



Vítor Jorge da Silva Santos

Licenciado em Geologia Aplicada e do Ambiente

Gestão de Risco Geotécnico na Construção de Túneis em Maciços Rochosos

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Geológica

Orientadora: Doutora Paula F. da Silva, Prof.^a auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e GeoBioTec

Coorientadora: Doutora Maria da Graça Azevedo de Brito, Prof.^a auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e GeoBioTec

Júri:

Presidente: Doutora Maria Luísa Dias de Carvalho de Sousa Leonardo, Prof.^a Catedrática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguentes: Doutora Laura Maria Mello Saraiva Caldeira, Prof. Catedrática Convidada do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa
Doutor José António de Almeida, Prof. Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro, Prof. Catedrático da Universidade da Beira Interior
Doutor Mário Quinta Ferreira, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Doutora Paula F. da Silva, Prof.^a auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e GeoBioTec
Doutora Maria da Graça Azevedo de Brito, Prof.^a auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e GeoBioTec



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2016

Gestão de Risco Geotécnico na Construção de Túneis em Maciços Rochosos

Copyright em nome de Vitor Jorge da Silva Santos, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

DEDICATÓRIA

A todos os trabalhadores de frente de túneis

AGRADECIMENTOS

A nível institucional quero deixar expresso os meus agradecimentos à EDP Produção por autorizarem a divulgação dos dados recolhidos nas suas obras dos Aproveitamentos hidroelétricos de Venda Nova II, Venda Nova III, Picote, Bemposta e Alqueva, sem os quais não seria possível realizar esta investigação.

Por razão igual à anterior, relativamente à obra do Túnel do Marão, agradeço à Infraestruturas de Portugal.

Agradeço ainda à Cêgê que disponibilizou a sua base de dados relativa às obras acima mencionadas.

Uma nota de apreço à FCT-UNL por me ter aceitado para desenvolver este estudo.

A nível pessoal quero deixar os meus agradecimentos às orientadoras Paula Silva e Graça Brito que sempre estiveram disponíveis para me ouvir e esclarecer dúvidas muito para além do horário de expediente e sempre tiveram uma palavra amiga nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço à Patrícia por numa fase prévia, me ter passado o bichinho de prosseguir estudos e iniciar uma investigação desta dimensão.

Agradeço à Ana pela grande ajuda na revisão ortográfica e gramatical dos textos e por ter sempre uma palavra de incentivo.

Agradeço a toda a minha família, pais, irmão, cunhadas, cunhado e sobrinhos por todo o apoio prestado e compreensão em algumas ocasiões em que me isolei para estudar.

Enalteço os meus pais, aos quais serei eternamente grato, por numa primeira fase, apesar das dificuldades, conseguiram dar-me uma formação ao nível do ensino superior, e que agora permitiu a realização desta dissertação, por sempre me apoiaram, incentivaram e ensinarem a nunca me acomodar e aproveitar todas as oportunidades que a vida nos concede.

Um agradecimento especial, que as palavras são incapazes de espelhar, à Sofia, minha esposa, companheira de todos os momentos. Para além do incentivo e apoio à realização da presente investigação, foi sempre a primeira leitora de tudo o que escrevi, contribuindo com sugestões e correções e soube ainda cuidar de mim, da Rita, do pequeno André e do Juca.

Deixo aqui expresso os meus mais sentidos agradecimentos a todas as pessoas que ao longo do meu percurso académico e profissional me influenciaram no sentido de me tornar geólogo com um sentido crítico apurado, que no limiar, levou à realização desta dissertação e que pelo seu número é impossível de destacar nominalmente.

RESUMO

As técnicas e métodos utilizados no contexto da construção de túneis têm tido amplo desenvolvimento nos últimos séculos. Entre eles salienta-se, nos últimos anos, a implementação e desenvolvimento de métodos de gestão de risco geotécnico que tem como objetivo principal a diminuição de custos e realização das obras em segurança para trabalhadores, equipamento e terceiros.

Esta investigação tem como objetivo principal o desenvolvimento da implementação da gestão de riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis escavados em maciços rochosos. Tendo em consideração os elementos disponíveis na bibliografia e em cinco casos de estudo selecionados, analisam-se os documentos disponíveis e procedimentos implementados, integrando-os num sistema de gestão de riscos. Para o efeito, a fase construtiva é dividida em quatro situações genéricas: fase inicial de construção, trecho a escavar, frente de escavação e trecho escavado.

Para cada situação genérica mostra-se o modo de deteção e identificação de riscos geotécnicos e selecionam-se as metodologias consideradas mais adequada para análise. Perante os riscos detetados apresentam-se as medidas para a respetiva eliminação ou mitigação, mas sempre que possível, também são indicadas medidas otimizadoras. Por último, identificam-se os riscos residuais.

Na fase inicial da construção, os principais riscos resultam da escassez de informação relativa às condições geológicas e geotécnicas provenientes das fases anteriores à construtiva, onde a opção para a análise de riscos recai numa lista de verificação.

No trecho a escavar, o principal risco geotécnico prende-se com a variação das características geotécnicas do maciço. Para metodologias de análise do risco, descreve-se uma árvore de eventos quantitativa, baseada na estimação da qualidade do maciço em avanço por diferentes metodologias matemáticas (regressão linear, krigagem, redes neuronais) e, também, pela análise empírica, expedita, de um especialista. São ainda definidos os dados probabilísticos sobre a variação dessa qualidade, representada pelo RMR, na frente de escavação seguinte, tendo em conta a qualidade observada na frente de escavação em curso.

Relativamente à frente de escavação, os principais riscos detetados resultam de uma insuficiente caracterização do maciço rochoso, da falta de iniciativa para proceder à análise dos resultados recolhidos e da implementação deficiente de procedimentos executivos. Para analisar os riscos nesta situação, recorre-se a três metodologias: uma lista de verificação, uma árvore de falhas e duas árvores de eventos.

Na situação de trecho de túnel escavado, os principais riscos geotécnicos detetados relacionam-se com a garantia de estabilidade da escavação e, para a respetiva análise, usa-se uma lista de verificação e uma árvore de eventos com o objetivo de verificar a ocorrência de deformações excessivas do maciço e a identificação de patologias na contenção que indiciem situações de instabilidade potencial.

Cada um dos riscos detetados é alvo de avaliação. Desta resulta que, na maioria das situações, os riscos são intoleráveis. Para controlo desses riscos são apresentadas medidas com o objetivo de os

eliminar, sempre que possível, ou em caso de impossibilidade, mitigá-los. Por último são ainda indicados os riscos residuais, ou sejam, aqueles que se mantêm em obra, por impossibilidade de eliminação e/ou mitigação eficaz.

A metodologia desenvolvida de gestão de riscos geotécnicos em túneis é ainda aplicada a um caso de obra em curso, um túnel rodoviário em escavação, permitindo identificar os respetivos riscos geotécnicos potenciais, realizar a sua análise e avaliação e definir as medidas de controlo a implementar. Indicam-se ainda os riscos residuais potenciais. Neste contexto, a aplicação da metodologia proposta apresentou-se como uma mais-valia na gestão de riscos geotécnicos associados à construção de túneis em maciços rochosos.

Esta investigação abre um novo caminho à gestão de riscos geotécnicos, com interação entre as condições impostas pelas características do maciço rochoso e as metodologias habitualmente utilizadas na construção de túneis, tornando possível a efetiva eliminação ou diminuição da ocorrência de acidentes, o que se traduz numa redução dos custos e respetivos prazos de execução de obra.

Palavras-chave: Gestão de risco; Geotecnia; Túnel; Maciço rochoso; Fase construtiva

ABSTRACT

Tunneling methods and techniques have been widely advanced over the last centuries. In recent years, risk management applied to engineering and underground works has been increasing, with main goal of executing works with safety for workers, equipment and third parts, allowing the reduction of costs. The main purpose of this research was to develop a geotechnical risk management methodology in the construction phase of tunnels excavated in rock mass. In the development of a new geotechnical risk management methodology, the construction phase is divided into four general stages, including the early stage of construction, stretch for excavation, excavation of tunnel face and excavated tunnel section.

Taking into account scientific literature of reference and five selected case studies, the documents available and implemented procedures were analyzed, and then integrated into a risk management system.

For each stage is shown the mode of detection and identification of geotechnical risks and select the methodologies considered more suitable for analysis. Given the risks detected are presented the action to the respective elimination or mitigation, but whenever possible, optimizers measures are also indicated. Finally, are identified the residual risks.

In the early stage of excavation, the main risk is the lack of knowledge of the real geological and geotechnical conditions from the previous phases of construction, so a checklist was the option chosen to perform risk analysis.

For the second phase (stretch for excavation), the main geotechnical risk is the variability of the rock mass. It was possible to present a quantitative event tree (ETA) based on the estimation of the quality of the rock mass in advance by different mathematical methods (linear regression, kriging, neural networks), and also by empirical analysis of a specialist. They are also defined probabilistic data on the variation in quality represented by the RMR, in stretch for excavation, taking into account the quality observed in the excavation face.

The main risks detected for the third stage (excavation face) result from the insufficient characterization of the rock mass, absence of analysis of data and deficient implementation of construction procedures. To analyze the risks in this situation, it resorts to three methods: a checklist, a tree failures and two trees events.

In the excavated tunnel section situation, the main geotechnical risks are related to the excavation stability assurance. For this purpose, a checklist analysis is used as well as an event tree to verify excessive deformations of the rock mass and to identify pathologies in the rock support that indicate potential instability situations.

Each of the risks detected is subject to evaluation. In most situations, the risks are intolerable. For risk control, are presented measures with the aim of eliminate, when possible, or if not possible, mitigate

them. Finally, the residual risks are identified, ie, those that remain, due to the impossibility of eliminate or effective mitigation.

The new methodology of geotechnical risk management for tunnels is applied to a case study in progress, the Marão Tunnel, and it allowed identifying, analyzing and evaluating the potencial geotechnical risks, as well the identification of control measures to be implemented. The eventual residual risks were also indicated. In this context, the application of the proposed methodology was presented as an asset in the management of geotechnical risks associated with the construction of tunnels in rock masses.

This research opens a new path in geotechnical risk management, with interaction between the conditions imposed by rock mass features and methodologies used in tunneling, making possible the effectively elimination or reduce the occurrence of accidents, resulting into financial saving and reduction of the execution time.

Keywords: Risk management; Geotechnics; Tunnel; Rock mass; Construction phase

SIGLAS E ABREVIATURAS

ΔR – Convergência
a.C. – Antes de Cristo
ACP – Análise em componentes principais
AFC – Análise fatorial de correspondências
AFTES – *Association Francaise des Tunnels et de l'Espace Souterrain*
AHA – Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II
AHB – Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II
AHP – Aproveitamento hidroelétrico de Picote II
AHVNII – Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II
AHVNIII – Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III
Ainf. – Área de influência das pregagens
ALARP – *As low as reasonable possible*
APRH – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos
apud – Citado por
ASCE – *American Society of Civil Engineers*
ATO – Acompanhamento técnico da obra
BTS – *British Tunnel Society*
C – Consequência semiquantitativa
CAH – Classificação ascendente hierárquica
CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
CIRIA – Construction industry research and information association
D&B – *Drill & Blasting* - Escavação com explosivos
DAT – *Decision Aids for Tunneling*
EC7 – Eurocódigo 7
EDP – Eletricidade de Portugal
et alia – E outros (*et al.*)
ETA – *Event Tree Analysis* - Análise por Árvore de Eventos
EUA – Estados Unidos da América
F – Índice de fraturação do maciço
FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis* - Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos
FMECA – *Failure Mode, Effect and Critically Analysis* - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Gravidade
FTA – *Fault Tree Analysis* - Análise por Árvore de Falhas
GeoQ – Modelo de gestão de risco de Brinkman (2008)
GSI – *Geology Strength Index* - Índice de resistência do maciço
HAZOP – Análise dos Perigos e da Operacionalidade (*Hazard and Operability Analysis*)
HSE – *Health Safety Environment*
IAEI – *International Association of Engineering Insurers*
Ib. – como referência anterior
ISRM – *International Society of Rock Mechanics* - Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
ITA – *International Tunnelling Association*
ITIG – *International Tunnelling Insurance Group*
LCI – Diagramas de localização, causas e indicadores das falhas
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MANCOVA – Análise multivariada de covariância
MANOVA – Análise multivariada de variância
MC – Matriz de correlação
MO – Método observacional
n.d. – Não disponível
NATM – *New Austrian Tunnelling Method*
NGI – *Norwegian Geotechnical Institute*

Opus citatum – Referência à citação anterior (*op. cit.*)
p – Probabilidade estimada
P – Probabilidade semiquantitativa
PAT – Planos para avanço do túnel
PK – Ponto ao quilómetro
 P_r – Pressão na contenção
PRA – Análise preliminar de riscos
Q – *Rock quality index* de Barton *et al.* (1974)
R – Risco semiquantitativo
R' – Raio do túnel
RCU – Resistência à compressão uniaxial
RGR – Relatório geotécnico de referência
RMR – *Rock Mass Rating* de Bieniawski (1989)
RQD – *Rock Quality Designation*
S – Variância
s.l. – Sentido lato
SEM – *Sequential Excavation Method* - Escavação sequencial
SCL – *Sprayed Concrete Lining*
SPG – Sociedade Portuguesa de Geotecnia
TBM – *Tunnel boring machine* - Tunneladora
TGV – *Transport Grande Vitesse* - Comboio de alta velocidade
TM – Túnel do Marão
V – Vulnerabilidade semiquantitativa
W – Estado de alteração do maciço
x – Média da amostra

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VII
SIGLAS E ABREVIATURAS.....	IX
ÍNDICE GERAL.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XXV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICAÇÃO DO TEMA.....	7
1.3 OBJETIVO E RUMO INERENTE.....	10
1.4 METODOLOGIA GERAL.....	12
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	14
2. ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	17
2.1 RISCOS GEOTÉCNICOS.....	17
2.1.1 Definições.....	17
2.1.2 Gestão de risco.....	20
2.1.3 Análise e avaliação de risco.....	25
2.1.3.1 Listas de verificação.....	27
2.1.3.2 Árvores de falhas.....	28
2.1.3.3 Árvores de Eventos.....	30
2.1.4 Controlo do risco.....	32
2.2 INCERTEZA E HETEROGENEIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS.....	33
2.3 DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS.....	35
2.3.1 Estatística descritiva.....	36
2.3.2 Regressão linear.....	37
2.3.3 Análise multivariada de dados.....	38
2.3.3.1 Matriz de correlação.....	39
2.3.3.2 Análise fatorial de correspondências.....	39

2.3.4	Geoestatística.....	41
2.3.4.1	Estimação Geoestatística.....	43
2.3.5	Redes neuronais.....	46
2.4	ABORDAGEM À CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS.....	47
2.4.1	Relatório geotécnico de referência.....	48
2.4.2	Método observacional.....	49
2.4.3	Escavação por métodos convencionais e tuneladora.....	54
2.4.4	Escavação sequencial.....	58
2.4.5	Monitorização geotécnica de túneis em maciços rochosos.....	61
2.4.6	Acompanhamento técnico de obra - ATO.....	65
3.	METODOLOGIAS E PRESSUPOSTOS SUBJACENTES.....	71
3.1	METODOLOGIAS DE DETEÇÃO E ANÁLISE DE RISCO.....	74
3.1.1	Fase inicial da construção.....	75
3.1.2	Trecho de túnel a escavar.....	77
3.1.2.1	Estatística descritiva das características do maciço rochoso.....	79
3.1.2.2	Análise multivariada dos parâmetros de RMR.....	81
3.1.2.3	Estimação do índice RMR.....	83
3.1.3	Frente de escavação.....	87
3.1.4	Trecho de túnel escavado.....	90
3.2	AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO.....	93
3.2.1	Risco intolerável.....	94
3.2.2	Risco ALARP.....	95
3.2.3	Risco tolerável.....	95
3.3	CONTROLO DO RISCO GEOTÉCNICO.....	95
3.4	RISCO RESIDUAL E SECUNDÁRIO.....	97
4.	CASOS DE ESTUDO.....	99
4.1	APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA II.....	102
4.1.1	Descrição geral.....	102
4.1.2	Enquadramento geológico.....	103
4.1.3	Enquadramento geotécnico.....	105
4.1.4	Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise.....	105
4.2	APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA III.....	107
4.2.1	Descrição geral.....	107
4.2.2	Enquadramento geológico.....	109
4.2.3	Enquadramento geotécnico.....	109

4.2.4	Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise.....	111
4.3	APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE PICOTE II	113
4.3.1	Descrição geral	113
4.3.2	Enquadramento geológico	115
4.3.3	Enquadramento geotécnico	116
4.3.4	Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise.....	118
4.4	APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE BEMPOSTA II	119
4.4.1	Descrição geral	119
4.4.2	Enquadramento geológico	121
4.4.3	Enquadramento geotécnico	122
4.4.4	Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise.....	123
4.5	APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE ALQUEVA II	124
4.5.1	Descrição geral	124
4.5.2	Enquadramento geológico	125
4.5.3	Enquadramento geotécnico	127
4.5.4	Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise.....	128
4.6	SÍNTESE E ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS CASOS DE ESTUDO DE OBRAS CONCLUÍDAS.....	129
4.7	TÚNEL DO MARÃO	132
4.7.1	Descrição geral	132
4.7.2	Enquadramento geológico	133
4.7.3	Enquadramento geotécnico	134
5.	DETEÇÃO DE RISCOS GEOTÉCNICOS POTENCIAIS NOS CASOS DE ESTUDO.....	137
5.1	FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO.....	137
5.2	TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR	143
5.2.1	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II	144
5.2.1.1	Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade.....	144
5.2.1.2	Estimação da qualidade	145
5.2.1.3	Erro na estimação da qualidade	148
5.2.2	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III.....	149
5.2.2.1	Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade.....	149
5.2.2.2	Estimação da qualidade	150
5.2.2.3	Erro na estimação da qualidade	152
5.2.3	Aproveitamento hidroelétrico de Picote II	154
5.2.3.1	Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade.....	154
5.2.3.2	Estimação da qualidade	155

5.2.3.3	Erro na estimação da qualidade	157
5.2.4	Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II	159
5.2.4.1	Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade.....	159
5.2.4.2	Estimação da qualidade	160
5.2.4.3	Erro na estimação da qualidade	162
5.2.5	Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II.....	163
5.2.5.1	Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade.....	163
5.2.5.2	Estimação da qualidade	164
5.2.5.3	Erro na estimação da qualidade	167
5.2.6	Síntese da deteção de riscos potenciais	168
5.3	FRENTE DE ESCAVAÇÃO	172
5.3.1	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II	172
5.3.2	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III.....	173
5.3.3	Aproveitamento hidroelétrico de Picote II	174
5.3.4	Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II	174
5.3.5	Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II.....	175
5.3.6	Síntese da deteção de riscos potenciais	176
5.4	TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO.....	177
5.4.1	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II	178
5.4.2	Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III.....	180
5.4.3	Aproveitamento hidroelétrico de Picote II	183
5.4.4	Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II	185
5.4.5	Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II.....	187
5.4.6	Síntese da deteção de riscos potenciais	189
6.	NOVA METODOLOGIA DE GESTÃO DE RISCOS.....	191
6.1	FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO.....	192
6.1.1	Deteção e análise de riscos	192
6.1.2	Avaliação de riscos.....	198
6.1.3	Medidas de controlo	201
6.1.4	Riscos residuais	206
6.2	TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR	208
6.2.1	Deteção e análise de riscos.....	209
6.2.1.1	Árvore de eventos.....	209
6.2.1.2	Probabilidade de ocorrência de RMR.....	213
6.2.2	Avaliação de riscos.....	214
6.2.2.1	Árvore de eventos.....	214

6.2.2.2	Probabilidade de ocorrência de RMR.....	214
6.2.3	Medidas de controlo	215
6.2.3.1	Árvore de eventos.....	215
6.2.3.2	Probabilidade de ocorrência de RMR.....	216
6.2.4	Riscos residuais	217
6.3	FRENTE DE ESCAVAÇÃO	217
6.3.1	Deteção e análise de riscos	218
6.3.1.1	Lista de verificação.....	218
6.3.1.2	Árvore de falhas	221
6.3.1.3	Árvores de eventos	222
6.3.2	Avaliação de riscos.....	226
6.3.2.1	Lista de verificação.....	226
6.3.2.2	Árvores de eventos	227
6.3.3	Medidas de controlo	237
6.3.3.1	Lista de verificação.....	238
6.3.3.2	Árvores de eventos	240
6.3.4	Riscos residuais	246
6.3.4.1	Lista de verificação.....	246
6.3.4.2	Árvores de eventos	247
6.4	TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO	248
6.4.1	Deteção e análise de riscos	249
6.4.1.1	Lista de verificação.....	249
6.4.1.2	Árvore de eventos.....	252
6.4.2	Avaliação de riscos.....	254
6.4.2.1	Lista de verificação.....	254
6.4.2.2	Árvore de eventos.....	255
6.4.3	Medidas de controlo	258
6.4.3.1	Lista de verificação.....	258
6.4.3.2	Árvore de eventos.....	260
6.4.4	Riscos residuais	262
6.4.4.1	Lista de verificação.....	262
6.4.4.2	Árvore de eventos.....	263
7.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	265
7.1	FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO.....	265
7.1.1	Identificação e análise dos riscos	265
7.1.2	Avaliação dos riscos e medidas de controlo.....	269

7.1.3	Riscos residuais	271
7.2	TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR	272
7.2.1	Identificação e análise dos riscos	272
7.2.2	Avaliação dos riscos e medidas de controlo.....	280
7.2.3	Riscos residuais	281
7.3	FRENTE DE ESCAVAÇÃO	282
7.3.1	Identificação e análise dos riscos	283
7.3.2	Avaliação dos riscos e medidas de controlo.....	285
7.3.3	Riscos residuais	287
7.4	TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO.....	287
7.4.1	Identificação e análise dos riscos	287
7.4.2	Avaliação dos riscos e medidas de controlo.....	290
7.4.3	Riscos residuais	292
7.5	SÍNTESE DA APLICAÇÃO DA GESTÃO DE RISCOS PROPOSTA	293
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	297
8.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	297
8.2	PERSPETIVAS FUTURAS.....	305
	BIBLIOGRAFIA.....	307

APÊNDICES

APÊNDICE I – Distribuição de valores de RMR por classes

APÊNDICE II – Correlação entre os índices RMR-Q

APÊNDICE III – Parâmetros descritores da qualidade do maciço

APÊNDICE IV – Estatística da amplitude dos semivariogramas

APÊNDICE V – Correlação entre índice RMR observado e estimado por diferentes metodologias -
tabelas

APÊNDICE VI – Correlação entre índice RMR observado e estimado por diferentes metodologias -
gráficos

APÊNDICE VII – Correlação entre índice RMR observado e erro absoluto das diferentes
metodologias de estimação - gráficos

APÊNDICE VIII – Índice RMR observado ao longo das escavações e erro absoluto das diferentes metodologias de estimação - gráficos

APÊNDICE IX – Gestão de riscos na fase inicial da construção

APÊNDICE X – Ocorrência dos valores de RMR na frente seguinte

APÊNDICE XI – Gestão de riscos na frente de escavação

APÊNDICE XII – Gestão de riscos no trecho escavado

APÊNDICE XIII – Estimação da qualidade do maciço no avanço seguinte - tabelas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama de evolução histórica de túneis.....	4
Figura 1.2 – Ilustração do critério de aceitação de risco com introdução da gestão de risco.....	10
Figura 1.3 – Diagrama com a metodologia geral adotada.....	13
Figura 2.1 – Diagrama da interligação dos conceitos envolvidos na gestão de risco.....	19
Figura 2.2 – Diagrama do plano de gestão do risco	21
Figura 2.3 – Diagrama das etapas de gestão de risco	22
Figura 2.4 – Ilustração da redução do risco ao longo do projeto s.l.....	22
Figura 2.5 – Diagrama da gestão de risco GeoQ que se repete em cada fase do projeto	24
Figura 2.6 – Símbolos de operadores e eventos utilizados nas árvores de falhas	28
Figura 2.7 – Exemplo de uma árvore de falha de análise de risco de um túnel	29
Figura 2.8 – Exemplo de uma árvore de eventos com análise quantitativa.....	30
Figura 2.9 – Esquema de observação do maciço rochoso a diferentes escalas	33
Figura 2.10 – Esquema de configuração de uma rede neuronal	47
Figura 2.11 – Diagrama da influência do MO no projeto e na construção.....	52
Figura 2.12 – Diagrama organizacional da aplicação do MO	53
Figura 2.13 – Ilustração do ciclo de trabalhos na escavação por D&B.....	56
Figura 2.14 – Esquemas com a parcialização da secção de escavação adotadas em diferentes países .	59
Figura 2.15 – Esquemas de parcializações da secção de escavação.....	59
Figura 2.16 – Ilustração de curva de resposta no maciço	61
Figura 2.17 – Gráficos de curvas de resposta do maciço com tempo e comprimento de escavação.....	61
Figura 2.18 – Ilustração de dispositivos de observação num túnel em meio urbano	62
Figura 2.19 – Esquema de configurações de ponto e cordas de uma secção de convergências	63
Figura 2.20 – Ilustrações da deformação e potenciais instabilidades de um túnel	64
Figura 2.21 – Esquemas associados ao comportamento do maciço rochoso. a) rotura por queda de bloco e cunhas; b) rotura generalizada por deformação elasto-plástica	65
Figura 2.22 – Gráfico de tempo de autossustentação do maciço.....	68

Figura 2.23 – Diagrama de aplicação do plano de avanço do túnel	69
Figura 3.1 – Diagrama da metodologia de gestão de riscos na fase construtiva	72
Figura 3.2 – Diagrama da metodologia geral da presente investigação	73
Figura 3.3 – Diagrama da metodologia para a fase inicial da construção	76
Figura 3.4 – Diagrama da metodologia para o trecho a escavar.....	77
Figura 3.5 – Diagrama da metodologia de avaliação da heterogeneidade do maciço e estimação da sua qualidade em avanço	78
Figura 3.6 – Gráfico de algumas correlações entre os índices RMR e Q.....	81
Figura 3.7 – Esquema de previsão da qualidade do terreno para o trecho a escavar.....	85
Figura 3.8 – Esquema gráfico do modo de determinação do RMR seguindo a metodologia empírica do especialista	87
Figura 3.9 – Diagrama da metodologia para a frente de escavação	87
Figura 3.10 – Diagrama da metodologia para o trecho já escavado.....	90
Figura 3.11 – Gráficos de deformação do maciço em função do índice Q e do vão do túnel	91
Figura 4.1 – Infografia dos casos de estudo sobre Carta Geológica de Portugal 1:1.000.000	99
Figura 4.2 – AHVNII e AHVNIII: infografia da localização dos empreendimentos.....	102
Figura 4.3 – AHVNII: infografia tridimensional do empreendimento.....	103
Figura 4.4 – AHVNII e AHVNIII: infografia do enquadramento geológico	104
Figura 4.5 – AHVNII: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados	106
Figura 4.6 – AHVNII: estatística descritiva dos valores do índice Q observados	107
Figura 4.7 – AHVNIII: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados	112
Figura 4.8 – AHVNIII: estatística descritiva dos valores do índice Q observados	112
Figura 4.9 – AHP: infografia da localização do empreendimento	114
Figura 4.10 – AHP: infografia tridimensional do empreendimento.....	114
Figura 4.11 – AHP e AHB: infografia do enquadramento geológico	115
Figura 4.12 – AHP: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados.....	118
Figura 4.13 – AHP: estatística descritiva dos valores do índice Q observados.....	119

Figura 4.14 – AHB: infografia da localização do empreendimento.....	120
Figura 4.15 – AHB: infografia tridimensional do empreendimento	120
Figura 4.16 – AHB: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados	123
Figura 4.17 – AHB: estatística descritiva dos valores do índice Q observados	124
Figura 4.18 – AHA: infografia da localização do empreendimento.....	125
Figura 4.19 – AHA: infografia do enquadramento geológico.....	126
Figura 4.20 – AHA: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados	128
Figura 4.21 – AHA: estatística descritiva dos valores do índice Q observados	129
Figura 4.22 – Estatística descritiva dos valores do índice RMR observados em todos os casos de estudo	131
Figura 4.23 – Estatística descritiva dos valores do índice Q observados em todos os casos de estudo	132
Figura 4.24 – TM: infografia da localização do túnel	132
Figura 4.25 – TM: infografia do enquadramento geológico	133
Figura 5.1 – AHVNII: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação	146
Figura 5.2 – AHVNII: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores do índice RMR..	147
Figura 5.3 – AHVNII: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR.....	148
Figura 5.4 – AHVNIII: gráfico do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação.....	151
Figura 5.5 – AHVNIII: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação.....	152
Figura 5.6 – AHVNIII: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR.....	153
Figura 5.7 – AHP: gráfico do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação.....	156
Figura 5.8 – AHP: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação.....	157

Figura 5.9 – AHP: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR	158
Figura 5.10 – AHB: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação.....	161
Figura 5.11 – AHB: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação.....	162
Figura 5.12 – AHB: gráfico do Erro absoluto na estimação do índice de RMR	163
Figura 5.13 – AHA: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação.....	165
Figura 5.14 – AHA: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação.....	166
Figura 5.15 – AHA: gráfico dos erros absolutos na estimação do índice de RMR.....	167
Figura 5.16 – Gráfico com os resultados dos valores de RMR considerando a totalidade dos casos de estudo e excluindo o AHB.....	170
Figura 5.17 – Gráficos com a correlação entre RMRobs e RMRkrig considerando a totalidade dos casos de estudo ou excluindo o AHB	171
Figura 5.18 – AHVNII: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação.....	179
Figura 5.19 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação.....	179
Figura 5.20 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante.....	180
Figura 5.21 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução	180
Figura 5.22 – AHVNIII: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação.....	181
Figura 5.23 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação	182
Figura 5.24 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante	182
Figura 5.25 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução	183

Figura 5.26 – AHP: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação.....	184
Figura 5.27 – AHP: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação	184
Figura 5.28 – AHP: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante	185
Figura 5.29 – AHP: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução	185
Figura 5.30 – AHB: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação.....	186
Figura 5.31 – AHB: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação.....	187
Figura 5.32 – AHA: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação.....	188
Figura 5.33 – AHA: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação	188
Figura 5.34 – AHA: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução	189
Figura 5.35 – Gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação nos casos de estudo.....	190
Figura 6.1 – Árvore de eventos com probabilidade de ocorrência de uma classe de qualidade do maciço e probabilidade de a estimar adequadamente, obtida por krigagem	211
Figura 6.2 – Gráfico de probabilidade de ocorrência do valor de RMR na frente seguinte com base no valor de RMR observado da frente atual.....	213
Figura 6.3 – Árvore de falhas com a sistematização de alguns eventos na origem da instabilidade da escavação.....	221
Figura 6.4 – Árvore de eventos para a determinação do risco de colapso ou deformação da periferia da escavação.....	223
Figura 6.5 – Árvore de eventos para a determinação de colapso parcial de blocos e cunhas	225
Figura 6.6 – Árvore de eventos para análise de risco geotécnico no trecho já escavado	253

Figura 7.1 – Gráfico com distribuição do RMR expectável, baseado nos cinco casos de estudo já construídos	273
Figura 7.2 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel poente Norte..	276
Figura 7.3 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel poente Sul	277
Figura 7.4 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel nascente Norte	278
Figura 7.5 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel nascente Sul ..	279

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Identificação do método e correspondente tipo de análise a implementar	26
Tabela 2.2 – Exemplo de lista de verificação	27
Tabela 2.3 – Escavabilidade do maciço	55
Tabela 2.4 – Tipos de tuneladoras	57
Tabela 3.1 – Relação entre descrição qualitativa e probabilidade e classificação.....	75
Tabela 3.2 – Classificação das consequências de eventos perigosos	75
Tabela 3.3 – Intervalos de valores dos parâmetros da classificação de RMR e definição das classes para aplicação de AFC	82
Tabela 3.4 – Avaliação do risco	94
Tabela 4.1 – AHVNII: características geométricas das estruturas subterrâneas	103
Tabela 4.2 – AHVNII: resumo das características das zonas geotécnicas e secções de escavação/contenção	105
Tabela 4.3 – AHVNIII: características geométricas das estruturas subterrâneas.....	108
Tabela 4.4 – AHVNIII: zonas geotécnicas e respetivas secções tipo de contenção para os túneis do circuito hidráulico	110
Tabela 4.5 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para os túneis de saída de energia e construção, acesso à central, acesso ao túnel em carga e acesso às câmaras das comportas e restituição	110
Tabela 4.6 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o túnel de ataque à tomada de água.....	111
Tabela 4.7 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para os túneis de saída de energia, interligação, construção e ventilação e acesso às chaminés de equilíbrio	111
Tabela 4.8 – AHP: características geométricas das estruturas subterrâneas	115
Tabela 4.9 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o circuito hidráulico	117
Tabela 4.10 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para as galerias de ataque.....	117

Tabela 4.11 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o túnel de acesso à central em secção corrente	118
Tabela 4.12 – AHB: características geométricas das estruturas subterrâneas	121
Tabela 4.13 – AHB: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de adução	122
Tabela 4.14 – AHB: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de ataque	122
Tabela 4.15 – AHA: características geométricas das estruturas subterrâneas.....	125
Tabela 4.16 – AHA: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para as galerias de adução	127
Tabela 4.17 – AHA: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de ataque	128
Tabela 4.18 – Resumo das características dos casos de estudo concluídos.....	130
Tabela 4.19 – TM: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção	135
Tabela 5.1 – AHVNII: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso.....	144
Tabela 5.2 – AVNIII: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso.....	149
Tabela 5.3 – AHP: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso.....	154
Tabela 5.4 – AHB: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso.....	159
Tabela 5.5 – AHA: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso.....	164
Tabela 5.6 – Principais características do maciço rochoso nos casos de estudo em análise	168
Tabela 6.1 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar na fase inicial da construção	193
Tabela 6.2 – Probabilidade de ocorrência de cada classe de qualidade do maciço ao longo de um túnel	210
Tabela 6.3 – Probabilidade de estimar corretamente a classe de qualidade do maciço em avanço	210
Tabela 6.4 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar na frente de escavação	218
Tabela 6.5 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar no trecho escavado	249

Tabela 7.1 – TM: lista de verificação para a fase inicial da construção.....	266
Tabela 7.2 – TM: exemplo da tabela resumo com os resultados de estimação da qualidade do terreno em antecipação	274
Tabela 7.3 – TM: resultados dos valores de RMR estimados que se enquadram no intervalo do desvio padrão calculado com base nos resultados dos casos de estudo concluídos.....	280
Tabela 7.4 – TM: lista de verificação desenvolvida para aplicar na frente de escavação	283
Tabela 7.5 – TM: lista de verificação desenvolvida para aplicar no trecho escavado.....	288

“Even a very comprehensive and appropriately conducted geological survey of the site of a proposed tunnel cannot accomplish more than a very crude estimate of the length of the tunnel sections in which each of the principal types of rock conditions will be encountered. Further differentiation cannot be expected. Hence, even if methods for accurately computing the rock load under given rock conditions were available, they would have very little practical value on account of the inevitable uncertainties associated with predicting the rock conditions.”
Terzaghi et al., 1996

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo integra uma síntese dos antecedentes da construção de túneis, com uma abordagem genérica à problemática dos acidentes que têm ocorrido a nível mundial e que levaram à definição dos objetivos a alcançar com este trabalho. Identificados os problemas e objetivos, apresenta-se a fundamentação sobre a necessidade da sua realização. São, ainda, deixadas indicações sobre as principais metodologias a que se recorre para solucionar os problemas identificados, de modo a alcançar os objetivos propostos. Por último, faz-se uma descrição da organização dos capítulos em que se divide esta dissertação.

1.1 ANTECEDENTES

A escavação de túneis em maciços rochosos assume cada vez maior relevância à escala mundial; Portugal não é exceção, assim como os países que se encontram em vias de desenvolvimento e partilham a mesma língua, como é o caso de Angola, Brasil e Moçambique. Num contexto de globalização, torna-se relevante continuar a investigar para o desenvolver de competências e de conhecimentos nesta área.

Nos últimos anos, têm sido realizadas em Portugal um conjunto de obras hidroelétricas em subterrâneo, como sejam os reforços de potência em Picote, Bemposta, Baixo Sabor, Alqueva, Venda Nova, Salamonde e Foz Tua, entre outras; bem como trechos de autoestradas, como acontece recentemente na A4, com o Túnel do Marão, encontrando-se ainda em vista outras obras semelhantes e relevantes para o desenvolvimento do país, como sejam os circuitos hidráulicos no Rio Tâmega ou, eventualmente, a longo prazo, os túneis ferroviários para o comboio de alta velocidade - TGV.

Neste contexto, a Engenharia Geológica surge como um apoio essencial a este tipo de obras subterrâneas, onde a segurança, a economia e a produtividade de execução levam à necessidade de implementar conhecimentos e apurar metodologias que potenciem a respetiva otimização.

Desde a construção do primeiro túnel, há mais de 4000 anos na Babilónia, sob o Rio Eufrates, para ligação subterrânea entre o palácio e o Templo de Jove, por ordem de Semiramus (Szechy, 1970), que os métodos e as técnicas de construção têm vindo a evoluir.

No século VII a.C. foi construído, em Jerusalém, o primeiro túnel integrado na rede de abastecimento de água. No século seguinte, os gregos construíram um aqueduto na ilha de Samos que contava com um túnel, de 1036 m de comprimento, escavado em calcários maciços. Este túnel é, ainda hoje, um exemplo de uma das grandes realizações de engenharia dos tempos antigos, na medida em que a escavação se processou a partir de dois emboquilhamentos, tendo-se encontrado com exatidão no interior do maciço (Apostol, 2004).

Os Romanos construíram vários túneis como estrutura de aquedutos, na rede rodoviária e, ainda alguns, como nas catacumbas, normalmente de extensão e secção pequena.

Na Idade Média, a execução de túneis restringiu-se a fins militares ou mineiros como sejam, a título de exemplo, os vários quilómetros de galerias mineiras na Hungria (López Jimeno, 1997).

Um avanço significativo na construção de túneis verificou-se apenas mais tarde na Europa, devido às crescentes necessidades de melhoria das ligações entre regiões. O primeiro de vários canais de navegação que incluiu a escavação em subterrâneo foi executado no século XVII, em França, para ligar o Oceano Atlântico ao Mar Mediterrâneo (Stack, 1982). O túnel de *Malpas*, no *Canal de Midi*, foi o primeiro onde se utilizou a pólvora para desmonte do terreno (López Jimeno, 1997); antes disso apenas se recorria a martelos, a guilhos e, ocasionalmente era utilizada água congelada nas descontinuidades do terreno para auxiliar o desmonte (*op. cit.*).

O início da engenharia de túneis terá acontecido com a construção do túnel *Tronquoy*, no canal de *Saint Quentin*, também em França, no início do século XIX. O túnel atravessou um maciço arenítico e, devido à sua largura de 8 m, elevada para a época, foi construído com auxílio de um arco em madeira, de baixo para cima, através de várias galerias individuais. A escavação do núcleo foi feita sob proteção daquele arco. Trata-se dos primórdios dos sustimentos e da escavação sequencial (Kovári, 2001b).

Segundo López Jimeno (*op. cit.*), em 1825, Brunel foi o primeiro a utilizar a técnica de escudo, o que lhe permitiu escavar um túnel sob o rio Tamisa, em Londres. A escavação desenvolveu-se num maciço de rocha branda, em presença de água. Esta mesma técnica foi posteriormente aproveitada por Peter Barlow e melhorada, sob a supervisão do engenheiro Henry James Greathead, no projeto do túnel sob a *Tower Hill Thames* (Kovári, *op. cit.*). A técnica de escudo foi melhorada nos anos seguintes com introdução de novas metodologias de contenção, como seja a utilização de um anel de ferro fundido e betão, em 1864. Contemporaneamente à utilização de escudos, também se iniciou em 1828 a utilização de ar comprimido na escavação de túneis (Couto, 2011).

Em França, foram ainda executados outros túneis ferroviários grandes, em particular nos Alpes. O primeiro foi o de *Mont Cenis*, com aproximadamente 12 km de extensão e que levou 14 anos a ser executado, tendo ficado concluído em 1871. Neste túnel utilizaram-se, pela primeira vez, os martelos pneumáticos, bem como a dinamite, entretanto inventada por Nobel. A utilização destas novas técnicas permitiu concluir o túnel mais rapidamente (Szechy, 1970). Nos Alpes, seguiu-se a execução do túnel de São Gotardo, entre 1872 e 1882, com aproximadamente 13 km de extensão e que durante muitos anos foi o túnel ferroviário mais longo do mundo, bem como o de *Simplon*, que era constituído por dois túneis gémeos, paralelos, ambos de 9,8 km, que ficaram concluídos respetivamente em 1906 e 1919. Estas construções contribuíram para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos executivos, análise estrutural, assim como dos sustimentos (Szechy, *op. cit.*).

Nos Estados Unidos da América (EUA), o primeiro túnel ferroviário importante foi o de *Hoosac*, em *Massachusetts*. Este túnel teve a particularidade de demorar 21 anos a ser concluído, em parte devido ao facto do maciço rochoso ser muito resistente para as ferramentas de furação disponíveis na altura. Foi concluído em 1876 (López Jimeno, 1997) mas, apesar do tempo que a construção demorou, contribuiu para os avanços na tecnologia de execução de túneis, tendo sido uma das primeiras vezes que se utilizou a dinamite nos EUA.

Durante a segunda metade do século XX e início do presente século, registou-se um incremento na construção de túneis e outras obras subterrâneas, quer ferroviárias, mais longas e mais profundas, quer centrais hidroelétricas ou túneis rodoviários, o que proporcionou o ambiente certo para que novas metodologias, filosofias e técnicas executivas associadas se desenvolvessem.

O crescimento da atividade mineira a partir do século XIX também teve o seu efeito na engenharia de túneis ao desencadear novos desenvolvimentos, principalmente no recurso a sustimentos mais económicos. Os suportes convencionais, em alvenaria, que nos anos 50 do século XX dominavam nos túneis de todo o mundo, foram progressivamente substituídos pelo aço, betão projetado, pregagens e, finalmente, por uma combinação deles (Szechy, 1970). Com a utilização destes novos sustimentos, destaca-se o *New Austrian Tunnelling Method* (NATM), apresentado por Rabcewicz (1964), que pela sua franca adesão e proliferação na execução de túneis em todo o mundo é ainda hoje utilizado, embora com algumas modificações. No entanto, uma vez que tem como conceito principal a utilização das características autoportantes do maciço como parte integrante da contenção, surgem dúvidas se é realmente um método ou antes uma filosofia de escavação (Kovári, 1993; 1994).

Em meados do século passado destaca-se ainda a utilização da primeira tuneladora (TBM) para escavação de um túnel, apesar do projeto e construção da primeira tuneladora datar de meados do século XIX, por Herry Mouse, mas esta não chegou a ser utilizada. Nos 100 anos seguintes vários foram os projetos para a construção de tuneladoras, mas apenas em 1952-53 é que a *S. Robbins and Associates* projetou e construiu a *Mittry Mole*, uma máquina com diâmetro de 7,8 m e 149 kW de potência que abriu o caminho para as modernas TBM's para rocha (Hapgood, n.d.).

Segundo Couto (2011), a construção de túneis pode ser dividida em quatro fases de evolução, conforme consta na Figura 1.1. A primeira é respeitante aos túneis antigos, desde os primórdios da construção em subterrâneo até à utilização de escudo como técnica para a escavação; a segunda, referente aos túneis do século XIX, onde várias técnicas foram desenvolvidas e permitiram a construção de túneis, mesmo em condições geotécnicas adversas; a terceira corresponde à construção de túneis com uma abordagem de maior conhecimento geológico e geotécnico do terreno onde se inserem, contemplando a mecânica dos solos e das rochas, o que tornou possível prever o comportamento do terreno quando escavado; e a última fase, que teve os seus primórdios ainda no século passado, com a utilização de metodologias de auxílio à decisão, mas efetivamente foi implementada já no presente século, com o incremento das preocupações referentes à presença de riscos na construção e da respetiva gestão.

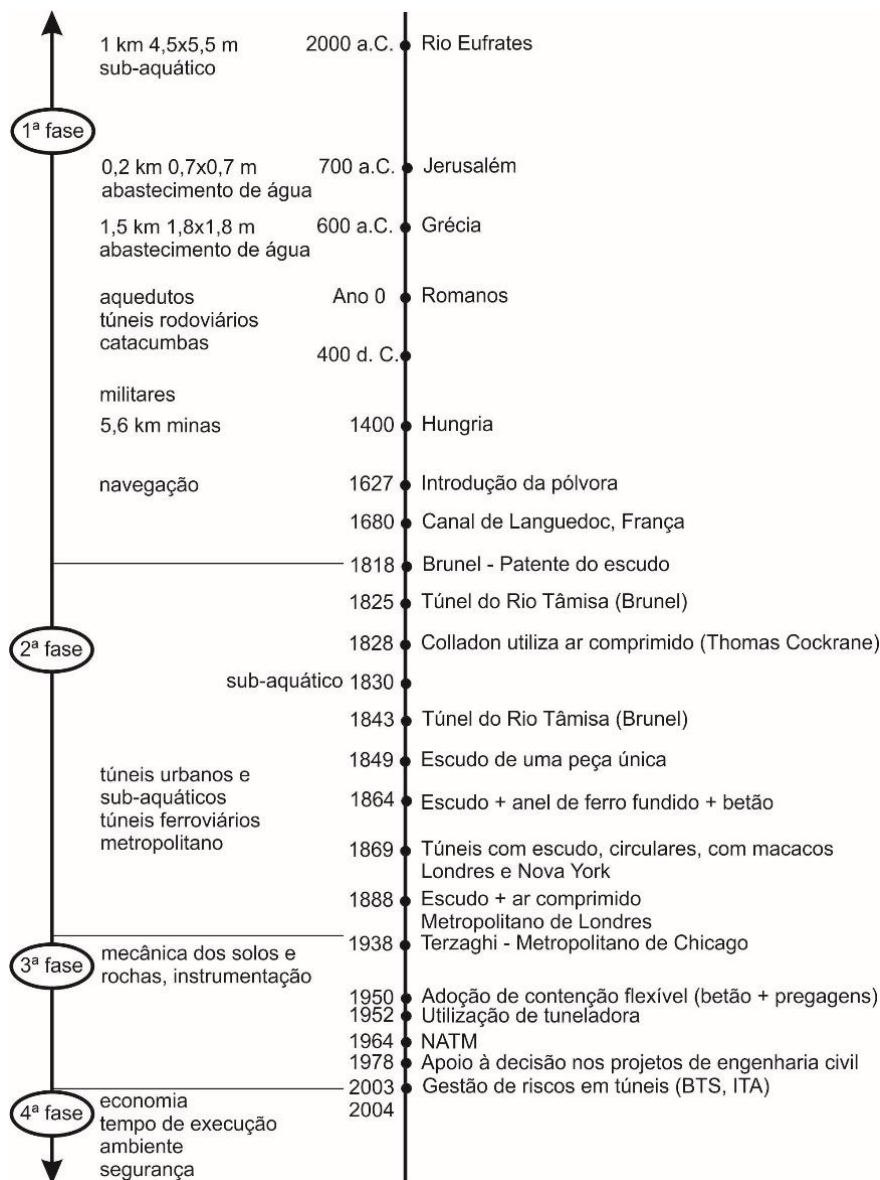


Figura 1.1 – Diagrama de evolução histórica de túneis (adaptado de Couto 2011)

A construção de túneis, tratando-se de obras em subterrâneo, lineares, às vezes com recobrimentos elevados ou situadas na proximidade de estruturas implantadas à superfície, em que o acesso ao interior do maciço para estudar as respetivas características geológicas e geotécnicas é limitado, encontra-se sempre associada uma incerteza na variabilidade das propriedades do maciço a atravessar (Hoek & Palmeiri, 1998), em particular relativamente às condições geológicas (Dematteis, 2012).

Dada a natural variação nas características dos terrenos e as incertezas que muitas vezes existem no início da construção, Peck (1969) apresentou as definições e conceitos de um novo método de abordagem ao projeto de execução de obras, que designou de método observacional - MO. Este método, que é detalhado nesta dissertação na Secção 2.4.2, veio a revelar-se particularmente eficaz na abordagem a projetos e construção de túneis. Definem-se, inicialmente, as linhas orientadoras do projeto e, ao longo da fase de execução, consideram-se os novos dados entretanto disponíveis, para o seu complemento e desenvolvimento, com adaptação do projeto às condições reais do terreno (Kovári & Lunardi, 2000). Conforme refere Hoek (1999), muitas vezes é preferível a adoção de um intervalo de valores para as características dos terrenos em detrimento de um único, fato sublinhado pelo Eurocódigo 7 - EC7 (NP EN 1997-1, 2010).

Qualquer incerteza na caracterização de base do maciço influencia e limita o desenvolvimento técnico na abordagem à globalidade do projeto, desde a sua conceção, à sua construção e exploração, o que em última análise se repercute obrigatoriamente em incerteza económica. Neste contexto, surge a necessidade de implementar a gestão de riscos nos projetos de Engenharia Civil.

Todos os projetos s.l. (projetos sentido lato pelo significado abrangente desde as fases dos estudos de viabilidade até à exploração) de túneis acarretam perigos e, muitas vezes, as consequências associadas (riscos) são abordadas, no entanto sem a devida profundidade ou abrangência para que pudesse considerar-se uma gestão de riscos, de acordo com a definição apresentada por Eskesen *et al.* (2004).

Nos anos 80 do século XX, a análise de riscos começou a ganhar dimensão com a sua implementação em túneis; contudo, a sua aplicação limitava-se, maioritariamente, aos riscos económicos e financeiros e à partilha dos mesmos entre os diferentes intervenientes no projeto e na construção da estrutura (Dudeck, 1987). Na sequência de vários acidentes importantes em escavações em subterrâneo, as companhias de seguros desenvolveram um conjunto de documentos de base para a gestão de riscos em túneis (Kochen, 2009; Cândido, 2010), nomeadamente *The Association of British Insurers* que preparou, conjuntamente com *The British Tunnelling Society – BTS*, o “*The joint code of practice for risk management of tunnel works in the UK*” (BTS, 2003) para o mercado britânico. No entanto, este foi rapidamente adaptado para uma versão internacional pela *The International Tunnelling Insurance Group* (ITIG, 2012), com algumas modificações propostas pela *International Tunnelling Association – ITA*, e pela *International Association of Engineering Insurers - IAEI* (Eskesen *et al.*, 2004).

Em Portugal, a construção de túneis teve o seu início com a exploração das primeiras minas de carvão. Os túneis para fins civis iniciaram-se aquando da execução da linha ferroviária entre Lisboa e o

Carregado, com o túnel de Chão de Maçãs, ainda no século XIX (Ferreira, 2010). Seguiu-se, ainda no mesmo século, outro túnel ferroviário, o do Rossio em Lisboa, considerada então como a maior obra de engenharia realizada em Portugal (Oliveira, 2014). No capítulo da construção de túneis ferroviários, Gomes & Pinto da Cunha (2014) destacam as incidências geológicas determinantes para a construção e manutenção dos túneis de Albergaria, Alcântara e Rossio.

No século XX a construção de túneis foi crescente, com a execução de túneis ferroviários, de metropolitano, rodoviários e hidráulicos. Uma referência para a Região Autónoma da Madeira que conta com uma das maiores taxas de extensão de túneis na sua rede rodoviária a nível mundial (Ferreira, 2010).

As metodologias de construção de túneis em Portugal seguem rumos idênticos aos dos restantes países. Em Portugal, a gestão de riscos para obras subterrâneas, aplicada a todas as fases do projeto s.l., tem pouca expressão. Ganhou algum mediatismo também na sequência de alguns acidentes (Cândido, 2010), como no caso dos ocorridos na Estação do Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa, em 2000, que acarretou uma análise de risco qualitativa, ou no caso do Metropolitano do Porto, no ano seguinte, onde foi implementado um Plano de Gestão de Riscos que se mostrou eficaz na identificação e redução do risco inicial (Chiriotti *et al.*, 2004).

Os acidentes do Metropolitano do Porto tiveram dimensão internacional (Babendererde *et al.*, 2004a, 2005), impondo algumas considerações sobre o risco da escavação de túneis em maciços heterogêneos com recurso a tuneladoras (Babendererde *et al.*, 2004b).

Nos últimos anos a temática dos riscos geotécnicos em túneis em Portugal tem sido abordada no âmbito da investigação científica. A dissertação de mestrado de Barbosa (2008) sobre as metodologias de construção de túneis em maciços rochosos, apresenta uma compilação atualizada relativa à gestão de risco na conceção e construção de túneis. Noutra dissertação de mestrado de Cândido (2010) apresenta uma análise qualitativa para a gestão de risco. No mesmo ano, tendo por base os acidentes do Metropolitano do Porto, Sousa (2010) na sua dissertação de doutoramento, analisa os riscos em projetos de túneis, abordando a problemática da previsão das condições geológicas na frente de escavação de túneis com tuneladora.

Dada a relevância dos riscos associados às obras geotécnicas, a Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG) tem promovido várias ações sobre o tema nos últimos anos. Destaca-se, em 2004, um curso intitulado de “*Geotechnical risk in rock tunnels*” (Matos *et al.*, 2006). Em 2009, teve lugar um seminário intitulado “Aspectos Geotécnicos do Projecto, Construção, Exploração e Análise de Risco em Obras Subterrâneas” organizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pela Universidade do Minho. Em 2012, a SPG em colaboração com a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, promoveram o VI Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia subordinado ao tema “Risco e Segurança”.

Como em qualquer área, a construção de túneis continua em desenvolvimento, com a implementação de novas abordagens, ou desenvolvimento de metodologias, de modo a tornar mais segura, económica e eficiente a sua execução. Com estes pressupostos indicam-se, seguidamente, as problemáticas associadas a este tema, que justificam a sua abordagem nesta investigação.

1.2 JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

O tema sobre o qual versa a presente dissertação assume importância na construção de túneis, justificada pela ocorrência de acidentes graves neste tipo de estruturas (Seidenfub, 2006) e pela pressão de construir de forma célere e com os menores custos associados, sem menosprezar a segurança (Vanicek, 2011).

A construção de túneis desenvolve-se no subsolo, num espaço confinado, onde existem sempre pessoas e equipamentos, muitas vezes em laboração contínua, pelo que a ocorrência de um perigo, implica uma probabilidade significativa de afetação de pessoas, equipamentos e às vezes de terceiros que estejam à superfície, significa isto que os perigos facilmente se transformam em riscos.

A gestão de risco deve-se iniciar desde as fases precoces do projeto s.l. (BTS, 2003) e acompanhar todas as fases, com diminuição dos riscos envolvidos ao longo do processo (Eskesen *et al.*, 2004; Schubert, 2004; Brinkman, 2008; Ceric *et al.*, 2011; ITIG, 2012; Palmer *et al.*, n.d.). No entanto, isso nem sempre acontece e a gestão de risco não é considerada de forma específica com a devida relevância, não chegando à fase construtiva qualquer menção ao assunto, o que é sinónimo de um risco acrescido a gerir nesta fase.

Habitualmente, os projetos de túneis apontam cenários de perigos geotécnicos que podem ocorrer e apresentam medidas a adotar para os eliminar ou mitigar; contudo, não se trata de um processo de gestão de riscos orientado especificamente para deteção e identificação dos perigos, nem existe definição da magnitude desses perigos, ou seja, não se pode considerar que os riscos associados estejam integrados num processo de gestão de riscos. Em consequência, muitas vezes não existe a avaliação dos riscos e restante gestão, com desenvolvimento de procedimentos de eliminação ou mitigação e controlo dos riscos, conforme indicado por Eskesen *et al.*, (2004).

Entre os principais riscos associados às construções de túneis encontra-se o geotécnico (Matos, *et al.*, 2006; Kochen, 2009), o qual é indicado como uma das principais causas dos acidentes mais graves ocorridos (Seidenfub, 2006).

Os riscos geotécnicos presentes na fase construtiva dos túneis têm fundamento em diferentes fatores que podem ser divididos em riscos associados ao conhecimento das condições geológicas e geotécnicas do maciço rochoso e em riscos derivados dos procedimentos técnicos adotados, inserindo-se, neste último grupo, o facto de alguns projetos não contarem com qualquer gestão de risco implementada.

Os riscos geotécnicos mais difíceis de analisar são os relacionados com o conhecimento das condições geológicas e geotécnicas. Por mais estudos e prospeção realizados com base numa análise custo/benefício, o conhecimento das características reais e modelação do comportamento do maciço rochoso no início da construção é sempre limitado. A falta de investimento em estudos e prospeção (Gomes, 1991) e/ou a complexidade do enquadramento geológico e a heterogeneidade dos maciços rochosos implicam, muitas vezes, a ocorrência de situações imprevistas ou mesmo imprevisíveis durante a fase construtiva.

Os riscos que derivam da limitação de conhecimento do maciço não podem ser identificados na totalidade; no entanto, os modelos geológicos-geotécnicos desenvolvidos na fase de projeto devem ser aprofundados e definidos com um incremento do respetivo rigor durante a fase construtiva, tendo em conta as novas informações que vão ficando disponíveis à medida que a escavação avança. Neste domínio, a contemplação do MO afigura-se como importante para que estes pressupostos funcionem adequadamente.

Na fase construtiva, realizar a gestão de riscos de forma contínua e em simultâneo com o avanço da construção, permite uma maior eficácia no controlo dos riscos, possibilitando a sua eliminação ou mitigação. Os riscos geotécnicos em túneis têm como base essencial as características do maciço rochoso; contudo, na fase construtiva há outro facto relevante que influencia os riscos presentes, o qual decorre da parte técnica e dos procedimentos executivos adotados.

Na execução de túneis, a produtividade máxima normalmente apenas é alcançada quando é colocada a contenção mínima necessária para garantir a segurança das pessoas e da escavação, a qual é ditada pelas características do terreno atravessado.

Com a otimização da contenção, o tempo despendido na sua aplicação é o estritamente necessário, o que resulta em economia financeira e do prazo de execução. Significa isto que, independentemente da qualidade do terreno ser fraca ou elevada e necessitar de muita ou pouca contenção, aplicar a que é adequada e estritamente necessária para garantir a estabilidade é a que resulta na otimização de recursos.

Caso se coloque contenção insuficiente, isso pode resultar em colapso, total ou parcial, e consequentes perdas de tempo e financeira na recuperação da secção; neste cenário podem eventualmente ocorrer outros problemas associados, como sejam a perda de vidas e/ou equipamentos. Por outro lado, aplicar mais contenção que a necessária, conduz a uma perda de tempo e ao decorrente custo financeiro associado aos materiais e à operação.

A monitorização e observação durante toda a construção do túnel é um dos elementos essenciais de gestão e controlo de riscos (Sousa, 2010). Como referido anteriormente, esses mesmos elementos, de monitorização e observação, são uma das bases do MO, o que indica um denominador comum, com potencial para desenvolver e interligar dois temas partindo dos mesmos elementos.

O sucesso da construção de um túnel resulta da otimização da produtividade e economia dentro da segurança, o que pode ser alcançado com um controlo de risco rigoroso, inserido numa gestão de risco geotécnico dinâmica e efetiva, implementada na fase construtiva, e numa metodologia executiva definida em projeto que contemple a adequação das soluções preconizadas, como é o caso do MO.

Segundo Eskesen *et al.* (2004), o MO constitui uma das ferramentas a utilizar na gestão de riscos. O recurso ao MO permite: adequar os meios às reais condições geológicas e geotécnicas observadas durante a fase construtiva e maximizar a produtividade e economia da construção.

O desenvolvimento da construção e a recolha de novos dados, em particular os obtidos na monitorização do comportamento geotécnico do maciço, possibilitam a revisão do projeto; no entanto, o enquadramento dos dados recolhidos e das soluções aplicadas na fase construtiva, no âmbito de uma gestão de risco, podem aumentar a segurança, dinâmica e confiança necessárias a uma maior implementação das revisões.

A gestão de riscos deve evoluir ao longo do processo de realização de um projeto. De forma análoga à sequência de estudos que culminam na execução e ulterior exploração de um túnel, a gestão de riscos também deve ser tratada da mesma forma, preferencialmente acompanhando cada uma das etapas, até que seja garantida a sua implementação prática.

A avaliação dos riscos durante a fase construtiva tem de ir mais além da abordagem genérica contemplada nas fases anteriores do processo, de forma a dar resposta à especificidade e pormenor dos riscos presentes na realidade, para que estes sejam mitigados e/ou eliminados de forma eficaz e objetiva, obtendo-se a utópica segurança total, quer de proteção das vidas humanas, quer dos equipamentos, associados à maximização de prazos de execução e conseqüente economia da construção.

Os riscos podem ser avaliados como toleráveis ou inaceitáveis; os riscos toleráveis não necessitam da implementação de qualquer procedimento; os riscos inaceitáveis têm de ser eliminados ou mitigados, independentemente dos custos, até se considerarem toleráveis. Existe ainda uma zona, entre os limites do tolerável e do inaceitável - *as low as reasonably practicable* (ALARP), onde o risco deve ser reduzido enquanto o custo for razoável quando comparado com o nível de redução do risco alcançado (Leca & Eskessen, 2006).

A adoção de uma gestão de risco geotécnico continuada ao longo da construção de túneis em maciços rochosos permite aumentar o conhecimento disponível sobre o maciço e proceder a uma avaliação dos riscos com maior precisão para controlá-los eficientemente, na perspetiva de auxiliar a obtenção da máxima produtividade e economia dentro da segurança, conforme se ilustra na Figura 1.2.

Perante a problemática apresentada que justifica a abordagem deste tema para investigação, na secção seguinte apresentam-se os objetivos.

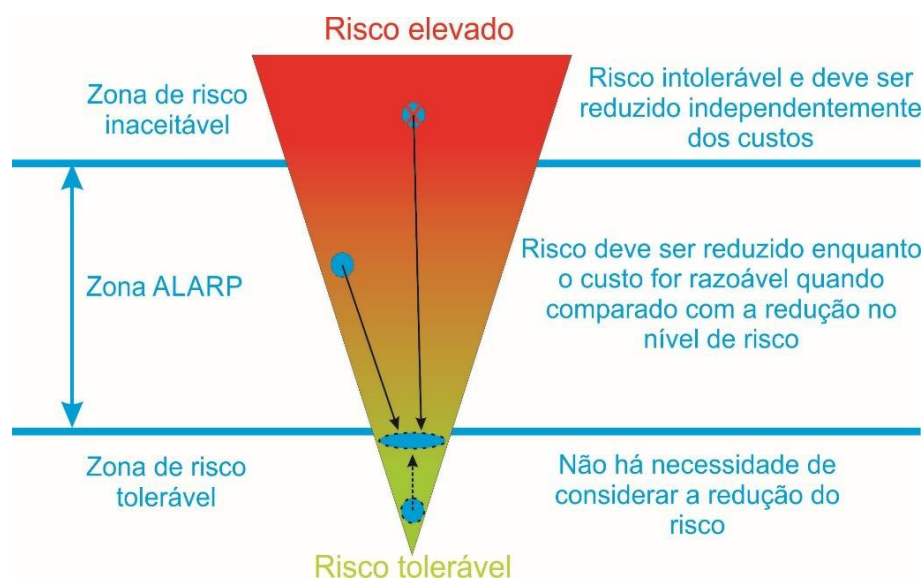


Figura 1.2 – Ilustração do critério de aceitação de risco com introdução da gestão de risco (adaptado de Leca & Eskesen, 2006)

1.3 OBJETIVO E RUMO INERENTE

Os objetivos que se propõem para esta dissertação são separados em gerais, onde se abordam as questões mais abrangentes dos riscos geotécnicos, e específicos, onde se pretende responder a riscos geotécnicos singulares ocorrentes na fase construtiva de túneis, como seguidamente se descrevem.

A determinação do risco geotécnico na fase de construção permite dar resposta aos projetos s.l. que não contemplem esta abordagem nas fases anteriores à construção, ou integrá-la e complementá-la, caso tenha sido realizada.

De uma forma mais abrangente é intenção desta dissertação incrementar a confiança e a celeridade de aplicação da gestão de riscos na construção de túneis, o que permitirá a sua efetiva implementação resultando, desta forma, numa economia de tempo e custo financeiro para todas as entidades envolvidas.

Os objetivos gerais desta investigação são os seguintes:

- i. Eliminar ou diminuir a ocorrência de acidentes por razões geotécnicas na construção de túneis em maciços rochosos;
- ii. Aplicar efetivamente a gestão de riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis, integrada com o projeto e produção para potenciar a economia de tempo e recursos;
- iii. Responder à inexistência ou incipiência do processo da gestão de riscos no âmbito da geotecnia que existe na fase construtiva de túneis em maciços rochosos.

Os objetivos específicos que se pretendem alcançar com a presente investigação são os seguintes:

- i. Desenvolver uma gestão de riscos especificamente direcionada para a fase construtiva de túneis em maciços rochosos;
- ii. Apresentar metodologias de análise de riscos adequadas para cada etapa da fase construtiva de túneis;
- iii. Apresentar medidas eliminatórias ou mitigadoras do risco geotécnico, integradas com o projeto e produção, para cada uma dessas fases executivas.

Com a presente investigação descreve-se uma metodologia de gestão de risco geotécnico na fase construtiva de túneis escavados em maciços rochosos, que permita identificar, analisar, avaliar e definir procedimentos a implementar, ou seja, que possibilite realizar uma gestão de risco geotécnico, tendo em conta a eventual heterogeneidade do maciço rochoso, assim como definir procedimentos executivos a adotar, com vista a proporcionar maior segurança, produtividade e economia neste tipo de construções.

Para o efeito desenvolvem-se os princípios orientadores que permitem a determinação do risco geotécnico presente em qualquer etapa da construção, bem como os procedimentos para o seu controlo, através da interligação com as equipas de projeto e produção, garantindo a segurança, a produtividade e a economia da obra.

Dividindo a fase construtiva de túneis em quatro situações genéricas, definidas adiante na Secção 1.4, pretende-se que a metodologia desenvolvida para implementar a gestão de risco geotécnico seja adequada, especificamente a cada uma dessas situações (etapas).

Para a etapa inicial da fase construtiva é necessário aplicar uma metodologia que permita analisar a quantidade e qualidade dos elementos que chegam das fases de estudo anteriores (estudo prévio, anteprojecto e outros).

Perante um maciço com características geológicas e geotécnicas variáveis, é necessário obter uma síntese dos riscos geotécnicos mais comuns que chegam à fase de construção. Um dos objetivos parciais desta investigação é a compilação de listas de verificação dos riscos geotécnicos mais comuns associados a projetos de túneis em maciços rochosos, a qual será validada e complementada com base na informação obtida em alguns casos de estudo seleccionados, a apresentar no Capítulo 4.

As listas de verificação de riscos surgem preferencialmente de fontes bibliográficas e da experiência do autor na assistência técnica a este tipo de obras; contudo a sua identificação, na prática, no decurso da construção, necessita ter em consideração não só as condições geotécnicas, mas também os procedimentos executivos. Seleccionam-se aquelas relativas à análise de riscos que permitem, no decurso da fase construtiva, uma identificação célere e eficaz dos principais riscos nomeados nas listas de verificação compiladas, quer estes correspondam a riscos residuais, quer resultem de novas situações, não contempladas nas fases anteriores do processo de gestão de riscos.

É objetivo que, para uma maior integração e sem incremento substancial de trabalho a desenvolver, a nova metodologia de gestão de riscos, incluída no Capítulo 6, contemple o recurso aos levantamentos geológicos e geotécnicos habitualmente realizados no acompanhamento deste tipo de construções. Através da canalização desses elementos para uma gestão de riscos estruturada, desenvolve-se uma identificação imediata de riscos geotécnicos mais prováveis. Segue-se a apresentação de procedimentos que, interligados com o projeto e produção, permitem a gestão de risco de forma economicamente eficiente garantindo, simultaneamente, a segurança da estrutura. Neste ponto, afigura-se como uma mais-valia as construções de túneis onde o MO esteja implementado, uma vez que a integração deste método na gestão de riscos geotécnicos facilita a interligação entre os vários intervenientes na obra e permite alcançar o objetivo de maior economia, garantindo a segurança.

Para além de recorrer aos levantamentos geológicos e geotécnicos como base de uma gestão de riscos, considera-se ainda a instrumentação e monitorização da estrutura, nomeadamente os procedimentos implementados na fase construtiva, assim como a respetiva análise de estabilidade resultante da observação.

Com base na informação disponível de projeto, complementada pela obtida durante a construção, validam-se árvores de eventos que permitem quantificar os riscos geotécnicos presentes na fase de construção de túneis escavados em maciços rochosos.

No sentido de antever as características do terreno do trecho a escavar, recorre-se novamente aos levantamentos geológico e geotécnicos contínuos das superfícies já escavadas e habitualmente realizados para aferir o modelo geológico-geotécnico herdado das fases de estudo anteriores, e complementá-lo, progressivamente, incrementando o respetivo rigor permitindo, em antecipação, determinar as características mais prováveis de encontrar nas frentes de escavação seguintes e prever o comportamento do terreno face à escavação do túnel.

Para realizar a avaliação dos riscos é fundamental ter presente que, na construção de túneis, qualquer perigo facilmente constitui um risco intolerável porque conforme já referido, existem sempre pessoas e equipamentos no seu interior e, às vezes, terceiros à superfície ou na envolvente. Os riscos considerados como intoleráveis necessitam do devido tratamento no sentido da sua eliminação, se possível, ou no mínimo da sua mitigação, pelo que se apresentam procedimentos nesse sentido e identificam-se potenciais riscos residuais, caso ainda se verifiquem.

Na secção seguinte apresenta-se a metodologia geral proposta para cumprir com os objetivos definidos.

1.4 METODOLOGIA GERAL

Para desenvolver uma gestão eficaz e objetiva dos riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis, define-se uma nova metodologia, com base em cinco casos de estudo de túneis hidráulicos escavados em maciços rochosos, focalizando especificamente as diferentes etapas que compõem a fase

construtiva. Em seguida, aplica-se essa metodologia a um outro caso de obra, um túnel rodoviário em execução também num maciço rochoso - Figura 1.3.

Deste modo, a fase construtiva foi dividida em (Figura 1.3):

- i. Início da construção;
- ii. Trecho de túnel a escavar;
- iii. Frente de escavação;
- iv. Trecho de túnel escavado.

A cada uma destas situações tipo foram aplicadas diferentes metodologias para identificação, análise e mitigação ou eliminação dos riscos geotécnicos.

Para identificação dos riscos geotécnicos é proposto o recurso a procedimentos de identificação e caracterização do maciço rochoso, habitualmente já implementados no acompanhamento técnico da escavação de túneis.

Para análise dos riscos envolvidos foram selecionadas metodologias qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas; tendo em consideração a dinâmica habitualmente presente nesta fase de obra, as metodologias a utilizar foram adaptadas ou desenvolvidas de forma simplificada, de modo a permitir uma utilização e implementação fácil nas frentes de obra. Para o efeito recorreu-se a listas de verificação, árvores de eventos (quantitativas e semiquantitativas) e árvores de falhas (qualitativas, apenas para organização das relações entre eventos que estiveram na origem da falha do sistema).

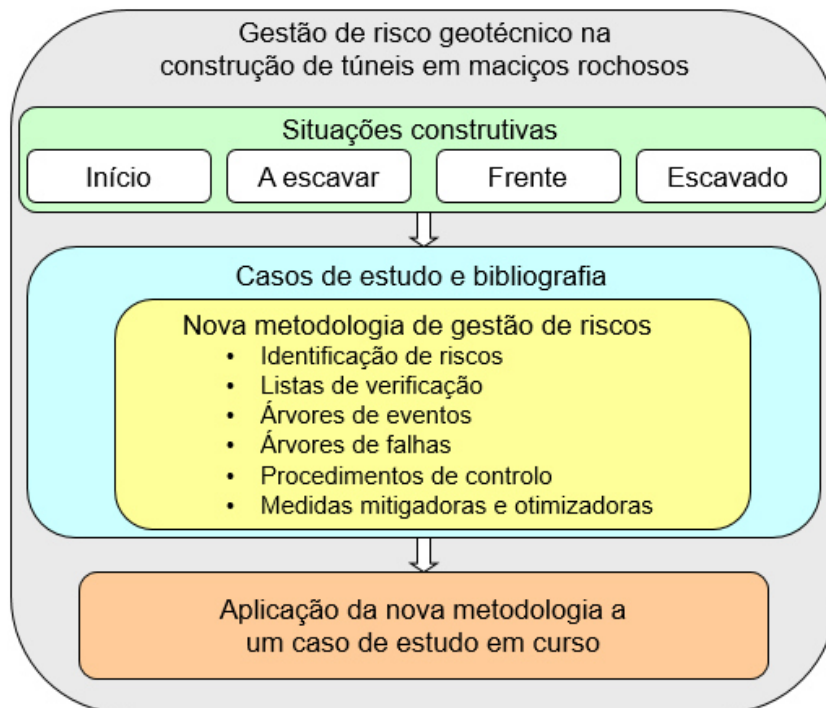


Figura 1.3 – Diagrama com a metodologia geral adotada

Para determinar a qualidade dos maciços rochosos em antecipação à frente de escavação foi necessário recorrer à sua modelação, utilizando-se metodologias matemáticas, tais como a estatística descritiva, análise fatorial de correspondências, regressão linear, krigagem, redes neuronais e, ainda, uma metodologia empírica, expedita, relativa à intervenção do especialista, com interpretação gráfica da variação da qualidade do maciço rochoso ao longo do comprimento dos túneis.

Tendo por base os cinco casos de estudo descritos no Capítulo 4, assim como o conhecimento disponível na bibliografia, apresenta-se uma nova metodologia de gestão de riscos na fase construtiva de túneis em maciços rochosos; em particular, definem-se os itens a constar nas listas de verificação a aplicar, assim como os ramos das árvores de eventos e de falhas a aplicar e apresenta-se a verosimilhança associada a cada ramo. Contemplam-se ainda procedimentos a implementar na fase construtiva para gestão dos riscos geotécnicos.

A nova metodologia desenvolvida nesta investigação é finalmente testada num caso de estudo da construção de um túnel em curso, para validar a sua aplicação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação de doutoramento apresentada encontra-se organizada em oito capítulos, dos quais os dois primeiros constituem a introdução e enquadramento do tema abordado na investigação desenvolvida.

No capítulo de **introdução** à investigação revelam-se, de forma resumida, os antecedentes de construção de túneis e principais metodologias utilizadas na sua execução. É abordada a problemática e questões que levam à realização da presente investigação, assim como os objetivos a atingir. Inclui ainda a organização dos capítulos em que se divide a dissertação.

No capítulo seguinte consta o **enquadramento do tema**, descrevendo as principais metodologias utilizadas na gestão de risco, com particular destaque para as que são utilizadas nesta investigação. É ainda referida a problemática de heterogeneidade dos maciços rochosos e indicam-se os métodos matemáticos de análise multivariada de dados e de estimação que são aplicados. Por fim aborda-se a construção de túneis em maciços rochosos, com referência às principais metodologias de escavação, aplicação de contenção, acompanhamento técnico da obra e monitorização das deformações do maciço rochoso ou do conjunto maciço/contenção aplicada.

O terceiro capítulo é dedicado às **metodologias** implementadas e descreve-se a forma de desenvolvimento do trabalho no âmbito do tema, com descrição de uma nova abordagem de gestão de risco geotécnico na fase construtiva de túneis em maciços rochosos. Esta resulta da conjugação de várias metodologias, de diferentes áreas específicas, como sejam a gestão de riscos, a matemática, o

empirismo e os métodos construtivos de túneis, respondendo aos principais riscos geotécnicos em túneis e visando alcançar os objetivos propostos no Capítulo 1.

No quarto capítulo são descritos os **casos de estudo** considerados nesta investigação e descrevem-se, para cada um, as respetivas características e enquadramento na geologia regional em que se inserem e as condições geotécnicas específicas do projeto que os contempla. Analisa-se ainda a estatística descritiva dos resultados das classificações geomecânicas realizadas durante o acompanhamento técnico da escavação, que permitem verificar a qualidade do terreno ocorrente.

O quinto capítulo surge como continuação da descrição dos casos de estudo, mas realizando uma **análise orientada para a gestão de riscos**, na extração de informações relevantes para elaborar a nova metodologia de gestão de riscos que consta do capítulo seguinte.

O **desenvolvimento da nova metodologia** integra o capítulo seis, onde os dados disponíveis de casos de estudo de obras já concluídas servem de base à deteção e ao desenvolvimento das metodologias de análise quantitativa ou semiquantitativa dos riscos geotécnicos, apresentando-se metodologias de identificação e análise e, após a avaliação dos riscos, referem-se as medidas mitigadoras e otimizadoras mais comuns para integrar a gestão de risco, resultantes das experiências adquiridas nos casos de estudo, assim como de elementos disponíveis na bibliografia. Por último, identificam-se os riscos residuais que permanecem.

No capítulo sete revelam-se os resultados da **aplicação da nova metodologia proposta** a um outro caso de estudo, em curso.

No oitavo capítulo incluem-se as **considerações finais e perspectivas futuras**, sintetizando-se a contribuição que a presente investigação tem para o avanço da temática e, por último, como nenhuma investigação se encontra totalmente concluída, apontam-se as linhas orientadoras para investigações futuras no âmbito do tema abordado.

2. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O enquadramento ao tema abordado nesta investigação tem o propósito de revelar as principais áreas do conhecimento contempladas e a que se recorre para desenvolver uma nova metodologia de gestão de riscos adequada à construção de túneis em maciços rochosos.

Neste capítulo referem-se as principais definições e metodologias utilizadas na gestão de risco e aborda-se a questão da heterogeneidade dos maciços rochosos e de que modo o seu conhecimento é importante para o sucesso da construção de túneis. Descrevem-se alguns métodos matemáticos de análise multivariada de dados e de estimação que são aplicados no tratamento da informação disponível sobre os casos de estudo seleccionados. Por fim, descrevem-se algumas metodologias de construção de túneis em maciços rochosos, com destaque para as principais utilizadas na escavação, aplicação de contenção, acompanhamento técnico da obra - ATO e monitorização das deformações do maciço, originadas pela abertura de um espaço vazio no seu interior.

2.1 RISCOS GEOTÉCNICOS

A abordagem aos riscos geotécnicos em túneis, segue um enquadramento idêntico aos de outras áreas do conhecimento, sendo importante referir as definições de alguns termos e enquadrar a temática da gestão de riscos, expondo as principais ferramentas de análise e avaliação, bem como os procedimentos para controlo.

2.1.1 Definições

Nos projetos de engenharia, desde a sua conceção à construção, são tomadas inúmeras decisões num ambiente de incerteza. A ponderação dessas incertezas, consequências e por fim tomadas de decisão, por si só, não podem ser consideradas uma gestão de risco na sua plenitude e globalidade de significado, no entanto, constituem uma parte importante dela. Uma gestão de riscos concebida adequadamente deve contemplar uma organização e metodologias de acordo com as definições mais recentes e que seguidamente se introduzem.

Os conceitos inerentes à gestão de risco em estruturas geotécnicas resultam dos inicialmente aplicados à área financeira ou indústrias aeroespacial e nuclear, em particular as metodologias de análise de risco para auxílio à tomada de decisão face às incertezas que se baseavam em estudos probabilísticos (Santos, 2006).

Os documentos preparados pelos grupos das companhias de seguros (BTS, 2003; ITIG, 2012), assim como pela ITA (Eskesen *et al.*, 2004) e *Technical Committee on Risk Assessment and Management*

(ISSMGE_TC32, 2004), permitem clarificar um conjunto de conceitos e definições sobre a gestão de risco utilizada nesta dissertação e que se apresenta em seguida:

- **Perigo** (*hazard*) - situação ou condição com potencial para provocar danos humanos, materiais e/ou ao meio ambiente, perdas financeiras ou atrasos na conclusão do projeto.
- **Risco** (*risk*) - combinação da frequência de ocorrência de um determinado perigo e as consequências da sua ocorrência.
- **Análise do risco** (*risk analysis*) - processo estruturado que identifica tanto a probabilidade como a extensão de consequências adversas decorrentes de uma determinada atividade; inclui a identificação de perigos e descrição de riscos, que pode ser qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa.
- **Apreciação de risco** (*risk evaluation*) - comparação entre os resultados da análise de risco com os critérios de aceitação de risco ou outro critério de decisão definido.
- **Avaliação do risco** (*risk assessment*) - análise integrada dos riscos inerentes a um sistema ou a um projeto e a sua importância num contexto apropriado; ou seja, trata-se da análise do risco acrescida da apreciação de risco.
- **Critério de aceitação do risco** (*risk acceptance criteria*) - expressão qualitativa ou quantitativa que define o nível máximo de risco, que é aceitável ou tolerável, para um dado sistema.
- **Eliminação do risco** (*risk elimination*) - ação para evitar a ocorrência do risco.
- **Mitigação do risco** (*risk mitigation*) - ação para reduzir o risco, minimizando as suas consequências ou a sua frequência de ocorrência para um nível considerado adequado.
- **Risco residual** (*residual risk*) – risco remanescente, que não foi alvo de medidas de controlo por ser considerado tolerável, ou mesmo após aplicação das medidas permanece e com o qual é necessário conviver.
- **Gestão de risco** (*risk management*), é o processo sistemático de:
 - i. Identificar perigos e riscos associados, incluindo com terceiros, que têm impacto nos resultados de um projeto, em termos de custos e de prazo, através de avaliações de risco;
 - ii. Quantificar os riscos, incluindo o seu prazo e as implicações de custo;
 - iii. Identificar ações pró-ativas para eliminar ou mitigar os riscos;
 - iv. Aplicar métodos de identificação para o controlo dos riscos;
 - v. Alocar riscos às diversas partes envolvidas no contrato.

A definição destes conceitos é coerente com o glossário, em Português, apresentado pela Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB, 2005), relativamente à gestão de riscos em barragens.

Segundo (Einstein *et al.*, 2010) o risco pode ser descrito pela Equação 2.1:

$$R = P[E]. P[C/E]. u[C] \quad \text{Equação 2.1}$$

Sendo, R representa o risco, P[E] representa probabilidade de ocorrência do evento, P[C/E] a probabilidade de afetação do meio ao evento E, e u[C] o grau de dano, avaliado por C.

Contudo, de modo mais simplificado, sempre que possível, nesta investigação recorreu-se à fórmula de Baecher (1981) para quantificar o risco, que vem expressa na Equação 2.2:

$$R = P.C \quad \text{Equação 2.2}$$

Sendo, R representa o risco, P a frequência de ocorrência de um perigo, e C as consequências.

Recorrendo a outras palavras para descrever a gestão de riscos, esquematiza-se na Figura 2.1 a interligação do significado dos vários termos, resultando o risco da probabilidade ou verosimilhança de ocorrência de um perigo face às consequências que são geradas nos elementos em risco. Para cada risco envolvido num dado sistema é necessária a definição de critérios de aceitação. O risco é analisado recorrendo a determinadas metodologias pré-estabelecidas e enquadrado em critérios de aceitação. Estes procedimentos possibilitam uma avaliação dos riscos envolvidos. Após a sua avaliação e caso os critérios de aceitação ou tolerância sejam excedidos, devem ser implementados procedimentos no sentido de eliminar os riscos ou, quando tal não é possível, mitigá-los para que sejam enquadrados em níveis dentro do que for considerado aceitável.

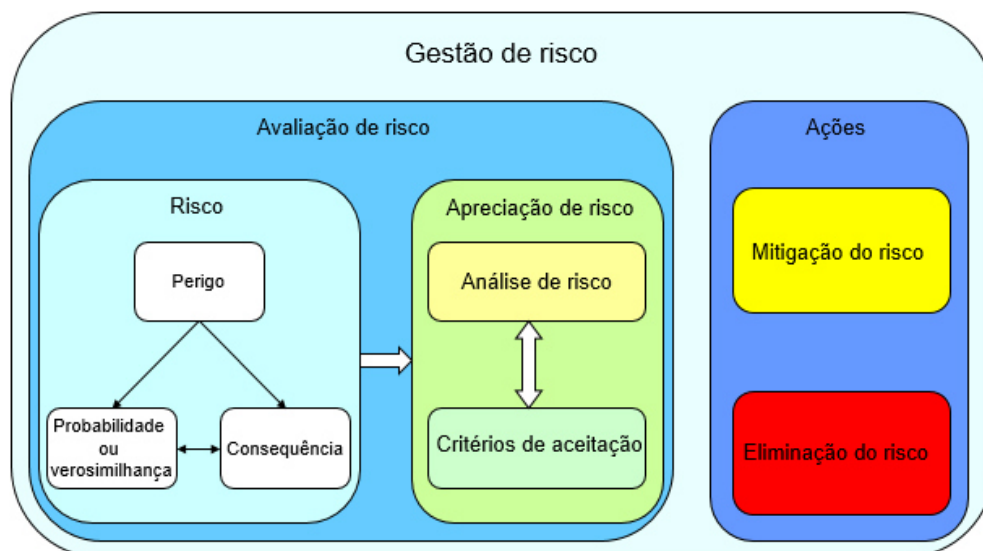


Figura 2.1 – Diagrama da interligação dos conceitos envolvidos na gestão de risco

Definidos os principais termos associados à gestão de riscos, importa abordar os conceitos de implementação, conforme consta seguidamente.

2.1.2 Gestão de risco

Os riscos em obras subterrâneas decorrem essencialmente de movimentos do maciço, com consequências limitadas à área de construção, ou nas respetivas áreas envolventes, podendo desenvolver eventuais subsidências com forte impacto à superfície, explosões de rocha em profundidade, ou combinações das anteriores (Cândido, 2010).

A gestão de riscos é influenciada por um conjunto de fatores, de entre os quais se destaca a capacidade e experiência dos intervenientes no projeto e construção, a noção de responsabilidade inerente ao respetivo processo de gestão, o tipo de projeto e estrutura e o ambiente de trabalho. E para que a gestão de risco seja maximizada é fundamental considerar esses fatores e adequar as metodologias utilizadas (Ward, 1999). Em conformidade, Eskesen *et al.* (2004) sublinham que, na prática, a gestão de riscos requer muita experiência e conhecimentos práticos e teóricos. Em termos genéricos existem três tipos principais de riscos potenciais:

- Incertezas associadas ao terreno (litologia, estruturas, fraturação) e à hidrogeologia e suas consequências;
- Incumprimento de prazos de construção;
- Afetação de pessoas e bens.

A gestão destes riscos deve possibilitar o controlo dos seguintes três fatores (*ib.*):

- Percepção - inclui o risco pessoal para os trabalhadores e terceiros, o risco material para terceiros, o risco ambiental, o risco de atraso na construção, outros os riscos materiais (custos adicionais);
- Análise, avaliação e controlo - identificação dos perigos, suas consequências e implementação das medidas para eliminá-los ou mitigá-los;
- Alocação e monitorização - abordagem da definição da responsabilidade do risco e descrição das atividades; monitorizar, auditar e rever os procedimentos integrados na gestão de riscos.

A implementação de um Plano de Gestão de Riscos tem de considerar vários aspetos, nomeadamente (Grasso *et al.*, 2007):

- Nenhum projeto é livre de risco;
- Nem todos os riscos podem ser totalmente eliminados ou mitigados;

- O procedimento não resolve todos os riscos, sendo necessário definir, para cada um deles, o respetivo nível de aceitação; o risco residual estará sempre presente;
- A gestão de riscos deve ser aplicada em todas as fases do projeto s.l.;
- Os Donos de Obra devem realizar uma estimativa de custos para os riscos que não podem ser removidos ou mitigados.

Como se revela na Figura 2.2, um plano de gestão de riscos deve contemplar várias etapas que se sucedem. Cada risco identificado e analisado com recurso a metodologias seleccionadas, deve ser avaliado, classificando-se em tolerável ou intolerável sendo que, neste último caso, tem de ser devidamente tratado no sentido da sua eliminação ou, caso não seja possível, da sua mitigação; por fim é necessário monitorizar o risco observando-o e controlando-o. Um aspeto importante para evitar disputas judiciais é definir ou identificar o responsável pelo risco, embora não seja esse um dos objetivos desta investigação.

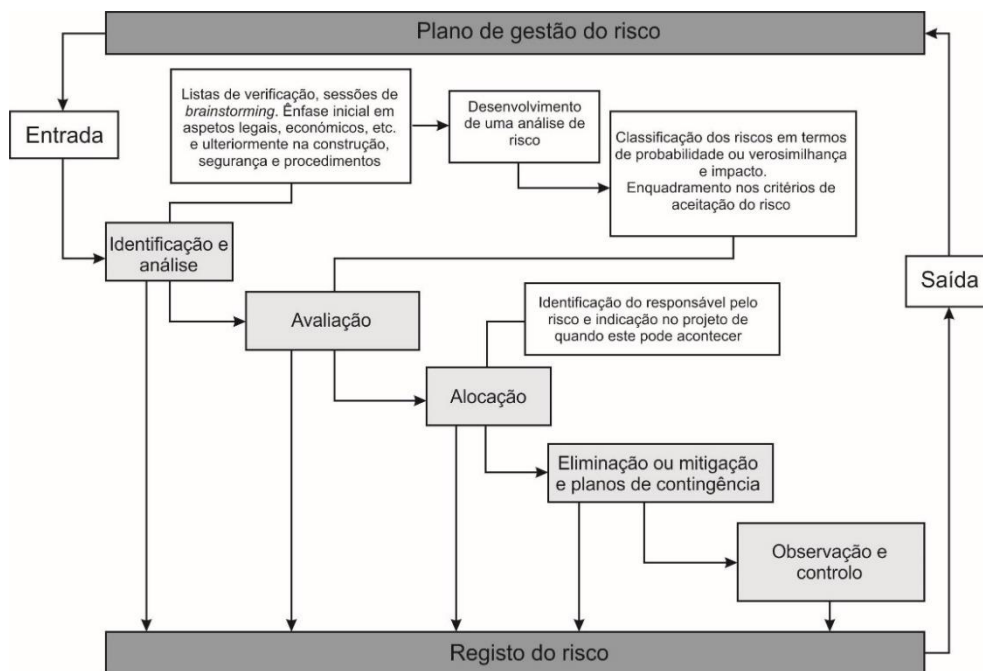


Figura 2.2 – Diagrama do plano de gestão do risco (adaptado de Powell & Silverton, 2003)

A identificação de riscos deve garantir que todos os perigos, mesmo os aparentemente menores, com potencial direto ou indireto de se tornarem riscos, a curto ou longo prazo, sejam considerados desde as fases iniciais do projeto (Caldeira, 2002).

A alocação do risco, com identificação do responsável pela sua resolução caso ocorra, é importante em termos contratuais e financeiros, sendo referida por diversos documentos (BTS, 2003; Powell & Silverton, 2003; Eskesen *et al.*, 2004; Schubert, 2004; ITIG, 2006; Cândido *et al.*, 2012). Possibilita distribuir o risco por quem está mais apto para o tratar, identificando um responsável, mas em nada contribui para a sua eliminação ou mitigação.

Assinale-se que a legislação portuguesa já contempla, no âmbito da Lei de Responsabilidade e Gestão de Riscos Ambientais (Decreto-lei_N.º147/2008), um regime de responsabilidade do operador por danos ambientais, através da criação de garantias financeiras e sanções, com vista a prevenir/reparar potenciais danos ambientais. Mais recentemente, em Outubro de 2011, este tema foi desenvolvido no “Guia para a avaliação de ameaça iminente e dano ambiental” (APA/ISQ, 2011).

Conforme já referido no Capítulo 1, segundo Leca & Eskesen (2006) existe uma zona entre o limite do aceitável e do intolerável, designada de ALARP, onde o risco deve ser reduzido enquanto o custo for razoável quando comparado com o nível de redução do risco alcançado. Significa isto que, se o custo para redução ou eliminação do risco for muito elevado relativamente ao benefício obtido com a redução do risco, é preferível não implementar esses procedimentos.

A observação e o controlo do risco são utilizados para verificar a eficiência do sistema. Em todas as fases do projeto s.l., todo o processo associado a cada um dos riscos deve ser registado.

Conforme já referido e representado nas Figuras 2.3 e 2.4, a gestão de riscos deve acompanhar todo o processo do projeto s.l. de uma obra com o objetivo de diminuir os riscos. Os riscos totais iniciais devem ser tratados no sentido de diminuir, em número e em intensidade, no âmbito do processo de gestão.

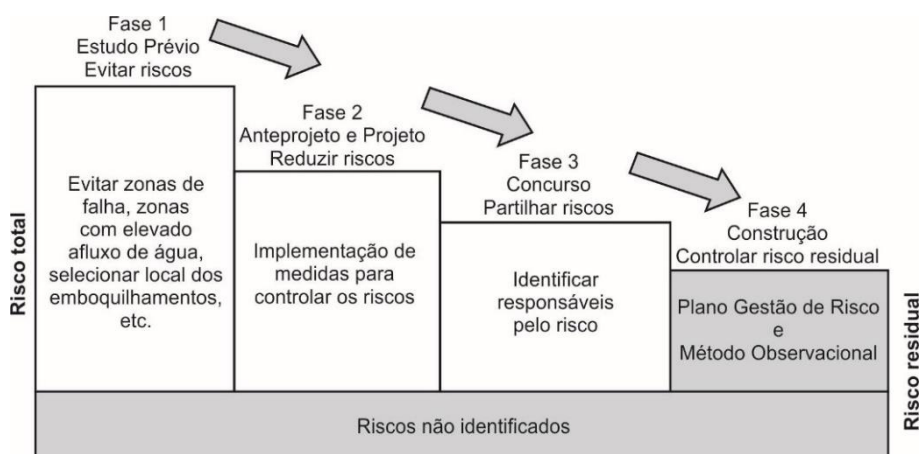


Figura 2.3 – Diagrama das etapas de gestão de risco (adaptado de Schubert, 2004)

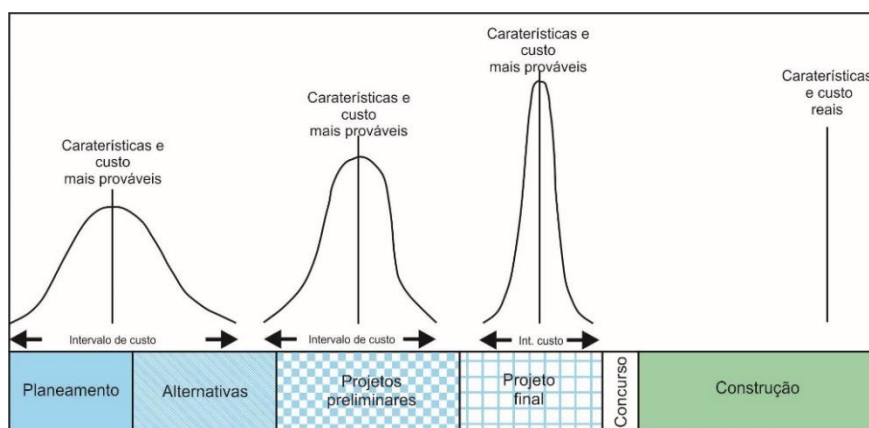


Figura 2.4 – Ilustração da redução do risco ao longo do projeto s.l. (adaptado de Palmer *et al.*, n.d.)

Em cada uma das fases do projeto s.l., desde o planejamento até à construção, os riscos devem ser sucessivamente diminuídos para que o controle de custos seja mais preciso; contudo, é necessário ter presente que existem sempre riscos que podem não ser contemplados e que mesmo os riscos considerados e que foram alvo de tratamento, por impossibilidade, podem não ter sido eliminados, o que implica a presença de risco residual que passará para a fase construtiva e de exploração, e que terá de ser controlado.

O risco que não é possível eliminar ou mitigar, é designado de risco residual. É transversal às fases de projeto e assim chega à fase construtiva e de exploração, ou seja, torna-se necessário conviver com ele, sendo recomendável definir os seguintes critérios para a sua gestão (Chiriotti *et al.*, 2004):

- i. Regras e responsabilidades;
- ii. Comunicação e caminhos de auxílio à decisão;
- iii. Formação dos operadores;
- iv. Definição de parâmetros de referência para verificar a correspondência entre as previsões de projeto e os dados de construção;
- v. Plano de segurança;
- vi. Verificação independente;
- vii. Supervisão da construção e monitorização.

No caso das obras em subterrâneo e para o sucesso na gestão do risco residual, Kochen (2009) indica a implementação de um plano de gestão de riscos que obedeça aos seguintes requisitos:

- i. Revisão e avaliação dos maciços ocorrentes nas escavações subterrâneas, considerando o método construtivo selecionado;
- ii. Revisão e avaliação das incertezas e variações nas condições geológicas e geotécnicas identificadas no projeto e método construtivo;
- iii. Implementação de planos de prospeção geotécnicos adicionais, em caso de necessidade;
- iv. Apresentação de cálculos de estabilidade das escavações subterrâneas, e avaliação das necessidades de tratamento prévio de terreno;
- v. Elaboração de um registo de riscos relativamente aos túneis, contendo os riscos identificados, estimativa da sua probabilidade de ocorrência e impacte, bem como as medidas a preconizar em projeto e implementar na construção, para reduzir os riscos iniciais a níveis aceitáveis;
- viii. Verificação e adequação da monitorização geotécnica para avaliar o comportamento dos túneis, dos maciços e do meio envolvente.

Brinkman (2008) retoma um modelo para a gestão de risco, designado de GeoQ que, tal como o de Schubert (2004), tem em conta as várias fases de projeto de uma obra, mas acrescenta que, em cada

fase, a gestão deve ser autónoma, repetindo a recolha de dados disponível, identificação e avaliação de riscos, sua mitigação, avaliação do risco residual e registo de risco - Figura 2.5.

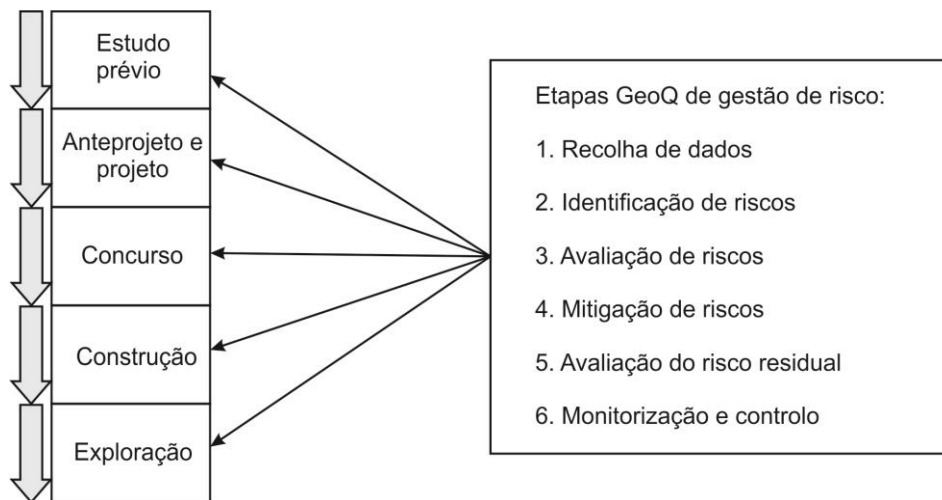


Figura 2.5 – Diagrama da gestão de risco GeoQ que se repete em cada fase do projeto (adaptado de Brinkman, 2008)

A gestão de riscos na fase construtiva de um túnel pode ser implementada formalmente, com procedimentos obrigatórios e um programa de atividades, com realização de todos os registos, habitualmente enquadrada por legislação do país, por exigência do Dono de Obra ou de outras entidades. Por outro lado, pode ser implementada sem o formalismo da anterior, mas contando com procedimentos e registos que visam o desenvolvimento da construção, enquadrada pela sobriedade de uma filosofia de gestão de riscos como forma de evitar problemas e garantir a segurança, que no final resulta em economia (Thomas & Banyai, 2007).

Esta última abordagem é a que norteia a investigação desenvolvida nesta dissertação, enaltecendo a gestão dos riscos na prática, onde as características do maciço rochoso observado na escavação são condicionantes da necessidade de desenvolver procedimentos, que se adaptem aos riscos que normalmente existem na fase construtiva. A gestão de risco deve ser considerada uma ferramenta relevante no auxílio à construção, descurando e demarcando-se da produção de registos sistematizados, como forma de produção de trabalho por si só, espartilhados por rotinas de procedimentos pouco realistas, que impedem a adequada implementação e abrangência que um processo deste tipo deve ter no contexto da construção de túneis.

Dentro da gestão de riscos, assume particular relevo as metodologias de análise, por existirem disponíveis várias ferramentas, com aplicação variada e adequada a cada caso e situação, como se poderá ver seguidamente.

2.1.3 Análise e avaliação de risco

A análise de riscos, conforme definição já apresentada anteriormente, é uma parte da gestão que permite qualificar ou quantificar os riscos e, conseqüentemente levar à adoção das ações apropriadas para lidar com cada um deles (Fouladgar *et al.*, 2011). Estas análises podem ser divididas em qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas (CNPGB, 2005). Entende-se por análises qualitativas, as abordagens meramente descritivas, enquanto as análises semiquantitativas contemplam a atribuição de um valor relativo à verosimilhança e consequência do risco (vulnerabilidade) e, como tal, já permitem uma valorização igualmente relativa do risco; por sua vez, as análises quantitativas pressupõem abordagens matemáticas da probabilidade e da intensidade da ocorrência de um risco.

Ainda nos anos 70 do século passado, Einstein *et al.* (1978) apresentaram um estudo para auxiliar as tomadas de decisão relativas a métodos de escavação e locais de execução de túneis, tendo em conta os custos inerentes. Estes sistemas de auxílio à decisão (*Decision Aids for Tunneling - DAT*) tiveram a sua evolução nos anos 90 do século passado, com a publicação de alguns desenvolvimentos (Sinfield & Einstein, 1996; Xu *et al.*, 1997) e prosseguiram já neste século (Einstein, 2001, 2003; Hass & Einstein, 2002; Sousa, 2010; Sousa & Einstein, 2012).

Para as análises de risco, Eskesen *et al.* (2004) indicam como métodos mais utilizados as Árvores de Falhas, Árvores de Eventos, Árvores de Decisão, Multirrisco e Simulação de Monte Carlo. A Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens destaca como análises mais adequadas para o caso das barragens a seguinte lista (CNPGB, 2005):

- HAZOP – Análise dos Perigos e da Operacionalidade (*Hazard and Operability Analysis*);
- FMEA – Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis*), e FMECA – Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Severidade (*Failure Mode, Effect and Critically Analysis*),
- FTA – Análise por Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis*),
- ETA – Análise por Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis*),
- Nó de Borboleta (*Noeud Papillon*).

Ulteriormente, numa análise de risco aplicada a uma barragem de aterro para retenção de rejeitados de uma exploração mineira, atualmente designada de infraestrutura de armazenamento de resíduos mineiros, são aplicadas análises semiquantitativas, como a FMEA e a FMECA (Santos, 2006; Santos *et al.*, 2008).

Na gestão e análise de riscos em barragens de aterro, Pimenta (2012) considera como mais apropriada a utilização de uma análise quantitativa, como a ETA.

Para além da lista anterior, merecem ainda referência as análises por listas de verificação, as análises preliminares de risco, o índice de risco, o diagrama de localização, as causas e indicadores das falhas, as análises difusas (*fuzzy*), as análises de sensibilidade, as análises multicritério e as redes bayesianas (Santos, 2006; Almeida & Ferreira, 2008). Quanto ao tipo de análise, conforme anteriormente referido

e constante na Tabela 2.1, estas podem ser divididas em qualitativas, quantitativas ou semiquantitativas.

Tabela 2.1 – Identificação do método e correspondente tipo de análise a implementar

Métodos de análise de risco	Tipo de análise a implementar		
	Qualitativas	Semiquantitativas	Quantitativas
Listas de verificação (<i>checklist</i>)	X		
Análise de perigos e operacionalidade (HAZOP)	X		
Índices de risco		X	
Análise dos modos de rotura e seus efeitos (FMEA)	X		
Análise dos modos de rotura, seus efeitos e criticidade (FMECA)		X	
Análise por árvores de falhas (FTA)	X	X	X
Análise por árvores de eventos (ETA)	X	X	X

Estas metodologias de análise de risco, em túneis, têm sido aplicadas com sucesso em todo o mundo, indicando-se como exemplos as listas de verificação (Ceric *et al.*, 2011; Cândido *et al.*, 2012; Cândido, 2010) e as análises quantitativas que recorrem a ferramentas matemáticas, tais como, as análises difusas (Buchmeister *et al.*, 2006; Fouladgar *et al.*, 2011), a simulação de Monte Carlo (Eskesen *et al.*, 2004; Mohamed, 2006) e as redes bayesianas (Ferson, 2003; Sousa, 2010; Leu & Adi, 2011).

No desenvolvimento da presente investigação, a utilização de metodologias de análise de risco foi restringida às listas de verificação e árvores de falhas e eventos, justificando-se a seleção da primeira metodologia pela simplicidade e rapidez de aplicação, a segunda por otimizar a organização e perceção de eventos que conduzem à falha do sistema e, a última, pela organização, sistematização e perceção de eventos consequentes.

Uma vez concluída a análise de risco, é necessário proceder à sua avaliação. Numa fase prévia devem ser definidos critérios de aceitação de risco, os quais não têm como base regras ou normas restritivas, dependendo na sua essência do “nível” de risco que se esteja disposto a tolerar. A avaliação dos riscos é realizada pelo enquadramento dos resultados da análise nos critérios de aceitação, o que não inviabiliza uma apreciação dos resultados.

Seguidamente descrevem-se as ferramentas de análise de risco mais relevantes para o desenvolvimento da presente investigação, como sejam as listas de verificação e árvores de falhas e de eventos.

2.1.3.1 Listas de verificação

As listas de verificação de riscos tratam-se, efetivamente, de listagens com enumeração descritiva dos principais riscos que podem estar relacionados com o projeto s.l. em apreço. Necessariamente são realizadas por especialista na área e surgem da recolha de informação disponível em várias fontes, como sejam bibliografia, registos de riscos realizados em intervenções semelhantes, revisão de documentos e/ou sessões de brainstorming com outros especialistas ou envolvidos no empreendimento.

De acordo com Santos (2006) e conforme exemplo constante na Tabela 2.2, trata-se de uma abordagem à análise de risco, sistematizada em tópicos, baseada na história da obra ou de obras similares.

Tabela 2.2 – Exemplo de lista de verificação (Santos, 2006)

Pontos para analisar	Ocorre	Não ocorre	Não analisado	Comentários
Área do assunto 1 Análise do ponto 1.1 Análise do ponto 1.2 ...	X			
Área do assunto 2 Análise do ponto 2.1 Análise do ponto 2.2 ...		X		
Área do assunto 3 ...	X			

Segundo Cândido (2010), é uma abordagem indutiva que tem como base observações particulares que são generalizadas de forma mais abrangente para aplicação a outros casos. É um método qualitativo de análise de risco, onde apenas se verifica a sua ocorrência. No entanto, permite uma definição de medidas a implementar para eliminação ou mitigação do respetivo risco potencial, caso se concretize.

As listas de verificação têm como vantagens principais:

- Serem evolutivas, pela inclusão de novos itens de verificação em qualquer altura do processo;
- De rápida implementação, mesmo por pessoas que não sejam especialistas;
- De fácil perceção por parte de todos os envolvidos no processo, mesmo que de outras áreas do conhecimento.

Esta metodologia pode ser utilizada de forma individual na análise de riscos, ou de forma conjugada com outras metodologias, como elemento principal ou complementar, ou seja, de forma diversificada e abrangente.

Como principais limitações apontam-se as seguintes:

- Possibilidade de ignorar alguns riscos, uma vez que se limita à verificação dos itens listados;

- A sua eficácia depende da experiência do especialista que a concebe, bem como do trabalho desenvolvido na pesquisa de situações a incluir.

Trata-se de um método qualitativo, em que a avaliação dos riscos verificados é sempre subjetiva e está associada à experiência do respetivo autor e, ulteriormente, do técnico que a implementa.

2.1.3.2 Árvores de falhas

As árvores de falhas (FTA) são uma metodologia de análise de riscos desenvolvida nos inícios dos anos 60 do século passado, para o estudo de fiabilidade do controlo de lançamento de mísseis que, ao longo do tempo, tem sido aplicada em variadas áreas (Longo, 2006), assumindo-se como um dos métodos principais na avaliação de riscos pós-acidente.

Como se trata de uma abordagem dedutiva, permite desenvolver uma análise partindo da falha e percorrer o caminho no sentido dos eventos e das conjugações que estiveram na respetiva origem (CNPGB, 2005). Segundo Santos (2006), este tipo de análise dedutiva leva a uma observação do geral para o particular, na busca das situações que causaram a falha do sistema.

Neste tipo de análise, os eventos envolvidos podem ser catalogados face à relevância e posição que ocupam nas árvores de falhas. Na sua construção podem ser utilizados operadores lógicos (e, ou, negação, afirmação), conforme representado na Figura 2.6.

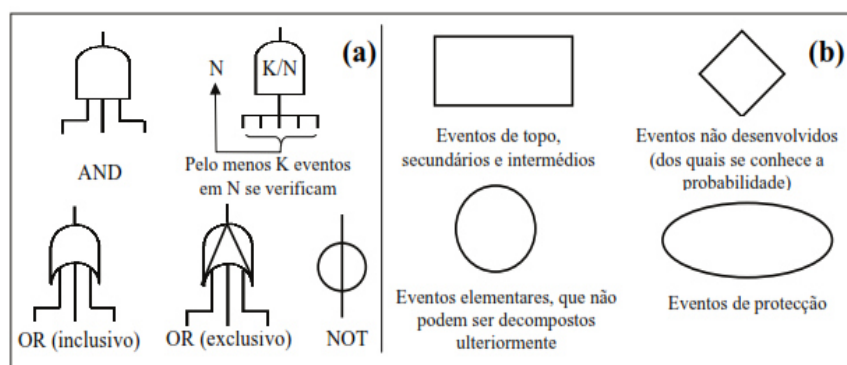


Figura 2.6 – Símbolos de operadores e eventos utilizados nas árvores de falhas (Longo, 2006)

A Figura 2.7 revela que o método contempla uma representação gráfica da situação em análise, o que se torna uma mais-valia na perceção das interligações entre os vários eventos envolvidos, resultando uma simplificação estruturada de problemas complexos (Eskesen *et al.*, 2004), sendo adequado na análise de acidentes de grande escala (CNPGB, 2005).

Na fase inicial dos projetos, a aplicação desta metodologia revela-se importante, uma vez que permite representar diferentes cenários hipotéticos que podem levar à falha do sistema (Longo, 2006).

Para a construção das FTA é importante definir o evento principal que representa a situação indesejável que se pretende analisar, definir os vários ramos e respetivas conjugações de eventos que,

de forma independente, podem não apresentar qualquer risco, mas interligados deram origem a essa falha do sistema.

As FTA podem ser utilizadas como método quantitativo, onde as probabilidades de ocorrência de cada evento estão calculadas; como método semiquantitativo, em que são estimadas a probabilidade ou a verosimilhança associada a cada evento, com base na experiência de técnicos qualificados (Caldeira, 2005); como método qualitativo é um auxílio importante na sistematização dos processos associados à falha ou vulnerabilidade do sistema (Pimenta, 2008), o que permite desenvolver procedimentos, enquadrados em medidas de eliminação ou mitigadoras, para travar os processos que levam à referida falha.

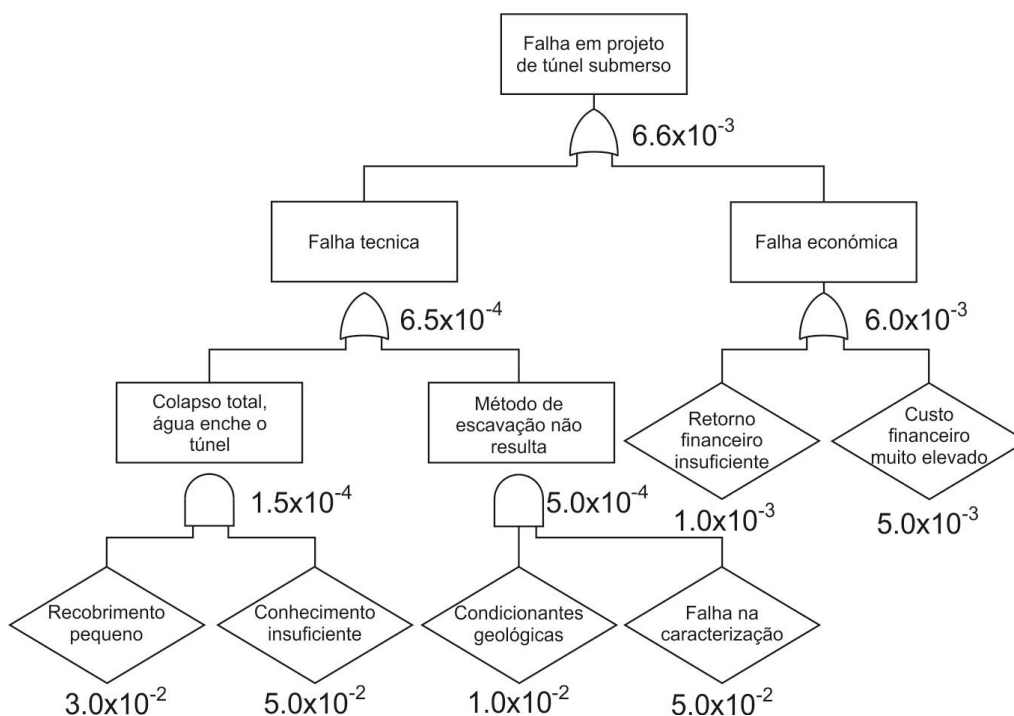


Figura 2.7 – Exemplo de uma árvore de falha de análise de risco de um túnel (Eskesen *et al.*, 2004)

Segundo Longo (*op. cit.*), a aplicação das FTA enquanto método quantitativo de análise de risco em engenharia de túneis é muito reduzida, porque as bases de dados disponíveis não contemplam registos de ocorrências de riscos geotécnicos.

As principais vantagens de aplicação desta metodologia são:

- Representação gráfica e lógica que facilita a sua leitura e interpretação;
- Encontrar-se amplamente difundida, sendo aplicada em vários domínios do conhecimento;
- Representação de um número significativo de eventos e sua interligação que levam à falha do sistema;
- Permitir determinar os eventos que estão na origem da falha do sistema.

Como limitações da FTA indicam-se as seguintes:

- Análise de uma única falha por árvore, quando às vezes um evento leva a mais que um tipo de falha do sistema;
- Criação da árvore depende da experiência de quem a concebe; a quantificação implica uma base de dados alargada que permita o cálculo da probabilidade associada a cada evento presente na árvore.

2.1.3.3 Árvores de Eventos

Segundo Eskesen *et al.* (2004), a ETA permite verificar o desenvolvimento da resposta potencial de um sistema, a partir de um acontecimento inicial, e avaliar as possíveis consequências que o mesmo pode causar, tratando-se como tal de um método indutivo.

Esta metodologia foi desenvolvida no início dos anos 70 do século passado, para análise de riscos em centrais nucleares e pressupõe o conhecimento de todos os eventos iniciadores de falhas do sistema em análise, assim como os eventos intermédios (CNPGB, 2005).

Uma vez iniciada a análise de um evento, é possível observar o desenvolvimento de todas as consequências associadas (Santos, 2006)

As árvores de eventos viabilizam a análise lógica do desempenho do sistema, num enquadramento que antecede o acidente, mas também podem ser aplicadas com sucesso em situações de pós-acidente, para análise das várias consequências que possam ocorrer (Pimenta, 2008).

Segundo Longo (2006), a construção de uma ETA é realizada da esquerda para a direita, podendo contar com inúmeros eventos intermédios, que devem seguir uma ordem sequencial cronológica na sua organização dentro da árvore - Figura 2.8.

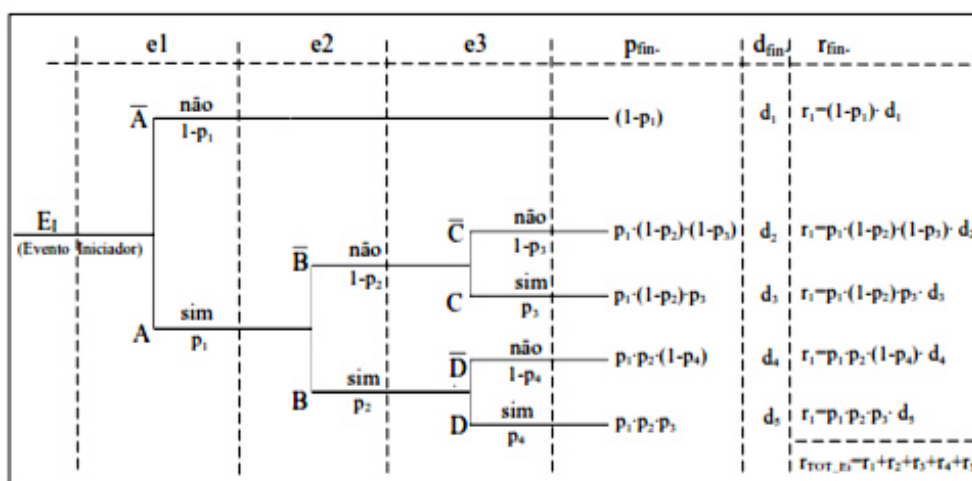


Figura 2.8 – Exemplo de uma árvore de eventos com análise quantitativa (Longo, *op. cit.*)

A construção da ETA é beneficiada quando antecedida da realização de diagramas de influências. Estes diagramas permitem representar, graficamente, a interligação das situações que eventualmente possam ocorrer, o que ajuda a visualizar as relações entre os eventos iniciais e os seus efeitos. A principal vantagem deste tipo de representação é a explicação das relações entre eventos (Pimenta, *op. cit.*).

O número de eventos intermédios é ilimitado; no entanto, quando mais extensas mais complexas (Espósito *et al.*, 2010), mas maior a abrangência da situação descrita.

Este método de análise de riscos pode ser utilizado com uma base qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa. Neste último caso, permite utilizar a probabilidade associada a cada evento, onde os ramos que saem de um evento inicial ou de cada um dos eventos intermédios deve ser igual a 1 (Longo, *op. cit.*), isto significa que os eventos finais têm associada uma probabilidade condicional, que pode ser descrita pelo Teorema de Bayes (Ferson, 2003; Sousa, 2010; Conrady & Jouffe, 2011).

As ETA, quando utilizadas como método de análise de riscos qualitativas, não permitem determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos associados; contudo, possibilitam uma leitura organizada do sistema na identificação de eventos associados a falhas, bem como o seu encadeamento na concretização dessas falhas (Pimenta, *op. cit.*). Este processo, embora qualitativo, auxilia na definição das medidas de mitigação ou de eliminação dos riscos.

A utilização de ETA como método semiquantitativo resulta, muitas vezes, de um incremento à análise qualitativa e como alternativa aceitável, quando é impossível calcular as probabilidades associadas a cada evento. Neste caso é realizada uma estimativa de probabilidades baseada na experiência em obras semelhantes, o que resulta numa aproximação realista (Caldeira, 2005).

Como vantagens essenciais das árvores de eventos, indicam-se:

- Representação gráfica, que possibilita uma compreensão rápida e eficaz do sistema;
- Identificação dos eventos iniciadores de falhas de sistemas, que permite a aplicação de medidas focalizadas para os eliminar ou mitigar;
- Identificação da sequência de eventos que conduzem à falha do sistema.

As principais limitações encontradas neste método de análise de riscos são:

- Cada árvore restringe-se a um único evento inicial e, às vezes, a causa de uma falha é o resultado de vários eventos iniciais isolados, mas que ocorrem em simultâneo;
- Os eventos iniciais têm de ser conhecidos previamente;
- Pode originar depreciação de alguns eventos que se venham a revelar importantes, uma vez que a geração da árvore é subjetiva e está dependente da experiência de quem a concebe.

Comparando a FTA com a ETA, de um modo resumido, verifica-se que, no primeiro caso, um conjunto de situações, conjugadas entre si, podem levar à falha do sistema e, no segundo, como um

evento inicial, conjugado com condicionantes, tem possibilidade de gerar vários cenários com diferentes probabilidades de ocorrência.

Na sequência de procedimentos da gestão de riscos, após concluir a análise e avaliação de risco, os considerados intoleráveis ou dentro do critério ALARP têm de ser alvos de medidas de controle, conforme se define seguidamente.

2.1.4 Controlo do risco

Como referido anteriormente, a sequência de procedimentos da gestão de riscos implica que, após a análise e avaliação dos riscos, caso esteja excedido o limite do aceitável, os mesmos sejam alvo de procedimentos no sentido de os eliminar ou mitigar.

Neste contexto, os procedimentos a desenvolver não obedecem a fórmulas genéricas, sendo exclusivos de cada situação; no entanto, há condutas, desde o projeto à construção, que devem ser seguidas e que levam à diminuição dos riscos (Chapman, 2007). Apenas com a conjugação de uma conduta atenta e consciente dos riscos e a implementação de medidas específicas de cada situação para o seu controlo, é possível desenvolver de forma eficiente a gestão dos riscos.

Mesmo com o desenvolvimento específico das medidas e procedimentos a implementar em cada situação de risco, torna-se importante a monitorização do processo para avaliar a sua adequabilidade aos objetivos pretendidos, sejam eles no sentido de mitigação ou da eliminação (Palmer *et al.*, n.d.).

A eliminação de risco é sempre o procedimento mais desejável; todavia, às vezes torna-se impossível de concretizar, como acontece, a título ilustrativo, no caso da escavação de túneis, onde o risco associado à variação das condições geotécnicas está sempre presente e é quase impossível eliminá-lo podendo, no entanto, adotar-se medidas mitigadoras, no sentido da sua prospeção. Continuando com o exemplo da escavação de túneis, o risco de colapso também está sempre presente, sendo a sua eliminação possível pela adoção de contenção adequada às características do maciço presente, aplicada atempadamente, nem que seja em avanço, como o tratamento prévio do terreno na frente de escavação.

Muitas vezes, o controlo de risco é feito pela definição em projeto de planos de contingência, onde vêm refletidas medidas a adotar perante a ocorrência de cenários geotécnicos gravosos para a estabilidade da escavação, de modo a evitar o seu colapso.

Os cenários geotécnicos gravosos são muitas vezes reflexo de condições de heterogeneidade dos maciços rochosos ou de incertezas relativas ao seu estudo, pelo que na secção seguinte se aborda esta problemática.

2.2 INCERTEZA E HETEROGENEIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS

A utilização do termo incerteza aplicado às características do maciço rochoso apresenta um significado relacionado com a aleatoriedade, heterogeneidade e eventual falta de conhecimento desse maciço, levando ao distanciamento do significado matemático do termo, em que a insuficiência de dados impossibilita a realização de cálculos estatísticos. Assim, os maiores desafios em geotecnia provêm da incerteza, sendo por isso necessário tê-la em consideração na análise de riscos desenvolvida, seja ela na fase de projeto, ou na construtiva (Chowdhury *et al.*, 2012).

As incertezas representam perigos para a realização de qualquer projeto. Como referido, a consumação desses perigos pode ter consequências significativas para pessoas e bens, materiais ou financeiros, tornando-se em riscos (Eskesen *et al.*, 2004).

A heterogeneidade dos maciços rochosos leva a que, por mais estudos que se realizem, não seja economicamente possível conhecer na prática todas as suas características de forma detalhada. Por um lado, torna-se espacialmente impossível analisar e caracterizar todo o maciço, nas mais diferentes escalas, uma vez que, por si só, o efeito de escala em geotecnia é condicionante, conforme referido por Barton (1990), Gomes (1998), Hudson (2012) e, ainda indiretamente, por Hoek (2007), quando considera a observação do maciço a diferentes escalas conforme consta na Figura 2.9. Por outro lado, há características ou fenômenos que podem não ser considerados ou conhecidos para incluir na avaliação, o que origina frequentemente situações imprevistas ou imprevisíveis no decorrer da fase construtiva de túneis, quando as reais características do maciço ficam disponíveis e com as quais é necessário lidar.

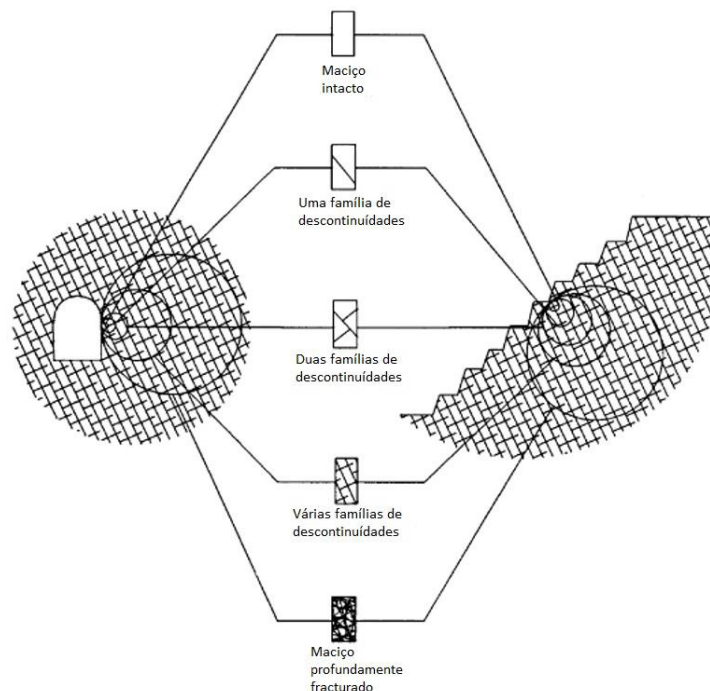


Figura 2.9 – Esquema de observação do maciço rochoso a diferentes escalas (Hoek, 2007)

Christian (2004) refere que as incertezas em geotecnia podem ser de dois tipos:

- Aleatória - quando a incerteza está associada à variação natural do terreno e das condições hidrogeológicas;
- Epistemológica - quando a incerteza deriva da falta de conhecimento.

Estes dois tipos de incerteza acabam por estar interligados uma vez que, quanto maior é a heterogeneidade do maciço, maior será a dificuldade em conhecê-lo e, por outro lado, quanto mais homogêneo é, maior será a facilidade de conhecer as respetivas características.

Com a noção de que os maciços rochosos são intrinsecamente heterogêneos, a AFTES (2012) apresenta recomendações no sentido de se realizarem estudos de pormenor para caracterização dos maciços, que permitam analisar os riscos e incerteza na vertente geológica, hidrogeológica e geotécnica.

Sobre a incerteza associada às obras subterrâneas, Hoek & Palmeiri (1998) verificam que existe uma relação entre custos acrescidos nos projetos e o comprimento total de furação de prospeção realizada para uma dada extensão dos respetivos túneis. Quanto mais baixa for a relação comprimento de furação na prospeção / extensão de túnel, maiores serão os custos acrescidos inerentes. Este trabalho veio demonstrar que o investimento em fase de projeto para identificação e caracterização do maciço a afetar pela obra é compensado pela maior exatidão na previsão de custos da construção, ou seja, quanto menor o risco inicial em relação às incertezas do terreno, menor será o risco financeiro, e possivelmente técnico, na fase construtiva. Anteriormente, Rodrigues-Carvalho & David (1986) já tinham concluído que o investimento em estudos, em fases precoces, compensava largamente, na medida em que se conseguia melhorar a previsão de custos de construção.

Na fase de estudo, a recolha de elementos sobre o maciço rochoso à superfície, encontra-se penalizada pela existência de vegetação e solo de cobertura, limitando a obtenção de dados a afloramentos rochosos pontuais. No caso de recolha de dados em profundidade, torna-se necessário recorrer a prospeção que, em caso de utilização de métodos indiretos, levam à necessidade de validação ou calibração com métodos diretos, sendo o resultado dos dados recolhidos sujeito à subjetividade de interpretação do especialista ou, no caso dos métodos diretos, serem ainda pontuais.

Se para o caso de maciços homogêneos a construção de modelos geológicos-geotécnicos é um exercício de sucesso; no caso de maciços fortemente heterogêneos, revela-se inapropriado e muitas vezes enganador. A pressão dos custos, do tempo disponível para os estudos e a obrigatoriedade de se apresentarem determinados elementos para integrar as peças de um projeto, acarreta que, às vezes, sejam emitidos documentos com um grau de incerteza elevado. Este problema levou Dematteis (2012) a apresentar recomendações para quantificar a fiabilidade do modelo geológico utilizado em projetos de obras importantes.

De acordo com o referido por Flores (2006), como principais fontes de incerteza encontrada em geotecnia indicam-se as seguintes:

- Variação geológica local e o efeito de escala dos maciços;
- Desenvolvimento limitado dos estudos realizados;
- Erros de medição;
- Desconhecimento do estado de tensão do maciço e comportamento face à realização da obra;
- Estimativas geotécnicas infundadas;
- Validade e precisão dos modelos desenvolvidos;
- Uso abusivo de correlações empíricas;
- Erro humano;
- Condições hidrogeológicas da região pouco estudadas;
- Eventos extremos (sismos, etc.).

O maciço rochoso presente em determinado local tem o seu enquadramento e história geológica específica, que se reflete nas suas características atuais; o seu estudo retrospectivo em casos de obras já realizadas permite acrescentar conhecimento genérico de base para aplicação em situações futuras; no entanto, é fundamental ter presente que a história geológica refletida no enquadramento regional e local tem um papel importante nas características intrínsecas do maciço rochoso, que o faz ser único.

Perante o conjunto de parâmetros que permite caracterizar um maciço rochoso e a sua heterogeneidade pela variação destes, o número de variáveis que descrevem o maciço e quantidade de elementos recolhidos ao longo da escavação de um túnel é significativa. Para o tratamento dessa quantidade de informação é recomendável recorrer a metodologias matemáticas para auxiliar a análise empírica do especialista.

Seguidamente, apresentam-se algumas dessas metodologias matemáticas mais utilizadas em estudos para caracterização e descrição dos maciços rochosos, bem como as geralmente usadas para estudar, simultaneamente, vários parâmetros e, ainda, algumas a que se pode recorrer para estimar resultados em locais que não foram alvo de amostragem.

2.3 DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Nesta secção indica-se uma das formas de proceder à descrição dos maciços rochosos, numa abordagem matemática no tratamento das características que permite a definição das condições geotécnicas ocorrentes durante a construção de um túnel. Como geralmente a caracterização dos maciços é realizada de modo pontual, por amostragem, limitada por razões várias, é necessário desenvolver modelos que revelem o cenário ou cenários possíveis de ocorrer.

2.3.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva permite sintetizar os dados disponíveis da amostragem realizada, que se pretende que sejam representativos de toda a população, de forma a possibilitar uma leitura rápida, intuitiva e facilmente entendível.

Como principais definições relevantes para esta dissertação e do âmbito da estatística descritiva, disponíveis em diversos manuais subordinados ao tema, nomeadamente em Calapez *et al.* (2007), Reis (2008), Figueiredo (2009), referem-se as seguintes:

- Dado estatístico – dado numérico sobre o qual se aplicam os métodos estatísticos;
- População – conjunto total de elementos portadores de, pelo menos, uma característica comum;
- Amostra – parcela representativa da população, que é trabalhada e analisada de forma a possibilitar conclusões sobre a população;
- Parâmetros – valores singulares que existem na população e que servem para a sua caracterização;
- Atributo – carácter qualitativo dos dados;
- Variável – conjunto de resultados possíveis de um fenómeno;
- Variável qualitativa – valores expressos por atributos;
- Variável quantitativa discreta – conjunto de dados com estrutura numérica expressa geralmente por números pertencentes ao conjunto N - números naturais, inteiros não negativos;
- Variável quantitativa contínua – conjunto de dados com estrutura numérica que resulta de uma mensuração, onde o intervalo de resultados possíveis corresponde ao conjunto R - números reais, que podem assumir qualquer valor entre dois limites.

A análise estatística contempla várias fases, que se estende desde a definição do problema a ser estudado, planeamento do estudo a desenvolver, recolha de dados, verificação dos dados recolhidos e apresentação, até à análise e interpretação dos resultados obtidos.

Das fases de análise estatística importa destacar a apresentação de resultados, que pode ser realizada recorrendo a diferentes métodos, como seja em forma de tabelas (com a totalidade dos dados, ou de frequência), gráficos e medidas descritivas da curva de frequência. As tabelas permitem apresentar valores numéricos exatos para uma leitura objetiva, enquanto os gráficos, pela apresentação visual, sintetizam grande quantidade de informação de forma facilmente perceptível.

As medidas descritivas podem ser calculadas dos dados da população, sendo neste caso designadas de parâmetros, ou calculadas de amostras, denominadas neste caso de estimadores ou estatísticas.

As medidas mais utilizadas são:

- Média aritmética – valor calculado pelo somatório dos resultados da amostra dividido pelo número de elementos da amostra;
- Moda – valor que detém o maior número de observações;
- Mediana – valor numérico que separa a metade superior da inferior de uma amostra de dados, uma população ou uma distribuição de probabilidade;
- Desvio padrão – é a raiz quadrada da variância, é a medida mais comum da dispersão estatística.

No tratamento de dados compostos por muitas variáveis, para verificar as relações entre essas variáveis, como no caso das características dos maciços rochosos é importante trabalhar conjuntamente toda a informação, pelo que na secção seguinte se aborda a análise multivariada de dados.

2.3.2 Regressão linear

Para efeitos da presente investigação, este método corresponde a uma regressão linear onde a variável independente é o espaçamento ou distância entre as frentes de escavação e a variável dependente é a qualidade do maciço rochoso, representada pelo valor de RMR.

A relação entre as duas variáveis é representada numa equação matemática, que permite modelar a variável dependente em função da variável independente.

O comportamento da variável dependente, Y, relativamente à variável independente, X, pode ser representado segundo vários modelos, como sejam:

- Linear;
- Quadrático;
- Cúbico;
- Exponencial;
- Logarítmico;
- Entre outros.

Para determinar o mais adequado, deve-se verificar qual o que melhor se ajusta aos dados observados. O valor estimado resulta do cálculo recorrendo à Equação 2.3, que determina a relação entre ambas as variáveis.

$$\gamma_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo:

γ_i - Variável explicada (dependente); é o valor que se quer atingir;

α - É uma constante, que representa a intercetação da reta com o eixo vertical;

β - É outra constante, que representa o declive (coeficiente angular) da reta;

X_i - Variável explicativa (independente) representa o fator explicativo na equação;

ϵ_i - Variável que inclui todos os fatores residuais, mais os possíveis erros de medição. O seu comportamento é aleatório, devido à natureza dos fatores que encerra. Para que essa fórmula possa ser aplicada, os erros devem satisfazer determinadas hipóteses, que são: serem variáveis normais, com a mesma variância σ^2 (desconhecida), independentes e independentes da variável explicativa X.

2.3.3 Análise multivariada de dados

A análise multivariada de dados contempla várias metodologias, abordando-se ao longo desta secção as mais relevantes, em particular as que integram as metodologias utilizadas nesta investigação como se verá no Capítulo 3.

Os primeiros estudos que contemplaram a utilização de métodos quantitativos em Ciências da Terra, ainda longe da análise multivariada de dados, foram desenvolvidos por Lyell em 1830 (Landim, 2000), para classificação de fósseis dos moluscos datados do Terceário da bacia de Paris.

O início da estatística multivariada, enquanto divisão diferenciada dentro da matemática, ocorreu no princípio do século passado, sendo os primeiros trabalhos nesta área atribuídos a Pearson, Fisher, Hotelling, Wilks e Bartlett (Reis, 2001). A análise multivariada é a área da estatística que incide sobre as relações entre as variáveis. De acordo com Davis (2002), os métodos da análise multivariada são poderosos, uma vez que permitem manipular, simultaneamente, um número significativo de variáveis que, de outra forma, seria impossível.

Segundo Landim (2000) e Bakke *et al.* (2008), entre os métodos mais utilizados em análise multivariada destacam-se:

- Matriz de correlação (MC);
- Classificação ascendente hierárquica (CAH);
- Análise de componentes principais (ACP);
- Análise fatorial de correspondências (AFC);
- Regressão múltipla;
- Análise discriminante múltipla;
- Análise multivariada de variância e covariância;
- Análise conjunta;
- Correlação canónica.

Este tipo de análise multivariada é abordada por diversos autores na sua aplicação às ciências da terra, como sejam Almeida (1983), Pereira (1983), Sousa (2000), Davis (2002), Landim (2010), entre outros.

A fundamentação teórica destas metodologias de análise multivariada de dados pode ser encontrada em diversas publicações (Davis, 2002; Hair *et al.*, 1995; Hill & Lewicki, 2007; Johnson & Wichern, 2002; Koch Jr & Link, 2002), apresentando-se nas secções seguintes uma descrição das mais relevantes para o desenvolvimento do presente estudo, como sejam a MC e AFC.

2.3.3.1 Matriz de correlação

A correlação entre variáveis constitui uma das medidas descritivas de amostras multivariadas, que permite a perceção imediata da semelhança entre as variáveis; no entanto, no caso de muitas variáveis, a análise dessas correlações pode tornar-se morosa e menos imediata mesmo que, como habitualmente, os resultados sejam sintetizados em forma de matriz (Reis, 2001). Segundo Reis (*op. cit.*) a correlação entre variáveis i e j é dada pelas Equações 2.4 a 2.6:

$$r_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii} - S_{jj}}} \quad \text{Equação 2.4}$$

Sendo a variância (S) da variável ou amostra definida por:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n [(X_u - \bar{X})^2] \quad \text{Equação 2.5}$$

E a média da variável ou amostra, definida por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n X_u \quad \text{Equação 2.6}$$

Sendo:

i e j - variáveis

r_{ij} - Correlação entre variáveis;

S - Variância da variável;

\bar{X} - Média da amostra.

2.3.3.2 Análise fatorial de correspondências

A AFC é uma metodologia descritiva / exploratória de matrizes que apresentem correspondência entre linhas e colunas. O resultado dessa análise permite explorar a estrutura de variáveis categóricas presentes na matriz (Hill & Lewicki, 2007).

Esta metodologia de análise multivariada de dados revela-se adequada para o tratamento de dados nominais, como sejam os pesos atribuídos a cada parâmetro que constitui as classificações geomecânicas, a classe de qualidade do maciço, as zonas geotécnicas do maciço, entre outros (Landim, 2010).

Segundo Oliveira & Amaral (2007), este método pode ser utilizado na análise exploratória dos dados, com o objetivo de diminuir a dimensionalidade dos dados originais, ou ser utilizado como análise confirmatória, para testar hipóteses sobre a redução dos dados a uma determinada dimensão, tendo em conta qual será a distribuição das variáveis segundo essa mesma dimensão.

Recorrendo à AFC torna-se possível analisar, simultaneamente, variáveis quantitativas e/ou qualitativas com diferentes escalas, uma vez que esta metodologia projeta as variáveis constantes em linhas e colunas no mesmo fatorial, facilitando o estudo das relações dos diferentes parâmetros com as amostras (Hair *et al.*, 1998).

Segundo Hair *et al.* (*op. cit.*), a AFC é um método de interdependência baseado na associação entre objetos e suas características descritivas, ou atributos especificados pelo analista. Os objetivos principais da aplicação deste método são relacionar categorias de características ou de amostras entre si, ou relacionar simultaneamente as amostras com as categorias de características. Uma das principais vantagens do método é representar linhas e colunas (amostras e variáveis) num único espaço conjunto. Como desvantagens ou limitações deste método, Hair *et al.* (*op.cit.*) indicam que, embora seja eficiente na análise exploratória de dados de uma forma descritiva, é pouco adequado ao testar hipóteses. A seleção da dimensionalidade dos fatores é arbitrária, resultante do operador, não seguindo um critério ou procedimento matemático.

Na AFC os dados são agrupados em categorias e os valores próprios são extraídos de tabelas de contingências. Nas tabelas de contingências, os valores originais podem ser transformados em probabilidades condicionais. Com essa transformação, as relações entre colunas e linhas da tabela transformada são as mesmas da matriz original dos dados. Assim, a análise em modo Q (variáveis) e para o modo R (amostras) são equivalentes, o que revela um espaço bidimensional, definido pelos dois vetores próprios mais importantes, ou seja, após decomposição em coordenadas principais, resulta a distribuição simultânea, tanto das amostras, como das variáveis (Landim, *op.cit.*).

Numa tabela de contingências, as observações em cada coordenada (ij) podem ser expressas como proporções do número total de observações. Se as linhas e as colunas da tabela forem independentes, as observações devem ser aproximadamente iguais ao produto das probabilidades marginais das respetivas linhas e colunas.

Conforme síntese apresentada por Almeida (2003), os procedimentos para realização da AFC são os seguintes:

- Seleção do espaço de menor dimensão (seja R^p) da matriz K de termo geral $k(i,j)$ com construção da matriz de Burt;

- Cálculo dos perfis das linhas e colunas:

$$\frac{f_{ij}}{f_i} = \frac{k(i, j)}{k(i)} \quad \text{onde} \quad k(i) = \sum_j k(i, j) \quad \text{e} \quad f_i = \frac{k(i)}{k} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$\frac{f_{ij}}{f_j} = \frac{k(i, j)}{k(j)} \quad \text{onde} \quad k(j) = \sum_i k(i, j) \quad \text{e} \quad f_j = \frac{k(j)}{k} \quad \text{Equação 2.8}$$

- Cálculo da matriz de inércia t , de termo geral:

$$t_{jj'} = \sum_i \frac{f_{ij} f_{ij'}}{f_i \sqrt{f_j f_{j'}}} \quad \text{Equação 2.9}$$

- Diagonalização da matriz de inércia e obtenção de $p-1$ valores próprios λ_α e os $p-1$ respetivos vetores próprios U_α ;
- Análise do histograma de valores próprios e escolha da dimensão do espaço cuja inércia acumulada explique uma percentagem significativa da inércia na nuvem de partida;
- Projecção das linhas i da matriz nos eixos de inércia retidos:

$$f_{i\alpha}^T = \sum_j \frac{f_{ij}}{f_i \sqrt{f_j}} U_{\alpha j} \quad \text{Equação 2.10}$$

- Projecção das colunas j da matriz nos eixos de inércia retidos:

$$f_{j\alpha}^T = \frac{1}{\sqrt{\lambda_\alpha}} \sum_i \left(\frac{f_{ij}}{f_j} \right) f_{i\alpha}^T \quad \text{Equação 2.11}$$

- Cálculo das projecções de eventuais elementos suplementares;
- Cálculo das contribuições absolutas e relativas;
- Interpretação dos gráficos planos, cruzando todos os pares de eixos retidos com base nos valores próprios, projecção dos indivíduos e propriedades, contribuições absolutas e relativas, etc.

As características do maciço rochoso apresentam variação, em muitas situações, essa variação relaciona-se com o espaço, ocorrem alterações progressivas, muitas vezes associados a fenómenos geológicos de escala abrangente como sejam falhas regionais, metamorfismo regional, entre outros, sendo importante o seu estudo, conforme se descreve na secção seguinte.

2.3.4 Geoestatística

O estudo das características do maciço é particularmente importante ao longo do alinhamento dos túneis, sendo abordado nesta secção o método matemático da geoestatística como ferramenta para a

estimação espacial das propriedades do maciço rochoso, tendo em consideração a incerteza envolvida na sua estimação.

A geoestatística assenta em modelos probabilísticos, que tomam em consideração a estrutura do fenómeno a estudar. Estes modelos têm por objetivo, não só o conhecimento do comportamento espacial e/ou temporal dos fenómenos no meio em que estes ocorrem, como também a quantificação da incerteza associada ao conhecimento desses mesmos fenómenos (Journel, 1993).

Surge nos anos 60 do século passado pela necessidade de modelação de recursos minerais (Matheron, 1963; Journel & Huijbregts, 1978; Isaaks & Srivastava, 1989; Soares, 2006) sendo posteriormente aplicada aos mais variados campos das geociências (Goovaerts, 1997; Soares, 2006) e, no âmbito da geologia da engenharia, na estimação da qualidade de rochas ornamentais, na modelação de estruturas geológicas, na simulação de reservatórios petrolíferos, entre outros (Pereira *et al.*, 1992; Albuquerque *et al.*, 1993; Pereira *et al.*, 1992; Silva *et al.*, 1997; Almeida *et al.*, 2003; Quental *et al.*, 2012; Charifo *et al.*, 2013; Matias *et al.*, 2015).

A estimação dos valores finais de uma classificação geomecânica tem sido objeto de alguns estudos, encontrando-se o recurso à krigagem ordinária na aplicação ao RQD (Ayalew *et al.*, 2002; Ozturk & Nasuf, 2002).

A estimação geoestatística dos valores de RMR também tem sido alvo de abordagem por alguns estudos, quer para aplicação a túneis (You & Barnes, 1997; Choi & Lee, 2007; Exadaktylos & Stavropoulou, 2008), quer a uma mina, como foi o caso do estudo realizado por Egana & Ortiz (2013). Para determinação da qualidade do maciço rochoso numa região em Itália, Ferrari *et al.* (2014) realizaram a estimação do RMR por duas metodologias, a krigagem ordinária e simulação estocástica. Outra metodologia para estimação do RMR também foi abordada, como é o caso da regressão multivariada (Miranda, n.d.; Miranda, 2007; Jalalifar *et al.*, 2014).

Durante a escavação de um túnel o conhecimento da possibilidade de variação da qualidade do terreno e sua antecipação foi estudada por Santos *et al.* (2014), recorrendo a metodologias matemáticas de estimação do valor de RMR no avanço seguinte.

Na aplicação a um túnel para determinara o suporte na fase de projeto, Jeon *et al.* (2009) recorreram a *ordinary kriging, indicated kriging and sequential indicator simulation*, para estimar o valor de RMR. Esta temática é da maior importância para adequação das contenções e equipamentos, embora Kaewkongkaew *et al.* (2015), indique as limitações da utilização destas metodologias de estimar a qualidade do maciço em antecipação, nomeadamente nos elevados erros que se podem verificar perante variações bruscas de qualidade do maciço rochoso.

O objetivo da geoestatística é referido por Soares (2006) como sendo a caracterização da dispersão espacial e espaciotemporal das grandezas que definem a quantidade e qualidade de recursos naturais, recursos geológicos ou outros fenómenos espaciais, em que os atributos manifestam uma certa estrutura no espaço e/ou tempo.

De uma forma intuitiva assume-se que, por exemplo, o estado de alteração dos maciços rochosos diminui em profundidade e que há uma tendência, no mesmo sentido, para as discontinuidades surgirem com abertura menor, admitindo-se de igual forma que a presença de estruturas geológicas locais, possam afetar essa tendência geral, ou seja, no caso das características geotécnicas ao longo da escavação de túneis, pode-se considerar a utilização da geoestatística como adequada.

A geoestatística pretende caracterizar a distribuição espacial das grandezas medidas de forma discreta, limitada pela amostragem ou observação pontual e a avaliação das medidas de incerteza, tendo em conta a variabilidade espacial dessas grandezas, a qualidade das observações, o tipo de modelo geoestatístico escolhido e o grau de conhecimento do fenómeno. Os métodos utilizados em geoestatística resumem-se à quantificação da continuidade espacial das características observadas, aos modelos de interpolação espacial, tendo por base a sua variabilidade (Soares, *op. cit.*).

De seguida descreve-se sumariamente algumas ferramentas geoestatísticas utilizadas na estimação do índice de qualidade RMR obtido nas frentes de túneis, com vista a antever a sua variabilidade espacial durante os trabalhos de escavação.

2.3.4.1 Estimação Geoestatística

Designa-se por estimação a avaliação de uma grandeza desconhecida, a partir de um conjunto limitado de informação. Normalmente, o que se conhece da realidade dos fenómenos do meio físico são observações discretas, limitadas em número e em representatividade espacial, que se desenvolvem no espaço e/ou no tempo, evidenciando por um lado, um comportamento irregular, que reflete a variabilidade dos vários fatores intervenientes na sua génese e, simultaneamente, uma certa estrutura no campo onde ocorrem - estas variáveis designam-se por variáveis regionalizadas.

Assim, a primeira etapa de um processo de modelação geoestatística consiste na análise estrutural do comportamento das variáveis através de uma função matemática (o semivariograma) que traduz a continuidade espacial do fenómeno no seu domínio de ocorrência (espacial ou temporal).

Representando a dispersão verificada em função de uma distância h , é possível obter uma síntese da continuidade espacial do fenómeno em estudo (Soares, *op. cit.*), conforme a Equação 2.12:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha}) - Z(x_{\alpha} + h)]^2$$

Equação 2.12

Sendo:

$\gamma(h)$ - dispersão verificada em função de uma distância h ;

$N(h)$ - número de pares de pontos para cada valor de h

$Z(x_{\alpha})$ - variável

Segundo Sousa (2000), a quantificação de variação conjunta de variáveis regionalizadas pode ser realizada recorrendo a covariância espacial cruzada, a correlação espacial cruzada e ao variograma cruzado.

O semivariograma experimental obtido das observações é representado por um variograma teórico que descreve o comportamento da variável regionalizada, ou seja, é realizada a modelação do semivariograma experimental, utilizando-se habitualmente para o efeito o modelo esférico, exponencial, gaussiano e de potência, sendo os dois primeiros os mais utilizados nas Ciências da Terra (Soares, 2006).

Tendo em conta a heterogeneidade dos maciços rochosos e a especificidade das variações das características em estudo, o ajuste do modelo teórico ao semivariograma deve ser sempre realizado de forma manual, uma vez que apenas desta forma e na posse do conhecimento do processo físico que a variável representa, é possível uma definição realista (*ib.*).

Para o presente estudo e tendo em conta os modelos de ajuste do semivariograma mais adequados nas geociências, optou-se pela utilização do modelo esférico que é descrito pelas equações 2.13 e 2.14:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ se } h < a \quad \text{Equação 2.13}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ se } h \geq a \quad \text{Equação 2.14}$$

Sendo:

C_0 - Ordenada na origem da função variograma; quando diferente de zero reflete a sobreposição de microestruturas de escala inferior à malha de amostragem e/ou erros de amostragem.

$C_0 + C_1$ - Variância da variável regionalizada, que reflete a variabilidade própria do fenómeno em estudo.

a é a amplitude que descreve a distância a partir da qual as amostras se tornam independentes, ou seja, que deixam de estar correlacionadas.

O semivariograma permite estimar a continuidade espacial de um dado fenómeno, o que possibilita caracterizar e quantificar a sua dispersão no espaço. Perante uma característica quantitativa $Z(x)$, os diagramas de representação de pares de pontos $Z(x)$ versus $Z(x+h)$ calculados com base no biponto para diferentes valores de h , permitem a estimação da continuidade espacial de $Z(x)$, podendo ser desenvolvidos cálculos para as várias direções do espaço. Com este exercício verifica-se que, à medida que os valores de h aumentam, a dispersão de valores torna-se maior e deixa de haver correlação espacial significativa entre pares de pontos (*ib.*).

Estimador Krigagem Normal

O estimador linear da krigagem normal é interpretado como uma combinação linear das medições das variável $Z(x_\alpha)$, $\alpha= 1, \dots, N$, conforme expresso na Equação 2.15:

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) \quad \text{Equação 2.15}$$

Sendo:

x_0 – localização do ponto onde se pretende estimar a variável;

λ_α - ponderador de krigagem para cada amostra $\alpha= 1, \dots, N$.

Cumpra dois critérios em relação ao erro de estimação $\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)]^* - Z(x_0)$

1 - o não enviesamento: $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$

2 - a variância de estimação é mínima: $\min \{\text{var } \varepsilon(x_0)\} \rightarrow 0$

Admitindo que a função aleatória é estacionária: $E\{Z(x_\alpha)\} = E\{Z(x_0)\} = m$; a igualdade

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha E\{Z(x_\alpha)\} = E\{Z(x_0)\}$$

é assegurada desde que a soma dos ponderadores λ seja unitária:

$$\sum_{\alpha} \lambda_\alpha = 1 \quad (\text{condição de universalidade})$$

A minimização da variância do erro, sujeita à condição de universalidade conduz a um sistema de $N+1$ equações chamado de krigagem, que, em notação matricial pode ser descrito da seguinte forma (Equações 2.16 e 2.17):

$$[K] * [\lambda] = [M] \quad \text{Equação 2.16}$$

cuja solução:

$$[\lambda] = [K]^{-1} * [M] \quad \text{Equação 2.17}$$

sendo:

[K] – a matriz de covariância entre as amostras;

[M] – a matriz de covariância entre as amostras e o ponto a estimar;

[\lambda] – a matriz dos ponderadores, solução do sistema matricial.

$$[K] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_1) & C(x_1, x_2) & \dots & C(x_1, x_N) & 1 \\ C(x_2, x_1) & C(x_2, x_2) & \dots & C(x_2, x_N) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(x_N, x_1) & C(x_N, x_2) & \dots & C(x_N, x_N) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}; [M] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_0) \\ C(x_2, x_0) \\ \dots \\ C(x_N, x_0) \\ 1 \end{bmatrix}; [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

Do segundo membro do sistema de krigagem pode deduzir-se que os ponderadores $[\lambda]$ do estimador de krigagem têm as seguintes características:

- quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar maior será o seu peso no estimador;
- quanto mais correlacionadas estiverem as amostras entre si (efeito de agrupamento ou redundância), menor será o seu peso individual na construção do estimador.

A informação fornecida pela variância de krigagem pode ser utilizada para aferir ou quantificar o erro associado à estimação. Esta medida de incerteza em torno do valor estimado reflete a geometria da malha de amostragem e a distância estrutural ao ponto a estimar.

2.3.5 Redes neuronais

As redes neuronais permitem determinar padrões dentro de bases de dados e têm sido aplicadas, quer a estudos geológicos (S. Leu & Adi, 2011), quer a estudos geotécnicos (Miranda *et al.*, 2007). Estas redes neuronais permitem verificar, por exemplo, a existência de sequências padrão na sequência de valores do índice RMR observados ao longo do alinhamento de túneis e galerias.

A utilização de redes neuronais visa solucionar problemas de reconhecimento de padrões que geralmente são baseados em um conjunto de informações previamente conhecido. Geralmente os conjuntos de dados são divididos em conjunto de treino da rede e conjunto de teste, onde o primeiro serve de base à identificação dos referidos padrões e o segundo permite aferir o erro associado à aplicação do algoritmo calculado.

As redes neuronais permitem calcular qualquer função computável, ou seja, possuem a capacidade de modelar relações lineares e não lineares.

Como principais vantagens das redes neuronais referem-se a capacidade de definir funções matemáticas através de exemplos e de generalizar, de modo a reconhecer elementos idênticos; bom desempenho adequado em tarefas pouco definidas; resultados válidos mesmo com elementos em falta; capacidade de identificar padrões, entre outras. (Moreira, 1997).

As redes neurais são sistemas paralelos complexos, baseadas nas conexões entre as várias componentes, que são dispostas de forma organizada por camadas. Cada elemento é ligado por meio de sinais *input/output* com um determinado peso associado - Figura 2.10.

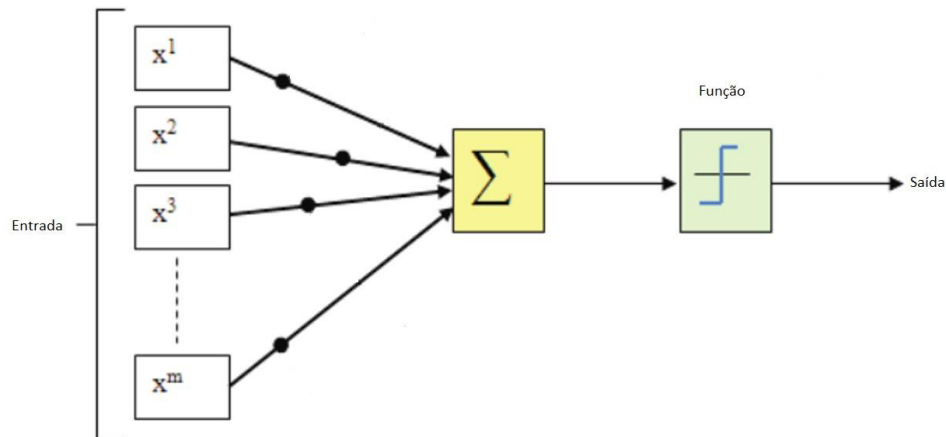


Figura 2.10 – Esquema de configuração de uma rede neuronal (Miranda, 2007)

Com a descrição das características do maciço considerada nesta secção, aborda-se de seguida a interação humana com o maciço rochoso na execução de túneis.

2.4 ABORDAGEM À CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

Conforme referido no Capítulo 1, a construção de túneis tem tido uma evolução significativa ao longo do tempo e ao longo desta secção descreve-se, de modo geral, as principais metodologias construtivas, assim como as de acompanhamento técnico neste âmbito e que se revelam importantes para o enquadramento da presente investigação.

O projeto de um túnel, em particular o nível de caracterização e definição das soluções, condicionam em parte a respetiva abordagem construtiva em maciços rochosos. A caracterização geológica e geotécnica, conforme já referido ao longo desta dissertação, assume-se como um dos principais condicionantes na definição de toda a abordagem construtiva e determinante no sucesso do projeto. Toda a informação de carácter geológico e geotécnico deve constar no relatório geotécnico, o qual deve ter o seu início nas fases prévias do projeto e ser incrementado e disponibilizado nas diferentes etapas, contendo um modelo geológico-geotécnico para a fase construtiva. Neste aspeto a existência de um relatório geotécnico de referência apresenta de modo sumário e objetivo as principais características do maciço e cenário ocorrente.

Os projetos de execução podem ter diferentes abordagens ou filosofias de conceção, desde os que assumem que a caracterização do maciço é um dado absoluto sem admitir a possibilidade de ocorrência de situações diferentes das caracterizadas, até aos que contemplam a implementação do

MO na fase construtiva, admitindo a heterogeneidade do maciço e a possibilidade de ocorrência de situações para além das preconizadas, relegando para a fase de obra a possibilidade de ajustar as soluções preconizadas à realidade com base nas características geológicas e geotécnicas observadas durante a fase de execução.

A construção de túneis em maciços rochosos reveste-se de algumas particularidades que é necessário considerar. A pormenorização do conhecimento alcançado, tendo a noção que os maciços são heterogêneos e que situações imprevistas e imprevisíveis podem ocorrer, são fatores preponderantes, que influenciam a seleção das metodologias de escavação, nomeadamente na escolha entre tuneladora (TBM) e escavação sequencial. A escavação sequencial é amplamente designada de NATM, embora incorretamente segundo Kovári (1993), uma vez que o NATM tem um significado restrito à filosofia em que se fundamenta a sua definição.

Na abordagem à construção de túneis de seguida define-se o relatório geotécnico de referência como elemento base de conhecimento das condições presente para a construção, descreve-se o método observacional, bem como os métodos de escavação e as sequências de escavação. Por último aborda-se a monitorização geotécnica e o acompanhamento técnico de obra no âmbito da geologia e geotecnia.

2.4.1 Relatório geotécnico de referência

Na sequência de várias disputas contratuais ocorridas nos EUA, devido a condicionalismos geotécnicos encontrados na fase construtiva de túneis, que levaram a que se tornasse quase impossível a realização deste tipo de obras, nos anos 70 do século XX os contratos passaram a incluir um documento designado de relatório de síntese do projeto geotécnico (Geotechnical Design Summary Report), renomeado para relatório geotécnico de referência - RGR (Geotechnical Baseline Report), já nos anos 90 do mesmo século (Rozek & Loganathan, 2009).

O RGR tem fundamentação técnica; no entanto, aproxima-se mais do conceito de um documento contratual, isto porque a filosofia que fundamenta a sua elaboração tem como objetivo apresentar toda a amplitude de cenários geológico-geotécnicos possíveis de ocorrer em determinado projeto, onde a definição dos seus limites surge na dependência do risco que o Dono de Obra pretende incorrer.

Assim, conforme referido por Cândido (2010), o RGR não é o habitual relatório geológico-geotécnico que serve de base ao projeto referido no EC7 (NP EN 1997-1, 2010).

Embora a presente investigação tenha como um dos objetivos lidar com os riscos geotécnicos na fase construtiva, independentemente da entidade a que esteja alocado, importa referir a relevância deste documento e o seu enquadramento num cenário onde a heterogeneidade dos maciços rochosos leva a atrasos na construção e a custos acrescidos, não previstos, e muitas vezes a conflitos jurídicos entre o Dono de Obra e a Entidade Executante, sendo inclusivamente identificado pelo ITIG (2012) como

uma medida de mitigação de riscos. Mas conforme apresentado, este relatório tem como principal objetivo a eliminação ou mitigação do risco de disputa jurídica derivado das condições geológicas e geotécnicas reais face às projetadas.

De um modo geral, segundo a ASCE (2007), o RGR deve conter:

- Fontes de informação;
- Descrição sumária do projeto;
- Descrição da área de implantação;
- Enquadramento geológico da área;
- Caracterização geotécnica do terreno;
- Considerações prévias sobre a conceção/projeto;
- Considerações prévias sobre o processo construtivo;
- Referências bibliográficas.

Apesar deste documento auxiliar nas disputas contratuais, também apresenta limitações, como no caso das características do maciço serem de tal modo heterogêneas que as condições encontradas são muito diferentes das constantes no RGR; ou ainda, no caso de não haver condições para realizar os estudos necessários para definir os parâmetros geotécnicos a incluir no relatório. Nestas situações, em que os valores indicados são muito diferentes dos observados, haverá garantidamente a necessidade de indenização (Cândido, 2010).

Como os estudos geológicos e geotécnicos realizados e vertidos no relatório de referência, geralmente revelam um maciço rochoso heterogêneo, com a presença de diferentes zonas, umas das abordagens mais eficientes para lidar com esse problema é o MO, que se descreve de seguida.

2.4.2 Método observacional

Os maciços rochosos são heterogêneos, apresentando incertezas quanto à variação espacial das suas características. Tendo em conta as variações inerentes ao maciço rochoso, uma abordagem ao projeto s.l. seguindo o MO é, segundo diferentes autores (Pistone & Pinto da Cunha, 1999; Powderham, 2002; Baars & Vrijling, 2005; Patel *et al.*, 2007; Schubert, 2008), uma abordagem que incorpora várias vantagens, que se traduzem ao nível técnico e financeiro.

Como referido no Capítulo 1, o MO promove a implementação de um projeto que se assume como flexível e facilmente adaptável à variação do terreno (Schubert, *op. cit.*), o que permite adequar e responder a essas incertezas e variações, quer derivem de incertezas de conhecimento (epistemológicas) dos maciços rochosos ou de variações naturais, aleatórias (Christian, 2004). São essas adaptações que vão possibilitar minimizar os correspondentes riscos, financeiros e técnicos.

As metodologias de construção de túneis em Portugal seguem rumos idênticos ao dos restantes países.

Nos túneis rodoviários da Gardunha, Régua e Varosa, foi utilizado o MO com sucesso, tendo-se alcançado uma otimização de soluções e custos das obras (Pistone & Pinto da Cunha, *op. cit.*).

Na fase de construção do túnel de Penalva, foi necessário implementar a plenitude dos princípios do MO, nomeadamente em previsões de comportamento do terreno, observação, medidas de contingência e adaptação da execução às reais condições encontradas (Caldeira & Muralha, 2004).

O MO assenta na monitorização do comportamento do maciço para definição da forma mais adequada de construção, no caso particular deste trabalho, de túneis. Este método foi utilizado na prática desde tempos remotos (Kovári & Lunardi, 2000), mas uma abordagem focalizada, foi apresentada por Terzaghi *et al.* (1996), embora sem que lhe tenha sido atribuído a designação pela qual atualmente é conhecida. Os princípios fundamentais do MO foram apresentados por Peck, 1969 e deles destacam-se os seguintes:

- i. Recurso à prospeção necessária que permita no mínimo estabelecer o padrão geral das características dos terrenos, não sendo fundamental defini-las em detalhe;
- ii. Avaliação das condições mais prováveis e dos desvios mais desfavoráveis para essas características; nesta avaliação as condições geológicas desempenham um papel fundamental;
- iii. Desenvolver o projeto com base na hipótese do comportamento esperado sob as condições mais prováveis;
- iv. Apresentação de um plano de observação para a fase de construção e cálculo dos valores admissíveis para os parâmetros a monitorizar, tendo por base as hipóteses preconizadas;
- v. Apresentação da estimativa dos valores do plano de observação tendo em conta as condições mais desfavoráveis, compatíveis com os dados disponíveis relativos às condições do subsolo;
- vi. Definição prévia de ações ou modificações do projeto, face ao eventual desvio significativo dos resultados de observação previstos;
- vii. Implementação do previsto no plano de observação e avaliação das condições reais;
- viii. Modificação do projeto face às condições reais.

Segundo o definido por Peck (*op. cit.*), o MO é flexível ao ponto de possibilitar duas abordagens diferentes ao projeto, sem que os seus princípios fundamentais sejam colocados em causa. Uma abordagem em toda a envolvimento do projeto, desde o seu início, designada de “*Ab Initio*”, e outra que pode ser implementada em qualquer altura, em projetos designados de mais tradicionais ou pré-definidos, designada por “*Best Way Out*”. Esta última abordagem é utilizada quando algum evento inesperado, não contemplado no projeto, ocorre e é necessário estabelecer uma forma de ultrapassar essa dificuldade.

O MO contempla a utilização dos dados recolhidos durante a construção, para incremento e desenvolvimento do conhecimento existente na fase de projeto, o que proporciona um

desenvolvimento com mais informação que a inicial e possibilita manter um controlo de segurança da construção (Moritz & Goldberger, 2006). Além dos dados da monitorização, na fase de construção de túneis ficam igualmente disponíveis novas informações sobre as características geológicas e geotécnicas do maciço, que devem ser cruzadas com os primeiros. Segundo o relatório 185 da CIRIA (Nicholson *et al.*, 1999), o MO é um processo contínuo de gestão integrado, de controlo da construção, de monitorização e de revisão, que permite modificação das definições preconizadas a incorporar durante ou após a construção. Todos estes processos têm de ser robustamente demonstrados. O objetivo é atingir economia sem comprometer a segurança.

O MO tem sofrido algumas alterações no sentido de o atualizar, adaptar e conciliar com novos desenvolvimentos. Wood (1987) realizou uma simplificação do método, onde os procedimentos são os seguintes:

- i. Realizar um modelo concetual;
- ii. Prever o comportamento esperado para as observações;
- iii. Observar (monitorizar) e comparar com (ii);
- iv. Verificar se as diferenças entre (ii) e (iii) são explicadas por valores de parâmetros, insuficientes de (i) ou inadequados de (i);
- v. Desenvolver uma revisão concetual do modelo;
- vi. Repetir os procedimentos de (ii), (iii), (iv) e (v), conforme apropriado.

Ulteriormente Powderham (1994, 1998, 2002) refere que na envolvência da construção atual, onde é exigido um grau de certeza no desempenho do projeto e no respetivo prazo de execução, dentro de um cenário de incerteza quanto ao comportamento do terreno e sua variação, é fundamental salvaguardar as questões de segurança. Neste sentido, Powderham & Nicholson (1996) apresentaram alterações que, genericamente, referem que as considerações iniciais para desenvolvimento do projeto devem ter por base as características mais desfavoráveis em detrimento das mais comuns, conforme indicado por Peck (1969). Perante esta envolvência, aqueles autores sugerem os seguintes princípios para o MO (Powderham & Nicholson, *op. cit.*):

- i. O projeto de base inicial deve corresponder a um nível de risco aceitável para todas as partes;
- ii. O nível de risco deve manter-se ou diminuir;
- iii. O planeamento construtivo deve ser feito por fases claramente definidas;
- iv. As mudanças adequadas devem ser implementadas progressivamente e demonstradas pelo desempenho observacional aceitável por retro análise.

Nicholson *et al.* (1999) referem ainda que aquele método permite o desenvolvimento de um maior controlo e flexibilidade dos projetos, uma maior motivação e trabalho em equipa entre as várias

entidades envolvidas na obra, adequação e gestão dos meios de construção que se traduzem numa mais-valia em termos de custo e tempo de execução, conforme esquematizado na Figura 2.11.

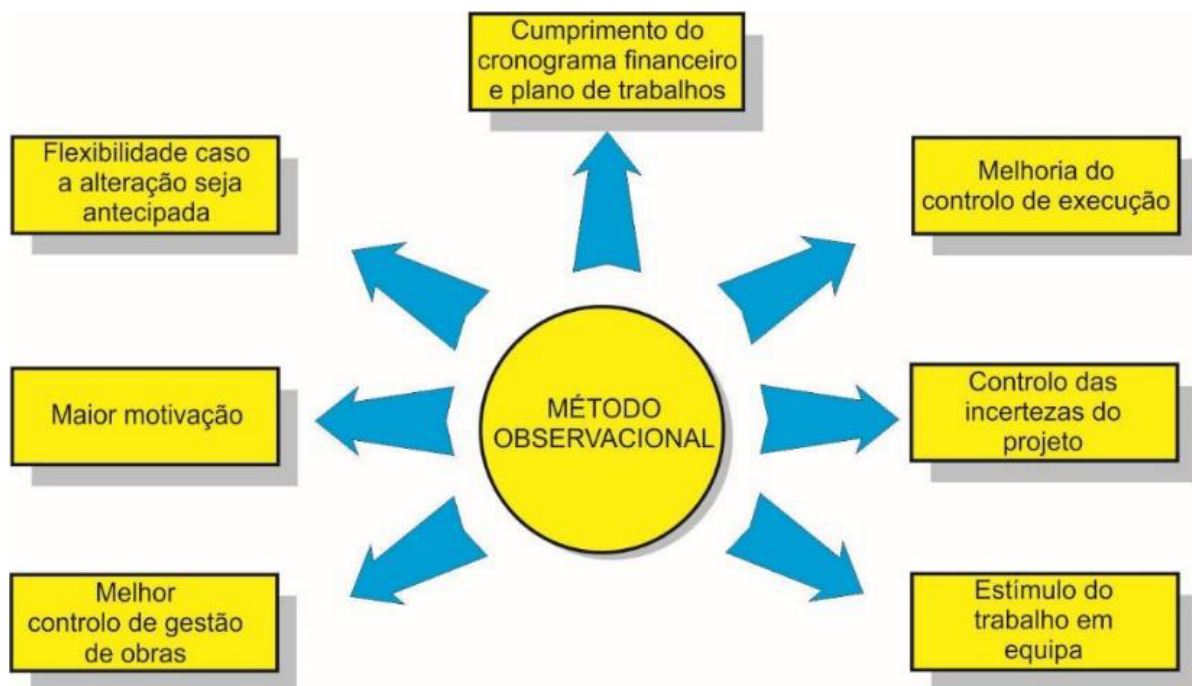


Figura 2.11 – Diagrama da influência do MO no projeto e na construção (traduzido de Nicholson *et al.*, 1999)

O desenvolvimento do projeto na fase de construção prossegue com a verificação constante, quer dos seus princípios, quer dos procedimentos executivos. Os resultados da monitorização são verificados com o objetivo de avaliar os pressupostos do projeto. Os procedimentos executivos são alvo de constante verificação e otimização, tendo sempre em conta os princípios de gestão da entidade para a qual o projeto foi realizado e em consonância com as leis e normas do país onde está a ser desenvolvido. Com base nestes resultados é realizada uma revisão do projeto e dos procedimentos, sendo verificado, por exemplo, se os critérios de alarme definidos são ultrapassados ou não. Caso os critérios de alarme sejam ultrapassados, pode ser necessário executar medidas de contingência ou emergência e a revisão é realizada no sentido de reforçar os fatores de segurança. Inversamente, se os critérios de alarme não forem ultrapassados, toda a conceção e procedimentos construtivos devem ainda ser revistos, eventualmente no sentido de aliviar os fatores de segurança inicialmente considerados.

Estes procedimentos devem ser verificados e revistos constantemente, de forma a otimizar toda a conceção e construção, conforme esquematizado na Figura 2.12.

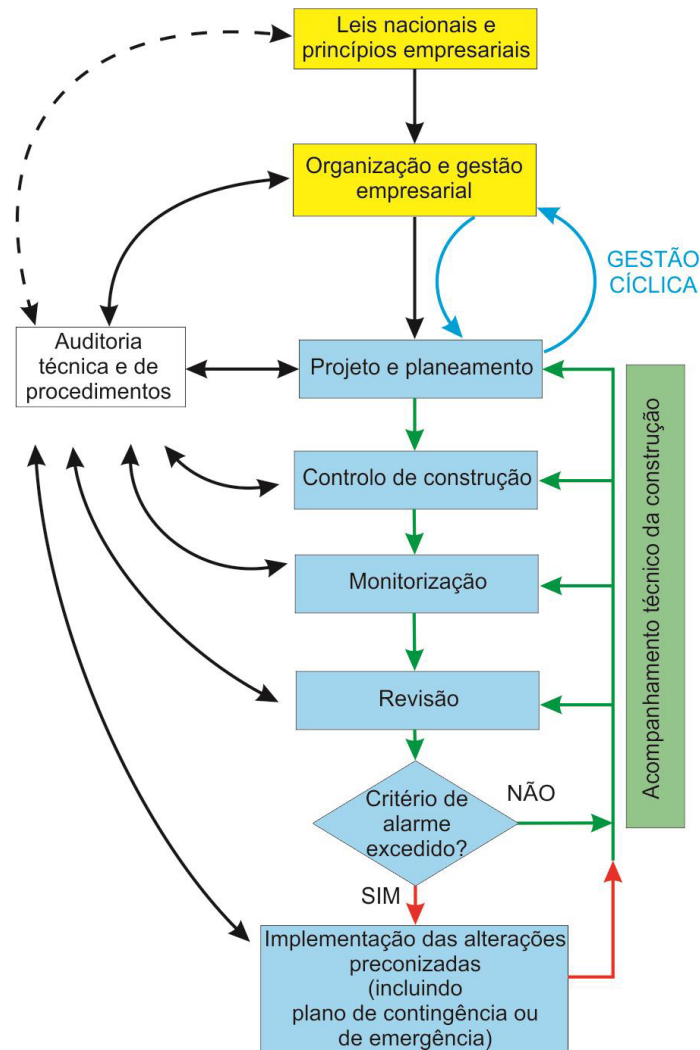


Figura 2.12 – Diagrama organizacional da aplicação do MO (traduzido de Nicholson *et al.*, 1999)

As normas mais recentes de desenvolvimento de projetos geotécnicos contemplam o recurso ao MO, como é o caso do EC7 (NP EN 1997-1, 2010), indicando a sua utilização como adequada sempre que for difícil prever o comportamento do terreno. O EC7 contempla a utilização do MO nos seguintes moldes (*op. cit.*):

“(1) Quando se utiliza o método observacional têm de ser satisfeitos, antes do início da construção, os quatro requisitos seguintes:

- devem ser estabelecidos os limites do comportamento aceitável;
- deve ser determinada a gama de variação dos comportamentos possíveis e deve demonstrar-se que existe uma probabilidade aceitável de que o comportamento real se situe dentro dos limites admissíveis;
- deve ser elaborado um plano de observação, com o objetivo de verificar se o comportamento real se situa dentro dos limites estabelecidos; isto deve ser tornado claro suficientemente cedo pela observação em intervalos curtos para que se torne possível a adoção atempada de medidas corretivas;

o tempo de resposta dos equipamentos e a análise dos resultados devem ser rápidos em relação à possível evolução do comportamento da obra;

- deve estar previsto um plano de atuação a ser adotado no caso de a observação revelar comportamento fora dos limites aceitáveis;

(2) Durante a construção, a observação deve ser efetuada tal como foi planeada e devem colocar-se, se tal for necessário, dispositivos adicionais ou proceder à substituição de equipamentos de observação. Os resultados da observação devem ser avaliados dentro de prazos apropriados e, em caso de necessidade, deve ser posto em prática o plano de atuação previamente estabelecido.”

A forma como o EC7 (*op. cit.*) aborda o MO leva a considerações por parte de alguns autores sobre a forma ampla como pode ser utilizado (Kovári & Lunardi, 2000; Patel *et al.*, 2007; W. Schubert, 2008), o que implica um refinamento da metodologia a implementar (Patel *et al.*, 2007; Zetterlund & Ericsson, 2008; Steiner & Irngartinger, 2011), salientando que todo o conjunto de informação nova obtida já na fase de construção é suscetível de ser utilizada nas revisões de projeto no âmbito do MO, quer sejam seguidas as determinações inicialmente definidas por Peck (1969), quer as ulteriores, das quais se destacam como mais relevantes as de Wood (1987), Powderham & Nicholson (1996), ou as definições presentes no EC7 (*op. cit.*).

Sobre a relação entre os processos de gestão de riscos e a utilização do MO para a fase de construção, Eskesen *et al.* (2004) referem que devem ser respeitados os pressupostos definidos no Relatório 185 da CIRIA (Nicholson *et al.*, 1999) e que a entidade segurada deve garantir, à partida, que o Projetista apresente, antes da fase construtiva, um plano e medidas de contingência pré-estabelecidas, nos quais deve incluir os meios necessários para lidar com situações imprevistas ao longo da execução da obra.

Este método pode ser utilizado com diferentes métodos de escavação, sejam eles convencionais com recurso a equipamentos mecânicos ou explosivos, ou com tuneladoras, em particular as específicas para maciços rochosos, que deixam o mesmo exposto após a escavação. Na secção seguinte descrevem-se de modo geral os dois principais métodos de escavação.

2.4.3 Escavação por métodos convencionais e tuneladora

A escolha do método de escavação é ditada pelas características geológicas e geotécnicas dos terrenos, sendo importante para o sucesso da escavação (Vallejo *et al.*, 2004). Diferentes autores caracterizaram a escavabilidade do terreno recorrendo a diversos parâmetros listados na Tabela 2.3.

A designação de escavação por métodos tradicionais é utilizada para as metodologias e processos de escavação que não utilizem tuneladora (TBM), ou seja, métodos mecânicos convencionais ou explosivos (*drill and blasting* – D&B).

Tabela 2.3 – Escavabilidade do maciço (López Jimeno, 1997)

Escavabilidade	Parâmetros para a definição da escavabilidade
Franklin <i>et al.</i> (1971)	Resistência à compressão uniaxial (RCU), espaçamento das descontinuidades, martelo de Schmidt, compressão pontual, RQD
Atkinson (1971)	RCU
Weaver (1975)	Velocidade sísmica, dureza, estado de alteração e fraturação, persistência, preenchimento e orientação das descontinuidades
Romana (1981)	RCU, RQD, abrasividade
Kirsten (1982)	RCU, RQD, Jn e Jr da classificação de Barton, posição relativa dos blocos, alteração das descontinuidades
Abdullatif & Cruden (1983)	RMR
Scoble & Muftuoglu (1984)	Estado de alteração, RCU, compressão pontual, espaçamento das descontinuidades, espessura da estratificação
Singh <i>et al.</i> (1987)	Resistência à tração, estado de alteração, abrasividade, espaçamento das descontinuidades
Hadjigeorgiou & Scoble (1990)	Compressão pontual, dimensão dos blocos, estado de alteração, disposição estrutural relativa

No caso de túneis em maciços rochosos, em alguns casos a seleção do método de escavação nem sempre é simples, subsistindo a dúvida entre o D&B e as tuneladoras (Tarkoy & Byram, 1991; Tarkoy, 1995; Nord, 2006; Kolymbas, 2008).

A escavação por métodos mecânicos tradicionais utiliza equipamentos de escavação de ataque pontual, como sejam por exemplo as retroescavadoras, giratórias com balde, giratórias com martelo pneumático e roçadoras, habitualmente utilizadas em solos ou rochas brandas, ou o “Jumbo” de furação para utilização de explosivos, neste caso utilizado em rochas resistentes.

A escavação D&B é das mais utilizadas em maciços rochosos, onde a escavação resulta de avanços sucessivos em comprimento habitualmente entre 1 m a 5 m, pela realização de um ciclo de procedimentos, conforme se ilustra na Figura 2.13, que contempla: furação, carregamento dos explosivos, detonação, remoção do escombros, reperfilamento e saneamento da superfície escavada e aplicação da contenção.

O comprimento do avanço depende da qualidade do maciço rochoso. Quando a qualidade do maciço é muito fraca os avanços são curtos, mas normalmente nunca inferiores a 1 m uma vez que, quando a qualidade do maciço se torna fraca, a sua resistência também tem tendência a ser baixa e deixa de ser necessária a utilização de explosivos para a sua escavação, sendo mais rápido e adequado proceder à escavação com recurso a outros meios mecânicos. Quando a qualidade do maciço é muito boa, o comprimento de escavação pode ser superior a 5 m, no entanto isso raramente ocorre por razões operacionais, uma vez que é esse o comprimento das barrenas de furação habitualmente utilizadas e deixa de ser produtivo acoplar uma segunda barrena.

O número de furos e sua localização, assim como o tipo e a quantidade de explosivo, o recurso a retardadores dos detonadores, etc., é definido no diagrama de fogo e depende de um conjunto de variáveis, como sejam a dimensão da escavação em secção e respetivo comprimento, as características

do maciço rochoso, a carga específica de explosivos e vibrações sísmicas geradas, entre outros (Ferreira, 2009).

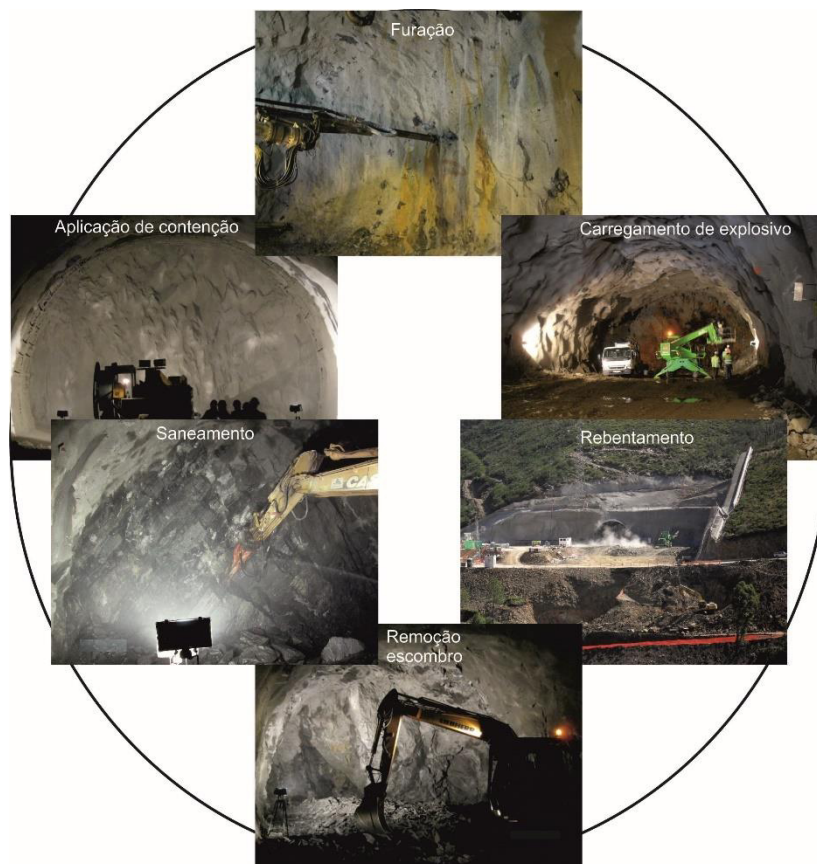


Figura 2.13 – Ilustração do ciclo de trabalhos na escavação por D&B (Santos *et al.*, 2013)

A remoção do escombros pode ser realizada de várias formas, quer pela sua recolha na frente de escavação, quer pelo seu transporte até ao exterior. As opções recaem habitualmente em pás mineiras, giratórias, *dumpers*, camiões, entre outros (Gonçalves, 2009; Ferreira, 2010; Pinto, 2010).

O reperfilamento e saneamento das superfícies escavadas é uma das etapas que mais contribui para a diminuição dos riscos de queda de blocos e cunhas soltas existentes na superfície de escavação. A utilização de explosivos ou martelo pneumático provoca perturbação no maciço rochoso para além do limite da escavação, levando à abertura das discontinuidades existentes ou à formação de outras novas, que no extremo podem levar à queda de material. A operação de saneamento realizada por meios mecânicos ou manuais, com alavanca, leva à queda imediata, mas controlada desse material, que obviamente não cairá posteriormente quando estiverem a decorrer outras atividades.

A aplicação da contenção preconizada em projeto é o elemento do processo que leva à estabilização da superfície escavada, para que outro ciclo seja iniciado dentro de condições de segurança.

Para escavação com recurso a tuneladora existem disponíveis várias opções incluídas na Tabela 2.4, encontrando-se uma síntese da sua descrição em López Jimeno (1997), ou AFTES (2000), algumas

das quais se destacam como mais adequadas para os maciços rochosos (Bieniawski *et al.*, 2009), como são os casos das tuneladoras abertas sem escudo ou com câmara de equilíbrio de pressões; no entanto, as suas limitações, em particular em maciços heterogêneos, têm sido abordadas por diversos autores (Marinos *et al.*, 1998; Steinergrímsson *et al.*, 2002; Babendererde *et al.*, 2004, 2005) o que leva à necessidade de desenvolver abordagens específicas à respetiva gestão de risco (Thomas & Banyai, 2007; Hamidi *et al.*, 2010).

Tabela 2.4 – Tipos de tuneladoras (adaptado de AFTES, 2000)

Grupo (TBM)	Categoria	Contenção
Ataque pontual	Roçadora	Nenhuma
	Escavadora	
<i>Main-beam</i>		
<i>Tunnel reaming machine</i>		
Escudo aberto	<i>Gripper</i>	Periférica
	Escudo parcial	
	Escudo simples	
	Escudo duplo	
Escudo fechado	Suporte mecânico	Periférica e frontal
	Escudo de ar comprimido	
	Escudo de lamas	
	Equilíbrio de pressões	
	Escudo misto	

Segundo Longo (2006), as tuneladoras abertas caracterizam-se por não apresentar, ou por terem apenas, um escudo dianteiro, ficando o maciço rochoso exposto. Este tipo de tuneladoras não coloca o sustimento em aduelas, típico de outro tipo de máquinas; no entanto, possui plataformas (*decks*) específicas para a aplicação de contenção, equipadas com martelos pneumáticos para colocação de pregagens e *robot* para projeção de betão.

Embora nesta investigação não se tenham utilizado como casos de estudo os túneis escavados com recurso a tuneladoras, as metodologias apresentadas no Capítulo 3, eventualmente, podem ser adaptadas para implementação em túneis onde sejam utilizadas tuneladoras com escudo aberto. Em relação às restantes tuneladoras como sejam as de escudo fechado, que não permitem a observação integral do terreno e podem colocar de imediato sustimento, normalmente constituído por aduelas pré-fabricadas de betão, a metodologia de gestão de riscos adiante apresentada (Capítulo 6), neste caso, não será aplicada diretamente.

Comparando as duas metodologias, a escavação com tuneladoras em maciços rochosos induz menor perturbação do maciço (Alber, 1996, 2000), a produtividade de escavação em condições geológicas e geotécnicas favoráveis é superior (Nord, 2006; Bieniawski *et al.*, 2007) e a secção transversal de

escavação, por ser circular, é de geometria normalmente mais estável que a maioria das utilizadas com D&B.

No caso de condições geológicas e geotécnicas muito heterogêneas, a escavação com tuneladora torna-se menos eficiente, uma vez que as adversidades encontradas são mais difíceis de ultrapassar (Babendererde *et al.*, 2004; Barton, 2006a, 2006b, 2008; Nord, 2006); nestas situações, a escavação D&B revela maior diversidade de soluções e facilidade de implementação, resultando em maior economia na respetiva transposição.

Enquadrando a comparação nos riscos geotécnicos é possível considerar que, por um lado, a escavação com tuneladora promove a estabilização do maciço; no entanto, no caso de maciços rochosos com características geológicas e geotécnicas muito heterogêneas ou de muito boa qualidade, com abrasividade elevada, a escavação com D&B possibilita a implementação de um maior leque de soluções e revela-se mais económica.

Em exclusivo para os métodos de escavação convencionais, contrapondo às TBM que escavam sempre os túneis em secção transversal plena, é possível dividir a secção transversal em várias de menor dimensão, que permitem um melhor controlo da estabilidade, como se aborda na secção seguinte.

2.4.4 Escavação sequencial

A escavação sequencial (SEM – sequential excavation method), como o nome indica, consiste em seguir uma série de procedimentos de escavação previamente estabelecidos, habitualmente com parcialização da secção de escavação final.

No caso de escavação em maciços rochosos, a escavação sequencial é habitualmente utilizada em túneis de grande dimensão de secção transversal, ou em trechos onde a qualidade geotécnica do maciço para a escavação de túneis é fraca. Em túneis com secção transversal de pequena dimensão, ou em trechos de boa qualidade geotécnica do maciço, a escavação desenvolve-se geralmente em secção total.

A dimensão da secção de escavação é um dos fatores que influencia a estabilidade da escavação (Cording *et al.*, 1972 in Barton *et al.*, 1974). Para maior controlo da estabilidade da escavação de secções de grande área, esta é muitas vezes parcializada em secções menores. Secções de escavação de menor área tornam mais fácil o controlo da estabilidade do túnel, quer pela menor necessidade de contenção, quer pela otimização da sua aplicação, em particular na estabilização de blocos e cunhas na periferia (Hoek *et al.*, 1995).

Perante esse efeito, várias foram as metodologias de parcialização da secção utilizadas ao longo do tempo, existindo algumas típicas da construção de túnel nos respetivos países, como são o caso de Inglaterra, Alemanha, Áustria, Bélgica, América e França, conforme se apresentam na Figura 2.14 (López Jimeno, 1997).

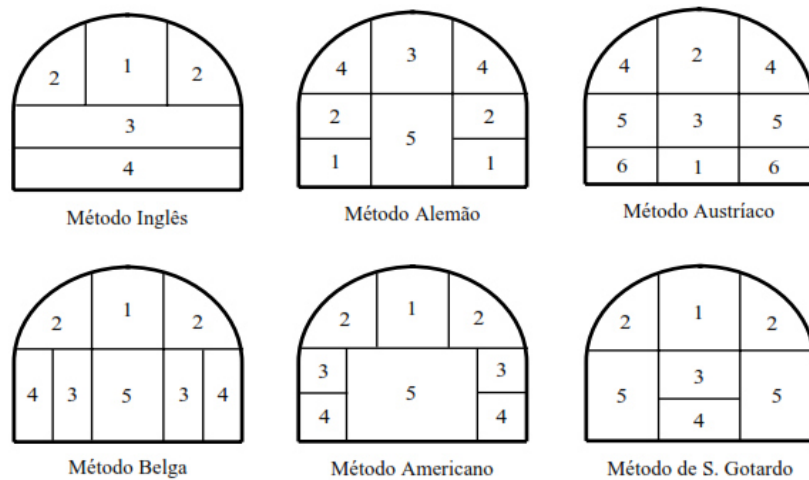


Figura 2.14 – Esquemas com a parcialização da secção de escavação adotadas em diferentes países (López Jimeno, 1997)

Na Figura 2.15 consta um esquema com a conjugação de escavação com secção transversal parcializada e a adoção de contenções flexíveis que promovem a mobilização do maciço para constituir, no conjunto, um arco de contenção das superfícies escavadas, constituem alguns dos princípios básicos apresentados por Rabcewicz (1964) em três publicações, de um método ao qual deu o nome de *New Austrian Tunneling Method* (NATM). No entanto, esta metodologia tem sido contestada ao longo dos anos, sendo apontada como uma filosofia e não como um método de escavação (Kovári, 1993, 1994, 2001a).

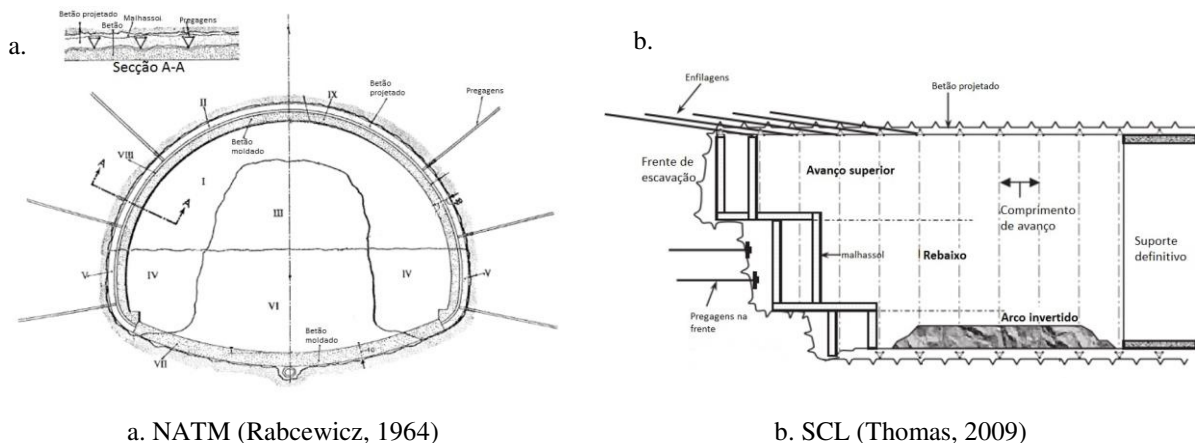


Figura 2.15 – Esquemas de parcializações da secção de escavação

Como a designação NATM se encontra envolta em alguma polémica, outras designações foram adotadas para definir os mesmos princípios como seja, nos Estados Unidos da América a *Sequential Excavation Method* - SEM e na Inglaterra a *Sprayed Concrete Lining* - SCL (Thomas, 2009; Sousa, 2010).

Independentemente do nome utilizado, os princípios que regem este tipo de metodologias ou filosofias são aplicados em inúmeros túneis em todo o mundo, em particular nos escavados em rocha com

recurso a explosivos. Segundo Muller (1990), os princípios que descrevem o NATM e servem igualmente de fundamento ao SEM e SCL, ascendem às duas dezenas. No entanto, são considerados como mais relevantes os seguintes (Bieniawski, 1989):

- i. Mobilização da resistência do maciço – a conservação do arco de terreno envolvente à escavação é o principal elemento de contenção e estabilização. A aplicação da contenção deve ser flexível o suficiente, aplicada no momento adequado, de forma a permitir a mobilização desse arco e que o mesmo se torne autoportante;
- ii. Contenção com betão projetado – a preservação do maciço na superfície de escavação é realizada com a aplicação de uma camada de betão projetado, às vezes associada a pregagens, imediatamente após a escavação, com o objetivo de manter as características de resistência do maciço, e evitar queda de material e deformações excessivas;
- iii. Monitorização – a aplicação deste método implica a observação das deformações do terreno ou do conjunto terreno/contenção, na envolvência da escavação;
- iv. Sustimento flexível – aplicação de contenção ou suportes flexíveis. A contenção é compartilhada entre o conjunto constituído pelo maciço rochoso e aplicação de betão projetado, pregagens, e eventualmente arcos metálicos, dependendo das características do maciço presente e da deformação observada;
- v. Fecho do arco invertido – a constituição de um anel devidamente contido promove a estabilização da escavação;
- vi. Contratos adequados – a adequação da contenção, face às características do maciço e deformações observadas, leva à necessidade de realizar adaptações na fase construtiva;
- vii. Classificação do maciço na frente de escavação – a caracterização do maciço presente na frente de escavação e o seu enquadramento nas classes definidas nas classificações geomecânicas ou nos zonamentos geotécnicos preconizados em projeto, permitem definir a contenção mais adequada a aplicar.

Em termos de riscos geotécnicos, apesar da ocorrência de alguns acidentes que levaram à falta de confiança destes métodos, particularmente em zonas urbanas (Atkins, 2006), a sua utilização em maciços rochosos tem-se revelado eficaz, com ampla aplicação em todo o mundo.

Qualquer projeto de túneis, independentemente do tipo de terreno, sua heterogeneidade, método ou sequência de escavação, necessita que os pressupostos assumidos sejam confirmados durante a execução, em particular a estabilidade, que pode ser avaliada na prática recorrendo a equipamentos para monitorização geotécnica, conforme se descreve na secção seguinte.

2.4.5 Monitorização geotécnica de túneis em maciços rochosos

A utilização de uma metodologia ou filosofia construtiva de túneis do tipo do NATM, SEM ou SCL, tem como um dos procedimentos fundamentais a monitorização da resposta elastoplástica do maciço, que resulta na sua convergência/confinamento (Mahtab & Grasso, 1992).

A geometria da secção transversal do túnel deve promover a estabilização, com a tensão compressiva a ser dirigida para o interior do maciço de forma a tornar-se autoportante.

Caso o maciço não seja autoportante, torna-se necessária a aplicação de contenção para garantir a estabilização do túnel; no entanto, essa contenção não pode ser excessivamente rígida, que impeça a mobilização do maciço enquanto elemento estabilizador, nem demasiado flexível que permita deformação excessiva e o conseqüente colapso. Conforme consta nas Figuras 2.16 e 2.17, a contenção também não deve ser aplicada muito cedo, nem demasiado tarde, de forma a limitar, no primeiro caso, a deformação e impedir a mobilização do arco autoportante e, no segundo, deformação excessiva que leve ao colapso (HSE, 1996; Hudson, 1993; Kovári, 1993).

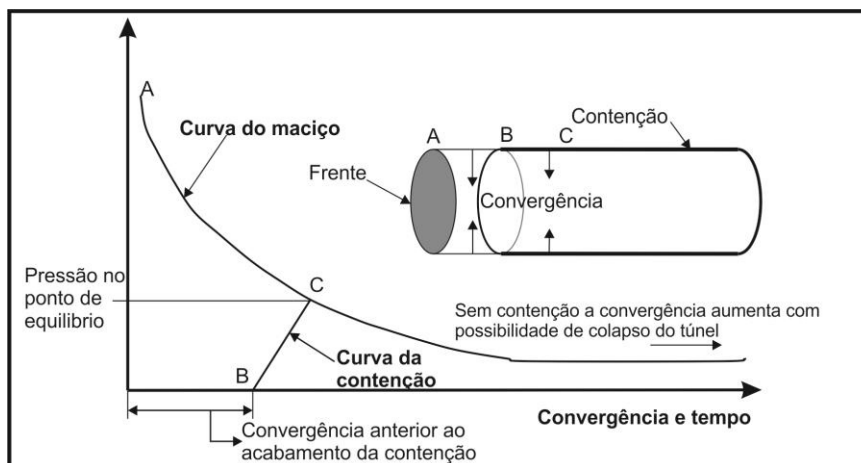
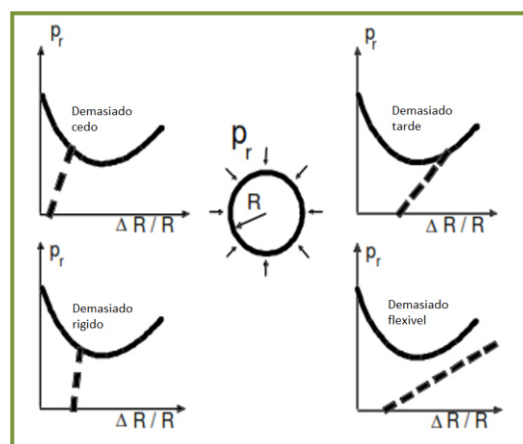


Figura 2.16 – Ilustração de curva de resposta no maciço (adaptado de HSE, 1996)



P_r – pressão na contenção; ΔR – convergência; R – raio do túnel

Figura 2.17 – Gráficos de curvas de resposta do maciço com tempo e comprimento de escavação (Muller & Fecker, 1978 in Kovári, 1993)

A monitorização dessas deformações pode ser realizada recorrendo a vários tipos de instrumentos, quer instalados a partir da superfície, quer montados a partir do interior do túnel.

O tipo, quantidade e local de instalação de instrumentos depende do contexto em que o túnel se encontra. Um túnel com pequeno recobrimento, no meio de uma cidade, tem um plano de instrumentação e monitorização diferente do de um túnel profundo, sem qualquer estrutura/infraestrutura na envolvente (Dunnicliff, 1988).

Nos túneis em fase de construção, as deformações que habitualmente se monitorizam, quer do maciço, quer das estruturas envolventes, resultam da medição de distância, pressão, tensão e inclinação. Para tal, encontram-se disponíveis no mercado os mais variados tipos de equipamentos e dispositivos de observação, específicos e adequados para aplicar em cada situação.

No caso de túneis em maciços rochosos fora do ambiente urbano, como são os casos em estudo (Capítulo 4), o habitual é a monitorização externa estar limitada aos emboquilhamentos, por exemplo através da instalação de alvos topográficos, marcas de superfície, extensómetros verticais e inclinómetros.

A monitorização da convergência/confinamento do maciço pelo seu interior, conforme esquematizado na Figura 2.18, pode ser realizada por vários dispositivos de observação indicando-se, a título de exemplo, os extensómetros, as células de medição de pressão, as células de medição de tensão em ancoragens, os *strain gages*, os piezómetros, os clinómetros, os fissurómetros, os inclinómetros, ou os convergenciómetros.

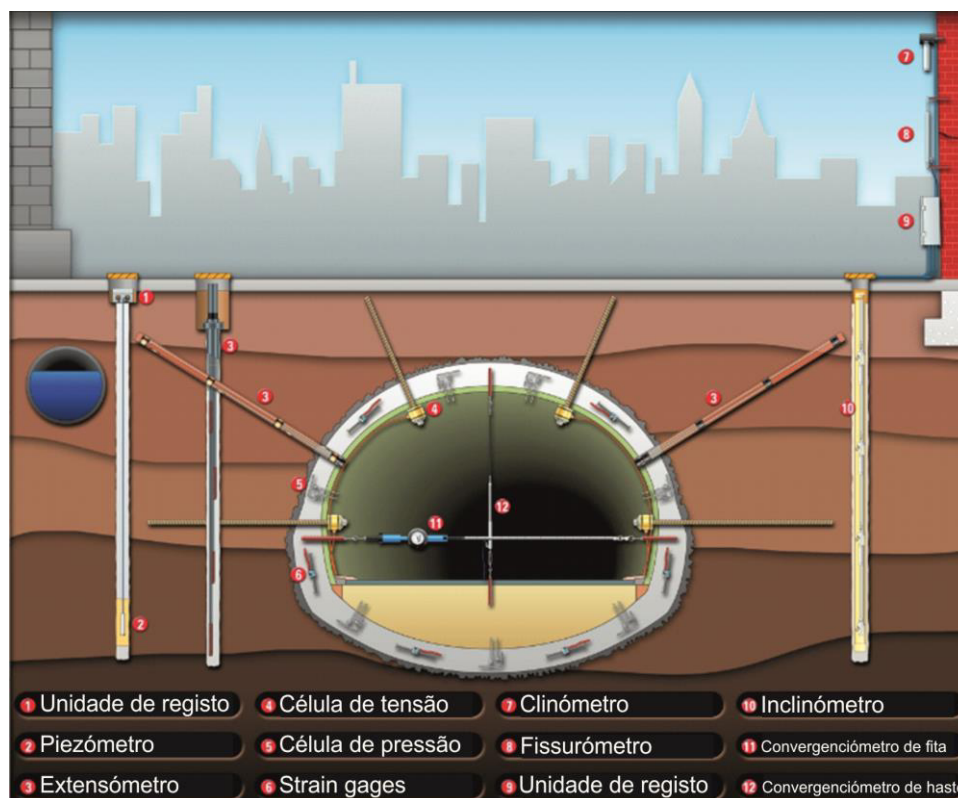


Figura 2.18 – Ilustração de dispositivos de observação num túnel em meio urbano (Geokon, 2013)

Nos casos em estudo, por serem em maciços rochosos, fora de ambiente urbano e com grande recobrimento, as deformações do maciço foram monitorizadas pelo método genericamente designado de convergências, conforme descrito pela ITA/AITES (2011).

A monitorização de convergências por esta metodologia consiste na leitura da distância entre pontos fixos de uma determinada secção transversal do túnel, que normalmente se designam de cordas. Para tal, são materializados pontos fixos na periferia da escavação, pela instalação de varões de aço, solidários com o maciço e/ou contenção aplicada, onde são colados alvos refletores.

O número de pontos fixos a instalar, e consequentemente o número de cordas em leitura, é normalmente definido no projeto, sendo habitual a implantação de três pontos para túneis de pequeno diâmetro e cinco pontos para túneis de maior diâmetro, dispostos com as configurações esquematizadas na Figura 2.19. A numeração dada a cada um dos alvos também pode variar em cada projeto.

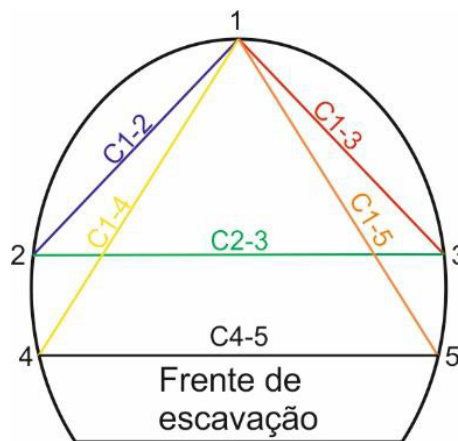


Figura 2.19 – Esquema de configurações de ponto e cordas de uma secção de convergências

A medição de convergências por este processo é realizada recorrendo a uma estação total de elevada precisão e exatidão. A utilização deste tipo de equipamento para realizar as leituras, revela várias vantagens em relação aos convergenciómetros (de haste ou de fita) e células de medição de carga em pregagens ou de pressão entre a contenção e o terreno, uma vez que a instalação dos equipamentos de apoio é muito rápida e pode ser realizada por elementos não especializados, as leituras não interferem com a restante produção da obra, não há obstrução das vias e não são necessários meios elevatórios. A leitura efetuada com aquele equipamento topográfico, para além de monitorizar a diferença entre os pontos (cordas), também permite acompanhar o posicionamento tridimensional de cada alvo topográfico (Machado, 2003).

A monitorização e interpretação da convergência do maciço, embora tenham de ser cuidadas e apresentem limitações (Oreste, 2009) são fundamentais para aplicar toda a filosofia construtiva acima referida e encontrar o ponto ótimo para aplicação de contenção, assim como a quantidade ótima de

contenção a aplicar (Guenot, 1982; Barlow, 1986; Carranza-Torres & Fairhurst, 2000; Graziani, 2000; Panet & Panet, 2001).

A análise e interpretação das curvas de reação do maciço, a partir da projeção da deformação ao longo do tempo, permitem verificar o comportamento da escavação em termos da sua estabilidade, conforme mostra a Figura 2.20 e desenvolver intervenções adequadas, quer no âmbito do MO, quer de uma gestão de riscos geotécnicos implementada na fase construtiva.

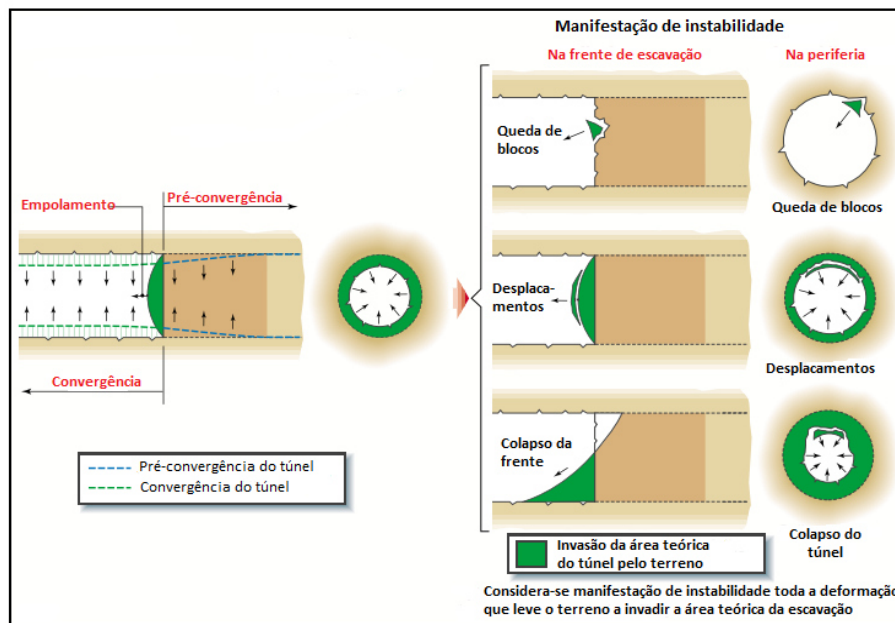


Figura 2.20 – Ilustrações da deformação e potenciais instabilidades de um túnel (Lunardi, 2000)

Segundo Longo (2006), a monitorização das deformações do maciço num túnel, permite minimizar o risco em várias vertentes:

- Envolvente da escavação, como seja edifícios ou infraestruturas;
- Própria obra, na deteção de situações imprevistas;
- Enquadramento com níveis de alarme definidos;
- Registo para situações futuras dentro do mesmo enquadramento.

Contudo, é necessário ter presente que, em maciços rochosos, o comportamento face à escavação não se resume às deformações elasto-plásticas, podendo estar presente outro tipo de roturas, mais frágeis, conforme se esquematiza na Figura 2.21. Neste tipo de roturas frágeis é necessário ter em consideração que a eficácia é limitada porque a monitorização por estes processos e metodologias é pontual, sendo necessário efetuar inspeções visuais.

Os planos de instrumentação e de monitorização dos túneis devem ser definidos na fase de projeto, mas é na fase construtiva que são implementados, fazendo parte do acompanhamento técnico da obra.

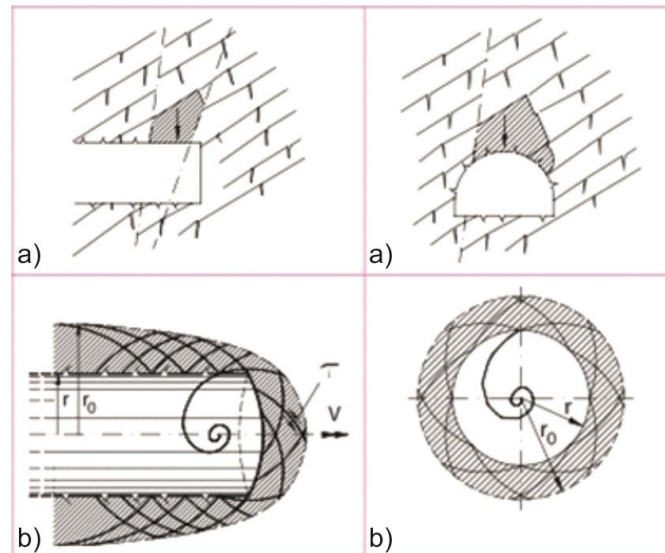


Figura 2.21 – Esquemas associados ao comportamento do maciço rochoso. a) rotura por queda de bloco e cunhas; b) rotura generalizada por deformação elasto-plástica (Lunardi, 2008)

Na secção seguinte é feita uma descrição sumária dos trabalhos geralmente realizados no âmbito desse ATO.

2.4.6 Acompanhamento técnico de obra - ATO

Na fase de construção de túneis já existe, habitualmente, disponível informação sobre as características do maciço, herdadas das fases de estudo anteriores. Em princípio, o comportamento do terreno perante a escavação também já se encontra identificado; porém, nesta fase, é fundamental aprofundar o conhecimento existente, pelo que os trabalhos a desenvolver no ATO devem incluir principalmente:

- Desenvolvimento dos estudos realizados nas fases anteriores;
- Levantamento das características do maciço;
- Classificação geomecânica do maciço escavado;
- Instrumentação e monitorização das deformações;
- Emissão de relatórios interpretativos dos dados recolhidos;
- Emissão de documentos com descrição de situações particulares diferentes do previsto;
- Emissão de documentos com o cenário mais provável para o terreno a escavar face à nova informação que fica disponível.

Para o acompanhamento geológico e geotécnico da execução de túneis em maciços rochosos, conforme indicado por vários autores (Oliveira, 1977; Costa-Pereira, 1985; Basto, 1998; Palmström, 1995; Plasencia, 2003; Brady & Brown, 2005), existem vários parâmetros que devem ser

preferencialmente considerados. De entre esses parâmetros destacam-se os que servem de base à realização das classificações geomecânicas (Romana, n.d.; Santos & Olivença, 2012), nomeadamente os seguintes:

- Estado de alteração e fraturação (ISRM, 1981);
- Resistência à compressão uniaxial - RCU (ISRM, 2007);
- Compartimentação do maciço rochoso e estimação do *Rock Quality Designation* – RQD (Deere, 1989), por aproximações empíricas a partir dos dados da fraturação (Priest & Hudson, 1976; Bieniawski, 1989; Palmström, 2005);
- Atitude das descontinuidades (ISRM, *op. cit.*);
- Espaçamento das descontinuidades (*ib.*);
- Características das descontinuidades (continuidade, rugosidade, ondulação, abertura, preenchimento, alteração das superfícies, ISRM, 2007);
- Afluência de água;
- *Rock Mass Rating* - RMR (Bieniawski, 1989);
- Índice de qualidade Q (Barton, 2002);
- Zonamento geotécnico do maciço.

Conforme referido por Barton & Bieniawski (2008) e A'ssim & Xing (2010), entre as classificações geomecânicas mais utilizadas em todo o mundo encontra-se a de Bieniawski (1989), inicialmente apresentada em 1973, que contou com várias revisões até à última versão de 1989 e a de Barton, Lien e Lunde (Barton *et al.*, 1974), que foi desenvolvida entre 1971 e 1974 e tem como última versão uma atualização realizada em 2002 (NGI, 2013).

A classificação de Bieniawski (1989) resulta no valor de RMR que é obtido por ponderação de seis características do maciço, conforme a Equação 2.18:

$$\text{RMR} = \text{P(rcu)} + \text{P(rqd)} + \text{P(esp)} + \text{P(h2o)} + \text{P(desc)} + \text{P(ori)} \quad \text{Equação 2.18}$$

Sendo:

RMR - *Rock Mass Rating*;

P(rcu) - Ponderação do valor de resistência à compressão uniaxial;

P(rqd) - Ponderação do valor do *rock quality designation* - RQD;

P(esp) - Ponderação do espaçamento entre descontinuidades;

P(h2o) - Ponderação das condições de afluência de água;

P(desc) - Ponderação das características das descontinuidades (resulta da ponderação das características de persistência, rugosidade, abertura, preenchimento e alteração);

P(ori) - Ponderação da orientação das descontinuidades em relação ao eixo do túnel.

A classificação de Barton et al. (1974) é o produto de fatores que caracterizam a compartimentação do maciço, a resistência das descontinuidades ao corte e influência do estado de tensão na estabilidade, conforme Equação 2.19.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad \text{Equação 2.19}$$

Sendo:

Q - *Rock mass quality*;

RQD - *rock quality designation*;

J_n - Ponderação do número de famílias de descontinuidades;

J_r - Ponderação da rugosidade das descontinuidades;

J_a - Ponderação da alteração das descontinuidades;

J_w - Ponderação da afluência de água;

SRF - Ponderação do estado de tensão.

A medição e determinação de características geotécnicas do maciço em fase de construção levam à necessidade de adoção de metodologias que sejam compatíveis com a dinâmica de execução. Tal como a filosofia inerente à determinação do *Geological Strength Index* - GSI (Marinos & Hoek, 2000) torna-se mais importante e real a determinação rápida de um intervalo de valores que caracterize o maciço, que um valor exato que demore muito tempo a ser obtido, e que obrigue à paragem dos trabalhos com as resultantes penalizações económicas e de prazos.

A caracterização sistemática do maciço rochoso em túneis, realizada de forma contínua, à medida que a escavação avança, só pode ser alcançada com metodologias que possibilitem a determinação imediata de parâmetros, isto porque, em parte, essa caracterização permite verificar o real comportamento do maciço face à escavação e enquadrar essas características e comportamento com as medidas de estabilização da escavação preconizadas no projeto.

Um dos aspetos relevantes que influencia a estabilidade da escavação é a aplicação da contenção dentro do tempo de autossustentação do maciço. Efetivamente, o tempo máximo em que o maciço é autoportante apenas é conhecido se ocorrer colapso. Como o colapso da escavação é o que se pretende evitar, é possível ter uma ideia teórica do tempo de autossustentação pelo ábaco apresentado por Lauffer (1958 *in* Bieniawski, 1989), atualizado por Barton & Bieniawski (2008) - Figura 2.22.

A utilização de metodologias morosas deixa de fazer sentido, quando a obtenção dos resultados não é alcançada em tempo útil para a determinação do comportamento do maciço e, conseqüentemente, o devido enquadramento para definição das medidas necessárias à estabilidade, colocando em causa a segurança e limitando a produtividade de execução.

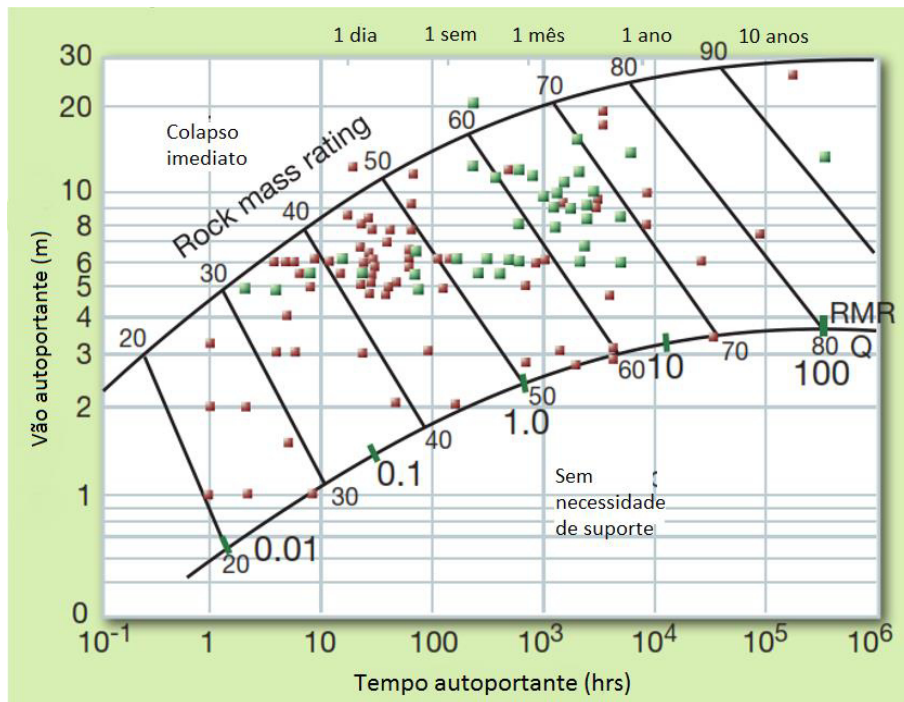


Figura 2.22 – Gráfico de tempo de autossustentação do maciço (Barton & Bieniawski, 2008)

Com o nível de importância da correta caracterização do maciço rochoso, surge a capacidade de tratamento de toda a informação em tempo útil e a sua divulgação às diferentes entidades relacionadas com a construção para que, em caso de necessidade ou relevância, se possam tomar e implementar decisões em tempo útil.

Neste último aspeto, é relevante a fase construtiva ser acompanhada, em permanência, por técnicos experientes na área da engenharia geológica. A presença de elementos técnicos representativos de cada uma das entidades envolvidas na obra, como sejam Dono de Obra, Entidade executante, Fiscalização e Projetista também se reveste de particular importância na agilização do processo de circulação de informação e na tomada de decisões, em caso de necessidade.

Com o objetivo de otimizar a produtividade e promover uma maior interação entre o projeto e a construção, Grasso (2008) apresenta os Planos para Avanço do Túnel – PAT, um documento que resume e sistematiza a apresentação da informação que fica disponível sobre as condições geológicas e geotécnicas reais e os resultados da monitorização.

Trata-se de uma abordagem de acompanhamento da fase construtiva, utilizada na prática em Portugal há muitos anos em documentos com outras designações, como Notas Técnicas ou Instruções Complementares de Execução. O PAT consiste num método de acompanhamento flexível e interativo do projeto, normalmente enquadrado pelo MO, onde a análise de situações específicas ou a adequação às reais condições observadas, permite um maior controlo no plano de gestão de riscos e a sua integração com a gestão de construção, de forma a promover a segurança e qualidade de execução - Figura 2.23.



Figura 2.23 – Diagrama de aplicação do plano de avanço do túnel (adaptado de Grasso, 2008)

No âmbito da gestão de riscos geotécnicos, torna-se relevante que o acompanhamento geológico e geotécnico realizado na fase construtiva inclua um documento específico, dedicado à gestão de riscos. Segundo Longo (2006), na fase construtiva de túneis os documentos de gestão de riscos geotécnicos devem incluir, no mínimo, os seguintes elementos a considerar:

- i. Perigos e eventos associados, presentes na área de afetação dos trabalhos (incluindo-se a área da obra, vazadouros, acessos, etc.);
- ii. Descrição das consequências de cada perigo;
- iii. Identificação de riscos, sua análise e avaliação;
- iv. Medidas de mitigação ou eliminação dos riscos;
- v. Previsão dos efeitos da implementação de medidas mitigadoras;
- vi. Alocação da responsabilidade do risco.

Todos os documentos devem ser emitidos com um carácter periódico, mas deve-se considerar também a sua emissão, com carácter excepcional, sempre que ocorram situações particulares que o justifiquem. Os conceitos e definições de cada uma das áreas contempladas nesta investigação ao longo deste capítulo são abordados de modo específico no Capítulo 3, revelando-se a sua conjugação de modo a permitir responder aos objetivos definidos.

3. METODOLOGIAS E PRESSUPOSTOS SUBJACENTES

Ao longo deste capítulo descreve-se uma nova abordagem à gestão de riscos geotécnicos na construção de túneis em maciços rochosos. Para uma gestão de riscos mais eficiente dividiu-se a fase construtiva em quatro etapas (Secção 1.4). Para cada uma, foram selecionadas as metodologias de diferentes áreas de conhecimento que, conjugadas, se revelam adequadas para lidar com os principais riscos geotécnicos potenciais.

Os principais documentos que guiam a implementação da gestão de riscos em túneis (BTS, 2003; Eskesen *et al.*, 2004; ITIG, 2006), assim como a maioria da bibliografia disponível, abordam a questão da identificação de perigos e riscos com uma base teórica. Para a fase de construção é importante a existência de métodos que permitam a identificação prática e adequada à dinâmica da execução, quer de riscos residuais que não foram mitigados ou eliminados em fases anteriores, quer de eventuais novos perigos e correspondentes riscos que possam advir ou, caso o processo não exista em fases precedentes, possibilitar gerir todos os riscos geotécnicos na fase construtiva.

Conforme referido no Capítulo 1, a gestão de riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis em maciços rochosos tem de responder a situações distintas, pelo que foram identificadas quatro etapas, de forma a adequar e otimizar as metodologias utilizadas, nomeadamente:

- i. Início da construção – riscos inerentes ao nível de conhecimento e elementos disponíveis sobre o projeto em questão;
- ii. Trecho de túnel a escavar – riscos que surgem na sequência da heterogeneidade natural do maciço rochoso e da impossibilidade de prever com precisão as reais condições existentes em antecipação;
- iii. Frente de escavação – riscos decorrentes da qualidade do terreno, capacidade de o caracterizar geotecnicamente e promover a sua estabilização com recurso a meios adequados;
- iv. Trecho de túnel escavado – riscos na sequência da garantia das condições de estabilidade ao longo do tempo, fundamental para a segurança e operacionalidade.

Esta divisão permite individualizar situações que, embora interligadas, pela sua especificidade é relevantes considerar numa análise, avaliação e procedimentos de gestão de risco exclusivos, conforme consta no diagrama da Figura 3.1.

As metodologias de gestão de riscos na fase construtiva, face às condições geológicas e geotécnicas reais do maciço rochoso, devem passar pela avaliação conjugada dos dados disponíveis de projeto e pela sua contínua atualização e revisão, face aos elementos obtidos no decurso da construção, uma vez que correspondem à realidade das condições e não a estimativas a partir de dados da prospeção, em

regra pontuais, e extrapoladas com base em interpretações subjetivas, realizadas em fases de estudo anteriores.

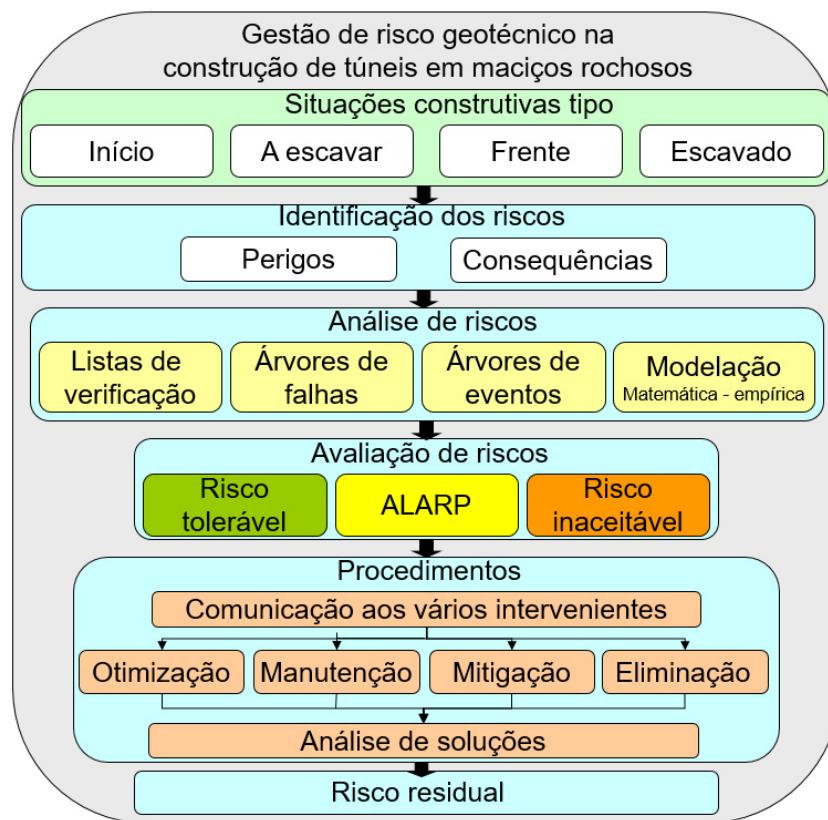


Figura 3.1 – Diagrama da metodologia de gestão de riscos na fase construtiva

A gestão de riscos geotécnicos implementada na fase construtiva tem de permitir:

- i. Primeira etapa - avaliar o trabalho já realizado neste âmbito em fases precedentes do processo;
- ii. Segunda etapa - gerir os riscos geotécnicos decorrentes da atividade construtiva, onde a escavação assume quase a totalidade da relevância e a interação entre as características do maciço e as metodologias e procedimentos construtivos adotados ditam os principais riscos geotécnicos envolvidos;
- iii. Terceira etapa - responder aos riscos inerentes à heterogeneidade do maciço rochoso no alinhamento preconizado e na limitação ao seu conhecimento integral, quer nas fases precedentes, quer em antecipação na fase construtiva.

Com a presente investigação, disponibiliza-se uma metodologia de gestão de risco geotécnico que se pretende de fácil implementação, com respostas céleres, adequadas ao ritmo construtivo, que aproveita o trabalho habitualmente já realizado na construção de túneis, como sejam a caracterização geológica e geotécnica, a aplicação de classificações geomecânicas e de observação geotécnica; o incrementa

com aplicação de ferramentas geomatemáticas e o desenvolve na adaptação às metodologias de gestão de riscos, recorrendo às listas de verificação, às árvores de eventos e ao método observacional. Desta forma, a metodologia proposta é desenvolvida e aplicada nesta investigação conforme se resume na Figura 3.2 e que se passa a detalhar.

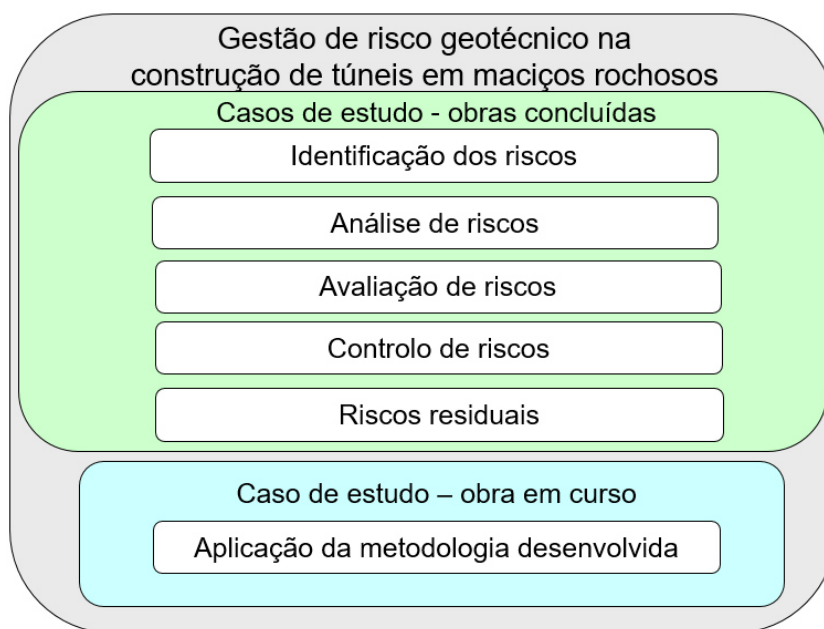


Figura 3.2 – Diagrama da metodologia geral da presente investigação

Conforme referido anteriormente, inicialmente analisam-se casos de túneis já construídos, utilizando-se os dados referentes a registos de perigos e riscos ocorridos, para validar e complementar listas de verificação compiladas da bibliografia.

Os cinco casos de obras hidráulicas já concluídas (Capítulo 4) servem ainda de base para a deteção de riscos geotécnicos associados à heterogeneidade dos maciços rochosos, pela aplicação de metodologias de estimação da qualidade do maciço por retro análise e ainda, oferecendo diretrizes para realização de árvores de eventos semiquantitativas.

A metodologia desenvolvida é aplicada a um caso de obra em curso, de modo a validar a sua operacionalidade e eficiência na gestão de riscos geotécnicos. Este caso de estudo teve um período de interregno devido a ordem judicial e política, tendo a execução sido realizada por diferentes entidades; contudo os procedimentos de acompanhamento no âmbito da geologia e geotecnia permaneceram iguais nas duas fases.

Na sequência dos procedimentos de gestão de risco, um dos iniciais é a deteção para que se possam identificar os riscos na aplicação a casos concretos, surgindo de seguida a análise de risco recorrendo a uma metodologia selecionada pela sua adequação à situação em concreto, como se verifica na secção seguinte.

3.1 METODOLOGIAS DE DETECÇÃO E ANÁLISE DE RISCO

Na identificação de riscos presentes em cada uma das quatro etapas da fase construtiva são utilizadas as descrições presentes na bibliografia, assim como as observadas nos casos de estudos.

Para análise de risco a realizar em cada uma das etapas, são utilizados métodos recomendados pela ITA para aplicação em túneis (Eskesen *et al.*, 2004), tais como listas de verificação, árvores de falhas, árvores de eventos (Ericson, 2005) e uma abordagem de estimação da qualidade do terreno em avanço (Fenton & Griffiths, 2008).

Tendo em consideração o faseamento construtivo nas diversas situações “tipo”, procura-se aplicar, em cada uma delas, o método, ou métodos, mais adequados para análise do respetivo risco geotécnico.

As listas de verificação, pela sua facilidade de implementação, surgem como adequadas a quase todas as situações, possibilitando conferir a existência de informação importante para o decorrer da construção, ou a implementação de procedimentos para a produtividade dentro dos critérios de segurança.

As árvores de falhas como são um método dedutivo e permitem determinar as sequências e combinações de eventos que levam ou podem levar a uma falha do sistema, assume-se como adequada na identificação dos eventos associados à estabilidade do túnel na frente de escavação uma vez que, o número de eventos e sua conjugação que podem levar a uma falha do sistema são elevados.

As árvores de eventos revelam-se adequadas para aplicar na análise da frente de escavação e na zona já escavada porque permitem organizar o desencadear de acontecimentos e suas interligações, que levam a situações de risco. Para cada um dos ramos representativo de interligações específicas de acontecimentos é possível, caso exista uma base de dados suficiente, calcular a probabilidade de ocorrência.

Os métodos matemáticos para estimação de características geológicas e geotécnicas aplicadas às mais variadas situações têm sido abordados por diversos autores (Brito *et al.*, 1992; Pereira *et al.*, 1994; Soares, 1989; Almeida, 2003; Folle, 2009; Almeida 2010; Quental *et al.*, 2012; Charifo *et al.*, 2013; Matias *et al.*, 2015), destacando-se para aplicação nesta investigação a krigagem (Soares, 2006; Yamamoto, 2009; Guimarães, 2012) e as redes neuronais artificiais (Miranda *et al.*, 2006; Leu & Adi, 2011).

Nos casos de estudo disponíveis, as situações de ocorrência de risco que permitam o cálculo de probabilidades associadas são escassas e, como tal, com pouco significado em termos práticos, ou seja, calcular a probabilidade associada a cada evento e conseqüente falha do sistema leva a pouco rigor, devido à limitação do número de casos disponível. Perante este problema, o recurso a uma análise semiquantitativa, pela estimativa de probabilidades, baseada na experiência em outras obras do género e recorrendo aos elementos disponíveis na bibliografia, resulta numa metodologia de aproximação realista ao objetivo pretendido (Caldeira, 2005).

As análises de risco por árvores de eventos têm sido utilizadas em barragens de terra com resultados aceitáveis (Ladeira *et al.*, 2007; Pimenta, 2008; Espósito *et al.*, 2010), onde é considerada a relação entre a ocorrência por descrição qualitativa e a probabilidade conforme se apresenta na Tabela 3.1.

Numa aplicação de análise semiquantitativa de risco num túnel, Shariar *et al.* (2008) considera uma escala de 1 a 5 para a verosimilhança, conforme classificação apresentada na Tabela 3.1 e para a consequência conforme consta na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Relação entre descrição qualitativa e probabilidade e classificação (adaptado de Vick, 2002 e Shariar *et al.*, 2008)

Descrição qualitativa	Probabilidade	Intervalo de probabilidade	Verosimilhança	Classificação
Impossível	0,01	0,0 - 0,05	Improvável	1
Improvável	0,1	0,02 - 0,15	Remota	2
Provável	0,5	0,45 – 0,55	Provável	3
Muito provável	0,9	0,75 – 0,9	Esperada	4
Certo	0,99	0,9 – 0,995	Frequente	5

Tabela 3.2 – Classificação das consequências de eventos perigosos (adaptado de Shariar *et al.*, 2008)

Consequência	Classificação	Descrição
Insignificante	1	Evento não provoca quaisquer danos ou atrasos. Sem feridos
Moderado	2	Evento provoca danos menores e/ou atrasos até 2 dias. 1-2 feridos ligeiros
Grave	3	Evento provoca danos reparáveis e/ou atrasos até 1 semana. > 2 feridos ligeiros
Crítico	4	Evento provoca danos reparáveis significantes e/ou atrasos entre 1 a 2 semanas. Feridos graves
Catastrófico	5	Evento provoca danos irreparáveis e/ou atrasos superiores a 2 semanas. Fatalidades

Tendo em consideração as várias situações em que se divide a fase construtiva para a gestão de riscos, seguidamente especifica-se a metodologia de deteção e análise de risco para a fase inicial da construção.

3.1.1 Fase inicial da construção

A metodologia utilizada para esta situação da fase construtiva, passa pela compilação dos elementos disponíveis na bibliografia, aos quais se adicionaram as situações ocorrentes nos casos de estudo em análise. Com estes elementos definem-se os métodos de análise de risco mais adequados para esta situação que, posteriormente, são aplicados no caso de estudo ainda em curso - Figura 3.3.

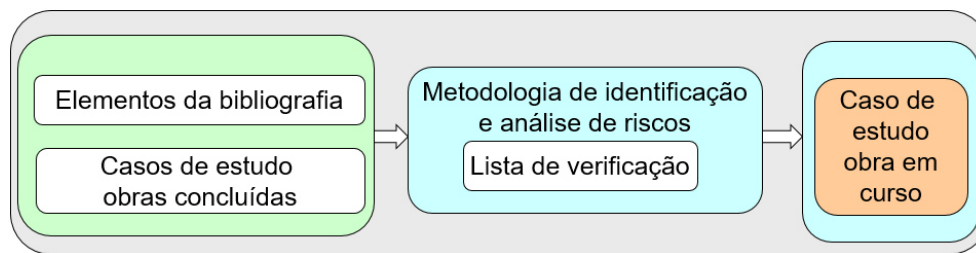


Figura 3.3 – Diagrama da metodologia para a fase inicial da construção

Conforme anteriormente referido, nem sempre o projeto contempla a gestão de riscos geotécnicos, ou às vezes não a apresenta de forma devidamente pormenorizada para a fase construtiva, aflorando a questão de uma forma reducionista, nomeadamente ao considerar apenas a verificação da realização de cartografia geológica e caracterização geotécnica de modo geral.

Vários autores referem o relatório geotécnico de referência (ITIG, 2006; ASCE, 2007; Freeman, 2009; Cândido *et al.*, 2012) como documento base da gestão de riscos de uma obra; contudo, este não se encontra uniformizado e nem sempre identifica a totalidade dos riscos presentes na construção de túneis.

Habitualmente, nesta fase já se encontram disponíveis estudos geológicos e geotécnicos que, dependendo da sua qualidade técnica e grau de pormenorização, podem oferecer um contributo significativo para a realização ou complementação da gestão de riscos geotécnicos a implementar.

Perante a heterogeneidade de informação que possa existir, é necessário desenvolver uma metodologia de gestão de riscos geotécnicos flexível e abrangente, de modo a contemplar os diferentes cenários de quantidade e qualidade de informação disponível.

As listas de verificação, pela sua fácil utilização e rápida implementação, tornam-se eficazes na análise de riscos geotécnicos (Cândido, *et al.*, 2012). São particularmente adequadas para aplicar no início da fase construtiva, analisar os riscos inerentes à quantidade e qualidade da informação disponível, ou à verificação da sua falta nas fases anteriores do processo. Esta metodologia, embora seja qualitativa, permite avaliar a quantidade da informação disponível e, deste modo, avaliar a fiabilidade do modelo geológico-geotécnico existente.

Na fase inicial da construção, para além da verificação dos documentos e da informação disponível das fases anteriores, é importante analisar os procedimentos adotados, que serão implementados no desenvolvimento da obra, tendo em vista a identificação dos riscos geotécnicos.

A compilação e incrementação das listas de verificação de riscos geotécnicos para a situação “tipo” em referência, surge de diferentes fontes de informação, como sejam:

- Pesquisa bibliográfica, indicando-se em particular os trabalhos de Daller (2004), Matos *et al.* (2006), Seidenfub (2006) e Cândido (2010);
- Casos de estudo (Capítulo 4),

- Experiência adquirida pelo doutorando no acompanhamento geológico e geotécnico de obras deste tipo.

A avaliação da verificação realizada com base na lista resultante poderá levar à necessidade de implementar medidas corretoras de minimização ou eliminação dos riscos ocorrentes.

Uma outra etapa considerada para a gestão de riscos na fase construtiva é o trecho de túnel a escavar, que se aborda seguidamente na definição da metodologia a implementar para detecção e análise.

3.1.2 Trecho de túnel a escavar

Conforme referido na Secção 2.4.6, habitualmente este tipo de obras conta com um ATO na vertente da geologia e geotecnia, que realiza a caracterização do terreno das superfícies escavadas, recorrendo a diversos parâmetros e, frequentemente, à classificação geomecânica do terreno ocorrente. Esses parâmetros servem de descritores do maciço e a apreciação da sua dispersão permite quantificar a heterogeneidade do maciço rochoso.

Conforme o diagrama constante na Figura 3.4, a metodologia para este trecho caracteriza-se, principalmente, pela utilização de ferramentas matemáticas para estimação da qualidade do terreno em antecipação, que permite avaliar a heterogeneidade do maciço. A base de dados disponível dos casos de estudo de obras já concluídas (Capítulo 4) permite ainda, indicar as características geotécnicas mais significativas na definição da qualidade do terreno para aplicar a situações novas. Por fim, para análise dos procedimentos a implementar no trecho a escavar, é apresentada uma árvore de eventos e um mapa de probabilidades de ocorrência dos valores de RMR no avanço seguinte da escavação.

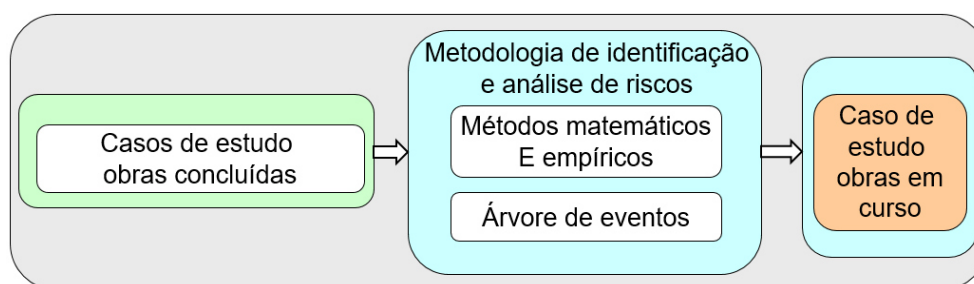


Figura 3.4 – Diagrama da metodologia para o trecho a escavar

A Figura 3.5 representa um diagrama dos métodos matemáticos e empíricos utilizados para modelação do trecho a escavar, tendo em vista completar a modelação da qualidade do maciço em antecipação e, dessa forma, minimizar os riscos associados à heterogeneidade e a limitação do conhecimento do maciço.

Considera-se que os resultados obtidos dos métodos matemáticos permitem analisar o nível de conhecimento geológico e geotécnico disponível, refinando os modelos com adição de mais informação, estimando-se assim o risco geotécnico associado à heterogeneidade do maciço.

A zona a escavar representa o maior desafio para a análise de risco geotécnico uma vez que, apesar de habitualmente haver um modelo de escala abrangente, à escala da frente de escavação do túnel, a antevisão da qualidade do terreno nos avanços mais próximos necessita de ser rigorosa, para que todos os intervenientes na obra, em particular a equipa de produção, esteja alertada e preparada para uma intervenção eficaz, com mobilização dos equipamentos necessários e adequados, em particular quando se tratam de condições geológicas e geotécnicas adversas para a estabilidade.

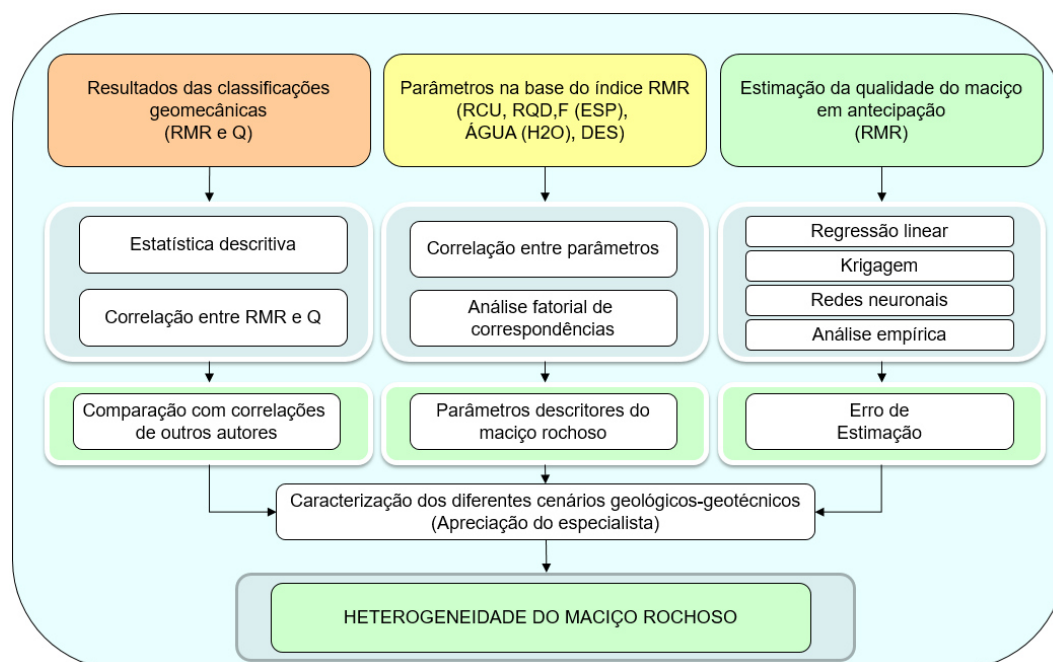


Figura 3.5 – Diagrama da metodologia de avaliação da heterogeneidade do maciço e estimação da sua qualidade em avanço

No caso da qualidade do maciço ser boa, as preocupações são diminutas, uma vez que o maciço é autoportante durante um período de tempo significativo e, como tal, a velocidade de intervenção para a sua estabilização também pode ser alargada, sendo menor a necessidade de contenção para assegurar a estabilidade. Para os casos em que a qualidade do maciço é fraca, normalmente associada ao atravessamento de falhas geológicas ou zonas tectonizadas, onde habitualmente se deteta a presença de água e material de preenchimento brando, com características mais próximas de um solo do que de uma rocha, o tempo de autossustentação do maciço torna-se diminuto, o que implica a necessidade de uma intervenção rápida, ou até mesmo um pré-tratamento do terreno, tendo em vista a sua estabilização.

Resumindo, os riscos geotécnicos presentes no trecho a escavar estão associados à heterogeneidade e variação das características do maciço rochoso.

Nas fases precedentes à construtiva são realizados geralmente estudos que incluem a prospeção geotécnica do maciço a interessar pela escavação e que permitem o desenvolvimento de um modelo geológico-geotécnico.

Na metodologia aplicada ao trecho a escavar, é particularmente relevante desenvolver uma análise pormenorizada às zonas de características mais fracas em termos de qualidade para a estabilidade do túnel e sua vizinhança, conforme já referido, por serem estas as de maiores consequências e que carecem de intervenção mais específica e célere.

Perante o enquadramento apresentado, indicam-se seguidamente as metodologias adotadas para descrever as características do maciço rochoso tendo em vista a análise da sua heterogeneidade.

3.1.2.1 Estatística descritiva das características do maciço rochoso

Como referido, geralmente a qualidade do maciço rochoso face à escavação de túneis é estimada recorrendo à sua classificação geomecânica. A classificação de Bieniawski (1989) afigura-se como importante por ser uma das mais difundidas (A'ssim & Xing, 2010) e pela existência de muitos estudos desenvolvidos com base nela e que permitem a determinação expedita do estado de tensão do maciço rochoso (Bieniawski, *op. cit.*).

A utilização conjunta da classificação de Bieniawski (*op. cit.*) e de Barton *et al.* (1974), para que uma sirva como confirmação da outra, é particularmente interessante, uma vez que são das classificações geomecânicas mais aplicadas nos maciços rochosos no ATO de túneis em todo o mundo (Hoek, 2007; Barton & Bieniawski, 2008) e como tal existem várias correlações entre ambas conforme síntese apresentada por Castro-Fresno *et al.* (2010).

Tendo em vista a caracterização da qualidade dos maciços rochosos dos casos de estudo, numa fase inicial realiza-se a estatística descritiva dos valores de RMR e Q sintetizados em histogramas e tabelas onde consta a média, a moda, a mediana e o desvio padrão. Salienta-se que aquele último índice tem uma escala logarítmica, o que dificulta a perceção da qualidade do maciço rochoso.

Seguidamente e ainda para caracterização da qualidade do maciço rochoso é calculada a correlação entre os resultados das classificações geomecânicas e comparada com algumas das correlações disponíveis na bibliografia, compiladas por Choquet & Hadjigeorgiou (1993) e por Castro-Fresno *et al.* (*op. cit.*) e contempladas seguidamente nas Equações 3.1 a 3.9:

$$RMR = 9\ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1979)} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$RMR = 5,9\ln Q + 43 \text{ (Rutledge & Preston, 1978)} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$RMR = 5,4\ln Q + 55,2 \text{ (Moreno, 1980)} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$RMR = 5\ln Q + 60,8 \text{ (Cameron-Clarke \& Budavari, 1981)} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$RMR = 43,89 - 9,19\ln Q \text{ (Tamames, 1983)} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$RMR = 10,5\ln Q + 41,8 \text{ (Abad et al., 1984)} \quad \text{Equação 3.6}$$

$$RMR = 12,11\log Q + 50,81 \text{ (Udd \& Wang, 1985)} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$RMR = 8,7\ln Q + 38 \text{ (Kaiser et al., 1986)} \quad \text{Equação 3.8}$$

$$RMR = 10\ln Q + 39 \text{ (Choquet \& Charette, 1988)} \quad \text{Equação 3.9}$$

Destas correlações, a Equação 3.5 surge com um erro. Conforme é apresentada, o resultado de um terreno de fracas características geotécnicas, com um índice Q baixo, corresponde um índice RMR elevado e vice-versa. Contudo, se o sinal negativo for trocado para um sinal positivo, a fórmula passa a fazer sentido; no entanto e em termos práticos, é muito semelhante à Equação 3.1.

Ulteriormente, Barton (1995) apresenta uma nova correlação entre os dois índices de qualidade do maciço rochoso e que consta na Equação 3.10.

$$RMR = 15\log Q + 50 \text{ (Barton, 1995)} \quad \text{Equação 3.10}$$

Conforme se pode visualizar em formato gráfico na Figura 3.6, estas correlações formam dois conjuntos, individualizados pela diferente inclinação das retas que as representam; um conjunto compreendido pela correlação de Bieniawski (1979) e de Kaiser *et al.* (1986), que conta ainda com as correlações de Tamames (1983), Abad *et al.* (1984) e Choquet & Charette (1988); um outro conjunto, constituído pelas correlações de Rutledge & Preston (1978), Moreno (1980), Cameron-Clarke & Budavari (1981), Udd & Wang (1985) e Barton (1995).

A presença desses dois grupos distintos pode estar relacionada com a litologia de terreno onde as correlações foram obtidas, ou até com o número de dados de base e respetiva dispersão, ficando a ideia que, no primeiro grupo mencionado, os valores de RMR-Q utilizados eram mais elevados, existindo fraca representatividade dos valores mais baixos da escala, enquanto nos casos do segundo grupo havia um número de dados representativos de valores mais baixos das classificações, ou seja, aquele conjuntos, representam maciços de boa e menor qualidade, respetivamente.

O objetivo deste procedimento é o de permitir, por um lado, validar os resultados de uma classificação com uma segunda, enquadrada pelas correlações já verificadas noutras situações de estudo, como sejam as disponibilizadas na bibliografia e constantes na Figura 3.6; e por outro, verificar se nos casos de estudo a considerar (Capítulo 4) a correlação verificada é semelhante nos diferentes locais e cenários geológicos-geotécnicos.

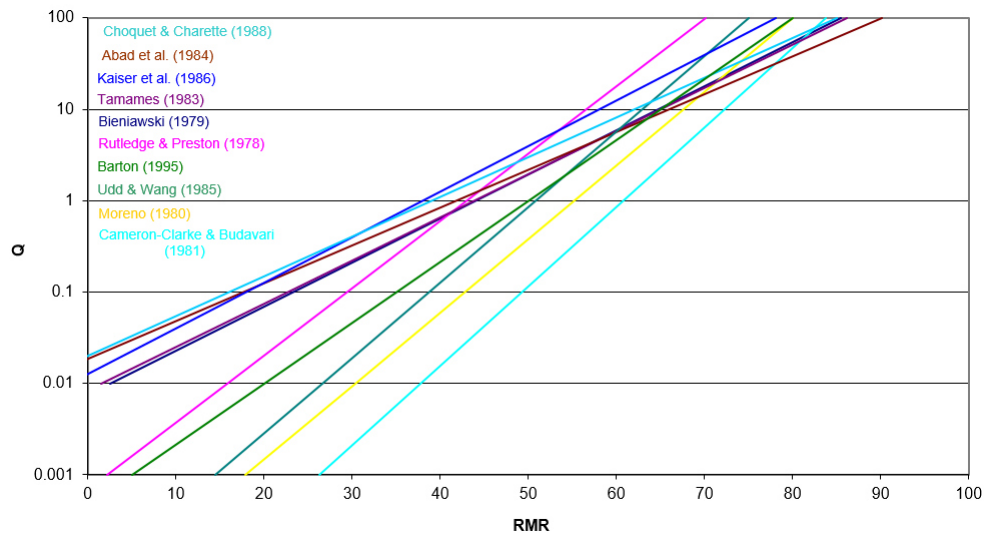


Figura 3.6 – Gráfico de algumas correlações entre os índices RMR e Q

3.1.2.2 Análise multivariada dos parâmetros de RMR

Uma segunda fase de análise dos dados consiste na aplicação de análise multivariada aos parâmetros que fundamentam a classificação de Bieniawski (1989). Esta análise tem como objetivo verificar a heterogeneidade do maciço rochoso nos seguintes aspetos:

- Relevância de cada parâmetro no resultado final do valor de RMR;
- Redundância entre parâmetros dentro da classificação;
- Comportamento dos parâmetros em zonas de diferente qualidade do maciço rochoso;
- Comportamento dos parâmetros em diferentes cenários geológicos.

Recorrendo à análise fatorial de correspondências (AFC), é possível verificar qual, ou quais, os parâmetros que têm maior influência na variação do resultado final das classificações.

De acordo com Davis (2002), a AFC é adequada para analisar conjuntamente variáveis nominais e variáveis categóricas. No caso de levantamentos geológicos e geotécnicos em túneis, há caracterizações descritivas de diferentes parâmetros, como sejam o estado de alteração (W) e de fraturação (F), assim como as classes representativas da qualidade do maciço em que se enquadra o valor final das classificações geomecânicas.

A classificação de Bieniawski (*op. cit.*) conta com pesos para representar os resultados de cada um dos parâmetros base da classificação. Para aplicação da AFC, conforme realizado por Olivença & Santos (2014), consideram-se os intervalos já conhecidos apresentados por Bieniawski (*op. cit.*), representando cada um pelo valor do peso médio representativo desse intervalo. Na Tabela 3.3 apresenta-se a classificação RMR com os respetivos pesos de cada intervalo para cada um dos parâmetros e que foi considerado como representativo para aplicação a AFC.

Tabela 3.3 – Intervalos de valores dos parâmetros da classificação de RMR (Bieniawski, 1989) e definição das classes para aplicação de AFC

Resistência à compressão uniaxial - RCU (designação para AFC – Prcu)							
Intervalo de valores (MPa)	< 1	1-5	5-25	25-50	50-100	100-250	> 250
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	0	1	2	4	7	12	15
Rock Quality Designation - RQD (designação para AFC – Prqd)							
Intervalo de valores (%)	<25	25-50	50-75	75-90	90-100		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	3	8	13	17	20		
Espaçamento – F fraturação (designação para AFC – Pesp)							
Intervalo de valores (m)	< 0,06	0,06 - 0,2	0,2 - 0,6	0,6 - 2	> 2		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	5	8	10	15	20		
Afluência de água (designação para AFC – Ph2o)							
Descrição geral	Escurência	Gotejante	Saturado	Húmido	Seco		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	0	4	7	10	15		
Características das descontinuidades (designação para AFC – Pdsc)							
Descrição geral	Lisas ou espelhadas c/ argila, muito abertas	Lisas, c/ argila, abertas	Rugosidade e abertura ligeira, muito alteradas	Rugosidade abertura e alteração ligeira	Rugosas fechadas s/ alteração		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	0	10	20	25	30		
Comprimento (Pcom)	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	6	4	2	1	0		
Abertura (Pabe)	Fechada	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	6	5	4	1	0		
Rugosidade (Prug)	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Lisa	Estriada		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	6	5	3	1	0		
Preenchimento (Ppre)	Nenhum	<5mm, duro	>5mm, duro	<5mm, mole	>5mm, mole		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	6	4	2	2	0		
Alteração (Palt)	Não alterada	Ligeira	Moderada	Muito alterada	Decomposta		
Peso do parâmetro RMR / Designação da classe AFC	6	5	3	1	0		
Orientação das descontinuidades (designação para AFC – Pori)							
Descrição geral	Muito desfavorável	Desfavorável	Razoável	Favorável	Muito favorável		
Valor parâmetro RMR / Designação da classe AFC	-12	-10	-5	-2	0		
RMR (designação para AFC – Prmr)							
Valor RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100		
Classe	V	IV	III	II	I		

Para aplicação desta metodologia (AFC), torna-se necessário desenvolver uma tabela de contingência a partir da matriz de dados originais, a qual pode ser transformada em matriz de Burt, que representa a frequência das variáveis da matriz de contingência (Hill & Lewicki, 2007). Após a realização destes procedimentos, estão reunidas as condições para projetar as classes das diferentes variáveis, no mesmo espaço bidimensional, de forma a observar a relação entre elas.

O tratamento de dados é efetuado com o programa informático *Statistica 10*, que auxilia no cálculo dos fatores e apresenta os resultados em gráficos disponibilizando, deste modo, elementos para uma leitura e análise rápidas.

3.1.2.3 Estimação do índice RMR

Numa terceira fase de tratamento dos dados disponíveis dos casos de estudo de obras já concluídas, é realizada a estimação da qualidade do terreno em antecipação, para o trecho correspondente ao comprimento do próximo avanço da escavação.

Nos estudos realizados nas fases iniciais para a caracterização do maciço rochoso para construção de túneis, a quantidade de informação disponível é limitada, o que pode introduzir erro na utilização de métodos geoestatísticos, caso a heterogeneidade dos maciços seja elevada.

Na fase construtiva, com a caracterização geológica e geotécnica do maciço, realizada à medida que a escavação avança, a quantidade de informação disponível, recolhida a cada avanço, passa a ser em número suficiente para aplicar métodos geoestatísticos; no entanto, as metodologias de estimação de variáveis geralmente utilizadas, que permitem a interpolação de dados, deixam de ter um significado prático, uma vez que as características do maciço entre frentes de escavação ficam disponíveis nos hasteais do túnel e a obtenção dessa informação por processos matemáticos fica desprovida de sentido, uma vez que está disponível a realidade.

Mas o estudo do comportamento espacial das variáveis que caracterizam o maciço é importante para antever as respetivas características do maciço, ou seja, trata-se de uma interpolação para além das zonas amostradas.

Aplicando a estimação para além dos limites da zona amostrada, mas dentro da amplitude do semivariograma, torna-se possível obter um cenário das características do maciço rochoso para as próximas frentes a escavar. No entanto, ressalva-se que nenhum método matemático consegue ser eficaz na antevisão de variações bruscas das características do terreno.

A qualidade do terreno, representada pelo valor de RMR, é modelada com recurso a ferramentas matemáticas, utilizando os programas informáticos *Excel 2014*, *GEOMS* e *Statistica 10*, antecipando valores para a qualidade do maciço a escavar.

Comparando os resultados obtidos da estimação com a qualidade do maciço observado, é possível calcular o erro e, em sequência, o risco geotécnico associado à heterogeneidade dos maciços rochosos.

Na escavação D&B, a implementação de ciclos de escavação dinâmicos, às vezes com frequência bidirária, leva a que a previsão da qualidade do maciço rochoso, para o trecho de escavação seguinte, seja necessariamente realizada de forma imediata, o que levou à exclusão de metodologias complexas e morosas.

Tendo em vista responder ao objetivo proposto, utilizam-se várias metodologias matemáticas e uma metodologia empírica e expedita baseada na análise gráfica do RMR ao longo do perfil de escavação, por parte de um especialista neste tipo de ATO.

Todas as metodologias, que seguidamente se enumeram e posteriormente se descrevem, respeitam o princípio da fácil implementação na fase construtiva, com obtenção célere e imediata de resultados, conforme já realizado para um túnel por Santos *et al.* (2014), são elas as metodologias:

- Matemáticas:
 - Regressão linear;
 - Krigagem normal;
 - Redes neuronais;

- Empírica (expedita):
 - Análise gráfica por especialista.

Na sua aplicação aos casos de estudo selecionados (Capítulo 4), os primeiros metros de escavação de cada uma das galerias analisadas, correspondentes a 10 ciclos de escavação, num comprimento médio de aproximadamente 30 m, foram considerados para desenvolvimento dos modelos em cada situação. Foram excluídos desta investigação a zona dos emboquilhamentos, cruzamentos com outros túneis e ainda a zona junto a outras estruturas de maior dimensão, porque algumas metodologias necessitam de um determinado número de dados como base de modelo e por exemplo, o resultado da classificação de Barton *et al.* (1974) é afetada por estas situações específicas.

Na aplicação das várias metodologias, simula-se o avanço da escavação, repetindo-se os procedimentos sucessivamente, para cada um dos trechos escavados, o que considerando todas as frentes de escavação dos vários casos de estudo, corresponde a um comprimento médio de 3,3 m, ou seja, a previsão desenvolvida para a qualidade do terreno, corresponde a uma distância de aproximadamente 3,3 m para além da frente de escavação presente, conforme se esquematiza na Figura 3.7.

Concretizando:1

Método da regressão linear

Foram considerados os dados respeitantes aos trechos abrangentes dos últimos 3 (n, n-1, n-2), 5 (n, n-1, ..., n-4) e 10 (n, n-1, ..., n-9) avanços da escavação, considerando-se que ao último avanço

corresponde o trecho n da escavação. Foi calculada a equação da regressão linear, tendo em conta todos os pontos e, com base nela, estimado o índice RMR para o trecho seguinte a escavar ($n+1$), correspondente ao já referido comprimento médio de 3,3 m.

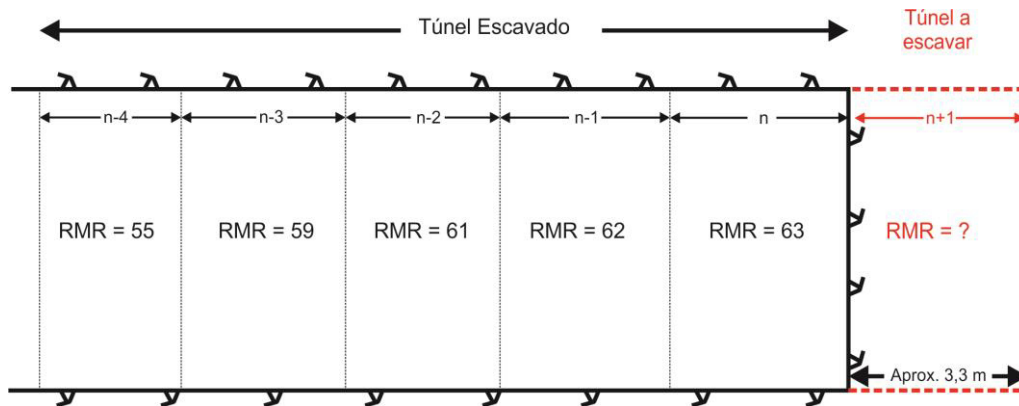


Figura 3.7 – Esquema de previsão da qualidade do terreno para o trecho a escavar

Método de estimacão geostatística por krigagem

Para aplicao da krigagem recorreu-se ao programa *GEOMS*; com esta metodologia de estimacão, todos os valores do índice de RMR observados até à frente de escavao n servem de base ao cálculo do semivariograma experimental, de forma a determinar o seu desenvolvimento espacial.

O semivariograma de um determinado parâmetro, no caso o RMR, pode ser específico para cada direo do espaço; no entanto, para o caso de um túnel, este fenómeno assume contornos menores, uma vez que interessa estudar o comportamento das variáveis ao longo do alinhamento do túnel, admitindo-se que o túnel se desenvolve sempre com a mesma direo.

Do semivariograma experimental resulta a equao da curva, como base no modelo esférico, que melhor ajuste apresenta aos resultados constantes no semivariograma, o que constitui a base que permite avaliar os resultados para a realizao da estimacão de valores para além das zonas observadas.

Com estas metodologias a estimacão é aplicada para uma zona para além da amostrada, que fica além dos pontos onde foram medidos os parâmetros; isto significa que, contrariamente ao habitualmente realizado com estas metodologias, não é feita uma interpolao dos valores, mas uma “extrapolao”.

Desenvolvendo a modelao do RMR ao longo da direo coincidente com o eixo do túnel, por krigagem normal, é possível obter valores de estimacão válidos para além dos limites amostrados, desde que inseridos no comprimento máximo de correlao dos valores definido no semivariograma, calculando-se deste modo o valor de RMR para o trecho seguinte a escavar ($n+1$).

O processo foi integralmente repetido para todas as frentes de escavao dos túneis e galerias que constituem os casos de estudo simulando, desta forma, o processo de escavao tal como ocorrido na realidade.

Método das redes neuronais

Para aplicação das redes neuronais, recorre-se ao programa informático *Statistica 10*, tendo-se considerado cinco colunas independentes, contendo o RMR dos últimos cinco trechos escavados (n , $n-1$, ..., $n-4$) e, como coluna dependente, o RMR da frente seguinte ($n+1$).

Para cada avanço da escavação, realiza-se todo o processo de criação de novas redes neuronais, baseadas em regressão, utilizando *Automated network search*. As redes neuronais testadas são do tipo *multi paralele layer* (MPL), com um mínimo de *hidden units* de 2 e um máximo de 20. As funções ativas para desenvolver os *hidden neurons* na MPL são a *identity*, *logistic*, *tanh* e *exponential*, utilizando-se *weight decay*, quer para as *hidden layer*, quer para a *output layer*, num intervalo entre 0,0001 e 0,001.

Para estimação de cada avanço, geram-se 20 redes neuronais e, em cada uma, realiza-se experimentação em 80% das amostras e teste em 20%. De entre as redes geradas, retém-se a que apresentava no teste, erro menor entre o valor calculado com base no algoritmo da rede e o observado na coluna dependente.

Com a seleção da rede neuronal com erro menor, executa-se uma *custom prediction* adicionando uma nova linha de dados contendo a qualidade do maciço representada pelo valor de RMR (n , $n-1$, $n-2$, $n-3$ e $n-4$), para calcular o valor do trecho seguinte ($n+1$).

Método expedito (empírico)

A metodologia empírica realizada por um especialista no ATO de escavação de túneis, propõe-se antever o RMR a ocorrer na frente seguinte, baseado na análise da tendência da qualidade do maciço rochoso, por observação do trecho já escavado.

Nesta metodologia expedita consideram-se todos os valores de RMR observados até à frente n , dispostos numa apresentação gráfica de RMR em função do comprimento de escavação. Conforme a Figura 3.8, a análise recai não só na tendência revelada pelos valores de RMR mais próximos da frente de escavação, mas também nas ocorrências anteriores observadas ao longo da escavação com tendências semelhantes.

Os resultados obtidos da simulação dos vários casos de estudo selecionados, pelos vários métodos, no final são comparados entre si e com a realidade observada, calculando-se o erro absoluto e avaliando-se deste modo, a sua eficácia específica face aos diferentes tipos de maciços rochosos estudados.

Durante a aplicação ao caso de estudo em curso, apenas a metodologia de estimação baseada na análise expedita de um especialista foi implementada durante a execução, todas as restantes são aplicadas por retro análise apenas no âmbito da presente investigação.

Ao longo da escavação de túneis em maciços rochosos, particularmente nos realizados com recurso a explosivos, inúmeras são as frentes de escavação, pelo que seguidamente se descrevem as metodologias de deteção e análise de riscos a implementar nessas frentes de escavação.

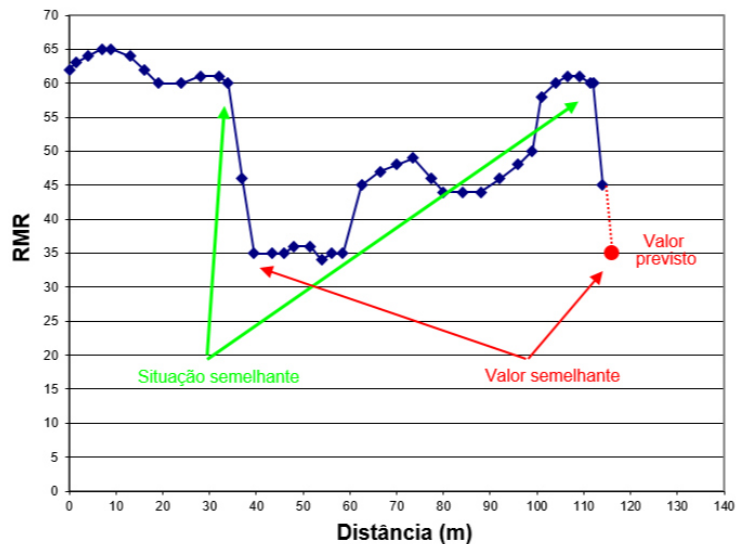


Figura 3.8 – Esquema gráfico do modo de determinação do RMR seguindo a metodologia empírica do especialista

3.1.3 Frente de escavação

O diagrama da Figura 3.9 revela a metodologia a implementar para a etapa da frente de escavação. A análise de risco geotécnico na frente de escavação passa pela determinação da sua estabilidade, onde a conjugação dos modos de rotura preferenciais do maciço rochoso e os procedimentos construtivos adotados assumem relevância. Partindo da compilação das situações referidas na bibliografia e casos de estudo analisados definem-se os principais modos de rotura do maciço, os procedimentos geralmente utilizados na execução, assim como as metodologias de análise de risco mais adequadas a essa situação. Os resultados assim obtidos são aplicados a um caso de estudo em curso.

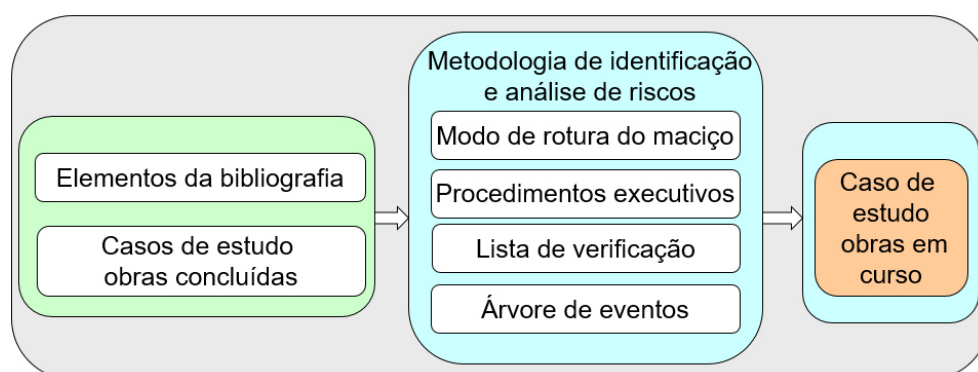


Figura 3.9 – Diagrama da metodologia para a frente de escavação

Segundo alguns autores (Hudson, 1989; Hoek *et al.*, 1995; Diederichs, 1999), os modos de rotura do maciço rochoso em túneis podem enquadrar-se em dois grupos principais, a queda de blocos estruturalmente controlados por descontinuidades e as induzidas por deformação excessiva.

Estes modos de rotura do terreno podem resultar em perigo de queda de blocos pontuais, colapso ou deformações limitadas da periferia da escavação (Palmström, 1995).

A instabilidade de uma frente de escavação constitui um risco porque de forma mais ou menos severa, tem como consequências, perdas de tempo, de recursos materiais e eventuais perdas humanas e/ou de equipamentos.

A presença de blocos e cunhas na periferia da escavação pode-se avaliar pela projeção da atitude das discontinuidades e sua relação com a direção da escavação (Hoek, 2007). Nesta situação importa verificar, não só as discontinuidades que constituem famílias, mas também aquelas erráticas, com atitude que são exceção aos alinhamentos estruturais preferenciais. Às vezes, as atitudes erráticas ficam fora das considerações do projeto no dimensionamento da contenção, necessitando por isso de apreciação específica na frente de escavação.

As classificações geomecânicas são aproximações empíricas que representam a qualidade do maciço rochoso para a abertura de túneis, pelo que se torna importante a sua validação. Com a aplicação de duas classificações na frente de escavação, é possível proceder à sua validação cruzada correlacionando os respetivos resultados e verificando se são enquadrados no que é habitual obter para o cenário geológico-geotécnico em apreço.

Esta metodologia de validação cruzada das classificações do maciço, carece de uma avaliação crítica, uma vez que os parâmetros que constituem cada uma delas são diferentes e, como tal, podem ocorrer situações de ambas as classificações estarem corretamente realizadas, sem que a correlação fique no intervalo definido pelas mais usuais (Figura 3.6).

Para análise do risco geotécnico presente na frente de escavação de um túnel, importa não só caracterizar o maciço, mas também os procedimentos utilizados para garantir a estabilidade. Se por um lado um maciço com características fracas, onde se esperam problemas, pode ser facilmente estabilizado por uma intervenção atempada e eficaz de aplicação de contenção, por outro, num maciço de qualidade boa, onde à partida não são preconizados problemas de estabilidade, pode ocorrer o destacar de cunhas ou de blocos pontuais.

O tempo decorrido entre a escavação e a aplicação de contenção também representa um eventual perigo. O maciço rochoso é autoportante durante um determinado período de tempo, que varia com a qualidade do maciço. Quanto melhor a qualidade do maciço, maior será o tempo de autossustentação; no entanto, esta regra não se aplica a roturas frágeis, como o destaque de cunhas e blocos devido à presença de discontinuidades. Isto porque estes blocos e cunhas não são controlados pela qualidade do maciço na sua generalidade, mas pelas características das discontinuidades, responsáveis pela resistência ao corte.

Face ao cenário descrito, as listas de verificação também se apresentam como adequadas para análise de riscos geotécnicos nesta situação específica da fase construtiva de túneis, sendo importante a definição de itens que permitam validar:

- A recolha de dados geotécnicos que possibilitem a identificação de perigos inerentes e riscos associados, como sejam os modos de rotura do maciço rochoso;
- Os procedimentos construtivos implementados, no sentido de garantir a estabilidade da escavação.

Estas listas de verificação, à semelhança das compiladas e incrementadas para análise dos riscos geotécnicos na etapa da fase construtiva, descrita na Secção 3.1.1, resultam das mesmas fontes de informação, bibliográfica e casos de estudo.

Partindo do registo das situações de instabilidade e colapso de escavações, quer dos casos de estudo, quer das descritas na bibliografia, é possível desenvolver uma árvore de falhas, embora pela falta de elementos para quantificar estatisticamente os ramos, se limite à sua utilização como método de identificação de eventos associados à ocorrência de falha do sistema.

No caso de túneis, a falha mais relevante pode ser descrita como o colapso, em que os eventos que levam à instabilidade da escavação podem estar relacionados com diferentes fatores, desde o conhecimento deficiente das condições geotécnicas a atravessar, a erros e omissões de projeto ou a abordagens construtivas ineficazes.

Outra metodologia de análise de riscos, com aplicação semiquantitativa, que se afigura como importante para entender os fenómenos envolvidos e suas interligações, é a árvore de eventos. Assim, para esta situação tipo, é desenvolvida uma árvore que sintetiza as situações e respetivas interligações na formação de falhas do sistema que, no caso limite, é o colapso da escavação.

Na deteção de eventos que causam a instabilidade da escavação é importante analisar os elementos disponíveis desde a fase de projeto, conjuntamente com as metodologias e procedimentos a utilizar na fase construtiva porque podem revelar-se inadequados para o terreno presente.

Igualmente relevante para detetar falhas do sistema é a verificação dos procedimentos adotados para ATO, que devem ser céleres na caracterização geológica e geotécnica de pormenor na frente de escavação e nos canais de transmissão dessa informação. A seleção de procedimentos na recolha de elementos e sua transmissão que, pela complexidade inerente, sejam morosos pode acarretar um tempo de intervenção deficiente, colocando em causa a estabilidade da escavação.

Significa isto que, não podem ocorrer situações em que o terreno fique instável, no tempo que decorre entre a identificação dessa potencial instabilidade e sua transmissão e mobilização de meios para uma intervenção eficaz. No limite, certamente que há perceção da ocorrência da instabilidade, embora tardiamente.

Como referido, em todo o processo de caracterização do maciço, de identificação de perigos, de avaliação de riscos e de definição de medidas a implementar, é importante um circuito de informação funcional entre todos os intervenientes na empreitada, que permita a execução atempada de tais medidas.

Com a construção do túnel em curso, ou mesmo na fase de exploração, existe o trecho que se encontra escavado. Na secção seguinte descreve-se a metodologia a utilizar nesta investigação para esta situação específica.

3.1.4 Trecho de túnel escavado

O risco geotécnico presente no trecho de túnel escavado surge associado à capacidade de manutenção de estabilidade da escavação ao longo do tempo, ou seja, encontra-se intimamente ligado à capacidade de caracterizar o maciço na frente de escavação e na adequabilidade, técnica e temporal, da contenção aplicada para manter a escavação estabilizada.

Deste modo, a metodologia a utilizar na fase construtiva inicia-se pela compilação de situações de risco descritas na bibliografia, conjuntamente com as situações verificadas nos casos de estudo em apreço, que permitem definir a forma de identificar esses riscos, assim como as metodologias mais eficazes para a sua análise - Figura 3.10.

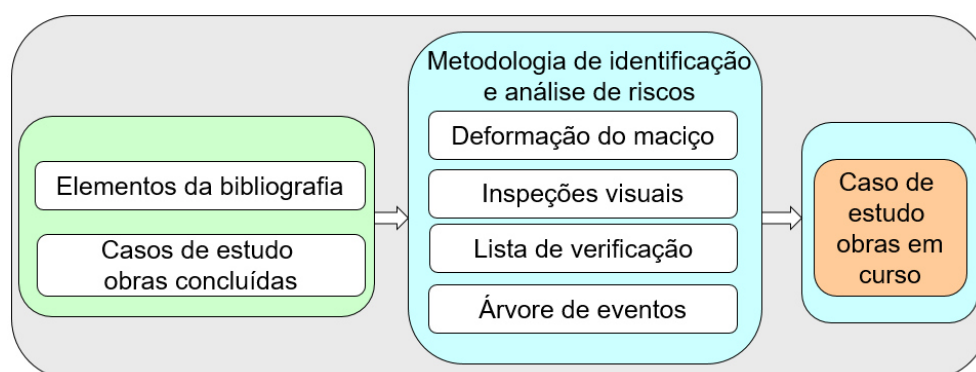


Figura 3.10 – Diagrama da metodologia para o trecho já escavado

Conforme já referido na Secção 2.4.5, a monitorização geotécnica das deformações do terreno provocada pela escavação do túnel é um dos métodos mais utilizados para verificação da estabilidade dos túneis no trecho escavado. Contudo, apresenta limitações, porque os locais de medição são pontuais, sendo os resultados extrapolados para a vizinhança dos pontos de observação, assim como para terreno com características geológicas e geotécnicas idênticas (ITA, 2011), pelo que necessitam de ser complementadas com inspeções visuais.

A monitorização do maciço rochoso em túneis, ou no caso específico do conjunto maciço rochoso/contenção, permite quantificar a evolução das deformações ao longo do tempo e comparar as mesmas com a taxa de evolução e/ou deformação máxima prevista em projeto.

Para além do enquadramento anteriormente referido, para uma análise eficiente é necessário saber interpretar a evolução das deformações ao longo do tempo e antever o seu comportamento; como tal e com base nos casos de estudo de obras já concluídas, apresentam-se as deformações máximas

registadas no conjunto do maciço e contenção aplicada, projetadas conforme o ábaco de Barton (2002) e contante da Figura 3.11.

Nos casos em que o projeto não indica limites de alerta e alarme ou valores expectáveis para a deformação, os ábacos apresentados na Figura 3.11 fornecem uma base para enquadrar os resultados de deformação medidos no túnel em análise.

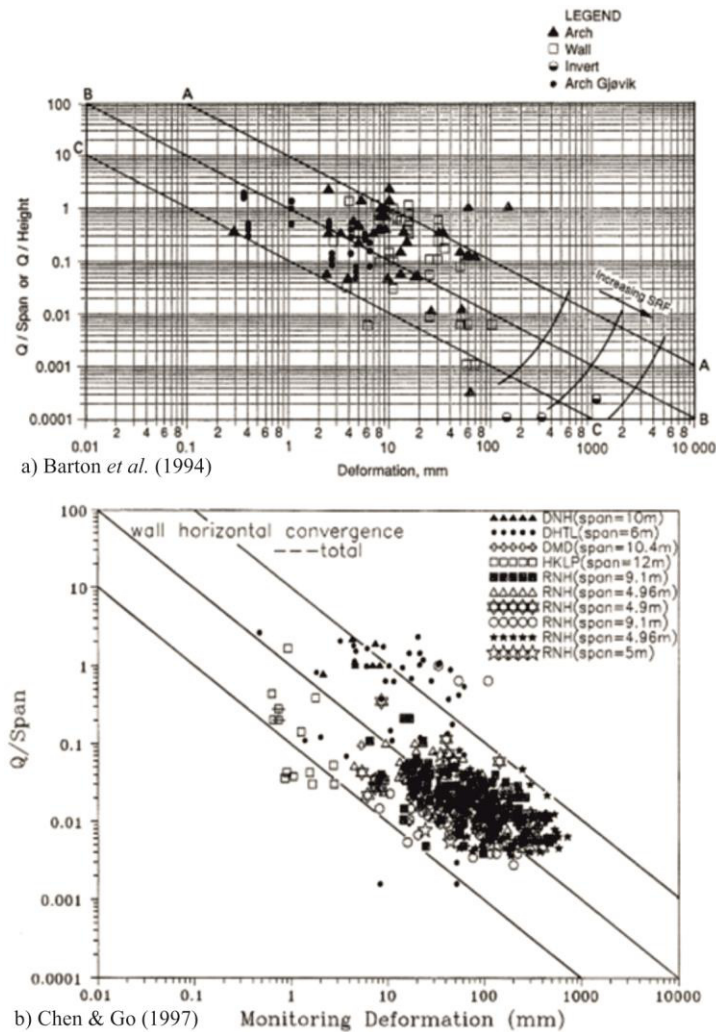


Figura 3.11 – Gráficos de deformação do maciço em função do índice Q e do vão do túnel (Barton, 2002)

A deformação medida vai depender da qualidade do terreno, mas também do vão do túnel. Em princípio, quanto maior o vão, mais deformação é expectável, bem como quanto menor a qualidade, maior a deformação expectável.

Ao considerar num dos eixos do gráfico, a razão entre a qualidade do terreno e vão do túnel, é possível uniformizar estas variáveis para comparar as deformações medidas entre túneis com dimensão de vão diferente e com a qualidade de terreno igual.

A árvore de eventos desenvolvida tem de abordar situações que permitam a análise da estabilidade da escavação ao longo do comprimento do túnel, particularmente importante quando o sustimento

definitivo ainda não se encontra instalado; no entanto, revela-se igualmente adequado para utilização na fase pós-construtiva.

Apesar da monitorização ser um método eficaz no acompanhamento da evolução de eventuais deformações do terreno, tem a limitação já referida de ser pontual, sendo por isso necessário complementá-la. Um método simples e expedito de complementar a observação geotécnica realizada com instrumentos, é a inspeção visual do maciço rochoso ou contenção aplicada presente nas superfícies do túnel. Caso o maciço esteja exposto, estas inspeções tornam-se mais difíceis, uma vez que pequenas alterações podem passar despercebidas, mas no caso da contenção aplicada contar com betão, o surgimento de patologias, como fissuração, é de identificação fácil.

A monitorização apenas se torna eficiente e cumpre os objetivos se houver capacidade de tratar os dados em tempo adequado e transmitir essa informação, devidamente analisada, com indicações precisas quanto ao estado de estabilidade das estruturas, aos vários intervenientes da empreitada. Por exemplo, numa situação limite, onde sejam detetados indícios de instabilidade, mas que essa informação apenas chegue às frentes de trabalho passado muito tempo, pode levar a uma situação de rotura, sem que qualquer intervenção tenha sido implementada.

Perante o enquadramento descrito, a análise de risco nesta situação da fase construtiva passa por metodologias que permitam a verificação dos procedimentos realizados, na instalação, leitura e análise dos resultados da observação geotécnica, assim como de inspeções visuais e procedimentos de transmissão da informação. Nesta situação é necessário, a partir dos casos de estudo já concluídos, identificar os cenários típicos de deformação do maciço rochoso e determinar as eventuais situações de rotura a incluir numa lista de verificação.

Além dessa lista, a análise dos riscos inerentes à monitorização da estabilidade das superfícies escavadas torna-se mais perceptível e mais fácil de implementar na prática, apresentada na forma de árvore de eventos.

A árvore de eventos a desenvolver para esta etapa da fase construtiva deve considerar o cenário mais gravoso, situado no tempo que medeia entre a escavação e a instalação do sustimento definitivo, quando o terreno é suportado pelo revestimento; no entanto, pode ser igualmente aplicada, na sua essência, à fase pós-construtiva quando o sustimento definitivo já se encontra instalado.

Na ausência de uma base de dados, ou caso esta se revele insuficiente por falta de representatividade para determinação das probabilidades que permitam desenvolver uma análise quantitativa, é possível realizar uma análise semiquantitativa com a mesma árvore de eventos, utilizando-se em alternativa à probabilidade calculada matematicamente, a verosimilhança, conforme já referido anteriormente na Secção 3.1.

A utilização de inspeções visuais para análise de risco é fundamental na identificação das patologias onde, para além da verificação da sua presença ou ausência, uma avaliação continuada ao longo do

tempo deve igualmente reconhecer a evolução dessas patologias; isto é, numa primeira inspeção é feita a identificação de patologias e em inspeções subsequentes é avaliada a evolução desses casos.

O registo das patologias pode ser efetuado numa tabela, mas para uma leitura mais rápida e abrangente, a realização de uma carta de riscos tendo por base a planta do túnel, afigura-se como eficaz para transmissão dessa informação. Com a apresentação dos resultados neste formato são facilmente perceptíveis os trechos onde ocorrem as patologias, as quais podem ser associadas a uma cor, conforme o grau de risco que representem, sendo habitual utilizar cores amarelas para patologias com menor risco, seguindo-se laranja e vermelho para riscos crescentes. Obviamente que, em caso de maior número de divisões de gravidade, outras cores intermédias podem ser usadas. A utilização da cor verde é desaconselhada, porque habitualmente para a generalidade das situações é representativa de ausência de problemas.

Com a deteção e análise de riscos realizada, a sequência da gestão leva à avaliação dos riscos ocorrentes, a qual é definida na secção seguinte.

3.2 AVALIAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO

A avaliação de risco consiste em enquadrá-lo dentro de critérios pré-definidos, tendo em conta o bom senso e experiência do especialista, para verificar se este é elevado e, como tal, intolerável, se é intermédio e aceitável perante determinadas situações em que as medidas a implementar na sua eliminação ou diminuição sejam inviáveis, ou diminuto e aceitável, constituindo um risco residual.

Nos métodos de análise de risco qualitativos, ou no caso das listas de verificação, que constituem uma das metodologias amplamente utilizadas neste estudo, a avaliação de risco torna-se simplificada. Como se trata de uma verificação de itens que constituem uma lista, a identificação de uma dada situação tem como procedimento subsequente a implementação de medidas, tendo em vista a respetiva correção.

A avaliação de risco determinado por métodos de análise quantitativos ou semiquantitativos, poderia resultar num enquadramento delimitado por valores rigorosos; no entanto e perante alguma subjetividade na definição dos valores limite de cada intervalo (intolerável, ALARP e tolerável), os critérios de enquadramento podem necessitar de uma avaliação específica de cada caso, onde deve prevalecer uma justificação crítica da experiência do especialista.

A avaliação semiquantitativa do risco é dada pelo produto entre a verosimilhança de ocorrência, verosimilhança de afetação e grau de dano do evento e a consequência de cada evento. Para a sua apreciação ou avaliação é necessário enquadrar o resultado obtido em situações de referência, como a desenvolvida por Shariar *et al.* (2008), que se resume na Tabela 3.4.

Apesar do enquadramento genérico dos riscos representados em árvores de eventos de acordo com a classificação da Tabela 3.4, a sua avaliação tem de ser específica, porque como o risco resulta do

produto entre a probabilidade ou verosimilhança de ocorrência e a intensidade ou consequência dos danos causados, muitas vezes verificam-se riscos de muito baixa probabilidade de ocorrência, mas de consequências desastrosas, o que vai resultar num valor de risco baixo a médio, de acordo com a avaliação expressa por Shariar *et al.* (2008), o que pode não ser denunciador de uma situação que necessita de aplicação de medidas.

Tabela 3.4 – Avaliação do risco (adaptado de Shariar *et al.*, 2008)

Nível de risco	Classificação	Descrição
Baixo	1-4	Risco tolerável. Não é necessária eliminação ou mitigação
Médio	5-9	Risco moderadamente tolerável. Pode ser necessária mitigação ou eliminação
Elevado	10-15	Risco na fronteira da tolerabilidade. Deve ser implementada mitigação ou eliminação
Muito elevado	16-25	Risco é intolerável. Devem ser implementadas medidas para eliminação do risco

Nas secções seguintes define-se os resultados possíveis para a avaliação de riscos, como sejam os intoleráveis, ALARP e toleráveis.

3.2.1 Risco intolerável

O risco geotécnico intolerável na fase construtiva de túneis em maciços rochosos pode ser definido como todas as situações em que seja colocada em causa a vida de pessoas, integridade de equipamentos, produtividade com perdas significativas de tempo ou recursos.

São intoleráveis situações que coloquem em causa a estabilidade das escavações, quer seja por ação de medidas implementadas, quer seja pela sua ausência.

Os riscos geotécnicos analisados nas listas de verificação podem ser avaliados de diferentes formas, dependendo de cada situação, uma vez que há casos em que, por omissão, resultam em risco inaceitável, enquanto outras resultam igualmente em risco, mas dentro do nível considerado tolerável.

No caso do trecho a escavar, a lista de verificação contempla maioritariamente procedimentos que permitem identificar a presença de riscos, pelo que a sua ausência implica a presença de risco intolerável.

As listas de verificação desenvolvidas analisam os procedimentos relacionados com a observação geotécnica do terreno, essenciais para monitorizar o comportamento do maciço e a sua estabilidade face à abertura do túnel, pelo que a ausência de qualquer um dos procedimentos implica riscos inaceitáveis.

As árvores de eventos desenvolvidas para cada uma das etapas da fase construtiva de túneis são semiquantitativas, baseadas na verosimilhança da ocorrência das situações contempladas, o que permite uma valorização do risco presente.

3.2.2 Risco ALARP

Qualquer avaliação de risco resulta, em última análise, do bom senso do especialista, pelo que todas as situações ocorrentes, em particular as associadas às metodologias empíricas de caracterização de classificação do maciço rochoso, que suscitem dúvidas sobre a adequabilidade dos procedimentos adotados, devem ser considerados dentro da região ALARP (Figura 1.2), para que possam ser consideradas medidas para eliminação ou mitigação dos riscos potenciais.

3.2.3 Risco tolerável

O risco geotécnico é considerado tolerável em diversas circunstâncias, a saber:

- i. A qualidade do maciço rochoso para a abertura de túneis não coloca em causa a estabilidade da escavação,
- ii. A contenção preconizada no projeto é aplicada dentro do tempo de autossustentação do maciço,
- iii. Quando os meios e métodos de escavação se revelam como adequados perante as características do maciço presente.

Mantendo a sequência da gestão de riscos seguida ao longo do capítulo presente, segue-se na próxima secção, a descrição do controlo de riscos.

3.3 CONTROLO DO RISCO GEOTÉCNICO

A gestão de risco geotécnico, conforme definida por (Eskesen *et al.*, 2004), resulta na integração da análise de riscos, com a respetiva avaliação e adoção dos procedimentos no sentido de os eliminar ou mitigar terminando assim o processo. No entanto, os riscos que, pela implementação de certos procedimentos, passaram para a zona do aceitável, ou mesmo os que já se encontravam nessa zona, podem ser alvo de nova apreciação, no sentido de os otimizar para promover a adequabilidade ou aumento da produtividade dentro de um risco controlado, respeitando a segurança da empreitada.

Embora os critérios inerentes à gestão de riscos sejam em parte empíricos, uma vez que se baseiam em registos de casos já ocorridos, sessões de *brainstorming* ou em descrições disponíveis na bibliografia,

sem uma base científica pura, deve-se aproveitar o nível de conhecimento existente para implementar o rigor necessário nestas análises.

Com uma gestão de riscos eficaz, é possível desenvolver procedimentos no sentido de eliminar ou diminuir o risco se este ultrapassar o limite do aceitável e, sempre que possível, deve ser uma preocupação otimizar a produção da construção, dentro de critérios e limites de segurança bem definidos, no sentido da manutenção do risco dentro do domínio considerado como tolerável.

Com a implementação desta filosofia na gestão de riscos, eleva-se o papel deste tipo de acompanhamento para uma integração próxima com a construção, oferecendo uma avaliação consciente dos riscos envolvidos e auxílio na seleção dos melhores procedimentos a implementar, no sentido de promover a maximização da produtividade face às reais condições geotécnicas encontradas. Isto permite, ainda, relegar a imagem de isolamento relativamente às restantes atividades construtivas, que às vezes ocorre.

O MO afigura-se como adequado na gestão de riscos em túneis, no entanto, como esclarece Eskesen *et al.* (2004), é necessário ser aplicado de forma criteriosa, com as definições contempladas na fase de projeto, para que sejam implementadas na abordagem às reais condições encontradas, respeitando os seus princípios de base (Caldeira & Muralha, 2004). Neste sentido, a gestão de riscos, contando com a avaliação dos novos dados recolhidos na fase construtiva, deve ter como procedimento a intervenção do Projetista, para otimização do projeto realizado.

Na fase construtiva, para promoção de uma célere interligação entre a gestão de riscos geotécnicos e o projeto de execução, é importante que os técnicos de ambas as atividades estejam em acompanhamento permanente da obra.

O acompanhamento do Projetista em permanência na construção de túneis resulta numa mais-valia, uma vez que há possibilidade de adaptar melhor o projeto, de modo mais adequado, às reais condições geotécnicas encontradas e de forma célere.

Embora este procedimento seja uma mais-valia técnica, necessita do devido enquadramento contratual por parte de todos os envolvidos na obra, para que possa ter a devida abrangência na sua implementação, resultando em economia para todas as partes.

A interligação da gestão de risco geotécnico com a produção também se revela importante, sendo necessário transmitir de forma célere e perceptível os diferentes cenários de risco para que a preparação de meios, assim como a celeridade de intervenção, sejam os mais adequados a cada situação detetada. Na abordagem realizada à estimação do risco para o trecho a escavar, é importante informar as restantes entidades envolvidas, que existe associado um nível de incerteza nos resultados obtidos, que é tanto maior quanto a heterogeneidade dos maciços rochosos.

Independentemente do resultado verificado na análise e avaliação de risco e como referido previamente, o procedimento fundamental de toda a metodologia é a comunicação dos resultados de forma célere aos restantes intervenientes na obra. Num cenário de identificação de risco geotécnico

para além do limite do tolerável, o procedimento a implementar é o de informar igualmente as várias entidades envolvidas na empreitada, neste caso com o objetivo de promover a sua resolução.

O procedimento seguinte é o de intervir nos planos de contingência. Em interligação com os vários intervenientes na fase construtiva, auxiliar na seleção de medidas a implementar na obra, tendo em vista a eliminação ou mitigação do risco, realizando uma nova avaliação do risco intrínseco às soluções apresentadas, mas nesta fase tendo em consideração as metodologias executivas a usar.

No caso em particular de risco inaceitável, a celeridade do processo reveste-se de importância extrema, uma vez que uma intervenção rápida pode ser, por si só, a solução para eliminar ou reduzir o risco envolvido, como seja por exemplo o surgimento de uma falha imprevista, onde as características do maciço se apresentem fracas para a abertura de túneis.

Caso o risco se encontre dentro do nível do tolerável, mas próximo do limite do intolerável, o procedimento a adotar é igualmente de informar os vários intervenientes na obra, no sentido de manutenção do risco, com particular atenção para alguma alteração que possa culminar no aumento de risco para além do limite; no entanto, ressalva-se que em situações onde se preveja o aumento de risco a curto prazo, como por exemplo na evolução acentuada das deformações do maciço, que possam atingir valores superiores aos níveis de alerta, pode ser de imediato sugerida a implementação de medidas, sempre com a devida discussão da situação com os restantes intervenientes na obra.

Na situação em que o risco se encontre dentro do nível do aceitável, longe do limite do intolerável, o procedimento a desenvolver é semelhante aos anteriores, informar todos os envolvidos na obra, e em sintonia com os mesmos, avaliar do ponto de vista do risco geotécnico envolvido, eventuais soluções no sentido de otimizar a produtividade e economia da construção.

Ainda que os casos de estudo utilizados nesta investigação não estejam inseridos em meio urbano, a caracterização e observação do terreno escavado, enquadrados em medidas de contingência adequadas, definidas pelo Projetista, em particular na abrangência dos princípios do MO, possibilita aos vários intervenientes rentabilizar meios, o que gerido adequadamente, resulta em benefício para todos os intervenientes neste tipo de obras.

Após aplicação das medidas de controlo, os riscos podem ficar totalmente eliminados ou podem manter-se riscos residuais, ou ainda serem gerados riscos secundários, conforme se referem na secção seguinte.

3.4 RISCO RESIDUAL E SECUNDÁRIO

Num processo de gestão de riscos podem ocorrer riscos residuais e secundários. Estes riscos pela sequência de processos são muitas vezes confundidos, pelo que se passa a descrever o seu significado.

O risco residual é remanescente, trata-se de um risco mínimo que ainda permanece após a implementação de medidas de controlo, sendo inviável ou impossível a sua eliminação e com o qual é

necessário conviver. Os riscos residuais são toleráveis, tendo associadas verosimilhanças de ocorrência remotas ou improváveis e consequências moderadas ou insignificantes.

O risco secundário resulta de uma nova situação colateral à implementação do controlo de um risco inicial. Neste caso, os riscos secundários gerados têm de ser alvo de gestão como se de um risco principal se tratasse, com análise e avaliação e implementação de medidas de controlo caso se considerem intoleráveis.

No Capítulo 4 são caracterizados os casos de estudo seleccionados para implementar as metodologias referidas ao longo deste capítulo.

4. CASOS DE ESTUDO

Neste Capítulo 4 descrevem-se os casos de estudo selecionados para a presente investigação, revelando-se as principais características descritivas, enquadramento geológico e geotécnico e ainda é revelada a estatística descritiva da informação disponível sobre a caracterização do terreno observado ao longo da escavação, em particular na análise da qualidade do terreno representada pelos índices RMR e Q por aplicação das metodologias referidas na Secção 3.1.2.1.

Como referido no Capítulo 1, nos últimos anos, Portugal tem sido palco da construção de várias obras subterrâneas, onde se destacam, pelo seu número e relevância, os túneis das novas rodovias e os circuitos hidráulicos dos aproveitamentos hidroelétricos. Dessas obras, foram selecionadas algumas como casos de estudo da presente investigação, localizados conforme indicado na infografia da Figura 4.1, e aos quais se aplica a metodologia descrita no capítulo imediatamente anterior.

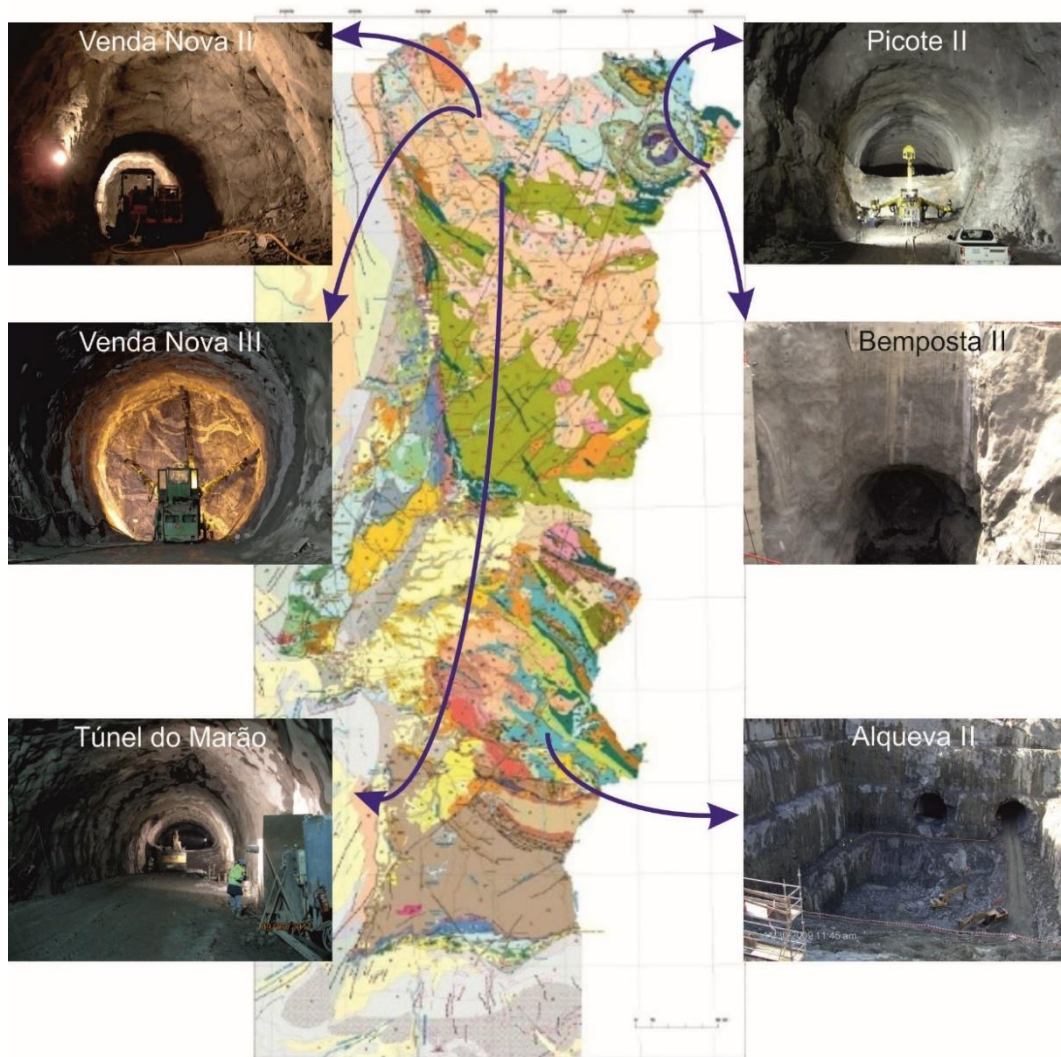


Figura 4.1 – Infografia dos casos de estudo sobre Carta Geológica de Portugal 1:1.000.000 (adaptado de LNEG-LGM, 2010)

Segundo Sousa (2000), o primeiro empreendimento hidroelétrico importante em Portugal com obras em subterrâneo, foi o de Venda Nova, que remonta a 1927. No final dos anos 50 e início dos anos 60 do século passado foram inaugurados os empreendimentos de Picote, em 1957, e Bemposta, em 1964. Estes são alguns dos empreendimentos que foram alvo de reforço de potência, com inauguração já no presente século, e contaram com ATO no âmbito da geologia e geotecnia, constituindo algumas dessas escavações em subterrâneo o objeto de estudo nesta investigação.

Os casos selecionados de aproveitamentos hidroelétricos estão normalmente associados a reforços de potência em barragens de betão em arco, inserindo-se em maciços rochosos, chegando alguns a contar com recobrimentos que ultrapassam 400 m (Plasencia, 2014).

Estes reforços localizam-se na proximidade dos aproveitamentos hidroelétricos iniciais, pelo que já existia um conhecimento prévio da geologia ocorrente e do comportamento do maciço rochoso perante a abertura de túneis. Na fase de reforço de potência, todos os túneis foram escavados com recurso a explosivo (D&B), seguindo uma metodologia baseada no NATM.

Dos casos de estudo selecionados, o mais antigo é o do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova II (AHVNII), que teve a sua fase de construção entre 1997 e 2004; seguiram-se os dois aproveitamentos no Rio Douro, efetuados entre 2007 e 2011, tendo o Aproveitamento Hidroelétrico de Picote II (AHP) sido executado primeiro, com poucos meses de diferença, relativamente ao Aproveitamento Hidroelétrico de Bemposta II (AHB). Ainda com pouca diferença no tempo para os anteriores, ocorreu a construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva II (AHA), entre 2008 e 2011. Contemporaneamente, com início em 2010 e ainda em construção, encontra-se o Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova III (AHVNIII). Finalmente, o caso de estudo onde é testada a metodologia é o do Túnel do Marão (TM), que teve início em 2009 e contou com três períodos de paragem devido a disputas judiciais, tendo o último sido de aproximadamente dois anos, pelo que se encontra em fase final de conclusão, tendo a escavação terminado em final de 2015.

Os diferentes casos estão organizados pelo seu enquadramento geológico e geotécnico e localização, abordando-se inicialmente os inseridos num cenário granítico, sendo o primeiro o AHVNII por ser o mais antigo, surgindo de seguida o AHVNIII, que embora seja o mais recente, localiza-se nas imediações do anterior, o que facilita a comparação. O terceiro inserido em cenário granítico a ser abordado é o AHP.

Entrando seguidamente nas rochas metassedimentares, descreve-se primeiro o AHB por apresentar um maciço supostamente de características com maior semelhança ao maciço granítico. Segue-se a descrição do AHA inserida num maciço supostamente com características diferentes dos anteriores e mais próxima do caso do TM, sendo este o último a ser descrito.

Assim, tendo em vista o desenvolvimento da presente investigação, os casos dos AHVNII e de AHVNIII ficam ambos inseridos no mesmo maciço granítico, onde o circuito hidráulico mais recente

envolve o anterior. Estes dois casos permitem desenvolver uma comparação de resultados para o mesmo cenário e enquadramento geológico.

Um outro caso selecionado, o AHP, e à semelhança dos circuitos hidráulicos anteriores, interessa igualmente um maciço granítico; no entanto, localiza-se distante dos anteriores, permitindo estudar a mesma litologia em localizações e enquadramentos geológicos diferentes.

O AHB insere-se num maciço constituído por rochas metassedimentares com grau de metamorfismo elevado. Com este caso pretende-se estudar um maciço metassedimentar onde a xistosidade não se apresente como elemento estrutural relevante para a estabilidade das escavações, ou seja, onde o maciço rochoso apresenta um comportamento face à escavação mais próximo do observado nos maciços graníticos, de estrutura maciça.

A seleção do AHA justifica-se pelo seu enquadramento num maciço metassedimentar constituído por rocha onde a xistosidade se encontra bem marcada e constitui um elemento estrutural relevante, às vezes funcionando como descontinuidade principal do maciço.

Conforme referido na metodologia (Capítulo 3), a investigação desenvolvida nesta dissertação limita-se à informação disponível sobre a escavação em túneis do circuito hidráulico principal, assim como dos túneis auxiliares, em secção transversal designada de corrente, isto é, excluem-se as zonas de emboquilhamento, de interseção com outros túneis e na proximidade de estruturas de maior dimensão, como o caso das centrais subterrâneas e câmaras de transformadores e comportas. Pela sua dimensão, devido às condições geológicas e geotécnicas especiais da sua localização e por existirem poucos casos disponíveis para estudo, as escavações em subterrâneo de grande dimensão como as centrais hidroelétricas e câmaras de transformadores ou comportas, também não são objeto de estudo.

O TM é aquele onde se implementa, no Capítulo 7, a nova metodologia de gestão de riscos geotécnicos. Este túnel tem uma finalidade diferente dos casos anteriores, uma vez que é parte integrante de um lanço da autoestrada A4, Amarante – Vila Real. Na realidade trata-se de dois túneis paralelos, um para cada sentido de tráfego, com várias galerias para passagens de emergência entre ambos. O cenário geológico onde se insere este caso é muito particular, uma vez que o maciço metassedimentar comporta várias formações geológicas, com litologias distintas, como xistos, psamitos, quartzitos e rochas vulcanossedimentares, entre outras, parte das quais afetadas por metamorfismo de contacto, o que lhes confere características mais próximas de corneanas que da rocha metamórfica inicial. Neste caso e à semelhança dos aproveitamentos hidroelétricos, a escavação também foi realizada com recurso a explosivo (D&B) e a metodologia de avanço da escavação foi baseada no NATM. A investigação limita-se ao estudo dos dois túneis principais, excluindo-se as ligações entre ambos.

Seguidamente caracterizam-se com maior pormenor cada um dos casos de estudo, conforme referido no início deste capítulo.

4.1 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA II

4.1.1 Descrição geral

O AHVNII localiza-se no Norte de Portugal, junto à povoação que lhe dá o nome, na margem direita do Rio Rabagão, na proximidade do Parque Nacional de Peneda-Gerês, entre a cidade de Braga e a vila de Montalegre - Figura 4.2.

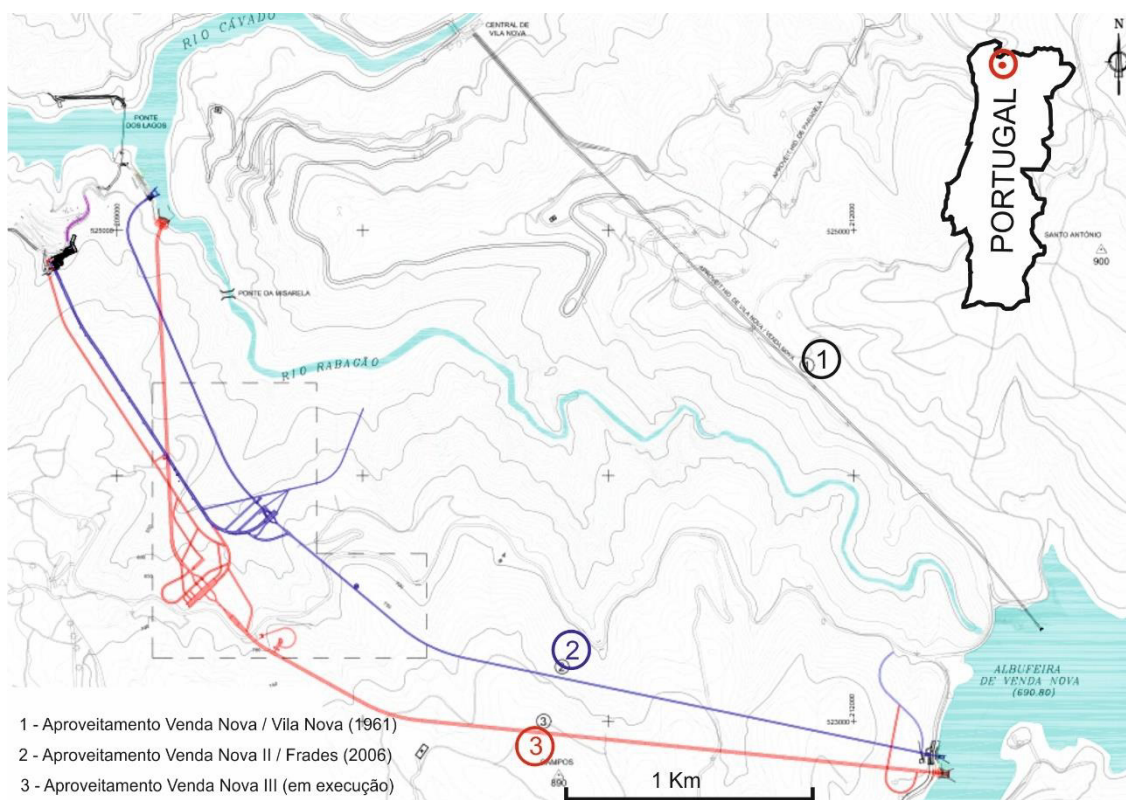


Figura 4.2 – AHVNII e AHVNIII: infografia da localização dos empreendimentos (adaptado de EDP, 2009)

Este aproveitamento hidroelétrico tem como componentes principais o túnel em carga com aproximadamente 2800 m e uma inclinação de 15%, o túnel de restituição com um comprimento próximo dos 1400 m e uma inclinação de 2%, e a central em subterrâneo com um comprimento de 60 m, uma largura de 20 m e uma altura de 30 m. O circuito hidráulico conta ainda com duas chaminés de equilíbrio e vários túneis auxiliares para acesso e construção - Figura 4.3. Os túneis em carga e restituição têm ambos uma secção transversal em ferradura, de 7,3 m de largura por 6,3 m de altura. Junto à central, encontra-se a caverna dos transformadores, ligada por duas galerias. Para acesso à central e ataque às escavações dos túneis do circuito hidráulico, foi construído um túnel de acesso com aproximadamente 1500 m, com 10,9% de inclinação e com um vão de 8 m numa secção transversal em ferradura que totaliza 58 m² (Miranda *et al.*, 2007).

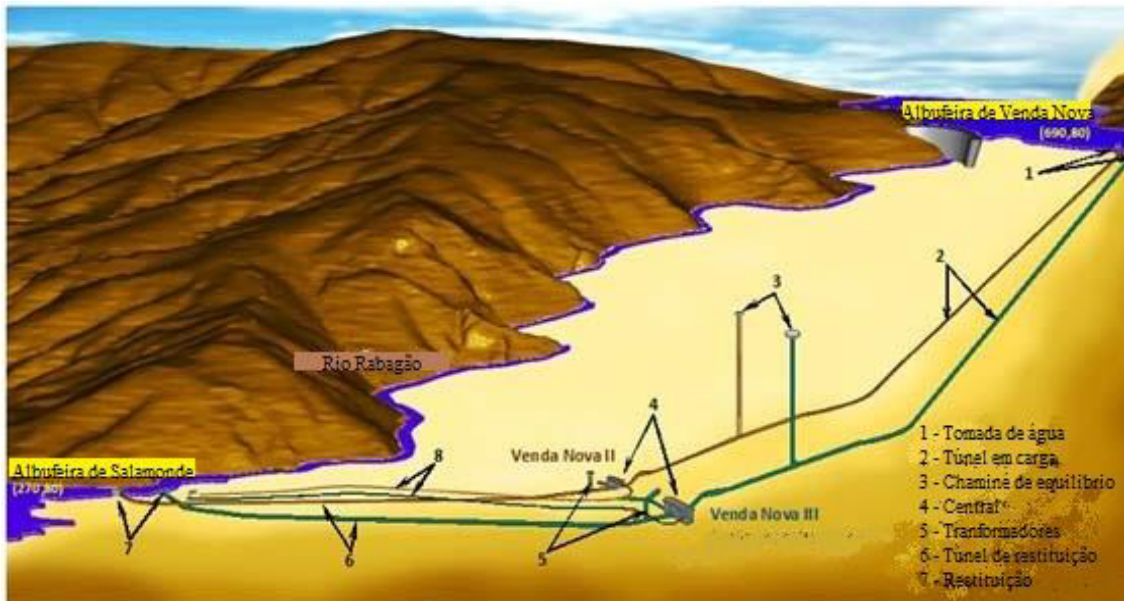


Figura 4.3 – AHVNII: infografia tridimensional do empreendimento (APRH, 2012)

Este circuito hidráulico é reversível e a sua potência máxima por grupo das turbinas-bombas é de 97,1 MW em turbinamento e de 94,7 MW em bombagem (EDP, 2009b).

Das várias estruturas que compõem este empreendimento foram seleccionadas como caso de estudo, com base nos critérios acima referidos, as que se apresentam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – AHVNII: características geométricas das estruturas subterrâneas

Estrutura	Comprimento (m)	Secção transversal		
		Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
Túnel em carga	2758	10	10	80
Túnel da restituição	1366	10	10	80
Túnel de acesso ao túnel em carga	177,5	5,5	5	35
Túnel de acesso à abóbada da central	95	5,5	5	35
Túnel de acesso ao túnel da restituição	180	5,5	5	35
Galeria de ventilação e segurança	411	3	3	10

4.1.2 Enquadramento geológico

A região do AHVNII insere-se no Maciço Hespérico, formado durante a Orogenia Hercínica, também designada de Varisca. Tendo em consideração as zonas morfoestruturais em que se divide o Maciço Hespérico, este local encontra-se na Zona Centro-Ibérica e caracteriza-se pela presença de terrenos paleozóicos, metamorfizados e alterados e, ainda, pela presença de granitos ligados à fase ante, pós e sin-tectónica (Ribeiro, 2006).

Na zona ocorrem formações metassedimentares, constituídas por intercalações de micaxistos e metagrauwaques, datados do Silúrico. Estes terrenos, junto ao contacto com os granitos, encontram-se

afetados por metamorfismo de contacto, consistindo em corneanas e migmatitos (Noronha & Ribeiro, 1983).

Os granitos na zona pertencem a várias unidades, conforme consta na Figura 4.4, nomeadamente:

- Granito da Borralha, caracterizado por apresentar grão médio a grosseiro, biotítico moscovítico, sin-tectónico;
- Granito do Cabril ou do Gerês, identificado pela sua tonalidade rósea devido à presença de feldspato, porfiróide, de grão grosseiro a médio, pós-tectónico;
- Granito de Ruivães, de grão grosseiro de duas micas, às vezes com tendência porfiróide;
- Granito da Cabreira, de grão médio de duas micas, às vezes com tendência porfiróide;
- Enclaves de granodiorito, de grão médio a fino, de cor escura e de formações metamórficas.

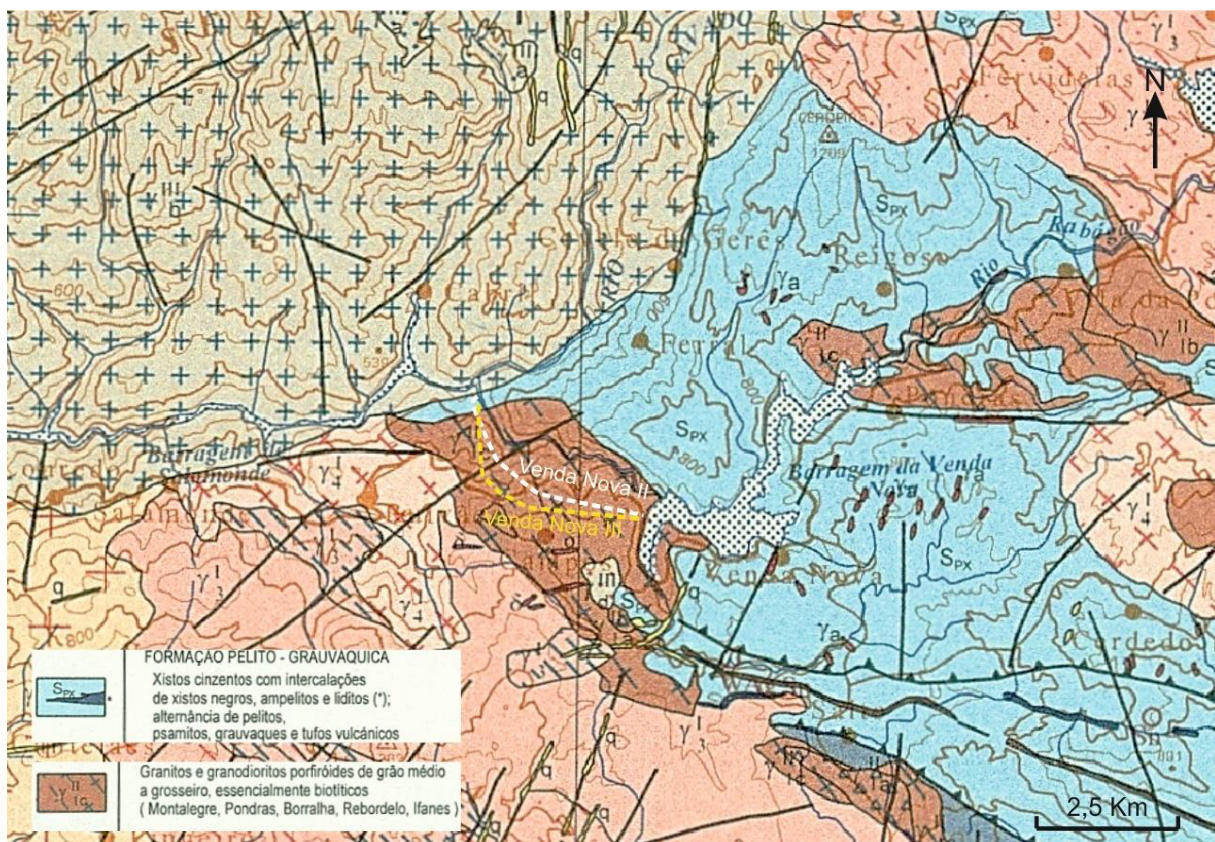


Figura 4.4 – AHVNII e AHVNIII: infografia do enquadramento geológico (adaptado de Pereira *et al.*, 2000)

Os estudos para este circuito hidroelétrico foram iniciados antes da publicação da carta geológica da região na escala 1:50.000 (Noronha & Ribeiro, 1983). Como tal, houve necessidade de desenvolver todos os trabalhos de campo, tendo em vista a realização da cartografia da zona envolvente que permitisse servir de base ao projeto (Plasencia, 2003).

Ao longo do traçado do circuito hidroelétrico predomina o granito da Borralha, com passagens de granito porfirítico de grão médio e tonalitos e granodioritos de pequena extensão, cortados por filões

aplíticos, pegmatíticos e de quartzo (Plasencia, *op. cit.*). Junto à restituição encontram-se interseções de filitos e metagrauvaques, de fácies migmatíticas (Lima *et al*, 2002).

O maciço rochoso, à escala macroscópica, apresenta uma rede de falhas e discontinuidades de orientação bem definida, em muitos casos patente no alinhamento reto das linhas de água da região, onde se encontram as direções preferenciais NNW-SSE, W-E e ainda subhorizontais.

4.1.3 Enquadramento geotécnico

O traçado definido para este circuito hidráulico foi fundamentalmente influenciado pelas características geológicas e geotécnicas ocorrentes (Plasencia, *op. cit.*). Tendo por base a caracterização geológica, foi realizado um zonamento geotécnico que agrupa o maciço em trechos de características idênticas e com comportamento idêntico face à escavação em subterrâneo.

Na generalidade, o maciço rochoso presente no local de implantação deste empreendimento hidroelétrico apresenta boa qualidade geomecânica, com valores de RMR elevados; no entanto, é necessário ter em conta a interseção de algumas zonas mais tectonizadas, como seja a falha de Boticas (T. Miranda, 2007).

Segundo Hidrorumo (1996), foram individualizadas no maciço rochoso três zonas geotécnicas, com características específicas que levaram à definição de cinco secções tipo de contenção, conforme descrito na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – AHVNII: resumo das características das zonas geotécnicas e secções de escavação/contenção (adaptado de Plasencia, 2003)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Faturação	RMR	Contenção
ZG1/S1	W ₁ a W ₁₋₂	F ₁ a F ₃	70-100	Abóbada com pregagens L=2,5 m, Ainf 2m ²
ZG2/S2	W ₂ a W ₃	F ₁ a F ₃	40-70	Abóbada com pregagens L=3 m, Ainf 1,5m ² . Abóbada e hasteais com 5 cm de betão projetado com fibras
ZG3/S3	W ₂ a W ₄	F ₄ a F ₅	30-40	Abóbada e hasteais com pregagens L=4 m, Ainf 1m ² e 5+5 cm de betão projetado com fibras
ZG3/S3A	W ₄	F ₄ a F ₅	20-30	Abóbada e hasteais com pregagens L=4 m, Ainf 1m ² e 5+5+5 cm de betão projetado com fibras
ZG3/S4	W ₅	F ₅	< 20	Perfilados metálicos, pranchões ou dupla malha eletrossoldada e betão armado

Ainf – Área de influência; L – Comprimento das pregagens

4.1.4 Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise

A qualidade do maciço rochoso para a abertura de túneis é sintetizada pelos resultados obtidos das classificações geomecânicas, como sejam os já referidos índices RMR e Q.

A Figura 4.5 resume a descrição estatística do RMR observado, ao longo de um total de 1036 frentes de escavação no AHVNII, correspondente a um comprimento total de 5467 m.

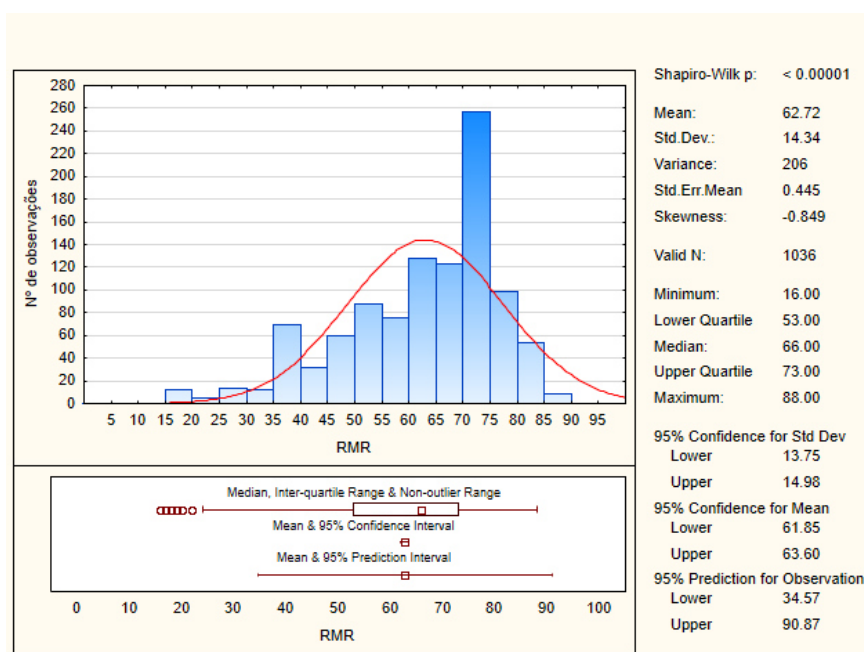


Figura 4.5 – AHVNII: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

Neste caso de estudo, verifica-se que o maciço apresenta uma qualidade boa, com RMR médio próximo de 62 e um desvio padrão de 14, sendo uma das classes mais frequentes a de valores de RMR no intervalo 70-75.

Pelas tabelas constante no Apêndice I e considerando as classes de qualidade do maciço para a escavação de túneis definidas por Bieniawski (1989), é possível verificar que o maciço mais representado é o enquadrado na classe de qualidade II ($60 < \text{RMR} < 80$), correspondente a terreno de boa qualidade, e a classe menos representada é a V ($\text{RMR} < 20$), indicando características geotécnicas mais fracas.

O resultado da aplicação da classificação de maciços rochosos, segundo Barton *et al.* (1974), encontra-se na Figura 4.6. Como a escala utilizada por esta classificação é logarítmica e com intervalo de variação de 0,0001 a 1000, a sua análise não pode ser realizada de forma direta à semelhança da efetuada para o RMR.

Conforme se observa na Figura 4.6, para este caso de estudo, a classe mais frequente é a que contempla terreno com valores inferiores a 1.

Correlacionando os dois índices de classificação do maciço em análise, resulta num R^2 de 0,84. A análise da Figura A2.1 constante no Apêndice II, permite considerar uma elipse imaginária com o eixo maior orientado com a correlação ótima e o eixo menor perpendicular, o qual representa a dispersão da correlação entre os dois índices, verificando-se que é elevada.

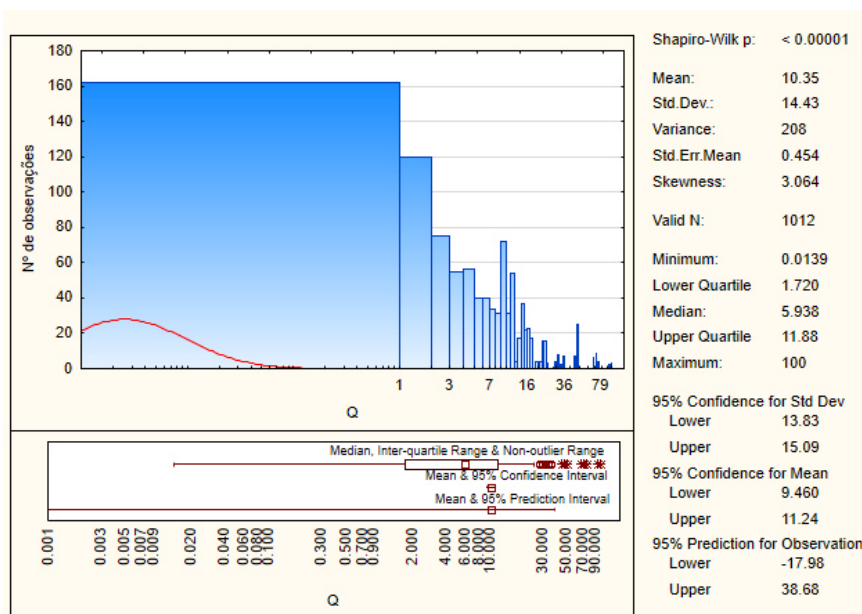


Figura 4.6 – AHVNII: estatística descritiva dos valores do índice Q observados

A correlação obtida entre as duas classificações para este caso de estudo aproxima-se mais das do grupo constituído pelas fórmulas de correlação (3.1), (3.5), (3.6), (3.8) e (3.9) que do constituído pelas correlações patentes nas fórmulas (3.2), (3.3), (3.4), (3.7) e (3.10), possivelmente porque as do primeiro grupo resultam de casos de estudo de maciços rochosos com qualidade melhor.

4.2 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA III

4.2.1 Descrição geral

O AHVNIII localiza-se no Norte de Portugal, nas proximidades do AHVNII já descrito. Conforme já referido, a povoação mais próxima é a de Venda Nova, por onde passa a estrada que liga Braga a Montalegre - Figuras 4.2 e 4.3.

A seleção do traçado deste novo circuito hidráulico considerou a presença do AHVNII, assim como as condicionantes geológicas e topográficas globais da região (EDP, 2009a).

As obras subterrâneas associadas à central assumem uma posição idêntica à do AHVNII devido à presença da falha de Boticas, que tem grande expressão na região e levou ao condicionamento da localização das estruturas, ficando situadas a uma distância idêntica em relação à referida falha (*op. cit.*).

Este circuito hidráulico é constituído por uma central em subterrâneo, instalada numa caverna com uma dimensão de 22 m de largura, comprimento de 101,5 m e altura máxima na zona dos grupos geradores de 55 m. Contiguamente, desenvolve-se num dos topos a câmara dos transformadores, com dimensão de 19,6 m de largura, 50 m de comprimento e uma altura máxima de 20 m.

O túnel em carga liga a tomada de água em turbinamento, na albufeira da barragem de Venda Nova, à central em subterrâneo, num comprimento de aproximadamente 2840 m, com uma inclinação de 13,8%. A secção transversal apresenta uma forma circular modificada, com diâmetro de 12 m.

O circuito hidráulico conta com duas chaminés de equilíbrio, com respetiva câmara de expansão, uma localizada antes da central com ligação ao túnel em carga e outra localizada após a central com ligação ao túnel de restituição.

O túnel de restituição tem uma secção transversal com diâmetro igual ao do túnel em carga e um comprimento de 1375,5 m, ligando a central ao bocal de restituição, localizado na albufeira da barragem de Salamonde.

Para a ligação entre os dois aproveitamentos hidroelétricos foi construída uma nova galeria com aproximadamente 286 m de extensão.

Para saída de cabos de energia e construção de toda a escavação subterrânea, o projeto preconizou um novo túnel, paralelo ao existente para o AHVNII, que dista desse 20 m.

Para construção deste reforço de potência foram construídos túneis de acesso à câmara das comportas e restituição, de ventilação e construção, acesso às chaminés de equilíbrio e acesso ao túnel em carga.

Junto à tomada de água em turbinamento, foi aproveitado parte do túnel de ataque existente do AHVNII, o qual foi prolongado, para uma nova galeria de ataque à zona da tomada de água e ao túnel em carga (*op. cit.*).

Na Tabela 4.3 inclui-se uma compilação das características das diferentes estruturas escavadas em subterrâneo que compõem o AHVNIII.

Tabela 4.3 – AHVNIII: características geométricas das estruturas subterrâneas

Estrutura	Comprimento (m)	Secção transversal		
		Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
Túnel em carga	2840	12	12	113
Túnel de restituição	1375,5	12	12	113
Túnel de acesso à central	286	8,2	8,4	58
Túnel de saída de energia e construção	1346	7,4	7,4	47
Túnel de acesso às câmaras das comportas e ao túnel de restituição	425	7	7	43
Túnel de acesso ao túnel em carga	286	7	7	43
Túnel de ataque à tomada de água	516	5,5	5,5	26
Túnel de saída de energia e ventilação	318	5,5	5,5	26
Túnel de acesso à chaminé de equilíbrio inferior	280	5,5	5,5	26
Túnel de ataque à chaminé de equilíbrio superior	260	5,5	5,5	26
Túnel de ventilação e construção	154	5,5	5,5	26

4.2.2 Enquadramento geológico

O enquadramento geológico do AHVNIII é igual ao AHVNII, uma vez que os dois aproveitamentos hidroelétricos são quase paralelos e encontram-se muito próximos.

Conforme descrito anteriormente e constante na Figura 4.4, na zona ocorrem formações metassedimentares, constituídas por intercalações de micaxistos e metagrauvaques, datados do Silúrico, no entanto a maioria do traçado do circuito hidroelétrico interessa granito, concretamente o Granito da Borralha (Noronha & Ribeiro, 1983).

Segundo EDP (2009), as intrusões graníticas originaram ações de metamorfismo de contacto nas formações metassedimentares, que tinham sido inicialmente afetadas por metamorfismo regional; isto faz com que, junto ao contacto com os granitos, se encontrem corneanas.

O maciço rochoso é cortado por alinhamentos estruturais correspondentes a falhas geológicas, fraturação intensa e zonas tectonizadas preenchidas por caulinite. A estas zonas estão normalmente associadas a uma maior percolação de água. As direções que apresentam também são iguais às indicadas para o caso do AHVNII, com as orientações preferenciais NNE-SSW, W-E e subhorizontais. O projeto (EDP, 2009) refere a interseção da escavação com a falha de Botica, em particular pelo túnel da restituição e pelo túnel de saída de energia e construção, correspondente a terrenos de fraca qualidade para a escavação de túneis. Como a interseção com a escavação não é na perpendicular ao alinhamento da falha, esta observa-se ao longo de uma extensão de aproximadamente 120 m.

4.2.3 Enquadramento geotécnico

Tendo como base as características geológicas e geotécnicas do maciço rochoso, determinadas, quer pelos elementos disponíveis nas várias campanhas de prospeção, quer pela construção dos circuitos hidroelétricos anteriores, o projeto (EDP, 2009) individualizou no maciço quatro zonas geotécnicas.

Para além da qualidade do maciço face à abertura de túneis, outro dos fatores que influencia a estabilidade é a forma e dimensão da secção transversal de escavação, pelo que esse aspeto foi considerado no projeto, tendo sido preconizado quantidade de contenção diferente a aplicar nas diversas estruturas referidas na Tabela 4.3.

Para os túneis do circuito hidráulico, túnel em carga e túnel da restituição, que apresentam secção transversal semelhante entre si, de aproximadamente 12 m de diâmetro, o projeto preconiza a aplicação de quatro secções tipo de contenção (*op. cit.*). Na Tabela 4.4 apresentam-se as características principais de cada zona geotécnica, bem com a contenção preconizada.

Os túneis de saída de energia e construção, acesso à central, acesso ao túnel em carga e acesso às câmaras das comportas e restituição apresentam, todos, secção transversal semelhante e como tal, a contenção a aplicar definida em projeto é idêntica - Tabela 4.5. Para estes túneis o maciço com

características que permitem o seu enquadramento em ZG1 e ZG2 foi agrupado de forma a corresponder à mesma secção de contenção tipo A.

Tabela 4.4 – AHVNIII: zonas geotécnicas e respetivas secções tipo de contenção para os túneis do circuito hidráulico

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 75	Pregagens L=4 m, Ainf 4,5 m ² e 5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG2/B	W ₁₋₂ , por vezes W ₃	F ₂ , às vezes F ₃	50-75	Pregagens L=4 m, Ainf 2 m ² e 5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG3/C	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , às vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	30-50	Pregagens L=4 m a L=6m, Ainf 1,125 m ² e 5+5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG4/D	W ₄₋₅ a W ₃ W ₂ pontual	F ₄₋₅ a F ₃ , F ₂ pontual	< 30	Pregagens L=6 m, Ainf 1,125 m ² e 20 cm de betão projetado reforçado com fibras. Perfilados metálicos afastados 0,75 m e betão cofrado com espessura de 0,7 m

Ainf – Área de influência; L – comprimento das pregagens

Tabela 4.5 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para os túneis de saída de energia e construção, acesso à central, acesso ao túnel em carga e acesso às câmaras das comportas e restituição

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 50	Pregagens L=3 m, Ainf 3,125 m ² e 5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG2/A	W ₁₋₂ , por vezes W ₃	F ₂ , às vezes F ₃		
ZG3/B	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , às vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	30-50	Pregagens L=3 m, Ainf 2 m ² e 5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG4/C	W ₄₋₅ a W ₃ W ₂ pontual	F ₄₋₅ a F ₃ , F ₂ pontual	< 30	Pregagens L=4 m, Ainf 1,125 m ² e 5+5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras. Perfilados metálicos afastados 0,75 m. Eventualmente, betão cofrado numa espessura de 0,4 m

Ainf – Área de influência; L – comprimento das pregagens

O túnel de ataque à tomada de água apresenta um vão de 5,5 m. A contenção a aplicar foi definida em projeto (*op. cit.*) e contempla igualmente quatro zonas geotécnicas, às quais corresponde o mesmo número de secções de contenção, conforme se resume na Tabela 4.6.

Os túneis de saída de energia, de interligação, de construção e ventilação, de acesso à chaminé de equilíbrio inferior e de ataque à chaminé de equilíbrio superior, apresentam secção transversal idêntica entre si, bem como ao túnel de ataque à tomada de água. No entanto e para estes, o projeto (*op. cit.*) agrupa o terreno enquadrado em ZG1 e ZG2 tendo como correspondência a mesma secção de contenção tipo A - Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o túnel de ataque à tomada de água

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 75	Pregagens L=2,5 m, Ainf 2 m ² e 5 cm de betão projetado com fibras na abóbada
ZG2/B	W ₁₋₂ , por vezes W ₃	F ₂ , às vezes F ₃	50-75	Pregagens L=2,5 m, Ainf 1,5 m ² e 5 cm de betão projetado com fibras
ZG3/C	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , às vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	30-50	Pregagens L=3 m, Ainf 1 m ² e 5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG4/D	W ₄₋₅ a W ₃ , W ₂ pontual	F ₄₋₅ a F ₃ , F ₂ pontual	< 30	Pregagens L=3 m, Ainf 1 m ² e 5 a 5+5 cm de betão projetado com fibras. Perfilados metálicos afastados 1 m e betão cofrado armado com espessura de 0,3 m
Ainf – Área de influência; L – comprimento das pregagens				

Tabela 4.7 – AHVNIII: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para os túneis de saída de energia, interligação, construção e ventilação e acesso às chaminés de equilíbrio

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 50	Pregagens L=3 m, Ainf 4,5 m ² na abóbada e 5 cm de betão projetado reforçado com fibras na abóbada
ZG2/A	W ₁₋₂ , por vezes W ₃	F ₂ , por vezes F ₃		
ZG3/B	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , por vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	30-50	Pregagens L=3 m de comprimento, Ainf 2 m ² e 5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras
ZG4/C	W ₄₋₅ a W ₃ W ₂ pontual	F ₄₋₅ a F ₃ , F ₂ pontual	< 30	Pregagens L=3 m, Ainf 1,125 m ² e 5+5+5 cm de betão projetado reforçado com fibras. Perfilados metálicos afastados 1,5 m. Eventualmente betão cofrado de 0,3 m espessura
Ainf – Área de influência; L – comprimento das pregagens				

4.2.4 Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise

A qualidade do maciço rochoso, sintetizada pelo valor de RMR observado ao longo da execução deste caso de estudo, num total de 1786 frentes de escavação, que acumulam um comprimento total de 7580 m, encontra-se resumida na Figura 4.7.

Verifica-se que o maciço tem uma qualidade boa, com valor médio de RMR próximo de 63, com uma distribuição próxima da normal, com exceção do intervalo de RMR 70-75, que se associa com a maior frequência de valores observados.

Enquadrando os valores de RMR observados ao longo da escavação nas classes de qualidade do maciço para abertura de túneis (Apêndice I), constata-se que a classe II (60<RMR<80), que corresponde ao maciço de boa qualidade para a abertura de túneis, é a mais representada, seguida da classe III (40<RMR<60) que identifica maciço de qualidade moderada. Como classe menos representada identifica-se a V (RMR<20), indicando que a presença de maciço de fraca qualidade foi pouco significativa.

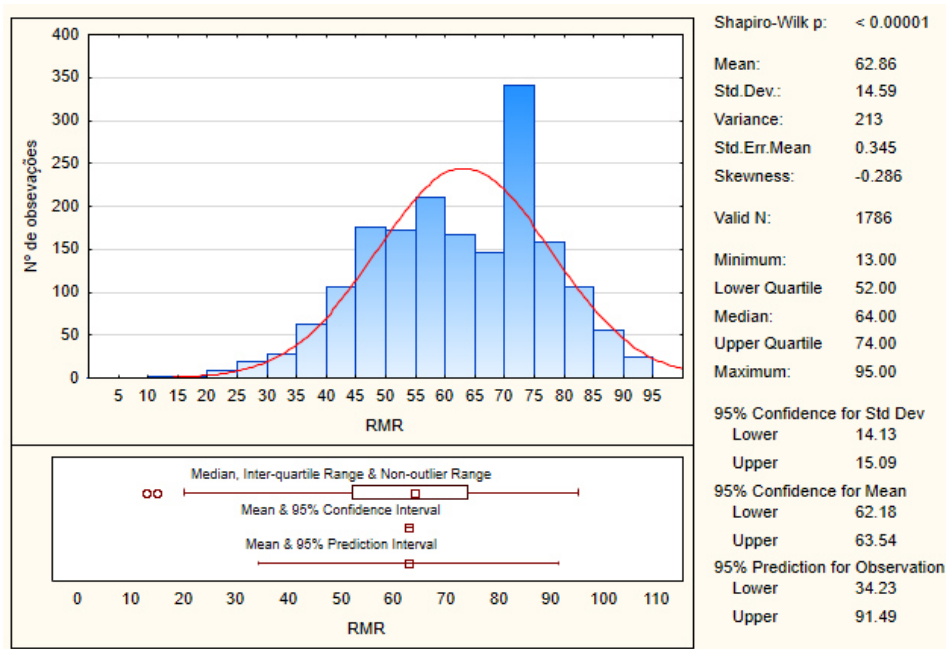


Figura 4.7 – AHVNIII: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

Os resultados da classificação de Barton *et. al.* (1974) encontram-se na Figura 4.8. O valor médio obtido para este caso de estudo é 16; no entanto ele é mascarado pela escala logarítmica desta classificação, sendo que a classe mais frequente é a inferior a 1.

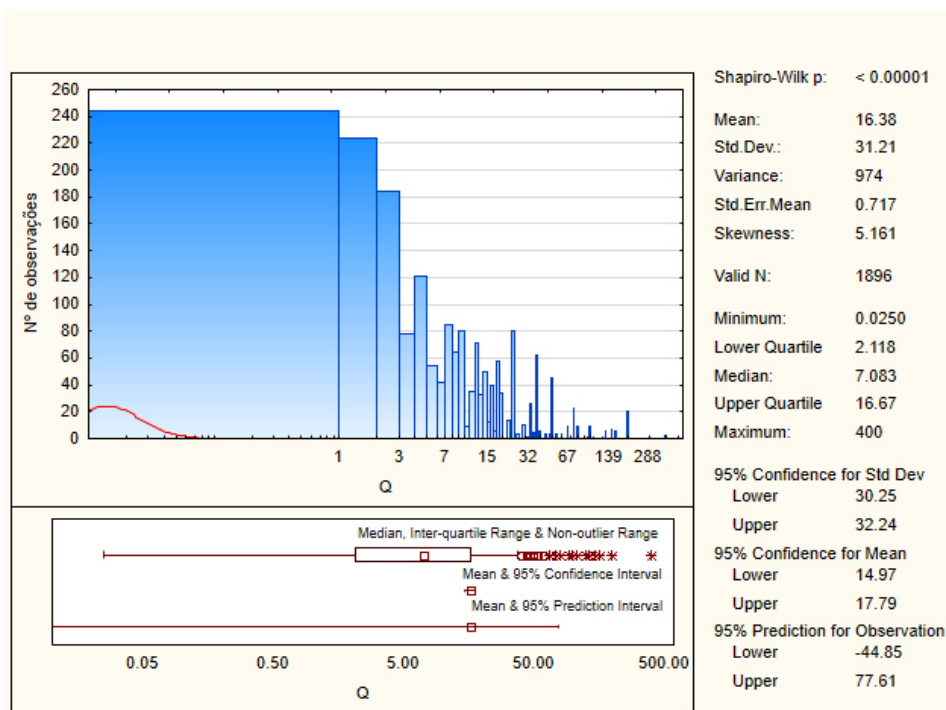


Figura 4.8 – AHVNIII: estatística descritiva dos valores do índice Q observados

A correlação verificada para este caso de estudo e que consta na Figura A2.2 do Apêndice II, revela um R^2 de 0,79 e, quando comparada com algumas das correlações disponíveis na bibliografia, e à semelhança do caso anterior, aproxima-se mais das fórmulas de correlação (3.1), (3.5), (3.6), (3.8) e (3.9). Embora a correlação adotada (exponencial) não o evidencie, pela análise do gráfico (Figura A2.2 no Apêndice II) fica patente que os valores de RMR mais baixos ficam próximos da reta que representa a correlação definida pela fórmula (3.6).

4.3 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE PICOTE II

4.3.1 Descrição geral

O AHP localiza-se no Nordeste de Portugal, junto à fronteira com Espanha, no trecho de Rio Douro internacional, a aproximadamente 25 km a Sul de Miranda do Douro. A povoação mais próxima é Barrocal do Douro, que teve origem com a construção do primeiro aproveitamento hidroelétrico de Picote, para albergar os trabalhadores envolvidos na obra.

Segundo a memória descritiva do processo de concurso para execução da obra (EDP, 2006), este reforço de potência tem como componentes principais a tomada de água, seguindo-se em subterrâneo a galeria em carga até à central. Esta galeria, após o bocal da tomada de água, apresenta uma inclinação de 45° ao longo de 80 m, numa forma em perfil, popularmente designada de pescoço de cavalo; no restante traçado, a inclinação é próxima de 5° . A central em subterrâneo tem um comprimento de 68 m, largura de 23 m e altura máxima que ronda os 58 m, idealizada para albergar um grupo gerador com uma potência ativa nominal de 230 MW. Junto à central existe uma caverna para albergar o transformador e outra para albergar as comportas. Posteriormente à passagem pela central, a água é devolvida ao rio pela galeria da restituição - Figura 4.9.

Para auxílio à construção do circuito hidráulico em subterrâneo foram construídas galerias de acesso e ataque, nomeadamente o túnel de acesso à central, a partir do qual se desenvolvem duas galerias de ataque, uma à galeria em carga e outra à abóbada da central. A partir desta última, foi escavada a galeria de ataque à restituição. Da central subterrânea derivam ainda, a galeria de ataque à câmara das comportas, a galeria de ligação à câmara dos transformadores e a galeria de cabos e ventilação. Esta última tem como objetivo ventilar a central e permitir a ligação ao poço de cabos vertical, com 150 m, que possibilita um acesso mais direto à superfície para transporte da energia produzida - Figura 4.10.

As características das estruturas a escavar para a construção deste reforço de potência encontram-se sintetizados na Tabela 4.8.

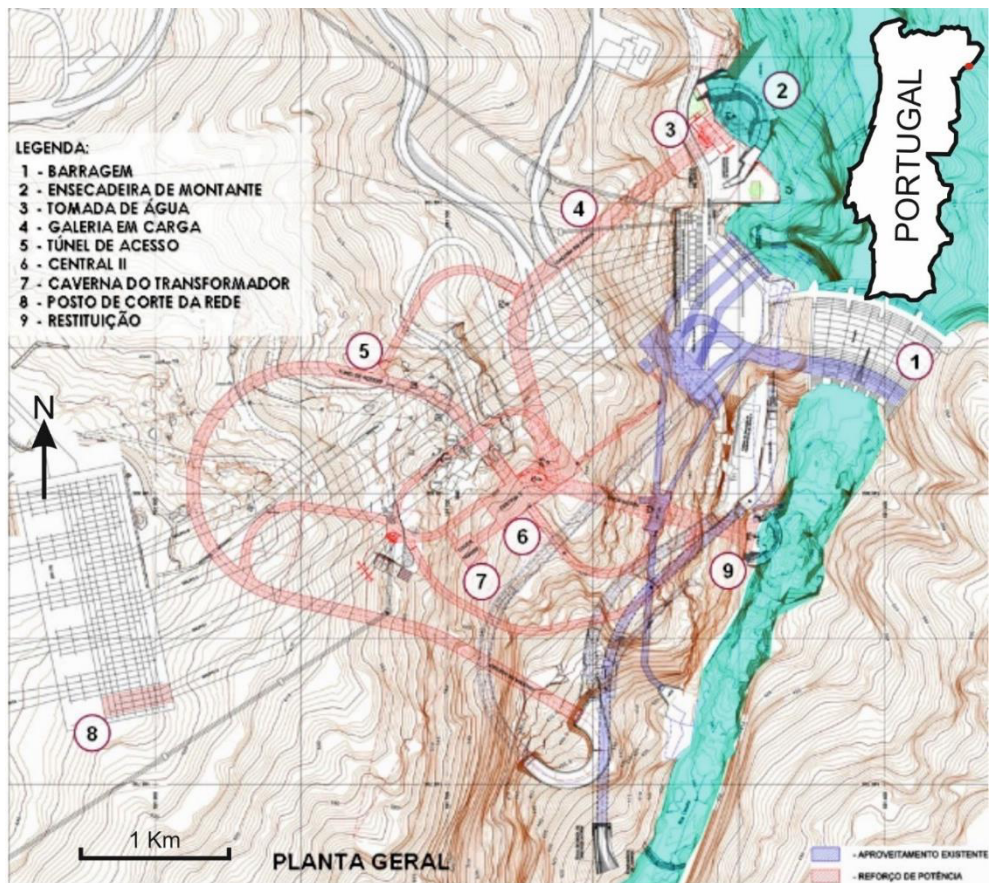


Figura 4.9 – AHP: infografia da localização do empreendimento (adaptado de EDP, 2006)

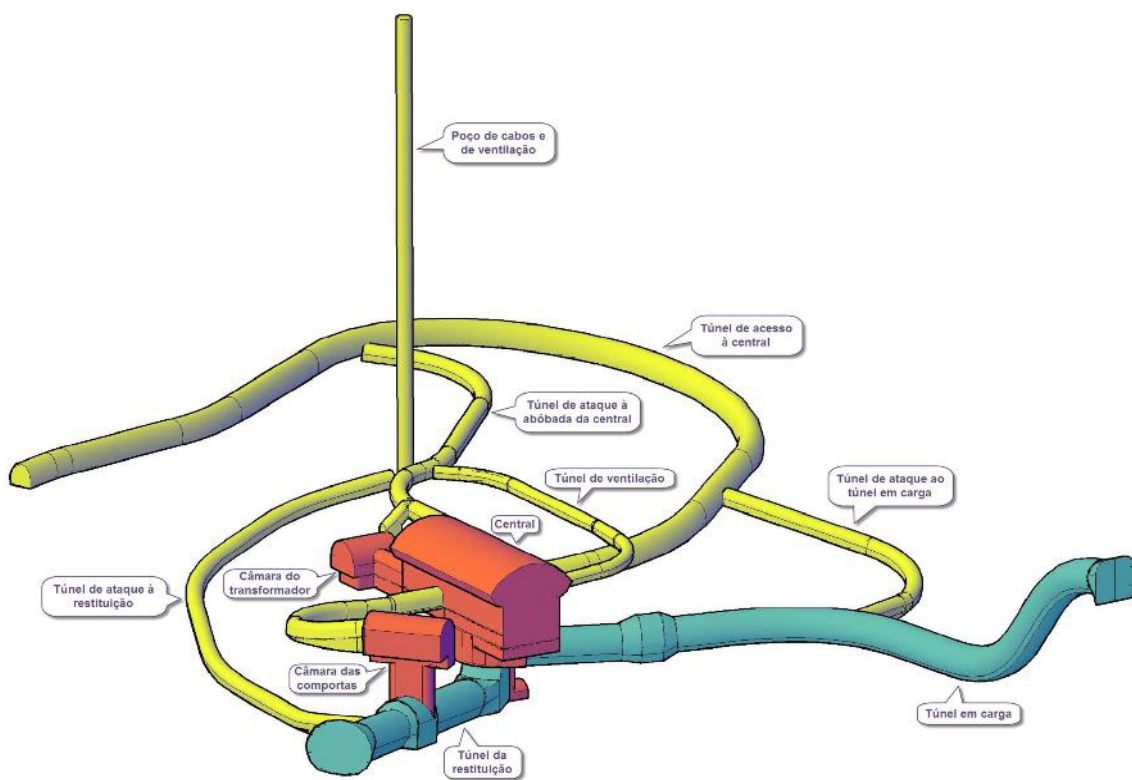


Figura 4.10 – AHP: infografia tridimensional do empreendimento (EDP, 2006)

Tabela 4.8 – AHP: características geométricas das estruturas subterrâneas

Estrutura	Comprimento (m)	Secção transversal		
		Largura (m)	Altura (m)	Área (m²)
Galeria em carga	300	12	12	113
Galeria de restituição	150	12	12	113
Túnel de acesso à central	625	8,5	8,1	62
Galeria de ataque à galeria em carga	141	5	5,5	26
Galeria de ataque à abóbada da central	204	5	5,5	26
Galeria de ataque à restituição	252	5	5,5	26
Galeria de ataque à câmara das comportas	121	5,5	5,8	29
Galeria de ventilação e segurança	155	3,7	4	14,5

4.3.2 Enquadramento geológico

Segundo Pereira *et al.* (2000), o local AHP situa-se em terrenos formados durante a Orogenia Hercínica, designados de Granito de grão médio, porfiróide, de duas micas (Picote, Bemposta). Esta local insere-se no Maciço Hespérico, na Zona Centro-Ibérica (Ribeiro, 2006) - Figura 4.11.

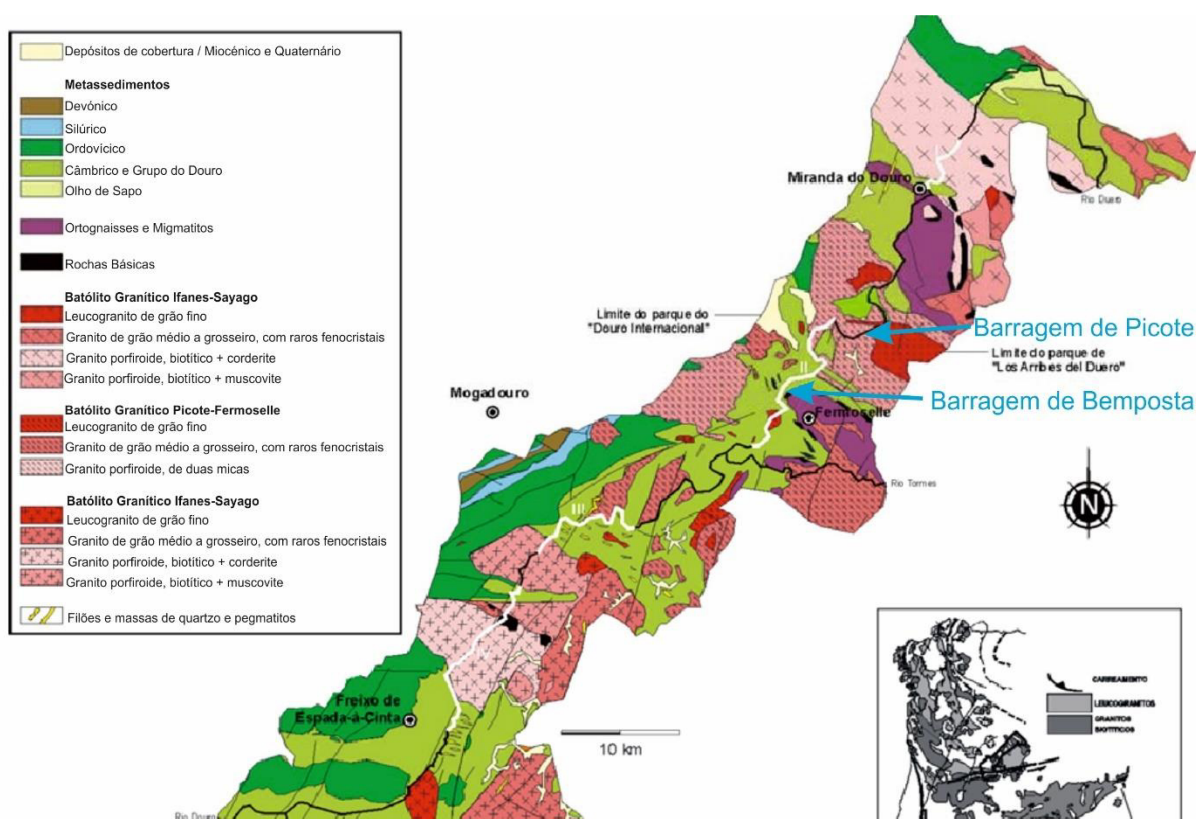


Figura 4.11 – AHP e AHB: infografia do enquadramento geológico (adaptado de Gomes & Plaza, 2006)

Uma descrição da história geológica da região é apresentada por Gomes & Alencão (2005), revelando que no Paleozóico a Península Ibérica era um mar, onde se depositaram areias e argilas. No final desse período, a Orogenia Hercínica, levou à emersão desses depósitos, que foram metamorfozados, constituindo quartzitos, xistos e migmatitos. Nessa altura, intrusões magmáticas resultaram em diversos granitóides, como é testemunho o de Picote.

Segundo o estudo geológico-geotécnico realizado para o projeto de construção da obra (EDP, 2006), na região encontram-se presentes quatro grandes unidades litológicas: as formações do Câmbrio Inferior, as formações do Câmbrio Médio, formações Mágmatias Intrusivas Ante-hercínicas e formações Mágmatias Intrusivas Sin-tectónicas. No local em apreço afloram litologias pertencentes ao último grupo apresentado, que se caracterizam pela presença de um granito de duas micas indiferenciado.

4.3.3 Enquadramento geotécnico

As variações litológicas ao longo do traçado da obra são poucas; no entanto, estão presentes variações geotécnicas relevantes devido à existência de descontinuidades, que compartimentam o maciço rochoso.

Segundo o projeto colocado a concurso para a execução da obra (EDP, 2006), o zonamento do maciço rochoso teve em consideração o estado de alteração e fraturação, assim como a quantidade de informação disponível dos estudos de prospeção realizados para cada estrutura da obra, aos quais foram associadas outros parâmetros, tais como o RQD, as características mecânicas e a permeabilidade, entre outros.

Para o circuito hidráulico, que contempla o conjunto constituído pelas galerias em carga e da restituição, o zonamento geotécnico divide o maciço em três zonas. As principais características das zonas geotécnicas e da contenção definidas no projeto foram sintetizadas por Ferreira (2009), que individualiza as galerias em carga e restituição, que conjuntamente com a central constituem o circuito hidráulico - Tabela 4.9.

Os túneis e galerias de acesso e ataque desenvolvem-se num maciço são, às vezes pouco alterado, com descontinuidades afastadas a muito afastadas, pontualmente muito fraturado junto ao alinhamento de descontinuidades mais relevantes, como sejam falhas geológicas (EDP, 2006).

Para as galerias de ataque foram preconizadas quatro secções de contenção tipo, das quais a A, B e C são de secção transversal corrente e dependem das características do maciço que resultam do valor de RMR, enquanto que a secção de contenção tipo D está reservada para a zona de chegada ao circuito hidráulico, onde a altura da escavação é variável entre a secção corrente e a altura das galerias do circuito - Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o circuito hidráulico (adaptado de EDP, 2006)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁ a W ₂	F ₁ a F ₂ , por vezes F ₃ a F ₄	> 70	Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m, 5 cm betão projetado com fibras na abóbada
ZG2/B	W ₁ a W ₂ , por vezes W ₃ a W ₄	F ₃ a F ₄	50-70	Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m, 10 cm betão projetado com fibras
ZG3/C	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , por vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	30-50	Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=4 m, 15 cm betão projetado com fibras
ZG3/D	W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 30	Arcos de betão projetado armados (RRS) realizados com betão projetado e pregagens Ø25 (A400NR) afastadas 1,5 m. 15 cm de betão projetado com fibras
Ainf – Área de influência; L - comprimento				

Tabela 4.10 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para as galerias de ataque (adaptado de EDP, 2006)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁ a W ₂	F ₁ a F ₂ , por vezes F ₃ a F ₄	> 70	Pregagens <i>Swellex</i> pontuais L=2 m
ZG2/B	W ₁ a W ₂ , por vezes W ₃ a W ₄	F ₃ a F ₄	40-70	Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=2,5 m. 5 cm betão projetado com fibras
ZG3/C	W ₃ , por vezes W ₄₋₅ ou W ₂	F ₃ , por vezes F ₂ , F ₄₋₅ pontual	< 40	Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=2 m ² e L=2,5 m. 10 cm betão projetado com fibras
ZG3/D	W ₄₋₅	F ₄₋₅		Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=2 m ² e L=3 m. 10 cm betão projetado com fibras
Ainf – Área de influência; L – comprimento				

O túnel de acesso à central encontra-se dividido em trechos devido a algumas singularidades, nomeadamente os 15 m iniciais que são de emboquilhamento junto à superfície e como tal a contenção preconizada é de betão armado moldado; os 20 m finais, junto à central, para os quais também foi preconizada a aplicação de betão armado moldado; e a zona entre o pk 0+065 e o pk 0+090, onde este novo túnel passa sob um túnel já existente, estando preconizado um reforço de contenção. Em duas zonas de bifurcação, com a galeria de ataque à abóbada da central e com a galeria de ataque à galeria em carga, também foi preconizado reforço de contenção. Estas zonas singulares, conforme referido anteriormente não foram contempladas nesta investigação. Para a secção corrente do túnel de acesso à central foram definidas características para cada uma das zonas geotécnicas em que o maciço foi individualizado, bem como a correspondente contenção a aplicar - Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – AHP: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para o túnel de acesso à central em secção corrente (adaptado de EDP, 2006)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁ a W ₂	F ₁ a F ₂ , por vezes F ₃ a F ₄	> 50	Pregagens sistemáticas na abóbada Ainf=4 m ² e L=3 m. 5 cm betão projetado com fibras
ZG2/B	W ₁ a W ₂ , W ₃ a W ₄	F ₃ a F ₄	20-50	Pregagens sistemáticas Ainf=3 m ² e L=3 m. 10 cm betão projetado com fibras
ZG3/C	W ₄₋₅ , por vezes W ₃	F ₄₋₅ , por vezes F ₃	< 20	15 cm betão projetado com fibras. Arcos de betão projetado armados, com pregagens Ø25, L=4 m, afastados 1,5 m. Revestidos com betão armado

Ainf – Área de influência; L – comprimento

4.3.4 Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise

Na Figura 4.12 resume-se a descrição estatística dos valores de RMR, obtidos nas 572 frentes de escavação e registados ao longo de 1635 m de escavação dos túneis e galerias. O maciço apresenta uma qualidade moderada a boa, abrangendo um intervalo de valores de RMR entre 50 e 75 com frequência elevada e próxima entre si.

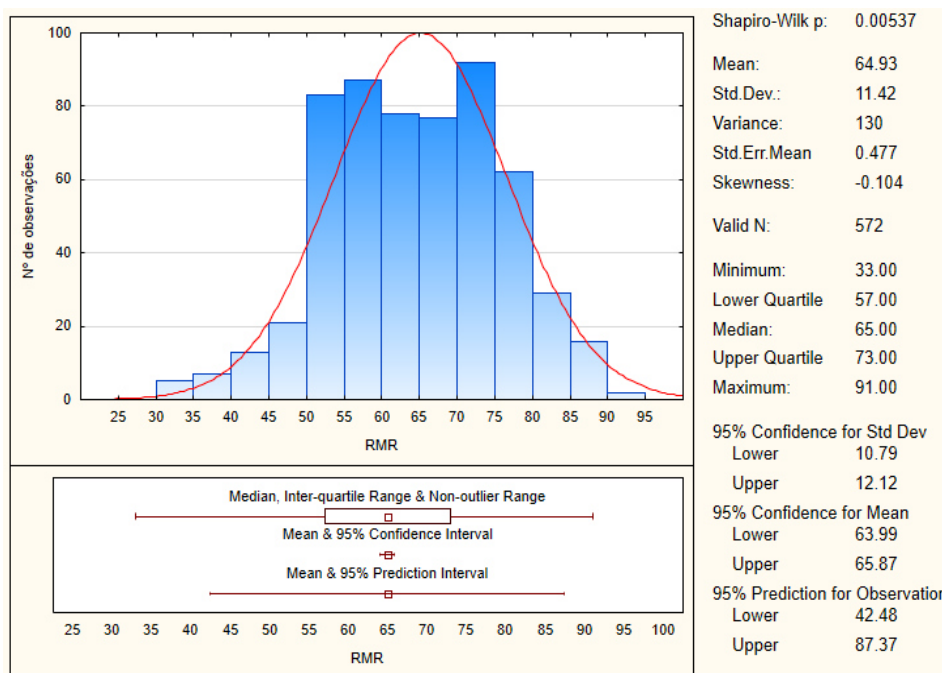


Figura 4.12 – AHP: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

A Tabela A1.3 com a distribuição estatística do valor de RMR, constante no Apêndice I, revela que a classe de qualidade do maciço mais representado é a II ($60 < \text{RMR} < 80$) o que, segundo Bieniawski (1989), é representativa de um maciço de qualidade boa para a escavação de túneis.

Neste caso de estudo, todas as cinco classes de qualidade do maciço foram observadas, embora as classes extremas, a I (RMR>80) e a V (RMR<20), estejam pouco representadas.

No acompanhamento da obra, simultaneamente com a avaliação do valor de RMR e para as frentes de escavação das galerias, estava prevista a aplicação da classificação segundo Barton *et al.* (1974). Os resultados do índice Q encontram-se na Figura 4.13 e revelam um valor médio de 10, embora a classe mais representada se situe entre os valores de 1 e 2.

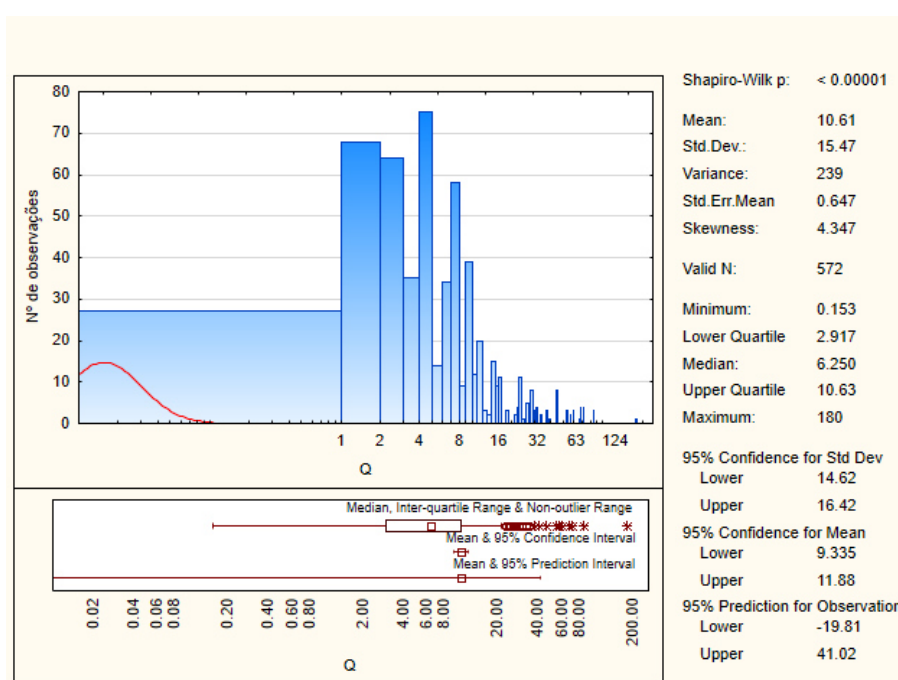


Figura 4.13 – AHP: estatística descritiva dos valores do índice Q observados

A correlação entre os resultados das duas classificações geomecânicas (RMR e Q) revela um valor de R^2 de 0,72. Comparando a correlação calculada com algumas das disponíveis na bibliografia (Figura A2.3 no Apêndice II), verifica-se que, para valores de RMR e Q elevados, a correlação obtida não se assemelha com nenhuma das consideradas neste estudo; no entanto, para valores intermédios e baixos daqueles índices, esta correlação é próxima da apresentada por Abad *et al.* (1984) na Equação 3.6.

4.4 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE BEMPOSTA II

4.4.1 Descrição geral

O AHB localiza-se no Nordeste de Portugal, no trecho do Rio Douro internacional, junto à fronteira com Espanha, na proximidade da localidade de Bemposta, entre Miranda do Douro e Mogadouro.

Segundo a memória descritiva do processo de concurso (EDP, 2007), este aproveitamento hidroelétrico é fundamentalmente constituído por uma central em poço, um circuito hidráulico que

conta com a tomada de água, galeria de adução, galeria de restituição e uma subestação localizada à superfície. Para acesso à central, o projeto preconiza uma galeria de ataque - Figuras 4.14 e 4.15.

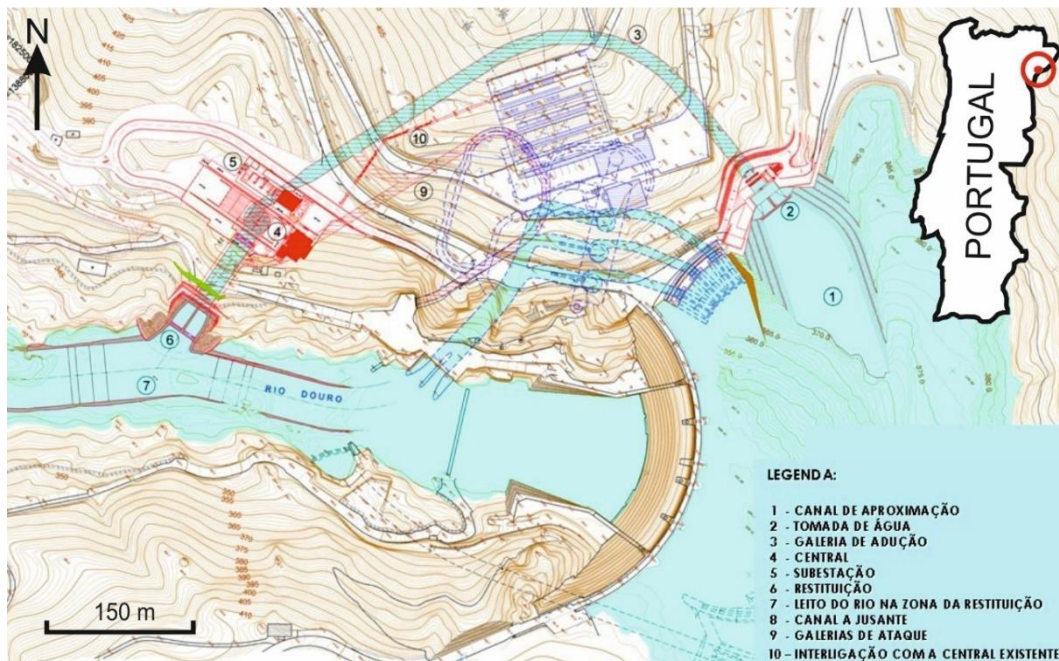


Figura 4.14 – AHB: infografia da localização do empreendimento (adaptado de EDP, 2007)

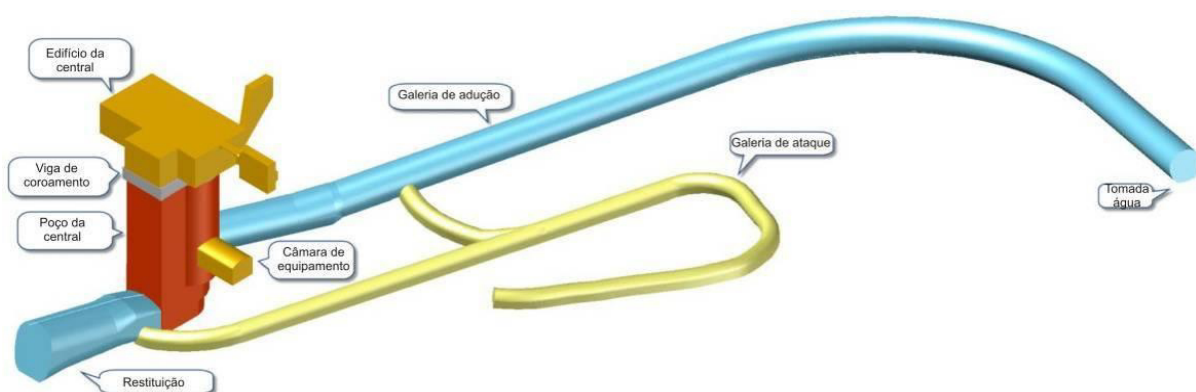


Figura 4.15 – AHB: infografia tridimensional do empreendimento (adaptado de Lima, *et. al.*, 2012)

A galeria de adução conta com um comprimento de 404 m e inclinação de 13,6%. Em planta, esta galeria é constituída por dois trechos retos, um montante de 65 m e um jusante de 140 m, e uma curva, de 147 m de comprimento, que realiza a concordância entre os dois trechos retos. Junto à central existe um trecho de 45 m, sem inclinação, e uma curva de ligação ao trecho inclinado com 7 m – Figura 4.15. A secção transversal é circular com 12 m de diâmetro, o que equivale a uma área de aproximadamente 86,6 m².

A jusante da central existe uma galeria de restituição da água ao leito do rio Douro, que conta com um comprimento em subterrâneo de 41 m e uma secção transversal retangular de 12,6 m de largura e

altura variável, o que implica uma área igualmente variável entre 129,1 m², junto à central e os 168,8 m², junto ao canal a jusante.

Conforme consta na Tabela 4.12, das estruturas que constituem este reforço de potência foram apenas seleccionadas as galerias de adução e de ataque, tendo-se excluído a galeria de restituição porque apresenta uma dimensão reduzida comparativamente com os restantes casos, bem como a dimensão da sua secção transversal é variável ao longo do comprimento, o que iria dificultar comparações dos dados obtidos entre si e com os restantes casos de estudo.

Tabela 4.12 – AHB: características geométricas das estruturas subterrâneas

Estrutura	Comprimento (m)	Secção transversal		
		Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
Galeria de adução	387	12	12	113
Galeria de ataque	404	6	6,5	87

4.4.2 Enquadramento geológico

Este aproveitamento hidroelétrico, à semelhança do anteriormente caracterizado, também se insere no Maciço Hespérico e dentro das divisões deste, na Zona Centro-Ibérica (Ribeiro, 2006).

Segundo Pereira *et al.* (2000), o local de Bemposta situa-se em terrenos autóctones hercínicos, pertencentes ao Complexo de paragnais, granitos gnáissicos e migmatitos, também designados de Granitos nodulares de Tourém, Miranda do Douro, Sendim e Barragem de Bemposta (Figura 4.11).

As formações metassedimentares originais foram migmatizadas durante a Orogenia Hercínica, dando origem ao complexo geológico atual (EDP, 2007). As litologias presentes neste Complexo incluem diversos tipos de granitos, tonalitos, granodioritos, pegmatitos e aplitos (Gomes *et al.*, 2005).

Segundo o estudo geológico-geotécnico da EDP (*op. cit.*) a cartografia de superfície realizada no âmbito do primeiro aproveitamento hidroelétrico, identificou a passagem progressiva das rochas migmatíticas aos granitos de anatexia, onde as micas deste último apresentavam a estrutura planar do micaxisto original. Deste modo, o granito tem limites difusos no contacto com outras litologias e são comuns os encraves de micaxisto no seio das rochas plutónicas.

Os granitos gnáissicos terão resultado da fusão parcial das rochas metassedimentares originais, sendo contemporâneos dos leitos quartzo-feldspáticos pertencentes aos migmatitos. De modo semelhante, nos granitos observam-se encraves de micaxistos.

Os migmatitos caracterizam-se pela sua constituição cristalofílica e material granítico com origem na rocha original, que foi parcialmente fundida pelo magma granítico. Apresentam clivagem (S1) bem definida, com direção WNW-ESE e pendor acentuado para SSW, a qual é próxima da direção dos eixos das principais dobras observadas na região (NW-SE a WNW-ESSE). As falhas principais apresentam uma direção preferencial NNE-SSW e NE-SW.

O maciço rochoso na zona da tomada de água e galeria de adução é constituído por migmatitos e micaxistos, enquanto que na zona da central e restituição, predominam granitos gnaíssicos.

4.4.3 Enquadramento geotécnico

Tendo por base a caracterização geológica, os estudos geológicos-geotécnicos realizados, individualizaram quatro zonas geotécnicas do maciço rochoso (EDP, 2007), com características sintetizadas por Ribeiro (2009) num estudo que aborda o trecho superior da central.

Tendo em conta as características do maciço rochoso, assim como das galerias, foram definidas secções de contenção tipo. Uma vez que a secção transversal de escavação é significativamente diferente para a galeria de adução (diâmetro 12 m) e galeria de ataque (diâmetro 6 m), foi definida contenção específica para cada uma destas estruturas, conforme resumem as Tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13 – AHB: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de adução (adaptado de EDP, 2007)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁ a W ₂	F ₁ a F ₃	> 70	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m. 5 cm betão projetado com fibras. Hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m.
ZG2/B	W ₂ a W ₃	F ₃ a F ₄	50-70	Abóbada e hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m. 10 cm betão projetado com fibras.
ZG3/C	W ₃ a W ₄	F ₄ a F ₅	30-50	Abóbada e hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=4 m. 15 cm betão projetado com fibras.
ZG4/D	W ₄ a W ₅	F ₄ a F ₅	< 30	Abóbada e hasteais: 15 cm de betão projetado com fibras. Arcos de betão projetado armados (RRS) realizados com betão projetado e pregagens Ø25 (A400NR) afastadas 1,5 m.
Ainf – Área de influência; L – comprimento				

Tabela 4.14 – AHB: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de ataque (adaptado de EDP, 2007)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/ZG2/A	W ₁ a W ₂	F ₁ a F ₃	> 50	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4,5 m ² e L=3 m. 5 cm betão projetado com fibras
ZG3/B	W ₂ a W ₃	F ₃ a F ₄	20-50	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=3 m. 10 cm betão projetado com fibras. Hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=3 m. 5 cm de betão projetado com fibras
ZG4/C	W ₃ a W ₄	F ₄ a F ₅	< 20	Abóbada e hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=3 m e 10 cm de betão projetado com fibras. Arcos de betão projetado armados (RRS), afastados 1 m, com espessura de 15 cm
Ainf – Área de influência; L - Comprimento				

4.4.4 Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise

Neste caso de estudo, à semelhança dos anteriores, a qualidade do maciço para a abertura de túneis foi determinada pelo valor de RMR. Na Figura 4.16 consta a estatística descritiva simples do valor de RMR observado ao longo da escavação. É possível constatar que o valor de RMR médio é 55, encontrando-se os valores mais frequentes nos intervalos entre 50-55 e 55-60.

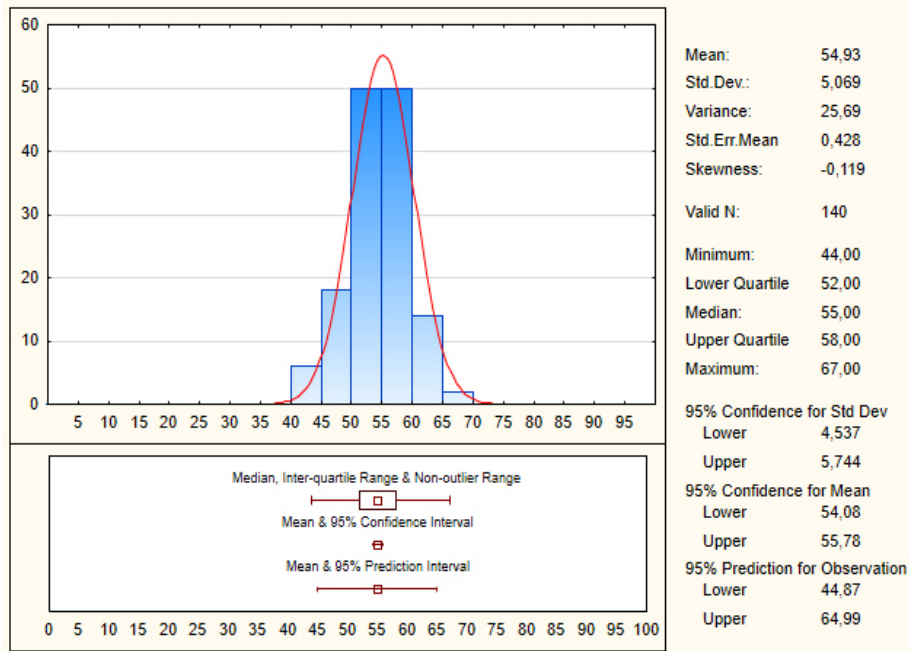


Figura 4.16 – AHB: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

No caso de estudo em análise, a variação do valor de RMR entre o mínimo e máximo observados é pequena, indicando homogeneidade da qualidade do maciço rochoso.

Todo o maciço escavado ao longo das galerias foi enquadrado em apenas duas das cinco classes de qualidade definidas por Bieniawski (1989), respetivamente a II ($60 < \text{RMR} < 80$) e a III ($40 < \text{RMR} < 60$), albergando esta última a maioria das situações conforme se pode ver na Tabela A1.4 constante no Apêndice I.

Relativamente aos resultados da aplicação da classificação de Barton (1974), o valor médio é de $Q=3,4$, sendo a classe mais frequente a de valores no intervalo entre 2 e 3 - Figura 4.17.

A correlação entre os resultados das duas classificações geomecânicas (RMR e Q), para este caso de estudo é muito baixo, com um valor de R^2 de 0,14 (Figura A2.4 no Apêndice II), o que poderá ter resultado de problemas de aplicação ou eventualmente de características particulares do maciço rochoso, nomeadamente o fato de apresentar pouca variação ao longo da escavação.

Quando comparada a correlação obtida com algumas das disponíveis na bibliografia (Apêndice II), não existe semelhança, o que pode ser justificado pelos valores observados terem pouca variação ou

por eventuais características específicas deste maciço levarem a que a dispersão de valor Q seja ainda menor que a de RMR.

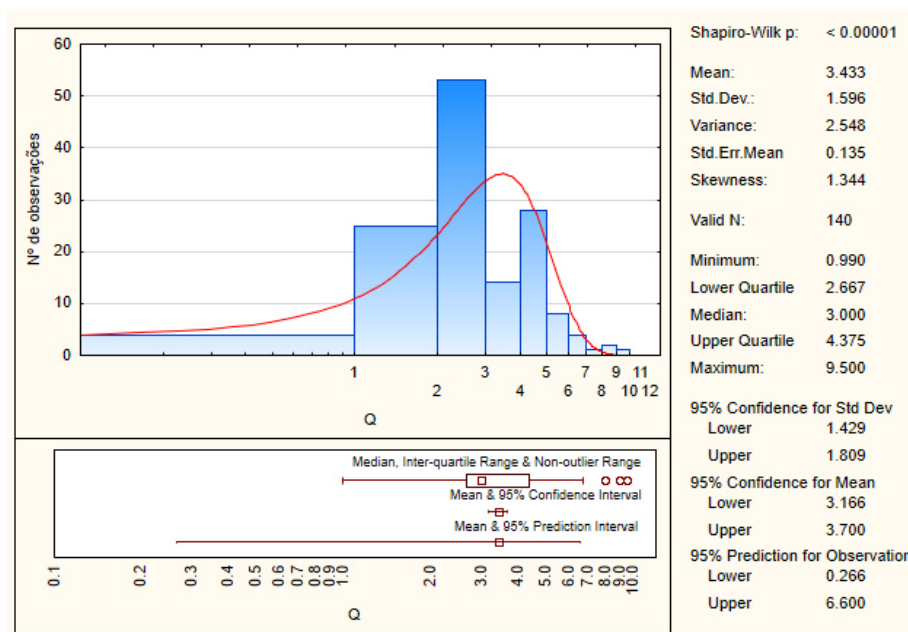


Figura 4.17 – AHB: estatística descritiva dos valores do índice Q observados

4.5 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE ALQUEVA II

4.5.1 Descrição geral

O AHA localiza-se no Baixo Alentejo, no Rio Guadiana e tem como objetivo aproveitar os recursos hídricos da maior albufeira artificial da Europa para produção de energia hidroelétrica.

Num estudo realizado sobre o revestimento definitivo da central, Oliveira *et. al.* (2012) resumem a descrição da produção de energia hidroelétrica resultante da instalação de dois grupos reversíveis, cada com uma roda do tipo Francis de 6m de diâmetro, que permitem desenvolver uma potência em turbinamento de 130 MW e em bombagem de 110 MW.

Este aproveitamento hidroelétrico tem como componentes principais a central e a subestação em subterrâneo, escavadas em poço a partir da superfície, a tomada de água, a restituição, duas galerias de adução e uma galeria de acesso - Figura 4.18.

O estudo em apreço incide sobre as escavações em subterrâneo, nomeadamente as galerias de adução e a galeria de acesso, também designada no projeto como galeria de ataque (COBA, 2007).

Das estruturas que constituem este reforço de potência foram apenas selecionadas as galerias de adução 1 e 2 e a de ataque - Tabela 4.15.

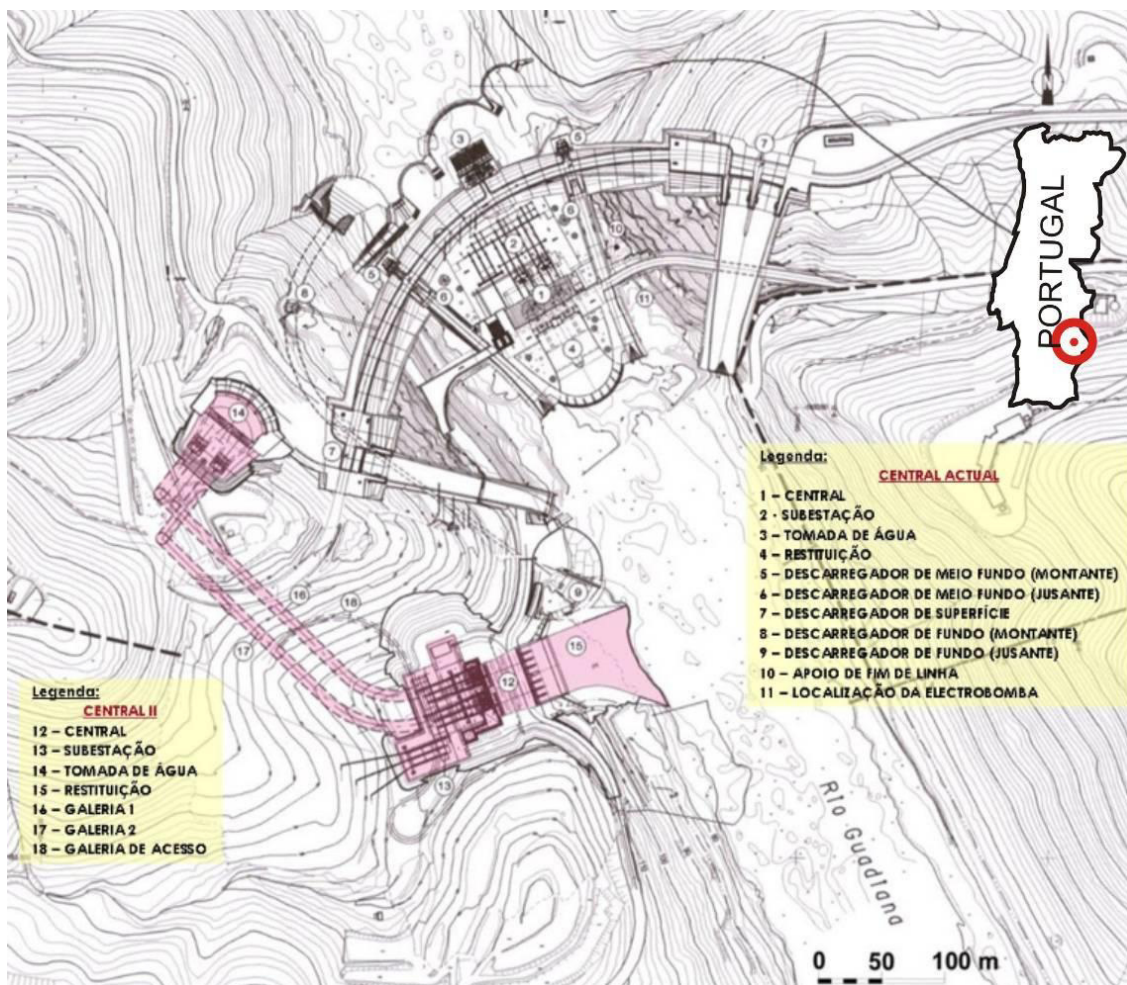


Figura 4.18 – AHA: infografia da localização do empreendimento (adaptado de COBA, 2007)

Tabela 4.15 – AHA: características geométricas das estruturas subterrâneas

Estrutura	Comprimento (m)	Secção transversal		
		Largura (m)	Altura (m)	Área (m ²)
Galeria de adução 1	427	9,5	9,5	71
Galeria de adução 2	431	9,5	9,5	71
Galeria de ataque	150	5	6	37

4.5.2 Enquadramento geológico

Perante as grandes unidades morfoestruturais em que se inserem os terrenos da Península Ibérica, a região do Alqueva enquadra-se na Zona de Ossa Morena. As litologias ocorrentes derivam de evolução metamórfica complexa e forte deformação tangencial, inserida no setor Moura-Ficalho do domínio Évora-Beja - Figura 4.19.

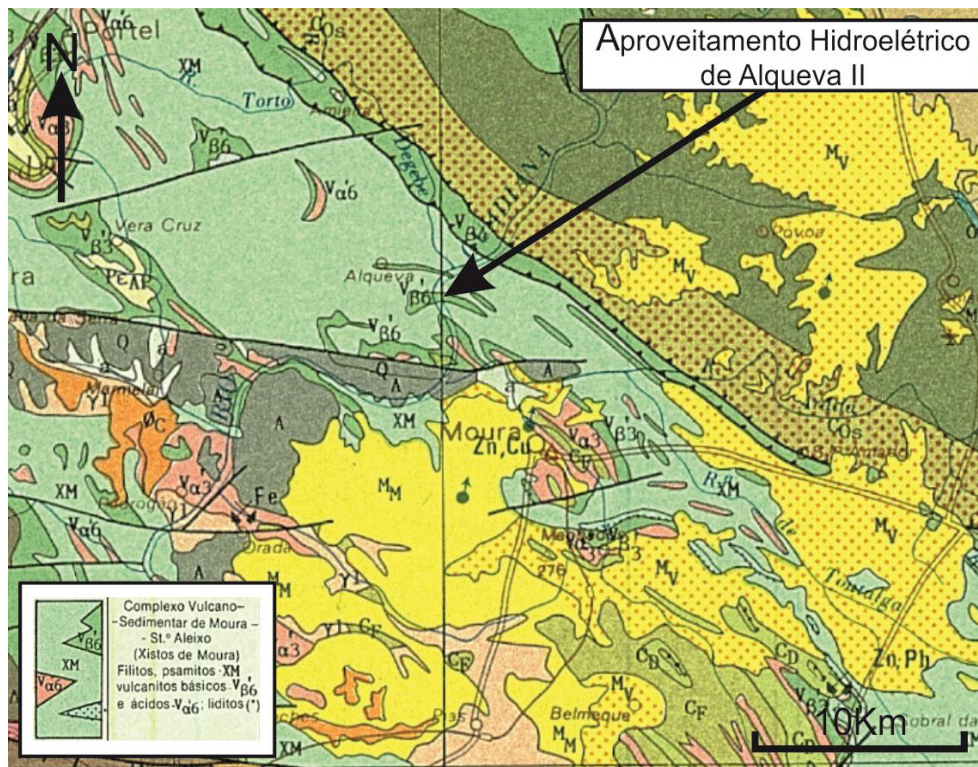


Figura 4.19 – AHA: infografia do enquadramento geológico (adaptado de Oliveira *et al.*, 1992)

A estrutura tectónica presente à escala regional resume-se, na generalidade, a um antiforma resultante do empilhamento de carreamentos sucessivos originados pela Orogenia Varisca.

O local de construção desta obra conta com a presença de rochas verdes da Série cristalofílica, azóica (Barros *et al.*, 1970), também conhecidos por Xistos de Moura e que, ulteriormente foram designadas por Complexo Vulcano Sedimentar de Moura-Sto Aleixo (Araújo *et al.*, 2006).

Nos estudos realizados no âmbito da obra (COBA, 2007), a geologia interessada foi caracterizada como uma sucessão interestratificada de metavulcanitos, onde predominam os tufos e as lavas de natureza bimodal, e os metassedimentos constituídos por xistos, filitos e rochas carbonatadas marmorizadas.

No local deste reforço de potência, aquele complexo geológico encontra-se representado por três unidades, uma constituída por filádios, a dos xistos verdes intercalados de mármore e a de xistos verdes interdigitados de quartzo.

A unidade dos filádios não é intersectada pela obra, mas caracterizam-se por bancadas de espessura variada, desde milimétrica a métrica, de granularidade igualmente variável, com tonalidades cinzentas a acastanhadas e brilho acetinado.

A unidade dos xistos verdes intercalados de mármore apresenta-se em bandas estratiformes maciças ou laminadas, constituídas por xistos verdes intercalados por estreitas camadas lenticulares de mármore branco. Ocorrem ainda por vezes bancadas pouco espessas de filádios de composição siliciosa e sericítico-clorítica.

A unidade de xistos verdes interdigitados de quartzo é caracterizada por xistos verdes normalmente bastante deformados, com espessura de alguns decímetros interdigitados de quartzo. Normalmente ocorrem no prolongamento de falhas, sem que tenham sido considerados como material constituinte das respectivas caixas.

Nas imediações deste caso de estudo, foram ainda identificadas rochas filoneanas, com particular destaque para o quartzo que ocorre em filonetes de pequena expressão ou em lentículas de geometria sigmóide a preencher as principais falhas. Foi ainda identificado um filão felsítico a preencher uma falha de atitude WNW, 70°NE, com comprimento de 1m e uma espessura de 0,2 m.

As descontinuidades presentes têm uma atitude e indícios de movimentação que levam a concluir ser herdadas da Orogenia Varisca, mas reativadas pela Orogenia Alpina.

As bancadas que constituem o maciço (S_0) encontram-se bem marcadas pelas intercalações das diferentes litologias e assumem uma disposição de N315°, 5-40°NE. A estratificação (S_1) é variável com o tipo litológico, apresentando nos estratos mais finos um *fabric* planar, habitualmente designado de forma genérica como xistosidade e nos mais grosseiros é materializado pela presença de descontinuidades penetrativas. Nas dobras, a xistosidade materializa o respetivo plano axial com atitude média N65°W, 18°NNE.

4.5.3 Enquadramento geotécnico

Tendo por base a caracterização geológica, foram individualizadas três zonas geotécnicas do maciço rochoso. A caracterização geotécnica do maciço permite definir a contenção a aplicar em cada uma das zonas geotécnicas tendo em vista garantir a estabilidade do maciço face à escavação do túnel. Para o caso das galerias de adução, o projeto (COBA, *op. cit.*) define a existência de quatro secções de contenção tipo -Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – AHA: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para as galerias de adução (adaptado de COBA, *op. cit.*)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 70	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=3 m. 5 cm betão projetado com fibras; Hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=6 m ² e L=3 m
ZG2/B	W ₃	F ₃	50-70	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m. 10 cm betão projetado com fibras; Hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=3 m. 5 cm de betão projetado com fibra.
ZG3/C	W ₄₋₅	F ₄₋₅	30-50	Abóbada: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=4 m. 15 cm betão projetado com fibras; Hasteais: pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=4 m. 10 cm de betão projetado com fibras
ZG3/D	W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 30	Frente de Escavação: ocasionalmente, betão projetado com fibras; Abóbada: Eventual pré-contenção com enfilagens. Perfilados espaçados 1 a 1,5 m, contraventados e com pranchões metálicos e 15 cm de betão projetado com fibras
Ainf – Área de influência; L - comprimento				

Relativamente à galeria de ataque, é previsto em projeto que a cada zona geotécnica, corresponda o mesmo número de secções de contenção tipo, conforme se apresenta na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – AHA: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção para a galeria de ataque (adaptado de COBA, 2007)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/A	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 50	Abóbada: Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=3 m. 5 cm betão projetado com fibras; Hasteais: Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=6 m ² e L=2 m ocasionais
ZG2/B	W ₃	F ₃	30-50	Abóbada: Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=3 m ² e L=4 m. 10 cm betão projetado com fibras; Hasteais: Pregagens <i>Swellex</i> Ainf=4 m ² e L=3 m. 5 cm de betão projetado com fibras
ZG3/C	W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 30	Frente de Escavação: ocasionalmente, betão projetado com fibras; Abóbada: eventual pré-contenção com enfilagens. Perfilados espaçados 1 m, contraventados e com pranchões metálicos e 15 cm de betão projetado com fibras

Ainf – Área de influência; L – comprimento

4.5.4 Caracterização do maciço durante a escavação e sua análise

Neste caso de estudo observaram-se 247 frentes de escavação, correspondendo a um comprimento acumulado de 713 m, ao longo dos quais se realizou a caracterização do maciço que permitiu determinar os valores de RMR e o Q. A Figura 4.20 resume a descrição estatística para os valores de RMR, verificando-se a presença de um maciço com valor médio de RMR de 64, mas onde o intervalo mais representado corresponde ao 70-75.

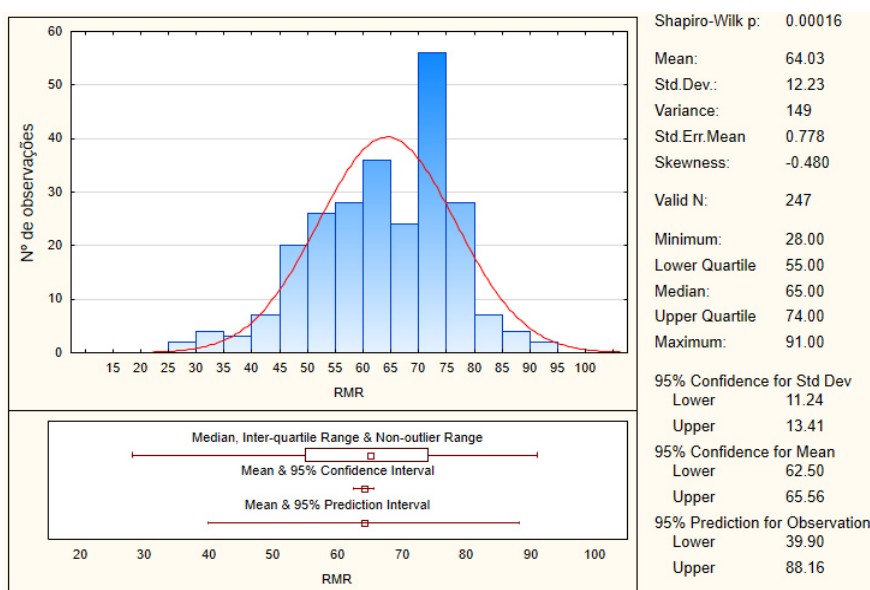


Figura 4.20 – AHA: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

Considerando as respectivas classes de qualidade do maciço rochoso (Bieniawski, 1989), verifica-se (Figura A1.5 no Apêndice I) a representatividade fraca da classe I ($RMR > 81$), sendo a mais representativa a classe II ($61 < RMR < 80$). Neste caso de estudo não se verificaram situações que permitissem o enquadramento no maciço na classe de qualidade mais fraca - V ($RMR < 20$).

A aplicação do sistema Q resulta num valor médio de 5,6, sendo o intervalo mais frequente o de valores inferiores a 1, conforme se pode observar no gráfico constante na Figura 4.21.

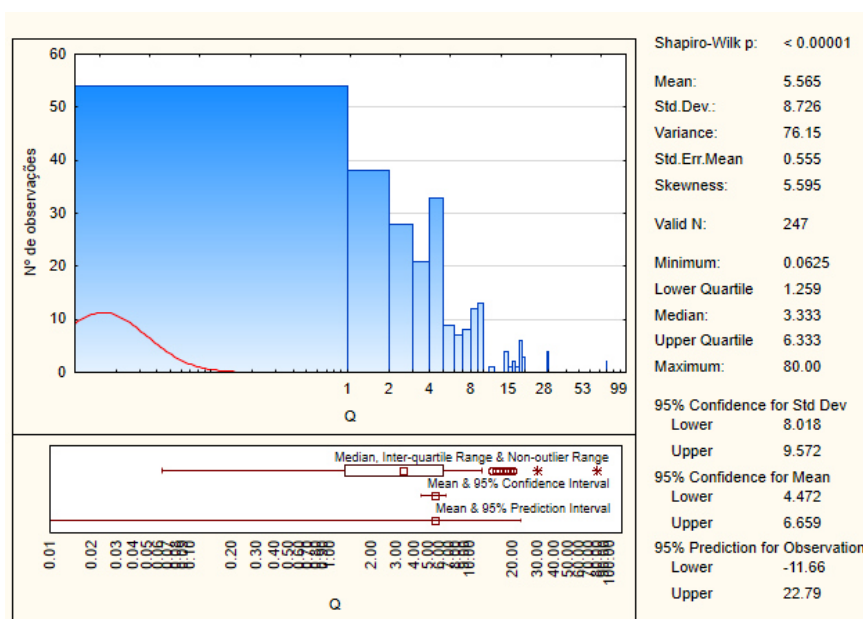


Figura 4.21 – AHA: estatística descritiva dos valores do índice Q observados

Correlacionando os resultados das duas classificações consideradas (RMR e Q), obtém-se um valor de R^2 de 0,57 (Figura A2.5 no Apêndice II). Comparando esta correlação com algumas das disponíveis na bibliografia verifica-se que, neste caso de estudo e para valores elevados de RMR, ela não se aproxima de nenhuma delas, mas para valores mais baixos, fica próximo da correlação definida pela fórmula (3.8); embora, os dados disponíveis de valores de RMR baixos ($RMR < 20$) sejam poucos.

4.6 SÍNTESE E ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS CASOS DE ESTUDO DE OBRAS CONCLUÍDAS

Perante os cinco casos de estudo apresentados e que servem de base ao desenvolvimento da metodologia apresentada no Capítulo 3, cada um dos quais com características específicas, torna-se importante apresentar uma síntese na Tabela 4.18, que inclui as principais litologias, a dimensão dos túneis, bem como o zonamento geotécnico e contenções tipo contempladas para cada situação.

Tabela 4.18 – Resumo das características dos casos de estudo concluídos

Casos de estudo	Litologias principais	Dimensão dos túneis analisados		Zonamento	RMR	Contenção	
		Comprimento (m)	Secção transversal (m ²)				
AHVNII	Granito	4810	4124	80	ZG1/S1	>70	Ab: P 2,5 m, Ainf 2 m ²
					ZG2/S2	40-70	Ab: P 3 m, Ainf 1,5 m ² . BP 5 cm; H: BP 5 cm
			275	35	ZG3/S3	30-40	Ab.+H: P 4 m, Ainf 1m ² . BP 5+5 cm
			411	10	ZG3/S3A	20-30	Ab.+H: P 4 m, Ainf 1m ² . BP 5+5+5 cm
AHVNIII	Granito	8086.5	4215,5	113	ZG3/S4	< 20	Perf. dupla malhasol e BC
					ZG1/A	> 75	Ab.+H: P 4 m, Ainf 4,5 m ² . BP 5 cm
					ZG2/B	50-75	Ab.+H: P 4 m, Ainf 2 m ² . BP 5+5 cm
					ZG3/C	30-50	Ab.+H: P 4-6 m, Ainf 1,125 m ² . BP 5+5+5 cm
		ZG4/D	< 30	Ab.+H: P 6 m, Ainf 1,125 m ² . BP 5+5+5+5 cm. Perf. + BC			
		3871	26-58	ZG1-ZG2/A	> 50	Ab.+H: P 3 m, Ainf 2 m ² . BP 5 cm; H: BP 5 cm	
				ZG3/B	30-50	Ab.+H: P 3 m, Ainf 2 m ² . BP 5 cm; H: BP 5+5 cm	
ZG4/C	< 30			Ab.+H: P 4 m, Ainf 1,125 m ² . BP 5+5+5 cm. Perf. + BC			
AHP	Granito	1948	450	113	ZG1/A	> 70	Ab.: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm
					ZG2/B	50-70	Ab.+H: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5+5 cm
					ZG3/C	30-50	Ab.+H: P 4 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5+5 cm
			ZG3/D	< 30	Ab.+H: Arcos de BP 5+5+5 cm		
			625	62	ZG1/A	> 50	Ab.+H: P 3 m, Ainf 4 m ² . Bp 5 cm; H: Bp 5 cm
					ZG2/B	20-50	Ab.+H: P 3 m, Ainf 3 m ² . Bp 5+5 cm
		ZG3/C			< 20	Ab.+H: Arcos de BP 5+5+5 cm	
		873	14,5-29	ZG1/A	> 70	P 2 m, pontuais	
				ZG2/B	40-70	Ab.+H: P 2,5 m, Ainf 4 m ² . Bp 5 cm H: Bp 5 cm	
ZG3/C	< 40			Ab.+H: P 2,5 m, Ainf 2 m ² . Bp 5+5 cm			
AHB	Metassedimentares (granitos gnaissicos, migmatitos)	791	387	113	ZG1/A	> 70	Ab.: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm
					ZG2/B	50-70	Ab.+H: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5+5 cm
					ZG3/C	30-50	Ab.+H: P 4 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5+5 cm
					ZG4/D	< 30	Ab.+H: Arcos de BP 5+5+5 cm
		404	87	ZG1/A	> 50	Ab.: P 3 m, Ainf 4,5 m ² . BP 5 cm	
				ZG2/B	20-50	Ab.: P 3 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5 cm. H.: P 3 m, Ainf 3 m ² . BP 5 cm	
ZG3/C	< 20	Ab.+H: P 3 m, Ainf 3 m ² . Bp 5+5 cm. Arcos de BP					
AHA	Metassedimentares (xistos, filitos)	1008	858	71	ZG1/A	> 70	Ab.: P 3 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm. H.: P 3 m, Ainf 6 m ²
					ZG2/B	50-70	Ab.: P 4 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5 cm;. H.: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm
					ZG3/C	30-50	Ab.: P 4 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5+5 cm;. H.: P 4 m, Ainf 4 m ² . BP 5+5 cm
					ZG3/D	< 30	Enfilagens, Perf. + BP 5+5+5 cm
		150	37	ZG1/A	> 50	Ab.: P 3 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm;. H.: P 2 m, Ainf 6 m ² pontuais	
				ZG2/B	30-50	Ab.: P 4 m, Ainf 3 m ² . BP 5+5 cm;. H.: P 3 m, Ainf 4 m ² . BP 5 cm	
				ZG3/C	< 30	Enfilagens, Perf. + BP 5+5+5 cm	

Ab – abóbada; Ainf – área de influência; BC – betão cofrado; BP – betão projetado com fibras; H – hasteais; P – pregagens (*Swellex*); Perf. – perfilados metálicos

Estes casos enquadram-se em diferentes cenários geológicos, com a presença de rochas ígneas e metassedimentares. O comprimento dos túneis em estudo é específico de cada caso, mas enquadrando na geologia verifica-se um predomínio de extensão em rochas ígneas. A área das secções transversais dos túneis é igualmente variável, verificando-se situações desde 14,5 m² até 113 m², predominando as extensões de túnel com maiores áreas de secção transversal. O zonamento geotécnico enquadrado pelos valores de RMR e respetiva contenção aplicada são semelhantes nos diferentes casos; contudo e

como seria de esperar, entre secções transversais de diferente área ocorrem diferenças quanto à quantidade de contenção a aplicar.

O terreno analisado nestes casos de estudo totaliza um comprimento superior a 16600 m de escavação, caracterizado em mais de 3600 avanços, tendo-se observado um RMR médio de 63 e um desvio padrão de 14, conforme se pode verificar na Figura 4.22. A classe mais frequente é a de valores de RMR entre 70 a 75.

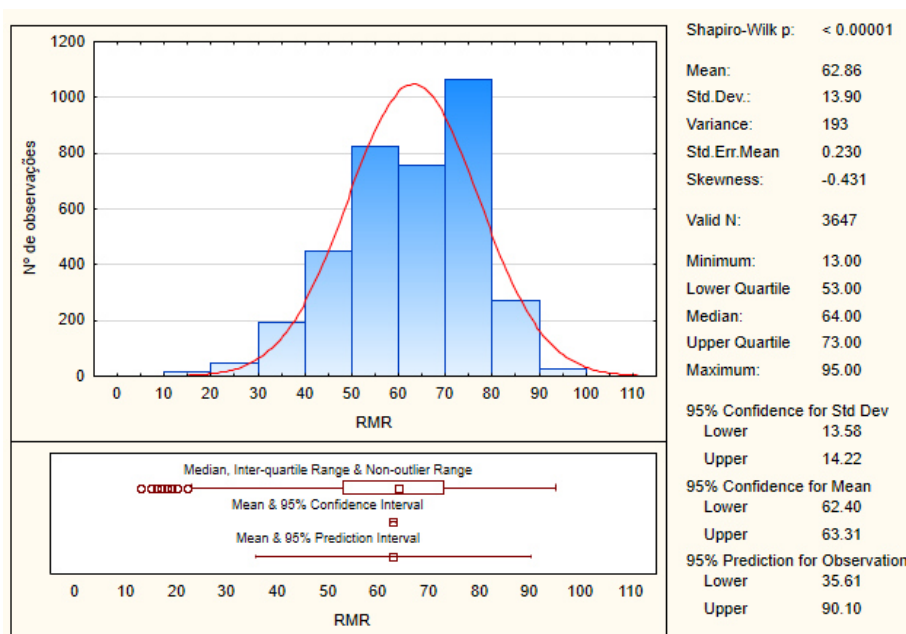


Figura 4.22 – Estatística descritiva dos valores do índice RMR observados em todos os casos de estudo

Os resultados de Q revelam um valor médio de 12,8, mas à semelhança do observado para cada um dos casos de estudo individualmente, os valores mais frequentes encontram-se no intervalo inferior a 1 – Figura 4.23.

Recorrendo à Tabela A1.6 que integra o Apêndice I, constata-se que, de acordo com as classes de qualidade do maciço para abertura de túneis definidas por Bieniawski (1989), estes casos de estudo desenvolvem-se em maciço de qualidade boa ($60 < \text{RMR} < 80$).

A correlação entre os resultados das duas classificações geomecânicas encontra-se na Figura A2.6 no Apêndice II e revela um valor próximo de 0,76 considerando-se que qualitativamente é mediana a elevada. Na mesma figura verifica-se que, comparando com as correlações da bibliografia, fica próxima da revelada por Abade *et al.* (1984) na Equação 3.6.

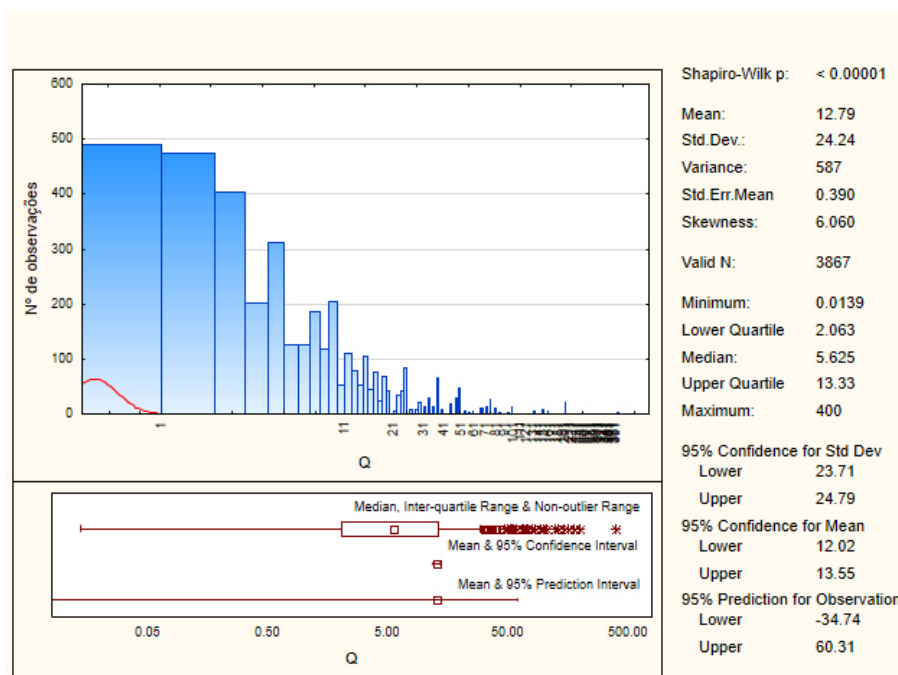


Figura 4.23 – Estatística descritiva dos valores do índice Q observados em todos os casos de estudo

4.7 TÚNEL DO MARÃO

4.7.1 Descrição geral

Como referido, o TM é uma estrutura integrante da autoestrada A4 entre as cidades de Amarante e Vila Real. Localiza-se no norte de Portugal e a sua projeção teve como objetivo vencer, em traçado de autoestrada, a orografia da serra que o designa - Figura 4.24.

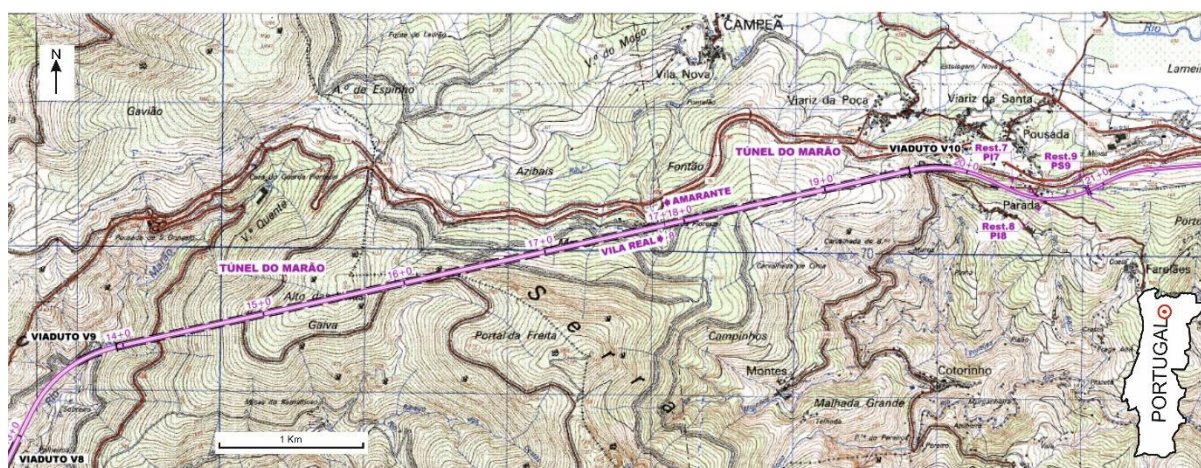


Figura 4.24 – TM: infografia da localização do túnel (adaptado CJC, 2009)

Esta obra é constituída por um par de túneis gémeos, paralelos, afastados 10 m, cada um com 5655 m de comprimento, perfazendo um total de 11.310 m de túnel (Alençã *et al.*, 2011). A secção

transversal interna é semicircular, com 11 m de altura e 13 m de largura. A secção transversal de escavação conta com uma área de 105 m² (CJC, 2009).

Os túneis são unidireccionais, com duas faixas de tráfego e entre ambos existirão 15 ligações, perpendiculares aos túneis principais, localizadas a cada 400 m, destinadas a passagens de emergência para peões ou para veículos e instalação de cabines elétricas (Alençao *et al.*, *op. cit.*). A secção transversal das passagens para peões é de 15 m² e as passagens de veículos e peões contam com uma secção transversal de aproximadamente 70 m².

O traçado em perfil desenvolve-se em rampa constante do emboquilhamento poente (cota 640) até próximo do emboquilhamento nascente (cota 772), onde o perfil longitudinal apresenta uma curva que resulta numa inversão de pendor no traçado – Figura 4.24.

Este túnel teve duas fases de construção, uma inicial com a escavação de 7328 m distribuídos por quatro frentes de escavação, sendo duas do lado poente e duas do lado nascente; e uma outra, ulterior, separada por aproximadamente 2 anos, para conclusão da escavação e da restante construção.

4.7.2 Enquadramento geológico

A região conta com a presença de formações metassedimentares, com datações compreendidas entre o Câmbrico e o Devónico inferior - Figura 4.25. Estas formações pertencem ao designado autóctone da Zona Centro-Ibérica, confrontando a NW com os terrenos para-autóctones que constituem o prolongamento das Unidades de Mouquim e de Canadelo, constituídas igualmente por rochas metassedimentares (Pereira, 1987).



Figura 4.25 – TM: infografia do enquadramento geológico (adaptado de Coke, 2000)

Segundo Ribeiro *et al.* (1988), a Serra do Marão ocupa uma posição central na estrutura em leque desenhada numa transversal pela Zona Centro-Ibérica.

Os terrenos datados do Câmbrio estão representados pela Formação de Desejosa, pertencente ao Grupo das Beiras, caracterizada pela alternância de filitos e metassiltitos (Sousa, 1982).

Os terrenos datados do Ordovícico estão representados por (Sá *et al.*, 2005):

- Formação Vale de Bojas, que se divide no Membro de Bojas, caracterizado pela presença de conglomerados poligénicos e metatufitos, e no Membro de Freitas, no qual predominam os quartzitos impuros;
- Formação do Marão, constituída pelo Membro de Ermida, caracterizado pela presença de conglomerados quartzíticos, pelo Membro de Malhada, onde ocorrem quartzitos com magnetites, e pelo Membro de Fragas da Ermida, que conta com a presença de alternâncias de filitos e psamitos;
- Formação de Moncorvo, constituída por uma série monótona de filitos cinzentos.

A região onde se insere a Serra do Marão foi afetada por deformação associada à génese do Orógeno Varisco que ocorreu em três fases distintas, das quais se destaca a primeira fase D1, responsável pela maioria das estruturas observadas. A primeira fase de deformação é responsável pela macroestrutura, designada por *anticlinorium* que constitui a serra do Marão. Trata-se de uma dobra de 1ª ordem em cujos flancos ocorrem dobras de ordem menor (Coke *et al.*, 1993).

O TM intersecta o flanco ocidental desta estrutura (Coke & Santos, 2012), onde as dobras da primeira fase de deformação apresentam estilos diversos e vergências geralmente para NE, com os eixos inclinados em média 10-12° para N60°W; no entanto, em algumas zonas, a inclinação pode ultrapassar 30° (Coke, 2000). O flanco Este da estrutura anticlinal encontra-se cortado na zona pela Falha de Manta, após a qual surgem os terrenos enquadrados na Formação de Desejosa (Santos *et al.*, 2013).

4.7.3 Enquadramento geotécnico

Tendo por base a caracterização geológica realizada na fase de estudo prévio e seu desenvolvimento posterior, na fase de projeto, foram individualizadas três classes de maciço rochoso, a que corresponde três zonas geotécnicas.

Segundo Ferreira (2010), no caso do TM, as classes definidas no maciço tiveram como base o enquadramento das características das descontinuidades do maciço definido no índice GSI (Hoek & Marinos, 2000). A classe I do terreno engloba características as descontinuidades “muito boas” e “boas”, a classe II inclui as características das descontinuidades “boas” e “razoáveis” e a classe III abrange as características “fracas” e “muito fracas”.

Segundo o projeto de execução da primeira fase de construção (CJC, 2009), ao maciço com características que permitam o seu enquadramento em ZG1 corresponde a uma secção tipo D, o que exibe características de ZG2 tem correspondência a uma secção tipo C e, o terreno com características que o permitam enquadrar em ZG3 tem correspondência em secção tipo A; sempre que a escavação decorra nos emboquilhamentos ou em zonas de falha, que apresentem características de ZG3, corresponde a secção tipo B - Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – TM: zonas geotécnicas e secções tipo de contenção (adaptado de CJC, 2009)

Zona Geotécnica / Secção tipo	Alteração	Fraturação	RMR	Contenção
ZG1/D	W ₁₋₂	F ₁₋₂	> 60	5 cm a 5+5 cm de betão projetado com fibras metálicas e pregagens sistemáticas com 5 m
ZG2/C	W ₃	F ₃	40-60	5+5 cm de betão projetado com fibras metálicas e pregagens sistemáticas com 5 m
ZG3/B	W ₄₋₅	F ₄₋₅	20-40	5+5+5 cm de betão projetado com fibras metálicas e pregagens sistemáticas com 5 m
ZG3/A	W ₄₋₅	F ₄₋₅	< 20	Cambota metálica incorporada com 30 cm de espessura de betão projetado

Na segunda fase de construção, houve uma nova entidade executante, assim como um novo Projetista que, tendo em consideração as características do terreno e seu comportamento em termos de deformação, nos aproximadamente 7,3 km escavados na primeira fase, realizou ajustes quanto ao número de zonas geotécnicas consideradas, que passaram a ser 3 e nos valores limite de RMR de cada uma. Resumidamente, a ZG1 caracteriza-se por valores de RMR superiores a 45; a ZG2 por valores de RMR no intervalo entre 25 e 45; e a ZG3 por valores de RMR inferiores a 25.

A caracterização deste caso de estudo durante o acompanhamento técnico da obra é abordada no Capítulo 7, integrada na aplicação da nova metodologia de gestão de riscos geotécnicos na construção de túneis em maciços rochosos, desenvolvida nesta investigação.

Conhecendo-se o enquadramento geológico e geotécnico, em particular a análise da qualidade do terreno em cada um dos casos de estudo, no Capítulo 5 são reveladas informações adicionais e detetados os principais riscos geotécnicos presentes em cada uma das etapas em que se dividiu a fase construtiva.

5. DETEÇÃO DE RISCOS GEOTÉCNICOS POTENCIAIS NOS CASOS DE ESTUDO

Para deteção de riscos geotécnicos presentes na construção de túneis em maciços rochosos procedeu-se à análise dos elementos disponíveis sobre os cinco primeiros casos de estudo apresentados nas Secções 4.1 a 4.6, nomeadamente:

- Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II (AHVNII);
- Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III (AHVNIII);
- Aproveitamento hidroelétrico de Picote II (AHP);
- Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II (AHB);
- Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II (AHA).

A deteção dos riscos potenciais nestas empreitadas já concluídas, considerou a abordagem à fase construtiva repartida pelas quatro situações tipo definidas no início do Capítulo 3, a recordar:

- i. Fase inicial da construção;
- ii. Trecho de túnel a escavar;
- iii. Frente de escavação;
- iv. Trecho de túnel escavado.

Ao longo deste capítulo, para cada uma das quatro situações da fase construtiva de túneis em maciços rochosos, descrevem-se as ocorrências identificadas nos casos de estudo já concluídos e suscetíveis de constituir riscos geotécnicos.

5.1 FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO

Ao longo desta secção desenvolve-se uma análise aos elementos disponíveis dos casos de estudo, na fase inicial da construção, com o objetivo de detetar os riscos potenciais que se encontram presentes e que foram tratados ou que permanecem para as etapas posteriores.

A abordagem geológica e geotécnica realizada para cada um dos casos de estudo é semelhante, ocorrendo apenas algumas adaptações decorrentes da especificidade de cada local e incremento de estudos, realizados nos casos executados mais recentemente, uma vez que já existia conhecimento proveniente dos trabalhos de execução dos aproveitamentos anteriores. Perante a semelhança de informação disponível para todos os casos em apreço, a análise da mesma é feita de modo integrado, apenas com algumas referências específicas a algum dos casos quando pela especificidade se justifique.

Processo de gestão de riscos

A gestão de riscos em obras de construção civil em Portugal conta com poucos anos, e dos casos de estudo abordados, apenas os mais recentes, tais como AHVIII, AHB e AHA foram contemplados com a sua “implementação”. Contudo, apesar de, às vezes, não existir um processo com a designação de gestão de riscos, na maioria dos casos e no que se refere à área da geologia e geotecnia, muitos dos riscos potenciais são geridos na fase de projeto pela adoção de soluções que permitam adequar os procedimentos executivos à heterogeneidade do maciço rochoso, como seja a utilização do Método Observacional e, às vezes, a definição de planos de contingência.

Para cada um dos casos, foram identificados os principais cenários geológicos e geotécnicos adversos para a escavação dos túneis, nomeadamente no referente a zonas tectonizadas, o que demonstra a noção da potencial ocorrência de um perigo para a estabilidade.

Para estes casos, há potenciais riscos intrínsecos ou dissimulados que foram geridos de uma forma intuitiva, mas que devem ser detetados e enumerados, para que tenham um desenvolvimento no âmbito de gestão de riscos mais estruturada e sistematizada em empreitadas futuras. No caso de não haver uma gestão de risco geotécnico, a consequência extrema é o colapso, com a possibilidade de afetar pessoas e equipamentos, assim como o prazo de execução na reparação da situação, com os custos daí inerentes.

Conhecimento das condições geológicas do maciço e sua variação

Para os cinco casos analisados foi realizado um enquadramento geológico regional tendo em consideração os elementos disponíveis na bibliografia, nomeadamente recorrendo a cartas geológicas e respetivas notícias explicativas, artigos científicos e relatórios técnicos sobre a zona.

Para todos os casos em análise, os estudos desenvolvidos na fase de projeto, tendo em vista a construção, contaram com a compilação dos elementos disponíveis na bibliografia, incrementados por estudos específicos, realizados no âmbito do projeto da obra. Estes estudos contemplam um enquadramento abrangente, realizado a uma escala regional e um mais específico de cada alinhamento, com identificação das formações geológicas e diferentes litologias ocorrentes, bem como, dos principais alinhamentos estruturais. O levantamento da atitude das discontinuidades foi alvo de tratamento estatístico, com identificação das principais famílias de discontinuidades ocorrentes.

A localização do AHVNIII, muito próxima do AHVNII, possibilitou um nível de conhecimento geológico e geotécnico impar quando comparado com os outros casos de estudo uma vez que, aproximadamente uma década antes, foi construído o AHVNII que já contava com o ATO de geologia e geotecnia em permanência em obra, que realizou descrições pormenorizadas sobre a qualidade do maciço e ocorrências de situações particulares.

Estes elementos, entre outros, permitiram a conceção de um modelo geológico-geotécnico com caracterização do maciço rochoso e sua individualização em diferentes zonas geotécnicas. Neste aspeto específico, mais uma vez o AHVNIII surge beneficiado pela informação existente do aproveitamento anteriormente realizado, que permitiu considerar a existência de perigos e riscos, e inclusivamente antecipar a sua localização. O modelo geológico e geotécnico apurado torna-se mais próximo da realidade, uma vez que os dados disponíveis são em maior quantidade, mesmo em zonas particulares, como sejam o atravessamento de falhas, e existem registos, quer das respetivas orientações, quer das restantes características.

Normalmente, os elementos disponibilizados são suficientes para permitir desenvolver o modelo geológico adequado para o local.

Sem a obtenção da informação nas fases de estudo e projeto que permita desenvolver o modelo geológico, surge o perigo da imprevisibilidade dos cenários ocorrentes durante a escavação e as consequências de impossibilitar a realização de projetos específicos adequados às necessidades, com soluções adequadas às características do maciço e definir metodologias de execução, ou seja, implica a impossibilidade de determinar um prazo de execução e os custos envolvidos na obra.

Conhecimento hidrogeológico

Na vertente da hidrogeologia, as características do maciço rochoso ocorrente nos vários casos em análise, levou a considerar a existência de permeabilidade na dependência da abertura das descontinuidades que, em profundidade, se preconizou que fosse reduzida, ou seja, com baixas afluências ao interior da escavação. Neste domínio é sempre necessário considerar a presença de falhas e filões que, no caso de serem constituídos por material resistente e fraturado, podem apresentar permeabilidade elevada, ou no caso de serem constituídos por material argiloso podem constituir barreiras naturais à percolação, limitando zonas com água, as quais ao serem atravessadas pela escavação podem acarretar afluências consideráveis.

No caso do AHVNIII, a existência do AHVNII nas proximidades, com distância que chega a ser inferior a 30 m, implica um risco acrescido na influência que este possa eventualmente induzir na construção do mais recente, pela circulação de água de um circuito para o outro.

No caso do AHA, a prospeção realizada em profundidade permitiu medir a posição do nível de água e, com base na experiência acumulada neste tipo de maciço relativamente à percolação de água e caudais afluentes em escavações anteriormente realizadas, os elementos disponíveis continham um modelo hidrogeológico.

Relativamente a um modelo hidrogeológico, pode haver maior dificuldade na respetiva definição; contudo, habitualmente são indicados os níveis de água do maciço e a permeabilidade, sendo importante na contemplação de cenários de estabilidade da escavação onde a afluência significativa de

água seja um dos fatores determinantes e, na contemplação de um sistema de bombagem eficiente, em caso de necessidade

Para todos os casos em apreço o perigo de afluência de água foi contemplado e considerado nos elementos disponibilizados para a fase construtiva.

Conhecimento geotécnico e modelos

Com base no modelo geológico e caracterização geotécnica do maciço em profundidade é possível proceder ao zonamento geotécnico, o qual tem em conta a ocorrência de trechos com características de comportamento semelhante face às solicitações da obra a executar. O número de zonas geotécnicas consideradas no projeto de cada um dos casos de estudo dependeu das características do maciço, mas também da abordagem de cada um dos Projetistas o que, em alguns casos de estudo, resulta em características diferentes para a mesma designação de zonamento geotécnico (ZG1, ZG2, ...), tal como se pode comprovar pela Tabela 4.18 do Capítulo 4.

Contemplação do MO

A conceção de um zonamento geotécnico, realizado habitualmente na fase de projeto, onde é desenvolvido um modelo que permite antever o comportamento do terreno na sequência da escavação realizada, e preconizar a contenção mais adequada para garantir a estabilidade das superfícies escavadas, é de utilidade inquestionável na abordagem à fase construtiva, permitindo implementar o MO.

A definição de zonas geotécnicas surge na sequência da existência de um risco potencial, que tem como perigo a ocorrência de variação das condições geológicas e geotécnicas durante a escavação e tem como consequência a eventual ausência de procedimentos definidos para prosseguir com a escavação com garantia da estabilidade, porque não existem soluções adequadas para a escavação e contenção e, eventualmente, nem existem mobilizados equipamentos adequados, referindo-se a título de exemplo a ocorrência de falhas, sem que o projeto contemple os procedimentos para a escavação e contenção nestas condições e sem que a Entidade Executante tenha disponíveis meios e equipamentos para lidar com a situação.

Adequabilidade dos procedimentos executivos previstos para a construção

Este tipo de abordagem, onde as características do maciço observadas na fase construtiva levam ao seu enquadramento num zonamento geotécnico específico definido em projeto, a que corresponde uma contenção igualmente preconizada em fase de projeto, carece de verificação dos pressupostos teóricos, o que se traduz na identificação prática dos mecanismos de rotura do maciço e da sua deformação, ou seja, do seu comportamento perante as novas condições de tensão a que fica sujeito após a abertura dos túneis. Isto implica a existência de um risco que resulta de dois perigos, um associado às

condições geológicas e geotécnicas reais observadas serem diferentes das consideradas em projeto, justificado por déficit de amostragem ou por insuficiente desenvolvimento do projeto; e um outro resultante da falta de técnicos experientes e/ou especialistas no acompanhamento da execução para identificação das condições ocorrentes. As consequências destes perigos é o recurso a metodologias desadequadas perante as condições do maciço ocorrente, ou aplicação de contenção desajustada que levem ao seu excesso ou déficit, que resultem em custos acrescidos, instabilidade da escavação e/ou mais tempo de execução que o estritamente necessário.

Tendo por base o zonamento geotécnico do maciço, é desenvolvido um modelo que permite antever o comportamento do terreno na sequência da respetiva escavação tendo em conta a geometria das secções transversais previstas e preconizar a contenção mais adequada para garantir a estabilidade das superfícies escavadas.

Este tipo de abordagem, onde as características do maciço observado na fase construtiva levam ao seu enquadramento num zonamento geotécnico específico definido em projeto, a que corresponde uma contenção já preconizada, igualmente em fase de projeto, carece de verificação dos pressupostos teóricos, o que se traduz na identificação prática dos mecanismos de rotura do maciço e da sua deformação, ou seja, do seu comportamento perante as novas condições de tensão que passam a existir com a abertura dos túneis.

Tendo em vista a identificação dos mecanismos de rotura do maciço e uma caracterização geológica e geotécnica mais aprofundada que a realizada em fase de projeto, o organograma da obra deve prever, desde o início, a presença de um ATO com experiência em engenharia geológica. E nos casos de estudo em análise o ATO em geologia e geotecnia fazia parte do organograma da construção, quer na equipa do Dono de Obra e Fiscalização, quer na equipa da Entidade Executante.

Plano de observação geotécnica para medição das deformações e confirmação dos pressupostos do projeto

A medição das deformações permite averiguar a adequabilidade das soluções de contenção e avaliar a estabilidade da escavação.

A avaliação das deformações ocorrentes é feita de modo comparativo entre o previsto e o real. Este procedimento encerra a presença de riscos que resultam de perigos, como sejam, o comportamento do terreno ocorrente ser diferente do identificado com base na amostragem em fase de projeto, ou a contenção aplicada ser insuficiente para contrariar o estado de tensão presente. Isto pode ter como consequências a instabilidade da escavação por contenção em déficit, o que coloca em causa a integridade de pessoas e equipamentos, ou excesso de contenção aplicada, com os inerentes custos e prazo de execução para além do estritamente necessário que advêm destas situações.

Para medir a deformação do maciço, também designada de convergência/confinamento nos casos onde é utilizada contenção do maciço (Hudson, 1993), podem ser utilizados diferentes equipamentos de

observação; contudo, nos casos de estudo considerados, as deformações ao longo dos túneis foram monitorizadas através de secções de convergências. Nestes casos, as leituras eram asseguradas com recurso a equipamentos topográficos, uma vez que apresentam vantagens várias em termos, quer de fiabilidade de leituras, quer de operacionalidade (Machado, 2003).

Nos casos analisados, a metodologia de escavação selecionada foi o D&B. E uma vez conhecida a metodologia de escavação e as características do terreno, estão reunidas as condições mínimas para o devido dimensionamento dos meios humanos (organograma) e equipamentos necessários para realizar as escavações com o máximo de produtividade; no entanto, há situações particulares que podem não ter sido detetadas previamente e que é necessário acautelar, como seja o atravessamento de condições geológicas adversas, nas quais há sempre dificuldade em antecipar os meios de contenção sem identificação específica das características do terreno.

Em todos os casos estava prevista a escavação sequencial parcializada nos túneis com secção de grande diâmetro. Nos túneis de pequena secção, a escavação era em frente plena, estando prevista a parcialização sempre que as condições geológicas e geotécnicas fossem adversas.

Com base no conhecimento disponível sobre as condições geológicas e geotécnicas e selecionado o modo de escavação mais adequado é possível desenvolver as restantes metodologias necessárias à construção do túnel; contudo, é necessário que essas metodologias contemplem a sua revisão e adaptação já com a fase construtiva em curso, para responderem ao potencial perigo de ocorrência de situações não contempladas, quer resultem das condições não previstas do maciço, quer de problemas com os meios disponíveis para a execução, isto porque esse perigo pode ter como consequências danosas a impossibilidade de intervenção atempada na solução dessas situações, que coloquem em causa a estabilidade da escavação com potenciais danos para a integridade física de pessoas, equipamentos e tempo de execução na sua retificação e inerentes custos acrescidos.

Concretizando, a análise dos casos de estudo permitiu detetar situações que são práticas comuns, que muitas vezes são devidamente contemplados nos documentos provenientes das fases de estudo e projeto; contudo, devem ser sistematizados e integrados num processo de gestão de risco.

Conforme exposto, os riscos potenciais detetados são resumidos seguidamente:

- i. Verificação da existência de riscos e/ou plano de gestão de riscos geotécnicos na fase executiva;
- ii. Conhecimento das condições geológicas do maciço e sua variação;
- iii. Existência do RGR;
- iv. Conhecimento hidrogeológico;
- v. Conhecimento geotécnico do maciço e sua variação;
- vi. Modelo geológico e geotécnico com respetivo zonamento;
- vii. Plano de contingência para situações geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas adversas;
- viii. Contemplação do MO;

- ix. Adequabilidade dos procedimentos executivos previstos para a construção;
- x. Plano de observação geotécnica para medição das deformações e confirmação dos pressupostos do projeto.

5.2 TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR

A heterogeneidade dos maciços rochosos e a incapacidade de a conhecer totalmente em antecipação, pode constituir um dos maiores riscos no domínio da geologia e geotecnia na construção de túneis, com consequências ao nível de:

- Abordagem técnica à construção;
- Implementação de métodos e meios adequados;
- Garantia de estabilidade
- Segurança de pessoas e equipamentos
- Prazo de execução;
- Custos financeiros.

Qualquer adaptação que seja necessária efetuar aos métodos construtivos durante a construção, implica perda de tempo, porque mesmo que a adequação de metodologias ou equipamentos, permitam uma maior rentabilidade da data de implementação para diante e eventualmente a recuperação de prazo relativamente ao previsto, há a perda de tempo inerente ao período em que se recorreram às metodologias e meios menos adequados e, com tudo isso, os custos associados a estas operações aumentaram.

A capacidade de prever ou antecipar a variação de características que constituem a heterogeneidade do maciço rochoso é fundamental para o sucesso de uma escavação. Como tal, tendo em consideração os casos de estudo selecionados e a metodologia constante na Secção 3.1.2, seguidamente e para cada um dos casos de estudo concluídos, apresentam-se:

- **Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade** - resultados da análise multivariada (AFC) sobre os parâmetros que constituem a classificação de Bieniawski (1989), para determinarem objetivamente os mais relevantes na variação de qualidade do maciço rochoso;
- **Estimação da qualidade** - os resultados da estimação da qualidade do maciço rochoso em antecipação (RMR), segundo as seguintes metodologias:
 - Regressão linear baseada nos últimos três avanços (RMRregr3)
 - Regressão linear baseada nos últimos cinco avanços (RMRregr5)
 - Regressão linear baseada nos últimos 10 avanços (RMRregr10);
 - Krigagem normal (RMRkrig);
 - Redes neuronais (RMRrn);

- Análise gráfica expedita por especialista (RMRexp);
- **Erro na estimação da qualidade** - os erros associados à estimação da qualidade do maciço em antecipação.

5.2.1 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II

5.2.1.1 Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade

Neste caso observa-se um maciço rochoso com características que o permitiram enquadrar nas cinco classes de qualidade definidas por Bieniawski (1989), embora representadas com diferentes frequências para cada uma das classes (Secção 4.1.4).

Analisando os parâmetros que constituem a classificação de Bieniawski (1989), com as abreviaturas apresentadas na Tabela 3.3 e recorrendo a AFC, é possível verificar a relação entre parâmetros pela proximidade que apresentam entre si na projeção gráfica contante na FiguraA3.1 no Apêndice III.

Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 5.1 e mostram que, sempre que o maciço tem descontinuidades muito afastadas (Pesp:20) e as características das descontinuidades são muito boas (Pdes:25), este enquadra-se na classe I (RMR > 80).

Tabela 5.1 – AHVNII: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso

Classe RMR	Prcu	Prqd	Pesp	Ph2o	Pdes	Pcom	Pabe	Prug	Penc	Palt	Pori
I			Pesp:20		Pdes:25		Pabe:6		Penc:6	Palt:6	
II		Prqd:17	Pesp:15		Pdes:20		Pabe:4	Prug:5	Penc:4	Palt:5	Pori:0
III					Pdes:10	Pcomp:1		Prug:3		Palt:3	Pori:-10
IV	Prcu:7		Pesp:8	Ph2o:7	Pdes:0		Pabe:0		Penc:0	Palt:1	
V	Prcu:4 Prcu:2 Prcu:1	Prqd:8 Prqd:3	Pesp:5	Ph2o:5				Prug:0		Palt:0	

O maciço de classe II ($60 < \text{RMR} < 80$) surge preferencialmente quando se tem um RQD superior a 75% (Prqd:17), as descontinuidades estão afastadas (Pesp:15), as características das descontinuidades são boas (Pdes:20) e a sua orientação é muito favorável (Pori:0).

O maciço enquadrado em classe III ($40 < \text{RMR} < 60$) aparece associado a características de descontinuidades razoáveis (Pdes:10).

Quando se encontra um maciço onde a RCU da rocha apresenta valores no intervalo 5-50 MPa (Prcu:7), descontinuidades próximas (Pesp:8) e as respetivas características são fracas (Pdes:0) e o

terreno está saturado de água (Ph2o:7), este enquadra-se preferencialmente na classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$).

O maciço representante da classe V ($\text{RMR} < 20$) surge preferencialmente quando a RCU da rocha é inferior a 5 MPa (Prcu:4, Prcu:2, Prcu:1), o RQD inferior a 50% (Prqd:8, Prqd:3) e as descontinuidades estão muito próximas (Pesp:5).

Para este caso de estudo o enquadramento do maciço nas diferentes classes de qualidade poderia ser feito apenas conhecendo-se as características das descontinuidades (Pdes), particularmente o estado de alteração das respetivas superfícies (Palt), uma vez que este parâmetro se encontra individualizado como representativo em todas as classes de qualidade do maciço. Isto significa que, na frente de escavação, quando se observar a variação de algum destes parâmetros é natural que o maciço se venha a enquadrar noutra classe de qualidade. Ou seja, no caso da variação destes parâmetros se dar de modo gradual é possível antever essa alteração de qualidade do maciço.

5.2.1.2 Estimação da qualidade

Conforme referido na Secção 3.1.2.3, para estimação da qualidade do terreno em avanço, utilizaram-se as diferentes metodologias ali descritas, que tiveram como base representativa da qualidade, o índice RMR. Os resultados de RMR obtidos da estimação ao longo de aproximadamente 5500 m de escavação encontram-se na Figura 5.1.

Em todas as figuras para apresentação dos resultados de estimação do valor de RMR ao longo da escavação, conjuntamente com o valor de RMR observado, para este último é feita uma gradação de cores, correspondendo a verde a um maciço de melhor qualidade, a amarela a um maciço de qualidade mediana e a vermelha a um maciço de qualidade fraca.

No caso da estimação dos valores de RMR com recurso à krigagem, encontra-se no Apêndice IV os resultados estatísticos da amplitude para a variável RMR, tendo-se constatado que em termos médios o valor é de 39 m, ou seja, muito para além da distância para a qual se realiza a estimação (média de aproximadamente 3 m).

Independentemente do método de estimação utilizado, verifica-se grande proximidade entre os valores observados e estimados. Analisando os gráficos da Figura 5.1 com pormenor, verifica-se que, na generalidade e como seria de esperar, há uma resposta tardia das metodologias de estimação relativamente aos valores observados, principalmente quando as variações destes valores são bruscas e de significativa dimensão. Isto implica que, perante variação significativa de qualidade do terreno, qualquer dos métodos de estimação utilizados é falível.

Os resultados da estimação do índice RMR em avanço revelam que as diferenças são fracas, comparando quer com os valores observados, quer das várias metodologias entre si - Figura 5.2.

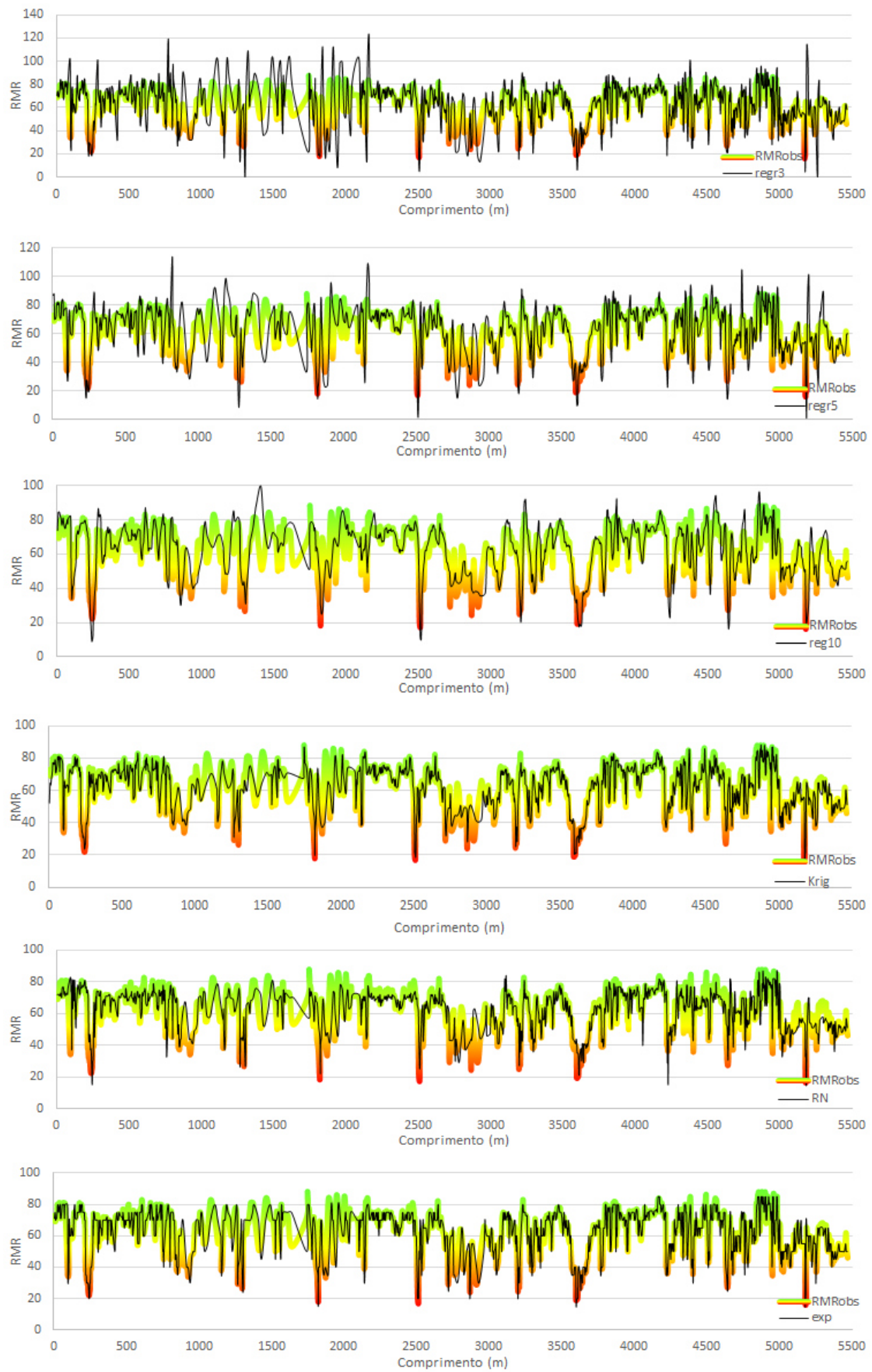


Figura 5.1 – AHVNII: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação

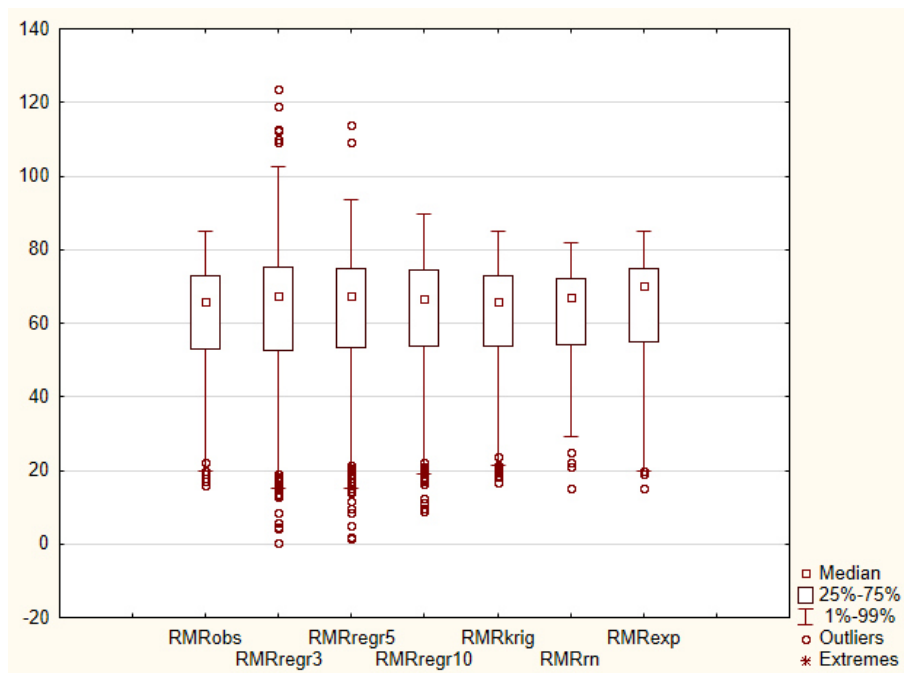


Figura 5.2 – AHVNII: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores do índice RMR

A média dos resultados obtidos é igualmente próxima entre si para as várias metodologias utilizadas e idênticas à observada pelo ATO.

A amplitude dos resultados mostra que a estimação pelo método de regressão linear baseada nos últimos três avanços (RMRregr3) vai além dos valores de RMR observados (RMRobs), isto para ambas as extremidades da distribuição. Em situação inversa, com o RMR estimado a ficar aquém do RMRobs, encontram-se os resultados da metodologia por krigagem (RMRkrig) e pelas redes neuronais (RMRrn), onde os valores estimados não abrangem a amplitude dos observados.

Como métodos com valores estimados mais próximos dos observados encontram-se a krigagem (RMRkrig) e o método empírico resultante da opinião expedita do especialista (RMRexp). Ou seja, o recurso a estas metodologias afigura-se como mais adequado para lidar com o risco de variação da qualidade do maciço rochoso, permitindo melhores resultados para a sua deteção em antecipação, comparativamente com as restantes metodologias estudadas.

Correlacionando os valores de RMRobs e os obtidos pelos diferentes métodos de estimação – Tabela A5.1 no Apêndice V, destaca-se como mais elevada a obtida pelos métodos de krigagem (RMRkrig) e expeditamente pelo especialista (RMRexp).

Para avaliar o comportamento da correlação entre os valores de RMR observados e os obtidos pelas diferentes metodologias, apresentam-se os respetivos gráficos no Apêndice VI. Genericamente, verifica-se ao longo da escala do valor de RMR uma dispersão constante, independentemente de se analisar o intervalo mais central ou as periferias da escala.

Analisando os valores estimados que mais se afastam da correlação adequada, há uma ligeira tendência para surgirem na zona central da escala.

5.2.1.3 Erro na estimação da qualidade

Na estimação da qualidade do maciço em avanço foram utilizadas diferentes metodologias que, conforme foi anteriormente analisado, não apresentam uma correlação adequada, o que implica a existência de erro associado à estimação dos valores. Na Figura 5.3 apresentam-se os resultados do erro absoluto calculado para cada um desses métodos.

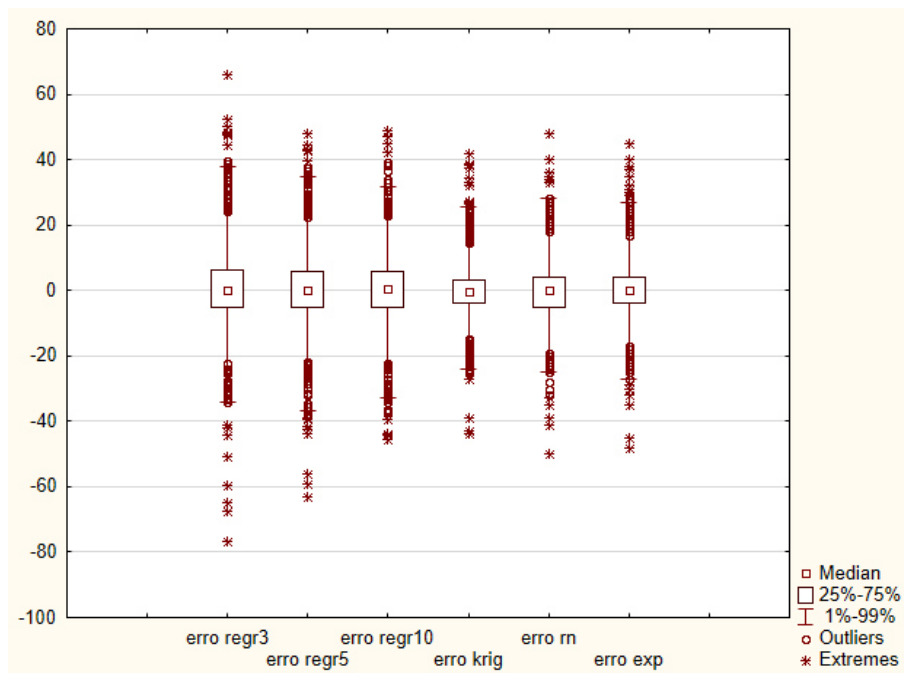


Figura 5.3 – AHVNII: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR

Para este caso de estudo e considerando as várias metodologias para estimação do RMR, a que assume menor erro é a krigagem (erro krig). Em situação oposta encontra-se a metodologia de regressão linear baseada nos três últimos avanços (erro regr3).

A projeção do erro em função do valor de RMRobs encontra-se no Apêndice VII e mostra que, para valores baixos, o erro tende a ser positivo e, inversamente para valores de RMR elevados, o erro tende a ser negativo. Estes valores eram expectáveis uma vez que, quando o maciço é de boa qualidade, em algum ponto vai diminuir de qualidade, originando um erro negativo e conforme verificado acima, as metodologias não conseguem dar resposta imediata à variação da qualidade do maciço. Estes resultados colocam em evidência que as metodologias utilizadas estimam o terreno de boa qualidade por defeito e os de qualidade fraca por excesso.

No Apêndice VIII encontram-se os gráficos com os valores de erro ao longo do comprimento da escavação, os quais permitem avaliar a eventual existência de relação entre o erro e a localização no túnel, como sejam os trechos de início, meio ou final. Este fator é importante uma vez que, a cada avanço da escavação, ficam mais dados disponíveis, pelo que as metodologias que entram em

consideração com todas as informações desde o início da escavação, como sejam a krigagem, redes neuronais e especialista, poderiam ter os seus modelos mais desenvolvidos no final da escavação, resultando erro menor na estimação dos valores à medida que a escavação avança. No entanto, verifica-se que não existem diferenças significativas ou uma associação clara, uma vez que o erro permanece sem variação significativa ao longo de todo o comprimento escavado, apresentando uma distribuição homogénea sem qualquer correlação.

Os dados constantes nos gráficos do Apêndice VIII permitem ainda analisar a dimensão do erro em função da dimensão do túnel em estudo. Observa-se um comportamento dos valores de erro sem variação significativa entre túneis de diferente comprimento ou secção transversal. Significa isto que nos casos estudados, o erro aparentemente não é influenciado pelo comprimento da escavação, nem pela dimensão da secção transversal.

5.2.2 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III

5.2.2.1 Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade

A aplicação de uma AFC neste caso de estudo tem os resultados que constam na Figura A3.2 no Apêndice III. Na Tabela 5.2 mostram-se, para cada classe de qualidade do maciço, as categorias de cada parâmetro que a descreve e que melhor se correlacionam com ela.

Tabela 5.2 – AVNIII: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso

Classe RMR	Prcu	Prqd	Pesp	Ph2o	Pdes	Pcom	Pabe	Prug	Penc	Palt	Pori
I			Pesp:20				Pabe:5	Prug:6		Palt:6	
II		Prqd:20			Pdes:20		Pabe:4	Prug:5 Prug:2	Penc:4	Palt:5 Palt:2	Pori:-2
III	Prcu:7	Prqd:13	Pesp:10	Ph2o:10 Ph2o:7		Pcomp:1					
IV	Prcu:4 Prcu:2	Prqd:8	Pesp:8					Prug:0		Palt:0	
V	Prcu:1	Prqd:3	Pesp:5								

Verifica-se que as classes de qualidade mais fracas (classes III, IV e V) surgem sempre que a RCU, o RQD e o espaçamento entre descontinuidades, também apresentam valores mais baixos, sendo que o parâmetro RQD surge como característico sempre que o maciço é enquadrado na classe II. Em posição oposta, a classe I, representativa da melhor qualidade do maciço, aparece quando o espaçamento entre as descontinuidades é mais elevado e tal traduz-se numa melhoria de qualidade.

Os resultados mostram que neste caso não existe um parâmetro que, por si só, permita a definição da qualidade do maciço rochoso desde a classe mais fraca até à boa; contudo, o risco de variação de qualidade do maciço eventualmente pode ser reduzido recorrendo ao RQD (representativo das classes entre II e V) e espaçamento das descontinuidades (representativo da classe I) em conjunto, porque no caso de identificação de variação progressiva de algum destes parâmetros, torna possível antecipar a variação geral da qualidade do maciço.

5.2.2.2 Estimação da qualidade

O valor RMR resultante da estimação pelas diferentes metodologias adotadas consta da Figura 5.4, inclui igualmente o RMRobs (representado pela cor verde nos valores de qualidade boa, amarelo para os medianos e vermelho para os de qualidade fraca), possibilitando a sua comparação ao longo do comprimento de túnel escavado (aproximadamente 7600 m).

No Apêndice IV constam os resultados estatísticos da amplitude para a variável RMR obtida neste caso de estudo, verificando-se um valor médio de 48 m, o que excede muito o comprimento médio do avanço seguinte (aproximadamente 3 m), que foi a distância utilizada nesta investigação.

Regista-se que, ao longo do comprimento da escavação, o valor de RMR estimado pelas diferentes metodologias é muito próximo do RMRobs, seguindo a mesma tendência. Quando a variação da qualidade do maciço é brusca, o RMR resultante da estimação não a acompanha de imediato, observando-se um desfasamento entre as duas linhas no gráfico, isto é, só após observar-se a variação do maciço é que esta passa a ser considerada nas metodologias de estimação, o que significa que esses eventos não se conseguem antever matematicamente e que o risco inerente à variação de qualidade do maciço continua presente. Na metodologia de regressão linear, com maior destaque à resultante dos últimos três avanços (RMRregr3), os valores de RMR estimados vão além dos limites, quer superior, quer inferior, do valor de RMRobs, o que raramente acontece com as restantes metodologias, salvo em situações pontuais, o que significa uma sobrestimação e subestimação por esta metodologia.

Perante a distribuição estatística dos valores de RMR da Figura 5.5, verifica-se que os valores descritivos, como sejam a média, 1º e 3º quartis ou limite de resultado de cada uma das metodologias são idênticos, com exceção de alguns valores extremos observados para a maioria dos métodos de estimação.

De entre os métodos adotados, o que apresenta resultados de estimação mais próximos do observado é o obtido por krigagem (RMRkrig), pelo que se afigura como mais adequado, de entre os usados. Em contraposição, encontram-se os resultados da aplicação da regressão linear baseada nos três últimos avanços da escavação (RMRregr3), identificando-se valores para além do máximo e mínimo observados, ou seja, confirma-se a subestimação e sobrestimação de resultados já identificados no caso de estudo anterior.

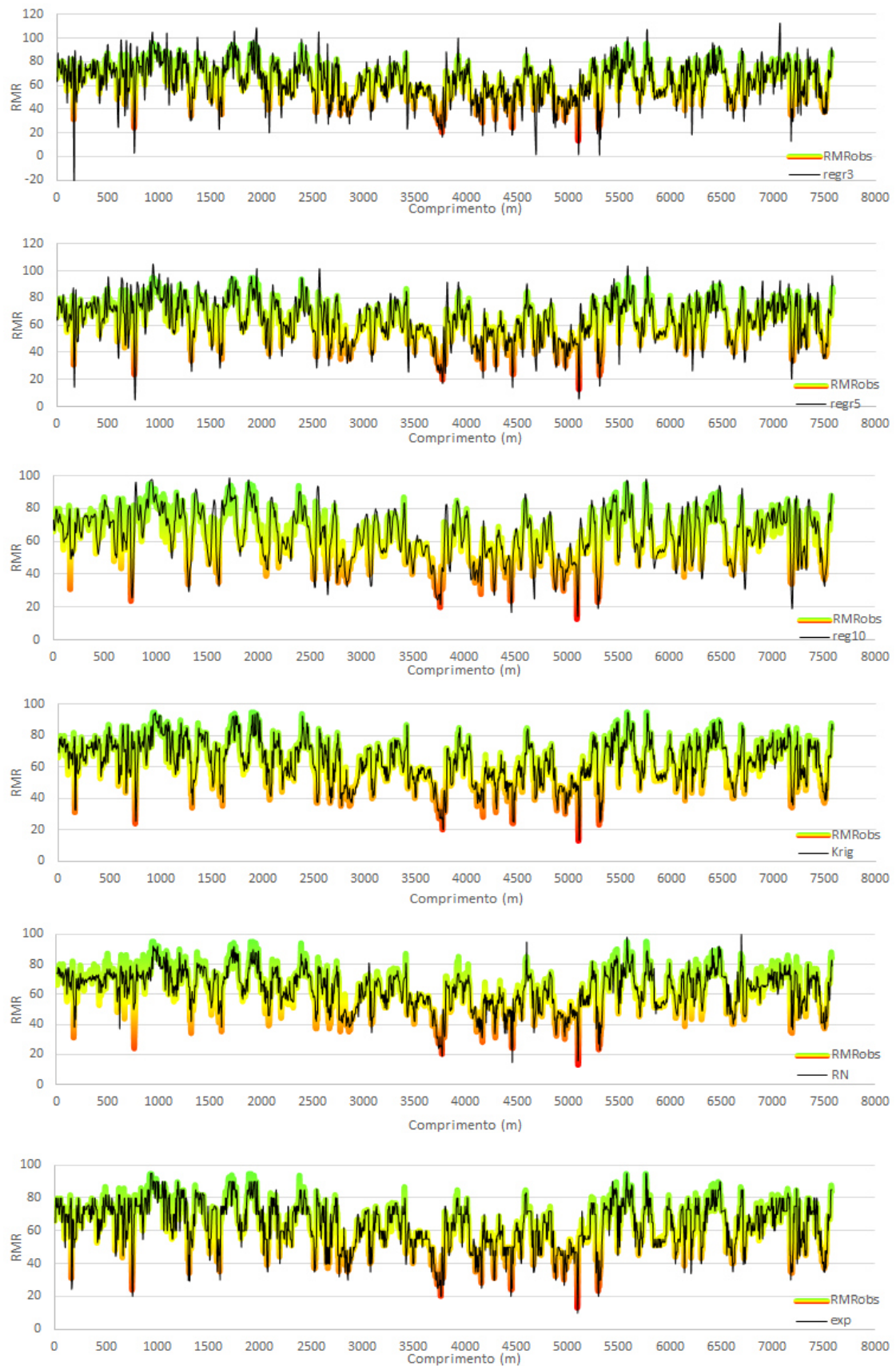


Figura 5.4 – AHVNIII: gráfico do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação

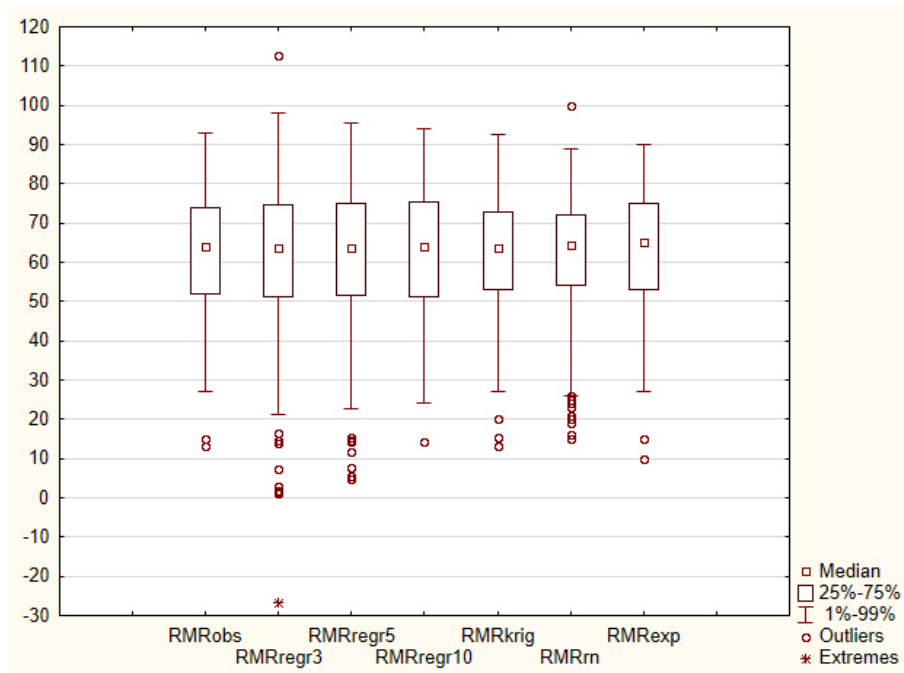


Figura 5.5 – AHVNIII: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação

Correlacionando os valores de RMR estimados com os observados, constata-se que os resultados são elevados para todos eles, conforme se constata pela Tabela A5.2 no Apêndice V, de entre os quais se identifica a krigagem (RMRkrig) como o mais elevado, seguido de muito próximo pela estimação efetuada expeditamente pelo especialista (RMRexp).

Comparando as diferentes metodologias de estimação do valor de RMR aplicadas neste caso de estudo, a correlação entre o RMRkrig e o do especialista (RMRexp) é a maior, significando que o resultado da utilização de qualquer um destes métodos é idêntica.

Para observar o comportamento da correlação do RMR estimado com o RMRobs apresentam-se no Apêndice VI, para cada metodologia, os respetivos gráficos, onde é possível averiguar uma grande concentração de valores em torno da reta da correlação perfeita; contudo, identifica-se alguma dispersão de resultados, em particular nos valores intermédios da escala de RMR.

Observa-se que a dispersão de valores (que surgem para além do intervalo de 0,95 da reta de previsão) é quase idêntica ao longo de toda a escala de valores de RMR, o que coloca em evidência a heterogeneidade do maciço e a sua imprevisibilidade independente da qualidade, que apresenta ser elevada ou baixa.

5.2.2.3 Erro na estimação da qualidade

Na estimação dos valores de RMR pelas diferentes metodologias consideradas, existe um erro associado. Na Figura 5.6 apresentam-se os resultados do erro absoluto calculado para cada um dos métodos de estimação do valor de RMR.

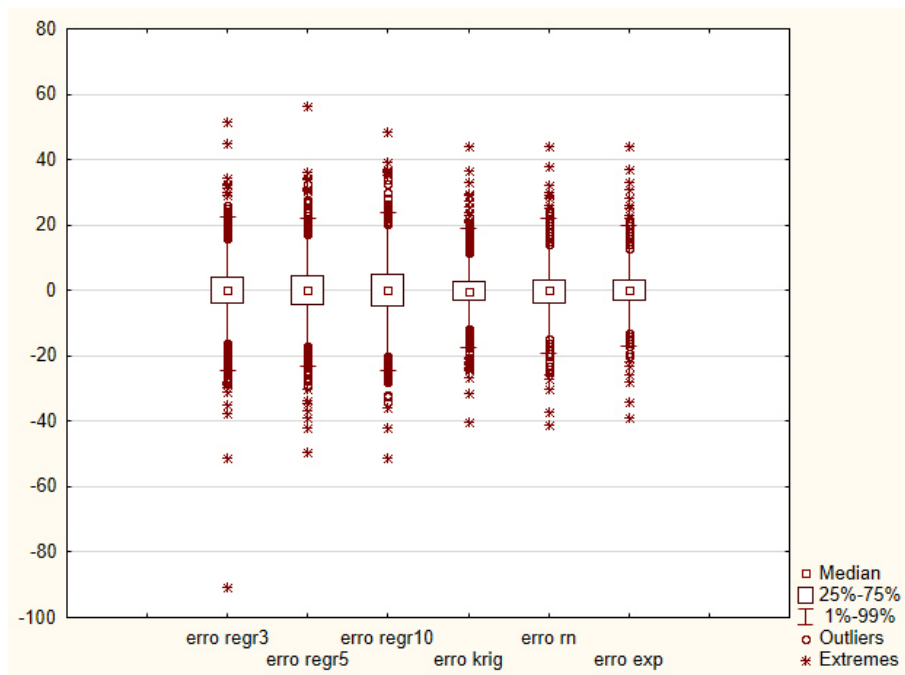


Figura 5.6 – AHVNIII: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR

Independentemente do método de estimação, observa-se um erro médio próximo de zero e com valores de dispersão geralmente de pequena amplitude (inferiores a 6), mas com alguns valores extremos elevados.

Detalhando os resultados dos erros, verifica-se que os da krigagem (erro krig) têm a menor amplitude de valores, confirmando-se ser o método mais adequado para diminuir o risco associado à estimação na variação de qualidade do maciço.

No Apêndice VII apresentam-se os gráficos que permitem avaliar a dimensão do erro em função do RMR observado. A dimensão do erro é idêntica ao longo da escala do valor de RMR para as metodologias de regressão (erro regr3, erro regr5 e erro regr10).

Para valores de RMR mais baixo um erro maior, assumindo valores positivos, e um erro menor, assumindo valores negativos, para os RMR mais elevados. Conforme já explicado, este comportamento é justificado porque quando a qualidade do maciço rochoso é baixa, em algum ponto vai melhorar e os modelos de estimação, de acordo com o constatado anteriormente, não têm capacidade para o prever de forma imediata; no caso de valores de RMR elevados a situação é contrária, mas a mesma justificação é válida.

Nas regressões lineares, a quantidade de dados envolvidos na estimação é sempre a mesma (3, 5 ou 10 últimos avanços); no entanto, nas metodologias de estimação em que se recorreu a redes neuronais, krigagem e ao especialista, há um incremento contínuo do número de dados no modelo, pelo que importa analisar se há uma diminuição do erro para o caso das galerias de maior dimensão e se o erro vai diminuído à medida que o comprimento aumenta. No Apêndice VIII encontram-se os gráficos com projeção do erro ao longo dos túneis, onde se verifica que, de um modo geral, não se verifica

correlação entre estas duas variáveis; nem o erro diminui à medida que o comprimento dos túneis aumenta, nem os túneis de maior comprimento apresentam erro menor; assim como, túneis de diferentes secções transversais também apresentam valores de erro idênticos. Não se observando qualquer relação entre o erro e a dimensão dos túneis.

5.2.3 Aproveitamento hidroelétrico de Picote II

5.2.3.1 Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade

Os dados disponíveis para este caso de estudo, também, permitem analisar as características que estão na base da determinação do valor de RMR, relativamente à relevância da sua variação na alteração da classe de qualidade do maciço rochoso observado.

A AFC, constante no Apêndice III, permite verificar de modo imediato quais os parâmetros geotécnicos que se encontram significativamente correlacionados com cada uma das classes de qualidade do maciço. Esses resultados encontram-se resumidos na Tabela 5.3, onde se verifica que as características das descontinuidades (Pdes) e, particularmente, a rugosidade (Prug) da superfície das descontinuidades permitem, por si, enquadrar o maciço na respetiva classe de qualidade do maciço, o que implica que o risco associado à heterogeneidade do maciço pode ser diminuído nos casos onde se detete variação progressiva de um destes parâmetros, uma vez que podem servir de indicador à alteração de classe de qualidade.

Tabela 5.3 – AHP: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso

Classe RMR	Prcu	Prqd	Pesp	Ph2o	Pdes	Pcom	Pabe	Prug	Penc	Palt	Pori
I	Prcu:20		Pesp:20		Pdes:30	Pcomp:6		Prug:6			
II	Prcu:12				Pdes:20		Pabe:4 Pabe:3	Prug:5	Penc:5		Pori:-10
III					Pdes:10		Pabe:1	Prug:3	Penc:2	Palt:3 Palt:2	Pori:12
IV	Prcu:4			Ph2o:7	Pdes:0			Prug:1		Palt:1	
V											

Os restantes parâmetros surgem como representativos de algumas classes de qualidade do maciço, mas de modo isolado, como sejam, o espaçamento entre descontinuidades (Pesp) que está associada à classe I, ou a resistência à compressão uniaxial (Prcu), que surge associada às classes I, II e IV.

Salienta-se que, neste caso de estudo, não se verificou a presença de maciço que levasse ao enquadramento na classe V, representativa de um maciço de qualidade mais fraca.

5.2.3.2 Estimação da qualidade

A estimação do valor de RMR recorrendo às várias metodologias consta da Figura 5.7. Da sua análise verifica-se que a estimação realizada ao longo da escavação dos diversos túneis, quando comparada com o RMRobs, indica uma proximidade significativa entre aqueles dois valores. Destacam-se apenas duas situações, aproximadamente aos 150 m e aos 630 m, presentes na estimação por regressão linear baseada nos últimos três avanços (regr3), onde se identificam picos indicadores de uma diferença significativa entre os valores estimados e observados. Ambas as situações resultam do final de uma tendência: a primeira das quais para uma melhoria da qualidade do maciço, e a segunda referente a condições mais fracas da qualidade do maciço.

Uma nota para a estimação do valor de RMR por krigagem, que têm por base os semivariogramas, com valores de amplitude que excedem o comprimento do avanço seguinte, tendo-se verificado para este caso de estudo um valor médio de amplitude de 30 m, conforme se pode observar nos resultados estatísticos apresentados no Apêndice IV.

Aplicando estatística descritiva aos valores de RMR observado e estimado pelas diferentes metodologias - Figura 5.8, identificam-se valores característicos idênticos, como sejam a média, 1º e 3º quartis ou limite de resultados. As exceções são alguns valores extremos, observados nos métodos de estimação de regressão linear (RMRregr3, RMRregr5 e RMRregr10) e no expedito por especialista (RMRexp).

Perante a estatística descritiva e de entre os métodos de estimação, o que apresenta resultados mais próximos do observado é o obtido de modo expedito pelo especialista (RMRexp). Em contraposição encontram-se os resultados da aplicação da regressão linear baseada nos três últimos avanços (RMRregr3), com presença de valores para além do máximo e mínimo observados, ou seja, com sub e sobrestimação de resultados.

Correlacionando os valores de RMR obtidos pelos vários métodos de estimação com os observados e entre si, conforme consta na Tabela A5.3 no Apêndice V, verificam-se para todos os casos valores elevados, correspondendo à resultante da krigagem (RMRkrig) o mais elevado, pelo que se afigura como o mais adequado para avaliar o risco de heterogeneidade do maciço, procedendo à sua identificação em antecipação.

Comparando entre as diferentes metodologias, a correlação entre os resultados da krigagem (RMRkrig) e da regressão linear com base nos últimos cinco avanços (RMRregr5) apresentam a maior correlação para este caso de estudo, significando que a utilização de qualquer deles é idêntica.

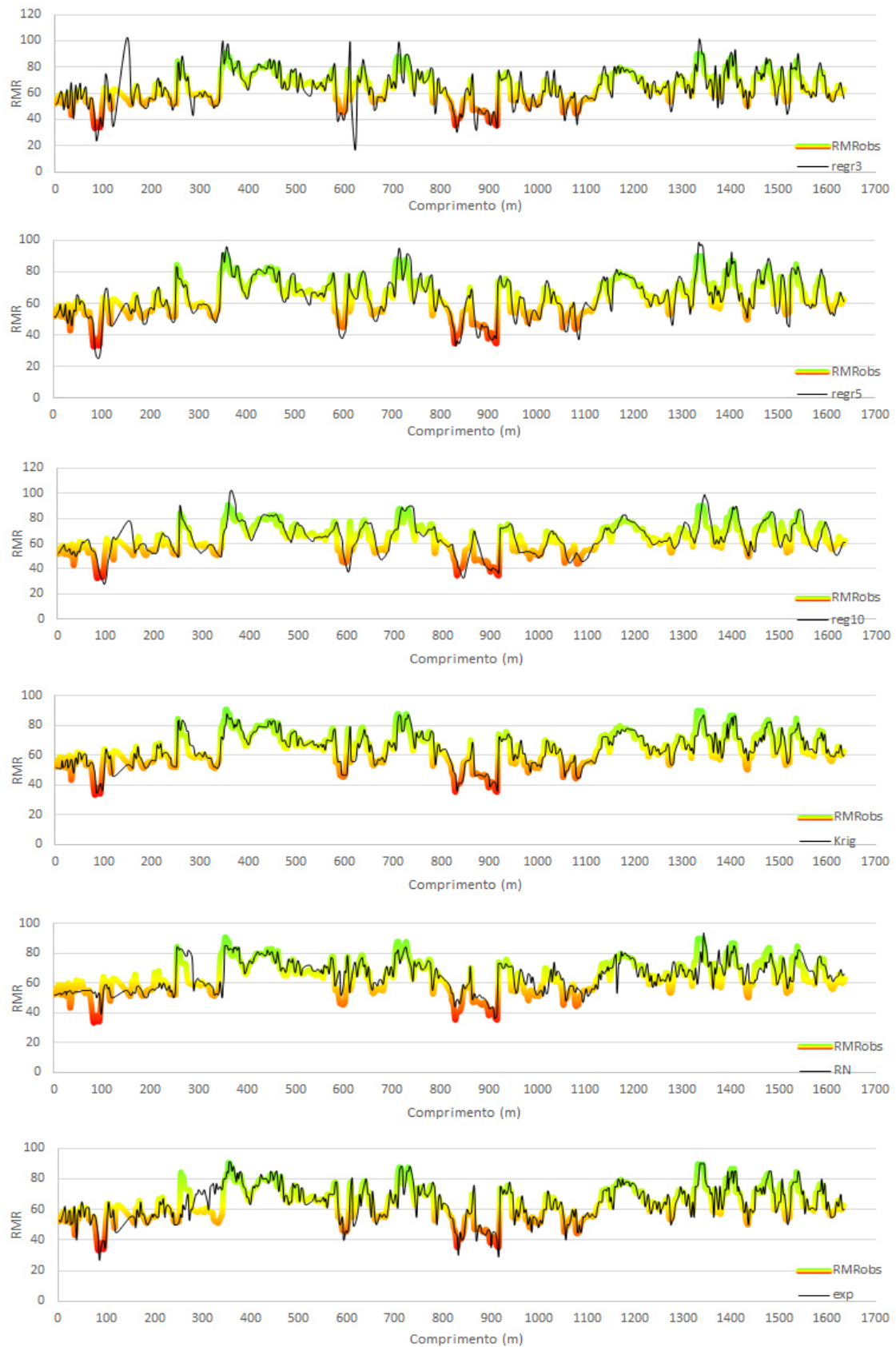


Figura 5.7 – AHP: gráfico do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação

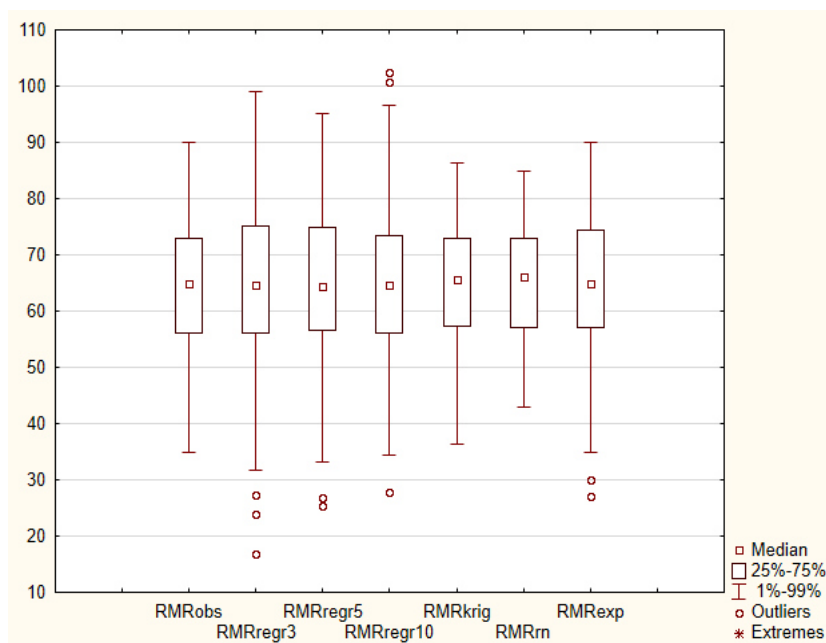


Figura 5.8 – AHP: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação

Para analisar o comportamento da correlação dos valores estimados pelas diferentes metodologias com os valores observados apresentam-se no Apêndice VI, os respectivos gráficos. Torna-se possível averiguar a presença de uma concentração significativa de valores em torno da reta da correlação perfeita, identificando-se poucos resultados dispersos. Observa-se, ainda, que a dispersão de valores que surgem para além do intervalo de 0,95 da reta de previsão, é quase idêntica ao longo de toda a escala dos valores de RMR, salientando a heterogeneidade do maciço e a sua imprevisibilidade independente da qualidade que apresenta ser muito boa ou fraca.

5.2.3.3 Erro na estimação da qualidade

A imprevisibilidade da qualidade do maciço em algumas situações, recorrendo a estes métodos de estimação em antecipação, já referida anteriormente, implica existência de um erro associado, representando a Figura 5.9 os resultados do erro absoluto calculado para cada um dos métodos de estimação.

Verificando-se um erro médio próximo de zero, com valores de dispersão em regra de pequena amplitude, mas com alguns valores extremos elevados.

Detalhando esta análise aos erros associados a cada metodologia, como consta na Figura 5.9, regista-se que os obtidos por krigagem (erro krig) são os que apresentam valor médio mais próximo de zero e com amplitude de valores menor, mesmo considerando os valores extremos. Situação idêntica é revelada pela regressão linear baseada no RMR nos últimos cinco avanços (erro regr5), ou seja, comprova-se o já indicado pelo cálculo das correlações, com ambas as metodologias a ficarem mais próximas do observado em obra.

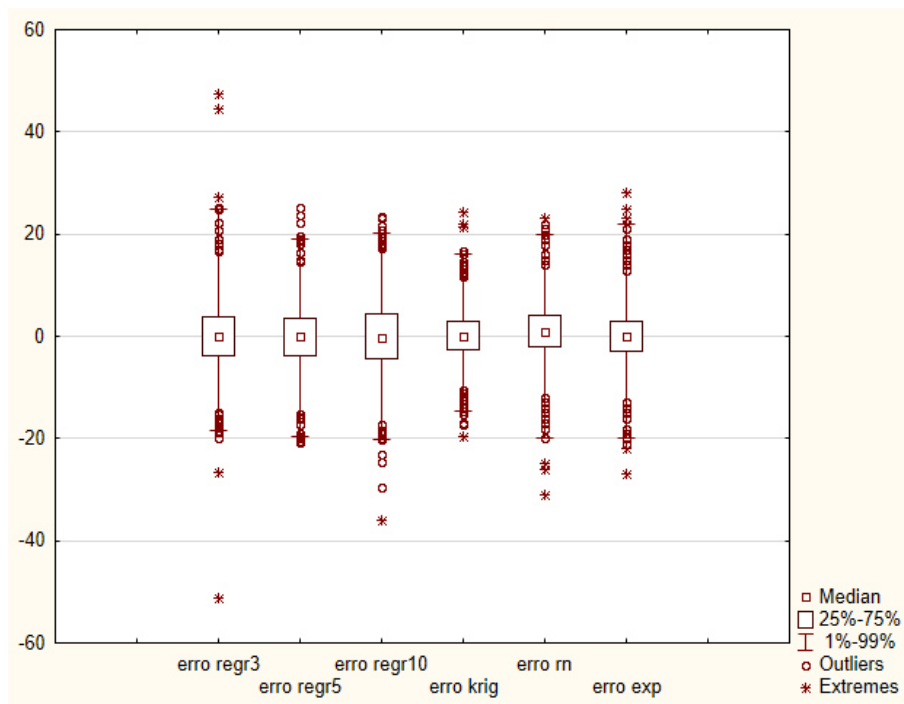


Figura 5.9 – AHP: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR

Como metodologia com mais erro associado encontram-se a regressão linear baseada no valor de RMR para os últimos três avanços (erro regr3) e regressão linear baseada nos últimos dez avanços (erro regr10).

Para avaliar se a dimensão do erro se encontra associada ao valor de RMRobs específico ao longo da escala, apresenta-se no Apêndice VII a respetiva projeção gráfica, onde se identifica que, com exceção das redes neuronais, onde a dimensão do erro é maior para valores de RMR mais elevados, nas restantes metodologias o erro de maior dimensão surge para valores intermédios de RMR.

Particularmente evidente nas metodologias de regressão (erro regr3, erro regr5 e erro regr10) é a presença de erro positivo para valores de RMR baixos e, erro negativo para valores de RMR elevados, conforme já verificado nos casos de estudo anteriormente analisados.

Nas metodologias de estimação como as redes neuronais (erro rn), krigagem (erro krig) e do especialista (erro exp), onde há um incremento contínuo de valores de RMR, poderia verificar-se uma diminuição do erro com o comprimento dos túneis; enquanto nas metodologias de regressões baseadas nos últimos valores observados, o número de dados utilizados na estimação é sempre o mesmo, sendo o erro de valor idêntico ao longo do comprimento dos túneis. Assim, para analisar esta possível correlação apresentam-se no Apêndice VIII os respetivos gráficos com a disposição do erro ao longo do comprimento da escavação.

Embora num dos túneis (Túnel de acesso à central) a dimensão do erro aumente com o respetivo comprimento, é possível verificar que coincide com uma maior variação do valor de RMR, aproximadamente da metade do túnel em diante e, para os restantes constata-se que não existem

diferenças significativas, ou uma associação entre o comprimento da escavação e o erro obtido na estimação do RMR.

Mesmo túneis de diferente comprimento apresentam valores de erro idênticos, assim como túneis de diferente secção transversal apresentam mais uma vez valores de erro idênticos.

5.2.4 Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II

5.2.4.1 Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade

Neste caso de estudo e conforme já referido, observou-se um maciço rochoso com características que levaram ao seu enquadramento, quase total, numa única classe de qualidade (classe III). A fraca variação das características do maciço levanta dificuldades na aplicação da AFC - Apêndice III. A Tabela 5.4 representa as características do maciço que levaram ao seu enquadramento na classe III, verificando-se que a quase totalidade das variáveis surge associada a essa classe de qualidade.

Tabela 5.4 – AHB: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respetiva classe de qualidade do maciço rochoso

Classe RMR	Prcu	Prqd	Pesp	Ph2o	Pdes	Pcom	Pabe	Prug	Penc	Palt	Pori
I											
II						Pcomp:4	Pabe:5	Prug:6	Penc:6	Palt:6	Pori:-2
III	Prcu:12 Prcu:7	Prqd:20 Prqd:17	Pesp:10	Ph2o:15 Ph2o:10		Pcomp:2	Pabe:4	Prug:3	Penc:4 Penc:2	Palt:5	Pori:12
IV											
V											

Pela AFC verifica-se que a classe II ocorre quando a orientação das descontinuidades deixa de ser muito desfavorável em relação ao eixo do túnel, para passar a apresentar uma orientação favorável (Pori:-2) e quando as características das descontinuidades melhoram de qualidade (Pcom:4, Pabe:5, Prug:6, Penc:6 e Palt:6).

Enquadrando os resultados no risco de heterogeneidade do maciço, admite-se que o parâmetro da orientação não pode servir de indicador para antever a variação da respetiva qualidade, porque não é uma característica do maciço que varie progressivamente, isto porque a orientação das descontinuidades em relação ao eixo do túnel assume determinada posição, ou não assume. Assim, é necessário recorrer a uma das outras características das descontinuidades, considerando-se que nas situações onde se verifique alteração progressiva de um desses parâmetros, tal indicia o enquadramento do maciço noutra classe de qualidade.

5.2.4.2 Estimação da qualidade

O RMRobs e estimado pelas diferentes metodologias aplicadas mostram resultados muito semelhantes ao longo dos aproximadamente 450 m de escavação.

Embora a diferença entre os valores de RMR máximo e mínimo observados seja pequena verifica-se, na maioria das situações ao longo da escavação e como referido acima, uma variação muito ligeira na qualidade do maciço, de uma frente para a seguinte.

A estimação dos valores de RMR com recurso à krigagem, teve por base semivariogramas que revelam um valor médio de amplitude de 25 m, conforme se pode observar nos resultados estatísticos patentes no Apêndice IV. Este valor de amplitude excede o comprimento médio utilizado na estimação do valor de RMR para o avanço seguinte da escavação, que é de aproximadamente 3 m.

De modo semelhante ao constatado nos outros casos de estudo, analisando o resultado obtido pelas várias metodologias de estimação, representado na Figura 5.10, averigua-se que, embora o perfil deixado pelos valores de RMR estimados seja idêntico ao observado, habitualmente há um desfaseamento; significa isto que, só após verificar-se variação na qualidade do maciço rochoso é que as metodologias de estimação começam a refletir estas mudanças.

Com base na estatística descritiva do RMRobs *versus* o estimado pelas diferentes metodologias, incluída na Figura 5.11, os valores de RMR obtidos por um especialista (RMRexp) apresentam-se como a metodologia com valores mais próximos dos observados, encontrando-se no extremo oposto o RMR resultante da aplicação de regressão linear, particularmente a baseada nos últimos três avanços da escavação (RMRregr3), a que apresenta maior diferença em relação aos valores observados.

Verifica-se ainda que os valores resultantes da estimação baseada em regressão linear (RMRregr3, RMRregr5, RMRregr10) têm um intervalo de valores superior ao RMRobs, indicando que os resultados obtidos são sobrestimados nos casos de RMR elevado e subestimados nos casos de RMR baixo. Em sentido oposto encontram-se os valores estimados por krigagem (RMRkrig) e pelas redes neuronais (RMRrn).

Relativamente à determinação do valor de RMR por um especialista (RMRexp), constitui a metodologias que, do ponto de vista estatístico, apresenta maior semelhança com o RMRobs, salienta-se que, para os valores de RMR mais elevados, a estimação não acompanha os valores observados, o que indica subestimação para os valores mais elevados do índice.

As correlações entre os valores de RMRobs e os obtidos pelos vários métodos de estimação constam na Tabela A5.4 no Apêndice V. Regista-se um valor máximo de 0,62 no caso do RMRexp o que, comparativamente fica aquém das verificadas nos restantes de casos de estudo; com correlação próxima da máxima verificada, encontram-se os valores estimados por krigagem (RMRkrig).



Figura 5.10 – AHB: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação

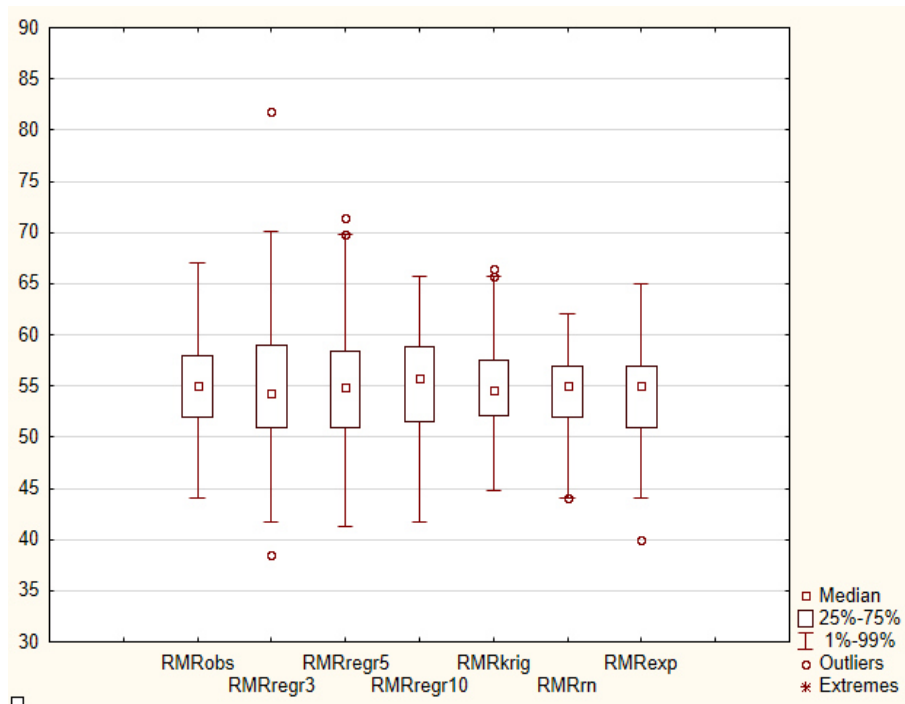


Figura 5.11 – AHB: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação

Perante os resultados verificados, na gestão do risco inerente à heterogeneidade do maciço e para as metodologias estudadas, a krigagem surge como mais adequada, embora se saiba que a sua eficácia é limitada, existindo um erro que seguidamente é avaliado.

Comparando as diferentes metodologias, as que apresentam maior correlação são a da krigagem (RMRkrig) e da abordagem do especialista (RMRexp), sendo a utilização de qualquer delas idênticas. Para observar o comportamento da correlação RMRobs com o estimado são apresentados no Apêndice VI, para cada metodologia, os respetivos gráficos, onde é possível averiguar uma grande concentração de valores de RMR, indicando a dispersão fraca da qualidade do maciço.

5.2.4.3 Erro na estimação da qualidade

Para este caso de estudo e conforme referido, a correlação entre o RMR estimado e o RMR observado é inferior ao dos restantes casos, pelo que importa analisar os erros inerentes a cada metodologia.

Verifica-se que, em termos médios, o erro é nulo e situa-se na maioria das situações em valores inferiores a ± 3 ; no entanto, também se constata a presença de situações com erro superior a ± 10 , como se pode ver na Figura 5.12.

A metodologia que apresenta menor erro na estimação é a resultante da análise expedita por um especialista (erro exp). Com resultados muito próximos dela, encontra-se o erro associado à estimação por krigagem (erro krig). Inversamente, a aplicação da regressão linear baseadas nos últimos três e dez avanços da escavação (erro regr3 e erro regr10) surge com erro maior associado.

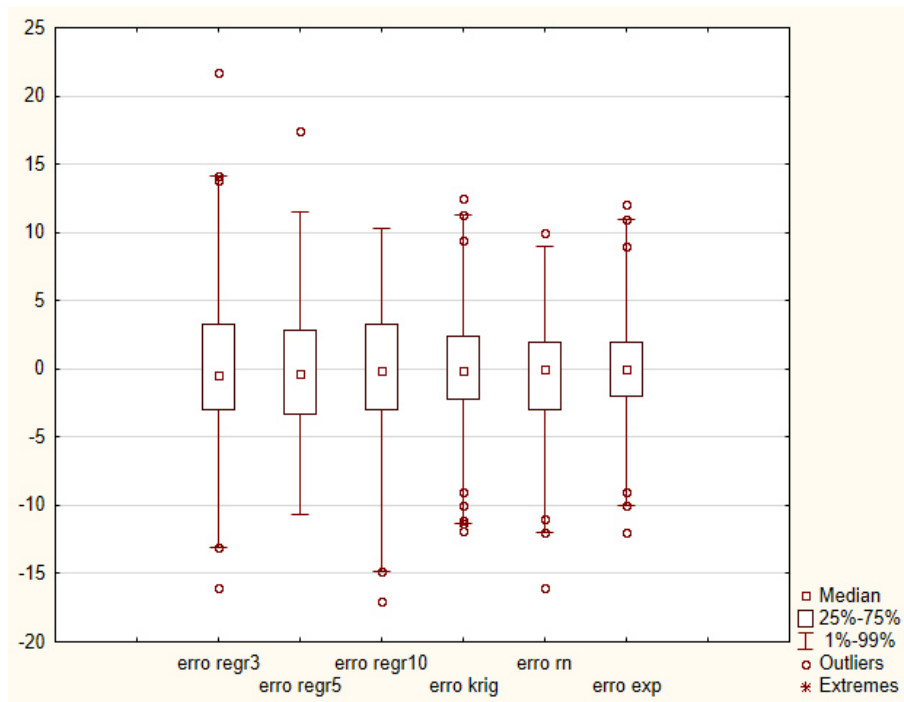


Figura 5.12 – AHB: gráfico do erro absoluto na estimação do índice de RMR

No Apêndice VII apresentam-se os gráficos com representação do erro em função do valor de RMRobs, onde se verifica que ele tende a ser positivo para valores de RMR baixos e negativo para valores de RMR elevados, conforme esperado e justificado nos casos anteriores.

No Apêndice VIII encontram-se os gráficos com os valores de erro ao longo do comprimento escavado. Embora a extensão dos túneis, neste caso de estudo, seja reduzida comparativamente com os dos restantes, não há diferenças significativas no valor do respetivo erro ao longo da escavação.

Na secção transversal dos túneis também não se traduzem diferenças significativas na dimensão do erro para qualquer uma das metodologias de estimação do valor de RMR; contudo, refira-se que apenas há duas galerias disponíveis para estudo com secção transversal diferente.

5.2.5 Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II

5.2.5.1 Parâmetros geotécnicos descritores da qualidade

Com base na AFC constante no Apêndice III e resumida na Tabela 5.5, a classe de qualidade mais fraca observada (classe IV) pode ser descrita pela presença de uma rocha de baixa resistência à compressão uniaxial (Prcu:4), RQD inferior a 50% (Prqd:8), ou ainda pela presença de descontinuidades próximas (Pesp:8). As restantes classes de qualidade do maciço podem ser descritas por um único parâmetro - as características das descontinuidades (Pdes). Sempre que elas variam (Pdes:10, Pdes:20 e Pdes:25), a qualidade do maciço (classe) também muda.

Tabela 5.5 – AHA: principais parâmetros responsáveis pelo enquadramento do índice RMR na respectiva classe de qualidade do maciço rochoso

Classe RMR	Prcu	Prqd	Pesp	Ph2o	Pdes	Pcom	Pabe	Prug	Penc	Palt	Pori
I					Pdes:25				Penc:6		
II	Prcu:12	Prqd:20			Pdes:20		Pabe:4	Prug:5	Penc:4	Palt:5	Pori:-5
III					Pdes:10	Pcomp:2 Pcomp:1 Pcomp:0		Prug:3		Palt:3	Pori:-10 Pori:12
IV	Prcu:4	Prqd:8	Pesp:8								
V											

Perante estes elementos, verifica-se que a qualidade do maciço neste caso pode ser definida apenas com base na variação de dois parâmetros: as características das descontinuidades (Pdes) para definição das classes I, II e II, e pela resistência à compressão uniaxial (Prcu), RQD (Prqd) ou espaçamentos entre descontinuidades (Pesp) em alternativa; ou seja, caso se verifique ao longo do acompanhamento da escavação a alteração destes parâmetros, se estes ocorrerem de modo progressivo, servem de indicador em antecipação da variação da classe de qualidade do maciço.

5.2.5.2 Estimação da qualidade

Como se pode observar na Figura 5.13, os diferentes métodos de estimação do valor de RMR registam valores semelhantes ao RMRobs.

Os semivariogramas na base da estimação com recurso a krigagem revelam um valor médio de amplitude de 30 m para este caso de estudo (Apêndice IV).

Considerando o valor de RMRobs ao longo da escavação e comparando com o estimado pelas diferentes metodologias identifica-se que os valores estimados ultrapassam os limites dos observados em diversas situações, particularmente quando se verifica a inversão de tendência dos observados.

De modo semelhante ao verificado nos restantes casos de estudo, no AHA e ao longo do túnel, os valores de RMR estimado revelam desfasamento com os observados e um atraso na revelação da variação da qualidade do maciço pelas metodologias de estimação.

As várias metodologias de estimação apresentam resultados estatísticos dos valores de RMR próximos dos observados (RMRobs), mas também semelhantes entre si. A média dos resultados obtidos é igualmente próxima entre as metodologias utilizadas e idênticas à observada no terreno - Figura 5.14.

Verifica-se que o método de estimação que apresenta, em termos estatísticos, valores mais próximos dos observados (RMRobs), é a krigagem (RMRkrig), pelo que deve ser uma das metodologias seleccionadas para análise do risco de heterogeneidade do maciço.

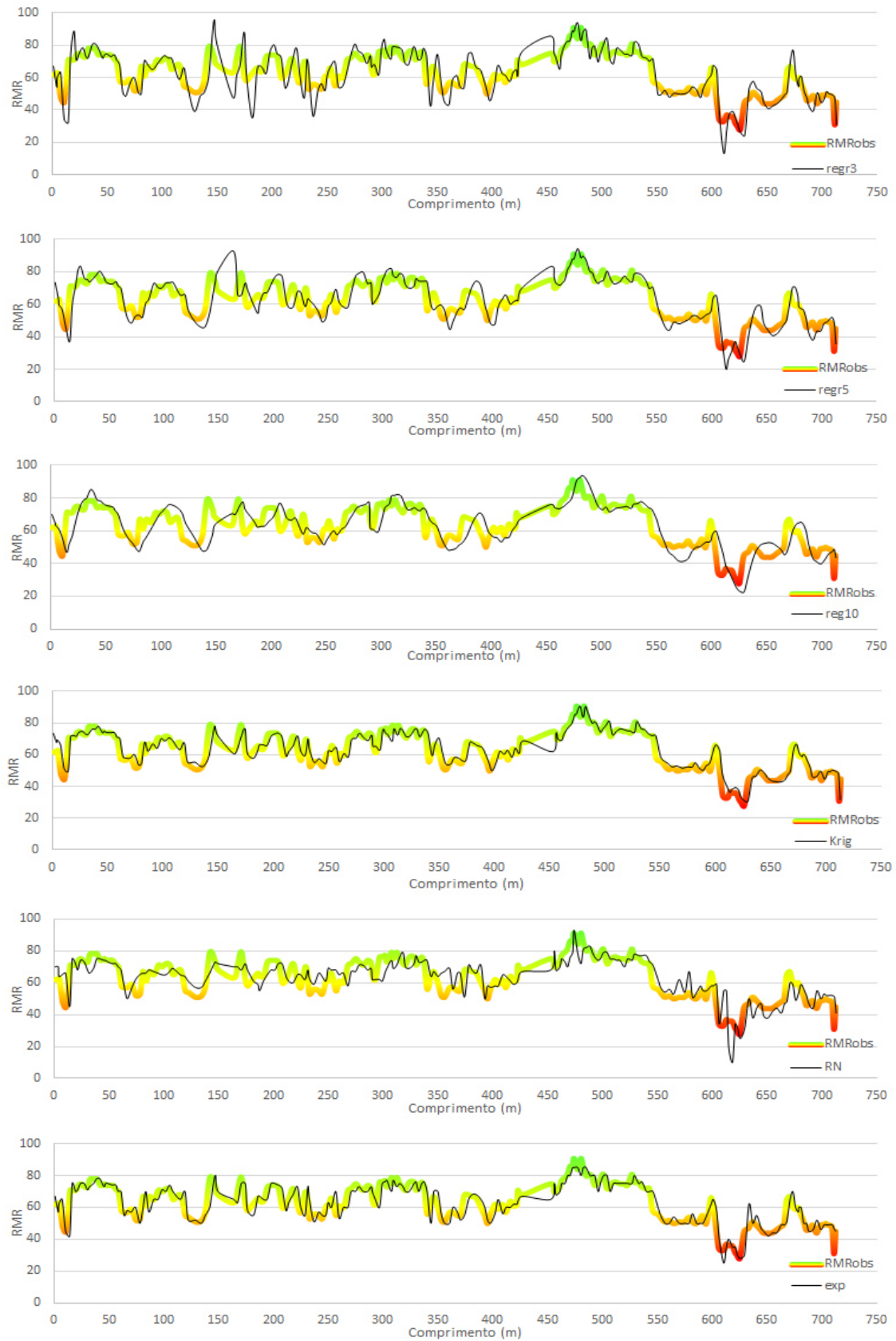


Figura 5.13 – AHA: gráficos do RMR observado e estimado em avanço, pelos diferentes métodos ao longo da escavação

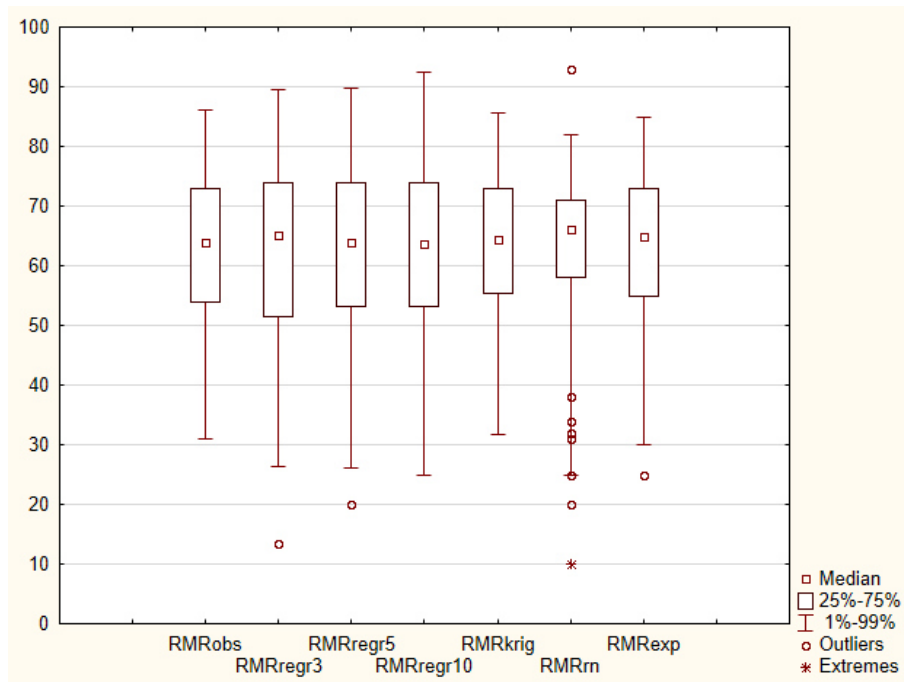


Figura 5.14 – AHA: gráfico dos resultados observados e estimados dos valores de RMR ao longo da escavação

Verifica-se ainda que os valores resultantes da estimação baseada na regressão linear (RMRregr3, RMRregr5 e RMRregr10) têm um intervalo de valores superior ao observado, indicando que os resultados obtidos estão sobrestimados nos casos de classe de qualidade elevada e subestimados nos casos inversos. Em sentido oposto funcionam os valores estimados por krigagem (RMRkrig) e pelas redes neuronais (RMRrn).

Correlacionando os valores de RMR obtidos pelos vários métodos de estimação com os observados e entre si, constata-se para todos eles, valores elevados, chegando a 0,88, como se pode ver na Figura A5.5 no Apêndice V.

Essas correlações indicam que os valores de RMR obtidos pelas metodologias de krigagem (RMRkrig) e pelo especialista (RMRexp) são os que ficam mais próximos dos observados (RMRobs); inversamente, os resultados obtidos pelas redes neuronais (RMRrn) são os que têm menor correlação com o RMRobs.

Comparando entre as diferentes metodologias, a krigagem (RMRkrig) e a abordagem pelo especialista (RMRexp) apresentam afinidade significativa, indicando que a utilização de qualquer uma delas é idêntica.

Para observar o comportamento da correlação dos valores estimados com os valores observados, apresenta-se no Apêndice VI, para cada metodologia, os respectivos gráficos, cuja análise regista uma concentração significativa de valores, identificando-se fraca dispersão de resultados.

Observa-se ainda uma maior variação de valores estimados próximo de valores de RMR correspondentes à classe III ($40 < \text{RMR} < 60$), que também se aproxima da média RMRobs; contudo, é também junto a este intervalo que se concentra a maioria dos valores disponíveis. Para a extremidade

de valores de RMRobs próximos dos limites, quer superior, quer inferior da escala de RMR, a dispersão dos valores estimados é menor que os anteriormente referidos.

5.2.5.3 Erro na estimação da qualidade

Na estimação da qualidade do maciço em avanço utilizaram-se também as diferentes metodologias já referidas e, conforme foi analisado, apresentam correlações elevadas com o RMRobs; no entanto existe um erro associado à estimação dos valores.

Na Figura 5.15 apresentam-se os resultados do erro absoluto calculado para cada um dos métodos de estimação utilizados, onde se regista na generalidade um erro médio próximo de zero, mas com valores de desvio padrão próximos de 5.

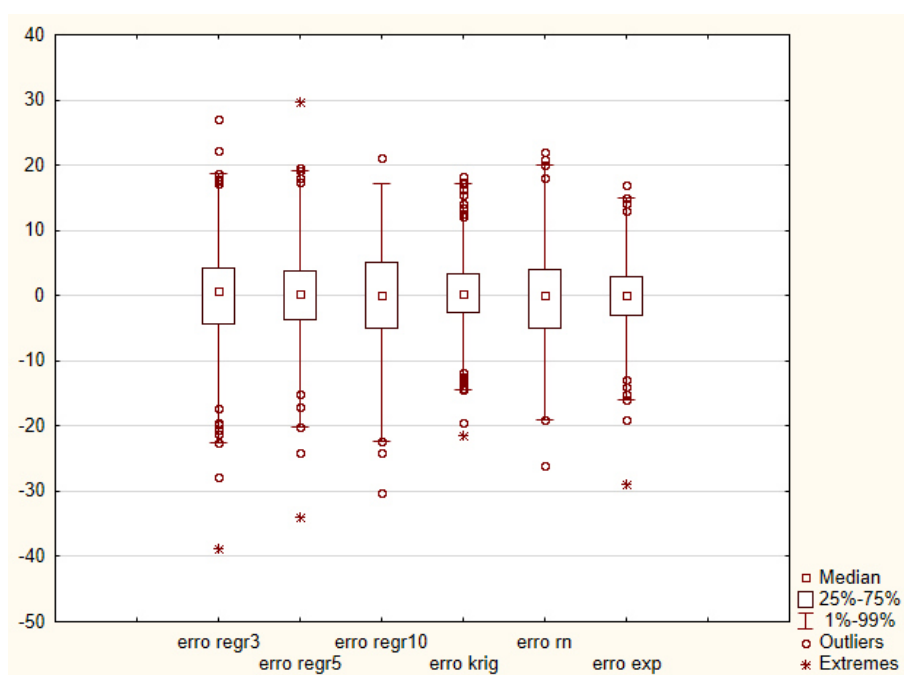


Figura 5.15 – AHA: gráfico dos erros absolutos na estimação do índice de RMR

Neste caso de estudo e de entre as metodologias para estimação usadas, a que assume menor erro é a krigagem (erro krig) e a abordagem pelo especialista (erro exp). Com maior erro associado à estimação encontra-se a metodologia de regressão linear baseada nos últimos três avanços (erro regr3). A projeção do erro em função do RMRobs encontra-se no Apêndice VII e mostra que, para valores baixos de RMR, o erro tende a ser positivo e, inversamente para valores de RMR mais elevados. Esta situação é esperada conforme já referido nos casos anteriormente discutidos.

No Apêndice VIII encontram-se os gráficos com os valores de erro ao longo do comprimento da escavação, dos quais se constata que não existem diferenças significativas, nem uma associação clara entre a localização da frente de escavação e o erro obtido na estimação do valor de RMR, uma vez que a distribuição dos valores é homogénea.

Os dados constantes nesses gráficos (Apêndice VIII) permitem ainda analisar o valor do erro relativamente à dimensão da secção transversal das galerias, verificando-se que permanece sem alteração significativa em túneis de diferente dimensão transversal.

5.2.6 Síntese da deteção de riscos potenciais

O risco de heterogeneidade do maciço a escavar ou da variação da sua qualidade para a abertura de túneis é importante para o sucesso da construção. Resumidamente, nesta investigação, avaliou-se a heterogeneidade do maciço pela:

- Variação do valor de RMR ao longo da escavação de túneis;
- Capacidade de determinar essa variação em antecipação, a qual foi limitada a métodos de estimação e ao erro associado.

A caracterização realizada para o maciço rochoso, em cada um dos cinco casos de estudo considerados (Capítulo 4), permite verificar a heterogeneidade dos mesmos, bem como as semelhanças e as diferenças entre si, em particular, porque alguns deles se inserem em contextos geológicos diferentes. Na Tabela 5.6 apresenta-se um resumo das principais características presentes em cada caso de estudo, que resultam de informação constante nos Capítulos 4 e 5, e Apêndices III a VIII.

Tabela 5.6 – Principais características do maciço rochoso nos casos de estudo em análise

Caso de estudo	AHVNII		AHVNIII		AHP		AHB		AHA	
Litologia principal	Granito		Granito		Granito		Granito gnaissico migmatito		Xistos e filitos	
RMR										
Médio	62		63		65		55		64	
Mínimo	17		13		33		44		28	
Máximo	88		95		91		67		91	
Parâmetros descritores das classes de qualidade	Pdes (Palt)		Prqd + Pesp		Pdes		Pdes / Pori		Pdes + Prcu / Prqd / Pesp	
Metodologias de estimação mais eficientes / correlação	Exp 0,81	Krig 0,81	Krig 0,90	Exp 0,90	Krig 0,88	Regr5 0,85	Exp 0,62	Krig 0,61	Krig 0,88	Exp 0,88
Erro na estimação	Exp 0,15	Krig -0,04	Krig -0,08	Exp -0,11	Krig 0,22	Regr5 -0,02	Exp -0,37	Krig -0,14	Krig 0,31	Exp -0,24
Desvio Padrão	8,89	8,76	6,46	6,69	5,55	6,78	4,37	4,28	6,02	6,16

Os diferentes casos de estudo têm em comum um valor de RMR médio semelhante, com exceção do AHB, que é mais baixo. O intervalo de valores de RMRobs é também idêntico, embora nos casos do AHVNII e AHVNIII o mínimo observado é inferior aos dos restantes, e no caso do AHB a diferença entre o RMR máximo e mínimo é menor que nos restantes casos de estudo.

No que se refere aos parâmetros descritores da qualidade do maciço e o respetivo enquadramento nas diferentes classes do maciço, verifica-se que as características das descontinuidades (Pdes) são comuns a quase todos os casos, com exceção do AHVNIII; ou seja, em quase todos os casos apenas uma característica é suficiente para enquadrar o maciço nas diferentes classes de qualidade. Caso a variação desta característica ocorra de modo progressivo ao longo do túnel, é possível antever a alteração da qualidade do maciço.

As metodologias que apresentam maior correlação e menor erro na estimação do RMR são a krigagem (krig) e a análise expedita por um especialista (exp); no entanto, apenas a krigagem é comum a todos os casos de estudo; uma vez que no caso do AHP, o especialista não surge como nenhuma das duas mais eficientes, possivelmente porque a variação do valor de RMR neste caso se dava de forma abrupta e estabilizava, não seguindo a tendência; os modelos matemáticos, conforme verificado, têm uma resposta mais lenta nas situações de variação abrupta, mas como de imediato há uma estabilização da qualidade, acabam por apresentar menor erro comparativamente com o especialista, que assume imediata variação com continuação de tendência. Ainda neste domínio, no caso do AHB, a correlação verificada entre o RMRobs e o resultante da estimação mais eficaz, é inferior ao verificado para os restantes casos.

Perante as diferenças litológicas e geomecânicas entre granitos, migmatitos e xistos, seria expectável que as diferenças mais significativas se verificassem entre os granitos e os xistos; contudo e pelos resultados obtidos, o caso de estudo em maciço xistento (AHA) apresenta grande proximidade de resultados com os outros em maciços graníticos (AHVNII, AHVNIII e AHP).

O caso de estudo AHB, que contempla o maciço gnaissico e migmatítico, é o que se diferencia dos restantes; contudo, como se trata de apenas um caso de estudo e de pequena extensão, não é possível fazer extrapolações ou generalizações no que se refere a maciços gnaissicos e migmatíticos serem diferentes dos restantes.

Nos casos estudados o erro não é influenciado pelo comprimento da escavação, nem pela dimensão da secção transversal.

Tendo em consideração o desenvolvimento da metodologia para aplicação na gestão de risco no trecho a escavar importa analisar, no contexto global a influência deste caso que difere dos restantes no contexto global pelo que, seguidamente verificam-se os resultados:

- i. Considerando todas as informações
- ii. Excluindo o caso de estudo do AHB

Esta verificação é realizada no respeitante a:

- Estatística descritiva dos valores de RMR (constante do Capítulo 4);
- Enquadramento nas diferentes classes de qualidade do maciço;

- Eficiência da estimação da qualidade do terreno em avanço pelo método com melhores resultados, que conforme referido acima corresponde à krigagem.

Como se pode observar na Figura 5.16, a diferença na estatística descritiva do valor de RMR, entre incluir ou excluir o caso de estudo do AHB é mínima, apresentando em todos os casos analisados valores muito próximos.

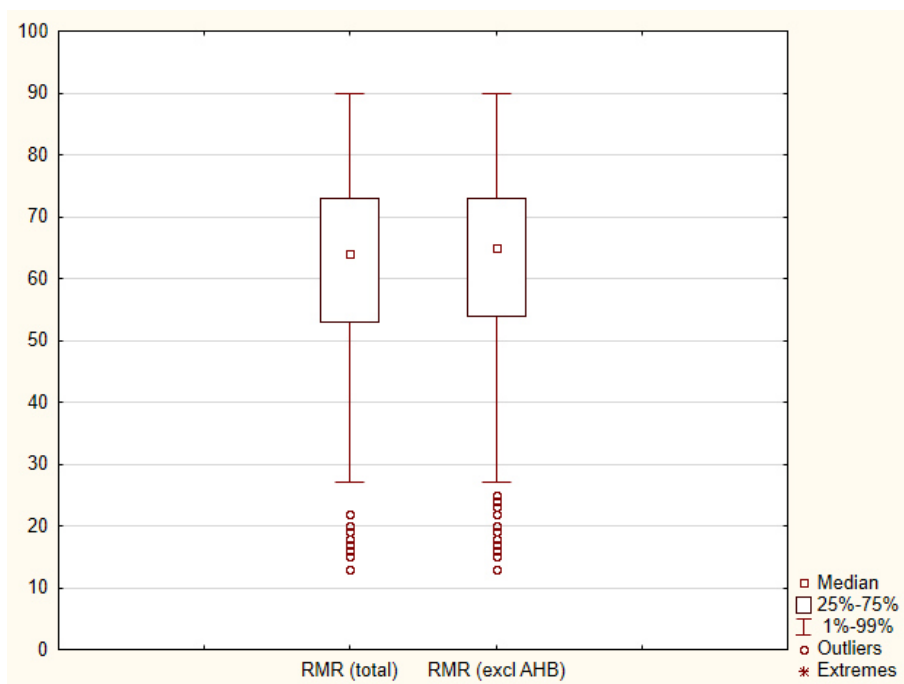


Figura 5.16 – Gráfico com os resultados dos valores de RMR considerando a totalidade dos casos de estudo e excluindo o AHB

Perante os resultados idênticos relativamente ao RMR, considerando ou excluindo o caso AHB, a ocorrência de cada uma das classes de qualidade do maciço conforme definidas por Bieniawski (1989) também é idêntica, mantendo ou excluído o AHB - Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Percentagem de cada classe de qualidade do maciço

Classe RMR	% em todos casos de estudo	% em todos os casos de estudo excluído o AHB
I	8,1	8,4
II	49,9	51,1
III	35,0	33,2
IV	6,6	6,8
V	0,4	0,5

Conforme se observa na Figura 5.17, a correlação entre os valores de RMR estimados por krigagem e os observados, é idêntica caso se considere, ou não, a inclusão dos dados relativos ao caso do AHB.

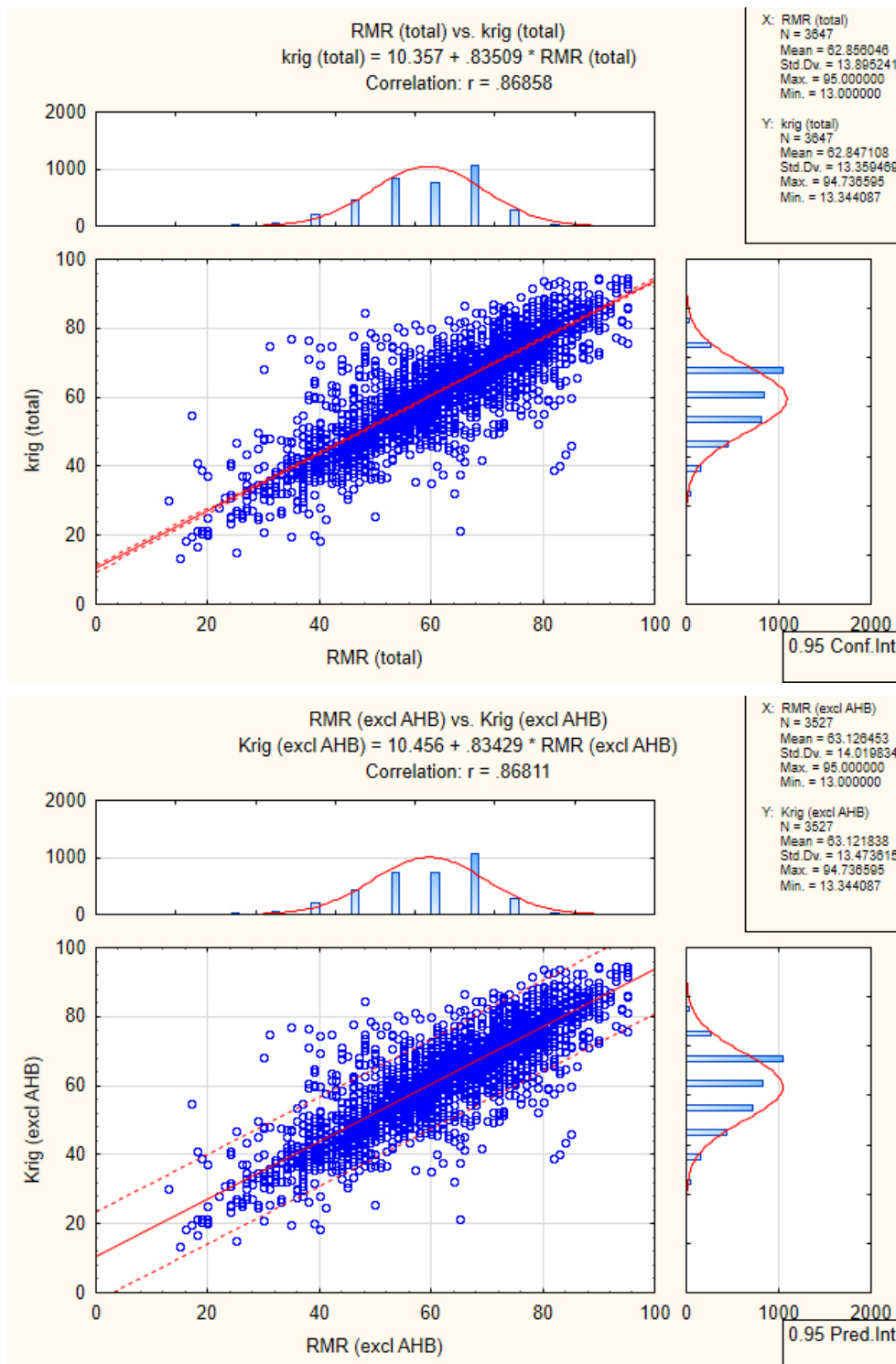


Figura 5.17 – Gráficos com a correlação entre RMRobs e RMRkrig considerando a totalidade dos casos de estudo ou excluindo o AHB

A exclusão do caso de estudo do AHB, apesar de apresentar por si só resultados diferentes dos restantes, quando incluído na análise global de todos os casos de estudo, não reflete diferenças significativas. Deste modo, ele continua a ser considerado ao longo desta investigação.

5.3 FRENTE DE ESCAVAÇÃO

Para uma gestão de riscos eficiente na frente de escavação é necessário desenvolver e aplicar um conjunto de conceitos técnicos que permitam a identificação específica de situações de risco, isto porque os procedimentos construtivos a implementar nas frentes de escavação vão muito além dos habitualmente referidos, de modo simplificado, nos ciclos de escavação, e que foram já abordados nas Secções 2.4.2 a 2.4.6.

Para além da determinação da qualidade do maciço recorrendo a classificações geomecânicas, é necessário identificar a eventual presença de mecanismos potenciadores de instabilidade, como sejam a afluência de água, modos de rotura do maciço e respetiva localização precisa nas superfícies escavadas.

Este tipo de identificação permite implementar medidas que, realizadas atempadamente, resultam na garantia de estabilização, como sejam desenvolver saneamentos eficientes, aplicar a contenção estritamente necessária à devida contenção do maciço e dentro do tempo em que esse maciço é autoportante.

Seguidamente, analisam-se os diferentes casos de estudo no sentido de validar a deteção dos riscos potenciais presentes na frente de escavação.

5.3.1 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II

Os procedimentos implementados nas frentes de escavação passaram pela realização de duas classificações geomecânicas diferentes, sendo adotadas as de Bieniawski (1989) e Barton *et al.* (1974). A identificação da afluência de água ao interior da escavação era realizada de modo expedito para a maioria das situações, com base na observação direta.

No AHVNII, a caracterização do maciço rochoso ocorrente contava com o levantamento das características das discontinuidades, de entre as quais a orientação era utilizada para avaliar a possibilidade de ocorrência de blocos e/ou cunhas suscetíveis de se destacarem da periferia da escavação.

Para além desse exercício, na frente de escavação eram identificadas as situações onde a presença de discontinuidades pudesse originar fenómenos de instabilidade potencial.

Após estes levantamentos geológicos e geotécnicos, era necessário dar sequência às observações e implementar o saneamento dos blocos e cunhas potencialmente instáveis ou, na impossibilidade da sua remoção, aplicar medidas de contenção, principalmente constituídas por pregagens e, às vezes, betão projetado.

Os resultados das classificações geomecânicas, para além de identificarem a qualidade do maciço para a abertura de túneis permitiam ainda, determinar o tempo autoportante do maciço, período durante o qual a contenção tem de ser aplicada para a devida estabilização.

Na aplicação da contenção era garantido que todos os intervenientes estivessem informados da situação geotécnica presente e os equipamentos operacionais para executar os trabalhos necessários. Às vezes ocorria falha de meios humanos, pelo que se tornava necessário ter mais que uma pessoa formada e familiarizada com a utilização dos equipamentos, assim como ter em obra equipamentos de reserva que permitissem a substituição, em caso de avarias.

5.3.2 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III

Este caso de estudo foi ulterior ao anterior descrito, mas em termos gerais, as linhas orientadoras da caracterização geológica e geotécnica a implementar da fase de obra foram idênticas.

No entanto e como referido previamente, com a presença do empreendimento anterior levou a considerar um risco adicional de afluência de água proveniente do primeiro, que colocasse em causa a estabilidade dos novos túneis. Para controlar essa situação, foram implementadas medidas de monitorização da quantidade de água afluyente e os respetivos parâmetros físico-químicos.

Para o restante acompanhamento técnico, todas as superfícies escavadas foram alvo de realização de cartografia geológica e caracterização geotécnica, onde se incluía a aplicação das classificações geomecânicas segundo Bieniawski (1989) e Barton *et al.* (1974).

O registo fotográfico, quer de situações gerais da escavação, quer de situações de pormenor, passou a ser requerido de modo sistemático em cada avanço da escavação.

Tendo em vista a determinação da existência de blocos ou cunhas na superfície de escavação, era realizado o levantamento e análise das descontinuidades, que contava com registo de várias características, nomeadamente: atitude, persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e estado de alteração.

Com base na atitude das descontinuidades era de imediato identificado, na frente de escavação, a presença de blocos e cunhas potenciais; ulteriormente, em gabinete, era realizada a projeção estereográfica dessas descontinuidades para uma análise mais rigorosa.

Posteriormente a estes levantamentos geológicos e geotécnicos, era necessário dar sequência às análises decorrentes das inspeções visuais e implementar o saneamento dos blocos e cunhas instáveis ou, na impossibilidade, aplicar medidas para a respetiva contenção.

Tendo como base a qualidade do maciço para a escavação subterrânea foi possível determinar, de modo expedito, o intervalo de tempo em que se admitia que o maciço fosse autoportante.

Toda a informação e análises decorrentes da caracterização das frentes de escavação, como fossem a qualidade do terreno, a presença de blocos e cunhas potencialmente instáveis e o tempo autoportante para o maciço, eram transmitidas com a máxima brevidade aos responsáveis pela execução.

Conforme verificado no caso de estudo anterior, a presença em obra de meios, quer humanos, quer de equipamentos de reserva foi fundamental para a devida aplicação de contenção dentro do tempo que as características do maciço rochoso permitissem.

5.3.3 Aproveitamento hidroelétrico de Picote II

Os procedimentos de acompanhamento geológico e geotécnico da escavação para este caso de estudo eram idênticos aos implementados nos casos de estudo anteriores.

Neste caso, também foram aplicadas as classificações geomecânicas segundo Bieniawski (1989) e Barton *et al.* (1974) ao maciço presente em cada um dos avanços da escavação.

A afluência de água ao interior da escavação, nos casos de um ponto isolado com débito de volume considerável, era medida com recurso a recipientes aferidos; nos casos de afluência dispersa e de pequeno volume, de modo expedito, pelo encaminhamento de vários pontos para um único tanque com secção de vazão de área conhecida.

A caracterização do maciço rochoso ocorrente contava com o levantamento das características das descontinuidades, de entre as quais a atitude era utilizada para avaliar a possibilidade de ocorrência de blocos e/ou cunhas suscetíveis de se destacarem da periferia da escavação.

Pela análise cinemática da atitude das descontinuidades em relação ao eixo do túnel, era possível identificar e localizar blocos e cunhas potencialmente instabilizadas.

Na posse desta informação, era avaliada a situação no sentido de implementar as medidas mais adequadas à sua estabilização, que passavam pela retirada ou aplicação de contenção e transmissão dessa informação aos responsáveis pela execução para que fosse efetivada.

A presença de meios adequados para realizar os trabalhos de saneamento e contenção, garantindo a sua substituição em caso de falta ou avaria, era fundamental para garantir os procedimentos dentro do tempo que as condições geotécnicas o permitissem.

5.3.4 Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II

A construção do AHB desenvolveu-se, aproximadamente, na mesma altura temporal do AHP, pelo que as metodologias utilizadas para o acompanhamento geológico e geotécnico foram semelhantes.

Acresce que a afluência de água ao interior da escavação era quantificada sempre que se justificasse, o que normalmente correspondia a afluências pontuais em regime escorrente, ignorando-se as situações de gotejamento esporádico, por apresentarem pouca relevância para a estabilidade da escavação.

O levantamento das descontinuidades presentes nas superfícies escavadas contemplava várias características, nomeadamente a atitude, persistência, abertura, rugosidade, material de preenchimento e estado de alteração. Analisando a conjugação da atitude das descontinuidades com a orientação das

galerias foi possível determinar a presença de blocos e cunhas suscetíveis de se destacarem da superfície da escavação.

Para além de verificar a possibilidade de ocorrerem blocos ou cunhas na frente de escavação era necessário identificar a respetiva localização precisa, para que pudessem ser removidos ou contidos de forma eficiente.

Tendo em consideração a secção transversal da galeria e a qualidade do maciço determinado pelo valor resultante das classificações geomecânicas, estimava-se o tempo em que o maciço era autoportante.

A transmissão de todos os elementos de caracterização geotécnica aos responsáveis pela execução era fundamental para que todos os trabalhos de saneamento e contenção fossem realizados dentro do tempo que as condicionantes geotécnicas do maciço rochoso permitissem.

5.3.5 Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II

Neste caso de estudo, embora localizado num contexto geológico muito diferente dos anteriores, com a presença de formações xistentas, os principais riscos envolvidos na frente de escavação continuam a ser os mesmos, nomeadamente o destaque de blocos e cunhas da periferia da escavação e o colapso generalizado.

As metodologias utilizadas para a deteção destas situações eram semelhantes às utilizadas nos restantes casos de estudo, passando pela caracterização geológica e geotécnica, com classificação geomecânica do maciço rochoso por dois processos diferentes, tendo sido utilizados os de Bieniawski (1989) e Barton *et al.* (1974), com respetivo cálculo do RMR e Q.

A afluência de água ao interior da escavação era quantificada sempre que se justificasse, o que normalmente correspondia a afluências pontuais em regime escorrente, ignorando-se as afluências gotejantes por serem pouco significativas.

A caracterização das discontinuidades com medição da atitude permitia conjugar as orientações com a dos túneis e analisar a possibilidade de ocorrência de blocos e cunhas na periferia da escavação. Após essa análise era necessário identificar, no novo trecho escavado, a presença dessas situações e verificar se a solução passava pelo respetivo saneamento ou contenção.

Para analisar a possibilidade de colapso da escavação, para além do exercício referido anteriormente para avaliar a eventualidade de destaque de blocos e cunhas, que conforme já referido, numa situação extrema pode levar ao colapso de toda a galeria, era necessário ainda determinar o tempo autoportante do maciço, para que a contenção fosse aplicada dentro desse intervalo de tempo.

Conforme referido para os casos de estudo anteriores, a transmissão atempada de toda a informação, aos responsáveis pela execução era importante para que os riscos pudessem ser eliminados ou mitigados.

5.3.6 Síntese da detecção de riscos potenciais

Os procedimentos implementados na frente de escavação, às vezes por imposição dos cadernos de encargos, ou por ser habitual em todas as obras, encerram a identificação e análise de riscos, no caso, tratados de forma expedita, sem a integração numa gestão de riscos.

A verificação da qualidade do maciço, é realizada habitualmente recorrendo a classificações empíricas, como sejam a de Bieniawski (1989) e Barton *et al.* (1974), que embora a recolha de dados para servir de base a essas classificações respeite metodologias comprovadas, há possibilidade de existir erro, quer resultante do empirismo das classificações, quer na recolha dos elementos, pelo que há um risco de erro na classificação do maciço, com as consequências associadas da contenção aplicada ser desadequada para o maciço presente, que no limite pode levar ao colapso da escavação, colocando em causa a integridade física de pessoas e equipamentos e inerente desperdício de tempo e de custos na retificação da situação.

A afluência excessiva de água ao interior da escavação implica o risco de instabilidade na escavação e de utilização eventual de equipamentos para a bombear das frentes de trabalho, no caso de escavações com pendor descendente. Isto tem consequências de custos acrescidos e eventual paragem das frentes de trabalho por inundação. Perante este cenário é habitual proceder à monitorização da afluência de água durante a fase construtiva.

Em maciços rochosos, o estado de fraturação e características das discontinuidades são dos elementos habitualmente considerados nos levantamentos para acompanhamento da escavação, porque permitem identificar o risco da presença de blocos e cunhas potencialmente instáveis, podendo a queda de material afetar a integridade física de pessoas e equipamentos.

Para analisar o risco de instabilidade, com eventual colapso da escavação, para além da identificação de possibilidade de destaque de blocos e cunhas, era necessário ainda determinar o tempo autoportante do maciço, o qual é obtido de modo empírico pelo ábaco da Figura 2.22, sendo que na gestão de risco é necessário verificar se a contenção preconizada em projeto é integralmente aplicada dentro desse tempo.

Resumindo mais uma vez, para esta etapa da construção de túneis, foram detetados os seguintes riscos potenciais:

- i. Falha de caracterização do maciço rochoso;
- ii. Falha na utilização da classificação do maciço;
- iii. Ausência de verificação e/ou monitorização da afluência de água ao interior da escavação e sua influência na estabilidade da escavação e dimensionamento da bombagem;
- iv. Falha na identificação de blocos ou cunhas instáveis;
- v. Falha na determinação do tempo autoportante do maciço com garantia de aplicação da contenção neste intervalo.

5.4 TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO

Os procedimentos adotados para o trecho de túnel escavado resumem-se à verificação e garantia das condições de estabilidade.

Nesta situação da fase construtiva, importa implementar medidas para detecção efetiva desse risco e ter disponíveis metodologias de análise que permitam a distinção entre ocorrências toleráveis e intoleráveis.

A monitorização das deformações do maciço, ou do conjunto constituído pela contenção aplicada e maciço, é um dos métodos que pode ser utilizado para uma detecção atempada de fenómenos de instabilidade.

O enquadramento do valor de deformação observado, quer em limites estipulados no projeto como expectáveis, resultantes dos modelos teóricos, quer em valores habitualmente obtidos em obras realizadas em cenários semelhantes é importante; no entanto, é sempre necessário ter em consideração que cada caso é específico, pelo que os valores pré-definidos podem ser falíveis. Para além da análise da deformação máxima registada, importa verificar a taxa de evolução e sua variação, isto porque uma taxa de evolução elevada pode levar a ultrapassar a deformação máxima admissível num curto período.

A detecção de situações de aumento da taxa de evolução é relevante, uma vez que indicam potenciais cenários intoleráveis para a estabilidade das escavações.

Contudo, por definição e conforme abordado na Secção 2.4.5 e 3.1.4, a observação de estruturas recorrendo a instrumentos para monitorizar as deformações dos túneis são pontuais e, depois, são complementados por inspeções visuais e extrapolados para condições geotécnicas semelhantes nas imediações dos pontos de observação.

Perante este cenário, para além dessa monitorização é necessário a implementação de metodologias mais abrangentes da globalidade da escavação. Uma dessas metodologias é a inspeção visual, embora seja expedita e sujeita a variados erros de operador, referindo-se a título de exemplo a experiência, dedicação e concentração na altura de a realizar.

As inspeções visuais podem ser registadas em listas, cartografadas e/ou registadas fotograficamente ou em vídeo; contudo, há uma parte do registo que fica na memória do operador porque dependem da sensibilidade de perceção das situações e da sua análise na identificação; isto, não é possível registar em boletins, sendo por isso, muito difícil transmitir a outros técnicos que ulteriormente venham a realizar inspeções no mesmo local.

Nas secções seguintes apresentam-se algumas situações identificadas em cada um dos casos de estudo, primeiro, as deformações máximas acumuladas em cada secção de convergências, representadas em função da qualidade do maciço e dimensão da secção transversal e, depois, alguns exemplos selecionados como representativos de três situações genéricas que decorrem da monitorização das deformações do maciço, são elas:

- Ausência de deformações, que são indicadoras de estabilidade potencial;
- Deformações a taxa de evolução constante indicadoras de potencial instabilidade;
- Deformações com aumento da taxa de evolução indicadora de instabilidade.

5.4.1 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II

As inspeções visuais realizadas não se encontram registadas, no entanto as mais gravosas estão na memória dos técnicos que acompanharam a obra. Sendo o autor desta dissertação um deles, assim como outro colega de profissão, em alguns casos foi possível recuperá-las para as contemplar nesta investigação.

As situações mais referidas eram relativas à queda de alguns blocos de rocha em zonas geotécnicas representativas da boa qualidade do maciço, onde a contenção aplicada era reduzida. A deteção de situações recorrendo a inspeções visuais era quase impossível devido à dimensão grande de alguns dos túneis (Tabela 4.18) e à falta de meios humanos para a sua realização. Eram quedas isoladas de blocos que, por serem pontuais, não foram objeto de instalação de dispositivos de observação que permitisse a sua ulterior monitorização e para os quais a deteção por instrumentos colocados na zona envolvente também se revelaria ineficaz.

Na Figura 5.18 constam as deformações observadas em 164 secções de convergência, em função da qualidade do maciço interessado. Verifica-se que, para razões elevadas entre a qualidade do maciço e a área da secção de escavação, existe grande dispersão na deformação do maciço, com valores muito baixos a mais elevados; enquanto para razões mais baixas entre a qualidade do maciço e a área da secção de escavação, os valores de deformação tendem a ser mais elevados. No fundo, este comportamento é expectável, uma vez que, levando o raciocínio ao absurdo, um túnel de grande diâmetro que atravessa terrenos de qualidade geotécnica baixa, representaria maior possibilidade de sofrer maior deformação.

Para este caso de estudo verificou-se que, em 12 situações, a deformação observada excedia o valor de 5mm, admitido como alerta, o que corresponde a 7 % dos casos observados.

No AHVNII foi possível identificar todas as situações genéricas de comportamento do maciço, desde as secções de convergência estabilizadas, onde nunca se observou qualquer deformação ao longo do tempo - Figura 5.19; a situações de evolução a taxa constante - Figura 5.20; e casos considerados mais gravosos, porque podiam implicar, num curto intervalo de tempo, o colapso da escavação, onde se verificasse a aceleração daquela taxa - Figura 5.21.

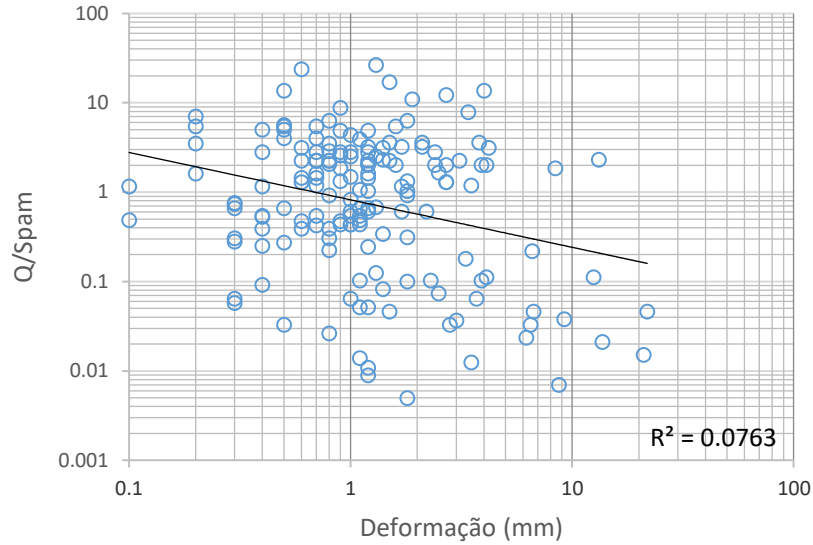


Figura 5.18 – AHVNII: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação

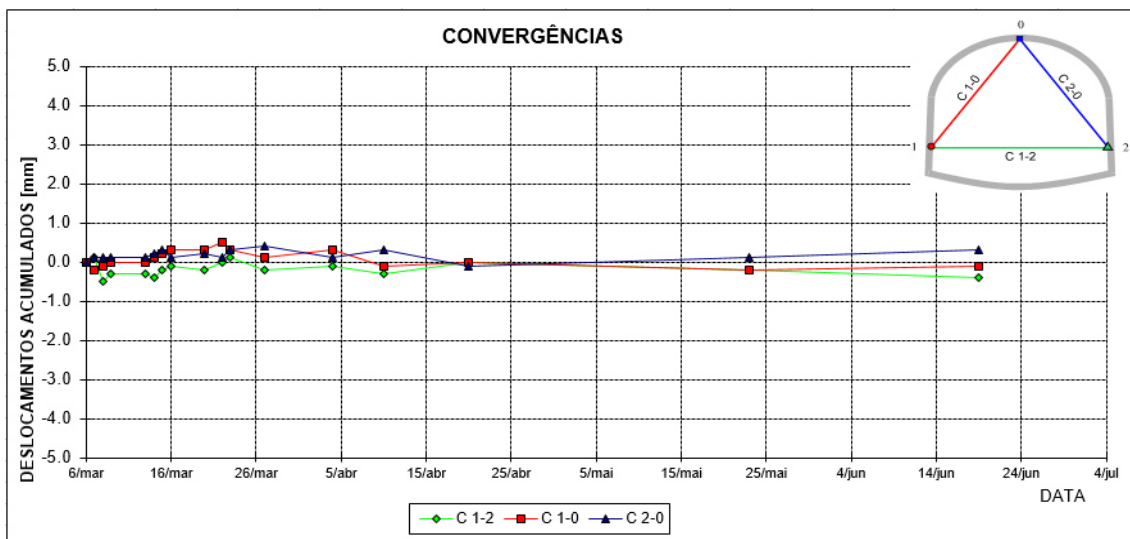


Figura 5.19 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação

A Figura 5.20 mostra um comportamento do maciço resultante de uma deformação a taxa constante, o que pode ser originado por um comportamento plástico à aplicação de contenção insuficiente que compense a descompressão do maciço, ou seja, pela acomodação do terreno às novas condições de tensão infligidas pela abertura de um espaço vazio no seu seio. O risco de instabilização encontra-se presente e pode haver necessidade de intervenção, a qualquer instante, para impedir maior deformação.

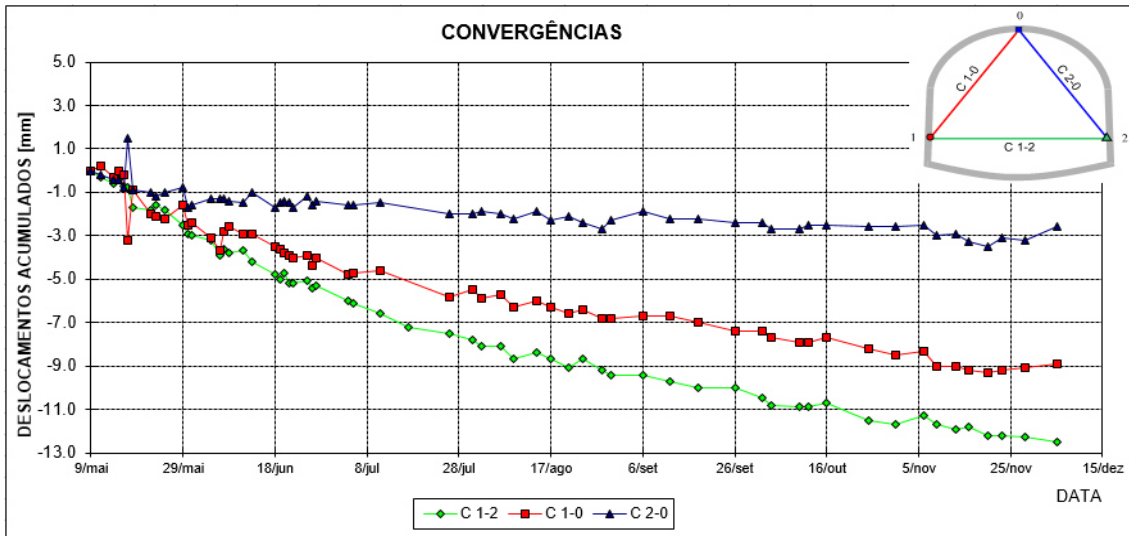


Figura 5.20 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante

A situação contemplada na Figura 5.21 é a mais gravosa em termos de risco, uma vez que, a deformação excessiva, para além de um ponto em que não há diminuição da taxa de evolução, pode indiciar uma rotura imediata do maciço. Nestes casos devem estar preparados os meios para uma intervenção no sentido de aplicar contenção, ou do seu reforço caso já exista.

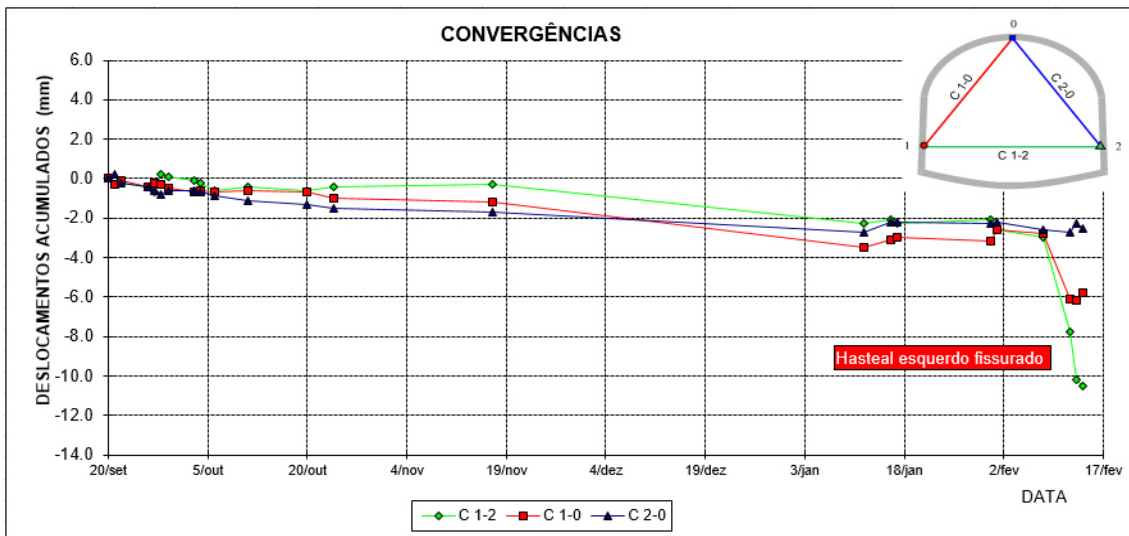


Figura 5.21 – AHVNII: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução

5.4.2 Aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III

As inspeções visuais revelaram situações de fissuras no betão projetado e de destaque de pequenos blocos na periferia da escavação. Dependendo das situações, as medidas adotadas foram:

- Acompanhamento continuado da situação por repetição das inspeções visuais;
- Instalação de instrumentos para monitorização, não previstos inicialmente;

- Reforço imediato da contenção de modo a garantir a estabilização.

Neste caso de estudo, as secções de convergências distavam entre si aproximadamente 20 m, com distâncias inferiores sempre que as características do maciço apresentassem variações significativas que o justificassem, ou em situações particulares que, por razões não especificadas, os técnicos que acompanhavam a obra consideraram importante observar.

Na Figura 5.22 constam as deformações observadas em 407 secções de convergências, em função da qualidade do maciço interessado.

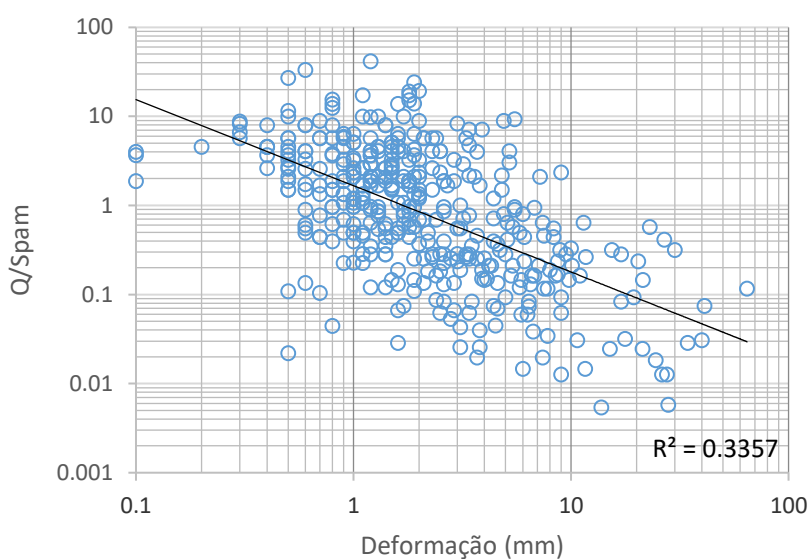


Figura 5.22 – AHVNIII: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação

Da análise deste gráfico verifica-se que, para relações entre a qualidade do terreno e o vão do túnel mais baixas, as deformações são maiores; enquanto para razões mais elevadas, a deformação medida é menor. Neste caso verificou-se que, em 77 situações, a deformação observada excedia o valor limite de 5mm admitido como alerta, o que equivale a 19 % dos casos.

À semelhança do caso de estudo anteriormente descrito, neste também foi possível identificar situações onde nunca se observaram deformações ou evoluções significativas, permanecendo estáveis ao longo do tempo - Figura 5.23; verificaram-se situações de incremento progressivo da deformação ao longo do tempo, evidenciando uma potencial situação de instabilidade - Figura 5.24; e situações de aceleração da taxa de evolução, onde é evidente a instabilidade da secção instrumentada - Figura 5.25. No exemplo constante na Figura 5.23, observa-se uma ligeira deformação inicial, possivelmente justificada pelo ajuste do maciço às novas condições de tensão geradas pela escavação e, após esse período, não se verificam deformações significativas ao longo do tempo, o que indicia estabilidade da zona.

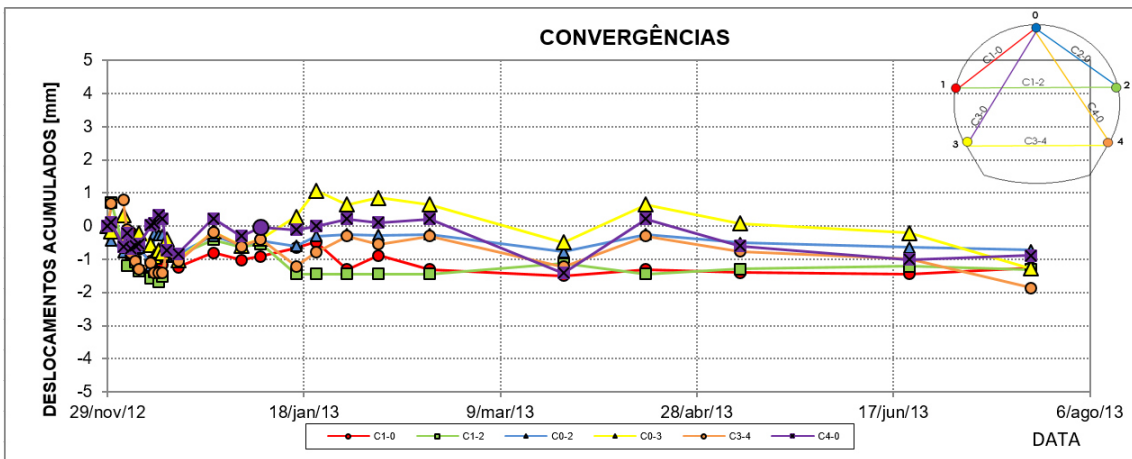


Figura 5.23 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação

A situação revelada na Figura 5.24 mostra uma deformação do maciço a taxa constante, que apenas foi alterada após intervenção na zona, com reforço das medidas de contenção aplicadas.

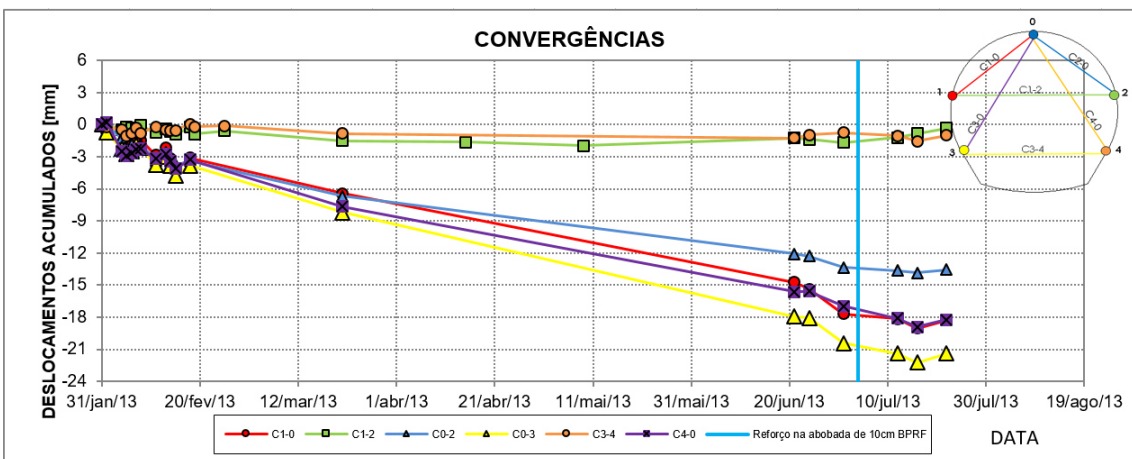


Figura 5.24 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante

O exemplo da Figura 5.25 é o mais gravoso em termos de risco, onde após deteção de uma situação de deformação a taxa constante, no final de março se observa um significativo aumento da taxa de evolução que, posteriormente, após intervenção na zona com reforço das medidas de contenção levou a uma diminuição na taxa até se atingirem valores próximos de zero, indiciando a estabilização da secção.

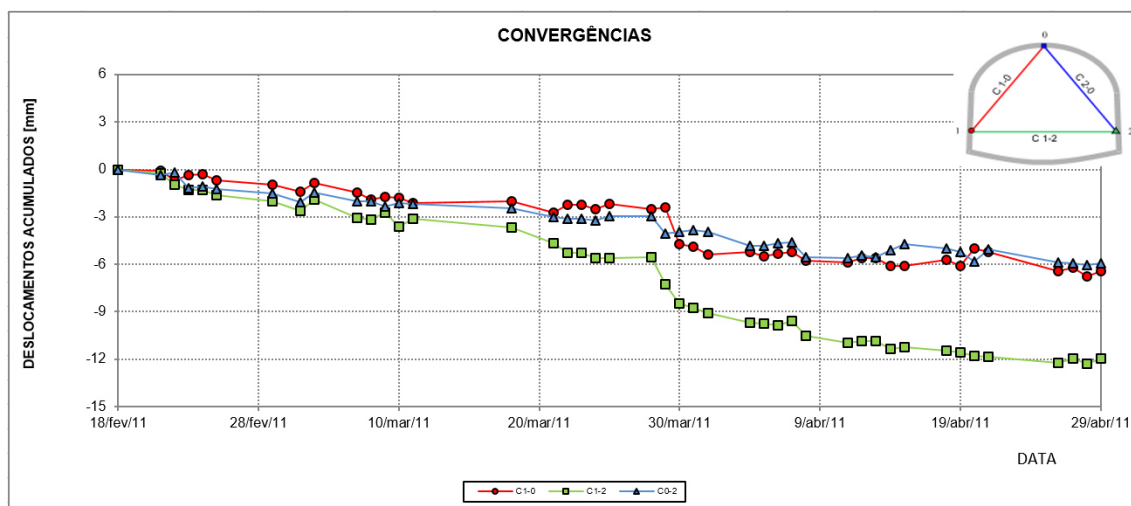


Figura 5.25 – AHVNIII: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução

5.4.3 Aproveitamento hidroelétrico de Picote II

Neste caso, as inspeções visuais revelaram, para além das habituais situações de fissuras no betão projetado e destaque de pequenos calhaus na periferia da escavação, fenómenos de explosão de rocha. Dependendo das ocorrências registadas, perante as deformações observadas no maciço ao longo dos túneis, as medidas adotadas foram idênticas também às descritas para o caso de estudo anterior.

Para os casos de explosão de rocha, a solução avançada foi a aplicação de uma camada de betão projetado. Apesar das classificações geomecânicas realizadas indicarem maciço rochoso de boa qualidade para a abertura de túneis, este procedimento evitou a descompressão brusca do maciço e garantiu a sua estabilização.

No AHP, foram instaladas 103 secções de convergência, que habitualmente tinham um distanciamento entre si de, aproximadamente, 20 m, sendo inferior sempre que as características geotécnicas apresentassem variações significativas que o justificassem ou, em situações particulares, que foram consideradas importantes observar pelo ATO, como terreno com qualidade enquadrada próximo do limite inferior da respetiva zona geotécnica.

As deformações observadas nas galerias que constituem este caso de estudo e, como seria expectável, revelam que para razões mais baixas entre qualidade do terreno e o vão do túnel as deformações são maiores, enquanto para razões mais elevadas a deformação é menor - Figura 5.26.

Para este caso verificou-se que, em 11 situações, a deformação observada excedia o valor limite de 5mm admitido como alerta, o que corresponde a 10 % dos casos.

No AHP, foram também identificadas situações onde não ocorriam deformações - Figura 5.27; deformações com taxa de evolução constante - Figura 5.28; e situações com aumento da taxa de evolução, conforme consta no exemplo da Figura 5.29, o que às vezes, levou ao reforço da contenção aplicada.

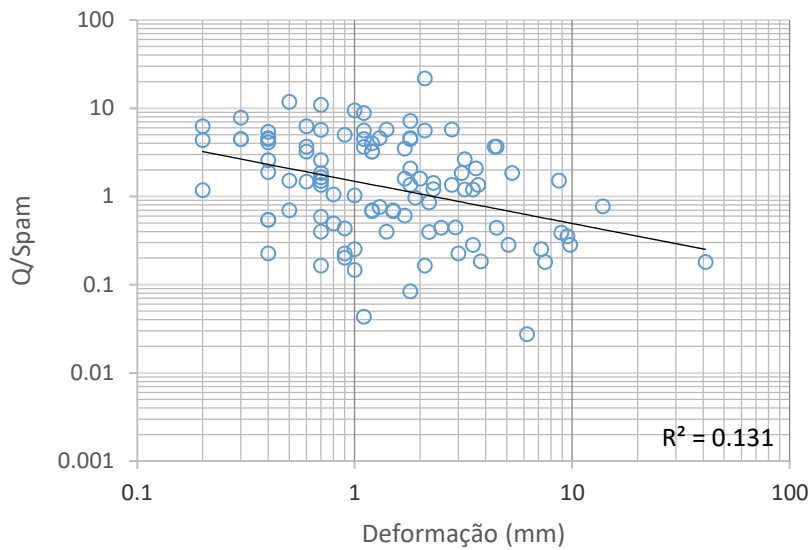


Figura 5.26 – AHP: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação

Neste caso também se verificaram situações onde as deformações observadas nunca tiveram evolução significativa, indicando sempre um cenário de estabilidade da escavação, tal como representado no exemplo da Figura 5.27.

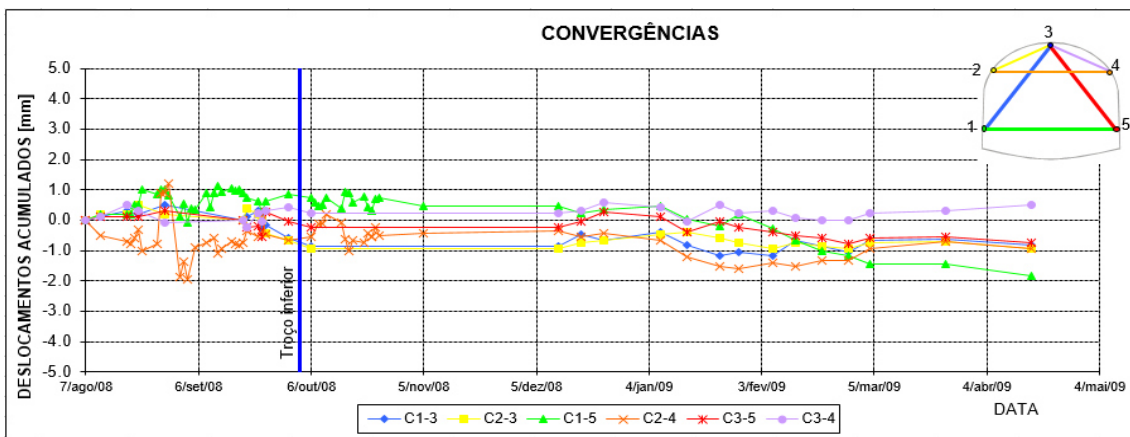


Figura 5.27 – AHP: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação

A Figura 5.28 revela um comportamento do maciço que resultou numa deformação a taxa constante, com particular evidência na direção horizontal. Ulteriormente detetou-se deformação associada à marca instalada no eixo do túnel, com aumento da taxa de evolução. Este comportamento do maciço é revelador de um acréscimo na instabilidade da escavação ao longo do tempo, sendo fundamental intervir com reforço da contenção antes que o colapso ocorra.

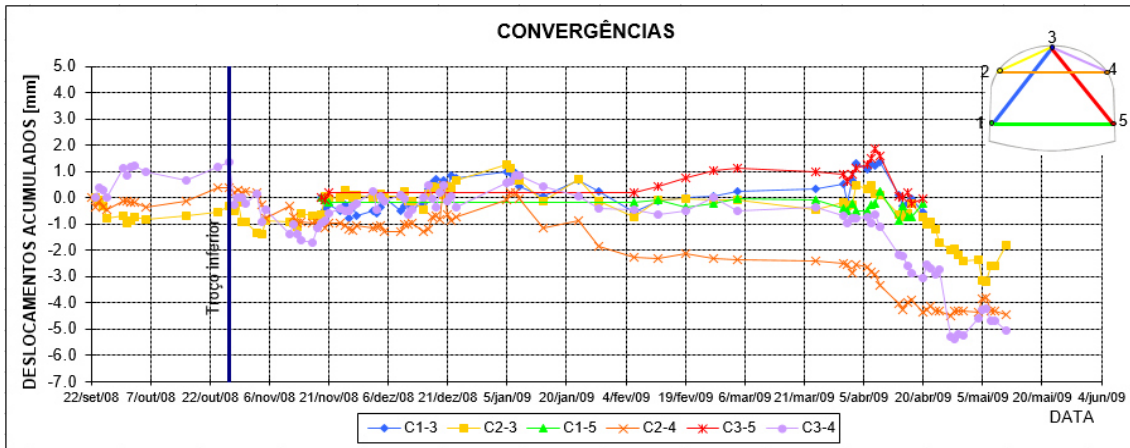


Figura 5.28 – AHP: gráfico com exemplo de secção com deformação a taxa constante

No exemplo da Figura 5.29 é apresentada uma ocorrência onde se observou um aumento do valor da deformação quando foi realizada a escavação da meia secção inferior do túnel, mas seguidamente as deformações estabilizaram. Ulteriormente houve uma intervenção na zona, com escavação de outra estrutura (central em subterrâneo) nas imediações deste túnel; em consequência verificou-se um aumento significativo da taxa de evolução da deformação, que terminou com a ligação, de modo natural, entre as duas estruturas, como previsto em projeto.

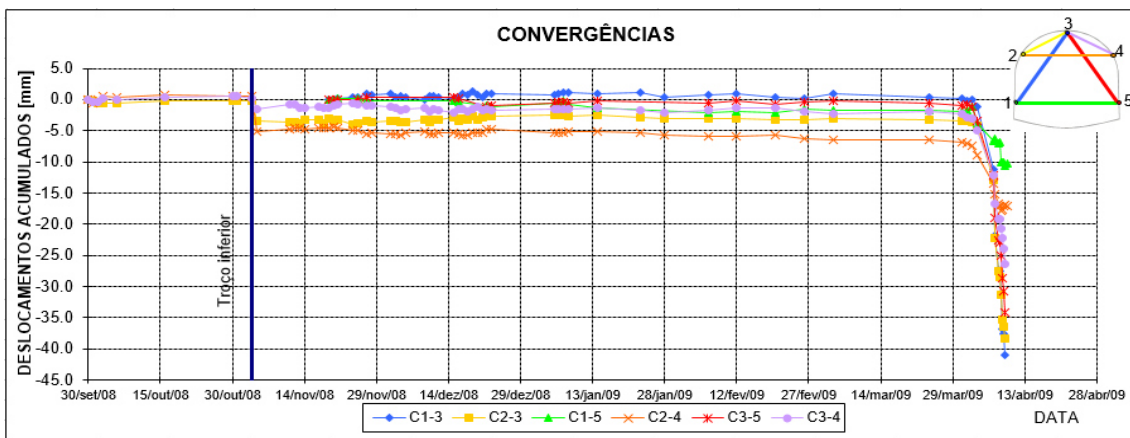


Figura 5.29 – AHP: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução

5.4.4 Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta II

Como salientado previamente, o comprimento das galerias do AHB é pequeno comparativamente com as dos casos abordados anteriormente, pelo que o número de ocorrências que as inspeções visuais detetaram foi limitado. Contudo e de modo genérico, observaram-se algumas fissuras. Nesta situação, as medidas adotadas foram:

- Acompanhamento continuado da situação por repetição das inspeções visuais de modo a verificar a sua evolução com o tempo;

- Instalação de dispositivos de monitorização não previstos inicialmente;
- Reforço da contenção de modo a assegurar a estabilização.

A monitorização das deformações ao longo do túnel foi realizada por medição de convergências, tendo o número de secções de monitorização sido de 24.

O reduzido número de secções resulta do comprimento dos túneis também ser pequeno, sendo o espaçamento entre secções aproximadamente o mesmo relativamente aos restantes casos apresentados. Na Figura 5.30 constam as deformações observadas em função da razão entre a qualidade do maciço interessado e o vão da galeria, onde se observa um conjunto de valores, que não mostram uma relação clara. Estes resultados, contrariamente ao que se verificou nos casos de estudo acima descritos, podem estar relacionados com fraca variabilidade na qualidade do terreno ou com o reduzido número de casos analisados.

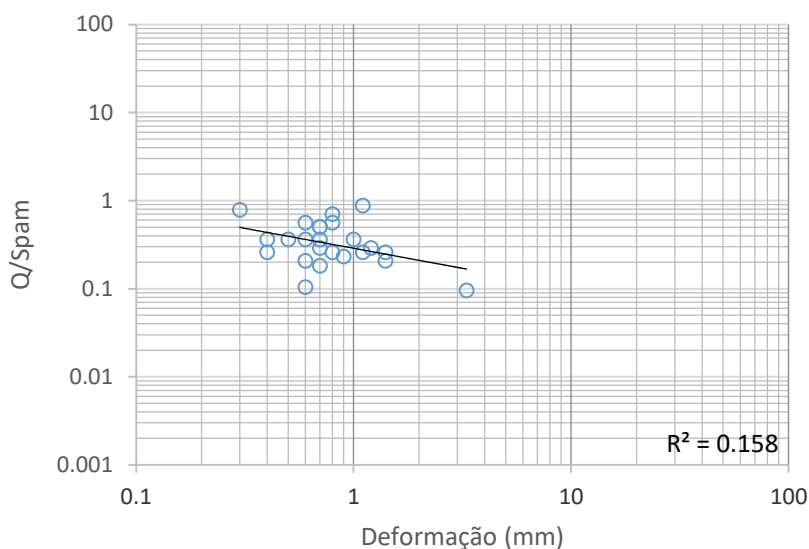


Figura 5.30 – AHB: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação

Neste caso de estudo não se identificaram situações em que a deformação tivesse excedido os 5mm do valor de alerta admitido, nem situações cuja taxa de evolução indiciasse situações de instabilidade, ou potencial instabilidade, e o exemplo que consta da Figura 5.31 representa o comportamento ocorrente em todas as situações, que foi a estabilização dos deslocamentos observados ao longo do tempo.

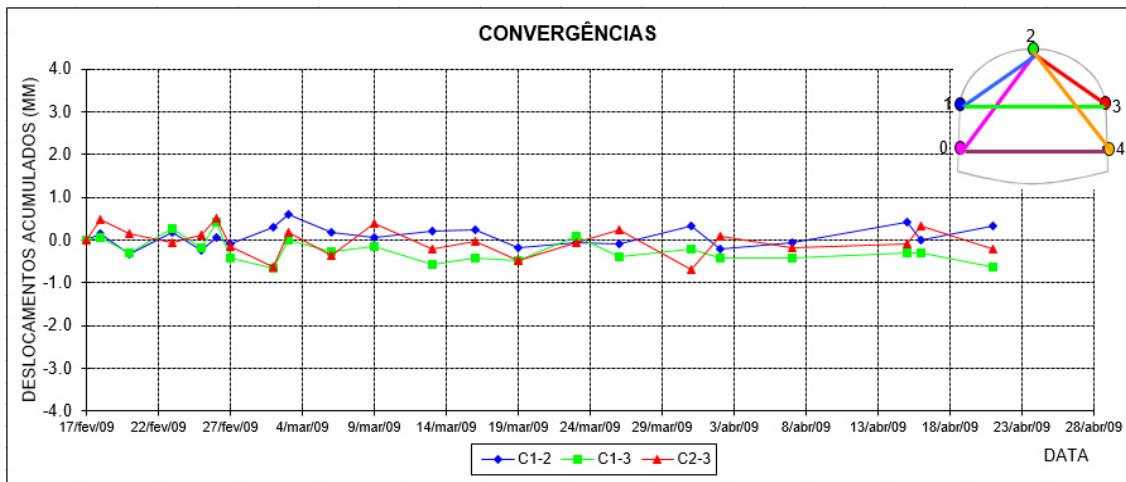


Figura 5.31 – AHB: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação

5.4.5 Aproveitamento hidroelétrico de Alqueva II

As inspeções visuais realizadas ao longo do período de execução desta obra permitiram identificar algumas situações de fissuração do betão projetado aplicado como contenção.

Relativamente a situações mais graves de desprendimento de blocos de dimensão significativa, ou colapsos da escavação, não foram registados. Perante este cenário geral, onde as poucas situações identificadas foram consideradas como graves para a estabilidade da escavação, a única medida adotada foi a do acompanhamento continuado da situação por repetição das inspeções visuais de modo a verificar a sua evolução no tempo.

Foram instaladas 52 secções de convergência, distando entre si aproximadamente de 20 m; em algumas situações, a distância entre secções era inferior, nomeadamente quando as características apresentavam variações significativas.

Na Figura 5.32 constam as deformações observadas em função da qualidade do maciço interessado e da dimensão do vão do túnel. Para este caso de estudo, os dados surgem no gráfico de modo conjunto, sem qualquer tendência, ou seja, não é visível qualquer relação entre a razão da qualidade do terreno pelo vão da secção transversal e a deformação observada.

Verificou-se que, em cinco situações, a deformação observada excedia o valor limite admitido de 5mm, o que corresponde a 10 % dos casos.

Foi possível identificar algumas das principais situações genéricas de comportamento do maciço, nomeadamente as que nunca revelaram qualquer deformação ou evolução significativa, como se revela na Figura 5.33, permanecendo estáveis ao longo do tempo, bem como as situações de aceleração da taxa de evolução, como exemplo da Figura 5.34, embora neste caso de estudo o valor máximo da deformação observada não tenha sido muito significativo.

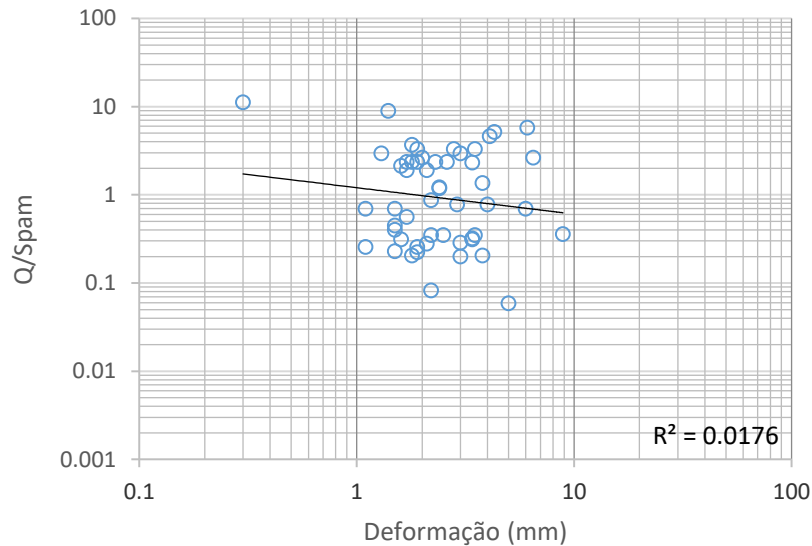


Figura 5.32 – AHA: gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação

As deformações observadas ao longo do tempo, reveladas pelo gráfico da Figura 5.33 são pouco significativas, permitindo concluir da estabilidade da escavação na zona representada pela secção de convergências do exemplo.

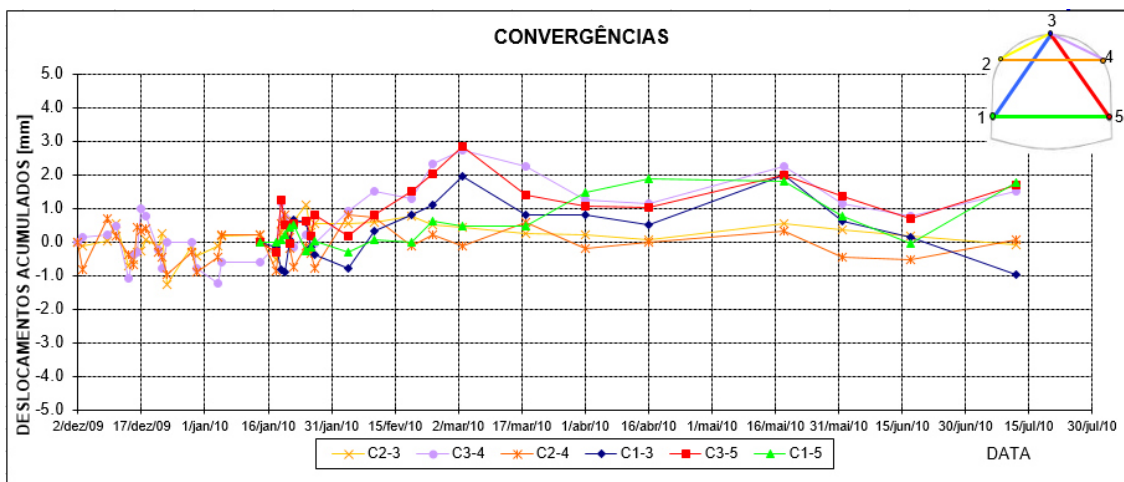


Figura 5.33 – AHA: gráfico com exemplo de secção com ausência de deformação

A Figura 5.34 mostra que, após aproximadamente um mês de monitorização, esta secção de convergências revelou o início da deformação no hastear direito da galeria, possivelmente devido à escavação da meia secção inferior, uma vez que a data é quase coincidente com o início da monitorização dos alvos instalados a cota inferior. Nestas situações, caso não se verificasse uma diminuição imediata da taxa de evolução seria necessário intervir para evitar instabilidade da zona.

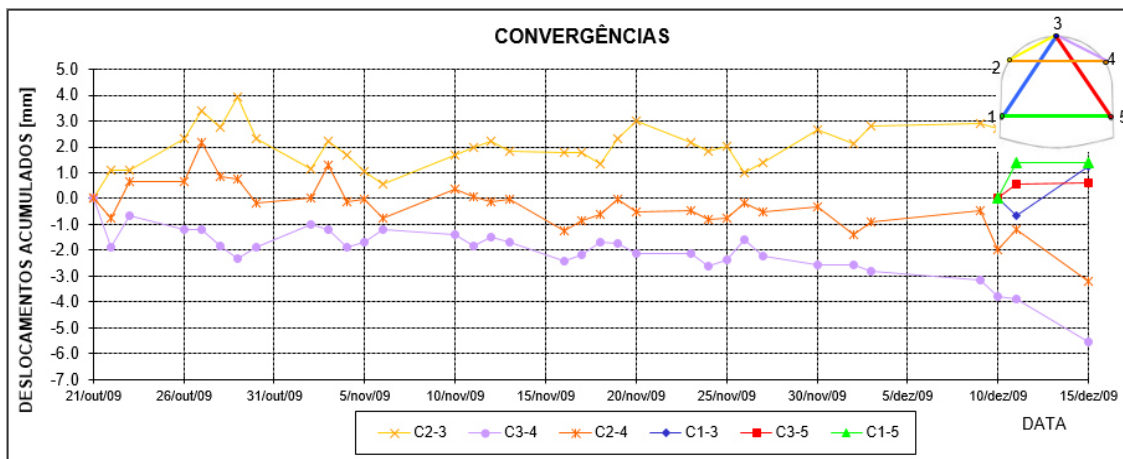


Figura 5.34 – AHA: gráfico com exemplo de secção com deformação com aumento da taxa de evolução

5.4.6 Síntese da detecção de riscos potenciais

Os procedimentos implementados no acompanhamento técnico dos casos de estudo selecionados contêm, de modo camuflado, a identificação e análise da presença de riscos geotécnicos potencialmente presentes no trecho já escavado.

A implementação de um sistema de monitorização implica a existência do risco potencial de deformação do terreno que, no caso de ser excessiva, pode ter como consequência o colapso da escavação, com possibilidade de afetar vidas e equipamentos, quer de modo direto na queda, quer de modo indireto por aprisionamento de quem se encontra na frente de trabalho, caso ocorram no emboquilhamento ou ao longo do túnel.

Na identificação das situações de risco é necessário proceder à análise das deformações medidas ao longo do tempo. Os resultados devem ser enquadrados numa das três situações genéricas acima indicadas.

Na situação onde **não se identificam deformações significativas ao longo do tempo**, geralmente a sua dimensão encontra-se aquém dos limites de alerta definidos pelo projeto. Caso o projeto não indique os valores dos limites de alerta, a deformação observada pode ser enquadrada nos valores habitualmente verificado em outros casos de estudo, como revelado na Figura 3.11, ou conforme a Figura 5.35 que revela todos os valores de deformação onde não se registou instabilidade nos casos de estudo avaliados.

Para a situação onde se verifique **evolução a taxa constante** é necessário acompanhar a situação para analisar o sentido da evolução, se diminui e estabiliza, ou se evolui em sentido contrário, sendo necessário intervir.

A situação de **aumento da taxa de evolução**, é reveladora de instabilidade iminente, que pode originar o colapso da escavação e, como tal, haverá potencialmente a consumação do risco, sendo necessário intervir de imediato.

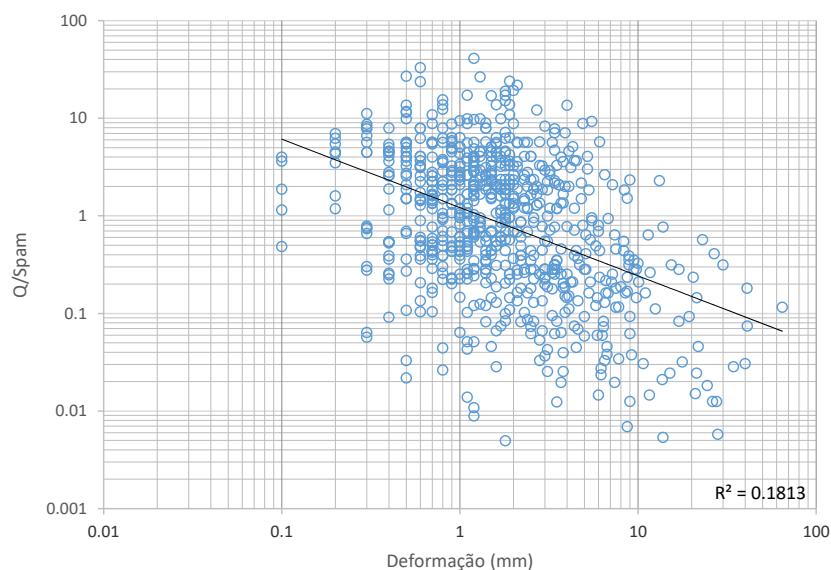


Figura 5.35 – Gráfico da deformação observada nos túneis em função da razão da qualidade do maciço pelo vão de escavação nos casos de estudo

As inspeções visuais são uma metodologia mais expedita que a monitorização, mas permitem identificar e acompanhar a evolução ao longo do tempo de situações de risco potencial de instabilidade, pelo que é necessário implementar medidas.

Com a deteção dos principais riscos geotécnicos presentes em cada uma das etapas da fase construtiva, torna-se possível inseri-los nas metodologias referidas no Capítulo 3 e desenvolver uma nova abordagem à gestão de riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis, que se revela no Capítulo 6.

6. NOVA METODOLOGIA DE GESTÃO DE RISCOS

Neste capítulo é apresentada a nova metodologia de gestão de riscos na fase construtiva de túneis em maciço rochosos, que resulta da conjugação de várias metodologias de diferentes áreas específicas de conhecimento descritas no Capítulo 3, com o incremento dos principais riscos geotécnicos detetados nos casos de estudo no Capítulo 5.

Conforme já referido, esta nova metodologia de gestão de riscos é enquadrada segundo as quatro situações em que se dividiu a fase construtiva, que seguidamente se recorda:

- i. Fase inicial da construção;
- ii. Trecho de túnel a escavar;
- iii. Frente de escavação;
- iv. Trecho de túnel escavado.

Todos os riscos geotécnicos detetados na fase construtiva de túneis em maciços rochosos são alvo de enquadramento em metodologias de análise. Conforme já referido no Capítulo 3, de entre as metodologias de análise de risco disponíveis, foram selecionadas as consideradas mais adequadas aos riscos presentes em cada uma das situações da fase construtiva de túneis.

Para os riscos detetados da fase inicial da construção, frente de escavação e trecho escavado, considerou-se adequado realizar análise recorrendo a listas de verificação; para os riscos detetados nas duas últimas situações referidas, foram ainda criadas adicionalmente árvores de eventos, sendo que para a situação da frente de escavação também foi gerada uma árvore de falhas. Relativamente aos riscos na situação de trecho a escavar apresentam-se os resultados estatísticos de probabilidade de ocorrência e/ou variação da qualidade do terreno no avanço seguinte da escavação. Contudo, ressalva-se que apenas a implementação de um plano de prospeção estruturado permite antever com rigor as mudanças de qualidade do terreno.

Após a análise dos riscos é importante realizar a sua avaliação, recorrendo-se às definições para a verosimilhança e consequência referidas nas Tabelas 3.1 e 3.2, bem como à classificação do nível de risco resultante, conforme consta na Tabela 3.4. Na avaliação realizada neste capítulo, coloca-se entre parênteses o valor considerado para a verosimilhança e consequência, assim como para o nível de risco resultante.

Da avaliação resultam riscos toleráveis, que não requerem qualquer ação para os controlar, mas que devem ser sempre alvo de observação geotécnica continuada durante o período de construção e até de exploração; ou riscos intoleráveis, sendo necessário a implementação de medidas de controlo com o objetivo principal de os eliminar ou, quando tal não é possível, recorrer no mínimo à sua mitigação.

Ainda neste capítulo, para os riscos avaliados como intoleráveis, são apontadas medidas de controlo para os gerir. As medidas indicadas, apesar de permitirem o controlo dos riscos apurados, admite-se

que não sejam únicas e na sua implementação pode ser necessário realizar adaptações ou incrementá-las caso a caso, para solucionar situações específicas na escavação de túneis.

Por último, apresentam-se os riscos residuais, que não se conseguem eliminar e com os quais é necessário conviver.

6.1 FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO

Na preparação da fase construtiva importa verificar se existem elementos geológicos e geotécnicos provenientes das fases de estudo que permitam tecer considerações sobre os principais riscos geotécnicos que potencialmente se têm de gerir, nomeadamente identificar, analisar, avaliar e disponibilizar atempadamente as soluções mais eficientes para os mitigar ou eliminar.

Conforme já referido, todos os riscos geotécnicos têm habitualmente como consequência atrasos na execução e gastos financeiros acrescidos, podendo na maioria das situações potenciar o colapso da escavação e, como tal, também colocam em causa a integridade física de pessoas e equipamentos.

6.1.1 Detecção e análise de riscos

As situações de riscos presentes na fase inicial da construção, que resultam da deteção realizada nos casos de estudo anteriormente descritos e, conjuntamente, com as recolhidas na bibliografia, serviram de base à lista de verificação resumida na Tabela 6.1.

Todos os riscos referenciados têm como consequência extrema, de modo direto ou indireto, o colapso da escavação, com possível afetação de pessoas e equipamentos no interior do túnel, e os inerentes acréscimos de prazo de execução e custos financeiros com a reparação da situação, pelo que os riscos na Tabela 6.1 serão referidos de modo abreviado sem menção ao dano que provoca, ou seja referem-se a perigos.

No Apêndice IX encontra-se uma tabela que contempla a descrição dos perigos, sua deteção e consequências associadas a cada risco como seguidamente se descreve, mas também as medidas para controlo e o respetivo risco residual que adiante serão abordados.

Seguidamente faz-se uma apreciação dos riscos, para os quais são indicados os modos de deteção.

O risco **R1.1 – Conhecimento insuficiente dos riscos geotécnicos que provoquem acréscimo de custos e de prazo**, resulta de uma situação de omissão da existência de um processo de gestão de riscos iniciado nas fases anteriores. A verificação da informação geológica e geotécnica proveniente das fases anteriores à construtiva permite detetar a presença deste risco.

A ausência de identificação e referenciação dos principais riscos geotécnicos envolvidos no projeto a executar, pode levar a que, na fase construtiva, eles surjam de modo inesperado, sem que estejam disponíveis metodologias ou procedimentos para a sua eliminação ou mitigação.

Apesar de, nos últimos anos, a gestão de risco ter começado a ser implementada neste tipo de obras com maior frequência, continua a ser pouco objetiva. Em muitas situações, a implementação tardia da gestão de riscos, impossibilita a identificação e controlo de riscos que poderiam ter sido eliminados anteriormente e que não seja possível, ou muito difícil, na fase construtiva como seja, a alteração de localização de um dos emboquilhamentos ou mesmo do traçado do túnel, de uma maneira geral.

Tabela 6.1 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar na fase inicial da construção

Risco	Ocorre	Não ocorre
R1.1 - Conhecimento insuficiente dos riscos geotécnicos		
R1.2 - Estudos geológicos pouco desenvolvidos ou pormenorizados		
R1.3 - Conhecimento insuficiente das condições geológicas		
R1.4 - Conhecimento insuficiente das condições hidrogeológicas		
R1.5 - Conhecimento insuficiente das características geotécnicas do maciço		
R1.6 - Ausência de RGR		
R1.7 - Indefinição do zonamento geotécnico		
R1.8 - Omissões ou insuficiência de estudos de comportamento mecânico do maciço		
R1.9 - Ausência ou inadequação do plano de instrumentação geotécnica		
R1.10 - Ausência ou inadequação do plano de monitorização		
R1.11 - Ausência ou omissão de recurso ao MO		
R1.12 - Inflexibilidade do projeto na adaptação às reais condições		
R1.13 - Não antecipação de cenários geotécnicos adversos		
R1.14 - Ausência de abordagem técnico-científica		
R1.15 - Falha na identificação das reais condições do maciço		
R1.16 - Produtividade baixa		
R1.17 - Ausência de circuito de informação definido		

O risco **R1.2 – Estudos geológicos pouco desenvolvidos que provoquem acréscimo de custos e de prazo** é muito semelhante ao descrito seguidamente e resulta igualmente do desconhecimento das características do maciço; embora o R1.3 esteja mais relacionado com a heterogeneidade do maciço e com a incapacidade de identificar cenários que pela sua especificidade sejam muito localizados, o R1.2 deriva do perigo dos estudos realizados serem pouco aprofundados e genéricos para as necessidades de caracterização do maciço, onde as consequências são a impossibilidade de realizar um projeto adequado e, para a fase construtiva, a impossibilidade de definir metodologias de escavação e os equipamentos adequados, em particular para escavação em zonas adversas, o que implica desperdício de tempo e custos acrescidos com eventual necessidade de mobilização de outros equipamentos.

A deteção deste risco pode ser feita através da análise dos elementos disponíveis no projeto e identificação de zonas onde a informação seja escassa ou a geologia aparentemente mais complexa,

em particular zonas tectonizadas, pouco estudadas. Neste procedimento, a realização de uma reinterpretação da informação disponível por outros especialistas é uma mais-valia na perceção dos locais com informação menos clara.

O risco **R1.3 - Conhecimento insuficiente das condições geológicas que provoque acréscimo de custos e de prazo** é semelhante ao R1.2, mas surge do perigo de caracterização geológica inadequada ou incompleta, o qual pode advir de diferentes fatores como sejam, levantamento geológicos de superfície pouco pormenorizados, perfis geológicos interpretativos pouco fundamentados, prospeção insuficiente para caracterizar o maciço, e/ou variação das condições geológicas. A concretização deste perigo pode ter como consequências a impossibilidade de desenvolver um projeto adequado, com metodologias construtivas desajustadas, e seleção de equipamentos de escavação desajustada que, no final, resultam em acréscimo de custos e de prazo de execução.

Para detetar este risco é necessário analisar os elementos disponíveis da fase de projeto e comparar com os estudos habitualmente realizados em projetos semelhantes; contudo nesta análise comparativa é necessário ter em consideração a complexidade do contexto geológico e tipo de ocupação à superfície.

O **R1.4 – Conhecimento insuficiente das condições hidrogeológicas que provoquem abordagem desadequada à construção**, pode advir de situações distintas:

- i. O perigo da pressão exercida pela água na periferia do túnel causar instabilidade;
- ii. O perigo da água afluenta ao interior da escavação necessitar de ser encaminhados no caso de túneis ascendentes, ou bombeados no caso de túneis descendentes e que, por razões ambientais, atualmente, têm de ser alvo de tratamento antes de restituídos às linhas de água;
- iii. O perigo potencialmente relacionado com a afetação de terceiros, sejam captações ou cursos de água naturais e pela potencial diminuição de recursos disponíveis.

Estes perigos podem ter como consequências a instabilidade da escavação, com o inerente tempo necessário à correção, necessidade de utilizar equipamentos para bombagem e danos irreparáveis em terceiros ou ambiente que, no limite, podem ser mitigados por indemnizações. Todas estas consequências têm ainda associados os custos financeiros inerentes.

A deteção deste risco é feita através da verificação dos estudos realizados, em particular se contêm informação sobre o nível freático (monitorização por piezómetros) e uma estimativa dos caudais afluentes.

O **conhecimento insuficiente das características geotécnicas do maciço** constitui o risco **R1.5**, que pode estar em parte relacionado com dois dos riscos referidos anteriormente - R1.2 e R1.3, isto porque, se houver um défice de conhecimento das condições geológicas do maciço, possivelmente as condições geotécnicas também estão mal estudadas; contudo, mesmo na posse de um conhecimento geológico aceitável, as condições geotécnicas podem estar mal identificadas, quer por

desenvolvimento fraco do estudo, com interpretações simplistas, quer por realização de poucos ensaios e/ou inadequados, que levem a modelos errados. As consequências inerentes a este risco são de informação insuficiente para o projeto, impossibilidade de selecionar metodologias que permitam a adaptação da contenção às reais condições do terreno e inerente desperdício de tempo e recursos financeiros.

Conforme referido na Secção 2.4.1, um dos documentos que deve acompanhar o projeto é o relatório geotécnico de referência, pelo que deve ser verificada a sua existência nesta fase de início da construção. O risco **R1.6 – Ausência de RGR com consequências para o conhecimento do terreno ocorrente**, que no limite possa originar uma abordagem desadequada à construção e ulteriormente a disputas judiciais com os inerentes custos financeiros associados. Este risco é detetado pela verificação da sua existência nos documentos provenientes das fases de estudo e projeto.

Um dos perigos que podem ocorrer é o projeto não definir o zonamento geotécnico do maciço, o que pode surgir na sequência do risco R1.5 e que tem como eventual consequência a falta de preconização de contenção adequada, que em fase de obra pode levar à instabilidade da escavação se essa contenção for em défice, o que resulta no risco **R1.7 – Indefinição do zonamento geotécnico que leve a recorrer a metodologias desadequadas**. Para detetar este risco é necessário verificar se o projeto conta com um zonamento do maciço adequado e respetiva caracterização.

O **R1.8 – Omissões ou insuficiência dos estudos de comportamento mecânico do maciço que provoquem instabilidade** surge do perigo do projeto estar incompleto por impossibilidade de definir modelos, possivelmente na dependência do conhecimento geológico e geotécnico limitado. As consequências que podem resultar são de eventual impossibilidade de definir soluções adequadas para a escavação e contenções; o que no limite pode levar à ocorrência de instabilidade e colapso da escavação.

Uma das formas de detetar este risco é através da verificação dos elementos disponíveis nos projetos, nomeadamente a presença de modelos de deformação do maciço e estudos de fraturação que contemplem a análise cinemática.

O risco **R1.9 – Ausência ou inadequação do plano de instrumentação geotécnica que impossibilite a deteção de instabilização** resulta da conjugação do perigo de omissão do plano de instrumentação para a obra que se pretende construir, com as consequências de impossibilidade de detetar deformações excessivas que coloquem em causa a estabilidade do túnel. Por sua vez, a impossibilidade de medir a deformação do terreno inviabiliza a confirmação dos pressupostos do projeto sobre a adequabilidade da contenção e a deteção de eventuais deformações excessivas, que no limite pode levar ao colapso da escavação, com prazo de execução e custos acrescidos com a reparação da situação.

A detecção deste risco é realizada recorrendo à verificação da presença de um plano de instrumentação nos documentos do projeto, que deverá conter o tipo e localização dos dispositivos de observação geotécnica a instalar.

O risco **R1.10 – Ausência ou inadequação do plano de monitorização**, isoladamente não provoca a instabilização do maciço, contudo a sua omissão, impede a medição de deformações em situações de potencial instabilidade. Este risco resulta do perigo de indefinição da frequência de leituras e níveis de alerta para a dimensão das deformações medidas, conjuntamente com as consequências de impossibilidade de acompanhamento da evolução das deformações, que eventualmente podem resultar na instabilidade e colapso da escavação, sendo necessário despende prazo e custos financeiros com a reparação da situação.

O perigo de abordagem à construção de um túnel sem recorrer ao MO ou a uma metodologia similar, que preveja a adaptação da contenção aplicada às reais condições observadas e medição dessas deformações para verificação da adequabilidade da contenção, tem como consequências a impossibilidade de aplicar a contenção estritamente necessária para garantir a estabilidade, resultando em excesso de contenção com o inerente tempo excessivo de aplicação e recurso empregues, ou em défice de contenção com a possibilidade de ocorrência de colapso e necessidade de reparação, o que também implica mais recursos de meios e financeiros. Isto resulta no risco **R1.11 – Ausência ou omissão de recurso ao MO que provoque utilização de metodologias desadequadas**. A detecção deste risco é feita através da verificação dos pressupostos do projeto relativamente à metodologia adotada, sobre a presença de zonamento geotécnico com respetiva contenção e verificação da adequação da contenção pela monitorização das deformações e, ulteriormente, na verificação das metodologias a utilizar na fase construtiva.

O risco **R1.12 – Inflexibilidade do projeto na adaptação às reais condições que provoquem acréscimo de custos e de prazo**, habitualmente resulta de uma filosofia pouco flexível do projeto na abordagem à fase construtiva, onde os estudos geológicos e geotécnicos constituem uma base sólida na realização do projeto, pelo que não é contemplada a ocorrência de outros cenários para além dos identificados. Esta abordagem encerra vários perigos, como sejam a consideração que o maciço se encontra muito bem estudado sem possibilidade de ocorrência de variação de características em relação ao identificado; a falta de consideração de soluções de escavação e contenção que se implementem de imediato e se adequem às reais condições geológicas e geotécnicas encontradas; e impossibilidade de recorrer ao MO.

As consequências que podem resultar destas ações são a falta de adequação das contenções, com o prazo de execução e custos inerentes à falta da máxima produtividade.

Para detecção deste risco é necessário verificar os elementos disponíveis e validar os pressupostos assumidos que o maciço se encontra estudado adequadamente e não admitem quaisquer outros cenários para além dos considerados, o que normalmente é pouco realista.

No sentido de avaliar o perigo de variação das características do maciço e a eventual presença de cenários geológicos e geotécnicos adversos para além da frente de escavação, às vezes é realizada prospeção em avanço; contudo a falta de um procedimento neste sentido pode ter como consequência a impossibilidade de detetar esses cenários, que pode levar à impossibilidade de intervenção imediata e, em situação extrema, ao colapso da escavação. A conjugação deste perigo com as consequências resulta no risco **R1.13 – Não antecipação de cenários geotécnicos adversos que provoquem a instabilização**. A deteção deste risco passa pela presença de um ATO em permanência e pela verificação da existência de um procedimento de acompanhamento da escavação que preveja a realização de prospeção em avanço, mesmo que seja de modo destrutivo, sem recolha de amostra.

O risco **R1.14 – Ausência de abordagem técnico-científica que impossibilite a deteção de instabilização**, refere-se a uma abordagem à construção de túneis sem uma base de acompanhamento técnico em permanência, quer numa fase prévia na preparação de meios a afetar à obra, quer seja ao longo da construção da obra. A ausência de um ATO em permanência tem como consequência a impossibilidade de implementar uma dinâmica de otimização ou adaptação das soluções preconizadas, às reais condições encontradas, o que normalmente leva a perda de produtividade por utilização de equipamentos pouco adequados ou a aplicação de contenção diferente da estritamente necessária para garantir a estabilidade da escavação, o que também implica gastos financeiros para além do necessário. A deteção deste risco pode ser feita através da verificação dos elementos disponíveis em projeto e dos meios previstos para a construção.

O perigo de não estar previsto o acompanhamento da construção de túneis por parte de técnicos experientes, auxiliados por especialistas tem como consequência a impossibilidade de identificação imediata da qualidade do terreno, particularmente gravoso em cenários adversos, que podem levar ao colapso da escavação sem a possibilidade de implementar medidas adequadas, isto tem como consequências o inerente acréscimo de custos e de prazo na reparação da situação, o que constitui o risco **R1.15 – Falha na identificação das reais condições do maciço que provoque a instabilização**. Este risco pode ser detetado pela verificação do organograma da obra na contemplação da presença de técnicos experientes e especialista na fase construtiva.

O risco **R1.16 – Produtividade baixa que provoque acréscimo de custos e de prazo**, não constitui por si só um risco geotécnico, mas pode resultar de diferentes perigos e consequências associadas, nomeadamente:

- i. Os perigos relacionados com uma abordagem à execução com meios desadequados relativamente às condições geológicas e geotécnicas conhecidas;
- ii. Os perigos relacionados com a ausência ou limitação de informação sobre o cenário geológico e geotécnico ocorrente.

As consequências são o desgaste excessivo nos equipamentos, dilatação do prazo de execução por falta de rentabilidade dos meios utilizados e acréscimo dos custos financeiros. A detecção deste risco é feita pela verificação das condições geológicas e geotécnicas presentes e se as metodologias, procedimentos e equipamentos, previstos são os mais adequados.

O **R1.17 – Ausência de circuito de informação definido que conduza à instabilização**, é um risco que por si não leva à instabilização do maciço; contudo, a falha de informação atempada entre os centros de decisão e a execução na frente de trabalho pode levar a situações de instabilização e, no limite, ao colapso da escavação, por falta de implementação das ações necessárias. A detecção deste risco passa pela verificação da existência de um procedimento claro sobre o circuito de correspondência de informação entre os vários intervenientes na construção.

6.1.2 Avaliação de riscos

A análise de riscos presentes no início da escavação foi realizada recorrendo a uma lista de verificação (Tabela 6.1). Esta metodologia de análise de risco leva a uma avaliação de presença/ausência de riscos potenciais. No entanto, é importante distinguir que a verosimilhança ou possibilidade de ocorrência de cada risco, bem como a gravidade das consequências, que podem ser distintas, o que leva a diferentes níveis de risco (Tabela 3.4), isto apesar da lista de verificação ser uma análise de risco qualitativa.

O **R1.1** é um risco que se admite ser de verosimilhança esperada (4) porque continuam a existir muitos projetos que não contempla a gestão de riscos desde as fases precoces, e de consequências graves (3), uma vez que implica a perda de tempo, custos, eventualmente de vidas e equipamentos e até à afetação potencial de terceiros, pelo que o risco resultante é elevado (12) e considerado intolerável, o qual não pode ser eliminado, porque para isso era necessário voltar às fases precoces do projeto, mas pode ser mitigado na fase construtiva.

A ocorrência do **R1.2** é provável (3), porque os estudos realizados na fase do projeto são geralmente limitados, pelo tempo e recursos disponíveis, ou mesmo por se basearem numa amostragem. As consequências podem resultar na impossibilidade de definir os equipamentos necessários para responder a todas as adversidades geológicas e geotécnicas eventualmente encontradas na fase construtiva e consequentes custos acrescidos, com necessidade de mobilização de outros equipamentos para além dos inicialmente selecionados. Outra das consequências é a impossibilidade de definir o tempo de execução e os custos financeiros. Ou seja, as consequências são críticas (4), o que conjugado com a já referida possibilidade de ocorrência provável (3), resulta num risco elevado (12) e considerado intolerável.

O **R1.3** é de verosimilhança esperada (4), porque as características do maciço rochoso nunca são conhecidas na totalidade numa fase inicial, existindo sempre a possibilidade de heterogeneidade para além do que é conhecido. Os danos consequentes são críticos (4) porque há possibilidade da contenção

preconizada não estar adequada para o terreno real por desconhecimento das respectivas condições geológicas, pelo que se trata de um risco de nível muito elevado (16) e intolerável, que necessita de medidas para a sua eliminação, ou no mínimo redução.

O **R1.4** é de verosimilhança provável (3) e de consequências catastróficas (5) e, como tal, classificado como elevado (15) e considerado intolerável. Habitualmente os estudos hidrogeológicos resumem-se à indicação da posição do nível freático, sem que conste quaisquer considerações sobre estimativa de caudais afluentes à escavação. Relativamente às consequências de maior impacto são a pressão exercida pela água na periferia da escavação que pode gerar instabilidade, a impossibilidade de definir atempadamente um plano de bombagem, com inundação da frente de escavação, afetação da qualidade e/ou quantidade de água de terceiros, ou do ambiente envolvente, com os inerentes custos financeiros e eventual afetação do prazo de execução.

Relativamente ao **R1.5**, este é de verosimilhança provável (3) e de consequências críticas (4) no respeitante à garantia de estabilidade e de adequação dos meios às necessidades exigidas pelo maciço para construção do túnel, que pode levar à perda de vidas, equipamentos, atrasos na execução e custos acrescidos no caso de originar colapsos, o que resulta num risco de nível elevado (12) e considerado intolerável, sendo necessário implementar medidas de controlo.

Os estudos geotécnicos fazem parte dos documentos habitualmente disponíveis, mas nem sempre é realizado um RGR, admitindo-se que o **R1.6** seja de verosimilhança provável (3) e de consequências graves (3), resultando num risco de nível médio (9), mas que se considera intolerável, pelo que deve ser contemplado por medidas de controlo.

O **R1.7** pode resultar de défice de desenvolvimento do projeto ou de estudos geotécnicos desadequados, com a verosimilhança de ocorrência é provável (3) e com consequências críticas (5) porque podem comprometer a estabilidade da escavação, com eventual afetação de pessoas e equipamentos, assim como gastos desnecessários de meios e tempo na reparação da situação. Perante a possibilidade de ocorrência e consequências, este risco é classificado como elevado (15), sendo necessário definir medidas de controlo, no sentido da sua mitigação ou eliminação.

Para **R1.8** considera-se uma verosimilhança de ocorrência provável (3) e de consequências críticas (4) na maioria das situações, isto tendo em conta que a estabilidade da escavação pode ser colocada em causa, o que pode resultar na perda de vidas, equipamentos e consequentes atrasos na execução e acréscimo de custos. O nível de risco resultante é elevado (12) e como tal considerado intolerável, com necessidade de aplicar medidas de controlo.

A possibilidade de ocorrência do **R1.9** é considerada remota (2) nos dias de hoje, uma vez que a grande maioria dos projetos contempla um plano de instrumentação; contudo, no caso de ocorrer e de se construírem túneis sem a sua presença, as consequências são catastróficas (5), porque impossibilita a medição das deformações e eventualmente a deteção atempada de instabilidade que leve ao colapso

da escavação. Trata-se de um risco de nível elevado (10) e intolerável, sendo recomendável a implementação de medidas corretoras.

O **R1.10** é de verosimilhança improvável (1) porque hoje em dia é habitual todos os projetos contemplarem a observação das deformações e a sua monitorização ao longo do tempo de obra e, às vezes, até durante a exploração; no entanto, a omissão desse plano de monitorização é de consequências críticas (5) porque podem, no limite, não permitir detetar a instabilização da escavação. O risco resultante é de nível médio (5), mas é recomendável implementar medidas para a sua retificação.

Na construção de túneis em maciços rochosos, o **R1.11** é de verosimilhança remota (2), uma vez que, habitualmente, os projetos recorrem ao zonamento geotécnico admitindo variação das características do maciço e, para cada uma das zonas, preconizam a aplicação de contenção específica e adequada a essas características para garantia da estabilidade do terreno. Contudo, a ausência de recurso a este método pode ser de consequências críticas (4), uma vez que o projeto pode não contemplar a variação das características do maciço, nem prever a adequação da contenção às reais condições observadas.

A consideração de um cenário geotécnico homogéneo e isotrópico ou totalmente conhecido, raramente corresponde à realidade e, como tal, ou trata-se de uma situação muito bem estudada, onde os riscos são diminutos, ou trata-se de pressuposição irreal, onde os riscos são críticos na garantia da estabilidade.

Perante este cenário o nível de risco é considerado médio (8), sendo recomendável a implementação de medidas de controlo no sentido de o eliminar.

A possibilidade de ocorrência do **R1.12** é de verosimilhança remota (2), principalmente porque os projetos deste tipo de estruturas habitualmente são desenvolvidos por especialistas, mas caso se verifique, as consequências resultantes podem ser críticas (4), porque a falha do dimensionamento da contenção, particularmente em défice, pode colocar em causa a estabilidade da escavação e consequente perda de vidas e equipamentos, dilatação do prazo de execução e custos acrescidos. O risco resultante é de nível médio (8) e é recomendável implementar medidas de controlo para o eliminar.

O **R1.13** é de verosimilhança frequente (5), porque na maioria dos túneis ocorrem cenários geotécnicos diferentes dos previstos e às vezes até imprevisíveis, como sejam por exemplo filões ou falhas não identificadas e às vezes com características diferentes também das habituais. As consequências destas ocorrências podem revelar-se catastróficas (5), levando em muitas situações ao colapso da escavação. Isto resulta num risco de nível muito elevado (25) que tem de ser mitigado, dado a impossibilidade de o eliminar na totalidade, porque em parte se relaciona com a inerente heterogeneidade dos maciços.

A verosimilhança do **R1.14** nos dias de hoje é improvável (1), tendo em consideração que todas as grandes obras em subterrâneo significativas têm acompanhamento por parte de técnicos experientes e

especialistas; contudo, as consequências da sua verificação são catastróficas (5), uma vez que, impossibilita o desenvolvimento e adequação de metodologias, a realização ou completa identificação de cenários de instabilidade, com as consequências ao nível da garantia de estabilidade, tempo de execução e custos acrescidos. O risco resultante é de nível médio (5), considerando-se recomendável a implementação de medidas para a sua eliminação.

O **R1.15** é de verosimilhança improvável (1) uma vez que, habitualmente, conforme referido acima, a construção deste tipo de obras conta com o acompanhamento em permanência de técnicos experientes, mas caso ocorram são de consequências catastróficas (5) porque pode colocar em causa a estabilidade da escavação, com os danos inerentes de aumento de prazo de execução para reparação de situações de instabilidade e custos acrescidos com essas reparações. Este risco é de nível médio (5), sendo recomendável implementar medidas para o eliminar na totalidade.

Relativamente ao **R1.16** é de verosimilhança esperada (4) e consequências catastróficas (5), porque na maioria das situações, o tempo de reação na mobilização de equipamentos e adaptação de procedimentos às variações de qualidade do terreno nem sempre é célere, por outro lado, geralmente as considerações de projeto são conservadoras, de modo a garantir a segurança e estabilidade, sendo a sua adaptação, no sentido de alívio de contenção ou ritmo de execução, muito difícil em fase de execução. Isto tem consequências, principalmente no respeitante ao prazo de execução e custos que daí advêm. O risco resultante é de nível muito elevado (20), sendo necessário definir as medidas a implementar para a sua eliminação ou mitigação.

O **R1.17** é de verosimilhança provável (3) e de consequências críticas (4), principalmente no caso de estar em causa a estabilidade da escavação, o que poderá ter reflexo no aumento do prazo de execução e custos associados. Assim, trata-se de um risco avaliado com nível elevado (12) que necessita de medidas eliminatórias.

Os riscos considerados são classificados de um modo qualitativo com diferentes níveis; contudo, mesmo para os considerados com nível mais baixo admite-se que a sua presença é intolerável, porque conforme já referido, na construção de túneis, o espaço é limitado e encontram-se sempre presentes pessoas e equipamento com a possibilidade da sua integridade ser colocada em causa, pelo que se justifica aplicar medidas no sentido de os eliminar ou mitigar. Seguidamente apresentam-se algumas dessas medidas.

6.1.3 Medidas de controlo

Tendo por base os riscos apresentados na Tabela 6.1, seguidamente são avançadas medidas de controlo, que têm como objetivo principal a sua eliminação e, quando tal não é possível, a sua mitigação. Sempre que possível, referem-se ainda, algumas medidas otimizadoras que podem ser

implementadas na fase construtiva para interligar a gestão de riscos com as restantes atividades geralmente realizadas.

O **R1.1** não pode ser eliminado uma vez que não é possível voltar atrás no tempo para implementar um processo de gestão de riscos geotécnicos, desde a fase precoce do projeto; contudo, é possível mitigá-lo pela implementação de um processo de gestão de riscos na fase inicial da construção. Neste caso, o processo de gestão de risco deverá ser específico, de forma a interligar as condições geotécnicas existentes com as metodologias de abordagem à obra, bem como no respetivo dimensionamento de equipas e dos equipamentos afetos.

Em relação ao **R1.2**, é necessário desenvolver ou aprofundar os estudos existentes para mitigá-lo, sendo o objetivo esclarecer dúvidas ou caracterizar zonas que tenham ficado fora de investigação. Para além de uma recolha de todos os elementos bibliográficos disponíveis sobre a região, um dos primeiros trabalhos a desenvolver é a realização de uma cartografia geológica de pormenor da zona. Com estes elementos é possível identificar os locais onde existem maiores dúvidas sobre as características do maciço e desenvolver um plano de prospeção para dar resposta às necessidades.

Em fase de construção, esse plano de prospeção pode ser dimensionado de modo faseado, ao longo do tempo de execução da empreitada, para aproveitar os dados entretanto disponíveis da construção de estruturas de outros elementos de obra, como sejam os acessos; desta forma, a implementação do plano de prospeção e ensaios pode ser adaptada às necessidades.

O **R1.3**, conforme já referido anteriormente, por mais estudos que sejam feitos é impossível de eliminar; contudo pode ser mitigado pelo aprofundar do conhecimento existente. Nesta fase inicial de execução é necessário recolher toda a informação disponível, verificar a existência de mais estudos que não tenham sido considerados na fase de projeto ou que, entretanto, tenham sido desenvolvidos e identificar as zonas onde o conhecimento do terreno não consensual e sobre o qual existam dúvidas. Neste domínio, destaca-se principalmente a presença de coberto vegetal que impossibilite a observação da superfície do terreno e de afloramentos rochosos, de alinhamentos estruturais, ou a existência de extensões amplas sem qualquer prospeção em profundidade. Nesta fase, a identificação dessas áreas deve ser iniciada com a realização de um levantamento geológico mais pormenorizado da superfície, a que se deverá seguir a seleção de metodologias adequadas a aplicar na execução, que permitam a identificação do terreno em avanço, como seja prospeção na frente de escavação.

O **R1.4** é de difícil eliminação sem a alteração de localização do túnel pelo que, na fase construtiva, apenas podem ser adotadas medidas que levem à sua mitigação. Uma das medidas prévias a implementar é a realização de estudos hidrogeológicos que permitam determinar a eventual presença de aquíferos e estimar o caudal afluente à escavação, assim como inventariar as captações de água pertencentes a terceiros, com registo de caudais extraídos e qualidade da água.

Caso se verifique a presença de água, com possibilidade de afluências significativas ao interior da escavação devem-se implementar medidas para a impermeabilização do túnel, que passam

principalmente pela injeção de caldas de cimento, as quais podem ser aditivadas para uma solidificação rápida, ou em casos mais gravosos, utilizar resinas de poliuretano, ou em casos extremos recorrer ao congelamento da água presente no maciço. Outra das medidas que pode ser implementada é a impermeabilização da superfície de escavação com telas.

Como medida otimizadora e sempre que seja possível, deve-se abordar a escavação pelo lado ascendente, o que permite a retirada da água por gravidade, evitando os meios e custos inerentes à bombagem.

Perante o **R1.5** deve-se investigar as condições geotécnicas e características do maciço que permitam desenvolver modelos geotécnicos com pormenor suficiente para antecipar cenários, prováveis e menos prováveis e adequar os meios na garantia da estabilidade.

A inexistência de um RGR, conforme contemplado pelo **R1.6** é eliminada pela execução de um relatório. Embora o relatório possa ser realizado, inclusivamente com a colaboração dos especialistas das várias entidades envolvidas na empreitada, as metodologias e valores de execução já foram acordados, pelo que ainda existe a possibilidade de ser necessário efetuar adaptações a cenários não contemplados que levem a disputas financeiras.

Na fase construtiva esta investigação pode ser integrada com a execução, de forma faseada e permitir analisar as reais condições ocorrentes avaliando a necessidade de ensaios e prospeção. Podem ainda ser aproveitados os dados recolhidos de outras frentes de obra, acrescentando rigor aos modelos.

As medidas de eliminação do **R1.7** passam pelo desenvolvimento de estudos e/ou projeto na caracterização do maciço, de modo a possibilitarem a definição do zonamento geotécnico.

Na posse de um modelo geotécnico que represente os cenários mais prováveis é possível definir os procedimentos e selecionar as metodologias mais adequadas para abordagem à fase construtiva.

Como forma de otimizar as medidas eliminatórias deste risco, é necessário preconizar meios de monitorização da qualidade do terreno no enquadramento das zonas geotécnicas e da adequabilidade da contenção perante o terreno presente, em cada zona, e deformação associada registada, o que permite validar os pressupostos assumidos em projeto e servir de base à revisão do mesmo na adequação da contenção às reais condições geotécnicas encontradas em situações futuras ao longo do túnel.

Na fase inicial da construção o **R1.8** pode ser eliminado com a realização dos estudos geotécnicos, ou aprofundamento do projeto na definição do comportamento expectável e modos de rotura previsto para o maciço. Ulteriormente, já em fase de escavação, este risco pode ainda ser mitigado recorrendo a metodologias de acompanhamento da execução, como será abordado na Secção 6.3, que preveja análises ao comportamento do terreno.

Para definir especificamente o comportamento expectável do maciço presente numa determinada zona, na fase construtiva e como referido, os estudos podem ser realizados de modo faseado, e orientados a cada frente de escavação, o que constitui uma medida otimizadora do risco a implementar nesta fase.

No início da fase construtiva, o **R1.9** pode ser eliminado pela concepção de um plano que contemple instrumentos para monitorização das deformações adequados, sendo o mais corrente em túneis em maciços rochosos com grande recobrimento, fora de ambiente urbano, o recurso sistemático a secções de convergências. No entanto, ressalva-se que a ausência de plano de instrumentação não constitui isoladamente um risco para o colapso da escavação, mas sim a impossibilidade de detetar e medir a evolução da deformação do maciço, pelo que as medidas para eliminar essa eventualidade passam pelo reforço da contenção.

O plano de instrumentação deve prever revisões periódicas que permitam adequar a quantidade de instrumentos à qualidade do terreno ocorrente e às deformações medidas. Ou seja, caso a qualidade do maciço seja boa e não se verifiquem deformações, em futuras situações semelhantes, devem ser tomadas medidas para deixar um espaçamento maior entre zonas observadas; inversamente, em situações onde se verifique deformações, em condições geológicas e geotécnicas semelhantes devem ser monitorizadas com menor espaçamento entre secções de convergências.

O **R1.10** pode ser eliminado pela elaboração ou desenvolvimento de um plano de monitorização, o qual deve ser realizado por um especialista, e onde no mínimo devem constar:

- Os instrumentos (tipo e quantidade);
- Os limites de alerta e alarme para as deformações expectáveis (valores máximos e taxa de evolução);
- A frequência de leituras;
- O modo de apresentação dos dados (preferencialmente gráfica).

Em fase de construção, o plano de monitorização deve prever a adaptação da frequência de leituras em função da dimensão da deformação e da sua taxa de evolução, onde no caso de não se verificar evolução significativa das deformações, a frequência de leitura deve ser diminuída sendo que, em qualquer altura que se verifique deformação ou indícios de instabilidade, elas devem ser realizadas de imediato, com o inerente aumento da sua frequência. Nos casos em que a taxa de evolução aumente, a alteração da frequência de leituras não pode ser considerada uma medida para eliminar o risco de colapso, para tal é necessário proceder a reforço de contenção.

A eliminação do **R1.11** resulta de uma verificação dos estudos geológicos e geotécnicos, acrescidos de uma revisão dos pressupostos considerados em projeto, sendo fundamental a definição das características mais prováveis e as mais adversas, considerando os cenários geológicos e geotécnicos mais prováveis de ocorrer ao longo da escavação e implementar o MO para realizar a construção do túnel, onde a observação geotécnica assume um papel preponderante na adaptação das contenções às reais condições observadas.

Na fase construtiva a monitorização das deformações do conjunto formado pelo maciço e contenção aplicada para a sua estabilização, permite verificar a adequabilidade do mesmo e testar o mínimo de

contenção necessária perante a qualidade do terreno presente uma vez que, ultrapassado esse mínimo, o maciço deforma, mas como está a ser monitorizado é possível reforça-lo de imediato, determinando-se, deste modo, a quantidade de contenção adequada.

O **R1.12** é eliminado por desenvolvimento dos estudos geológicos e geotécnicos e admissão da possibilidade de ocorrência de cenários geotécnicos variáveis e diferentes dos identificados. Neste aspeto, a presença em permanência em obra de um representante do Projetista, que recolha a informação e possibilite tomadas de decisão imediatas na adaptação do projeto, constitui também uma medida para eliminação deste risco.

Uma das formas de otimizar a presença deste risco é, nesta fase inicial da construção, analisar o enquadramento do projeto comparativamente com outros utilizados em cenários geotécnicos semelhantes; e, por outro lado, implementar revisões periódicas ao mesmo, com inclusão de novos dados entretanto disponíveis ao longo da construção.

O **R1.13** nunca pode ser garantidamente eliminado; contudo a sua mitigação pode ser feita recorrendo à implementação de metodologias, que integradas no ciclo de escavação, não constituem perdas de tempo de execução significativas, mas são importantes neste aspeto. Por exemplo a realização de prospeção destrutiva na frente de escavação, numa extensão de 15-20 m, possibilita a deteção de passagens de maciço de diferente resistência à furação ou de ocorrência de água.

Outra das metodologias que pode ser implementada, mas com um comprimento de prospeção pequeno, limitada ao comprimento do avanço de escavação seguinte, é o acompanhamento dos furos para utilização de explosivos (furação para a pega de fogo), onde o objetivo é o mesmo da prospeção, mas com menor comprimento.

A prospeção em avanço, recorrendo a furação destrutiva, é rápida de executar e não requer equipamento de furação extra relativamente ao utilizado no ciclo de escavação com explosivos, enquanto a furação com recolha de amostra contínua obriga a paragem prolongada dos trabalhos de escavação e à mobilização de equipamento de furação adicional, embora a qualidade da informação recolhida seja superior.

A eliminação do **R1.14** passa pela inclusão de técnicos experientes e especialistas no organograma das entidades envolvidas na fase construtiva, nos vários domínios do conhecimento, necessários à construção.

Uma das medidas para otimizar a presença de técnicos experientes e especialista no acompanhamento da execução de túneis é realizar sessões de *brainstorming* e relatórios periódicos de avanço da escavação (PAT) e cenários e soluções expectáveis para os trechos de escavação seguintes. Não sendo esta uma medida mitigadora exclusiva deste risco.

A eliminação do **R1.15** resulta na obrigatoriedade do acompanhamento em permanência por técnicos experientes, orientados por um especialista na área da geologia e geotecnia. Na fase inicial da construção devem ser definidas metodologias de acompanhamento, que permitam fundamentalmente:

- Caracterizar e complementar o conhecimento do maciço ocorrente;
- Analisar de modo integrado a qualidade do terreno com os indícios de instabilidade;
- Antever cenários prováveis de ocorrer para os trechos de escavação seguintes;
- Análise das eventuais deformações do maciço.

Como medida de otimizar estes elementos, é necessário implementar procedimentos para interligar o trabalho desenvolvido neste acompanhamento geológico e geotécnico e, na gestão de riscos geotécnicos, no sentido de mitigar ou eliminar os riscos presentes.

As medidas a implementar para eliminar o **R1.16** devem basear-se na seleção de entidades executantes, que contem com técnicos e operacionais experientes neste tipo de obras, com meios adequados e que tenham em consideração o conhecimento disponível sobre a obra e o cenário geológico e geotécnico em que se insere. Com isto é possível uma visão realista das condições e condicionalismos existentes e uma adequada programação dos trabalhos.

Para otimizar a resolução deste risco, as pessoas afetas à construção devem ter formação constante e partilhar informação entre si.

Como medida de eliminação do **R1.17** importa salientar a relevância da definição de meios de comunicação e circuito de informação, que permita a emissão de níveis de aviso ou de alerta imediatos, na eventualidade de se verificarem situações graves, preferencialmente com confirmação de entrega e de receção de informação por parte dos intervenientes.

6.1.4 Riscos residuais

Como referido no Capítulo 2, o risco residual é remanescente da aplicação das medidas de controlo, ou seja, tendo em consideração os critérios ALARP, constitui a parte do risco que não se consegue eliminar, ou não é economicamente viável a respetiva eliminação e com o qual é necessário conviver. Para a situação de início da fase construtiva, tendo em consideração os riscos apresentados na Tabela 6.1, indicam-se de seguidas os potenciais riscos residuais que continuam presentes.

O risco residual do **R1.1** resulta da impossibilidade de eliminar os riscos que, por exemplo, implique uma nova localização ou traçado dos túneis.

O risco residual do **R1.2** resulta da eventualidade de surgirem cenários geológicos imprevistos ou imprevisíveis e da impossibilidade de desenvolver ou analisar os elementos disponíveis por falta de tempo ou de meios.

Como risco residual do **R1.3** identifica-se a eventualidade de surgirem condições geológicas não identificadas, como sejam, a presença de falhas e zonas tectonizadas, entre outras.

Os riscos residuais do **R1.4** resultam da eventual impossibilidade de contornar aquíferos com um novo traçado ou localização do túnel. Outro dos riscos residuais deriva da impermeabilização do maciço,

onde a presença de água no seu interior, leva a um acréscimo de pressão na superfície escavada, pelo que a contenção aplicada deve considerar este fator. Relativamente ao congelamento da água, para além dos avultados custos envolvidos, a expansão da água nas descontinuidades pode levar a um decréscimo de qualidade do maciço por crioclastia, pelo que o processo de descongelamento só deve ocorrer após aplicação da contenção, que deve estar dimensionada para responder a este fenómeno.

Como risco residual do **R1.5** surge a impossibilidade económica de eliminar riscos que existam no alinhamento dos túneis, como zonas com fracas características geomecânicas uma vez que, nesta fase, é às vezes difícil mudar a localização dos emboquilhamentos dos túneis. A ocorrência de cenários geotécnicos não previstos continua a ser uma possibilidade, o que também constitui um risco residual.

O **R1.6** é eliminado pela implementação das medidas de controlo do risco, pelo que não existe risco residual.

O risco residual presente no **R1.7** relaciona-se com a possibilidade de definição desajustada de cada zonamento, quer nas características admitidas como representativas, quer nas medidas de contenção preconizadas para cada zona.

Como risco residual do **R1.8** encontra-se a possibilidade de ocorrência de um cenário geotécnico não previsto que leve a um comportamento inesperado do terreno, incluindo o seu colapso.

Relativamente ao **R1.9**, qualquer plano de instrumentação tem como risco residual a possibilidade de ocorrerem deformações excessivas entre pontos observados e que podem originar situações gravosas de colapso da escavação com consequências para pessoas e equipamentos e ao nível do prazo de execução e financeiras.

No controlo do **R1.10** fica como residual a possibilidade de ocorrência de deformações excessivas entre leituras sucessivas, ou seja, independentemente do intervalo de tempo entre leituras, há a possibilidade de ocorrer instabilização da escavação sem que a mesma seja detetada atempadamente.

A gestão do **R1.11** implica a existência de um risco residual resultante de falha na amostragem realizada na fase de projeto, onde as características admitidas para o terreno podem ser diferentes das observadas; no entanto, mesmo nesta situação, o MO prevê a adaptação do projeto às reais condições observadas; contudo esta pode não ser imediata.

Mesmo aplicando medidas de mitigação ou eliminação para o **R1.12**, continua a existir a possibilidade de ocorrência de cenários geotécnicos não previstos e imprevisíveis, pelo que estes constituem o risco residual.

Na gestão do risco **R1.13**, mesmo recorrendo a prospeção na frente de escavação e como esta é pontual, pode não detetar a presença de estruturas que sejam subparalelas ao eixo e cuja interseção com a escavação se dê numa zona não abrangida pela prospeção.

Como risco residual inerente ao **R1.14** indica-se a possibilidade de falta de comunicação entre entidades, técnicos e especialistas, ou de concentração da informação, que provoque desconhecimento

da possibilidade de ocorrência de situações já identificadas e, como tal, tomadas de decisão mal fundamentadas, sem base técnico-científica.

O principal risco residual identificado no **R1.15** é o de utilização de metodologias demasiado complexas, ou simplistas que se revelem incompletas, inviabilizando uma transmissão clara de informação aos restantes elementos e entidades envolvidas na execução.

O principal risco residual do **R1.16** decorre da impossibilidade, quer de justificar adaptações do projeto às reais condições observadas, quer de mobilização de equipamentos ou por avaria dos mesmos.

Com um sistema devidamente concebido e em funcionamento pleno, o risco residual inerente ao **R1.17** resume-se a falha humana ou de falha dos sistemas de comunicação.

6.2 TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR

Para análise de risco no trecho de túnel a escavar é realizada uma abordagem preferencialmente matemática, baseada nos elementos disponíveis dos casos de estudo, onde se pretende estimar a heterogeneidade inerente aos maciços rochosos.

Com esta abordagem, fica disponível uma base estatística de métodos de estimação mais eficientes e alguns resultados, como sejam as probabilidades de ocorrência de RMR ao longo da escavação e de cada classe de qualidade do maciço, para servir de apoio a novos projetos onde os elementos sobre a qualidade do terreno sejam pouco conhecidos.

Nenhum modelo matemático aplicado à variação dos maciços rochosos é isento de erro e de incerteza no resultado, como tal torna-se necessário a adoção de medidas complementares para verificar a qualidade do terreno estimado.

Nesta metodologia é particularmente relevante estudar pormenorizadamente as zonas com características geotécnicas mais fracas e que são penalizadoras para a estabilidade do túnel. Conforme já referido, são estas as mais sensíveis, onde a estabilidade do terreno é mais precária e que carecem de intervenção mais célere.

Às vezes a variação do terreno dá-se de forma abrupta, num curto espaço, mas como a diferença de resistência do maciço é significativa, torna-se possível detetá-la com furação em avanço, mesmo que destrutiva, o que torna a intervenção rápida de executar e facilmente integrável no ciclo de escavação.

Nas secções seguintes é realizada a deteção dos riscos presentes no trecho a escavar e a sua análise recorrendo a uma árvore de eventos e à probabilidade de ocorrência do valor do RMR no avanço seguinte da escavação. Perante a análise realizada é feita a avaliação dos riscos ocorrentes e apresentam-se na sequência algumas medidas para controlo dos riscos, com o objetivo principal de os eliminar, mas no caso de impossibilidade, de os mitigar no mínimo.

6.2.1 Detecção e análise de riscos

A variação da qualidade do maciço constitui um dos maiores perigos no trecho a escavar, para sua detecção durante o acompanhamento técnico da escavação, numa primeira abordagem pode ser analisada a variação de alguns dos parâmetros com particular relevância na alteração geral da qualidade do maciço, mas ressalva-se que tal apenas é possível se esses parâmetros apresentarem uma variação progressiva ao longo do comprimento da escavação.

Conforme resultados apurados no Capítulo 5 e resumidos na Tabela 5.6, o principal parâmetro que apresenta uma variação progressiva e permite antever a alteração da qualidade geral do maciço é o que reúne as características das descontinuidades.

Numa abordagem mais científica, baseada em elementos matemáticos de estimação da qualidade do terreno em antecipação, utiliza-se informação sobre a qualidade do maciço representada pelo valor de RMR e a sua variação ao longo da escavação o que, conforme se apresenta seguidamente, permite quantificar o risco presente.

Para análise do risco de heterogeneidade do maciço é apresentada uma árvore de eventos e dados estatísticos sobre a variação do valor de RMR, entre a frente de escavação presente e o trecho seguinte a escavar. Embora a simples apresentação de dados estatísticos não se possa considerar uma metodologia de análise de riscos, é aqui enquadrada porque permite quantificar a variação da qualidade do terreno para a frente seguinte.

É necessário ter presente que nesta investigação, para simplificação dos modelos, apenas foram considerados estes elementos para analisar a possibilidade de variação do maciço, mas não são os únicos habitualmente disponíveis, indicando-se, a título de exemplo, a presença de falhas identificadas, quer à superfície, quer na prospeção em profundidade, ou a extrapolação do cenário observado na escavação de outras galerias. Outro dos fatores indiciadores de eventuais riscos é o aumento da afluência de água ao interior da escavação.

6.2.1.1 Árvore de eventos

No domínio da heterogeneidade do maciço e tendo por base os casos cinco de estudo considerados, apresenta-se na Tabela 6.2 a probabilidade de ocorrência da qualidade do terreno na frente seguinte, depois de conhecida a classe em que se enquadra o maciço da frente atualmente observada.

Para exemplificar, quando na presença de uma frente de escavação que, pelas características apresentadas pelo maciço, é enquadrada na classe I, a probabilidade da frente seguinte se enquadrar na mesma classe é de 0,61, na classe II de 0,38 e na classe III de 0,01. Em caso algum se verificou o terreno passar de um maciço enquadrado em classe I para um maciço enquadrado em classe IV ou classe V; contudo, do ponto de vista teórico, essa possibilidade existe, por exemplo nas situações de falhas geológicas em que uma das paredes permanece resistente a delimitar a caixa, com material de fracas características geomecânicas.

Tabela 6.2 – Probabilidade de ocorrência de cada classe de qualidade do maciço ao longo de um túnel

Classe de qualidade na frente		Observada				
		I	II	III	IV	V
Seguinte	I	0,61	0,01	0,01	0,01	0,00
	II	0,38	0,82	0,16	0,03	0,06
	III	0,01	0,16	0,79	0,27	0,06
	IV	0,00	0,01	0,04	0,67	0,32
	V	0,00	0,00	0,00	0,02	0,56

Tendo em conta o método de estimação mais eficiente determinado para a globalidade dos casos de estudo, a krigagem, apresenta-se na Tabela 6.3 a probabilidade de estimar corretamente a classe em que se enquadra a frente seguinte.

Tabela 6.3 – Probabilidade de estimar corretamente a classe de qualidade do maciço em avanço

Classe de qualidade na frente		Observada				
		I	II	III	IV	V
Seguinte	I	0,51	0,05	0,01	0,00	0,00
	II	0,46	0,83	0,16	0,04	0,00
	III	0,03	0,12	0,79	0,31	0,12
	IV	0,00	0,00	0,04	0,63	0,44
	V	0,00	0,00	0,00	0,02	0,44

A representação em árvore de eventos – Figura 6.1, associada a uma análise quantitativa permite determinar o nível de risco intrínseco a cada situação, onde a variação brusca de classe, embora de probabilidade de ocorrência reduzida, representa os maiores danos associados ao risco. Isto pode ter como principais consequências um défice ou um excesso de meios disponíveis.

No caso de o terreno variar bruscamente de qualidade boa para fraca, os meios que se encontram mobilizados na frente de escavação podem ser insuficientes para uma resposta imediata na aplicação de contenção para a estabilização do terreno. Inversamente, se o terreno varia de qualidade fraca para boa, podem estar disponíveis meios em excesso que atrasem o processo executivo e levem a uma quebra de produtividade.

Perante um maciço, presente na frente de escavação, enquadrado na classe I, o mais provável ($p=0,61$) é na frente seguinte se encontrar na mesma classe I, sendo que a probabilidade de estimar corretamente pelas metodologias utilizadas é no máximo de 0,51. Quanto à probabilidade do terreno

variar as suas características, que levam à sua integração na classe II no avanço seguinte, é de 0,38, sendo a probabilidade de a estimar corretamente em antecipação, ou seja de prever essa variação do maciço, de 0,46. A variação direta de um maciço enquadrado na classe I para a classe III tem uma probabilidade de ocorrência de 0,01, sendo a capacidade de prever em antecipação de 0,03. Relativamente à probabilidade de um maciço variar diretamente de classe I para classe IV ou classe V é quase nula, não se tendo registado qualquer situação destas nos casos de estudo considerados.

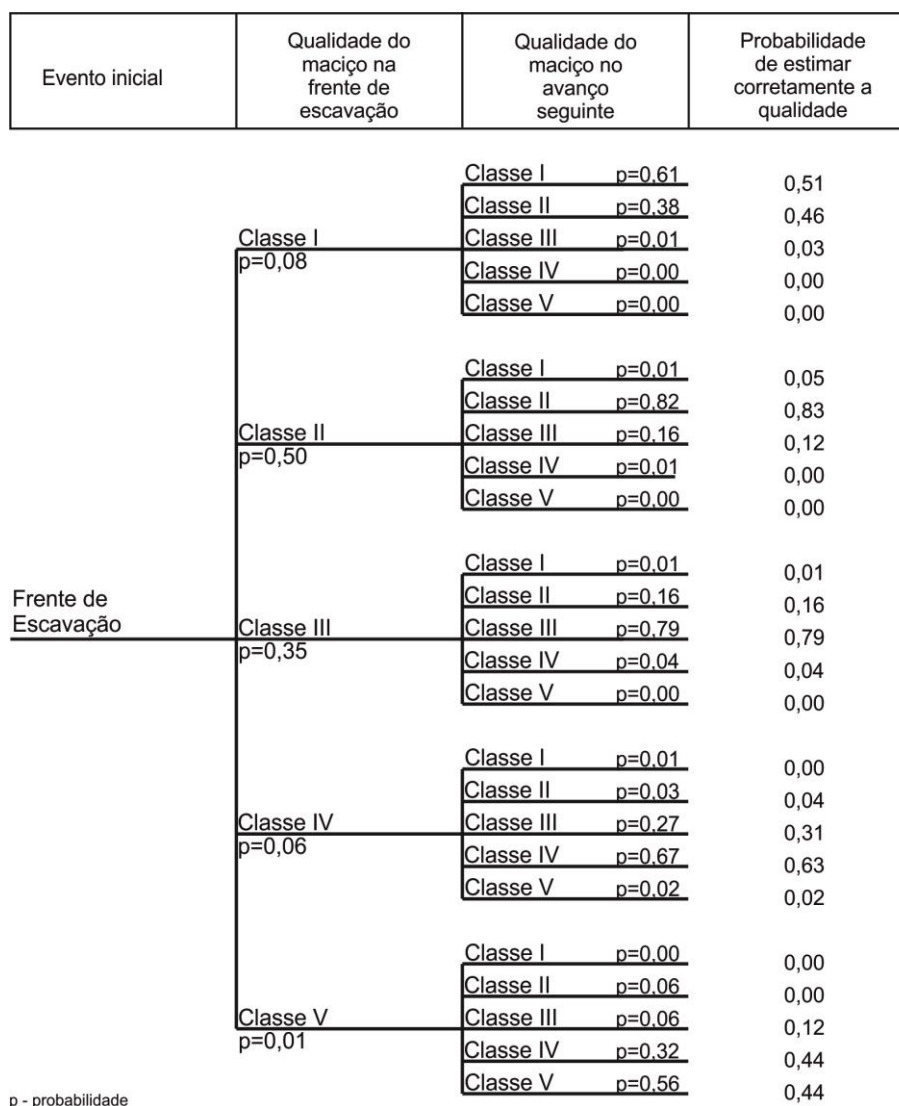


Figura 6.1 – Árvore de eventos com probabilidade de ocorrência de uma classe de qualidade do maciço e probabilidade de a estimar adequadamente, obtida por krigagem

Quando as características do maciço presente na frente de escavação levarem ao seu enquadramento em classe II, a probabilidade do maciço no avanço seguinte pertencer igualmente em classe II é de 0,82, sendo a capacidade de estimar corretamente em antecipação de 0,83. A variação no sentido de melhoria da qualidade do maciço, que leve à sua integração em classe I representa uma probabilidade de ocorrência de 0,01, sendo a probabilidade de estimar esta variação em antecipação de 0,05. Quanto

à variação da qualidade do terreno no sentido de características mais fracas, pertencente à classe III, verifica-se uma probabilidade de 0,16, sendo a probabilidade de estimar corretamente esta alteração de 0,12. Uma variação mais acentuada com passagem diretamente, de classe II, para classe IV, tem uma probabilidade de ocorrência de 0,01, e uma probabilidade de se estimar corretamente essa variação com as metodologias utilizadas nesta investigação, quase nula. Já a probabilidade do terreno passar de classe II para classe V é quase nula, não tendo ocorrido em nenhuma situação dos casos de estudo.

Perante um maciço com características que levam ao seu enquadramento na classe III, a probabilidade do maciço no avanço seguinte permanecer na mesma classe é de 0,79, sendo estimado corretamente com uma probabilidade de 0,79. A variação da qualidade do maciço de classe III para classe II, numa melhoria de características, tem uma probabilidade de 0,16, sendo estimado corretamente com uma probabilidade de 0,16. Já a variação direta de um maciço que se insira em classe III para classe I apresenta uma probabilidade de 0,01, com uma probabilidade de estimar corretamente em antecipação, recorrendo às metodologias utilizadas nesta investigação, quase nula. Quanto à variação da qualidade do terreno para piores características, que levem à sua integração na classe IV, apresenta uma probabilidade de ocorrência de 0,06, com uma probabilidade de estimar corretamente esta variação em antecipação de 0,04. O aparecimento de características do maciço, muito mais fracas, que levem à passagem direta de classe III para classe V, tem uma probabilidade de ocorrência quase nula.

Um maciço pertencente à classe IV numa frente de escavação apresenta uma probabilidade de 0,67 de permanecer com características semelhantes na frente seguinte, sendo a probabilidade de estimar corretamente com base nas metodologias utilizadas nesta investigação, de 0,63. A variação da qualidade do maciço de classe IV para classe III, numa melhoria de características, tem uma probabilidade de ocorrência de 0,27, sendo estimado corretamente com uma probabilidade de 0,31. Já a variação direta de um maciço que se insira em classe IV para classe II apresenta uma probabilidade de 0,03, com uma probabilidade de estimar corretamente em antecipação de 0,04. Uma variação direta de um maciço pertencente à classe IV para classe I nunca ocorreu nos casos de estudo considerados, pela que a probabilidade associada é quase nula. Quanto à variação da qualidade do terreno para piores características, pertencente à classe V, apresenta uma probabilidade de ocorrência de 0,02, com uma probabilidade idêntica de ser corretamente estimada.

Uma frente de escavação que apresente um maciço com muito fracas características para a abertura de túneis, que leve ao seu enquadramento na classe V, apresenta uma probabilidade do maciço no avanço seguinte ter características idênticas de 0,56, sendo a probabilidade de estimar corretamente em antecipação de 0,44. A passagem do maciço de classe V para classe IV no avanço seguinte, ocorre com uma probabilidade de 0,32, com uma probabilidade de estimar corretamente esta variação, de 0,44. Quanto à variação da qualidade do maciço de classe V para classe III, apresenta uma probabilidade de 0,06, que é idêntica à passagem direta em avanços consecutivos de classe V para classe II; contudo as probabilidades de estimar corretamente estas variações são respetivamente 0,12 e

nula. Quanto à passagem direta de um maciço pertencente à classe V a um enquadrado em classe I é quase nula, não se tendo registado em nenhuma situação dos casos de estudo considerados.

6.2.1.2 Probabilidade de ocorrência de RMR

Para calcular a variação do valor de RMR de uma frente de escavação observada para a seguinte (a escavar), apresenta-se no Apêndice X os valores observados na frente seguinte tendo em conta o valor de RMR observado na frente atual, isto é, a título de exemplo, perante uma frente de escavação em que o maciço exibe um RMR de 50, apresentam-se os valores de RMRobs na frente seguinte. Isto permite determinar a probabilidade de ocorrência do RMR na frente seguinte.

Os elementos constantes no Apêndice X resultam do observado nos casos de estudo, pelo que não existem dados de valores de RMR inferiores a 13, nem dos valores 14 e 21 (os gráficos destes dois valores encontram-se, no Apêndice X, propositadamente em branco para mostrar que se trata da ausência de valores e não de lapso de inclusão), bem como não existem registos de valores de RMR superiores a 95, porque também nunca se verificaram nos casos analisados.

A compilação de todos os elementos constantes no Apêndice X resulta na Figura 6.2, onde se torna evidente o valor de RMR mais provável de ocorrer na frente seguinte com base no observado na frente atual, assim como a dispersão de probabilidade em torno desse valor, a qual difere ao longo da escala de valores de RMR, encontrando-se valores onde a maior probabilidade de se concentrarem em torno do valor médio e, outros, onde há maior dispersão, isto é, situações onde o desvio padrão é menor e outras onde é maior.

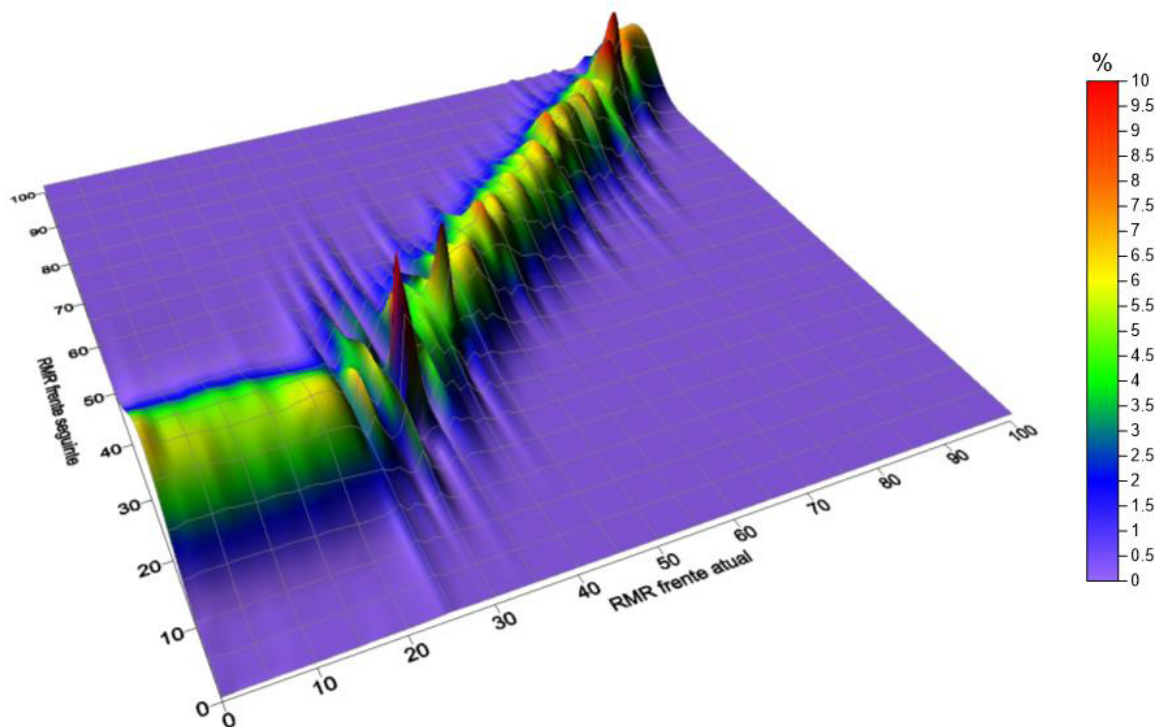


Figura 6.2 – Gráfico de probabilidade de ocorrência do valor de RMR na frente seguinte com base no valor de RMR observado da frente atual

Com base nos elementos disponibilizados na Figura 6.2 e Apêndice X, verifica-se ainda que, até ao valor de RMR de 36, a representatividade estatística e probabilística é reduzida, pelo que a determinação de valores com exatidão é diminuta, acontecendo situação idêntica para valores de RMR superiores a 90.

6.2.2 Avaliação de riscos

6.2.2.1 Árvore de eventos

Tendo como base a **árvore de eventos** apresentada na Figura 6.1, onde consta a probabilidade de ocorrências das várias classes de qualidade do maciço, conjugada com a probabilidade de ocorrência de cada uma das classes no avanço, verificam-se os cenários que seguidamente se descrevem.

Na situação de um maciço enquadrado em classe I variar bruscamente para uma qualidade de terreno enquadrada em classe IV ou V seria de consequências potencialmente catastróficas (5), mas apresenta uma probabilidade de ocorrência muito reduzida (1), resultando um risco de nível médio (5).

Na situação do maciço enquadrado na classe II, à semelhança do verificado para a situação de classe I, as variações bruscas de qualidade do terreno são de probabilidade reduzida (1) e as consequências também potencialmente catastróficas (5), o que resulta num risco de nível médio (5).

Perante um maciço de características moderadas para a abertura de túneis, verifica-se que o mais provável é o maciço permanecer com condições idênticas na frente seguinte; contudo, em caso de variação, a probabilidade de se verificar uma melhoria da qualidade é ligeiramente superior à probabilidade do maciço ocorrer com pior qualidade, mas constata-se que variações bruscas quer no sentido de melhoria, quer no sentido de condições mais fracas são de probabilidade muito reduzida (1) e embora as consequências potenciais fossem catastróficas, o nível de risco é médio (5).

A probabilidade de um maciço enquadrado na classe IV variar no trecho de escavação seguinte para uma situação de piores características, que levem ao seu enquadramento em classe V é reduzida (1) e embora as consequências sejam catastróficas (5), o nível de risco é médio (5). Relativamente à probabilidade das características do terreno melhorarem, é elevada, mas as consequências envolvidas são poucas, podendo resultar excesso de contenção aplicada, com o inerente custo e tempo de execução associado, mas não coloca em causa a estabilidade da escavação, pelo que o risco geotécnico resultante é reduzido.

6.2.2.2 Probabilidade de ocorrência de RMR

A avaliação da probabilidade de variação da qualidade do maciço tendo por base a Figura 6.2, onde consta a percentagem de **ocorrência dos valores de RMR no avanço seguinte** da escavação, uma vez conhecido o valor de RMR da frente atualmente observada, revela que a variação em torno de valor idêntico ao da frente atual é reduzida e que é possível identificar um intervalo onde se observa a

maioria das ocorrências, sendo que valores de RMR inferiores a 36 e superiores a 90 têm pouco significado estatístico. É possível ainda constatar que para valores de RMR superiores a 80, há um risco da variação da qualidade do terreno ser maior, evidenciado por maior dispersão dos resultados prováveis de ocorrer, assim como para valores de RMR inferiores a 40.

Significa isto que o risco de ocorrer variação do valor de RMR no avanço seguinte é maior quando o valor de RMR observado na frente atual é inferior a 40 ou superior a 80. Para valores de RMR na frente atual entre 40 e 80, também existe possibilidade de variação do valor de RMR na frente seguinte, mas com menor dimensão.

6.2.3 Medidas de controlo

6.2.3.1 Árvore de eventos

Considerando a Figura 6.1 e a avaliação realizada para os riscos presentes, verifica-se que a passagem brusca de classe I para outras inferiores, apesar da probabilidade ser baixa, pode sempre ocorrer a variação de um terreno de boa qualidade para um muito fraco, o que significa que os meios necessários para aplicar contenções em maior quantidade ou específicas de terreno de qualidade muito fraca devem estar de prevenção.

O risco de variação brusca do maciço de classe II para inferiores encontra-se sempre presente e não pode ser eliminado, mas pode ser mitigado, tendo de prevenção os meios necessários para intervenção atempada em caso de variação brusca, particularmente para uma situação de qualidade fraca.

No caso de um maciço de qualidade intermédia, as medidas necessárias para mitigar o risco de variação brusca da qualidade do maciço passam por ter de prevenção os meios e equipamentos necessários para ultrapassar, quer as situações gravosas de instabilidade da escavação, assim como para a possibilidade do terreno apresentar muito boa qualidade que se possam otimizar meios, com a sua mobilização para outras frentes de trabalho.

Perante um maciço de características fracas enquadrado na classe IV, a variação brusca da qualidade do maciço tem baixa probabilidade de ocorrência, podendo levar à desmobilização de equipamentos que apenas sejam utilizados em situações de maciço de muito boa qualidade para a abertura de túneis; contudo, os mesmos devem continuar de prevenção.

O risco de variação brusca da qualidade do terreno de características fracas para boas é de probabilidade reduzida, pelo que as medidas mitigadoras passam por desmobilizar, mantendo de prevenção alguns meios utilizados para construção do túnel em condições de maciço de melhor qualidade.

6.2.3.2 Probabilidade de ocorrência de RMR

Perante a probabilidade de ocorrência do valor de RMR na frente seguinte, tendo em consideração o observado na frente atual, constante na Figura 6.2, as medidas a implementar têm maior relevância para as situações em que ocorre RMR inferior a 40 ou superior a 80, sendo no primeiro caso aconselhável ter meios de prevenção para intervenção imediata de aplicação de contenção e, no segundo, ter presente que a qualidade do maciço é boa, mas a possibilidade de variação é elevada. Significa isto que, abaixo e acima dos limites de RMR referidos, respetivamente 40 e 80, é necessário ter meios de prevenção que permitam adequar as metodologias à possibilidade de variação da qualidade do terreno.

No caso de se utilizarem metodologias para estimar aquela qualidade em antecipação e os resultados mostrem variação do maciço, seja no sentido da sua melhoria ou do seu enfraquecimento, é necessário implementar medidas para mitigar riscos que possam ocorrer devido à utilização indevida de meios e recursos, que levam a gastos desnecessários.

Em caso de melhoria na qualidade do terreno é importante um alívio dos meios disponíveis que possam causar limitações de espaço ou de ações na obtenção da máxima produtividade, como sejam os equipamentos específicos para aplicação de contenções pesadas, como os perfilados metálicos, ou a quantidade de autobetoneiras para uma resposta célere à aplicação de maior espessura de betão projetado. Desta forma é possível economizar recursos financeiros com equipamentos e outros meios desnecessários.

Em caso de diminuição da qualidade do maciço, é necessário preparar os meios necessários para intervenções com maior celeridade para colocação da contenção e, às vezes, até implementação de medidas pré-estabilizadoras do terreno, pelo que a mobilização atempada desses meios (equipamento, materiais e recursos humanos) é fundamental para garantir a estabilização da escavação.

A implementação de medidas pré-estabilizadoras implica, numa primeira fase, a identificação da presença de um terreno de características muito fracas e/ou com grande afluência de água, que coloquem em causa a estabilidade da escavação. Nestas situações, habitualmente, verifica-se um tempo de autossustentação do terreno muito reduzido. Este tipo de intervenções habitualmente implica uma apreciação e decisão por parte das várias entidades envolvidas na obra.

É fundamental ter presente que as metodologias utilizadas que servem de base ao cálculo de risco resultam da utilização de modelos para caracterizar o terreno em antecipação e que nenhum modelo desenvolvido é isento de erro e de incerteza no resultado, como tal torna-se necessária a adoção de medidas complementares para verificar a qualidade do terreno estimado, como seja a realização de prospeção em avanço.

Esta verificação da qualidade do terreno em antecipação é particularmente importante quando:

- Há suspeitas de variação das características do maciço;
- O maciço apresenta características geomecânica fracas;

- Os estudos realizados nas fases anteriores indicam a presença de estruturas geológicas potencialmente adversas, como por exemplo falhas.

Perante a iminência de zonas tectonizadas, frequentemente a variação das características do maciço dá-se de forma abrupta num espaço curto, mas como nestas situações, habitualmente, a diferença de resistência do maciço é significativa, torna-se possível detetá-la com furos de prospeção em avanço, mesmo que sejam destrutivos.

6.2.4 Riscos residuais

O risco residual presente relaciona-se principalmente com o erro de estimação da qualidade do terreno em antecipação, o qual foi calculado e apresentado no Capítulo 5. De referir que, de entre as metodologias estudadas para estimar a qualidade do terreno em antecipação, conforme já concluído, a krigagem é a mais eficiente, com um erro de -0,136 e desvio padrão de 4,282.

A presença de risco na estimação da qualidade do maciço significa que há sempre possibilidade da heterogeneidade do maciço não ser detetada em antecipação, mesmo recorrendo a outras metodologias, como a prospeção em avanço, o que constitui um risco residual, com o qual é necessário conviver.

6.3 FRENTE DE ESCAVAÇÃO

O cenário da frente de escavação encerra riscos principalmente relacionados com as características geológicas e geotécnicas do maciço ocorrente, que ditam a necessidade de intervenção para aplicação de contenção e, quanto piores as condições encontradas, menor o tempo disponível para a realizar. Por outro lado, há riscos relacionados com os procedimentos executivos realizados na frente de escavação. Seguidamente apresentam-se os riscos detetados nos cinco casos de estudo, assim como alguns disponíveis na bibliografia, os quais são analisados recorrendo a uma lista de verificação, a uma árvore de falhas para sistematizar as interligações que levam ao colapso da escavação e a duas árvores de eventos.

Os riscos detetados e analisados são avaliados e na sequência referem-se as medidas de controlo para a sua eliminação, sempre que possível, ou em caso de impossibilidade para a sua mitigação. Por fim, são apresentados os principais riscos residuais.

6.3.1 Detecção e análise de riscos

Os perigos ocorrentes na frente de escavação têm como eventual consequência promover o colapso da escavação, com possibilidade de afetar pessoas e equipamentos, assim como levar a gastos financeiros desnecessários em materiais e outros recursos com a reparação da situação.

Tendo por base a deteção de riscos nos casos de estudo constante no Capítulo 5, nesta secção são apresentados os principais riscos presentes na frente de escavação, assim como as metodologias para a sua deteção e é descrita uma análise dos potenciais riscos em lista de verificação, árvore de falhas e árvores de eventos.

6.3.1.1 Lista de verificação

Os riscos geotécnicos presente na frente de escavação resultam não só das condições do terreno, mas também dos procedimentos e metodologias executivas, assim como a capacidade de identificar a sua presença efetiva na frente de escavação, pelo que se torna importante sintetizar uma lista de verificação desses perigos que podem constituir riscos, conforme se apresenta na Tabela 6.4.

Os riscos geotécnicos detetados para a etapa da frente de escavação, à semelhança do referido para a etapa inicial da construção, também têm como consequências extremas, o colapso da escavação, e outras que daí advêm, pelo que serão referidos de modo abreviado na Tabela 6.4.

No Apêndice XI apresenta-se uma tabela integral onde, para além da análise dos riscos, também se encontram as respetivas medidas de controlo e o correspondente risco residual.

Seguidamente descrevem-se os riscos que constam da Tabela 6.4 e a forma mais adequada para detetá-los.

Tabela 6.4 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar na frente de escavação

Risco	Ocorre	Não ocorre
R2.1 - Caracterização insuficiente da frente de escavação		
R2.2 - Erro na classificação geomecânica do maciço		
R2.3 - Falha na identificação da presença de cunhas e blocos		
R2.4 - Falha na determinação do modo de rotura do maciço		
R2.5 - Ausência de controlo da afluência de água		
R2.6 - Insuficiente execução do saneamento da frente		
R2.7 - Falha na aplicação de contenção		
R2.8 - Falha no cumprimento do tempo de autossustentação na aplicação de contenção		
R2.9 - Falha no circuito de informação		

O risco **R2.1 - Caracterização insuficiente da frente de escavação** que provoque a instabilização resulta da falta de acompanhamento técnico na área da geologia e geotecnia durante a escavação de túneis, às vezes resultado de pouca experiência por parte dos técnicos neste tipo de caracterização, ou

na adoção de metodologias pouco eficazes. Isto tem como consequências a impossibilidade de identificar corretamente os fatores de instabilidade e definir a contenção necessária para garantir a estabilidade.

A detecção deste risco pode ser feita por comparação das metodologias utilizadas geralmente em acompanhamentos semelhantes noutras obras, com os efetivamente implementados. Para detecção de caracterização insuficiente é ainda necessário verificar o pormenor e exatidão com que os levantamentos são realizados, os quais devem ter como objetivo o registo da realidade da situação observada.

A caracterização da frente de escavação de um túnel, conta geralmente com a classificação geomecânica do maciço, a qual resulta da caracterização de um conjunto de parâmetros. Na recolha de dados sobre esses parâmetros e atribuição dos pesos na classificação podem ocorrer erros, o que tem como consequências a impossibilidade de enquadrar com rigor o maciço observado no devido zonamento geotécnico e determinar a contenção adequada, o que constitui o risco **R2.2 - Erro na classificação geomecânica do maciço que provoque a instabilização.**

O risco **R2.3 - Falha na identificação da presença de cunhas e blocos que provoquem a instabilização** surge na sequência de um ATO insuficiente no âmbito da geologia e geotecnia e ainda devido à falta de análise dos elementos recolhidos, porque é necessário verificar a eventualidade de se formarem cunhas que coloquem em causa a estabilidade da escavação e a potencial afetação de pessoas e/ou equipamentos.

A detecção deste risco é feita por verificação dos procedimentos de acompanhamento técnico da escavação, em particular se de imediato na frente de trabalho são identificados blocos e cunhas e dadas indicações para serem saneados ou contidos. No caso de, posteriormente, as análises cinemáticas da conjugação das descontinuidades realizadas recorrendo à projeção em estereogramas, revelem a presença de outros blocos e/ou cunhas, é necessário dar novas indicações para o respetivo saneamento ou contenção.

Os modos de rotura do maciço dependem de inúmeros fatores, de entre os quais se destacam as propriedades de cada litologia e dependendo do estado de alteração e fraturação há modos de rotura específicos, pelo que é necessário identificar as características do maciço para evitar o risco **R2.4 - Falha na determinação do modo de rotura do maciço que provoque a instabilização.** A impossibilidade de determinar os modos de rotura leva a que a contenção aplicada não seja a estritamente necessária, o que pode ter consequências de estabilidade da escavação e tempo e custos acrescidos na reparação destas situações.

A detecção deste risco pode ser feita por verificação dos procedimentos implementados no acompanhamento técnico da escavação no âmbito da geologia e geotecnia, que preveja a determinação deste fator.

O risco **R2.5 - Ausência de controlo da afluência de água que provoque a instabilização** surge por falta de medição das exurgências de água, que tem por consequências: a eventual instabilização da escavação por pressão excessiva; e falta de mobilização atempada de recursos para bombear água caso as afluências sejam significativas em túneis descendentes

A verificação dos procedimentos e devida implementação de métodos de medição dos caudais afluentes, quer recorrendo a recipientes de volume conhecido e contabilizado o tempo de enchimento, quer recorrendo a descarregadores de secção conhecida servem como forma de detetar este risco.

Entrando no domínio da implementação de procedimentos executivos, o risco **R2.6 - Insuficiente execução do saneamento da frente que provoque a instabilização** pode surgir de duas situações, ou por falta de identificação de material suscetível de queda na frente de escavação, ou por negligência na importância de retirar de todo o material que se encontre solto, após o rebentamento e remoção do escombros.

A deteção deste risco é feita pela verificação de execução do procedimento e por avaliação da presença de material solto na periferia da escavação.

O risco **R2.7 - Falha na aplicação de contenção que provoque a instabilização** resulta de erro na definição do tipo ou quantidade e qualidade da contenção ou por aplicação descuidada, habitualmente em quantidade inferior à preconizada. As consequências em caso de contenção inferior à necessária podem ir desde deformações excessivas até ao colapso da escavação.

A deteção deste risco é feita por verificação da quantidade e qualidade da contenção aplicada comparativamente com a preconizada em projeto.

Com a determinação do valor de RMR para o maciço rochoso, por relações empíricas é possível conhecer o tempo de autossustentação; contudo existe o risco **R2.8 - Falha no cumprimento do tempo de autossustentação na aplicação de contenção que provoque a instabilização** que tem como consequência a instabilidade da escavação.

Para detetar este risco é necessário verificar se o tempo de autossustentação teórico foi determinado e comparar com o tempo decorrido até aplicação da contenção prevista em projeto.

O número de técnicos e especialistas das diferentes entidades envolvidas (Dono de obra, Projetista, Fiscalização, Entidade executante) e dos restantes trabalhadores envolvidos na execução de túneis é elevada, às vezes em laboração contínua através de dois ou três turnos de trabalho, onde as equipas se revezam com pouco tempo de sobreposição para relatar os acontecimentos ocorridos, neste contexto existe o risco **R2.9 - Falha no circuito de informação que provoque a instabilização**. Para deteção do risco é necessário definir os formatos de relatório e verificar o circuito de informação, o qual deve prever uma distribuição eficiente, para que todos os envolvidos retirem as necessárias relações. Os levantamentos geológicos e geotécnicos da frente de escavação têm de ter a devida sequência de modo a que as características observadas permitam enquadrar o maciço na respetiva zona geotécnica, para a

qual o projeto deve ter preconizado a contenção adequada a ser efetivamente aplicada e todos os intervenientes têm de estar informados.

6.3.1.2 Árvore de falhas

Conforme referido na Secção 2.1.3.2, as árvores de falhas podem ser utilizadas como método de identificação de eventos associados à ocorrência de uma falha do sistema.

No caso da execução de túneis, a falha mais relevante conforme se representa na Figura 6.3 é a instabilidade e o conseqüente colapso, situação que resulta de três fatores principais:

- falta de conhecimento das características do maciço, quer pela sua complexidade e impossibilidade de o conhecer devidamente, quer por defice ou ausencia de estudos;
- falha técnica, quer de dimensionamento do projeto para garantir a estabilidade, quer por falha na caracterização durante o acompanhamento da obra;
- falha de procedimentos, por erros de abordagem ou procedimentos construtivos inadequados, limitados ou pouco dinâmicos face às exigências do maciço rochoso.

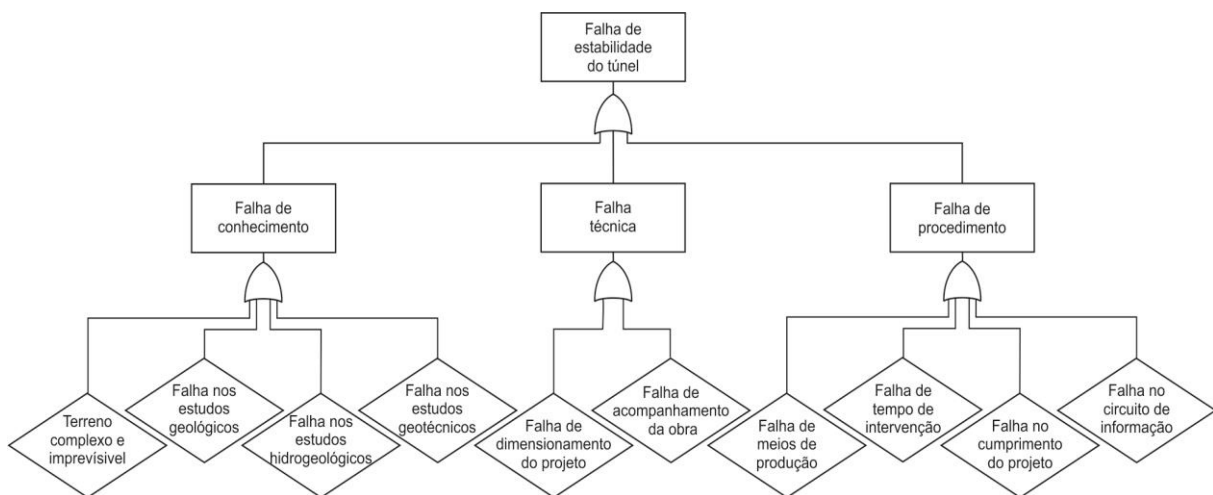


Figura 6.3 – Árvore de falhas com a sistematização de alguns eventos na origem da instabilidade da escavação

Neste processo é relevante referir que, às vezes, as condições existentes no interior dos túneis são deficientes em termos de visibilidade por fraca iluminação, poeiras, défice de ventilação e de estabilidade inerente às condições do terreno que, por razões de segurança, levam à limitação de contacto direto com a frente de escavação. Nestas condições há dificuldades na realização de levantamentos geológicos e geotécnicos rigorosos e de pormenor. Por outro lado, a dinâmica de execução não permite a adoção de metodologias que, pela sua complexidade, sejam morosas de implementar.

Uma situação amplamente reportada na bibliografia (Diederichs, 1999; Babendererde, *et al.*, 2004; Seidenfub, 2006; Hoek, 2007; Shahriar, *et al.*, 2008) e que também se verificou em alguns casos de

estudo é a conjugação de fatores puramente geológicos e geotécnicos que levam ao colapso da escavação, como são a presença de zonas tectonizadas que podem ter as seguintes características:

- Rocha de baixa resistência;
- Estado de alteração elevado;
- Descontinuidades próximas com baixo ângulo de atrito;
- Permeabilidade elevada.

Esta situação também poderia ser representada numa árvore de falhas, mas dada a sua simplicidade, com entrada de apenas quatro ramos, considera-se desnecessário.

6.3.1.3 Árvores de eventos

Para esta situação da frente de escavação, uma análise de riscos geotécnicos recorrendo a árvores de eventos é relevante para uma perceção mais clara e organizada da interligação entre eventos com potencialidade de levar à ocorrência de riscos.

Neste caso, não foi possível calcular a probabilidade associada a cada um recorrendo a uma análise semiquantitativa, pela verosimilhança de ocorrência dos eventos e suas consequências, baseando-se os valores atribuídos à experiência do autor em obras semelhantes, resultando numa metodologia de aproximação que se pretende realista ao objetivo pretendido.

Na análise são tidas como base as descrições para a verosimilhança, consequência e nível de risco, revelada respetivamente nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.4.

Tendo em consideração o acompanhamento técnico dos casos de estudo apresentados desenvolveu-se uma árvore de eventos com a análise de risco geotécnico semiquantitativo dos acontecimentos que levam à falha do sistema na frente de escavação; contudo, foi necessário dividir as situações em duas, a saber:

- Colapso generalizado;
- Colapso parcial - queda isolada de blocos e/ou cunhas.

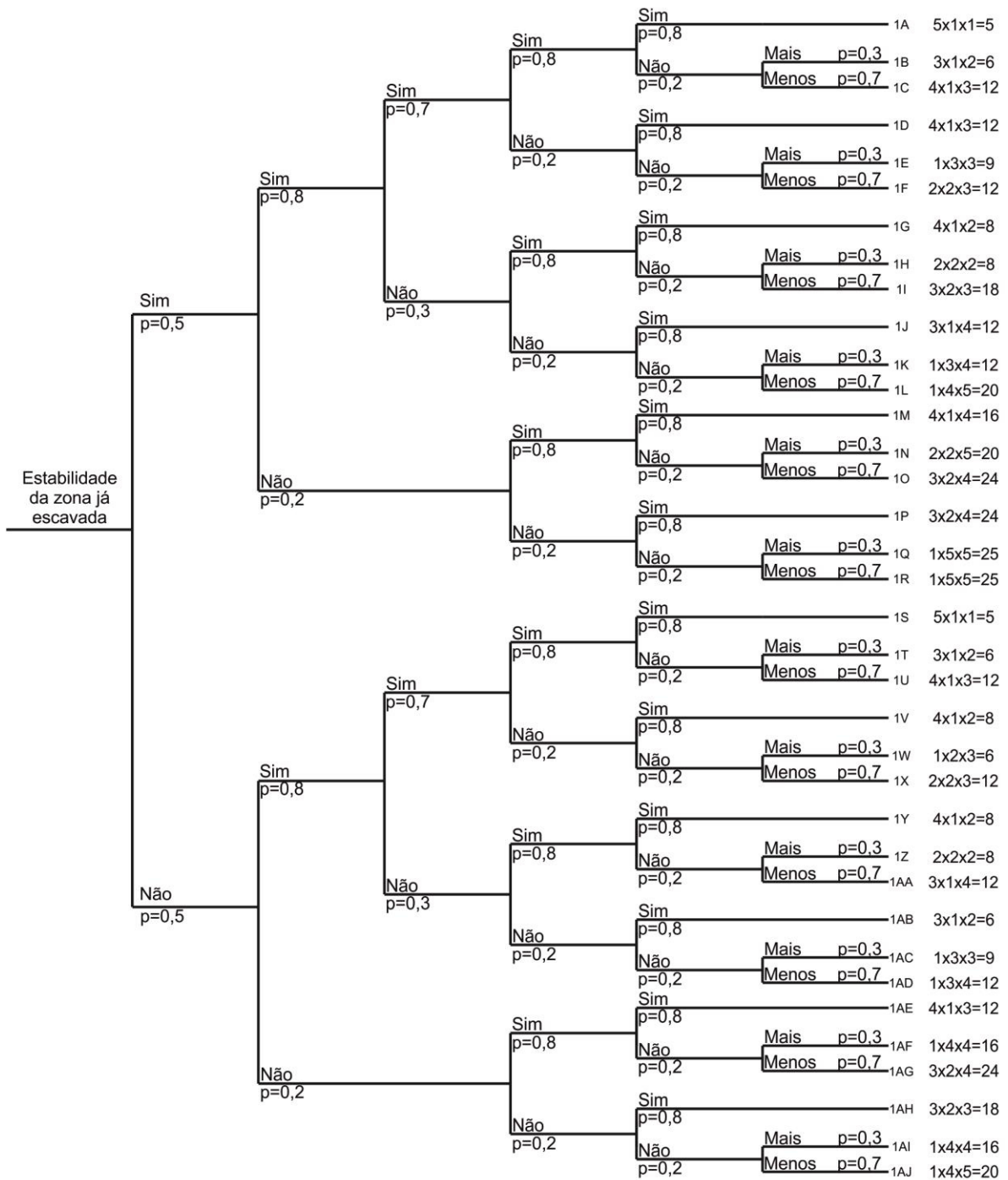
Para análise da estabilidade do túnel face ao comportamento do maciço, relacionado com as tensões elevadas e que levam ao colapso generalizado, foi desenvolvida a árvore de eventos constante na Figura 6.4.

Para esta árvore foram considerados os eventos considerados mais relevantes para controlar a estabilidade da escavação, nomeadamente:

- i. Afluência de água com caudal significativo;
- ii. Realização da classificação do maciço;
- iii. Verificação da classificação recorrendo a uma segunda classificação;
- iv. Aplicação da contenção dentro do tempo autoportante teórico;

- v. Aplicação da quantidade e qualidade de contenção prevista no projeto;
- vi. No caso de aplicação de contenção diferente da definida em projeto, verificar se foi colocada em excesso ou déficit.

Evento inicial	Afluência significativa de água	Utilização de uma classificação	Verificação com 2ª classificação	Aplicação de contenção dentro do tempo autoportante	Aplicação da contenção definida em projeto	Quantidade de contenção diferente do projeto	Ramo	Estimativa do risco $P[E].P[C E].u[C]=R$
----------------	---------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	---	--	--	------	---



p - verusimilhança; P[E] - verusimilhança de ocorrência do evento; P[C|E] - verusimilhança de afetação do meio; u[C] - grau de dano; R - risco semiquantitativo

Figura 6.4 – Árvore de eventos para a determinação do risco de colapso ou deformação da periferia da escavação

Nesta árvore de eventos, a primeira verificação é de afluência de água com caudal significativo, uma vez que é um dos fatores que geralmente influencia a estabilidade da escavação porque diminui as características geomecânicas do maciço.

Seguidamente é necessário averiguar a qualidade do terreno observado, procedendo-se para tal à realização de duas classificações geotécnicas (exemplo o RMR e o Q); o recurso a duas classificações tem o duplo objetivo de uma classificação validar a outra e de comparar os resultados obtidos através das correlações existentes na bibliografia. Caso as classificações geotécnicas em questão sejam as desenvolvidas por Bieniawski (1989) e Barton (2002) podem ser utilizadas as correlações apresentadas na Figura 3.6, recaindo a principal escolha na equação (3.6), apresentada por Abade *et al.* (1984), conforme se verificou na Secção 4.6. Este procedimento permite uma maior confiança na classificação do maciço rochoso e, conseqüentemente, nas análises realizadas a montante.

Como o resultado da classificação leva ao enquadramento do maciço presente no zonamento geotécnico definido em projeto, ao qual corresponde uma secção tipo de contenção igualmente definida em projeto, o passo seguinte da árvore de evento prevê a verificação da contenção instalada na realidade e, se a mesma foi na quantidade e qualidade prevista; caso tenha sido aplicada contenção diferente da definida em projeto, é necessário verificar se foi em excesso ou déficit. Por um lado, esta análise é relevante para a garantia de estabilidade da escavação no caso em que a contenção é inferior ao previsto; por outro lado, é relevante para o desperdício de recursos e meios com os custos associados, no caso da contenção aplicada ser superior à prevista.

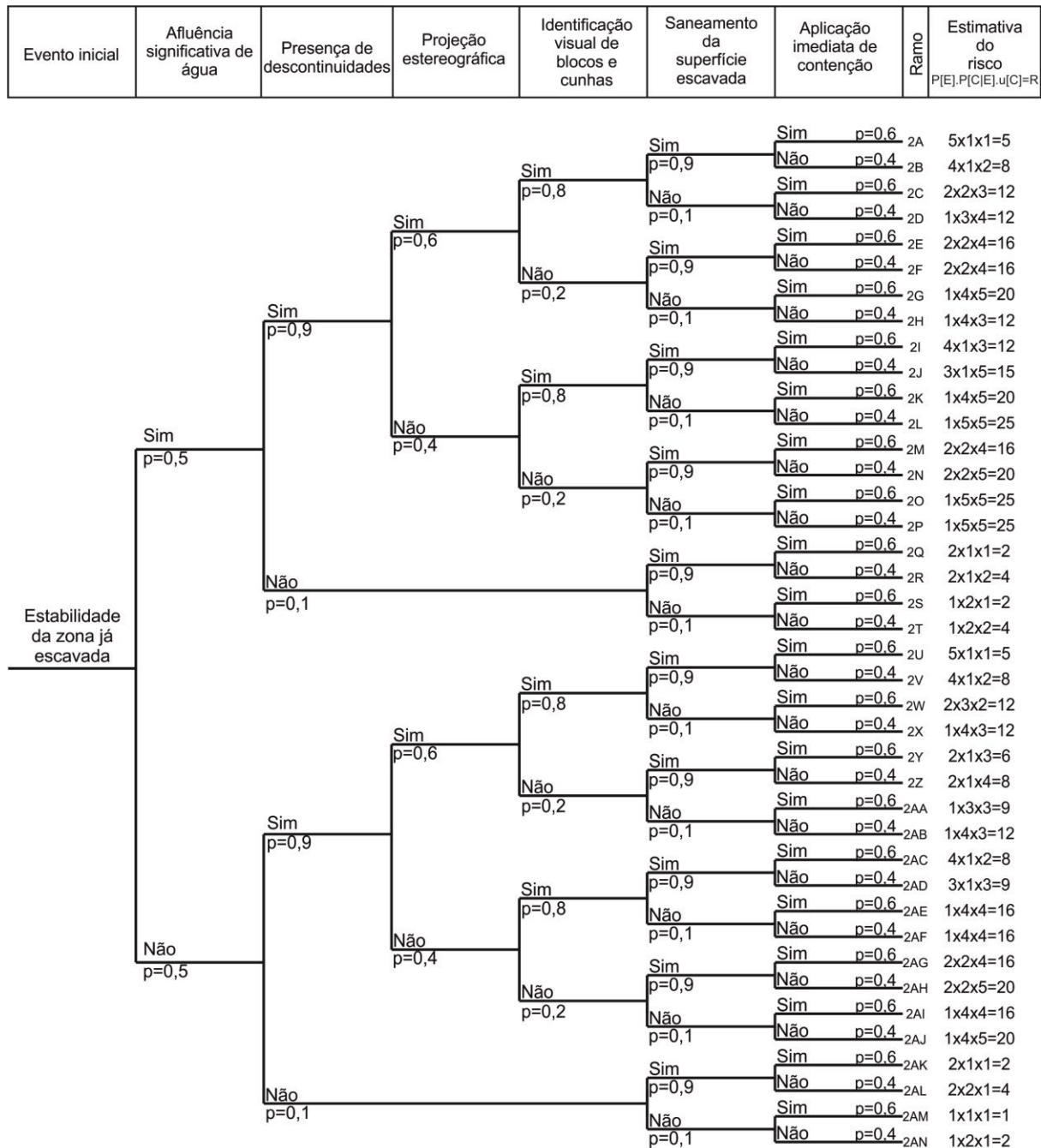
A análise à estabilidade do túnel na sequência de um comportamento de rotura frágil decorrente/despoletado pela presença de descontinuidades que, conjugadas com a orientação da escavação, levam ao colapso parcial, isolado de blocos e cunhas, é realizada recorrendo à árvore de eventos constante na Figura 6.5.

Na definição da árvore de eventos para esta situação foram considerados os seguintes eventos, considerados como particularmente relevantes para o controlo da estabilidade, nomeadamente:

- i. Afluência de água com caudal significativo;
- ii. Presença de descontinuidades;
- iii. Análise cinemática das descontinuidades por projecção estereográfica;
- iv. Identificação visual de blocos e cunhas na periferia da escavação;
- v. Saneamento de material solto na periferia da escavação;
- vi. Aplicação imediata de contenção.

Nos eventos considerados para a árvore da Figura 6.5, foi considerada inicialmente a presença de água no maciço, o que diminui a resistência ao corte das descontinuidades e exerce pressão acrescida na periferia da escavação e na contenção, tornando-se relevante o seu controlo. Segue-se a verificação das condições do terreno, nomeadamente a presença de descontinuidades e o necessário tratamento

conjungado com a orientação do túnel, para avaliar a presença de blocos e cunhas suscetíveis de queda. Uma das formas de evitar a queda descontrolada de material é através da realização do saneamento das superfícies escavadas. Com este procedimento, torna-se possível retirar os blocos e cunhas suscetíveis de queda e de provocar danos em pessoas ou equipamentos. Por fim, tratando-se de uma situação de maciço compartimentado, com roturas frágeis, onde a queda de blocos dá-se de forma rápida, é fundamental a aplicação imediata de contenção nos blocos e cunhas que não foram retirados, por impossibilidade ou por se encontrarem fora da secção de escavação.



p - verusimilhança; P[E] - verusimilhança de ocorrência do evento; P[C|E] - verusimilhança de afetação do meio; u[C] - grau de dano; R - risco semiquantitativo

Figura 6.5 – Árvore de eventos para a determinação de colapso parcial de blocos e cunhas

6.3.2 Avaliação de riscos

A análise de riscos geotécnicos presentes na frente de escavação, quer recorrendo a uma lista de verificação, quer sintetizados e representados de forma interligada recorrendo a uma árvore de eventos conduz, em ambos os casos, à necessidade de apresentar medidas eliminatórias ou mitigadoras para os riscos potenciais identificados, o que é efetuado na Secção 6.3.3. Em algumas situações é possível ainda apresentar medidas otimizadoras, que permitem retirar vantagens extras da gestão de riscos na fase construtiva.

6.3.2.1 Lista de verificação

Tendo como base a **lista de verificação** constante na Tabela 6.4, apresenta-se seguidamente a avaliação dos riscos presentes.

O **R2.1** é de verosimilhança remota (2) porque habitualmente há acompanhamento da escavação por parte de um técnico experiente em geologia de engenharia, mas de consequências críticas (4) caso ocorra, resultando em risco elevado (8) e que se considera intolerável, sendo necessário implementar medidas de controlo.

O **R2.2** resulta de levantamentos geológico e geotécnicos pouco rigorosos ou com ponderação pouco precisa dos parâmetros que constituem as classificações. Este risco é de verosimilhança improvável (1), mas de consequências que podem ser catastróficas (5) porque uma caracterização que não represente o terreno pode levar à aplicação de contenção desadequada e, no limite ao colapso da escavação, resultando num risco de nível médio (5), mas intolerável, pelo que é necessário aplicar medidas de controlo.

O **R2.3** é de verosimilhança remota (2), caso existam procedimentos eficientes de acompanhamento geológico e geotécnico da escavação, mas de consequências catastróficas (5) caso ocorram, o que resulta num risco de nível elevado (10) e o torna intolerável, com necessidade de aplicar medidas de controlo.

O **R2.4** é de verosimilhança remota (2) quando a escavação conta com o acompanhamento de técnicos experientes e/ou especialistas na área da geologia e geotecnia, mas de consequências catastróficas (5) caso ocorra, porque podem colocar em causa a estabilidade da escavação, com potenciais danos para pessoas, equipamentos, prazo de execução e para os custos inerentes à reparação das condições de estabilidade. O risco resultante é de nível elevado (10) e, portanto, intolerável, com necessidade de aplicação de medidas de controlo.

Um dos parâmetros relevantes para a estabilidade da escavação e que pode constituir um risco é o **R2.5**, que depende muito da litologia e restante cenários geológico de enquadramento, a verosimilhança de afluência de água é frequente (5) e as consequências, no caso de não ser controlado, são catastróficas (5), provocando eventuais danos na estabilidade, inundação da escavação, desperdício de recursos hidrogeológicos no caso de se atravessarem aquíferos e afetação de terceiros.

Perante esta situação, este risco é classificado como muito elevado (25) e como tal intolerável, sendo necessário implementar medidas de controlo.

O **R2.6** resulta de uma atividade que deve ser parte integrante do ciclo de escavação, mas às vezes não é realizada com a necessária atenção. Este risco é de verosimilhança provável (3) e de consequências críticas (4), porque leva à possibilidade de destaque de material potencialmente solto, presente na periferia da escavação; o que leva a classificar este risco como elevado (12), considerando-se intolerável, levando à implementação de medidas para o seu controlo.

Tendo em consideração as situações observadas, o **R2.7** é de verosimilhança remota (2), mas as consequências são o colapso da escavação e como tal, catastróficas (5), pelo que a avaliação resultante é elevada (10) e inaceitável, pelo que se considera importante aplicar medidas de controlo.

O **R2.8** é de verosimilhança remota (2), mas com consequências críticas (4), resultando num risco de nível médio (8), mas que se considera intolerável e como tal, necessita da implementação de medidas de controlo.

O **R2.9** encontra-se presente em todas as situações da fase construtiva e conforme já referido para a fase de início de escavação, é de verosimilhança provável (3) e de consequências críticas (4), o que resulta num risco de nível elevado (12) e intolerável, com necessidade de implementação de medidas de controlo.

Numa outra abordagem à análise de riscos, esquematizada numa **árvore de falhas** (Figura 6.3), permitiu a análise dos eventos que levam à instabilização da escavação. Os eventos identificados podem ser agrupados em:

- Procedimento indevido;
- Conhecimento inadequado;
- Erro técnico.

Na realidade, trata-se de eventos já considerados na lista de verificação, pelo que a sua avaliação é igual à acima apresentada, considerando-se dispensável uma avaliação mais profunda que a já realizada.

6.3.2.2 Árvores de eventos

Árvore de eventos da Figura 6.4

Para uma análise do risco de colapso ou deformação excessiva do maciço, foi apresentada na Figura 6.4, uma **árvore de eventos** com procedimentos que permitem avaliar, de modo semiquantitativo, o risco presente.

Tendo em consideração a árvore de eventos que consta na Figura 6.4, em particular os eventos que a constituem, verifica-se que a presença de água é um dos fatores de instabilização de uma escavação de um túnel, porque exerce pressão na periferia e provoca diminuição da resistência ao corte do maciço,

quer por diminuição do ângulo de atrito, quer por diminuição da tensão efetiva. As consequências associadas à presença de água para além de influenciarem a estabilidade, que numa situação extrema leva ao colapso da escavação, têm ainda consequências de eventual necessidade de bombagem, no caso do túnel ser descendente e de tratar essa água antes de ser lançada para o ambiente, ou seja, consequências financeiras.

A utilização de classificações geomecânicas permite caracterizar o maciço e enquadrá-lo nos pressupostos do projeto para determinar o zonamento geotécnico e consequente contenção mais adequada a ser aplicada e possibilita ainda a determinação do tempo de autossustentação teórico para o maciço. Como se tratam de classificações empíricas é importante realizar a validação cruzada pela aplicação de duas classificações. A falha de execução tem consequências no desenvolvimento de caracterização do maciço que permitem fazer, e de todos os trabalhos que aí se baseiam, levando no limite à adoção de contenção desadequada e sem justificação técnica que tanto pode ser em excesso com os custos financeiros e de tempo desperdiçado, como em défice colocando em causa a estabilidade com potencial afetação de pessoas, equipamentos e terceiros.

A verificação da aplicação da contenção dentro do tempo autoportante do maciço é importante porque em caso de falha, as potenciais consequências são o colapso da escavação com a eventual afetação da segurança de pessoas e equipamentos, bem como de prazo e custo com a reparação da situação.

A aplicação da contenção conforme previsto em projeto não implica riscos significativos caso os modelos estejam definidos corretamente. Mas no caso de ser aplicada mais contenção que a prevista, as consequências são de prazo e custos acrescidos e no caso de ser aplicada menos contenção que a prevista, a consequência extrema é o colapso da escavação com afetação de pessoas, equipamentos e terceiros.

Avaliação dos ramos da Árvore de eventos da Figura 6.4

De um modo resumido, dos riscos contemplados pela árvore de eventos presente na Figura 6.4, temos:

- Risco tolerável – Ramos 1.A, 1.S e 1.W;
- Risco tolerável, mas com recomendação de implementação de medidas de controlo – Ramos 1.B, 1.G, 1.H, 1.T, 1.Y, 1.Z e 1.AB;
- Risco intolerável – Ramos 1.C, 1.D, 1.E, 1.F, 1.I, 1.J, 1.K, 1.L, 1.M, 1.N, 1.O, 1.P, 1.Q, 1.R, 1.U, 1.V, 1.X, 1.AA, 1.AC, 1.AD, 1.AE, 1.AF, 1.AG, 1.AH, 1.AI e 1.AJ.

Pormenorizando os riscos presentes e seguindo os ramos da árvore da Figura 6.4, para um maciço com a presença de água; e perante o cenário de um maciço que seja alvo de caracterização geológica e geotécnica, é habitual realizar uma classificação geomecânica, que pode ser verificada por uma segunda classificação. Com o resultado das classificações define-se a qualidade do terreno e correspondente contenção preconizada no projeto, sendo necessário verificar se foi aplicada dentro do

tempo autoportante teórico e na quantidade preconizada o que, em caso afirmativo conclui um dos ramos da árvore, resultando num risco de nível médio (5) para a estabilidade da escavação e tolerável não sendo necessário implementar medidas de controlo (**Ramo 1.A**).

Seguindo um ramo semelhante ao anterior, ou seja, realizando a classificação do maciço, verificada por uma segunda classificação, aplicando a contenção dentro do tempo autoportante e sendo a quantidade ou qualidade diferente da preconizada em projeto, esta pode ter sido aplicada em excesso (**Ramo 1.B**) resultando num risco de nível médio (6) e tolerável porque as consequências são ao nível financeiro e de prazo, não colocando em causa a integridade de pessoas ou equipamentos.

Na mesma situação do risco anterior (**Ramo 1.C**), mas com aplicação de contenção em menor quantidade ou qualidade que a preconizada em projeto, o risco resultante é de nível elevado (12) e considerado intolerável sendo fundamental a implementação de medidas de controlo.

Mantendo o ramo onde se verifica afluência significativa de água, onde a caracterização do maciço é realizada por uma classificação geomecânica, verificada por uma segunda classificação, que permitam determinar a qualidade do terreno e chegar à contenção preconizada em projeto, essa contenção é colocada fora do tempo de autossustentação teórico, mas consiste na contenção preconizada no projeto (**Ramo 1.D**), o risco presente é de nível elevado (12), sendo intolerável e necessita de implementação de medidas de controlo.

Um ramo muito semelhante ao anterior, mas onde a quantidade ou qualidade da contenção preconizada em projeto não é a realmente aplicada, é necessário verificar se está em excesso (**Ramo 1.E**), resultando num risco de nível médio (9), mas intolerável, necessitando da implementação de medidas de controlo. No caso da contenção aplicada ser inferior à preconizada em projeto (**Ramo 1.F**), tem como potencial consequência a possibilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade. Ou seja, o risco presente é elevado (12) e considerado intolerável, pelo que é necessário implementar medidas de controlo.

Ainda num cenário de terreno com presença de água, onde é realizada uma classificação geomecânica, mas sem verificação por uma segunda classificação, a possibilidade de erro de caracterização do maciço é maior que nas situações anteriores, mas continua a ser possível determinar a contenção preconizada em projeto e verificar se é aplicada dentro do tempo de autossustentação. Nesta situação verifica-se se a contenção preconizada foi efetivamente aplicada (**Ramo 1.G**), o que resulta num risco de nível médio (8), tolerável, mas é recomendável a implementação de medidas mitigadoras.

Considerando ramos idênticos ao anterior, mas onde a contenção aplicada é diferente da preconizada em projeto, torna-se necessário verificar se foi em excesso (**Ramo 1.H**), o que resulta num risco de nível médio (8) e tolerável, mas onde é necessário aplicar medidas de contenção; ou a contenção preconizada foi aplicada em défice (**Ramo 1.I**), resultando num risco de nível muito elevado (18) e intolerável, que coloca em causa a estabilidade da escavação e que necessita da implementação de medidas de controlo.

A situação descrita pela afluência de água significativa, com a realização de apenas uma classificação geomecânica, sem que tenha sido feita a verificação com uma segunda classificação, com aplicação da contenção fora do tempo de autossustentação teórico, mas respeitando a quantidade e qualidade previstas em projeto (**Ramo 1.J**), revela um risco de nível elevado (12), sendo considerado intolerável. Situação idêntica à anterior, mas onde a contenção aplicada é diferente da preconizada em projeto, requer a verificação se a quantidade foi superior à prevista (**Ramo 1.K**), que constitui um risco de nível elevado (12) e intolerável, ou em quantidade inferior à prevista (**Ramo 1.L**), o que pode levar ao colapso da escavação, revelando um risco de nível muito elevado (20) e intolerável, que necessita da implementação de medidas de controle.

As situações da afluência significativa de água no maciço, mas onde não são realizadas classificações geomecânicas, embora se admita que a caracterização do terreno possa ser realizada, leva a considerar que não se encontra feita na sua plenitude, pelo que todos os ramos no seguimento são de risco muito elevado. Sem classificação não há possibilidade de determinar o tempo autoportante teórico. E mesmo o enquadramento do maciço nas condições definidas em projeto é dificultado. Na prática é possível verificar se foram iniciados fenómenos de instabilidade e admitir que o tempo autoportante foi respeitado, pelo que, seguindo os ramos do caso afirmativo, a aplicação da contenção pode respeitar o definido em projeto (**Ramo 1.M**), mas conforme referido o risco é muito elevado (16) e intolerável, tendo-se que implementar medidas de controle. Mesmo para os casos da contenção ser em mais quantidade que a definida (**Ramo 1.N**), ou menos quantidade (**Ramo 1.O**), o risco continua a ser muito elevado (20 e 24 respetivamente) e intolerável, pelo que há necessidade de promover medidas de controle.

Nos casos onde há afluência de água significativa, a classificação do maciço não é feita nem verificada e já existem indícios de instabilidade revelando que a contenção é aplicada para além do tempo autoportante, independentemente de ser aplicada na quantidade e qualidade preconizada em projeto (**Ramo 1.P**), mais que a prevista (**Ramo 1.Q**), ou menos que a prevista (**Ramo 1.R**), nestes casos, o nível de risco é sempre muito elevado (24, 25 e 25 respetivamente), porque coloca em causa a estabilidade da escavação e a segurança de pessoas e equipamentos, pelo que é considerado intolerável, sendo necessário aplicar medidas de controle.

Considerando os ramos da árvore de eventos onde não se verifica a afluência significativa de água, um dos fatores de instabilização está ausente. Seguindo para a realização de uma classificação geotécnica, verificada por uma segunda, que permitiram a determinação do tempo autoportante teórico, onde a contenção aplicada respeitou esse tempo e a quantidade e qualidade preconizada em projeto (**Ramo 1.S**), encontramos a situação mais esperada, com consequências pouco gravosas, mas com elevada possibilidade de ocorrência, o que leva a considerar um risco médio (5), mas tolerável que se admite não necessitar de implementação de medidas de controle.

Situação idêntica à anterior, apenas com a diferença da contenção aplicada ser mais que a contemplada em projeto (**Ramo 1.T**), o risco resultante é de nível médio (6) e considerado tolerável, contudo considera-se importante a implementação de medidas de controlo.

Ainda em situação semelhante, mas onde a contenção aplicada foi em menos quantidade ou qualidade que a preconizada no projeto (**Ramo 1.U**), o risco resultante é de nível elevado (12) e intolerável, uma vez que a estabilidade da escavação é colocada em causa e pode afetar a integridade de pessoas e equipamentos.

Para a situação de ausência de água com caudal significativo, onde é realizada uma classificação geomecânica, verificada por uma segunda, com a contenção aplicada fora do tempo autoportante teórico, mas na quantidade definida em projeto (**Ramo 1.V**), o nível de risco é médio (8), mas considerado intolerável porque o tempo autoportante teórico é ultrapassado, o que leva à necessidade de medidas de controlo.

Um cenário idêntico ao anterior, com a diferença da contenção aplicada ser mais que a preconizada em projeto (**Ramo 1.W**), o risco é de nível médio (6) e tolerável, mas é importante rever procedimentos, pelo que devem ser implementadas medidas de controlo. Já no caso de cenário idêntico, mas com aplicação de menos contenção que a preconizada em projeto (**Ramo 1.X**), coloca em causa a estabilidade da escavação, resultando num risco de nível elevado (12) e intolerável, onde é necessário intervir.

A situação onde não se verifica afluência significativa de água, onde é feita uma classificação geomecânica, mas que não é verificada por uma segunda, o tempo autoportante é determinado e respeitado na aplicação da contenção que é na quantidade e qualidade definida em projeto (**Ramo 1.Y**), o risco envolvido é de nível médio (8), sendo considerado tolerável; no entanto é recomendável uma revisão de procedimentos. Na mesma situação, mas com aplicação de contenção em quantidade maior que a prevista (**Ramo 1.Z**) implica a presença de um risco de nível médio (8) e tolerável, mas à semelhança do anterior, é recomendável uma revisão de procedimentos. Para o caso de situação conforme descrita, mas com aplicação de contenção em quantidade menor que a preconizada no projeto (**Ramo 1.AA**), existe a possibilidade de colapso da escavação, com eventual afetação de pessoas e equipamentos, o que resulta num risco de nível elevado (12) e intolerável, que necessita da implementação de medidas de controlo.

No cenário representado pelo ramo onde não se verifica afluência de água significativa e é realizada apenas uma classificação geomecânica, mas a aplicação da contenção é feita após o tempo autoportante teórico e a quantidade e qualidade do maciço rochoso respeita o definido em projeto (**Ramo 1.AB**), verifica-se um risco de nível médio (6) e tolerável, mas é recomendável a aplicação de medidas de controlo.

Situação semelhante à anteriormente descrita, mas com a diferença da contenção aplicada ser mais que a definida em projeto (**Ramo 1.AC**), representa risco de nível médio (9), mas intolerável para o qual

se recomenda a adoção de medidas de contenção. Na situação anterior, mas onde inversamente, a contenção aplicada seja menos que a contemplada em projeto (**Ramo 1.AD**), o risco é de nível elevado (12), podendo levar ao colapso da escavação, pelo que se considera intolerável e, como tal, é necessário implementar medidas de controlo.

O cenário do **Ramo 1.AE** representa uma situação onde não se verifica afluência significativa de água, não são utilizadas classificações geomecânicas, mas admite-se que a contenção tenha sido aplicada dentro do tempo autoportante do maciço e na quantidade e qualidade definida em projeto, o que representa um risco elevado (12) e intolerável e é necessário controlar com implementação de medidas. Em situações idênticas, mas onde a contenção aplicada seja diferente da preconizada em projeto (**Ramos 1.AF e 1.AG**), o risco resultante é em ambas as situações muito elevado (16 e 24 respetivamente) e considerado intolerável, sendo necessário implementar medidas de controlo.

As situações representadas pelos ramos onde não se verifica afluência significativa de água, mas não são realizadas classificações e se admite que o tempo autoportante tenha sido ultrapassado, independentemente da contenção ser aplicada de acordo com o definido (**Ramo 1.AH**) ou não (**Ramos 1.AI e 1.AJ**), o risco envolvido é sempre muito elevado (18, 16 e 20 respetivamente) e considerado intolerável, pelo que têm de ser implementadas medidas de controlo.

Árvore de eventos da Figura 6.5

Na construção de túneis em maciços rochosos, um dos riscos presente na frente de escavação é a queda de blocos e cunhas da periferia da escavação, que possam atingir pessoas ou equipamentos e, em casos extremos, levar ao colapso da escavação. Para avaliação desse risco foi apresentada na Figura 6.5 uma **árvore de eventos**.

Conforme referido a afluência significativa de água tem eventuais consequências na pressão na periferia da escavação e contenção, na erosão do material de preenchimento, levando em situações extremas ao colapso da escavação.

No caso da construção de túneis contar com o acompanhamento técnico na área da geologia e geotecnia, é habitual que um dos procedimentos implementados seja o da caracterização das discontinuidades ocorrentes. A análise das características das discontinuidades, de onde se destaca a atitude, permitem determinar a presença de blocos e cunhas na periferia da escavação e avaliar o potencial de queda.

A presença das discontinuidades no maciço pode originar a formação de blocos e cunhas na periferia da escavação que, em situação extrema, pode ter como consequência a queda de material e afetação da segurança de pessoas e equipamentos.

Após levantamento das características das discontinuidades, onde se inclui a medição da atitude, o mais provável é proceder à projeção estereográfica em diagrama de Schmidt, habitualmente recorrendo a programas informáticos específicos. Nessa projeção é importante que todos os polos das

descontinuidades fiquem visíveis, para que seja avaliada a possibilidade de formação de blocos não só pelas descontinuidades agrupadas nas famílias principais, mas também pelas descontinuidades de atitude aleatória que não pertencem a qualquer família. Perante um maciço rochoso onde se observem descontinuidades, o mais provável é que a análise indique a presença de blocos ou cunhas.

A projeção da atitude das descontinuidades conjugadas com a orientação do túnel permite avaliar a eventual existência de blocos, pelo que a supressão desta atividade tem como consequência a eventual existência de blocos que podem não ser detetados.

A identificação de blocos no avanço da escavação permite eliminar potenciais quedas descontroladas dos mesmos ou a falta da sua contenção, que pode levar à afetação de pessoas e equipamentos.

Contudo é necessário ter em consideração que, mesmo que estejam presentes blocos e cunhas com possibilidade de gerarem instabilidade, estes podem ser contidos de modo a ficarem numa situação estável, pelo que é importante avaliar não só a presença de blocos, mas também os procedimentos executivos que permitem o saneamento ou contenção de situações de potencial queda.

Nesta situação o saneamento da frente é uma atividade da máxima importância na garantia da estabilidade, porque todo o material que cair de modo controlado representa um risco mínimo para segurança das pessoas e equipamentos, pelo que habitualmente este procedimento é realizado. Todos os blocos e cunhas que, pela situação de menor potencial de queda e situados fora do perfil teórico de escavação não necessitem ser saneados de imediato, têm de ser alvo de contenção. Como a queda de blocos é um mecanismo de rotura frágil, pode dar-se de modo instantâneo sem que sejam observados indícios em tempo útil que os permitam identificar antecipadamente, pelo que é muito importante aplicar a contenção de imediato.

Conforme já referido, o saneamento do material solto na periferia da escavação promove a estabilidade, retirando de modo controlado os blocos e cunhas instáveis. A remoção desse material impede que o mesmo afete a segurança de pessoas e equipamentos.

Na presença de eventuais blocos e cunhas que não sejam retirados, por impossibilidade ou por se encontrarem fora da secção de escavação, requerem a contenção imediata, uma vez que o destaque por descontinuidades resulta de rotura frágil do maciço, de modo imprevisível.

Avaliação dos ramos da árvore de eventos da Figura 6.5

Resumindo, a avaliação de riscos resultante das situações compiladas pela árvore de eventos da Figura 6.5, temos:

- Risco tolerável – Ramos 2.Q, 2.R, 2.S, 2.T, 2.U, 2.AC, 2.AD, 2.AK, 2.AL, 2.AM e 2.AN;
- Risco tolerável, mas com recomendação de implementação de medidas de controlo – Ramos 2.A, 2.B, 2.V, 2.Y e 2.Z;
- Risco intolerável – Ramos 2.C, 2.D, 2.E, 2.F, 2.G, 2.H, 2.I, 2.J, 2.K, 2.L, 2.M, 2.N, 2.O, 2.P, 2.W, 2.X, 2.AA, 2.AB, 2.AE, 2.AF, 2.AG, 2.AH, 2.AI e 2.AJ.

Descrevendo seguidamente a avaliação de cada um dos riscos, tem-se que a sequência de eventos representada pelo **Ramo 2.A**, onde se verifica a afluência significativa de água e a presença de descontinuidades, que são avaliadas de modo conjugado para detecção de blocos e cunha, identificados na frente de trabalho e que são saneados e a contenção é colocada de imediato. As consequências, nesta situação, são pouco gravosas, mas a possibilidade de ocorrência é a mais elevada, pelo que o risco resultante é de nível médio (5) e tolerável, não se considerando necessário a aplicação de medidas de controlo.

Situação idêntica à anterior, mas onde a contenção não é colocada de imediato (**Ramos 2.B**) apresenta uma possibilidade de ocorrência ligeiramente menor que a situação anterior, no entanto as consequências podem ser maiores, o que resulta num risco superior ao anterior, mas considerado igualmente de nível médio (8), que embora se admita ser tolerável é recomendável a aplicação de medidas de controlo.

Na situação representada pelo **Ramo 2.C**, num túnel onde ocorra afluência significativa de água, realizada a caracterização das descontinuidades e projeção das suas atitudes em diagrama de Schmidt, e que se tenha verificado a presença de blocos e cunhas, mas onde não exista implementada a atividade de saneamento da escavação, mas a contenção preconizada é implementada de imediato, trata-se de um risco de nível elevado (12) porque, na ausência de saneamento, durante a aplicação da contenção podem cair blocos que estejam soltos e como tal, intolerável, considerando-se importante a implementação de medidas de controlo.

A situação do **Ramo 2.D** é semelhante à anterior, mas para além de não ser realizado saneamento dos blocos identificados, também não é aplicada contenção de imediato, é de verusimilhança reduzida, mas de consequências críticas, o que constitui um risco de nível elevado (12) e intolerável, que é necessário eliminar ou mitigar.

Perante a presença significativa de água, com caracterização das descontinuidades e realização análise cinemática, mas a identificação dos blocos e cunhas potencialmente instáveis não é realizada na frente de escavação, caso o saneamento seja realizado, permanece a possibilidade de não ser o mais correto e incisivo nos blocos gravoso e mesmo com aplicação imediata de contenção (**Ramo 2.E**), também reside a possibilidade de não serem contidos alguns dos blocos potencialmente instáveis, resultando num risco muito elevado (16) e intolerável que tem de ser alvo da aplicação de medidas de controlo.

Na situação semelhante, mas onde a contenção não é aplicada de imediato (**Ramo 2.F**), o risco de instabilidade é maior que na situação anterior, enquadrando-se o nível de risco dentro do muito elevado (16), pelo que é considerado intolerável e necessário aplicar medidas de controlo.

Continuando nos cenários idênticos aos anteriores, com afluência significativa de água e caracterização das descontinuidades e avaliação cinemática dos eventuais blocos e cunhas, mas onde não é realizada a identificação dos mesmos na frente de trabalho, nem realizado o saneamento,

independentemente da contenção ser aplicada de imediato (**Ramo 2.G**) ou não (**Ramo 2.H**), o nível de risco presente é sempre muito elevado (20 e 12 respetivamente) e considerado intolerável, sendo imperativo a adoção de medidas de controlo.

Os cenários descritos pelos ramos onde existe afluência significativa de água, as discontinuidades ocorrentes são caracterizadas, mas a análise cinemática das discontinuidades não é feita, mas é realizada a identificação expedita da presença de blocos na frente de trabalho, seguindo-se o saneamento do material solto na periferia da escavação e aplicação imediata de contenção (**Ramo 2.I**), o risco é de nível elevado (12), não pelas consequências elevadas, mas porque é um cenário de verusimilhança elevada, admitindo-se ser intolerável e necessário a implementação de medidas de controlo.

O **Ramo 2.J** representa uma situação semelhante à anterior, com a diferença da contenção não ser aplicada de imediato, o que resulta num risco elevado (15) porque, embora a verusimilhança sejam menores quando comparada com a situação anterior, as consequências são maiores, tornando a situação intolerável e a necessitar de medidas de controlo.

Identificando situações como as anteriores, mais onde não é feito o saneamento, a possibilidade de queda de blocos e cunhas aumenta e independentemente da contenção ser aplicada de imediato (**Ramo 2.K**) ou não (**Ramo 2.L**), sendo que nesta última, o risco é mais elevado, em ambos os casos, o nível de risco é muito elevado (20 e 25 respetivamente) e intolerável, sendo fundamental a implementação de medidas de controlo.

Seguindo os ramos com afluência significativa de água, com caracterização das discontinuidades ocorrentes, mas não é realizada a análise cinemática das discontinuidades, nem a identificação visual da presença de blocos e cunhas na frente de trabalho; contudo, é realizado o saneamento, embora não seja possível garantir a sua objetividade e eficácia, independentemente da contenção ser colocada de imediato (**Ramo 2.M**) ou não (**Ramo 2.N**), o risco envolvido é muito elevado (16 e 20 respetivamente) porque as consequências são a possibilidade de queda de blocos com as consequências de afetação acima referidas, o que resulta em situações intoleráveis que é necessário corrigir.

Em situações idênticas às anteriores, mas caso o saneamento não seja realizado, o risco resultante, mesmo independente da colocação imediata de contenção (**Ramos 2.O e 2.P**), é ainda mais alto que os anteriores, mas enquadram-se igualmente nos muito elevados (25 em ambas as situações) e são intoleráveis e obrigatoriamente necessárias medidas de controlo.

Para todas situações onde se verifique a afluência significativa de água, mas que não existam discontinuidades no maciço, não existe risco de queda de blocos, pelo que independentemente do saneamento ser ou não realizado, ou da aplicação imediata de contenção (**Ramos 2.Q, 2.R, 2.S e 2.T**), o risco é sempre baixo (2, 4, 2 e 4 respetivamente) e tolerável, não havendo lugar à implementação de medidas de controlo.

Entrando nos cenários sem afluência de água significativa, os riscos envolvidos são mais baixos, contudo, continuam a ocorrer riscos muito elevados, que se descrevem de seguida.

Para o **Ramo 2.U** que representa a situação onde se caracterizam as discontinuidades e é efetuada a análise cinemática com deteção da presença de blocos e cunhas, que são identificadas na frente de trabalho e realizado o seu saneamento, e ainda a aplicação de contenção, as consequências são diminutas, mas trata-se de uma situação de verusimilhança elevada, resultando num risco médio (5), mas tolerável e sem necessidade de implementar medidas de controlo.

Uma situação idêntica, mas sem aplicação imediata de contenção (**Ramo 2.V**), implica um risco maior, mais ainda dentro do nível médio (8) e tolerável, onde podem ser adotadas medidas de controlo no sentido de diminuir o risco.

Na situação onde não há afluência significativa de água, é feita a caracterização das discontinuidades e a análise da presença de blocos e cunhas potencialmente instáveis recorrendo à projeção estereográfica, os blocos e cunhas são identificados na frente de trabalho, mas não é feito saneamento tendo em vista a sua remoção. Neste caso, independentemente da contenção ser colocada de imediata (**Ramo 2.W**) ou não (**Ramo 2.X**), as possibilidades de ocorrência associadas são diferentes assim como as consequências, mas o risco resultante é idêntico e de nível elevado (12 em ambas as situações), considerado intolerável e com necessidade de implementar medidas de controlo.

Os **Ramos 2.Y** e **2.Z** revelam cenários de ausência de afluência significativa de água, num maciço com presença de discontinuidades, com realização da análise cinemática, mas a sua identificação na frente de trabalho não é realizada, embora se efetue o saneamento que permite remover o material potencialmente instável, embora sem garantia da sua eficácia, mesmo que a contenção seja aplicada de imediato, os riscos envolvidos são de nível médio (6 e 8 respetivamente) e o risco é tolerável, apesar de se considerar importante a implementação de medidas.

Continuando num maciço sem afluência significativa de água, com caracterização das discontinuidades e realização da avaliação da presença de blocos e cunhas, mas a sua identificação na frente de trabalho não é realizada, nem o saneamento do material potencialmente instável na frente de escavação, a aplicação de contenção de imediato (**Ramo 2.AA**) leva à presença de um risco de nível médio (9), mas que se considera intolerável e necessária a implementação de medidas de contenção adicionais.

Uma situação idêntica à descrita anteriormente, mas onde a contenção não é aplicada de imediato (**Ramo 2.AB**), o risco presente é maior, enquadrando-se no nível elevado (12) e intolerável, sendo necessário implementar medidas de controlo.

Num cenário de ausência de afluência significativa de água, com a presença de discontinuidades, mas sem realização de análise cinemática para a sua deteção; mas em que é efetuada a identificação de blocos e cunhas de modo expedito na frente de trabalho e é realizado o saneamento e aplicada

contenção de imediato (**Ramo 2.AC**), origina um risco de nível médio (8), que se admite ser tolerável e sem necessidade de implementação de medidas de controlo.

Numa situação idêntica à anterior, mas onde a contenção não é aplicada de imediato, o risco é superior (**Ramo 2.AD**), mas mantem-se no nível médio (9) e considera-se tolerável e sem necessidade de implementar medidas de contenção.

Nas situações de um maciço sem afluência de água significativa, com presença de descontinuidades, sem que seja realizada a sua análise cinemática para deteção de potenciais blocos e cunhas, mas com a sua identificação na frente de trabalho; contudo, sem que o saneamento do material solto na periferia da escavação seja realizado, quer seja aplicada contenção de imediato (**Ramo 2.AE**), quer não seja (**Ramo 2.AF**), o nível de risco é sempre muito elevado (16 em ambas as situações) e intolerável, necessitando da implementação de medidas de controlo.

Para as situações onde não há afluência significativa de água, mas estão presentes descontinuidades que não são alvo de análise cinemática para identificação de blocos e cunhas, nem é realizada a sua identificação específica na frente de trabalho, independente de ser realizado saneamento ou não, ou da aplicação imediata, ou não (**Ramos 2.AG, 2.AH, 2.AI e 2.AJ**), de contenção, os riscos presentes são sempre de nível muito elevado (16, 20, 16 e 20 respetivamente) e considerados intoleráveis, necessitando de medidas de controlo para a sua eliminação ou mitigação.

Nos ramos da árvore que descrevem situações onde não existe afluência significativa de água e o maciço rochoso não apresenta descontinuidades, não há possibilidade de se formarem blocos nem cunhas na periferia da escavação, pelo que independentemente de ser realizado saneamento e aplicação imediata de contenção (**Ramos 2.AK, 2.AL, 2.AM e 2.AN**), os riscos resultantes são todos de nível baixo (2, 4, 1 e 2 respetivamente) e considerados toleráveis, dispensando a aplicação de contenção.

Com a avaliação de riscos realizada e definida a necessidade de implementar medidas de controlo, na secção seguinte são apresentadas algumas medidas a implementar para eliminar ou mitigar os riscos intoleráveis, ou os toleráveis, mas que são diminuídos pelo ajuste de alguns procedimentos com poucas alterações ou custo financeiros associados.

6.3.3 Medidas de controlo

Nesta secção descrevem-se algumas medidas de controlo dos riscos anteriormente detetados, analisados e avaliados, divididos pela metodologia de análise, como seja a lista de verificação e árvores de eventos.

6.3.3.1 Lista de verificação

Para os riscos sintetizados pela **lista de verificação**, apresentada na Tabela 6.4, são em seguida indicadas algumas medidas de controlo tipo que se consideram adequadas, mas que se admite não serem únicas e eventualmente necessitem ajustes na adaptação à especificidade de cada caso em apreço.

O acompanhamento geológico e geotécnico da escavação de túneis por técnicos experientes apoiados por especialistas permite eliminar ou mitigar o **R2.1**. Recorrendo a metodologias de eficácia comprovada na caracterização do maciço rochoso, em particular a resistência da rocha, estado de alteração e grau de fraturação, características das discontinuidades, afluência de água e conjugação da atitude das discontinuidades com a do túnel, é possível identificar as principais situações de potencial instabilidade e eliminar este risco.

Como medida otimizadora de gestão deste risco indica-se a realização de uma avaliação periódica para verificar se as condições geológicas e geotécnicas observadas se enquadram no preconizado em projeto, de modo a dar sequência a essa avaliação, com recomendações de ajustes na contenção se necessário.

Conforme previamente referido, mesmo levantamentos geológicos e geotécnicos rigorosos, estão sujeitos a erros de medição e de apreciação.

Uma medida para mitigar o **R2.2** é a realização de duas classificações geomecânicas para o mesmo maciço, onde uma serve de verificação da outra. Na posse dos resultados de duas classificações, deve avaliar-se se ambas enquadram o maciço na mesma zona geotécnica ou na mesma classe de qualidade. Uma outra forma de validar as classificações utilizadas é recorrendo a correlações disponíveis na bibliografia, calculando-se o erro de uma em relação à outra. Caso a diferença entre valores resultantes da correlação sejam diferentes dos observados, é necessário ir verificar se cada parâmetro que constitui a classificação está corretamente caracterizado e ponderado.

Como forma de otimizar o trabalho desenvolvido na mitigação deste risco, os resultados das classificações podem ser correlacionados com outros parâmetros, como sejam as deformações medidas, para determinar qual a mais eficiente para o maciço presente.

O **R2.3** pode ser mitigado procedendo à análise da caracterização do maciço, em particular da atitude das discontinuidades em relação ao alinhamento do túnel. Para além da identificação expedita e imediata na frente de escavação da presença de cunhas ou blocos suscetíveis de se destacarem, é necessário realizar uma análise cinemática das atitudes das discontinuidades recorrendo a programas informáticos específicos; com este procedimento é possível comprovar o observado na frente de escavação e detetar eventuais situações que tenham escapado à observação expedita o que, caso se verifique, implica a necessidade de dar novamente indicações à frente de trabalho para retirar ou conter os blocos suscetíveis de destaque.

As medidas a adotar para mitigar o **R2.4** passam pela avaliação das características do terreno e o seu enquadramento em solo ou rocha e, ulteriormente, no enquadramento de possíveis roturas mais comuns, como sejam a deformação generalizada com confinamento, destaque de blocos e cunhas, explosão de rocha, fluência, entre outras.

Após identificação do modo de rotura é necessário aplicar a contenção preconizada em projeto e, em caso de necessidade, proceder à sua adaptação às reais condições observadas como seja, por exemplo, orientar as pregagens ou colocá-las especificamente em blocos que se estejam a destacar.

Como medidas mitigadoras do **R2.5**, numa primeira fase há a medição do caudal afluyente ao interior da escavação, seja de modo pontual em exurgências específicas, ou de modo global à saída dos túneis, isto permite analisar a variação e identificar situações de aumento significativo de caudal; no entanto, a medição do caudal afluyente à escavação, isoladamente, não constitui uma medida mitigadora. Como medida efetiva para controlo do risco deve ser prevista a execução de drenos para alívio de pressão da superfície de escavação e, posteriormente se necessário, impermeabilização da zona envolvente, por exemplo recorrendo à injeção do maciço com caldas de cimento ou colocando telas. Outra das medidas que pode ser implementada é o rebaixamento do nível freático, quer pelo interior do túnel através de furos subparalelos ao eixo, realizados de uma posição anterior relativamente à frente de escavação, ou a partir da superfície, recorrendo a furos de bombagem. Das soluções patentes na bibliografia para lidar com a presença de água, surge o seu congelamento, mas em Portugal é uma solução muito onerosa.

Como medidas otimizadoras da gestão deste risco, a água drenada pode ser captada para utilização na obra através da sua introdução na rede de abastecimento. Ou, caso se verifiquem aflúncias pontuais significativas, pode ser colocado um coletor na abóbada ou hasteais dos túneis e canalizar a água diretamente, sem que tenha contacto com a obra, para devolução à linha de água, o que evita custo com o tratamento da mesma.

Como medida mitigadora do **R2.6**, indica-se a obrigatoriedade de introduzir o saneamento no ciclo de escavação, quer mecânico, quer manual com alavanca, o que permite realizar uma queda controlada de todo o material potencialmente instável e fazer uma avaliação da presença de material que já não necessita ser saneado, mas que tem de ser alvo de contenção.

Para mitigar o **R2.7** e numa primeira fase, é necessário verificar se a contenção preconizada em projeto efetivamente se encontra aplicada, quer em quantidade, quer em qualidade; e numa segunda fase verificar os pressupostos do projeto, particularmente se a contenção prevista é adequada para a qualidade do terreno, o que pode ser feito pela análise da deformação medida através da instrumentação.

A verificação periódica da adequabilidade da contenção, quer em termos de défice (identificada por deformação excessiva), quer em termos de excesso (identificada por ausência de deformação), pode constituir uma medida otimizadora para a construção.

Como medidas mitigadoras para o **R2.8**, indica-se a definição e implementação, nas frentes de trabalho, de metodologias executivas eficientes para a escavação, com aplicação imediata da contenção preconizada no projeto. Numa primeira fase é necessário caracterizar o maciço e identificar o tempo de autossustentação; seguidamente, garantir a aplicação da contenção dentro desse tempo. Para mitigar o **R2.9** é necessário definir os circuitos de informação, que incluam mecanismos de confirmação do seu envio/receção. O recurso a novas tecnologias de distribuição da informação, como sejam bases de dados num servidor na *internet* disponíveis para os intervenientes, que devem ser conjugadas com metodologias mais banais de comunicação, como seja a transmissão dos registos em papel.

6.3.3.2 Árvores de eventos

Árvore de eventos da Figura 6.4

Com base nos riscos apresentados na **árvore de eventos** constante na Figura 6.4 e na avaliação realizada na secção anterior, apresentam-se seguidamente as medidas tipo a implementar para controlo desses riscos, ressalvando-se que estas medidas podem não ser as únicas e podem necessitar de ser ajustadas à especificidade de cada obra e de cada situação.

Para todas as situações onde se verifique a afluência significativa de água é recomendável a execução de furos com geodrenos para alívio de pressão.

Nos casos onde não é realizada qualquer classificação geomecânica ou é utilizada apenas uma, é importante rever os procedimentos de acompanhamento técnico da obra para que sejam sempre realizadas pelo menos duas classificações.

O respeito pelo tempo autoportante teórico do maciço é fundamental para assegurar o decorrer dos trabalhos de aplicação da contenção dentro da segurança e de estabilidade da escavação.

Na aplicação da contenção, devem ser seguidas as recomendações e definições do projeto, devendo a sua alteração ser realizada apenas com devida fundamentação e concordância dos vários intervenientes na empreitada.

Seguidamente, aborda-se para cada um dos casos as eventuais medidas de controlo tipo mais relevantes a implementar.

Medidas de controlo para os ramos da Árvore de eventos da Figura 6.4

Perante o cenário descrito pelo **Ramo 1.A** da árvore de eventos, o risco é tolerável e admite-se não ser necessário implementar medidas de eliminação ou mitigação de risco.

A situação do **Ramo 1.B** também é tolerável, no entanto é recomendável a revisão de procedimentos no sentido de ser aplicada a contenção estritamente necessária para garantia de estabilidade da escavação, para promover a máxima produtividade.

A situação representada no **Ramo 1.C** corresponde a um risco intolerável, uma vez que a aplicação de menos contenção que a prevista pode levar ao colapso da escavação, pelo que é necessário proceder ao reforço da contenção, garantindo a prevista em projeto.

Perante a avaliação de risco resultante dos eventos do **Ramo 1.D** considera-se serem necessárias medidas de eliminação desta situação, que passam pela obrigatoriedade de aplicar a contenção necessária à garantia de estabilidade, dentro do tempo de autossustentação, mesmo que seja respeitada a quantidade preconizada em projeto.

Nos casos onde não é aplicada a contenção definida em projeto, quer seja mais (**Ramo 1.E**), ou menos (**Ramo 1.F**), a falha no respeito pelo tempo de autossustentação teórico do maciço implica sempre a possibilidade de colapso da escavação, acrescentando desperdício de tempo e de recurso na aplicação de contenção a mais que o previsto e maior possibilidade de colapso, no caso da contenção ser inferior à preconizada. A medida a implementar para eliminação, a revisão de procedimentos de modo a garantir a aplicação da totalidade da contenção e conforme o preconizado em projeto, dentro desse tempo.

O risco representado pela conjugação de eventos descritos pelo **Ramos 1.G** é tolerável; contudo pode ser diminuído pela revisão de procedimentos, incluído a verificação da classificação do maciço, por uma segunda classificação geomecânica.

O risco da situação representada pelo **Ramo 1.H** é igualmente avaliado como tolerável porque as consequências não incluem o colapso da escavação nem a afetação da integridade de pessoas e equipamentos, apenas resulta a falta de verificação da classificação do maciço e a aplicação de mais contenção que a preconizada em projeto, com o inerente desperdício de recurso e de tempo. Pelo referido, a mitigação deste risco passa pela revisão de procedimentos, quer de acompanhamento técnico da empreitada, quer executivos, com adequação da contenção às necessidades impostas pelo terreno para ficar estabilizado.

Relativamente à situação do **Ramo 1.I**, a situação é idêntica à referida anteriormente, mas com a agravante da contenção aplicada ser inferior à preconizada em projeto, o que tem como potencial consequência o colapso da escavação. As medidas para eliminação deste risco são a realização de uma segunda classificação para permitir comprovar a qualidade do terreno ocorrente e garantia de aplicação de contenção, conforme preconizado no projeto.

O **Ramo 1.J** representa uma situação de risco avaliado como intolerável, para o qual as medidas a implementar são a realização de uma segunda classificação geomecânica que corrobore o resultado da outra classificação e respeito pelo tempo autoportante preciso para a aplicação da contenção.

As situações dos **Ramos 1.K** e **1.L** são idênticas à anterior, mas com a agravante da contenção ser diferente da preconizada em projeto, o que resulta em riscos intoleráveis, mas de diferentes consequências, cuja respetiva eliminação passa pela realização de uma segunda classificação

geomecânica, garantia de aplicação da contenção dentro do tempo autoportante teórico e na quantidade e qualidade definidas no projeto.

Todas as situações onde a caracterização do maciço não contempla a realização de classificação geomecânicas, tem como medida a revisão de procedimentos para implementação da sua execução. Na situação descrita pelo **Ramo 1.M** não carece de outras medidas, mas no caso dos **Ramos 1.N e 1.O** para além de implementar a realização das classificações, é necessário ainda adequar a contenção aplicada ao preconizado em projeto para que seja garantida, por um lado a utilização de recurso adequados e, por outro não colocar em causa a estabilidade da escavação.

Como medida de controlo do risco representado pelo **Ramo 1.P**, é necessário garantir que os procedimentos de acompanhamento técnico da obra contemplem a realização de, pelo menos, duas classificações geomecânicas e os procedimentos executivos considerem a aplicação da contenção preconizada em projeto, dentro do tempo autoportante do maciço.

Os **Ramos 1.Q e 1.R** representam situação de risco muito elevado e intolerável que também têm obrigatoriamente de ser controladas pela implementação de medidas, onde a realização de classificações para determinar a qualidade do maciço é importante, bem como a aplicação da contenção dentro do tempo autoportante e em conformidade com o projeto, porque conforme já referido, se for a mais implica desperdício de recurso e tempo, e se for a menos acarreta instabilidade potencial.

A situação descrita pelo **Ramo 1.S** resulta num risco tolerável, para o qual é dispensável a implementação de medidas.

O cenário representado pelo **Ramo 1.T** revela um risco tolerável, mas para o qual se recomenda a aplicação de medidas que passam por ajustar a contenção que está a ser colocada em excesso, à quantidade preconizada em projeto.

Uma situação inversa à anterior, que revela um risco intolerável é indicada pelo **Ramo 1.U**, onde é necessário igualmente ajustar a contenção aplicada, mas incrementando-a até à quantidade prevista em projeto.

A aplicação de contenção para além do tempo autoportante teórico, conforme representado pelos **Ramos 1.V, 1.W e 1.X**, implica a necessidade de rever os procedimentos executivos nesse aspeto, sendo que para as situações representadas pelos dois últimos ramos indicados, é ainda relevante proceder à aplicação da contenção conforme consta no projeto, sem que a mesma seja em excesso ou défice.

A situação representada pelo **Ramo 1.Y** resulta num risco tolerável, embora a implementação da realização de uma segunda classificação geomecânica nos procedimentos, permita a redução do risco sem incremento significativo de trabalho ou de custos financeiros envolvidos.

O **Ramo 1.Z** representa uma situação muito parecida com a anterior, onde é recomendável, para além da realização de uma segunda classificação geomecânica, a revisão dos procedimentos executivos de modo a cumprir a aplicação da contenção preconizada em projeto.

Para a situação descrita no **Ramo 1.AA**, o risco é intolerável, sendo necessário implementar nos procedimentos de acompanhamento técnico a realização de uma segunda classificação e realizar um reforço de contenção de forma a colocar a prevista em projeto e, desse modo, garantir a segurança da escavação.

Para o cenário representado pelo **Ramo 1.AB** verifica-se um risco que resulta da falta de verificação da qualidade do terreno por uma segunda classificação e aplicação de contenção para além do tempo autoportante teórico do maciço, que têm como medidas eliminatórias a implementação de procedimentos que incluam a realização de, pelo menos, duas classificações geomecânicas e a aplicação da contenção conforme preconizada em projeto, respeitando o tempo autoportante teórico para o maciço.

Situações semelhantes são descritas pelos **Ramos 1.AC e 1.AD**, representando igualmente riscos intoleráveis, mas de diferentes níveis, porque resultam respetivamente da aplicação de, mais contenção do que a prevista e, menos do que a prevista. Para ambas as situações é necessário implementar a realização de uma segunda classificação geomecânica, a aplicação de contenção dentro do tempo autoportante teórico e na quantidade indicada em projeto, para que seja garantida a estabilidade da escavação, despendendo o mínimo de recurso e tempo na execução.

O cenário dos **Ramos 1.AE, 1.AF e 1.AG** resultam em riscos intoleráveis, onde não são realizadas classificações geomecânicas para determinar a qualidade do terreno, o que impossibilita conhecer o tempo autoportante teórico pelo que, admitindo que o mesmo é respeitado por não ocorrerem fenómenos de instabilidade, e independentemente de ser aplicada contenção de acordo ou não com o preconizado em projeto, são riscos que necessitam ser eliminados. As medidas respetivas passam pela revisão dos procedimentos de acompanhamento técnico da empreitada, com inclusão da realização de pelo menos duas classificações deste tipo e nos casos onde a contenção aplicada não está de acordo com o projeto, proceder para que fique em conformidade, o que só é possível no caso de ser colocada menos, não havendo nada a fazer no caso de ser aplicada mais que a preconizada.

Os **Ramos 1.AH, 1.AI e 1.AJ** descrevem situações idênticas às anteriores, mas onde se admite que o tempo autoportante foi ultrapassado, revelado eventual ocorrência pontual de fenómenos de instabilidade, como seja queda de algum material. Para estas situações, as medidas a implementar são a de realização de, pelo menos, duas classificações geomecânicas para determinar a qualidade do terreno e, na sequência, o tempo autoportante teórico. Nas situações, onde a quantidade de contenção aplicada é diferente da preconizada em projeto, em particular nas situações em que está em défice, é necessário reforçar; na outra, de estar aplicada mais do que a necessária, é preciso rever os procedimentos executivos para garantir a aplicação da estritamente necessária.

Árvore de eventos da Figura 6.5

Na construção de túneis em maciços rochosos, um dos riscos presente é a queda de blocos e cunhas da periferia da escavação que possam atingir pessoas ou equipamentos e, em casos extremos, levar ao colapso da escavação. Para análise desse risco foi apresentada uma **árvore de eventos** na Figura 6.5 e a sua avaliação realizada na secção anterior; seguidamente apresentam-se as medidas necessárias para controlo desse risco.

Para todas as situações que revelem afluência significativa de água é recomendável a realização de furos e drenos para alívio da pressão exercida na contenção e no terreno na periferia da escavação.

A falta de tratamento da informação recolhida sobre as descontinuidades, particularmente para deteção da presença de blocos e cunhas é facilmente suprimida pela sua implementação nos procedimentos de acompanhamento técnico da escavação, assim como, a identificação específica desses blocos e cunhas na frente de trabalho.

O saneamento da superfície escavada é fundamental para eliminar o risco de queda descontrolada de material, numa altura em que decorram outras atividades na frente de trabalho.

Como a queda de blocos e cunhas se trata de rotura frágil do maciço, sendo muito difícil de detetar as deformações para antecipar a sua ocorrência, uma das formas de eliminar este risco, é proceder de imediato à aplicação de contenção, principalmente das pregagens para conter blocos com potencial risco de queda.

Medidas de controlo para os ramos da Árvore de eventos da Figura 6.5

Para a situação representada pelos eventos que compõem o **Ramo 2.A**, o risco foi considerado tolerável, no entanto recomenda-se a realização de drenos para encaminhamento da água e, desta forma, diminuir a pressão exercida na contenção e nas descontinuidades.

Relativamente ao **Ramo 2.B** nem sempre é possível eliminar este risco com a aplicação imediata da contenção necessária para a estabilização; contudo, tem de ser mitigado de modo a que nas situações mais graves, os blocos potencialmente instáveis sejam todos saneados, independentemente da sua posição na escavação, ou em alternativa, garantidamente contidos. Adicionalmente devem ser realizados furos e drenos.

Para eliminar o risco representado pelos eventos do **Ramo 2.C**, é necessário incluir nos procedimentos executivos a realização de saneamento das superfícies escavadas, quer de modo mecânico recorrendo a giratórias com martelo pneumático, quer de modo manual recorrendo a uma alavanca.

As medidas para eliminar o risco do **Ramo 2.D** passam pela retificação dos eventos que lhe estão na origem, como realização de furos e drenos para drenagem da água, incluir no ciclo de escavação, de modo sistemático, a atividade de saneamento das superfícies escavadas e para a situação dos blocos que não sejam removidos pelo saneamento, mas que constituam uma situação de potencial instabilidade, é necessário aplicar contenção de imediato.

A situação representada pelos eventos que constituem o **Ramo 2.E** é eliminada pela revisão dos procedimentos de acompanhamento técnico da escavação, com a identificação específica dos blocos e cunhas potencialmente instáveis na frente de trabalho.

A eliminação do risco decorrente da situação representada pelo **Ramo 2.F** é feita pela identificação dos blocos e cunhas potencialmente instáveis na frente de trabalho e pela revisão dos procedimentos executivos de forma a contemplarem a aplicação de contenção de imediato.

A eliminação do risco inerente à situação descrita pelo **Ramo 2.G** pode ser feita pela implementação de procedimentos de acompanhamento técnico da escavação, que incluam a identificação dos blocos e cunhas na frente de trabalho, assim como procedimentos executivos para o seu saneamento e em caso de impossibilidade ou inconveniência de serem saneados por se encontrarem fora da secção de escavação, serem de imediato contidos.

As medidas a implementar para a situação representada pelo **Ramo 2.H** são idênticas às referidas para o risco anterior, onde é necessário realizar a identificação dos blocos e cunhas instáveis na frente de trabalho. Para eliminar os riscos da falta de saneamento e contenção imediata de eventuais situações que sejam necessárias, é fundamental rever os procedimentos para assegurar a implementação destas atividades de modo sistemático.

A ausência de projeção estereográfica para deteção de blocos potencialmente instáveis, pode ser parcialmente colmatada pela identificação expedita na frente de trabalho; se a mesma se revelar eficiente e caso seja realizado saneamento e aplicação imediata de contenção (**Ramo 2.I**), as medidas a implementar resumem-se à revisão dos procedimentos de acompanhamento técnico da escavação com inclusão do tratamento estatístico da orientação das descontinuidades.

Em situação semelhante, mas onde a contenção não seja aplicada de imediato (**Ramo 2.J**), para além da revisão dos procedimentos de acompanhamento, também é necessário rever os procedimentos executivos para que seja aplicada contenção de imediato, sempre que necessária.

O risco inerente às situações onde não é realizada a deteção dos blocos e cunhas, mas os mesmos até são identificados de modo expedito na frente de escavação; contudo não há lugar ao seu saneamento, as medidas para eliminação são a execução daquelas atividades, implementando-as de modo sistemático, que no caso da contenção ser aplicada de imediato (**Ramo 2.K**) os procedimentos ficam por aí, mas no caso dos blocos e cunhas que não são saneados não serem contidos, também envolve risco, que necessita ser mitigado pela implementação dessa contenção (**Ramo 2.L**).

Para a situação representada pelo **Ramo 2.M**, que resulta num risco intolerável, as medidas eliminatórias são as de revisão de procedimentos, tendo em consideração a análise cinemática das descontinuidades por projeção estereográfica e identificação visual na frente de trabalho dos blocos e cunhas potencialmente instáveis. No caso de, para além da falha na projeção estereográfica das descontinuidades e na identificação prática das mesmas, a contenção não ser aplicada de imediato

(Ramo 2.N), às medidas anteriormente indicadas, é necessário acrescentar ainda a contenção dos blocos e cunhas potencialmente instáveis.

O risco resultante da situação descrita pelo **Ramo 2.O** pode ser eliminado pela implementação de procedimentos de acompanhamento técnico da escavação que contemplem o tratamento estatístico das descontinuidades e a identificação dos blocos e cunhas potencialmente instáveis na frente de trabalho. A estes procedimentos técnicos é necessário acrescentar a revisão dos procedimentos executivos, que passa pela implementação sistemática do saneamento das superfícies escavadas.

Situação idêntica à do ramo anterior é a do **Ramo 2.P**, mas com a agravante da contenção não ser aplicada de imediato, o que significa que, para além das medidas de controlo referidas para eliminar o risco anterior, é necessário rever os procedimentos executivos para contemplar a aplicação de contenção nos blocos e cunhas suscetíveis de queda.

Todas as situações representadas pelos ramos onde não se observam descontinuidades no maciço (**Ramos 2.Q, 2.R, 2.S e 2.T**), têm um risco considerado tolerável, que dispensa a implementação de medidas de controlo.

As restantes situações representadas na árvore de evento são um espelho das anteriormente descritas, com a diferença de não se verificar afluência significativa de água ao interior da escavação, pelo que as medidas a implementar são idênticas às correspondentes à mesma posição da árvore quando se verifica afluência significativa de água (**Ramos 2.U, 2.V, 2.W, 2.X, 2.Y, 2.Z, 2.AA, 2.AB, 2.AC, 2.AD, 2.AE, 2.AF, 2.AG, 2.AH, 2.AI, 2.AJ, 2.AK, 2.AL, 2.AM e 2.AN**).

6.3.4 Riscos residuais

A aplicação de medidas de mitigação e eliminação dos riscos presentes na situação da frente de escavação por mais eficientes que sejam, podem sempre voltar a acontecer, ou essas medidas podem ainda gerar risco que não podem ser resolvidos e com os quais é necessário conviver, e como tal são considerados riscos residuais.

6.3.4.1 Lista de verificação

Seguidamente descrevem-se os principais riscos residuais, da gestão de riscos realizada com base na **lista de verificação** contante na Tabela 6.4, que eventualmente continuam presentes, mesmo após a aplicação de medidas de controlo.

Para o **R2.1**, o eventual risco residual inerente é a possibilidade de voltarem a ocorrer erros nos levantamentos geológicos e geotécnicos realizados pelo ATO.

O risco residual presente no **R2.2** é o da diferença entre as classificações geomecânicas poderem ter outra justificação que não o erro na sua aplicação, como seja a decorrente da diferença nos parâmetros

que constituem cada classificação, ou a possibilidade de erro nas duas, principalmente em parâmetros comuns a ambas.

O principal risco residual identificado no **R2.3** relaciona-se com a ocorrência de descontinuidades esporádicas de atitude aleatória, sem significado estatístico na análise cinemática, mas que apresentam características muito desfavoráveis para a estabilidade da escavação, e que passem despercebidas na análise realizada.

O risco residual do **R2.4** remanescente após aplicação das medidas de controlo indicadas é o da presença de um maciço que deixe dúvidas quanto ao seu enquadramento em solo ou rocha, como sejam as rochas brandas ou os solos rijos, que dificulte a identificação dos modos de rotura.

O risco residual decorrente do **R2.5** é a possibilidade de ocorrência de afluências imprevistas, de modo imediato, principalmente quando se atravessam com a escavação barreiras naturais de aquíferos como sejam, falhas com enchimentos impermeáveis, filões com elevado estado de alteração, ou linhas de água fósseis.

Como risco residual do **R2.6** surge a situação de haver possibilidade de um saneamento incompleto que não elimine a queda descontrolada de material.

O risco residual identificado no **R2.7** é a possibilidade de se verificar, tardiamente, que a contenção é desadequada, o que implica aumento do prazo de execução e custos acrescidos porque ou ocorreram deformações excessivas que têm de ser reparadas para garantir a estabilidade, ou foi aplicada mais contenção que a necessária para estabilizar o maciço.

Apesar destas medidas mitigadoras indicadas para o **R2.8** pode sempre ocorrer queda de material logo após a escavação por o tempo de autossustentação ser muito reduzido e impossibilitar a aplicação de contenção em tempo útil. Nesta situação fundamental, realizar pré-tratamento do maciço para melhorar as suas características para a escavação.

Com um sistema de informação que contemple um plano de alerta, com verificação de emissão e receção de informação torna-se muito eficiente; no entanto, relativamente ao **R2.9** pode haver como risco residual as falhas humanas, ou do sistema na transmissão ou receção da informação (falha informática ou falta de eletricidade, entre outras).

6.3.4.2 Árvores de eventos

Árvore de eventos da Figura 6.4

Os riscos residuais resultantes da aplicação da análise por árvore de eventos são idênticos aos já referidos para a lista de verificação, porque se tratam dos mesmos riscos, apenas analisados de diferente modo.

No controlo de risco considerando a **árvore de eventos** constante na Figura 6.4, o risco residual, após aplicação das medidas de controlo em determinada frente de escavação são nulos; contudo, mesmo

revido os procedimentos, continua a existir a possibilidade de se voltar a verificar estes riscos ao longo do túnel em novos avanços da escavação.

Para a situação da afluência significativa de água, pode continuar a verificar-se, sendo fundamental realizar a devida drenagem do maciço pela execução de furos e geodrenos de alívio de pressão, que em caso de necessidade, em terreno de características geomecânicas fracas, podem ser realizados a partir de uma zona antecedente.

Relativamente ao evento de utilizar duas classificações geomecânicas, uma como verificação da outra, a implementação deste procedimento elimina o risco, embora exista o risco residual da possibilidade de ocorrência de erro nas duas classificações.

Relativamente à aplicação da contenção dentro do tempo de autossustentação, após estimado esse tempo e comunicado aos diferentes intervenientes é necessário implementar os procedimentos de aplicação da contenção que respeitem esse tempo. O risco residual prende-se com o tempo necessário para aplicar a contenção exceder o tempo de autossustentação, ou problemas de execução, como são as avarias que levem a atrasos relativamente ao tempo habitual na aplicação da contenção.

A aplicação de contenção em quantidade ou qualidade diferente do preconizado no projeto, tem como risco residual a possibilidade de voltar a ocorrer em caso de negligência, porque de outra forma o controlo da quantidade e qualidade da contenção prevista e realmente aplicada permite eliminar este risco.

Árvore de eventos da Figura 6.5

Na Figura 6.5 apresenta-se uma **árvore de eventos** para análise dos riscos inerentes à queda de blocos na frente de escavação. Como riscos residuais decorrentes dos eventos presentes nessa árvore, após a respetiva avaliação e aplicação das medidas de controlo, aponta-se para a maioria das situações como risco residual único, os procedimentos não serem implementados por descuido ou negligência, como sejam a projecção das descontinuidades em diagrama de Schmidt, a verificação na frente de trabalho da presença de blocos e cunhas na periferia da escavação e a execução do saneamento.

Relativamente à aplicação imediata de contenção, embora esta seja recomendável no sentido de garantir a estabilidade e reduzir o risco de queda de material, esta pode não ser feita por as características do maciço serem boas e não ser necessário, o que não constitui um risco, mas também pode não ser realizada por falta de meios, como seja por exemplo, a avaria de equipamentos e nesta situação trata-se de um risco residual.

6.4 TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO

Os riscos presentes no trecho de túnel já escavado estão principalmente relacionados com a manutenção da garantia da estabilidade e sua verificação através de um plano de observação.

Para esta situação da fase construtiva são apresentadas seguidamente o modo como se podem detetar os principais riscos geotécnicos presentes, os quais são analisados recorrendo a uma lista de verificação e uma árvore de eventos. Após análise, os riscos são avaliados e são indicadas medidas de controlo para que, sempre que possível, sejam eliminados e, quando não for possível, sejam mitigados. Por fim são referidos os eventuais riscos residuais remanescentes.

6.4.1 Detecção e análise de riscos

A análise das situações e procedimentos patentes nos casos de estudo e descritos na Capítulo 5, aos quais se adicionaram outros referidos na bibliografia, permitem determinar o modo mais eficiente para a deteção dos principais riscos presentes no trecho escavado.

Para além da descrição do modo como os riscos podem ser detetados, para esta situação da fase construtiva são ainda apresentadas duas metodologias de análise, uma por lista de verificação e outra por árvore de eventos.

6.4.1.1 Lista de verificação

Os riscos que se descrevem seguidamente resultam dos principais perigos e consequências identificados nos casos de estudo e disponíveis na bibliografia.

Os perigos referidos são compilados de modo resumido numa lista de verificação constante na Tabela 6.5 e apresentados integralmente conjuntamente com as medidas de controlo e risco residual no Apêndice XII. Todos os perigos detetados para esta etapa da construção podem constituir riscos, porque têm como consequência extrema o colapso da escavação, pelo que na Tabela 6.5 são descritos de forma abreviada.

Tabela 6.5 – Lista de verificação de perigos desenvolvida para aplicar no trecho escavado

Risco	Ocorre	Não ocorre
R3.1 - Falha na instalação dos dispositivos de observação preconizados		
R3.2 - Falha na instalação atempada dos dispositivos de observação		
R3.3 - Falha na localização adequada dos dispositivos de observação		
R3.4 - Falha na frequência de leituras adequada		
R3.5 - Falha no tratamento de dados		
R3.6 - Falha no tratamento atempado da informação		
R3.7 - Deformação excessiva do maciço		
R3.8 - Elevada taxa de evolução da deformação		
R3.9 - Falha na deteção de situações de instabilidade pela monitorização		
R3.10 - Falha nas inspeções visuais		
R3.11 - Falha no circuito de informação		

O risco **R3.1 - Falha na instalação dos dispositivos de observação preconizados que provoque a instabilização**, resulta de falta de atenção no aprovisionamento e, às vezes, até de falta de percepção da objetividade de tais dispositivos no contributo para o desenvolvimento da construção por parte de alguns intervenientes na construção da obra, sendo por estes motivos descuidada a sua instalação atempada.

A falha na instalação destes dispositivos impossibilita a medição das eventuais deformações, pelo que deixa para as inspeções visuais a identificação de fenómenos de instabilidade.

A deteção deste risco é feita pela verificação da instalação dos equipamentos e dispositivos de observação, se está de acordo com o preconizado em projeto.

A situação do risco **R3.2 - Falha na instalação atempada dos dispositivos de observação que provoque a instabilização**, pode surgir na sequência do R3.1, como medida de mitigação desse, por instalação dos equipamentos e dispositivos de observação quando se deteta estarem em falta, ou pode surgir esporadicamente, resultado de descuido para com a importância de instalação atempada dos equipamentos, ou ainda, por impossibilidade perante os trabalhos em curso, como seja exemplo a instalação de convergências muito próximas da frente de escavação, onde o rebentamento para o avanço seguinte pode destruir os equipamentos ou dispositivos de observação já instalados.

A deteção deste risco é feita por verificação da data de instalação em relação à data em que a escavação da sua localização foi feita, uma vez que devem ser coincidentes, sendo a instalação dos equipamentos imediata após a escavação.

O risco **R3.3 - Falha na localização adequada dos dispositivos de observação que provoque a instabilização**, resulta habitualmente, de uma instalação com espaçamento geométrico dos equipamentos ou dispositivos de observação, sem a consideração pelas condições geológicas e geotécnicas ocorrentes, nem pela variação da qualidade do maciço encontrada ao longo da escavação.

A deteção deste risco habitualmente é feita quando surgem indícios de deformação, como fissuras ou queda de material, sem que os instrumentos de monitorização geotécnica indiquem qualquer movimento do terreno.

O risco **R3.4 - Falha na frequência de leituras adequada que provoque a instabilização** pode resultar de dois fatores distintos: a implementação de um intervalo entre leituras muito alargado, ou com leituras esporádicas dos equipamentos; e a utilização de uma frequência de leituras diminuta, mas a deformação ser de tal ordem rápida que ocorra após a última leitura.

Para detetar este risco é necessário observar os indícios de instabilidade revelados por patologias na contenção ou queda de material sem que sejam detetadas deformações pelos equipamentos de monitorização.

O risco **R3.5 - Falha no tratamento de dados que provoque a instabilização**, habitualmente resulta de uma apresentação das leituras que não revela as deformações ocorridas, por serem apresentadas, quer de forma numérica, quer de forma gráfica com escala dos eixos desadequada (pouco

pormenorizada). Uma apresentação desadequada acarreta às vezes que a interpretação não seja possível, ou que não seja imediata, perdendo-se informação ou tempo necessário para uma intervenção.

A deteção deste risco é feita pela verificação do modo de apresentação dos dados, que deve ser gráfica e com escalas adequadas às deformações medidas e com disponibilização dos dados imediatamente após as leituras.

O risco **R3.6 - Falha no tratamento atempado da informação que provoque a instabilização**, resulta de atraso no tratamento da informação. Fazer leituras sem que as mesmas sejam alvo de tratamento no cálculo das deformações e toda a informação distribuída aos vários intervenientes é igual a não fazer monitorização, porque se não existe informação disponível, não há possibilidade de a analisar, nem de serem tomadas medidas em caso de deformações excessivas, o que pode levar ao colapso da escavação sem possibilidade de se tomarem as medidas adequadas atempadamente.

A deteção é feita pela verificação do tempo decorrido entre as leituras e a disponibilização dos dados.

O risco **R3.7 - Deformação excessiva do maciço que provoque a instabilização**, resulta das condições geológica e geotécnicas do maciço e do défice de contenção aplicada para garantir a estabilização.

Para detetar este risco é necessário acompanhar a evolução das deformações ao longo do tempo, onde deformações com taxa de evolução elevada, ou para além dos limites de alerta definidos, devem ter as devidas medidas de controlo.

O risco **R3.8 – Elevada taxa de evolução da deformação que provoque a instabilização**, refere-se à situação da taxa de evolução das deformações ser elevada, onde a rotura do maciço possa estar eminente.

A deteção deste risco é feita pela análise da evolução das deformações ao longo do tempo, onde o aumento da taxa de evolução é indicador de instabilidade.

O risco **R3.9 – Falha na deteção de situações de instabilidade pela monitorização que provoque a instabilidade**, pode ocorrer por avaria dos equipamentos, deficiente instalação, ou leituras com precisão insuficiente.

A deteção deste risco é feita pela observação no local, de fenómenos de instabilidade, como sejam patologias na contenção ou queda de material sem que os dispositivos de observação indiquem deformações.

O risco **R3.10 – Falha nas inspeções visuais que provoque a instabilidade**, pode ocorrer por falha humana na identificação das situações, ou por falta de condições para realizar as inspeções. Nesta última destacam-se a situações de ausência de meios elevatórios para chegar a toda a periferia da escavação, bem como o ambiente no interior da escavação, com a presença de pó no ar que dificulte a observação. Por outro lado, as inspeções visuais são adequadas para implementar onde a contenção

seja constituída por betão revelando-se pouco eficaz em zonas onde o maciço rochoso se encontra exposto.

O risco **R3.11 - Falha no circuito de informação que provoque a instabilização** pode ocorrer por negligência, quer da parte de quem envia, como da parte de quem recebe, ou por problemas no meio de transmissão.

6.4.1.2 Árvore de eventos

Para esta situação do trecho escavado, tendo em consideração os principais riscos que constam na lista de verificação, também foi concebida uma árvore de eventos. Conforme anteriormente referido, na ausência de uma base de dados significativa que permita o cálculo de probabilidade para uma análise quantitativa, a determinação da verosimilhança de ocorrência baseada na experiência adquirida no acompanhamento deste tipo de obras, afigura-se com adequada.

Os ramos da árvore resultam das situações identificadas nos casos de estudo e representam riscos semelhantes aos constantes na lista de verificação; contudo, são dispostos de modo sequencial para uma análise organizada, conforme se apresenta na Figura 6.6.

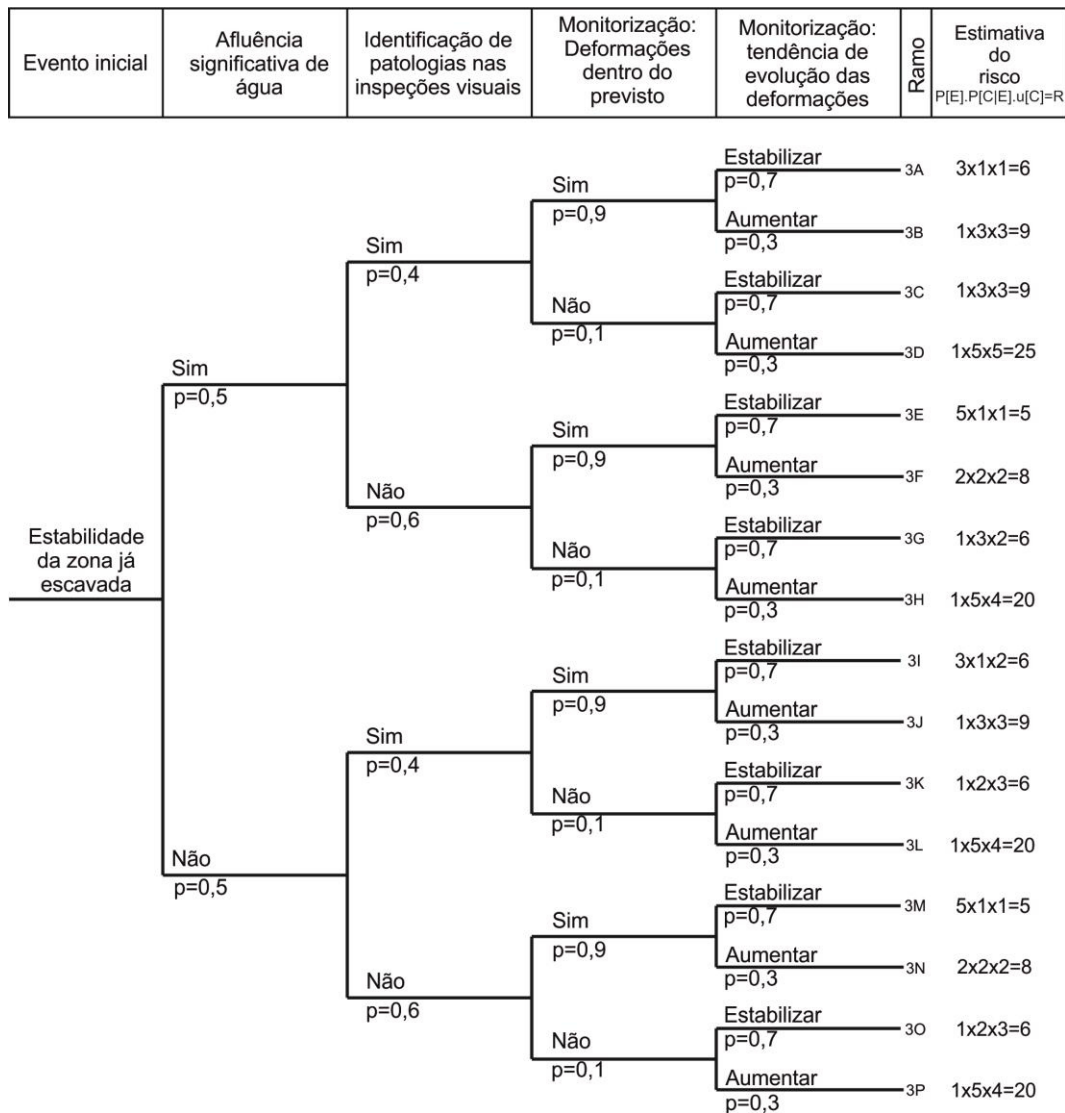
Como eventos principais a considerar nesta árvore selecionaram-se os seguintes:

- i. Afluência significativa de água;
- ii. Identificação de patologias na contenção;
- iii. Deformações da escavação dentro do previsto em projeto;
- iv. Tendência de evolução das deformações, no sentido de estabilidade ou de aumento da deformação.

A deteção do risco potencial, nesta situação de trecho já escavado, resulta da análise dos eventos já referidos anteriormente, onde a verificação da afluência significativa de água surge como um dos relevantes, uma vez que exerce pressão sobre a contenção e diminuiu as características mecânicas do maciço ao longo do tempo, pelo que é relevante o seu controlo.

A inspeção visual das superfícies escavadas permite a identificação de patologias na contenção e, eventualmente, no maciço e a repetição dessas inspeções, o acompanhamento das situações e eventual evolução. Estas inspeções tornam-se uma componente importante na monitorização porque permitem avaliar zonas que não foram contempladas com equipamentos de monitorização.

Na análise dos resultados da monitorização é necessário avaliar se as deformações se encontram dentro dos valores limites preconizados no projeto. Na falta de definição desses limites, a análise pode ser realizada por enquadramento das situações observadas nos gráficos sintetizados por Barton (2002), representados na Figura 3.11, ou em alternativa ou em complemento a Figura 5.35, onde se encontram os resultados das deformações registadas nos casos de estudo.



p - verusimilhança; P[E] - verusimilhança de ocorrência do evento; P[C|E] - verusimilhança de afetação do meio; u[C] - grau de dano; R - risco semiquantitativo

Figura 6.6 – Árvore de eventos para análise de risco geotécnico no trecho já escavado

Por último, esta análise de risco incide sobre a taxa de evolução que as deformações observadas apresentam. Ocorrem situações em que a deformação ainda se encontra dentro dos limites preconizados em projeto; no entanto, a taxa de evolução das deformações pode ser de tal modo elevada, que leve a ultrapassar esses limites num curto intervalo de tempo, passando a uma situação que pode rapidamente evoluir para o colapso da escavação.

Com os elementos das inspeções visuais e das deformações medidas é possível desenvolver uma carta de riscos do túnel para o trecho escavado. Trata-se de uma representação gráfica da planificação do túnel que deverá considerar informação sobre a qualidade do terreno, por exemplo representada pelo valor de RMR, a localização das convergências e sua situação de estabilização representada por código de cores que, conforme referido na Secção 3.1.4, deve reservar-se a cor vermelha para as situações mais gravosas e, em caso algum, se deverá utilizar a cor verde, nem mesmo em situações

estabilizadas ou que não se detete qualquer indício de instabilização, porque continua sob monitorização. A carta de riscos deverá ainda conter os resultados das inspeções visuais, igualmente codificada por cores para possibilitar uma leitura clara e objetiva.

A atualização periódica da carta de riscos permite uma perceção da evolução ao longo do tempo e do comprimento do túnel das situações identificadas.

6.4.2 Avaliação de riscos

Os riscos geotécnicos detetados para o trecho escavado foram compilados para análise numa lista de verificação e numa árvore de eventos. Seguidamente é feita a análise de cada um desses riscos, embora conforme já referido, a generalidades dos riscos presentes nas diferentes metodologias de análise é idêntica.

6.4.2.1 Lista de verificação

Relativamente aos riscos analisados recorrendo à **lista de verificação** apresentada na Tabela 6.5, resulta a avaliação que seguidamente se descreve.

O **R3.1** é de verosimilhança esperada (4) e de consequências críticas (4), porque podem levar à queda de material afetando pessoas e equipamentos, resultando em risco muito elevado (16) e intolerável, sendo imperativo a implementação de medidas de controlo.

O **R3.2** é de verosimilhança frequente (5) e com consequências críticas (4), o que resulta num risco de nível muito elevado (20) e como tal, intolerável, que pode ser eliminado pela instalação imediata dos dispositivos em falta.

Hoje em dia, os projetos de execução contemplam geralmente indicações e flexibilidade para realizar adaptações durante a fase construtiva, pelo que a verosimilhança de ocorrência do **R3.3** é remota (2) mas, caso ocorra, as consequências são críticas (4), pelo que o risco resultante é de nível médio (8), mas considera-se importante a implementação de medidas para a sua eliminação.

O **R3.4** é de verosimilhança remota (2), contudo caso ocorram é de consequências críticas (4) porque pode, no limite, ocorrer o colapso da escavação sem que seja detetada em antecipação, o que resulta num risco de nível médio (8), mas que deve ser contemplado por medidas de controlo.

O **R3.5** é de verosimilhança remota (2), mas as consequências podem ser críticas (4), uma vez que, a falta de interpretação das deformações ocorridas tem consequências idênticas à ausência de leituras porque não é possível detetar as deformações, podendo resultar no colapso da escavação. Isto resulta num risco de nível médio (8), mas que deve ser alvo de medidas para eliminação.

O **R3.6** é de verosimilhança remota (2), mas com consequências críticas (4) caso ocorra, resultando um risco de nível médio (8), que deve contar com medidas de controlo para a respetiva eliminação.

O **R3.7** é de verosimilhança remota (2), mas de consequências catastróficas (5), porque as deformações excessivas, conduzem no limite, a situações de colapso da escavação. O risco resultante é de nível elevado (10) e considerado intolerável, pelo que necessita de medidas de mitigação.

Muitas vezes o cenário de aumento da taxa de evolução é detetado antes de atingidos os limites de alerta e alarme. O **R3.8** é de verosimilhança provável (3) e de consequências catastróficas (5), resultando num risco de nível elevado (15) pelo que, de imediato devem ser desencadeados os mecanismos de implementação de medidas para controlo por este ser intolerável.

O **R3.9** representa situações de ocorrência remota (2), mas com consequências críticas (4) que, no limite, podem levar à impossibilidade de deteção de situações de instabilidade. O risco resultante é de nível médio (8), mas considera-se intolerável, necessitando da implementação de medidas de mitigação.

O **R3.10** é de verosimilhança provável (3) e de consequências críticas (4) porque a falha na deteção de situações patológicas na contenção pode levar, no limite ao colapso. O risco resultante é de nível elevado (12) e intolerável, pelo que deve ser alvo de implementação de medidas de controlo.

O **R3.11** onde existe um sistema de transmissão da informação bem implementado com métodos comprovados é de verosimilhança de ocorrência remota (2), mas de consequências críticas (4), o que revela um risco de nível médio (8).

Se a informação sobre o estado de estabilidade, ou de instabilidade da escavação, assim como das medidas a implementar para eliminação ou mitigação da situação, não for transmitida a todos os intervenientes e em particular à frente de obra pode, em situações graves, ocorrer o colapso da escavação, o que é intolerável.

6.4.2.2 Árvore de eventos

Os riscos constantes na **árvore de eventos** apresentada na Figura 6.6 são seguidamente avaliados, sendo cada um dos ramos a representação de uma situação de potencial risco.

A afluência significativa de água tem as consequências já referidas de contribuir para a instabilidade da escavação e para a eventual necessidade de bombagem e de tratamento da água antes de ser restituída.

A verificação de patologias na contenção tem de ser avaliada em conformidade com os estados de gravidade que apresentam, porque podem ser de vários tipos e com consequências diferentes, desde fissuras no betão projetado até colapsos de material, onde uma fissura não implica consequências graves, mas pode evoluir para outras situações sendo o último estado o colapso da escavação com possível afetação da integridade de pessoas, equipamentos e terceiros.

Para análise das deformações observadas é necessário realizar principalmente dois procedimentos, num primeiro, comparar o valor máximo verificado com os limites de alarme e alerta definidos no projeto e um segundo sobre a tendência de evolução das deformações ao longo do tempo.

A verificação de deformações para além do previsto ou do habitualmente registado em condições de terreno e de estruturas idênticas indicia uma situação não prevista, que poderá resultar da existência de um modelo desajustado, ou de deformação excessiva que poderá resultar no colapso da escavação.

Relativamente à tendência da deformação, a situação mais gravosa verifica-se quando há um aumento da taxa de evolução, que indicia instabilidade, particularmente gravosa quando a situação se verifica para além do limite de alerta, porque indicia colapso iminente da escavação.

Resumindo a avaliação de riscos resultante das situações compiladas pela árvore de eventos da Figura 6.6, temos:

- Risco tolerável – Ramos 3.E e 3.M;
- Risco tolerável, mas com recomendação de implementação de medidas de controlo – Ramos 3.A, 3.B, 3.C, 3.F, 3.G, 3.I, 3.J, 3.K, 3.N e 3.O;
- Risco intolerável – Ramos 3.D, 3.H, 3.L e 3.P.

Seguindo o ramo onde se verifica a afluência significativa de água, na situação representada pelo **Ramo 3.A**, são detetadas patologias na inspeção visual, mas a monitorização das deformações enquadra-se dentro do preconizado em projeto e a tendência de evolução das deformações indica estabilidade, o que resulta num risco de nível médio (6), mas tolerável; contudo é recomendável a implementação de medidas de controlo.

O **Ramo 3.B** da árvore de eventos é idêntico ao ramo A, mas com a diferença de se verificar um aumento da taxa de evolução das deformações, ou seja, indiciando o início da instabilização da zona, o que representa um risco de nível médio (9) e tolerável, mas para o qual se considera importante implementar medidas de controlo.

A situação de afluência significativa de água, com identificação de patologias pelas inspeções visuais, onde a monitorização das deformações revele valores para além do previsto em projeto, mas a tendência de evolução das deformações seja no sentido de estabilização (**Ramo 3.C**), resulta num risco médio (9) e tolerável, mas para o qual se recomenda a adoção de medidas de controlo.

A situação representada pelo **Ramo 3.D** da árvore de eventos apresenta a conjugação da afluência significativa de água, identificação de patologias na inspeção visual, onde a dimensão das deformações se encontra para além do previsto em fase de projeto e a tendência revelada ao longo do tempo é no sentido de aumento da deformação. Trata-se da situação com maior risco que se pode verificar no trecho já escavado, constituindo um risco muito elevado (25) e intolerável, para o qual é imperativo adotar medidas de contenção.

O **Ramo 3.E** representa uma situação com afluência significativa de água, ausência de identificação de patologias, as deformações dentro do previsto em projeto e a tendência de evolução das deformações no sentido de estabilidade, constituindo um dos cenários mais prováveis; embora as consequências

sejam diminutas, o risco resultante é médio (5), mas tolerável e sem necessidade de aplicação de medidas de controle.

Na situação idêntica à anterior, mas com a diferença da tendência das deformações ao longo do tempo ser no sentido de aumentar (**Ramo 3.F**), o risco resultante é de nível médio (8) e considerado tolerável enquanto o valor máximo das deformações não ultrapassar o nível de alerta definido pelo projeto; contudo, considera-se importante a implementação de medidas de controle.

Para a situação de afluência significativa de água, sem identificação de patologias na contenção, mas as deformações revelam valores para além do limite de alarme definido e a tendência de evolução ao longo do tempo é no sentido de estabilizar (**Ramo 3.G**), o risco resultante é de nível médio (6) e tolerável, embora se considere importante a implementação de medidas de controle.

Situação idêntica à anterior, com afluência significativa de água, sem se verificarem patologias nas inspeções visuais, e as deformações medidas estarem para além do previsto em fase de projeto, mas com a diferença de se verificar uma tendência de deformação no sentido de aumento, indiciando instabilidade da escavação (**Ramo 3.H**), o risco resultante é de nível muito elevado (20), sendo imperativo a implementação de medidas de controle.

Para o cenário representado pelo **Ramo 3.I** onde não existe afluência significativa de água, pelas inspeções visuais, mas são detetadas patologias ao longo da periferia do túnel que indiciem instabilidade, as deformações medidas revelam valores dentro do previsto em fase de projeto e a tendência de deformação é no sentido de estabilização, o risco resultante é de nível médio (6) e considerado tolerável, embora se admita ser conveniente a implementação de medidas de controle.

O **Ramo 3.J** da árvore de eventos representa uma situação semelhante à anterior descrita, com a diferença da tendência de deformação ser no sentido de aumento, revelando um risco médio (9), que se considera tolerável, embora seja conveniente a implementação de medidas de controle.

O **Ramo 3.K** da árvore de eventos, representa uma situação onde não se observa afluência significativa de água, as inspeções visuais identificam a presença de patologias, as deformações registadas encontram-se para além do previsto em projeto, mas a tendência de evolução das deformações é no sentido de estabilidade. Nesta situação o risco resultante é de nível médio (6), mas é recomendável a implementação de medidas de controle.

Situação idêntica à anterior, mas onde a tendência de deformação é no sentido de aumento (**Ramo 3.L**), o risco resultante é mais elevado que o anterior, sendo enquadrado no nível muito elevado (20), sendo fundamental a implementação de medidas de controle.

O **Ramo 3.M** representa uma situação de ausência de afluência significativa de água ao interior da escavação, onde as inspeções visuais não detetam patologias, as deformações medidas encontram-se dentro do previsto e a tendência de evolução ao longo do tempo é no sentido de estabilização. É das situações mais prováveis de ocorrer e sem consequências significativas; contudo, o risco resultante é

médio (5), devido à referida elevada possibilidade de ocorrência, mas não é necessário a implementação de medidas de controle.

Para a situação onde não há afluência significativa de água, não se identificam patologias nas inspeções visuais, as deformações encontram-se dentro do previsto em projeto, mas a tendência de evolução das deformações é no sentido de aumento dos valores observados (**Ramo 3.N**), o risco resultante é de nível médio (8) e tolerável, embora se considere importante a implementação de medidas de contenção.

Para a situação de ausência de afluência de água significativa, sem identificação de patologias na contenção, mas com as deformações observadas, para além do limite de alerta definido em projeto e com tendência de evolução a indiciar estabilidade da zona (**Ramo 3.O**), o risco é de nível médio (6) e tolerável, embora se considere relevante a implementação de medidas de controle.

Situação idêntica à descrita anteriormente, mas com a diferença da tendência de evolução ser no sentido de aumentar, indica instabilidade da zona (**Ramo 3.P**), o que resulta num risco elevado (20) e intolerável, sendo fundamental a implementação de medidas de controle.

6.4.3 Medidas de controlo

6.4.3.1 Lista de verificação

As medidas de controlo necessárias para dar seguimento à gestão de risco que inclui o recurso à **lista de verificação** da Tabela 6.5, são abordadas seguidamente.

A eliminação do **R3.1** tem de ser feita por sensibilização de alguns intervenientes, para a importância da instalação atempada dos dispositivos de observação e explicando a sua contribuição na identificação de situações graves para a estabilidade, na verificação de pressuposto do projeto e eventualmente na justificação da otimização das soluções preconizadas. Em caso de ocorrência, devem ser tomadas medidas mitigadoras da deficiente instalação dos instrumentos para medição no menor período de tempo possível.

Na fase construtiva, uma das medidas de otimização deste risco é desenvolver um plano de instrumentação que contemple a adequação da quantidade e localização de equipamentos, às reais condições geológicas e geotécnicas, contribuindo desta forma para uma maior fiabilidade dos resultados obtidos nas respetivas leituras.

Para o **R3.2** pode ser feita uma adaptação da localização dos equipamentos no sentido de monitorizar as zonas mais graves ou que suscitem dúvidas sobre a estabilidade uma vez que, na fase construtiva, são conhecidas as condições geológicas e geotécnicas do maciço, após a escavação.

Se a instrumentação for instalada corretamente, a sua localização deve ser representativa das características do maciço presente ao longo do túnel, encontrando-se cada zona geotécnica

devidamente representada. Sempre que ocorrerem variações das características do maciço, devem ser instalados novos equipamentos.

Como medida eliminatória do **R3.3** deve ser tida em consideração a qualidade do terreno ocorrente, onde as situações de características mais fracas devem ser contempladas com menor espaçamento entre secções de observação; assim como, situações de limite inferior de zonamento, também devem ser contempladas, para verificar se a contenção aplicada permanece adequada, ou sempre que as condições geológicas e geotécnicas variarem consideravelmente.

Nas situações de qualidade do maciço boa, ou que ao longo da escavação já tenha sido contemplada com vários dispositivos, todos eles reveladores de resultados idênticos de deformação fraca, a localização dos instrumentos de observação deve ser espaçada, introduzindo-se desta forma uma medida para otimizar este risco.

A eliminação do **R3.4** é realizada pela adoção de uma frequência máxima entre leituras de uma a duas semanas, preconizando-se o aumento da frequência de leituras caso ocorram deformações significativas, ou caso sejam realizados ou retomados trabalhos na zona. Habitualmente não são utilizadas frequências inferiores a diária, a não ser quando já se detetou deformações anteriormente. Contudo, o aumento da frequência de leituras não elimina a possibilidade de instabilização da escavação, apenas permite avaliar melhor a evolução das deformações. Para eliminar o risco de colapso é necessário reforçar a contenção aplicada.

A medida para eliminar o **R3.5** é recorrer a técnicos experientes neste tipo de trabalhos, apoiados por especialistas, que definam metodologias adequadas para tratamento e apresentação dos dados resultantes da instrumentação.

Em fase de construção podem ser implementadas medidas otimizadoras, adaptando ao longo da construção uma forma de apresentação que vá ao encontro das expectativas dos vários intervenientes, onde conste informação simples e objetiva.

Para eliminar o **R3.6** é necessário implementar como procedimento o tratamento dos dados logo após as leituras, com análise imediata ou no menor período de tempo possível por um especialista para que, em caso de necessidade, seja emitido atempadamente um alerta para implementar ações de estabilização. Após tratamento das leituras, estas devem ser disponibilizadas a todos os intervenientes.

Para eliminar o **R3.7** devem ser adotadas medidas estabilizadoras do maciço e, assim, realizado o reforço da contenção aplicada.

Como medida otimizadora da medição das deformações, devem efetuar-se avaliações periódicas, correlacionando a qualidade do terreno, com a contenção aplicada e deformações medidas, no sentido de verificar a adequabilidade da contenção, que conforme já referido anteriormente não deve ser em défice, nem em excesso.

As medidas eliminatórias para o **R3.8** passam pela aplicação de um reforço da contenção. Tal como para o risco R3.7, neste caso, se for frequente a verificação de tendência de evolução elevada das

deformações, também devem ser desencadeadas medidas otimizadoras para avaliação periódica da quantidade de contenção a aplicar de modo a evitar reforços posteriores.

A eliminação do **R3.9** passa pela aquisição de instrumentos de reserva; a sua instalação deve ser realizada por técnicos qualificados e as leituras feitas com recurso a equipamentos adequados.

Uma forma de mitigar a situação é o plano de monitorização contar com a presença de mecanismos de verificação das deformações pela redundância de leituras, com instalação de instrumentos distintos para as medir.

Como medida otimizadora a implementar na fase construtiva, indica-se a avaliação periódica dos erros de leitura, o que implica analisar os dados das secções de convergências estabilizadas e avaliar as variações existentes entre leituras consecutivas, ou com equipamentos diferentes realizar a mesma leitura.

As medidas de controlo do **R3.10** passam pela afetação prioritária de equipamentos para a realização de inspeções visuais e por garantir condições de ventilação e iluminação adequadas para desenvolver este trabalho. Por outro lado, estas inspeções têm de ser realizadas por técnicos experientes, com capacidade para analisar as situações ocorrentes e realizar registos precisos.

Como medidas a implementar para controlo do **R3.11** indica-se a existência de um circuito de informação bem definido entre as várias entidades desde o início da fase construtiva que preveja a confirmação de envio/receção da informação e, nos casos mais gravosos, deve contemplar uma dupla comunicação por diversos meios.

6.4.3.2 Árvore de eventos

Tendo em consideração os riscos avaliados na sequência da **árvore de eventos** constante na Figura 6.6 indica-se seguidamente as medidas de controlo para eliminação ou mitigação do risco. Conforme já referido para as outras situações da fase construtiva, estas medidas não são únicas e podem necessitar de adaptação perante a situação específica observada.

A situação descrita pelo **Ramo 3.A** é considerada tolerável, mas para diminuir o risco é recomendável a execução de geodrenos para libertar a pressão exercida pela água na contenção, reparação das patologias identificadas e realização de inspeções visuais com maior frequência.

A situação representada pelo **Ramo 3.B** é mitigada pela execução de geodrenos, a reparação das patologias observadas, aumento da frequência de leituras para monitorização das deformações e preparação dos equipamentos de aplicação de contenção para intervir no caso de necessidade.

A mitigação do risco representado pelo **Ramo 3.C** pode ser realizada pela execução de geodrenos e reparação das patologias identificadas nas inspeções visuais.

O **Ramo 3.D** representa um risco avaliado como intolerável, pelo que é obrigatório a implementação de medidas, indicando-se como adequadas a execução de geodrenos para alívio da pressão exercida

pela água na superfície de escavação e contenção e reforço de contenção de modo abrangentes a toda a zona representada pela medição das deformações e pelas patologias identificadas.

A sequência de eventos que constituem o **Ramo 3.E** representam um risco baixo, não carecendo de implementação de medida.

A mitigação do risco contante no **Ramo 3.F** é feita pelo aumento da frequência de leituras de monitorização, de modo a possibilitar um acompanhamento mais rigoroso da situação e preparação de meios para reforço de contenção em caso de evolução da situação.

O **Ramo 3.G** representa um risco tolerável, porque a situação indicia estabilidade da escavação, no entanto, como o nível de alerta foi ultrapassado é recomendável a execução de geodrenos para alívio da pressão exercida pela água na periferia da escavação.

O **Ramo 3.H** representa um risco intolerável porque evidencia uma situação de instabilidade da escavação, sendo fundamental a execução de geodrenos para alívio da pressão da água e reforço da contenção aplicada.

A situação esquematizada pelo **Ramo 3.I** é de risco tolerável, contudo é recomendável a reparação das patologias identificadas nas inspeções visuais.

Perante o cenário representado pelo **Ramo 3.J**, as medidas a implementar no sentido de mitigar o risco são de reparação das patologias observadas, aumento da frequência de leituras da monitorização e preparação dos meios para reforço de contenção para o caso da situação evoluir.

A situação referida no **Ramo 3.K** representa um risco de nível tolerável, mas para o qual se recomenda a implementação de medidas que passam pela reparação das patologias identificadas e maior frequência na realização das inspeções visuais.

Como medida de mitigar o risco representado pelos eventos que constituem o **Ramo 3.L** é necessário reforçar a contenção aplicada no mais curto intervalo de tempo possível de modo a evitar o colapso da escavação.

O risco revelado pelo **Ramo 3.M** é de nível médio, mas de consequências insignificantes, considerando-se que não há necessidade de implementar medidas de controlo.

Para a situação do **Ramo 3.N**, o risco envolvido é tolerável; contudo, considera-se importante implementar medidas para o mitigar, que passam pelo aumento da frequência de leituras e pela preparação dos meios necessários ao reforço de contenção para o caso da situação evoluir para maior risco, como seja o nível de alarme ser ultrapassado (nesta situação origina um outro risco).

O **Ramo 3.O** revela um risco associado à verificação de deformações para além do previsto em projeto, mas a tendência é indicadora de estabilidade, pelo que as medidas a implementar passam pela preparação de meios para reforço de contenção, para o caso da situação evoluir.

A situação revelada pelo **Ramo 3.P** indica instabilidade da escavação, sendo imperativo a sua correção, que passa pelo reforço da contenção aplicada.

6.4.4 Riscos residuais

6.4.4.1 Lista de verificação

Para os riscos geotécnicos eventualmente presentes no trecho de túnel escavados e que foram analisados com base na **lista de verificação** apresentada na Tabela 6.5, identificam-se os riscos residuais que seguidamente se descrevem.

O risco residual do **R3.1** é a continuação de ocorrência de situações de falta de instalação de instrumentação, eventualmente por negligência de alguns dos envolvidos na construção.

A situação do **R3.2** pode ocorrer em novas situações ao longo da execução dos trabalhos, pelo que a correção realizada para um local tem de ser estendida para todos ao longo do período de execução, com instalação atempada dos dispositivos de observação.

Como risco residual do **R3.3** encontra-se a possibilidade de, por menor que seja o espaçamento entre secções de observação, continuar a existir a possibilidade de ocorrerem situações de instabilidade entre os locais instrumentados.

O risco residual do **R3.4** é a possibilidade de voltarem a ocorrer deformações de elevada dimensão entre leituras, que coloquem em causa a estabilidade da escavação.

No **R3.5**, mesmo uma apresentação simplificada e clara, não invalida a presença do risco residual de continuarem a ocorrer dificuldades de interpretação, por parte de alguns dos intervenientes na fase construtiva.

Para o **R3.6**, o risco residual é a possibilidade de poderem sempre existir falhas no tratamento da informação, mesmo que esporadicamente.

Como risco residual do **R3.7** existe a possibilidade de ocorrerem novas deformações, mesmo após reforço da contenção.

O risco residual relativamente ao **R3.8** é idêntico ao do R3.7, e resulta da possibilidade de continuar a ocorrer elevada taxa de evolução das deformações, mesmo após reforço da contenção.

O risco residual do **R3.9** surge na possibilidade de ocorrência de deformações entre secções monitorizadas ou entre leituras sucessivas numa secção.

Para o **R3.10**, a falha humana constitui o principal risco residual; contudo, também se podem verificar problemas nos equipamentos elevatórios, de iluminação ou ventilação, que dificultem a realização da inspeção.

O risco residual relativo ao **R3.11** surge da possibilidade de todo o sistema de transmissão de informação falhar, encontrando-se como possibilidade para tal suceder a eventual negligência dos operadores na divulgação ou receção da informação, ou falha dos sistemas informáticos, telecomunicações, eletricidade, entre outros.

6.4.4.2 Árvore de eventos

Conforme referido, embora sejam utilizadas nesta situação do trecho de túnel já escavado, duas metodologias distintas de análise, os riscos envolvidos acabam por ser os mesmos pelo que seguidamente se referem de modos sucinto os riscos residuais que se podem remanescer da aplicação das medidas de controlo relativamente à análise por **árvore de eventos**.

Tendo como base a Figura 6.6, para as situações onde se verificou a afluência significativa de água, devem ser mitigadas pela execução de drenos, ou reforço dos existentes com mais quantidade ou comprimento, pelo que o risco residual inerente é a possibilidade da água continuar a exercer uma pressão para além da desejável.

A presença de patologias na superfície escavada ou na contenção aplicada, e que devem ser reparadas com aplicação de mais contenção, o risco residual associado é a possibilidade de voltarem a ocorrer novas situações semelhantes por a quantidade ou qualidade dessa contenção ainda ser insuficiente para garantir a estabilidade. Este risco residual é independente da monitorização das deformações, ou da tendência de evolução das mesmas evidenciar uma situação de estabilidade ou de aumento, embora o controlo destes parâmetros permita detetar novas situações de risco.

Nas situações descritas na árvore de eventos e onde não se identificaram patologias na inspeção visual, mas há o potencial risco de colapso da escavação, quer por as deformações observadas serem superiores às previstas em projeto, quer pela tendência de evolução revelar aumento, o risco residual é idêntico ao referido para os casos anteriores, porque mesmo após aplicação ou reforço de aplicação da contenção, há a possibilidade de voltarem a ocorrer as mesmas situações devido à quantidade ou qualidade das medidas implementadas serem insuficientes.

No capítulo seguinte (Capítulo 7) aplica-se a nova metodologia de gestão de riscos apresentada ao longo deste Capítulo 6 para validar os seus pressupostos e adequabilidade prática num túnel em construção.

7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia de gestão de risco geotécnico para a fase construtiva de túneis em maciços rochosos foi desenvolvida ao longo desta dissertação, tendo-se apresentado no Capítulo 6 os principais riscos ocorrentes, assim como as metodologias propostas, consideradas mais adequadas. Para estes riscos foram indicadas algumas medidas eliminatórias ou mitigadoras para, no final do processo, remanescerem apenas alguns riscos residuais aceitáveis.

Ao longo deste capítulo aquela metodologia é aplicada a um caso de estudo de uma empreitada em curso, nomeadamente o Túnel do Marão, revelando-se os resultados obtidos.

Conforme consta do Capítulo 3, o caso de estudo do Túnel do Marão será abordado de modo individualizado pelas quatro situações em que se divide a fase construtiva e, para cada uma delas, será realizada a gestão de riscos, com identificação e análise dos riscos geotécnico presentes, avaliação e identificação de medidas de eliminação ou mitigação a implementar no caso dos riscos ultrapassarem o limite do tolerável e, por fim, indicado o risco residual.

7.1 FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO

O início da construção do Túnel do Marão acarreta a necessidade de realizar uma verificação da informação geológica e geotécnica disponível e analisar os riscos existentes. Os riscos identificados são avaliados enquadrando-os como aceitáveis ou inaceitáveis sendo que, para esta última classificação, indicam-se as medidas necessárias para a sua eliminação ou mitigação. Adicionalmente, caso seja possível, são ainda apontadas medidas que otimizem o risco ocorrente.

Seguidamente apresenta-se a gestão de risco aplicada na fase inicial da construção do do Túnel do Marão.

7.1.1 Identificação e análise dos riscos

Na Tabela 7.1 consta a **lista de verificação** de riscos presentes no início da escavação, que foi apresentada no Capítulo 6 (Tabela 6.1) e é agora aplicada ao caso de obra em curso. Para complemento na identificação e análise verificadas nesta secção, assim como nas medidas de controlo e risco residual que se aborda nas secções seguintes, recorre-se à tabela incluída no Apêndice IX.

Regista-se que a aplicação da lista de verificação é de simples execução, bastando identificar e assinalar a presença ou ausência dos riscos descritos na lista. Mas, para justificação das opções assinaladas, descreve-se seguidamente cada um dos riscos considerados e seu enquadramento, em termos da presença ou ausência, neste caso de estudo.

Tabela 7.1 – TM: lista de verificação para a fase inicial da construção

Risco	Ocorre	Não ocorre
R1.1 - Conhecimento insuficiente dos riscos geotécnicos	X	
R1.2 - Estudos geológicos pouco desenvolvidos ou pormenorizados	X	
R1.3 - Conhecimento insuficiente das condições geológicas		X
R1.4 - Conhecimento insuficiente das condições hidrogeológicas	X	
R1.5 - Conhecimento insuficiente das características geotécnicas do maciço		X
R1.6 – Ausência de RGR	X	
R1.7 - Indefinição do zonamento geotécnico		X
R1.8 - Omissões ou insuficiência de estudos de comportamento mecânico do maciço		X
R1.9 - Ausência ou inadequação do plano de instrumentação geotécnica		X
R1.10 - Ausência ou inadequação do plano de monitorização		X
R1.11 - Ausência ou omissão de recurso ao MO		X
R1.12 - Inflexibilidade do projeto na adaptação às reais condições		X
R1.13 - Não antecipação de cenários geotécnicos adversos		X
R1.14 - Ausência de abordagem técnico-científica		X
R1.15 - Falha na identificação das reais condições do maciço		X
R1.16 - Produtividade baixa	X	
R1.17 - Ausência de circuito de informação definido	X	

No respeitante ao **R1.1**, constata-se que o processo de gestão de riscos não estava contemplado neste caso de estudo e como tal, a sua implementação torna-se imprescindível. Contudo, por razões de gestão de obra na perceção das vantagens da gestão de riscos, como processo específico, que integre as diferentes áreas técnico-científicas envolvidas neste tipo de construções, conduz a que a sua contemplação seja considerada apenas para algumas especialidades e sem a designação de gestão de risco.

No âmbito da geotecnia e perante a complexidade do cenário geológico presente na Serra do Marão (Secção 4.7), houve a necessidade de proceder à gestão de riscos, mas conforme referido, de uma forma dissimulada, sem essa designação formal.

Com a complexidade do cenário geológico presente ao longo do alinhamento adotado, em particular a existência de várias litologias, de dobras e de zonas tectonizadas, com características pouco conhecidas no que respeita à espessura e desenvolvimento em profundidade, o risco de estudos pouco pormenorizados (**R1.2**), respeitante às estruturas geológicas, encontra-se também presente. Assim existiam dúvidas que subsistiam, nomeadamente o desenvolvimento de algumas estruturas em profundidade, como seja de dobras e falhas, as quais não foram alvo de qualquer estudo específico de reconhecimento direto por sondagens, tendo sido apenas realizado um perfil geofísico que não foi totalmente elucidativo por falta de validação por um método de prospeção direto.

Relativamente à caracterização geológica (**R1.3**), a região do Marão tem sido alvo de vários estudos, quer de modo amplo na abrangência da região, quer de âmbito mais específico, devido à presença de minas na zona. O alinhamento do túnel foi ainda alvo de estudos para a fase de projeto.

Apesar da existência desses estudos, na fase de início de obra é necessário proceder à sua compilação e resumo, de modo a retirar a informação relevante, tendo em vista a construção do túnel e divulgá-la pelos vários intervenientes na obra.

Os estudos hidrogeológicos têm de garantir respostas, não só às questões que afetam diretamente a execução, como sejam caudais afluentes e pressão hidrostática com influência na estabilidade da escavação, mas também têm de dar resposta às questões ambientais e interferências com terceiros. Apesar de terem sido tomadas algumas precauções na identificação da afetação dos recursos hidrogeológicos com um sistema de monitorização do nível de água através da medição de piezómetros, isso não impediu a disputa judicial com terceiros e que levou à suspensão dos trabalhos por ordem do tribunal, até que fossem instalados mais dispositivos de observação que permitissem medir a posição do nível freático e averiguar a influência da escavação nos recursos hidrogeológicos envolventes. Pelo exposto, o **R1.4** encontrava-se presente.

O projeto de execução descreve a geologia ocorrente tendo em consideração os estudos já realizados sobre a região, revelando uma caracterização geotécnica do maciço baseado nos levantamentos geológicos realizados, pelo que o **R1.5** não se encontra presente.

Embora o relatório geológico fosse um dos documentos integrantes do projeto de execução, disponíveis no início da construção, não se encontrou qualquer documento específico de RGR, significa isto que o **R1.6** se verifica.

As condições geológicas e geotécnicas apresentadas no projeto levaram a considerar a presença de quatro zonas geotécnicas, onde constavam as características mais prováveis de ocorrer em cada uma delas e que permitiam enquadrar o maciço observado ao longo da escavação. Isto permite considerar que o **R1.7** não se verifica neste caso de estudo.

Perante as condições geológicas e geotécnicas identificadas, o projeto de execução indicava que poderia ocorrer destaque de blocos e cunhas da periferia da escavação e apresentava os valores expectáveis para a deformação do maciço no seu conjunto, o que descarta a presença do **R1.8**.

O projeto de execução contemplava ainda um plano de instrumentação e de monitorização, com identificação dos locais de instalação dos equipamentos em cada um dos emboquilhamentos. No caso da avaliação das convergências ao longo do túnel, era indicada a localização genérica e que a mesma se deveria adaptar às condições geológicas e geotécnicas presentes, com espaçamento máximo entre secções de 50 m para condições geotécnicas boas e espaçamento de 5 m em maciço de fraca qualidade, o que elimina a presença do **R1.9**.

O **R1.10** também não foi considerado presente neste caso de estudo, porque no projeto constava um plano de monitorização, onde era indicada a frequência máxima entre leituras, sendo a mesma

adaptada em função da taxa de deformação observada, onde quanto maior era esta taxa, maior era a frequência de leituras prevista, podendo no mínimo ser de uma vez por mês e, no máximo de duas vezes por dia.

Esse projeto admitia a variação das condições geológicas-geotécnicas ao longo da escavação, apresentando soluções executivas adequadas a essa variação, o que permite a implementação do MO, descartando-se assim a presença do **R1.11**.

Com a implementação do MO, fica afastado o risco de inflexibilidade do projeto nas adaptações às reais condições geotécnicas abrangidas pelo **R1.12**.

O **R1.13** também não se encontra presente porque, para previsão do terreno em avanço, em particular para a detecção de terreno com fracas características mecânicas, a metodologia de acompanhamento da obra incluía a execução sistemática de furos destrutivos em avanço. O acompanhamento técnico da execução preconiza ainda a utilização de metodologias para identificar o posicionamento da escavação na coluna litoestratigráfica e antever cenários de litologias diferentes, com comportamentos de estabilidade diversos, bem como a presença de zonas tectonizadas.

Para enquadrar o maciço escavado no zonamento geotécnico definido em projeto, entre outros trabalhos no âmbito da geologia e geotecnia, a construção deste túnel contava com o ATO neste domínio. Nesta empreitada havia também em permanência um ATO em engenharia civil por parte do projeto para realizar as devidas adaptações perante as reais condições encontradas. Com este acompanhamento por parte de técnicos experientes, o risco de falta de abordagem técnico-científica (**R1.14**) fica excluído, assim como o risco de impossibilidade de identificação das reais condições do maciço (**R1.15**).

A presença de quartzitos e a abrasividade que os mesmos podem causar nos equipamentos de furação, foi um assunto negligenciado. Como desde o início se previa a escavação pelo método D&B, sem recurso a TBM, a questão de abrasividade e escavabilidade do maciço assumia uma relevância menor. Relativamente ao restante dimensionamento de equipamentos e ritmo de escavação, são sempre considerados de modo otimista, pelo que existem sempre atrasos na escavação, mas pode-se admitir que os meios mobilizados conseguiram responder aos desafios da construção do túnel; mesmo assim, poderiam ocorrer situações de variação do terreno que colocassem em causa a produtividade, ou situações mais gravosas que o esperado que levassem mais tempo a ultrapassar, pelo que o **R1.16** foi considerado.

A definição de um circuito de informação é importante para que não se percam instruções nem registos relevantes (**R1.17**). Neste caso, não se encontrava claramente identificado um circuito de informação, nem estavam definidos os canais de circulação da informação de modo estruturado, pelo que existe um risco de perda de comunicação entre os vários intervenientes, quer fosse entre entidades, quer fosse entre membros da mesma equipa, embora desde o início da construção estivesse prevista uma base de dados disponível aos diversos intervenientes.

Perante os riscos geotécnicos identificados, seguidamente é necessário avaliá-los e descrever as respetivas medidas de controlo a implementar no caso em que são considerados intoleráveis.

7.1.2 Avaliação dos riscos e medidas de controlo

A análise de riscos, para este caso de estudo, permitiu verificar a presença dos riscos geotécnicos atrás enumerados, em particular os relacionados com a falta de existência de processo de gestão de riscos herdado das fases anteriores à construtiva (**R1.1**), com os estudos geológicos (**R1.2**) e hidrogeológicos pouco desenvolvidos (**R1.4**), com um RGR (**R1.6**) ou variações de qualidade do terreno que colocassem em causa a produtividade (**R1.16**) e ainda, a ausência de um circuito de informação bem definido e desenvolvido para garantir a distribuição da informação e a devida receção da mesma por parte de todos os intervenientes na execução da obra (**R1.17**).

A presença de qualquer um destes riscos é intolerável (têm o valor do nível de risco conforme identificado na Secção 6.1.2) e, como tal, é necessário implementar medidas no sentido de os eliminar ou de os mitigar, como seguidamente se apresentam; contudo, conforme já referido, sempre que possível é importante implementar também, em simultâneo, medidas otimizadoras.

No caso do risco de ausência de processo de gestão de risco (**R1.1**), o nível de risco é elevado (12), intolerável e a medida óbvia seria a de desenvolver esse tipo de sistema; contudo, a ausência de sensibilidade de alguns gestores sobre a importância deste processo, pode inviabilizar tal realização. Para contornar a situação, a solução que a direção técnica responsável pela gestão da geologia e geotecnia encontrou foi de implementar o processo de gestão de riscos sem a necessidade de lhe atribuir tal designação. Perante esta situação, devem ser desenvolvidos procedimentos, no sentido de se gerir os principais riscos geotécnicos presentes.

No caso de estudo em análise, a falta de conhecimento das estruturas geológicas ocorrentes (**R1.2**) constitui um risco elevado (12) que é intolerável, uma vez que a geologia estrutural da zona da Serra do Marão é complexa, com variações litológicas e a presença de zonas tectonizadas, dobras e fenómenos de metamorfismo e metassomatismo, que podem influenciar a qualidade do terreno a escavar ao longo do alinhamento do túnel, ou seja é um risco que resulta de verosimilhança de ocorrência elevada e de consequências críticas para o dimensionamento dos meios necessários à execução e possibilidade de ocorrências de cenários não identificados.

Como medidas para mitigar este risco, é necessário desenvolver estudos geológicos, contemplando cartografia geológica de pormenor da superfície e prospeção para reconhecimento do terreno em profundidade, com particular incidência nas zonas onde se verifiquem maiores dúvidas sobre essas estruturas. Neste âmbito é importante realizar e implementar um plano de prospeção, que pode ser faseado ao longo da empreitada e adaptado às necessidades de evolução dos trabalhos, diluindo os custos ao longo do tempo.

No respeitante aos estudos hidrogeológicos (**R1.4**), os riscos envolvidos estão relacionados com os caudais afluentes ao interior da escavação, que podem provocar problemas de estabilidade acrescidos e eventual necessidade de bombear água, no caso das frentes do lado Nascente, que têm pendente descendente. Isto resulta num risco de nível elevado (15) e intolerável.

Ainda neste contexto é necessário ter em atenção a afetação, quer dos recursos naturais no ambiente envolvente, quer de terceiros que tenham captações nas imediações.

O controlo deste risco é feito pela instalação de uma rede piezométrica que permita a monitorização do nível de água e a sua afetação pela escavação do túnel, realização de ensaios de bombagem para definir a transmissividade do maciço e influência no ambiente e em terceiros pelo controlo de caudais em linhas de água, nascentes e captações nas proximidades do alinhamento.

As medidas mitigadoras passam pela realização de injeções de impermeabilização, colocação de telas impermeabilizantes no interior do túnel, ou até mesmo possibilidade de congelar a água afluente, embora relativamente a esta última se desconheça a sua utilização em Portugal, devido aos custos envolvidos.

A ausência do RGR, conforme consta do **R1.6** é uma situação que representa um risco médio (9), mas que é intolerável, considerando que foi desenvolvido um estudo geológico e geotécnico que serviram de base ao projeto. Contudo, não foi tida como relevante a sua realização por a empreitada já se encontrar em curso e porque as condições geológicas, conhecidas no início da escavação, já se encontravam patentes no projeto de execução.

O risco de défice de produtividade por falta de conhecimento do terreno a escavar (**R1.16**) é de nível muito elevado (20) e intolerável, porque o défice de produtividade pode ditar o insucesso da obra em termos de prazo de execução e financeiros.

Para mitigar este risco é necessário investir em estudos de reconhecimento geológico e geotécnico, que podem passar por cartografia de pormenor e realização de prospeção e ensaios, o objetivo é determinar as características do terreno ocorrente e fornecer elementos sobre os parâmetros geotécnicos que possam influenciar a produtividade, como sejam a qualidade do maciço para a escavação do túnel, resistência e abrasividade do material, quantidade de afluência de água e pressão hidrostática, estado de fraturação do maciço e dimensão dos blocos, condições de estabilidade do terreno, vão máximo e tempo autoportante para que possa ser definido o avanço máximo a realizar sem necessidade de aplicar contenção, entre outras.

O risco de ausência de circuito de informação (**R1.17**) é de nível elevado (12) e intolerável, porque a incapacidade ou impossibilidade de transmitir a informação aos vários intervenientes pode levar, em situações extremas, à impossibilidade de implementar as medidas necessárias atempadamente e para evitar situações de colapso ou desconhecimento sobre a alteração das condições geológicas e geotécnicas, que impliquem a adoção de procedimentos diferentes dos utilizados até então.

Para mitigar este risco é necessário desenvolver um documento específico onde conste o circuito de informação, quer a nível institucional, quer a nível nominal, dos vários intervenientes, que contemple mecanismos de alerta, com confirmação de receção de informação.

A título de exemplo sugere-se a implementação, em obra, de uma base de dados que todos possam consultar a qualquer momento, numa plataforma na *internet*. E sempre que se detetem situações mais graves, que levem à necessidade de implementar ações, qualquer interveniente deve proceder ao alerta, desencadeando trocas de informação pelos restantes, por exemplo recorrendo a correio eletrónico, com confirmação de receção por telefone.

7.1.3 Riscos residuais

Perante os riscos detetados neste caso de estudo, para a situação de início da fase construtiva, foram avançadas medidas para controlo desses riscos, sendo o principal objetivo a sua eliminação; no entanto, para a maioria das situações, as medidas que podem ser implementadas permitem apenas a mitigação e não a eliminação, pelo que o risco residual se encontra presente.

O risco de ausência de processo de gestão de risco (**R1.1**) pode ser eliminado pela implementação de um processo na fase construtiva, sendo o risco residual o decorrente dos riscos existentes que já não podem ser eliminados nesta fase como seja, por exemplo, a eventual identificação de situações muito penalizadoras para a construção de túneis que obrigue, em condições normais prévias, à alteração do traçado.

O risco de conhecimento do cenário geológico-geotécnico (**R1.3**), ou ausência dele, nunca pode ser totalmente eliminado, porque os maciços são heterogéneos, e por mais estudos que se realizem nunca há garantias de obter um conhecimento absoluto. A ocorrência de estruturas geológicas que não sejam possíveis de identificar à superfície, e que não tenham sido detetadas com recurso à prospeção, pode sempre existir, acrescentando neste caso de estudo o túnel ser extenso, numa zona onde às vezes ocorre grande coberto vegetal.

Apesar dos estudos hidrogeológicos permitirem desenvolver um cenário sobre os riscos presentes neste domínio (**R1.5**), continua presente um risco residual, de situações locais, como seja um alinhamento estrutural que permita maior circulação de água. Isto pode inverter uma situação que se encontrava controlada, afetando a estabilidade da escavação, captações de terceiros ou até o ambiente envolvente por perda de recursos hidrogeológicos disponíveis na região.

O risco residual inerente à verificação do **R1.6** relaciona-se com a possibilidade de disputas judiciais pelo desconhecimento das condições geológicas que se vieram a verificar ao longo da empreitada.

O défice de produtividade relacionado com as condições geológicas e geotécnicas (**R1.16**) pode sempre suceder, constituindo um risco residual. Mesmo com o aprofundar do conhecimento geológico e geotécnico, conforme se referiu acima, podem sempre surgir situações imprevistas ou imprevisíveis, que condicionam todo o planeamento que se baseou nos elementos disponíveis.

Com a implementação de um circuito de gestão de informação com confirmação de emissão-recepção, o risco de transmissão da informação (**R1.17**) fica eliminado, contudo continua presente um risco residual associado à dinâmica e relevância dada por cada interveniente a essa informação, que pode levar a um bloqueio do sistema por inoperância.

7.2 TRECHO DE TÚNEL A ESCAVAR

Conforme referido por diversas vezes ao longo desta dissertação, a heterogeneidade do maciço rochoso constitui um dos principais riscos em geotecnia, sendo um dos mais complexos de gerir porque a variação das características do maciço entra no domínio do desconhecido e, às vezes, até do que não é possível antecipar.

No Capítulo 5 foram apresentados dados referentes à variação das características de maciços rochosos ao longo da abertura de túneis hidráulicos, apresentadas estatísticas de ocorrência da qualidade do maciço e testadas metodologias para estimação da qualidade em antecipação. Estas metodologias são aplicadas em seguida ao estudo do TM para determinar a qualidade do terreno mais provável de ocorrer no trecho de escavação seguinte e sua variação.

7.2.1 Identificação e análise dos riscos

Para o caso de estudo em apreço, descreve-se que o mesmo se insere num maciço metassedimentar, tal como os casos de estudo já concluídos de AHB e AHA, embora num enquadramento geológico regional diferente.

Conforme referido na Secção 5.2.6, o caso da AHB e o de um maciço de características particulares que difere dos restantes casos de estudo, já o AHA apresenta resultados semelhante aos restantes casos, localizados num cenário granítico. Assim, os elementos de base para realizar a análise de risco neste caso do TM, para a situação do trecho a escavar, será o do conjunto de todos os casos de estudo porque tem maior significado estatístico.

Considerando os resultados de RMR obtidos em todas as frentes de escavação dos cinco casos de estudo já concluídos, sintetizados na Secção 4.6 e revelados com nova apresentação visual na Figura 7.1, é de esperar um valor RMR médio próximo de 63, com variação entre 13 e 95, encontrando-se uma classe mais frequente com valores de RMR entre 70 e 75.

Perante a distribuição apresentada, enquadrando os valores de RMR nas classes de qualidade do maciço rochoso, conforme definidas por Bieniawski (1989) e constantes na Tabela 5.7, é expectável que o maciço enquadrado em classe de qualidade I ($RMR > 80$) não chegue a 10%, o pertencente à classe II ($60 < RMR < 80$), seja o mais frequente, constituindo aproximadamente 50% das situações, o maciço inserido na classe III ($40 < RMR < 60$) seja de 30%, o correspondente à classe IV ($20 < RMR$

<40) constitua quase 7% das situações e que o maciço correspondente a características mais fracas para a escavação de túnel, enquadrado em classe V (RMR <20) seja inferior a 1% das situações.

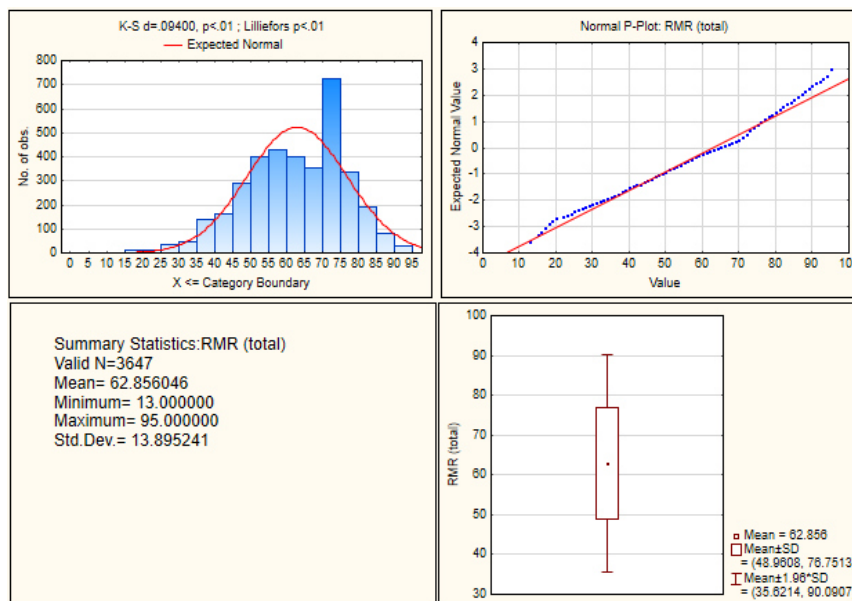


Figura 7.1 – Gráfico com distribuição do RMR expectável, baseado nos cinco casos de estudo já construídos

Com base nestes elementos, mesmo que os elementos de caracterização do maciço deste caso de estudo sejam escassos, torna-se possível traçar um cenário para a escavação com estimativa de rendimento de execução e custos associados à contenção a utilizar, assim como do prazo de execução.

Para a correta caracterização do maciço é fundamental que todos os parâmetros sejam recolhidos com o máximo de rigor, seguindo as metodologias e indicações sugeridas pela ISRM (2007), ou recorrendo a estimativas utilizando métodos já comprovados. Contudo, perante os elementos constantes na Tabela 5.6, é de considerar que as características das discontinuidades sejam as principais responsáveis pela alteração da qualidade do maciço, podendo a sua variação ao longo da escavação, no caso de ser progressiva, servir de indicador em antecipação da mudança de qualidade do terreno.

Conforme consta na mesma Tabela 5.6, o método mais eficiente para estimação do valor de RMR em antecipação é a krigagem, ficando os valores estimados de modo expedito pelo especialista, próximos dos resultados obtidos por esse método.

Assim, para antecipar a qualidade do maciço presente na frente seguinte, durante o acompanhamento da escavação é importante verificar, sucessivamente a cada avanço, a possibilidade de alteração.

Conforme referido na Secção 3.1.2.3 na aplicação a este caso de estudo, a estimação dos valores de RMR durante o ATO limitou-se à análise do especialista, sendo o resultante da metodologia matemática aplicado nesta fase da investigação por retro análise.

Para este acompanhamento foi desenvolvida a Tabela 7.2, tendo-se optado pela apresentação em tabela em detrimento da gráfica porque a escala é ampla perdendo-se rigor; a análise encontra-se, na integridade, no Apêndice XIII, onde consta:

- Valor de RMR observado até à presente frente de escavação e classe de qualidade do maciço onde se insere esse valor;
- Valor de RMR estimado para o avanço seguinte da escavação e desvio padrão associado tendo por base:
 - Estimação e desvio padrão por krigagem;
 - Estimação e desvio padrão por especialista;
 - Probabilidade de ocorrência do RMR e desvio padrão na frente seguinte considerando o da atual frente;
 - Probabilidade do maciço na frente seguinte se enquadrar em cada uma das classes de qualidade.

Tabela 7.2 – TM: exemplo da tabela resumo com os resultados de estimação da qualidade do terreno em antecipação

PK	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão Expedito - Especialista			RMR provável + desvio padrão (Apêndice X)*			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V				
14233	55	III	54	48	60	56	50	62	55	48	62	0,006	0,158	0,785	0,050	0,002
14240	44	III	56	50	62	56	50	62	47	41	53	0,006	0,158	0,785	0,050	0,002

* A análise completa da distribuição associada à probabilidade de ocorrência do valor de RMR na frente seguinte baseado no valor de RMR observado na frente anterior carece da consulta dos elementos disponíveis no Apêndice X

Concretizando sobre os elementos contantes na Tabela 7.2, para estimação dos valores por krigagem e pelo especialista na aplicação a este caso de estudo, foram seguidas as metodologias apresentadas no Capítulo 3 e já aplicadas de igual modo aos casos de estudo concluídos no Capítulo 5, tendo daí resultado o desvio padrão para aplicar aos valores estimados.

Os valores de estimação resultantes do recurso à krigagem tiveram como base semivariogramas que revelaram um valor médio de amplitude de respetivamente 48 m, 44 m, 41 m e 45 m, para as frentes de trabalho do TPN, TPS, TNN e TNS, conforme se pode observar nos resultados estatísticos patentes no Apêndice IV. Estes valores de amplitude excedem muito o comprimento médio utilizado na estimação de foi de aproximadamente 3 m.

A probabilidade de ocorrência do RMR na frente seguinte resulta da análise de dados estatísticos dos casos já concluídos, apresentada no Capítulo 6 e constante no Apêndice X.

A probabilidade de enquadramento do maciço rochoso, presente no avanço seguinte, numa das cinco classes de qualidade do maciço, tendo em consideração a frente presente resulta dos elementos estatísticos baseados nos casos de estudo já concluídos e que constam da Tabela 5.7.

No Apêndice XIII apresentam-se as tabelas na integridade, para todos os trechos de avanço da escavação do TM, onde a cada avanço da escavação, novos dados são adicionados para estimar a qualidade do maciço na frente seguinte.

A implementação no acompanhamento diário da escavação, de modo sucessivo, desta estimativa de qualidade do terreno em antecipação, permite ter um cenário da qualidade do maciço para a frente seguinte, bem como ter a percepção da possibilidade da sua variação

Para este caso de estudo e perante a existência de quatro frentes de escavação, duas por nascente (Norte e Sul) e duas por poente (Norte e Sul), geram-se o mesmo número de tabelas para acompanhamento de cada uma das frentes, conforme se pode verificar no Apêndice XIII.

Nas Figuras 7.2 a 7.5 apresentam-se de modo resumido os resultados obtidos para cada uma das frentes de escavação do TM, utilizando as metodologias de estimação acima referidas (krigagem, apreciação expedita de um especialista e probabilidade de ocorrência da qualidade do terreno representada pelo RMR).

A Figura 7.2 mostra os resultados do túnel poente Norte, onde se verifica que o maciço observado se enquadra, em quase toda a extensão, na classe de qualidade III ($40 < \text{RMR} < 60$), com algumas variações pontuais, quer dos valores de RMR dentro dessa classe, quer com passagens à classe de qualidade superior (classe II), quer à de qualidade inferior (classe IV), em particular no trecho final desta frente, sendo que apenas em duas situações se verificou a ocorrência da classe com características mais gravosa para a estabilidade da escavação que levaram ao enquadramento do terreno na classe V ($\text{RMR} < 20$).

As diferentes metodologias de estimação utilizadas no acompanhamento revelam resultados idênticos, com o valor de RMR observado muito próximo do valor de RMR expectável. As ligeiras variações a este cenário, na generalidade, revelam que o valor observado ainda se enquadra dentro do desvio padrão. Apenas em algumas situações, muito pontuais, de variação brusca da qualidade do maciço, é que se verificou um valor de RMR observado para além dos limites definidos pelo intervalo do desvio padrão. Neste caso do túnel poente Norte, essas situações pontuais de variação brusca da qualidade do maciço levaram a alteração da classe, o que representa um risco acrescido.

Na Figura 7.3 apresentam-se os resultados obtidos para o túnel poente Sul, onde se verifica a presença de um maciço observado com menor variação de qualidade que o túnel Poente Norte, apesar destes túneis distarem apenas 10 m entre os hasteais mais próximos, o que por si só revela a heterogeneidade do maciço. Num trecho inicial de comprimento grande, a totalidade do maciço escavado enquadra-se na classe de qualidade III ($40 < \text{RMR} < 60$), identificando-se neste trecho, apenas uma situação onde se enquadrrou na classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$), depois passou a classe II ($60 < \text{RMR} < 80$), com algumas passagens a classe III ($40 < \text{RMR} < 60$) e no trecho final predominou o maciço de qualidade enquadrada preferencialmente em classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$), com algumas passagens pela classe III ($40 < \text{RMR} < 60$).

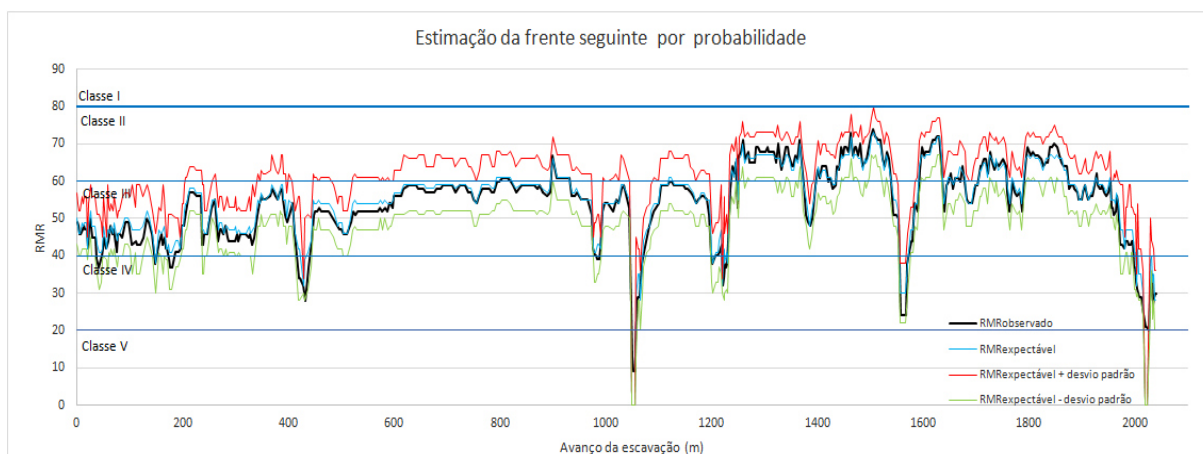
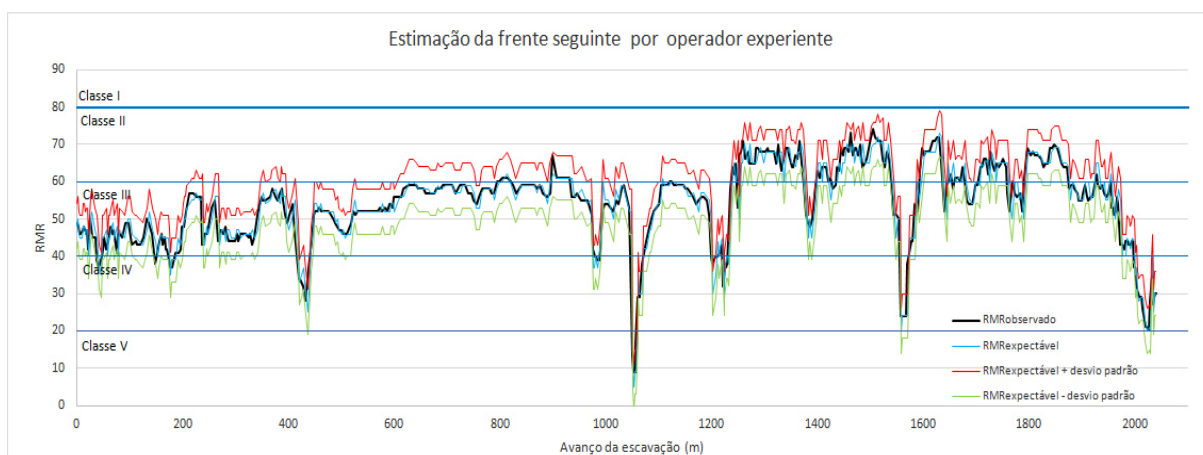
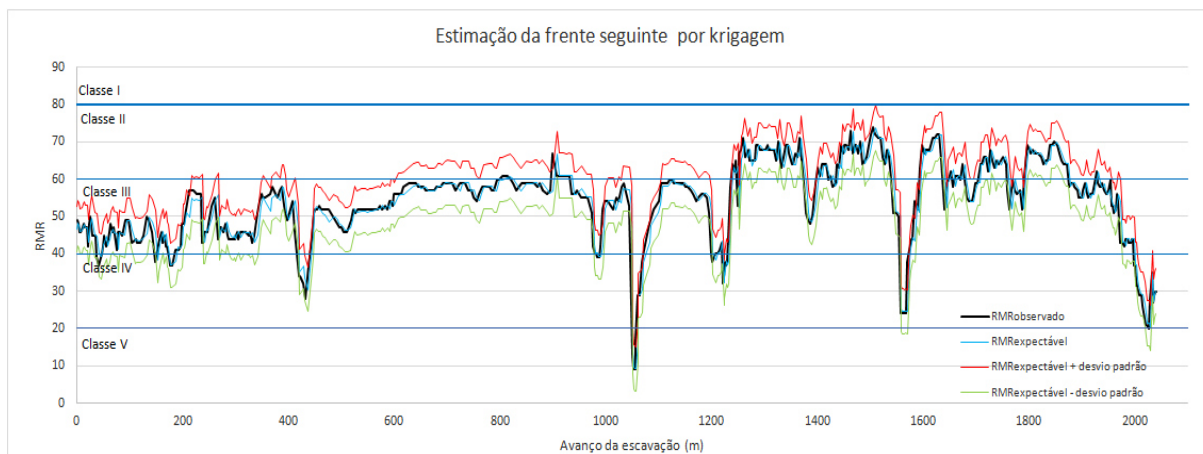


Figura 7.2 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel ponte Norte

No caso da Figura 7.3, entre as diferentes metodologias de estimação da qualidade do terreno em avanço, verificam-se resultados idênticos, com os valores de RMR expectáveis muito próximos dos valores de RMR observados e, para a quase totalidade da extensão escavada por esta frente de trabalho, as situações de variação da qualidade do terreno ficaram dentro dos limites definidos pelo desvio padrão.

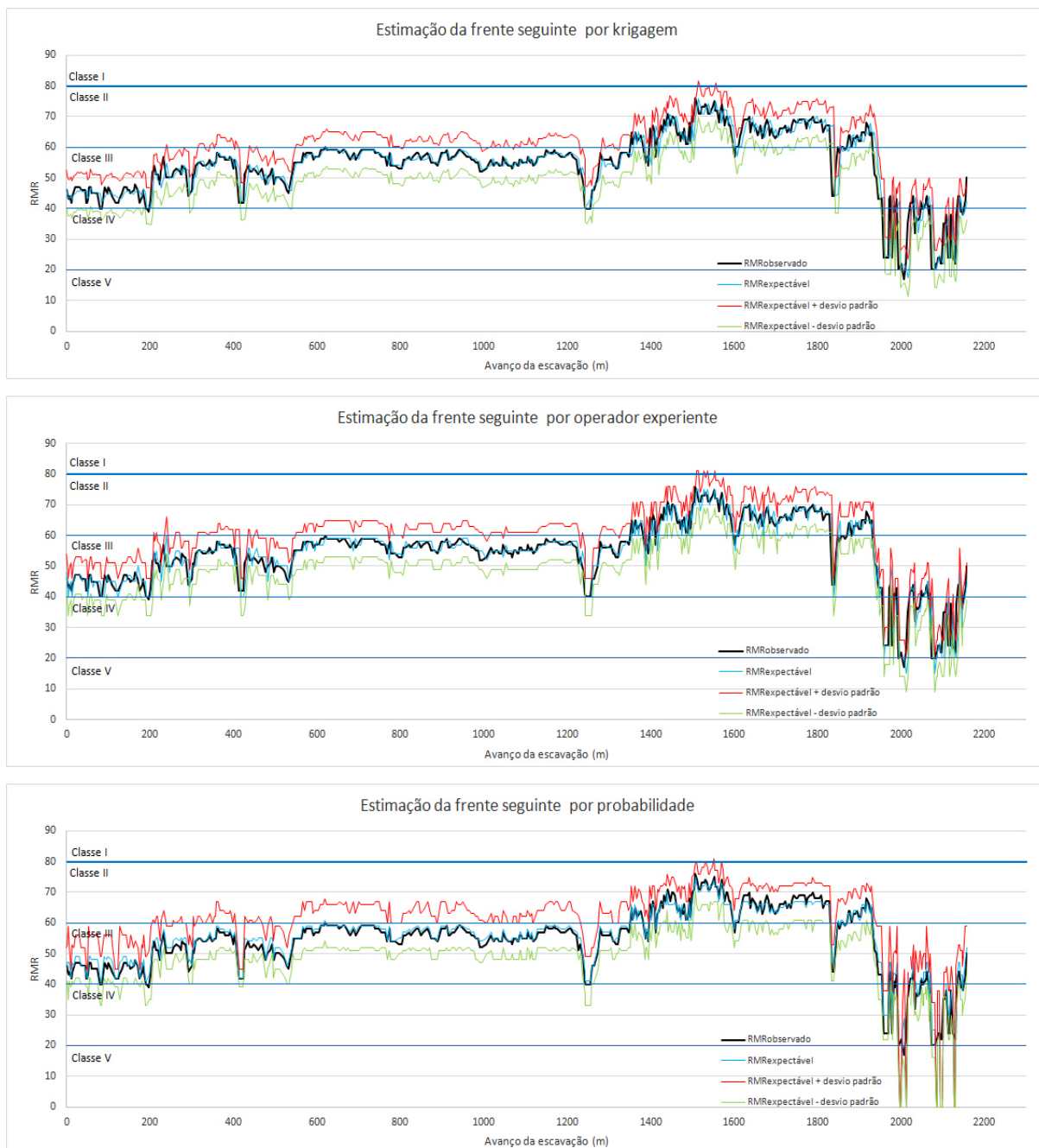


Figura 7.3 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel ponte Sul

Conforme se pode verificar pela análise da Figura 7.4, onde constam os valores de RMR observados e estimados para o túnel nascente norte, apesar de uma variação constante dos valores de RMR ao longo do túnel, o intervalo dessa variação normalmente é de amplitude reduzida, apenas no trecho final da escavação desta frente se observou, em termos gerais, uma diminuição da qualidade do maciço. A qualidade do maciço enquadra-se preferencialmente na classe de qualidade II ($60 < \text{RMR} < 80$), encontrando-se muito próxima da classe III ($40 < \text{RMR} < 60$), registrando-se várias ocorrências de maciço integrados nesta última. No trecho final verifica-se a ocorrência de maciço integrado na classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$).

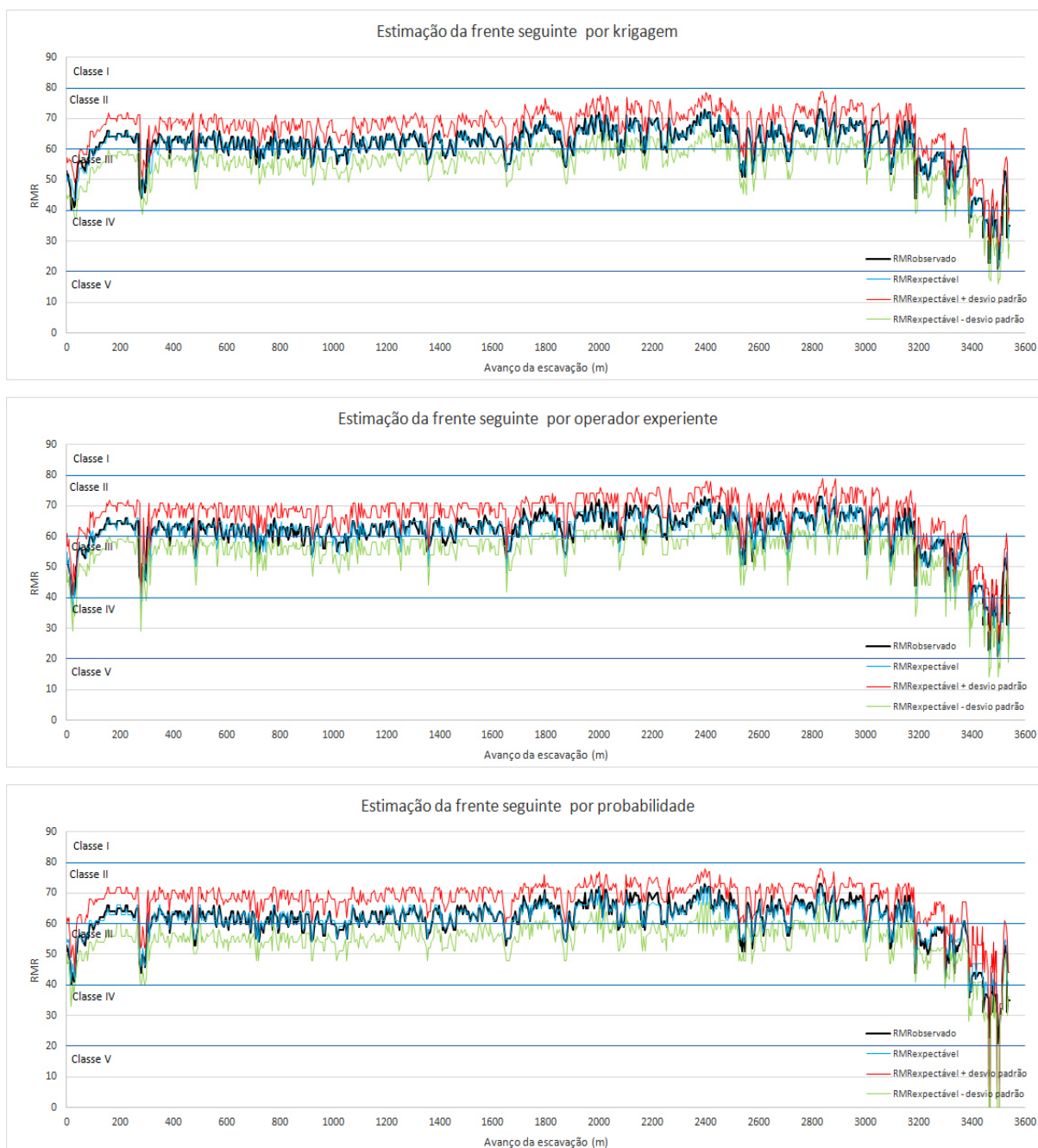


Figura 7.4 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel nascente Norte

As diferentes metodologias de estimação revelam resultados muito próximo, com os valores de RMR expectáveis idênticos aos valores de RMR observados e nas situações onde se verifica diferença entre o expectável e o observado, habitualmente a diferença fica dentro dos limites definidos pelo desvio padrão.

Os resultados obtidos para o túnel nascente Sul constam na Figura 7.5, onde à semelhança do túnel nascente Norte, que distam apenas 10 m entre os hasteais mais próximos, também se verifica, ao longo da extensão do túnel, uma variação constante de valores de RMR de amplitude reduzida. Neste caso, a qualidade do maciço enquadra-se preferencialmente na classe de qualidade II ($60 < \text{RMR} < 80$),

existindo várias passagens pela classe III ($40 < \text{RMR} < 60$). Há semelhança do observado para o túnel Norte, também se verifica uma diminuição, em termos gerais, da qualidade do maciço no trecho final da escavação desta frente de trabalho, enquadrando-se preferencialmente em classe III ($40 < \text{RMR} < 60$), com algumas passagens a classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$).



Figura 7.5 – TM: gráficos com os valores de RMR estimados e observados no túnel nascente Sul

Entre as diferentes metodologias de estimação os resultados são idênticos, sendo os valores de RMR expectáveis muito parecidos com os observados na realidade e as diferenças verificadas enquadram-se

em aproximadamente 90% dentro dos limites definidos pelo desvio padrão (o desvio padrão considerado foi o obtido dos casos de estudo já concluídos), conforme se pode verificar na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – TM: resultados dos valores de RMR estimados que se enquadram no intervalo do desvio padrão calculado com base nos resultados dos casos de estudo concluídos

	Krigagem	Expedito - Especialista	Probabilidade
TPN	0,83	0,84	0,91
TPS	0,86	0,88	0,92
TNN	0,86	0,87	0,95
TNS	0,90	0,90	0,97

Implementando no acompanhamento da obra esta metodologia em exclusividade e de um modo restrito, os resultados são os apresentados, mas no controlo de risco as metodologias utilizadas devem ser interligadas; nesta situação, por exemplo, com a análise das características do maciço imediatamente após a escavação.

Neste caso, onde existem dois túneis paralelos, com distância reduzida entre si (10 m), é possível recorrer aos elementos sobre a qualidade do terreno do túnel que se encontra numa posição de escavação mais avançada, para determinar a qualidade do terreno daquele que tem menor comprimento de escavação.

Neste caso, para o lado nascente, os dois túneis apresentam uma qualidade do maciço idêntica e conforme referido para os túneis do lado poente, o do lado Sul revelou na generalidade melhor qualidade do maciço que o do lado Norte. Este fato é explicado pela ocorrência de singularidades geológicas, como fenómenos metassomáticos localizados e pelo fato do túnel que tem comprimento maior, servir de dreno ao maciço, contando com maior afluência de água ao interior da escavação.

7.2.2 Avaliação dos riscos e medidas de controlo

A qualidade do maciço rochoso, presente ao longo da escavação do túnel, apesar de revelar variações constantes, estas são geralmente de amplitude reduzida, encontrando-se a qualidade do maciço na generalidade do lado poente na classe III ($40 < RMR < 60$) e no lado nascente na classe II ($60 < RMR < 80$), muito próximo do limite com a classe III, pelo que o risco associado à heterogeneidade do maciço é reduzido; contudo, existem casos particulares onde se verificam variações significativas e, se estas forem no sentido de qualidade mais fraca, são de consequências gravosas. A diminuição brusca da qualidade do maciço pode levar a uma situação que o tempo de autossustentação seja mais curto e que ocorra instabilidade da escavação, ou até mesmo o colapso se os meios não estiverem de prevenção para aplicar a contenção com celeridade, pelo que perante a imprevisibilidade destas situações importa ter sempre preparadas as medidas e os meios para intervir caso ocorrem.

No caso do túnel poente Norte verificou-se que a qualidade do maciço raramente alterava da classe III ($40 < \text{RMR} < 60$) para a classe II ($60 < \text{RMR} < 80$) e observou-se uma grande extensão onde a qualidade do maciço teve variações pouco relevantes (aproximadamente entre 550m e 900 m, na Figura 7.2), pelo que o risco de ter meios de contenção em excesso para as necessidades do maciço não se coloca. Em situação oposta, a constatação de algumas passagens bruscas no terreno enquadrado na classe III ($40 < \text{RMR} < 60$) para a classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$) e o registo de uma situação que chegou mesmo à classe V ($\text{RMR} < 20$), levou à necessidade de implementar medidas, nomeadamente a mobilização dos meios necessários para garantir a estabilização do terreno num curto período de tempo, uma vez que, quanto menor a qualidade do maciço, menor o tempo autoportante e maior rapidez é exigida na aplicação de contenção para assegurar a estabilidade.

O túnel poente Sul revelou ao longo da escavação uma qualidade, do maciço, idêntica à verificada no lado poente Norte; no entanto não se verificaram variações bruscas, nem passagens importantes a outra classe de qualidade do maciço; na situação mais gravosa, de ocorrência de maciço com características geomecânicas mais fracas, o maciço foi classificado com um valor de RMR próximo dos 40, ou seja dentro da classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$), mas muito próximo da classe III ($40 < \text{RMR} < 60$), pelo que o risco geotécnico resultante da heterogeneidade do maciço foi irrelevante.

Ambos os túneis (Norte e Sul) do lado nascente mostram um maciço com qualidade variável, mas a dimensão da variação é muito pequena. Com exceção da zona do emboquilhamento, que conforme referido ficam fora do âmbito desta investigação por os modelos terem poucos dados para a devida estimação, mas onde se registou uma qualidade mais fraca do maciço, que levou ao seu enquadramento em classe III ($40 < \text{RMR} < 60$) e classe IV ($20 < \text{RMR} < 40$) e a passagem por uma zona mais fraca próximo dos 350m de escavação (Figura 7.4 e 7.5), a restante extensão do túnel revelou um maciço de qualidade a variar em torno do valor de RMR de 60. Nesta situação, o risco de heterogeneidade do maciço é baixo; importa, no entanto, ter em atenção que podem surgir estruturas geológicas que condicionem a qualidade do maciço e, eventualmente, a estabilidade da escavação, as quais dificilmente são previstas pelos modelos utilizados para a estimação da qualidade do terreno.

7.2.3 Riscos residuais

A adoção de metodologias que permitem estimar a qualidade do maciço em avanço, conforme verificado com base nos cinco casos de estudo já executados e confirmado por este caso de estudo em curso, têm uma taxa de sucesso que chega a ser superior a 90%, com um erro do valor RMR estimado próximo de zero e com desvio padrão que, para a maioria das situações, é inferior a 6 valores; contudo, isto também revela que existem situações onde a utilização destas metodologias é falível, em particular quando há variações bruscas da qualidade do terreno, como são exemplo a presença de

zonas tectonizadas. Esta situação revela a presença de um risco residual de variação brusca da qualidade do terreno, o que é imprevisível.

Uma medida de fácil implementação na frente de escavação que permite mitigar este risco residual é a execução de prospeção em avanço. A adoção de furação com recolha de amostra permite ter acesso ao terreno, de modo direto, mas é um procedimento moroso que implica a paragem dos trabalhos de escavação durante muito tempo.

Mesmo recorrendo, de modo sistemático, a furação destrutiva, em caso de dúvida, é sempre possível realizar furação com recolha de amostra.

Uma fonte de informação adicional, apesar de muito limitada em comprimento, mas que não deve ser negligenciada, é o tempo de furação da pega de fogo. Cada pega de fogo na frente de escavação obriga à execução de inúmeros furos que têm o comprimento que se pretende escavar. O registo dos dados da furação por alguns equipamentos mais recentes, munidos de computadores que mostram as diagrfias instantâneas, podem ser analisados para verificar a diferença de tempo de furação, quer dentro do mesmo avanço da escavação, quer em avanços diferentes.

A implementação de prospeção em avanço pode reduzir o risco residual, resultante das metodologias de estimação, mas pode não ser suficiente para o eliminar, uma vez que qualquer prospeção por furação fornece elementos pontuais, pelo que noutra posição da frente de escavação o cenário geológico-geotécnico pode ser diferente.

O recurso a outros elementos disponíveis, como sejam os resultantes da cartografia de superfície, informação sobre outros túneis ou galerias já executadas, também devem ser utilizados, para esboçar o cenário no trecho a escavar e desta forma diminuir o risco residual, embora esta abordagem tenha ficado fora do âmbito desta investigação por questões de prazo.

7.3 FRENTE DE ESCAVAÇÃO

Os procedimentos construtivos adotados na frente de escavação podem ter variações de empreitada para empreitada, dependendo principalmente da equipa técnica afeta à produção e acompanhamento técnico no âmbito da geologia e geotecnia; contudo, os principais riscos geotécnicos são transversais e podem existir na maioria das obras, independente das pessoas e entidades envolvidas.

Tendo em consideração os procedimentos implementados na frente de escavação de um túnel, aplicam-se ao caso do TM, as metodologias de análise de riscos apuradas no Capítulo 6 para esta situação, nomeadamente a lista de verificação e as árvores de eventos.

Os riscos identificados nesta situação da fase construtiva são ainda alvo de avaliação e de apresentação de medidas eliminatórias ou mitigadoras dos riscos presentes. Mais uma vez se ressalva que as medidas apontadas são de âmbito genérico e não devem ser encaradas como únicas, e em qualquer situação dever ser avaliadas ou validadas pelo Projetista ou Entidade Fiscalizadora da obra.

7.3.1 Identificação e análise dos riscos

Os principais riscos geotécnicos presentes nos procedimentos construtivos na frente de escavação foram apresentados numa **lista de verificação** (Tabela 6.4) no Capítulo 6, que agora serve de base à identificação de riscos presentes neste caso de estudo, conforme consta na Tabela 7.4. Para auxiliar na gestão de risco recorrendo à lista de verificação pode ser consultado o Apêndice XI.

Tabela 7.4 – TM: lista de verificação desenvolvida para aplicar na frente de escavação

Risco	Ocorre	Não ocorre
R2.1 - Caracterização insuficiente da frente de escavação		X
R2.2 - Erro na classificação geomecânica do maciço		X
R2.3 - Falha na identificação da presença de cunhas e blocos	X	
R2.4 - Falha na determinação do modo de rotura do maciço		X
R2.5 - Ausência de controlo da afluência de água		X
R2.6 - Insuficiente execução do saneamento da frente	X	
R2.7 - Falha na aplicação de contenção	X	
R2.8 - Falha no cumprimento do tempo de autossustentação na aplicação de contenção	X	
R2.9 - Falha no circuito de informação		X

Dos riscos constantes na lista de verificação inicial, apenas alguns são identificados como presentes neste caso de estudo, nomeadamente o **R2.3**, **R2.4**, **R2.6**, **R2.7** e **R2.8**. Apresenta-se seguidamente a justificação da opção de considerar ou não a existência de cada um dos riscos que constitui a lista de verificação.

Com a implementação de um acompanhamento de execução em permanência no âmbito da geologia e geotecnia que tenha em consideração metodologias de recolha e análise de dados de eficácia comprovada já implementados e testados noutros locais, com resultados comprovados, fica fora de consideração o risco de caracterização insuficiente da frente de escavação que leve à instabilidade (**R2.1**).

O risco de erro na classificação geomecânica do maciço que provoque a instabilização (**R2.2**) também não foi considerado nesta empreitada, porque para além do recurso às duas classificações geomecânicas mais utilizadas, que são as apresentadas por Bieniawski (1989) e Barton *et. al.* (1974), o maciço era ainda enquadrado na classificação, ou índice de resistência do maciço *Geological Strength Index* (GSI) definido por Hoek (Marinos & Hoek, 2000); ou seja, era feita uma dupla verificação da qualidade do maciço ocorrente por comparação dos resultados provenientes das diferentes classificações.

A análise e identificação de blocos e cunhas, suscetíveis de se destacarem, era realizada em cada frente de escavação, mas de forma expedita, ficando a análise da presença de cunhas e blocos totalmente

dependente da experiência do técnico que faz os levantamentos e sem verificação mais pormenorizada em gabinete, com recurso a programas informáticos específicos para esta análise.

Embora os procedimentos definidos para caracterização geológica e geotécnica do maciço ocorrente na frente de escavação, contemplem a medição da atitude das descontinuidades, habitualmente a projeção estereográfica em diagrama de Schmidt apenas é feita esporadicamente para constar em relatórios periódicos, não sendo considerada uma ferramenta para análise da presença de eventuais cunhas e blocos na periferia da escavação, pelo que o **R2.3** se encontra presente.

O maciço rochoso ocorrente encontra-se compartimentado por descontinuidades bem definidas, que colocam em evidência a presença de blocos e cunhas na periferia da escavação, potencialmente responsáveis pela rotura do maciço; assim, o risco de ausência de determinação do modo de rotura do maciço que provoque a instabilização (**R2.4**) não se verifica.

O risco de ausência de controlo da afluência de água que provoque a instabilização (**R2.5**) também não se encontra presente, porque foram adotadas metodologias de medição do caudal com recurso a descarregadores do tipo Thompson e definidas medidas de contingência para as situações de afluências significativas, que passam pela impermeabilização do maciço recorrendo à injeção de calda de cimento.

Um dos riscos verificados neste caso de estudo é o de falha no saneamento da frente de escavação (**R2.6**). Este procedimento assume na escavação uma importância idêntica à da colocação da contenção na garantia da estabilidade do maciço. Todos os blocos e cunhas que tenham sido afetados pelo explosivo no desmonte da rocha, devem ser retirados utilizando martelo pneumático montado em giratória e/ou manualmente com recurso a alavancas. Este procedimento é às vezes descurado para acelerar o ciclo de escavação e realizar de imediato a contenção, mas pode levar à queda de material de modo descontrolado, colocando em causa a integridade física de pessoas e equipamentos.

O risco de falha na aplicação da contenção (**R2.7**) encontra-se sempre presente e foi verificado neste caso de estudo. Este risco normalmente resulta de um controlo deficiente da quantidade de contenção aplicada, ou de avaria dos equipamentos de aplicação da contenção, que pode assumir consequências menores no caso da qualidade do maciço rochoso ser elevada e do tempo de autossustentação ser também elevado, ou assumir dimensão catastrófica em situações de fraca qualidade do maciço, com tempo de autossustentação diminuto.

O risco de falha na aplicação da contenção pode não resultar de avarias do equipamento e estar apenas relacionado com o tempo de autossustentação do maciço (**R2.8**). Neste caso foi identificada uma situação onde a qualidade do maciço rochoso era muito fraca e que, após rebentamento da pega de fogo para avanço da escavação, ainda durante a execução do saneamento na frente do túnel, houve o início de queda de material que foi aumentando de proporções, ainda foi aplicado betão projetado conforme previsto como elemento da contenção, mas não houve tempo do mesmo ganhar resistência, até que ocorreu o colapso da frente e abóbada no novo trecho escavado. Ou seja, nesta situação o

tempo de autossustentação foi de tal modo reduzido que não houve possibilidade da contenção aplicada ficar ativa.

Com a definição na fase inicial da construção de um procedimento de circulação da informação, que passava pela disponibilização de todos os dados numa plataforma na *internet* disponível para todos os intervenientes mediante identificação e palavra-passe, permite não considerar nesta fase o risco de falha no circuito de informação que provoque a instabilização (**R2.9**).

Aplicando ao caso em apreço a análise de riscos por **árvore de eventos**, para a situação da frente de escavação, constante na Figura 6.4, verifica-se a utilização de uma segunda classificação geomecânica como verificação da primeira. Assim, os principais riscos geotécnicos envolvidos na frente de escavação surgem das seguintes situações: aplicação de contenção igual ao preconizado, mas para além do tempo de autossustentação do maciço, aplicação de contenção inferior ao preconizado em projeto, independentemente de ser aplicada dentro ou para além do tempo de autossustentação do maciço.

Na verificação dos procedimentos para identificação de situações de potencial instabilidade, como sejam, a deteção da presença de blocos e cunhas na periferia da escavação é considerada a **árvore de eventos** apresentada na Figura 6.5. Neste caso, verifica-se que os principais riscos geotécnicos ocorrem quando não é realizada a análise cinemática da orientação das discontinuidades para verificar a eventual presença de blocos e cunhas na periferia da escavação; contudo, mesmo que essa seja efetuada, caso ocorram blocos ou cunhas e não se implemente o seu saneamento ou contenção, o risco de queda de blocos ou de colapso também se encontra presente.

Com a identificação da presença de riscos na frente de escavação, seguidamente são avaliados realizando o seu enquadramento em toleráveis ou inaceitáveis, indicando de imediato as medidas a implementar em caso de necessidade.

7.3.2 Avaliação dos riscos e medidas de controlo

A avaliação dos riscos identificados neste caso de estudo, recorrendo à **lista de verificação**, resultam em intoleráveis, com o nível de risco considerado conforme descrito na Secção 6.3.2, o que requer a implementação de medidas eliminatórias ou mitigadoras, contudo sempre que seja possível, também são conjugadas medidas no sentido de otimizar os riscos.

Para o risco de queda de blocos ou cunhas por falta de análise da atitude das discontinuidades (**R2.3**), avaliado como nível elevado (10) e a medida a implementar passa pela inclusão, nas metodologias de acompanhamento técnico, da realização dessa análise, a qual deve ser efetuada de modo conjugado entre a frente de escavação, onde é realizada uma análise prévia e mais expedita de modo imediato, que permita deixar indicações na frente de trabalho sobre as áreas a sanear; e ulteriormente, no gabinete, realizar uma análise estatística, com projeção da atitude das discontinuidades em diagrama

de Schmidt e análise cinemática de blocos potencialmente instáveis. Sempre que se justifique, as indicações deixadas na frente de trabalho devem ser complementadas.

O risco de instabilidade da escavação por falta de saneamento (**R2.6**) resulta em nível elevado (12) e é mitigado pela sensibilização das equipas de produção para a importância desta atividade, onde o princípio básico a transmitir é que todo o material que seja retirado no saneamento, se encontrava com potencial de instabilidade elevado e que já não tem possibilidade de atingir pessoas, nem equipamentos. Para eliminar este risco, o saneamento deve constituir uma obrigatoriedade no ciclo de escavação e, por fim, deve ser realizada a verificação da sua execução.

A falha na aplicação da contenção (**R2.7**) é de nível elevado (10) porque pode ter como consequência a instabilidade da escavação. Como medidas para eliminar este risco indicam-se a verificação sistemática da quantidade e qualidade de contenção aplicada através de um programa de inspeção e ensaios e a presença em obra de mais de um equipamento para aplicação da contenção para, em caso de avaria, ser substituído de imediato.

Quando o risco de colapso resulta da aplicação tardia da contenção (**R2.8**) é de nível médio (8), onde as medidas a implementar vão no sentido de, numa primeira fase, determinar o tempo de autossustentação do maciço e transmitir esse resultado aos vários intervenientes e, numa segunda fase, sensibilizar sobre a importância de respeitar esses tempos, em particular nas situações onde seja diminuto devido à existência de um maciço com qualidade fraca e que carece de intervenção imediata. Pela análise realizada com base nas **árvores de eventos**, a aplicação de contenção em menor quantidade ou qualidade que a preconizada em projeto é uma situação intolerável que tem de ser mitigada caso ocorra. A solução é a aplicação de mais contenção até perfazer a quantidade e qualidade preconizada no projeto e, como medida eliminatória, implementar procedimentos de verificação, num plano de inspeção e ensaios eficiente. Como exemplo, para controlo da colocação de pregagens basta contar o número que é aplicado devendo as mesmas ser localizadas em pontos estratégicos e orientadas em função da atitude das descontinuidades ocorrentes, para que sejam mais eficientes na contenção de blocos e ofereçam uma maior resistência efetiva. Para controlo da espessura de betão projetado, podem ser colocados testemunhos metálicos, cravados na superfície de escavação, com comprimento exterior igual à espessura que se pretende aplicar.

A presença de blocos e cunhas na frente de escavação, quer resultem da falta de identificação por utilização de metodologias deficitárias no acompanhamento geológico e geotécnico, quer resultem da falta de saneamentos, é um risco intolerável, para o qual, as medidas a implementar para a sua eliminação passam pelo acompanhamento técnico com a análise sistemática da presença de blocos e cunhas e incluir no ciclo de escavação o saneamento das superfícies escavadas. Neste último caso, se não for possível ou for inconveniente por gerar sobreescavação excessiva, é necessário implementar medidas de contenção imediatas, como por exemplo recorrer a pregagens e/ou betão projetado para estabilização dos blocos.

7.3.3 Riscos residuais

Na situação da frente de escavação, os riscos geotécnicos presentes, podem ser mitigados e, em alguns casos, eliminados, mas podem ocorrer situações que resultem na presença de um risco residual que não pode ser ignorado.

A realização de análises cinemáticas para detetar blocos e cunhas potencialmente instáveis, quer de modo expedito na frente de escavação, quer estatisticamente por projeção em estereograma, não elimina, por si só, o risco decorrente da queda, sendo necessário garantir a implementação de medidas para saneamento ou contenção dos mesmos. E mesmo com a execução desses procedimentos, há sempre a possibilidade de descontinuidades, consideradas pouco relevantes ou que não pertençam às principais famílias do maciço, promoverem a instabilidade da escavação.

Podem ainda ocorrer situações onde a presença de descontinuidade no interior do maciço, para além do espaço do túnel, localizarem-se próximas da superfície de escavação e serem responsáveis por instabilidade.

O saneamento que seja realizado com recurso a meios mecânicos e seguido de saneamento com meios manuais elimina, quase na totalidade, a possibilidade de queda de blocos da periferia da escavação; contudo, continua a existir a possibilidade, embora remota, de algum bloco ter escapado ao saneamento e, como tal, originar problemas de estabilidade com consequências para a integridade dos intervenientes ou dos equipamentos.

O risco de falha na aplicação da contenção, quer resulte da falta de meios com aplicação em défice, quer por aplicação tardia, pode ser eliminado pela implementação das medidas eficientes de execução e controlo, referidas anteriormente, pelo que não resulta risco residual.

7.4 TRECHO DE TÚNEL ESCAVADO

Para a situação do trecho de túnel já escavado, encontram-se identificados os principais riscos ocorrentes, os quais vão agora ser testados na aplicação ao caso do TM, para que sejam analisados, avaliados e, em caso de necessidade, sugerir medidas a implementar no sentido de eliminar ou mitigar os riscos presentes. Eventualmente, em algumas situações, podem ser ainda sugeridas medidas para otimizar os riscos. Por último, enumeram-se os riscos residuais.

7.4.1 Identificação e análise dos riscos

Na Tabela 7.4 consta a **lista de verificação** dos principais riscos geotécnicos presentes no trecho escavado, a qual foi apresentada na Tabela 6.5 (Secção 6.4) e que agora é adaptada para aplicação. No Apêndice XII consta uma tabela com informação extra que permite um complemento à identificação e

análise de riscos pela lista de verificação, algumas medidas de controlo e ainda, o eventual risco residual.

Na sequência da aplicação da lista de verificação para esta situação da fase construtiva, neste caso, constata-se a presença de alguns riscos que estão relacionados com a instalação tardia ou de localização inadequada dos instrumentos de observação (**R3.2** e **R3.3**), assim como a dimensão excessiva das deformações observadas (**R3.7**, **R3.8**, **R3.9** e **R3.10**).

Seguidamente apresentam-se as justificações sobre as opções de considerar presentes ou ausentes os riscos constantes na lista de verificação da Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – TM: lista de verificação desenvolvida para aplicar no trecho escavado

Risco	Ocorre	Não ocorre
R3.1 - Falha na instalação dos dispositivos de observação preconizados		X
R3.2 - Falha na instalação atempada dos dispositivos de observação	X	
R3.3 - Falha na localização adequada dos dispositivos de observação	X	
R3.4 - Falha na frequência de leituras adequada		X
R3.5 - Falha no tratamento de dados		X
R3.6 - Falha no tratamento atempado da informação		X
R3.7 - Deformação excessiva do maciço	X	
R3.8 - Elevada taxa de evolução da deformação	X	
R3.9 - Falha na deteção de situações de instabilidade pela monitorização	X	
R3.10 – Falha nas inspeções visuais	X	
R3.11 - Falha no circuito de informação		X

O risco de não instalação dos dispositivos de observação preconizados em projeto que provoque a instabilização (**R3.1**) não foi considerado presente, porque todos os equipamentos preconizados foram efetivamente instalados no decorrer da construção da obra, existindo pessoas nominalmente identificadas como responsáveis por essa tarefa.

No caso dos emboquilhamentos, todos os dispositivos de observação estavam instalados e em leitura quando se iniciou a escavação do túnel; no entanto, relativamente à instalação de outros instrumentos, nomeadamente as secções de convergências na frente de escavação, em muitas situações, estas eram instaladas tardiamente (**R3.2**), quando a frente de escavação já se encontrava a mais de 30 m e já tinha passado mais de uma semana após a escavação. Com isto, as deformações iniciais do maciço eram perdidas, desconhecendo-se a sua verdadeira dimensão. O desconhecimento da real deformação ocorrida impossibilita, ou torna mais difícil, analisar a adequação da contenção, sendo possível concluir que esta não se encontra em défice, porque não ocorreram fenómenos indicadores de instabilidade; contudo, torna-se impossível determinar se está em excesso e se, efetivamente, a

contenção aplicada não permitiu qualquer deformação, ou se ela apenas não foi registada porque os instrumentos foram instalados tardiamente.

O projeto previa um espaçamento entre secções de convergências que podia chegar a 50 m, isto para os casos de maciço de boa qualidade para a abertura de túneis. Embora estivessem previstas e implementadas distâncias menores em caso de maciço de qualidade mais fraca, ocorreram situações onde passagens muito pontuais com características fracas, que não foram monitorizadas, e onde ulteriormente, se verificou a presença de fissuras no betão projetado, indiciadoras de deformação, mas que não foram medidas (**R3.3**) por se encontrarem entre secções espaçadas 5 m (espaçamento mínimo previsto entre secções de convergências).

Neste caso de estudo a frequência de leituras definida em projeto previa o ajuste em função das deformações observadas, iniciando-se com leituras diárias e, caso ocorressem várias leituras consecutivas ao longo de, no mínimo, 15 dias sem que se verificasse deformação significativa, a frequência de leitura era adaptada para semanal e, passado mais um mês sem que se verificassem deformações significativas, a frequência passava a mensal, ficando em leitura até final da construção com esta frequência máxima. Caso em alguma leitura se verificasse a ocorrência de deformações, a frequência voltava a ser diária até que, comprovadamente, estivesse numa situação de estabilização. Perante a implementação deste procedimento, considera-se que o risco de frequência de leituras inadequada que provoque a instabilização (**R3.4**) esteja ausente.

O risco de tratamento de dados inadequado que provoque a instabilização (**R3.5**) também se admite não existir, porque desde o início da fase construtiva que os procedimentos de monitorização previam o tratamento das medições, com apresentação de dados em forma gráfica, contendo as deformações ao longo do tempo. Isto permite uma análise rápida e eficiente sobre o estado de instabilidade da zona representada pelos instrumentos.

O risco de tratamento tardio da informação que provoque a instabilização (**R3.6**) foi eliminado desde início da construção, pela contemplação de uma equipa dedicada à monitorização, dimensionada de modo a tratar os dados imediatamente após a sua recolha.

Em algumas situações, a medição das deformações recorrendo às convergências permitiu verificar a existências de deformações elevadas (**R3.7**), com taxa de evolução igualmente elevada (**R3.8**) e que levou à intervenção no local, com reforço da contenção já aplicada.

O espaçamento significativo (50 m) entre secções de convergências, conjuntamente com limitação de ação para reforço da contenção quando o TM esteve parado na sequência da imposição judicial e, posteriormente política, levou em alguns casos pontuais ao registo de queda de material, que não foi detetada pela monitorização (**R3.9**), contudo foi verificada numa fase precoce e acompanhada ao longo do tempo pelas inspeções visuais realizadas ao longo do túnel. Neste caso, as medidas necessárias para mitigar este risco não tiveram lugar devido às já referidas limitações de ação impostas por ordem judicial e política.

A falha nas inspeções visuais (**R3.10**) teve lugar devido às condições de iluminação fracas e à ausência de meios elevatórios para observar a abóbada do túnel em todas as campanhas realizadas, o que levou à deteção tardia, em algumas situações, onde ocorreu queda de material.

De modo semelhante ao referido para a situação da frente de escavação sobre o risco de ausência de um circuito de informação bem definido (**R3.11**), no presente caso não se verificava porque, desde o início da construção, estava contemplada a existência de uma plataforma na *internet* onde todos os dados da monitorização ficavam disponíveis para todos os intervenientes mediante identificação e palavra-passe, e o circuito de circulação da informação que inicialmente não estava definido, foi solucionado na fase inicial da construção.

Recorrendo à análise de risco realizada com base na **árvore de eventos** disponibilizada na Figura 6.6 na Secção 6.4, verifica-se que os riscos mais elevados se encontram relacionados com a situação de patologias na contenção e deformações fora do previsto, com aumento da taxa de deformação; assim como a situação onde não se identificaram patologias na contenção aplicada, mas a medição das deformações revelou aumento da taxa de evolução independentemente de estarem ou não dentro da deformação máxima prevista.

Conforme referido para as análises de riscos por lista de verificação, também relativas a uma árvore de eventos, as situações de queda de material verificadas na situação do trecho já escavado, estiveram relacionadas com o elevado tempo de paragem dos trabalhos, estas foram pontuais e localizadas em zonas onde as inspeções visuais identificaram o problema numa fase precoce.

Com a identificação dos riscos ocorrentes neste caso de estudo, importa seguidamente avaliá-los e descrever as medidas a implementar para a sua correção em caso de necessidade.

7.4.2 Avaliação dos riscos e medidas de controlo

Tendo em consideração a gestão de riscos que incluía **lista de verificação**, em seguida apresentam-se as considerações sobre os riscos identificados neste caso de estudo, nomeadamente os **R3.2**, **R3.3**, **R3.7**, **R3.8**, **R3.9** e **R3.10**, avaliados de acordo com o descrito na Secção 6.4.2 indicando-se de imediato as respetivas medidas de controlo.

A instalação tardia de dispositivos de observação (**R3.2**) não constitui por si só um risco geotécnico, mas considera-se que é de nível muito elevado (20), isto porque pode levar à impossibilidade de medição das deformações do maciço desde uma fase precoce. Isto significa que a real deformação do maciço não é medida na sua totalidade, podendo levar a situações de colapso da escavação, quer antes da instalação dos instrumentos de observação, sem que tenha existido possibilidade de detetar as deformações, quer durante a medição porque na realidade a dimensão da deformação ocorrida é superior à medida. Neste caso, a implementação da gestão de risco geotécnico ao longo da execução,

levou à detecção de situações de instalação tardia dos instrumentos; no entanto, em nenhum deles se registou instabilidade.

Como medida mitigadora desta situação é necessário implementar mecanismos de controlo da instalação e desenvolver ações de sensibilização junto da entidade e pessoas responsáveis por esse trabalho, para esclarecer sobre a importância desta ação no contexto da execução da obra, nomeadamente na verificação da segurança na manutenção da estabilidade, adequabilidade da contenção e economia que daí pode resultar.

O espaçamento extenso, entre secções de monitorização no interior do túnel (**R3.3**), constitui um risco avaliado como médio (8), mas considerado intolerável, uma vez que, conforme verificado neste caso de estudo, em particular durante o período de paragem, pode levar a situações de instabilidade entre secções instrumentadas sem que estas indiquem a existência de deformações. Como medida mitigadora, é necessário durante a fase de execução ter em atenção as situações de variação da qualidade do maciço rochoso, mesmo variações de pequena extensão podem ser significativas para justificar a instalação de nova instrumentação.

Mesmo numa fase posterior é possível instalar novas secções de monitorização no caso de ocorrerem dúvidas sobre a estabilidade de uma determinada zona.

A monitorização das deformações no interior de túneis recorrendo a secções de convergências, traduz-se numa observação localizada dos pontos de instalação dos dispositivos de observação, onde as deformações medidas são extrapoladas para a vizinhança onde o cenário geológico-geotécnico é idêntico. Perante isto, é importante que, sempre que ocorram variações significativas das características do maciço, sejam colocados novos pontos de medição.

A verificação de deformações excessivas (**R3.7**) é um risco de nível elevado (10) e intolerável que deverá levar num curto período de tempo à intervenção no sentido de mitigar esse risco. Deformações elevadas são indicadoras da instabilidade do maciço, pelo que devem ser adotadas medidas estabilizadoras que na maioria das situações passa pela aplicação ou reforço de aplicação da contenção. Estas medidas devem sempre que possível ser implementadas por decisão do Projetista, contudo podem ocorrer situações onde a taxa de evolução das deformações é elevada (**R3.8**), constituindo um risco elevado (15), onde não é possível dispender de tempo para desenvolver análises elaboradas ou estudos complementares para avaliação da situação, tornando-se imperativo agir de imediato para garantir a estabilidade da escavação.

Para mitigar o risco de ocorrência de situações de instabilidade que não sejam detetadas pela monitorização (**R3.9**), que constitui um risco de nível médio (8), uma das medidas a implementar é complementá-la com a realização de inspeções visuais periódicas às superfícies escavadas, com o objetivo de detetar patologias na contenção ou possibilidade de abertura de fissuras no maciço rochoso.

A ausência de inspeções visuais (**R3.10**) constitui um risco de nível elevado (12) e, embora não sejam um substituto da monitorização, permitem cobrir uma área maior, em particular a localizada entre secções instrumentadas. Contudo, estas inspeções visuais são limitadas, sendo mais eficientes em situações onde esteja aplicado betão, como ocorria no caso de estudo. Isto torna possível a identificação de fissuras que se formem; no entanto, por razões várias, como seja a fraca iluminação, a extensão grande do túnel, onde a área a inspecionar é vasta, ou ainda a dimensão grande da secção, leva a que pequenas fissuras passem despercebidas ou sejam invisíveis sem recurso a meios elevatórios para inspecionar a abóbada. Apesar das limitações referidas, neste caso foram identificadas, numa fase precoce, patologias no betão projetado e, em algumas situações, no conjunto do betão projetado e terreno, mas a limitação de ações decretada pelo tribunal e decisão política, levou a que a reparação da situação não ocorresse, impedindo a mitigação do risco.

Perante os riscos identificados recorrendo à **árvore de eventos** da Figura 6.6, nos locais onde possam ocorrer situações, com ou sem identificação de patologias na contenção aplicada, mas a medição das deformações revele aumento da taxa de evolução, o que efetivamente se verificou neste caso, é necessário implementar medidas mitigadoras. As medidas a implementar são de reforço imediato da contenção aplicada, onde o dimensionamento deverá ser realizado pelo Projetista da obra.

Embora não se trate de um risco habitual no decorrer da execução de um túnel, neste caso de estudo verificou-se a ocorrência de patologias na contenção, mas devido à paragem prolongada dos trabalhos, ao longo do tempo assistiu-se, em alguns locais pontuais, à degradação do estado da contenção aplicada. Trata-se de um cenário inaceitável, onde as medidas eliminatórias a implementar passam pelo saneamento da zona, retirando toda a contenção obsoleta e aplicação de novos elementos de contenção; contudo, pelas limitações de ação já referidas, durante o período de paragem não foram realizadas intervenções para implementar as medidas mitigadoras.

7.4.3 Riscos residuais

Os riscos envolvidos no trecho já escavado podem ser, na sua maioria, eliminados não deixando riscos residuais, como são o caso da instalação tardia de equipamentos.

No caso do risco de espaçamento extenso entre secções de monitorização, por mais próximas que sejam colocadas, nunca são instaladas de modo contínuo, pelo que por muito reduzido que seja esse espaçamento, há sempre a possibilidade de ocorrência de deformação na extensão que medeia secções de convergências contíguas, constituindo deste modo um risco residual; contudo podem ser mitigadas pelas inspeções visuais.

As situações onde ocorrem deformações excessivas que levem à necessidade de aplicação ou reforço de contenção na zona onde foram detetadas permanecem com um risco residual de voltarem a

evidenciar deformações. O incremento de deformação do conjunto maciço/contenção aplicada pode levar à necessidade de implementar novos reforços de contenção.

A implementação de inspeções visuais para deteção de patologias na contenção tem vários riscos residuais, alguns dos quais já referidos, como sejam a fraca iluminação, a extensão do túnel ou a dimensão grande da secção que impossibilitam uma inspeção adequada sem recurso a meios elevatórios para observar a abóbada. Por outro lado, as inspeções visuais dependerem da observação de um técnico e, como tal, estão sujeitas à sua avaliação, o que faz com que a substituição do técnico possa levar a julgamentos diferentes, mesmo com linhas orientadoras definidas de modo pormenorizado.

Mesmo que as patologias detetadas com recurso a inspeções visuais levem à aplicação ou reforço da contenção, há o risco residual de voltarem a ocorrer patologias na mesma zona, sendo eventualmente necessário novo reforço de contenção.

7.5 SÍNTESE DA APLICAÇÃO DA GESTÃO DE RISCOS PROPOSTA

A aplicação da nova metodologia desenvolvida a um caso de estudo permitiu gerir os riscos identificados nas diferentes situações da fase construtiva.

Para a **fase de início da construção**, a análise de riscos, recorrendo à lista de verificação, permitiu identificar a presença de seis riscos geotécnicos, nomeadamente:

- Falta de existência de processo de gestão de riscos herdado das fases anteriores à construtiva (**R1.1**)
- Estudos geológicos pouco desenvolvidos (**R1.2**);
- Conhecimento insuficiente das condições hidrogeológicas (**R1.4**);
- Ausência de um RGR (**R1.6**);
- Variações de qualidade do terreno que coloquem em causa a produtividade (**R1.16**);
- Ausência de um circuito de informação bem definido e desenvolvido para garantir a distribuição da informação e a devida receção da mesma por parte de todos os intervenientes na execução da obra (**R1.17**).

A avaliação de riscos permitiu considerar qualquer um dele intolerável e, como tal, fundamental a implementação de medidas no sentido de os eliminar ou de os mitigar.

Para o **R1.1** não foram implementadas medidas de gestão de risco, mas o ATO implementou um processo de gestão de riscos sem a necessidade de lhe atribuir tal designação, com identificação dos principais riscos ocorrentes e medidas a implementar.

No caso do **R1.3** como medida mitigadora foi necessário desenvolver estudos geológicos, contemplando cartografia geológica de pormenor da superfície e prospeção para reconhecimento do

terreno em profundidade, com particular incidência nas zonas onde se verifiquem maiores dúvidas sobre essas estruturas.

As medidas mitigadoras para o **R1.5** foram garantidas pela instalação de uma rede piezométrica e pelo controlo de caudais em linhas de água, nascentes e captações nas proximidades do alinhamento. Ainda se implementou a realização de injeções de impermeabilização pelo interior do túnel.

No caso do **R1.6** não foram consideradas medidas de controlo porque foi considerada irrelevante a sua realização por a empreitada já se encontrar em curso e porque as condições geológicas conhecidas no início da escavação já se encontravam patentes no projeto de execução.

Para mitigar o **R1.16** foi necessário investir em estudos de reconhecimento geológico e geotécnico para refinar o conhecimento que influencia a produtividade, como seja a qualidade do maciço para a escavação do túnel, resistência e abrasividade do material, quantidade de afluência de água e pressão hidrostática, estado de fraturação do maciço e dimensão dos blocos, condições de estabilidade do terreno, vão máximo e tempo autoportante para que possa ser definido o avanço máximo a realizar sem necessidade de aplicar contenção, entre outras.

A mitigação do **R1.17** foi garantida pelo desenvolvimento de um documento específico onde constava o circuito de informação, quer a nível institucional, quer a nível nominal dos vários intervenientes com mecanismos de alerta, com confirmação de receção de informação.

Os riscos residuais ocorrentes, de um modo genérico prendem-se com as situações que não é possível conhecer no início da fase construtiva de um túnel, em particular a heterogeneidade real dos maciços rochosos.

Para a situação do **trecho de túnel a escavar**, com o objetivo de antecipar a qualidade do maciço presente no avanço seguinte, foram calculados os valores de RMR recorrendo às seguintes metodologias:

- Estimção e desvio padrão por krigagem;
- Estimção e desvio padrão por especialista;
- Probabilidade de ocorrência do RMR e desvio padrão na frente seguinte considerando o da presente frente;
- Probabilidade do maciço na frente seguinte se enquadrar em cada uma das classes de qualidade.

Entre as diferentes metodologias de estimção os resultados são idênticos, sendo os valores de RMR expectáveis muito parecidos com os observados na realidade e as diferenças verificadas enquadram-se em aproximadamente 90% dentro dos limites definidos pelo desvio padrão.

O risco associado à heterogeneidade do maciço é reduzido; contudo, existem casos particulares onde se verificam variações significativas, e quando são no sentido de qualidade mais fraca, são de

consequências gravosas, o que levou à necessidade de implementar medidas, nomeadamente a mobilização dos meios necessários para garantir a estabilização do terreno num curto período de tempo, uma vez que, quanto menor a qualidade do maciço, menor o tempo autoportante e maior rapidez é exigida na aplicação de contenção para assegurar a estabilidade.

As metodologias de estimação da qualidade do terreno em avanço são eficientes, mas existem situações onde o erro é elevado, particularmente quando se verificam variações bruscas da qualidade do terreno, como seja a ocorrência de falhas. Esta situação constitui um risco residual, que pode ser mitigado pela implementação de execução de prospeção na frente de escavação.

Na situação da **frente de escavação** os riscos identificados recorrendo à lista de verificação foram quatro, nomeadamente:

- Falha na identificação da presença de cunhas e blocos na frente de trabalho (**R2.3**);
- Insuficiente execução do saneamento da superfície escavada (**R2.6**);
- Falha na aplicação da contenção (**R2.7**);
- Falha no cumprimento do tempo de autossustentação na aplicação de contenção (**R2.8**).

A avaliação de riscos levou a considerar que todos eles são intoleráveis, sendo necessário implementar medidas de controlo, que passaram pela revisão dos procedimentos de acompanhamento técnico da escavação, para efetiva identificação sistemática dos blocos e cunhas na periferia da escavação e pela revisão dos procedimentos executivos na realização sistemática de saneamento, aplicação de contenção, sugerindo-se a presença de equipamentos de reserva, o que nem sempre aconteceu e que levou a novas situações de ocorrência deste risco. Na revisão dos procedimentos executivos também foi considerada a aplicação de contenção dentro do tempo de autossustentação do maciço; no entanto, voltaram a ocorrer situações onde esse tempo foi tão curto que foi temporalmente impossível aplicar contenção antes de ocorrer instabilidade.

Os riscos residuais foram a ocorrência de novas situações por impossibilidade logística na manutenção permanente de equipamentos de reserva e impossibilidade prática de respeitar o tempo autoportante do maciço por ele ser diminuto.

O recurso às árvores de eventos permitiu identificar os riscos intoleráveis e rever procedimentos de acompanhamento técnico da construção para eliminá-los e, para os restantes, apresentar recomendações de revisão aos procedimentos executivos, no sentido de eliminar os riscos associados e promover o decorrer dos trabalhos de construção do túnel, com maior segurança e menores riscos de colapso generalizado ou queda isolada de material.

No **trecho de túnel escavado**, o recurso à lista de verificação permitiu identificar seis riscos, que se passam a enumerar:

- Falha na instalação da instrumentação (**R3.2**)
- Falha na localização da instrumentação (**R3.3**)
- Deformações excessivas do maciço (**R3.7**)
- Elevada taxa de evolução da deformação (**R3.8**)
- Falha na detecção de situações de instabilidade pela monitorização (**R3.9**)
- Falha nas inspeções visuais (**R3.10**)

O recurso à árvore de eventos para análise de riscos nesta situação da fase construtiva, revela resultados idênticos aos da lista de verificação, porque no fundo se tratam dos mesmos riscos, apenas com metodologias de análise idênticas.

A avaliação levou a considerar todos estes riscos intoleráveis, resultando na implementação de medidas de controlo. De um modo resumido, essas medidas consistiram em:

- Maior controlo na verificação de instalação da instrumentação;
- Reflexão sobre a escolha dos locais onde instalar a instrumentação;
- Reforço da contenção devido às deformações excessivas e a elevada taxa de evolução da deformação;
- Reforço de meios utilizados nas inspeções visuais e maior frequência.

Os riscos residuais presentes nesta situação do trecho escavado podem ser totalmente eliminados pela aplicação das medidas de controlo; contudo, nos casos onde a medida de eliminação do risco é a aplicação de reforço de contenção, há sempre possibilidade do maciço continuar a deformar ou de ocorrerem novas patologias na contenção.

As considerações finais sobre o trabalho desenvolvido ao longo desta investigação são reveladas no Capítulo 8.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

Como uma investigação nunca se encontra concluída, neste capítulo reúnem-se as considerações finais mais relevantes sobre a investigação desenvolvida e, são ainda deixadas algumas indicações para que o tema possa ser aprofundado ou abordado por outras metodologias.

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação desenvolvida ao longo desta dissertação de doutoramento revela orientações específicas sobre a implementação da gestão de risco geotécnico na fase construtiva de túneis em maciços rochosos, baseada em casos de estudo de circuitos hidráulicos, com secções transversais de dimensão variável entre 10 m² e 113 m², limitada ao interior do túnel, tendo-se excluído os emboquilhamentos, cruzamentos e interseções com outras estruturas; contudo, em vários enquadramentos geológicos, com aplicação a um túnel rodoviário em formações metassedimentares; todos eles, com recobrimento elevado e fora de ambiente urbano, interessando maciço rochoso, em média, de moderada a boa qualidade, pouco heterogéneo, escavado pelo método D&B, embora se admita que as metodologias desenvolvidas possam ser adaptadas a escavação com tuneladora de *grippers*.

A metodologia apurada para a gestão de riscos geotécnicos permite complementar um processo de gestão de risco que seja proveniente das fases de estudo e projeto, mas também, responder à lacuna de existência desse processo quando se chega à fase construtiva de túneis.

Para aplicação desta nova metodologia, houve necessidade de dividir a fase construtiva de túneis em quatro situações, nomeadamente: a fase inicial da construção, o trecho a escavar, a frente de escavação e o trecho escavado, sobre as quais incidiu a especificidade da gestão de riscos, apurando-se as metodologias mais adequadas para cada uma dessas situações.

Para a **fase inicial da construção**, os principais riscos geotécnicos podem ser identificados por verificação da existência de documentos de projeto que permitam uma caracterização do maciço, os quais deverão conter informação de base no domínio da geologia e geotecnia, e contenham ou possibilitem o desenvolvimento de modelos sobre os cenários ocorrentes, preferencialmente com identificação das condições mais comuns e mais gravosas, sendo que estas últimas devem estar localizadas.

Ainda no domínio da identificação dos riscos, é fundamental que toda a informação disponibilizadas seja alvo de complemento com novos levantamentos de superfície e, eventualmente, prospeção adicional, sobre a qual deve incidir uma nova interpretação dos dados com o objetivo de verificar,

complementar e revelar uma nova visão e eventualmente detetar situações com déficit informação, que necessitem de maior aprofundamento do conhecimento existente.

A metodologia de análise de risco selecionada para esta fase inicial foi uma lista de verificação (Tabela 6.1), onde os riscos que a constituem são resultantes da análise das situações patentes nos casos de estudo e de fontes bibliográficas.

A verificação da presença de riscos deve ter a devida sequência de avaliação (Secção 6.1.2). Para todas as situações analisadas, a presença dos riscos identificados e avaliados como intoleráveis, implica a necessidade de implementar medidas de controlo no sentido de, sempre que possível, os eliminar, e quando tal não é possível, no mínimo mitigá-los (Secção 6.1.3). Na fase construtiva, já se encontram definidos os equipamentos e metodologias de execução; assim para alguns riscos é possível implementar medidas otimizadoras para interligar de modo mais prático a gestão de risco com as atividades de execução, contribuindo para as melhores soluções, garantindo simultaneamente a segurança e a produtividade, como sejam a preconização da realização de prospeção distribuída ao longo do tempo para diluir custos financeiros e análise da nova informação, que vai ficando disponível para ajustar os modelos geológicos e geotécnicos.

As medidas indicadas nesta dissertação para controlo do risco (Secção 6.1.3) são de eficácia comprovada em situações reais, patentes nos casos de estudo, mas admite-se que não sejam únicas e que necessitem ser ajustadas ou adaptadas em novas situações perante a especificidade de cada uma.

Na gestão de riscos geotécnicos da fase inicial da construção, apontam-se ainda os riscos residuais (Secção 6.1.4), que se relacionam principalmente com a heterogeneidade do maciço e na impossibilidade de detetar, numa fase prévia, todas as situações e cenários geotécnicos com elevada precisão.

Na aplicação da metodologia ao caso de estudo do Túnel do Marão (Secção 7.1), a lista de verificação permitiu identificar os riscos presentes, para tal foi fundamental conhecer os trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto e seguindo cada um dos itens que compõem a lista, verificar a sua presença ou ausência. Para os riscos que não se identificaram não foram necessários mais procedimentos, mas para os restantes, foi feita a sua avaliação, e os avaliados como intoleráveis, originaram a implementação de medidas, algumas com sucesso, outras que esbarram na decisão por parte da gestão de obra para não serem implementadas, como o caso da ausência de um processo de gestão de risco geotécnico, mas mesmo essas tiveram sequência por implementação de procedimentos que permitiram eliminar ou mitigar os riscos geotécnicos presentes.

Dos riscos identificados, a maioria foi eliminada pela aplicação das medidas de controlo apresentadas, sendo o risco residual quase nulo. Apenas os riscos de conhecimento das características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas não foi possível considerar totalmente eliminados porque podem sempre ocorrer situações não identificadas, isto apesar do investimento realizado em prospeção e levantamentos geológicos de superfície na fase construtiva.

Na situação do **trecho a escavar** o risco geotécnico mais relevante é o associado à heterogeneidade do maciço e à capacidade de antever a variação da sua qualidade em antecipação.

Tendo em conta a caracterização geológica e geotécnica habitualmente realizada no acompanhamento deste tipo de obras e a base de dados resultante dos casos de estudo selecionados, conclui-se que as características das discontinuidades, compostas pelos parâmetros relativos ao comprimento ou persistência, abertura, tipo de preenchimento, rugosidade e estado de alteração da superfície das discontinuidades, são as principais responsáveis pela variação da qualidade do maciço; isto é, quando os parâmetros que constituem as características das discontinuidades variam significativamente, a qualidade do maciço, também tem alteração. Isto permite concluir que nos casos onde se verifique uma variação progressiva das características das discontinuidades, a qualidade global do maciço vai alterar, permitindo assim uma antevisão.

Nesta investigação recorreu-se a modelos matemáticos para estimação da qualidade do maciço em antecipação, tendo por base o valor de RMR determinado a cada avanço da escavação (Secção 6.2.1).

De entre as metodologias matemáticas de regressão linear calculada de três modos, com base nos valores de RMR dos últimos 3, 5 e 10 avanços, redes neuronais, krigagem e estimativa empírica expedida de um especialista no acompanhamento da escavação de túneis, verificou-se que todas apresentam resultados próximos na estimação do RMR em antecipação, mas a krigagem destaca-se como mais eficaz, seguida pelos resultados do especialista.

A correlação entre os valores de RMR estimados e os observados chegam próximo dos 90%, com um erro absoluto médio próximo de zero e desvio padrão próximo de 6. Isto permite concluir que, recorrendo a uma destas metodologias matemáticas, em particular à krigagem, um técnico com menor experiência pode, neste aspeto específico, ficar ao nível de um especialista.

Quando a variação da qualidade do maciço é brusca, o RMR resultante da estimação não a acompanha de imediato, observando-se um desfasamento entre as duas linhas no gráfico (Figuras 7.2 a 7.5), isto é, só após observar-se a variação do maciço é que esta passa a ser ponderada nas metodologias de estimação, o que significa que esses eventos não se conseguem antever matematicamente e que o risco inerente à variação de qualidade do maciço continua presente.

Observa-se um comportamento dos valores de erro da estimação sem variação significativa entre túneis de diferente comprimento ou secção transversal.

Para análise dos riscos de variação da qualidade do maciço no trecho a escavar, foi apresentada uma árvore de eventos quantitativa (Figura 6.1), que permite verificar o nível de riscos dessa variação para as diferentes classes de qualidade, conforme definidas por Bieniawski (1989), bem como, a capacidade de antever essa variação em antecipação tendo em conta o método matemático mais eficiente (krigagem).

Apresenta-se ainda uma base estatística da ocorrência do valor de RMR no trecho de escavação seguinte (Figura 6.2), tendo em conta o valor de RMR na frente de escavação atual, o que permite antever o cenário de variação da qualidade do maciço rochoso no trecho de escavação seguinte.

Os eventos associados a probabilidades baixas, mas de intensidade e consequências catastróficas (exemplo sismos, maremotos, erupção de vulcões), implicam riscos muito elevados, o que aplicado a este caso, é análogo à presença de um maciço de valor de RMR baixo, após uma frente com valor de RMR alto, o que raramente ocorre, segundo a informação apresentada na Secção 6.2.1 e 6.2.2, mas é de consequências catastróficas porque num caso extremo pode levar ao colapso da escavação.

Nesta investigação, na antevisão da qualidade do maciço, apenas foram selecionadas metodologias matemáticas e uma empírica, mas conjugando estas com outras fontes de conhecimento, como os dados resultantes da cartografia de superfície e prospeção em profundidade, é possível desenvolver modelos mais eficientes e diminuir o risco envolvido de variação da qualidade do terreno, embora essa análise tenha ficado fora do âmbito deste estudo.

Como medida de mitigação deste risco (Secção 6.2.3) destaca-se a execução de prospeção na frente de escavação, que mesmo sendo destrutiva fornece informação, embora de menor qualidade comparativamente com a de amostra contínua; contudo, é muito mais rápida de executar, integrável no ciclo de escavação e permite verificar a presença de terreno de diferentes resistências, como seja a passagem para uma zona tectonizada.

Para esta etapa da fase construtiva não foram reveladas medidas optimizadoras, porque o desenvolvimento deste tipo de análises constitui a base para a adequação de metodologias e procedimentos para o avanço da escavação em condições de segurança e com optimização da produtividade.

Tendo em conta as metodologias utilizadas na análise e controlo de risco, é necessário ter presente que existe a possibilidade de poder ocorrer variação do maciço sem que seja detetada em antecipação, o que constitui o risco residual (Secção 6.2.4).

Na aplicação ao caso de estudo (Secção 7.2), para a análise do risco de variação de qualidade do maciço foi necessário ter em conta as metodologias mais eficientes na estimação do valor do RMR em avanço, que é a krigagem, a análise expedita de um especialista e a probabilidade de ocorrência de cada classe. Com isso foi possível avaliar o nível de risco envolvido para cada uma das quatro frentes de escavação e em cada avanço de modo sistemático. Em caso de necessidade, quando detetada a probabilidade de variação da qualidade do terreno, em particular para as classes extremas (classes I e V), eram indicadas às equipas de produção as medidas de controlo a implementar para mitigar os riscos envolvidos para desmobilizar ou mobilizar equipamentos adequados. Destaca-se como risco residual, que a possibilidade de variação brusca da qualidade do terreno pode sempre ocorrer, sem que as metodologias de estimação o permitam antever.

A análise dos casos de estudo, assim como de elementos disponíveis na bibliografia permitiram detetar os principais riscos ocorrentes na **frente de escavação**, os quais foram enquadrados em três métodos de análise (Secção 6.3.1), nomeadamente uma lista de verificação (Tabela 6.4), uma árvore de falhas (Figura 6.3) e duas árvores de eventos (Figuras 6.4 e 6.5).

A opção de apresentar uma lista de verificação resulta da facilidade de compilar os riscos detetados e da sua aplicação na identificação de riscos.

A árvore de falhas desenvolvida (Figura 6.3) foi qualitativa e surgiu para permitir sistematizar os eventos que podem levar ao colapso da escavação, concluindo-se que não são apenas as características do maciço e a insuficiência do seu conhecimento, mas também os procedimentos executivos quando indevidamente implementados e os erros técnicos de recolha e interpretação dos dados geológicos e geotécnicos.

Apresentam-se ainda duas árvores de eventos, uma para identificação de eventos que podem levar ao colapso da escavação (Figura 6.4), com destaque para a caracterização do maciço e sua classificação, procedimentos de execução na aplicação da contenção prevista em projeto e dentro do tempo de autossustentação que o maciço; e a outra para identificação da queda de blocos e cunhas da periferia da escavação, tratando-se de túneis em maciços rochosos é habitual a presença de descontinuidades, que conjugadas entre si e com a orientação da escavação, podem promover o destaque de blocos e cunhas, pelo que uma outra árvore de eventos é dedicada a esse risco (Figura 6.5), onde os fatores apreciados são a verificação da presença de descontinuidades e sua análise na formação de blocos por projeção em diagrama de Schmidt, a identificação da localização de blocos potencialmente instáveis na frente de escavação e a verificação de procedimentos para sanear esses blocos e material solto ou, em caso de impossibilidade, garantir a contenção.

A avaliação dos riscos para esta situação da fase construtiva (Secção 6.4.2) revelou a presença de riscos considerados intoleráveis e que necessitam da implementação de medidas de controlo para eliminação, ou mitigação.

As medidas de controlo dos riscos indicadas para esta situação da frente de escavação (Secção 6.4.3) vão no sentido de garantir a recolha e análise dos elementos geológicos e geotécnicos e implementação dos procedimentos executivos que promovam a estabilização da escavação.

As medidas optimizadoras propostas para esta situação passam pela análise continuada da nova informação que fica disponível pelo ATO, que deve ser comparada com os pressuposto do projeto, de modo a promover a adequabilidade das soluções de contenção e procedimentos de execução.

Os riscos residuais, após implementação dos procedimentos, são quase nulos para uma determinada frente de escavação, mas podem voltar a ocorrer em novas frentes, principalmente por falha humana se houver descuido na implementação dos procedimentos.

A aplicação da metodologia desenvolvida ao caso de estudo em execução (Secção 7.3) levou, nesta situação da fase construtiva, à identificação de riscos pela lista de verificação, os quais estão

principalmente relacionados com o desenvolvimento e análise dos elementos geológicos e geotécnicos recolhidos, em particular com a análise cinemática das descontinuidades na formação e potencial destaque de blocos, e com os procedimentos para os sanear ou aplicar contenção atempadamente, dentro do tempo de autossustentação do maciço, para garantir a estabilidade da escavação.

Nota que relativamente à afluência de água, que se encontra como primeiro evento das árvores definidas nesta investigação, na aplicação ao TM, como eram dois túneis paralelos o que apresentava comprimento maior, serviu de dreno ao maciço, contando com maior afluência de água.

Na gestão de riscos, que inclui a análise recorrendo às árvores de eventos, os riscos presentes são idênticos aos verificados pela lista, sendo as medidas de controlo as mesmas.

O risco residual nesta situação, após implementação de todos os procedimentos de controlo é a possibilidade de voltarem a ocorrer situações semelhantes em novas frentes de escavação, principalmente originadas pela falta de cumprimento dos procedimentos.

Os riscos geotécnicos detetados na situação de **trecho escavado** foram compilados para análise (Secção 6.4.1) numa lista de verificação (Tabela 6.5) e numa árvore de eventos (Figura 6.6), uma vez que foram consideradas as metodologias mais adequadas a esta situação da fase construtiva.

Conforme referido, a lista de verificação constitui uma metodologia de análise de fácil implementação, uma vez que basta identificar a presença ou ausência de riscos na aplicação a novos casos de estudo. Nesta situação, os riscos detetados para constituir a lista de verificação resumem-se à garantia de manutenção da estabilidade da escavação.

Para este trecho do túnel, foi ainda apresentada uma árvore de eventos que permite sistematizar e analisar as interligações das atividades envolvidas que podem constituir riscos. Destaca-se a análise dos procedimentos habitualmente já realizados, mas que integrados na gestão de riscos possibilita o desenvolvimento de um controlo mais rigoroso da situação, nomeadamente a análise das inspeções visuais realizadas ao longo do túnel e da monitorização feita na instrumentação, em particular as convergências por ser a metodologia mais usual na monitorização das deformações no interior de túneis.

Relativamente à identificação das patologias, estas resumem-se à sua presença ou ausência, embora se possa realizar uma classificação expedita de modo qualitativo sobre as situações observadas, atribuindo a cada classe um nível de risco associado.

Para a situação da medição das deformações do maciço ao longo do tempo, identificaram-se três situações genéricas de análise com riscos diferentes:

- Sem deformação ao longo do tempo onde a o perigo de colapso é reduzido e como tal não é possível gerar danos, resultando em risco negligenciável.
- Deformação com taxa de evolução constante ao longo do tempo. Esta situação tanto pode resultar da acomodação do maciço às novas condições de tensão e como tal podem estabilizar;

como pode evoluir para o aumento da taxa de deformação, enquadrando-se na situação seguinte.

- Deformação com aumento da taxa de evolução. O perigo de colapso encontra-se presente a curto prazo, com possibilidade de afetar vidas e/ou equipamentos, prazo de execução acrescido para reparação da situação e custos inerentes. Nesta situação o risco é intolerável.

Os riscos ocorrentes são avaliados como intoleráveis (Secção 6.4.2) e como tal, necessitam da implementação de medidas de controlo no sentido da sua eliminação, ou em caso de impossibilidade da sua mitigação.

As medidas de controlo (Secção 6.4.3) quando necessárias passam preferencialmente pela aplicação de reforço da contenção, que deve ser em quantidade e qualidade que garanta a estabilidade da escavação. A avaliação dos resultados da observação geotécnica permite a definição de eventuais medidas optimizadoras na revisão do projeto de contenção e de procedimentos executivos a implementar na frente de escavação.

O risco residual inerente (Secção 6.4.4) resulta da possibilidade de voltarem a ocorrer situações de potencial instabilidade, mesmo após a implementação de medidas de controlo.

No caso de estudo do TM, foi possível identificar a ocorrência de riscos recorrendo à lista de verificação, os quais vão desde a falha na instalação atempada e na localização da instrumentação, até à ocorrência de deformações excessivas e com taxa de evolução elevada que, eventualmente, podem culminar no colapso da escavação.

A implementação de medidas de controlo indicadas permitiu mitigar esses riscos, mas foi impossível de eliminar alguns deles porque há sempre a possibilidade de voltarem a ocorrer, quer nos mesmos locais, quer noutros ao longo do túnel, o que constitui o risco residual.

Na aplicação da nova metodologia de gestão de riscos desenvolvida para a construção de túneis em maciços rochosos verificam-se resultados aceitáveis, com identificação de riscos presentes e sua resolução, constituindo uma mais-valia no acompanhamento técnico deste tipo de estruturas no sentido de garantir a segurança de pessoas e equipamentos, auxiliando a produtividade com adequação de meios às necessidades impostas pelas características do maciço, o que se traduz na otimização da produtividade, com a sequente economia financeira e de prazo de execução.

Concluindo, com esta nova metodologia de gestão de riscos na fase construtiva de túneis em maciços rochosos, baseada em cinco casos de estudo e aplicada a um outro caso, torna-se possível:

- Na fase inicial da construção, recorrendo a uma lista de verificação, identificam-se os riscos geotécnicos, sejam eles resultantes de limitação de conhecimento das características do terreno, ou do défice de estudos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos, o que pode originar abordagens à construção com metodologias desadequadas. A implementação de

medidas de controlo possibilita eliminar ou mitigar os riscos geotécnicos e traçar cenários realistas para a execução da empreitada que nesta fase é iniciada.

- Na fase do trecho a escavar, onde os riscos geotécnicos mais relevantes surgem na dependência da heterogeneidade do maciço, apresentam-se as metodologias para estimação da variação do terreno em antecipação que permitem analisar o risco presente. São ainda apresentadas medidas de controlo, como seja a prospeção em avanço e sugerida a inclusão de outros dados conhecidos que permitem desenvolver um modelo mais preciso e diminuir esses riscos.
- Na frente de escavação, a implementação de metodologias de acompanhamento geológico e geotécnico da escavação, com comprovada eficiência, permite analisar a qualidade do terreno; a verificação dos procedimentos executivos, como o saneamento e a aplicação de contenção adequada que garantam a estabilização da escavação e permitam eliminar o risco de destaque de blocos e cunhas da periferia da escavação.
- Para o trecho escavado, a gestão de risco passa pela manutenção da estabilidade da escavação, que pode ser feita pela verificação de implantação do plano de instrumentação e monitorização, associado à realização de inspeções visuais das superfícies de escavação, que no conjunto permitem detetar deformações ou os seus indícios que precedem a instabilização da escavação. Com esta deteção é possível intervir atempadamente e deste modo, eliminar o risco de colapso da escavação.

Com esta gestão de riscos geotécnicos é possível eliminar ou diminuir a ocorrência de acidentes na construção de túneis em maciços rochosos, e suas consequências, quer ao nível da queda individualizada de material, quer no colapso generalizado da escavação, que pode afetar pessoas, equipamentos, e decorrente aumento de prazo e de custos.

Esta nova metodologia de gestão de riscos geotécnicos é apresentada de modo integrada com trabalho que habitualmente já é desenvolvido no acompanhamento geológico e geotécnico, neste tipo de construções, promovendo interligação com a execução, numa adequação das metodologias que levam à otimização da produtividade perante as reais condições geotécnicas encontradas, com consequente economia de recursos e de custos.

Como ultima consideração, admite-se que esta investigação não se encontra concluída, sendo necessário desenvolver e/ou aprofundar alguns aspetos específicos, são a apresentadas na secção seguinte.

8.2 PERSPETIVAS FUTURAS

Enquanto a dúvida recair sobre o Homem e o pensamento científico estiver presente, qualquer investigação nunca estará concluída.

A investigação desenvolvida ao longo desta dissertação apresenta um contributo para a gestão de riscos geotécnicos na fase construtiva de túneis em maciços rochosos. Abre igualmente nova abordagem ao tema com a implementação da gestão de riscos na fase construtiva de modo objetivo e específico; contudo, pela limitação de recursos, disponibilização de dados e tempo há aspetos que não foram abordados ou tiveram uma abordagem restritiva, pelo que se torna relevante prosseguir e desenvolver esta temática, deixando-se para tal as seguintes sugestões e orientações genéricas:

- Aplicação da metodologia a outros contextos geológicos e geotécnicos, uma vez que os casos de estudo na base da definição da metodologias foram todos referentes a reforços de potências, localizados em maciços rochosos selecionados por apresentarem condições favoráveis à sua implementação e onde já existia um conhecimento das condições geotécnicas existentes, proveniente da construção dos empreendimentos anteriores;
- Aplicação da metodologia a mais túneis rodoviários e a túneis ferroviários em contexto geológico e geotécnico semelhante, preferencialmente onde a localização seja uma imposição e não uma seleção de onde se encontram características favoráveis como no caso dos aproveitamentos hidroelétricos;
- Adaptação da nova metodologia de gestão de riscos geotécnico a túneis em maciços terrosos;
- Adaptação da nova metodologia de gestão de riscos a túneis localizados em áreas urbanas, onde existem outros riscos envolvidos, particularmente na afetação de terceiros como edifícios e vias de comunicação;
- Validar da nova metodologia de gestão de riscos em túneis escavados com recurso a tuneladora, indicando-se como mais aproximado no mesmo contexto de maciços rochosos, as tuneladoras de *ripper*, onde a superfície escavada fica momentaneamente disponível para caracterização;
- Ampliar as listas de verificação apresentadas com aprofundamento ou inclusão de outros riscos que não foram considerados nesta investigação;
- Ampliar o número de medidas mitigadoras e de eliminação dos riscos geotécnicos
- Ampliar o número de medidas otimizadoras de riscos geotécnicos;
- Desenvolver maior interligação entre a gestão de riscos e a execução de obras de modo a promover a sua mais-valia;
- Aplicar outras metodologias de análise de risco, preferencialmente quantitativas no contexto dos casos de estudo abordados nesta investigação;

- Desenvolver a metodologia de estimação da qualidade do maciço em avanço utilizando os resultados de outras classificações geomecânicas diferentes da de Bieniawski (1989), como seja a classificação de Barton *et al.* (1974), ou de Palmström (1995), ou índice de resistência do maciço como o GSI (Marinos & Hoek, 2000) e testar a sua eficiência;
- Desenvolver a metodologia de estimação da qualidade do maciço em avanço utilizando os parâmetros que servem de base ao resultado final das classificações geomecânicas, como sejam as características das descontinuidades, espaçamento das descontinuidades, RQD, etc.;
- Aplicação de outras metodologias matemáticas na estimação da qualidade geotécnica do maciço rochoso a escavar, indicando-se a título de exemplo a krigagem com deriva externa, caso se encontrem disponíveis características do terreno para a zona a escavar, ou se incluam dados dos equipamentos de furação;
- Desenvolvimento de novos modelos que possibilitem uma rápida atualização com inclusão de nova informação obtida a cada avanço de escavação, mas que igualmente contemple a informação obtida do reconhecimento de superfície, nomeadamente a presença de zonas tectonizadas;
- Recalcular os valores de RMR e determinar o erro inerente, tendo por base as características mais relevantes resultantes da AFC reveladas nesta investigação;
- Caracterização de mais casos de maciços migmatíticos e gnaissicos, assim como existentes para verificar a sua semelhança ou diferença com os resultados dos casos estudados nesta investigação;
- Inclusão de mais casos de estudo no estudo de probabilidade realizado de modo a adicionar maior robustez estatística aos resultados;
- Estimação da qualidade do maciço para distâncias superiores à próxima frente de escavação;
- Estudo pormenorizado sobre as deformações do maciço relativamente à qualidade do maciço e contenção aplicada;
- Desenvolvimento de estudos para sistematizar a implementação de cartas de riscos durante a construção de túneis.

BIBLIOGRAFIA

- A'ssim, A.-J., & Xing, Z. (2010). Most used rock mass classifications for underground opening. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(2), 403–411.
- Abad, J., Caleda, B., Chacon, E., Gutierrez, V., & Hidalgo, E. (1984). Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. In *5th International Congress Rock Mechanics* (pp. 15–17).
- Abdullatif, O., & Cruden, D. (1983). The relationship between rock mass quality and ease of excavation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 28, 183–187.
- AFTES. (2000). *New recommendations on choosing mechanized tunneling techniques*. French Tunnelling and Underground Engineering Association.
- AFTES. (2012). *Recomendations on the characterisation of geological hydrogeological and geotechnical uncertainties and risk*.
- Alber, M. (1996). Design of high speed TBM-drives. In *8th International IAEG congress* (pp. 3537–3543). Rotterdam.
- Alber, M. (2000). Advance rates for hard rock TBMs. *Tust*, (1), 15.
- Albuquerque, T., Pereira, H. G., Soares, A., & Brito, G. (1993). Spatial characterization of the extreme values of a recovery index in a marble quarry. In J. Elbrond & X. Tang (Eds.), *APCOM'93, XXIV APCOM - International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries* (pp. 445–451). Montreal, Canada.
- Alencão, A., Coke, C., Neto, A., Oliveira, A., Pratas, P., & Santos, V. (2011). VI Seminário recursos geológicos, ambiente e ordenamento do território – Guia da excursão. In J. Lourenço, A. Alencão, A. Sousa Oliveira, L. Sousa, & R. Teixeira (Eds.), *VI Seminário recursos geológicos, ambiente e ordenamento do território* (p. 54). Vila Real.
- Almeida, E., & Ferreira, M. (2008). Técnicas de análise de risco aplicadas à planeamento e programação de projectos da construção civil. In *IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão* (p. 15).
- Almeida, J. ., Vintem, C., Luís, A., & Lopes, M. (2003). Modelação estocástica da compartimentação dos mármore na unidade de Borba. *A Geologia de Engenharia E Os Recursos Geológicos*, (2), 309–322.
- Almeida, J. A. (2003). *Análise de correspondências. Principios teóricos e exemplo de aplicação*.
- Almeida, J. A. (2010). Modeling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. *Engineering Geology*, (114), 26–33.
- Almeida, R. (1983). Aplicação da análise de dados à tipologia de minério. In *Encontros sobre métodos quantitativos aplicados às variáveis regionalizadas* (pp. 85–92). Instituto Nacional de Investigação Científica.
- APA/ISQ. (2011). *Guia para avaliação para ameaça evidente e dano ambiental*. Amadora.
- Apostol, T. (2004). The tunnel of Samos. *Engineering & Science*, (1), 30–40.
- APRH. (2012). Imagem do Reforço de Potência de Venda Nova III. Retrieved September 30, 2012, from <http://www.aprh.pt/ishs2012/technicalvisit-images.html>
- Araújo, J., Almeida, P. de, Borrego, J., Pedro, J., & Oliveira, T. (2006). As regiões central e sul da Zona de Ossa Morena. In R. Dias, P. Terrinha, & K. J. (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Universidade de Évora.
- ASCE. (2007a). *Geotechnical Baseline Reports for Construction - Suggested Guidelines*. (R. Essex,

- Ed.). ASCE.
- ASCE. (2007b). *Geotechnical baseline reports for construction. The technical committee on geotechnical reports of the underground technology research council*. Reston.
- Atkins, W. (2006). The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground - Research report 453. Retrieved August 23, 2013, from <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr453.pdf>
- Atkinson, T. (1971). Selection of open-pit excavating and loading equipment. *Transactions of the Institut. Min. Metallurgy*, (80), A101–A129.
- Ayalew, L., Reik, G., & Busch, W. (2002). Characterizing weathered rock masses – A geostatistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (39), 105–114.
- Baars, S. Van, & Vrijling, J. K. (2005). Geotechnical applications and conditions of the observational method. *Heron*, 50(3), 155–172.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P., & Cardoso, A. S. (2004a). Characterization of granite and the underground construction in Metro do Porto, Portugal. In *Proc. International Conference on Site Characterization* (pp. 19–22). Porto.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P., & Cardoso, A. S. (2004b). Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses – The Case of “Metro do Porto” and the Measures Adopted. In *Conference in Aveiro* (p. 15). Aveiro.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P., & Cardoso, A. S. (2005). EPB-TBM face support control in the Metro do Porto project, Portugal. Retrieved January 7, 2011, from <http://www.roscience.com/hoek/references/H2005c.pdf>
- Baecher. (1981). Risk screening for civil facilities. *Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Eng. CER*, 81(9), 20.
- Bakke, H., Leite, A., & Silva, L. (2008). Estatística multivariada: Aplicação da análise fatorial na engenharia de produção. *Revista Gestão Industrial*, 1–14.
- Barbosa, P. (2008). *Avaliação do risco em túneis rodoviários extensos em maciços rochosos - Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Barlow, J. (1986). *Interpretation of tunnel convergence measurements*. University of Alberta.
- Barros, A., Carvalhosa, & Galopim de Carvalho, A. (1970). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 e Notícia Explicativa da Folha 43-B (Moura)*.
- Barton, N. (1990). Scale effects or sampling bias? In *Proc. Int. Workshop Scale Effects in Rock Masses* (pp. 31–55). Rotterdam: Balkema.
- Barton, N. (1995). The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In *Keynote Lecture, 8th ISRM Congress* (pp. 1023–1032). Tokyo: Balkema.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, (39), 185–216.
- Barton, N. (2006a). Fault zones and TBM. In A. Campos e Matos, L. Ribeiro e Sousa, Pinto, Kleberger, & Lopes (Eds.), *Geotechnical Risks in Rock Tunnels* (pp. 75–117). Taylor & Francis.
- Barton, N. (2006b). TBM tunnelling in sheared and fractured rock and the application of Q TBM model concepts. In J. Montero & J. Colmenares (Eds.), *Vith South American Rock Mech. Cong.* (pp. 77–112). Cartagena, Colombia.
- Barton, N. (2008). TBM tunnel construction in difficult ground. In *Proc. VI th South American Congress on Rock Mechanics*. Bogota, Colombia.
- Barton, N., & Bieniawski, Z. (2008). RMR and Q - Setting Records. *Tunnels and Tunnelling International*, February, 26–29.

- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–239.
- Basto, M. (1998). *A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos - Dissertação de Mestrado*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Bieniawski, R., Celada, B., & Tardáguila, I. (2009). Selección de tuneladoras para macizos rocosos con frentes estables. *Ingeopress*, (181), 16–22.
- Bieniawski, Z. (1979). Geomechanics classification in rock engineering applications. In *Proc. 4th Int. Congress Rock Mechanics* (pp. 41–48). Rotterdam: Balkema.
- Bieniawski, Z. (1989). *Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z., Celada, B., & Galera, M. (2007). Prediction TBM escavability. *Tunnels & Tunnelling International*, 25–28.
- Brady, B., & Brown, E. (2005). *Rock mechanics for underground mining* (3th Editio). Kluwer Academic Publishers.
- Brinkman, J. (2008a). Risk management applied to tunnels. In *Presentation in Risk Management in Civil Engineering Advanced Course* (p. 6). Lisboa: LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Brinkman, J. (2008b). Risk management in civil engineering RISK MANAGEMENT APPLIED TO TUNNELS.
- Brito, G., Albuquerque, T., Ribeiro, J., & Pereira, H. G. (1992). Estimacão geoestatística de um índice de recuperaçao para pedreiras de mármore. *Revista Geonovas*, 177–187.
- Brito, M. G., & Rogado, J. Q. (1996). Simulation of weathered layers in a granite massif based on geophysics survey. In E. Y. Baafi & N. A. Schofield (Eds.), *Geostatistics Wollongong '96* (pp. 707–718). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BTS. (2003). *The joint code of practice for risk management of tunnel works in UK*. Londo.
- Buchmeister, B., Kremljak, Z., Polajnar, A., & Pandza, K. (2006). Fuzzy decision support system using risk analysis. *APEM - Advances in Production Engineering Management Journal*, (1), 30–39.
- Calapez, T., Reis, E., Melo, P., & Andrade, R. (2007). *Estatística aplicada - Vol. 1*. Silabo.
- Caldeira, L. (2002). As análises de risco e as incertezas. In *Atas VII Congresso Nacional de Geotecnia* (pp. 2295–2311). Lisboa: SPG.
- Caldeira, L. (2005). *Análise de Risco em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro*. Lisboa: Programa de Investigação para obtenção de Habilitação para funções de Coordenação Científica. LNEC.
- Caldeira, L., & Muralha, J. (2004). O método observacional e a sua aplicação ao túnel de penalva. *Revista Geotecnia*, (100), 31–46.
- Cameron-Clarke, I. S., & Budavari, S. (1981). Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecore and in-situ observations. *Engng Geol.*, (17), 19–53.
- Cândido, M. (2010). *Contributo para a gestão do risco geotécnico na construção de túneis - Dissertação de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa.
- Cândido, M., Silva, P., & Gomes, A. S. (2012). As listas de verificacão na gestão de riscos geotécnico em túneis – uma revisao critica. In *XII Congresso Nacional de Geotecnia* (p. 18). Lisboa: SPG.
- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence–confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2(15), 187–213.

- Castro-Fresno, D., Diego-Cabrera, R., Ballester, F., & Álvarez-García, J. (2010). Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q index in low-quality soils. *Revista de La Constrution*, 9(1), 107–119.
- Ceric, A., Marcic, D., & Kreso, I. (2011). A risk-assessment methodology in tunnelling. *Tehnicki Vjesnik*, 4(18), 529–536.
- Chapman, T. J. P. (2007). Ground risk mitigation by better geotechnical design and construction management. *Risk Management*, 645–656.
- Charifo, G., Almeida, J. A., & Ferreira, A. (2013). Managing borehole samples of unequal lengths to construct a high-resolution mining model of mineral grades zoned by geological units. *Journal of Geochemical Exploration*, (132), 209–223.
- Chiriotti, E., Grasso, P., Gaj, F., & Giacomini, G. (2004). O controlo dos riscos na escavação mecanizada de túneis urbanos. In *IX Congresso Nacional de Geotecnia* (pp. 259–268). Aveiro: SPG.
- Choi, J., & Lee, C. (2007). An estimation of rock mass rating using 3D-indicator kriging approach with uncertainty assessment of rock mass classification. In *11th congress of the international society for rock mechanics* (pp. vol. 2, 1285–1288). Lisbon.
- Choquet, P., & Charette, F. (1988). Applicability of rock mass classifications in the design of rock support in mines. In *proc. 15th Canadian Symp. Rock Mechanics* (pp. 39–48). Toronto.
- Choquet, P., & Hadjigeorgiou, J. (1993). Design of support for underground excavations. In J. Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering* (pp. 313–348).
- Chowdhury, R., Flentje, P., & Bhattacharya, G. (2012). Geotechnics in the 21st Century, uncertainties and other challenges, with particular references to landslide hazard and risk assessment. Retrieved December 13, 2012, from <http://ro.uow.edu.au/engpapers>
- Christian, J. T. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing?. 39th Terzaghi Lecture. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 10(130), 985–1003.
- CJC. (2009). *Memória descritiva e justificativa do projecto de execução do Túnel do Marão (não publicado)*.
- CNPGB. (2005). *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em barragens, 1º Relatório de Progresso*. Lisboa.
- COBA. (2007). *Reforço de potência do escalão de Alqueva. Estudo Geológico-Geotécnico (não publicado)*.
- Coke, C. (2000). *Evolução geodinâmica do ramo sul da Serra do Marão um caso de deformação progressiva em orógenos transpressivos - Dissertação de Doutoramento*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Coke, C., Dias, R., & Ribeiro, A. (1993). Variscan deformation in the Marão region. In A. Chambel (Ed.), *Comunicações da XII reunião de geologia do Oeste peninsular* (pp. 77–88). Évora: Universidade de Évora.
- Coke, C., & Santos, V. (2012). Geologia estrutural na caracterização do comportamento geotécnico da escavação do Túnel do Marão. In *Congresso Nacional de Geotecnia* (p. CD-ROM). Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Conrady, S., & Jouffe, L. (2011). Introduction to Bayesian Networks. Retrieved January 13, 2013, from http://www.bayesia.us/white_papers/BBN_Introduction_V13.pdf
- Costa-Pereira. (1985). *A geologia de engenharia no planeamento e projecto de túneis em maciços rochosos - Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Couto, E. (2011). *Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçados por tirantes passivos - Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
- Daller, J. (2004). Risk control at the design of a 13 km long railway tunnel in Austria. In *Course on Geotechnical Risk in Rock Tunneling* (p. 8). Aveiro.
- Davis, J. C. (2002). *Statistics and data analysis in geology* (3th editio). John Wiley and Sons.
- Decreto-lei_N.º147/2008. (2008). Lei de responsabilidade ambiental. *Ministério Do Ambiente, Do Ordenamento Do Território E Do Desenvolvimento Regional D.R. N.º 145, Série I de, 5027–5038*.
- Deere, D. U. (1989). *Rock quality designation (RQD) after 20 years*. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- Dematteis, A. (2012). Presentazione dell'attività della commissione IAEG Italia: Raccomandazioni per la quantificazione dell'affidabilità del modello geologico applicato alla progettazione di grandi opere civili. *Geingegneria Ambientale E Mineraria, XLIX(3)*, 23–31.
- Diederichs, M. (1999). *Instability of hard rockmasses: The role of tensile damage and relaxation*. University of Waterloo.
- Dudeck, H. (1987). Risk assessment and risk sharing in tunneling. *Tunneling and Underground Space Technology, 3(2)*, 315–317.
- Dunncliff, J. (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.
- EDP. (2006). *Aproveitamento hidroelétrico do Douro Internacional - Reforço de Potência de Picote - Estudo Geológico Geotécnico (não publicado)*.
- EDP. (2007). *Aproveitamento hidroelétrico do Douro internacional. Reforço de potência de Bemposta (não publicado)*.
- EDP. (2009a). *Venda Nova III - Reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova - Estudos de Caracterização geológica (não publicado)*. Porto.
- EDP. (2009b). *Venda Nova III - Reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova - Memória descritiva (não publicado)*. Porto.
- Egaña, M., & Ortiz, J. (2013). Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. *Journal of GeoEngineering, 8(3)*, 83–90.
- Einstein, H. (2001). The decision aids for tunnelling (DAT) – a brief review. In *Tunnelling Technology* (pp. 37–49). Korea Tunnelling Assoc.
- Einstein, H. (2003). Uncertainty in rock mechanics and rock engineering — then and now. *Rock Mechanics, 281–294*.
- Einstein, H., Labreche, D., Markow, M., & Baecher, G. (1978). Decision analysis applied to rock tunnel exploration. *Engineering Geology, (12)*, 143–161.
- Einstein, H., Sousa, R., Karam, K., Manzella, I., & V, K. (2010). Rock slopes from mechanics to decision making. In J. Zhao, V. Labiouse, J.-P. Dudt, & J.-F. Mathier (Eds.), *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering* (pp. 3–13). London: CRC Press.
- Ericson, C. (2005). *Hazard analysis techniques for system safety*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group N°2. *Tunnelling and Underground Space Technology, 19*, 217–237.
- Espósito, T., Naghettini, M., Ladeira, J., & Caldeira, L. (2010). Análise por árvore de eventos: Ferramenta para a gestão de risco em barragens de terra. *Geotecnia, (120)*, 3–24.

- Exadaktylos, G., & Stavropoulou, M. (2008). A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (45), 1102–1125.
- Fenton, G., & Griffiths, D. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Ferrari, F., Apuani, T., & Giani, G. P. (2014). Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (70), 162–176.
- Ferreira, C. (2009). *Reforço de potência da Barragem de Picote - Escavação e Contenção - Dissertação de Mestrado*. Universidade do Porto.
- Ferreira, R. (2010). *Incidências das características geotécnicas dos terrenos na construção dos túneis do Marão - Dissertação de Mestrado*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Ferson, S. (2003). Bayesian methods in risk assessment. Retrieved February 28, 2012, from <http://www.ramas.com/bates.pdf>
- Figueiredo, F. (2009). *Estatística descritiva e probabilidades. Problemas resolvidos e propostos com aplicações em R*. Escolar Editora.
- Flores, J. (2006). *Risk management in Canadian tunneling projects. Master of Science in Construction Engineering and Management*. University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Folle, D. (2009). *Análise e aplicações da geoestatística no controle geológico-geotécnico urbano*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Fouladgar, M., Yadani-chamzini, A., Hossein, M., & Set, F. (2011). Risk evaluation of tunnelling projects by fuzzy topsis. In *Proceeding of International Conference on Management* (pp. 1219–1232).
- Franklin, J., Broch, E., & Walton, G. (1971). Logging the mechanical character of rock. *Trans Inst Min Metall*, (80), A1–A9.
- Freeman, T., Klein, S., Korbin, G., & W., Q. (2009). Geotechnical Baseline Reports— A Review. Retrieved from <http://www.jacobssf.com/>
- Geokon. (2013). Instrumentation posters - Tunnelling Instrumentation. Retrieved February 21, 2013, from <http://www.geokon.com>
- Gomes, & Pinto da Cunha, A. (2014). Breve história dos túneis ferroviários em Portugal. In R. Pistone & A. Pinto da Cunha (Eds.), *Túneis em Portugal* (1st ed., pp. 2–9). Lisboa: Comissão Portuguesa de Túneis.
- Gomes, E., & Alencão, A. (2005). *Património geológico transfronteiriço na Região do Douro: Roteiros*. Vila Real.
- Gomes, E., & Plaza, M. (2006). Itinerários geoturísticos: um suporte aos percursos de barco nas albufeiras do Douro Internacional (Arribas do Douro). Retrieved November 7, 2012, from <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/cz9.pdf>
- Gomes, E., Sousa, L., Coke, C., & Lourenço, J. (2005). Enquadramento geomorfológico e geológico das barragens de Miranda do Douro, Picote e Bemposta. In *Interreg IIIA–Douro–Duero–Séc. XXI, Acção 2.2*. Freixo de Espada à Cinta.
- Gomes, M. L. (1991). A construção do túnel de São Domingos-Morgável e as carências do reconhecimento geológico-geotécnico. In *4º Congresso Nacional de Geotecnia* (pp. 181–191). Lisboa: SPG.
- Gomes, M. L. (1998). *O efeito de escala em maciços rochosos. O caso da resistência e deformabilidade das descontinuidades - Dissertação de Doutoramento*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

- Gonçalves, A. (2009). *Execução de túneis nas formações vulcânicas da ilha da Madeira: O caso do túnel 1 da nova ligação Vasco Gil - Fundoa à cota 500 - Dissertação de Mestrado*. Universidade da Madeira.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford Univ. Press.
- Grasso, P. (2008). Risk management applied to mechanized tunnelling in urban areas. Retrieved August 5, 2012, from <http://www.acquacon.com.br/2cbt/apresentacoes/2506/17h30piergiorgiograsso.pdf>
- Grasso, P., Chiriotti, E., Xu, S., & Kazilis, N. (2007). Use of risk management plan for urban mechanized tunnelling projects: From the establishment of the method to the successful practice. In *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Proceeding of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly* (pp. 1535–1540). Prague.
- Graziani, A. (2000). Evaluation of rock bolts effectiveness in reducing tunnel convergence in squeezing rocks. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, (1), 64–72.
- Guimarães, T. (2012). *Modelação de metais pesados nos solos e sedimentos na envolvente à Mina de Aljustrel - Dissertação de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa.
- Hadjigeorgiou, J., & Scoble, M. J. (1990). Ground characterization for assessment of ease of excavation. In R. K. Singhal & M. Vavra (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 323–331). Calgary - Alberta: Balkema.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1998). *Multivariate data analysis* (4th ed.). Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., & Bejari, H. (2010). Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using fuzzy-AHP. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (69), 523–532.
- Hapgood, F. (n.d.). No TitleHistory of the Tunnel Boring Machine. Retrieved June 28, 2015, from <http://fhapgood.fastmail.fm/TBM01.html>
- Hass, C., & Einstein, H. (2002). Updating the decision aids for tunnelling. *Journal Construction Engineering & Management*, (128), 40–48.
- Hidrorumo. (1996). *Reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova II (não publicado)*. Porto.
- Hill, T., & Lewicki, P. (2007). *Statistics: Methods and Applications*. Tulsa: StatSoft.
- Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology – an engineer’s viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, (32), 1–19.
- Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. Retrieved September 3, 2010, from http://www.rocscience.com/hoek/corner/Practical_Rock_Engineering.pdf
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, part 1 e 2. *Tunnels & Tunnelling International*, (32/11 32/12), 45–51 33–36.
- Hoek, E., & Palmeiri, A. (1998). Geotechnical risks on large civil engineering projects. In *Keynote address for Theme I – International Association of Engineering Geologists* (p. 12). Vancouver.
- HSE. (1996). *Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels, A review of sprayed concrete tunnels with particular reference to London Clay*. Sudbury: HSE Books.
- Hudson, J. (1993). *Comprehensive rock engineering. Volume 4: Excavation, support and monitoring*. Pergamon.
- Hudson, J. (2012). Design methodology for the safety of underground rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3), 205–214.

- Hudson, J. A. (1989). *Rock mechanics principles in engineering practice*.
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford Univ. Press.
- ISRM. (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Nt. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, (18), 85–110.
- ISRM. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics*. (R. Ulusay & J. A. Hudson, Eds.). Ankara, Turkey: Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group.
- ISSMGE_TC32. (2004). Risk assessment - Glossary of Terms. *Technical Committee on Risk Assessment and Management*, (July), 7. Retrieved from http://140.112.12.21/issmge/2004Glossary_Draft1.pdf
- ITA/AITES. (2011). Monitoring and control in tunnel construction. Retrieved February 21, 2012, from http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ItaReports/ITA_Report_N9_WG2_P.pdf
- ITA, A. /. (2011). Monitoring and control in tunnel construction. Retrieved February 21, 2012, from http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ItaReports/ITA_Report_N9_WG2_P.pdf
- ITIG. (2012). *A code practice for risk management of tunnel works (2nd edition)*. ITIG.
- Jalalifar, H., Mojedifar, S., & Sahebi, A. A. (2014). Prediction of rock mass rating using fuzzy logic and multi-variable RMR regression model. *International Journal of Mining Science and Technology*, (24), 237–244.
- Jeon, S., Hong, C., & You, K. (2009). Design of tunnel supporting system using geostatistical methods. In N. Huang & Liu (Eds.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 781–784). London: Taylor & Francis Group.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. (2002). *Applied multivariate statistical analysis*. NJ: Prentice-Hall.
- Journel, A. (1993). Modelling uncertainty: some conceptual thoughts. *Geostatistics for the next Century*, 30–43.
- Journel, A., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. London: Academic Press.
- Kaewkongkaew, K., Phien-wej, N., & Kham-ai, D. (2015). Prediction of rock mass along tunnels by geostatistics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 81–90.
- Kaiser, P. K., MacKay, C., & Gale, A. D. (1986). Evaluation of rock classification at B. C. Rail Tumbles Ridge tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, (19), 205–234.
- Kirsten, H. (1982). A classification system for excavation in natural materials. *Civil Engineering South Africa*, (24), 293–308.
- Koch Jr, G. S., & Link, F. (2002). *Statistical analysis of geological data*. Dover.
- Kochen, R. (2009). Gerenciamento de riscos em obras subterrâneas de engenharia. *Revista Engenharia*, (595), 100–107.
- Kolymbas. (2008). *Tunneling and tunnel mechanics. A rational approach to tunnelling* (2nd ed.). Springer.
- Kovári, K. (1993). Erroneous concepts behind the NATM. In *Lecture at Rabcewicz-Geomechanical Colloquium* (p. 21). Salzburg.
- Kovári, K. (1994). Erroneous concepts behind the new austrian tunnelling method. *Tunnels &*

Tunnelling International, November 9(26), 38–42.

- Kovári, K. (2001a). The control of ground response – Milestones up to 1960s. In *AITES-ITA World Tunnel Congress – Progress in Tunneling After 2000* (pp. 93–118). Milano.
- Kovári, K. (2001b). The control of ground response - milestones up to the 1960s. In *AITES - ITA 2001 World Tunnel Congress* (p. 26). Milano.
- Kovári, K., & Lunardi, L. (2000). On the observational method in tunnelling. In *Proceedings of the GeoEng 2000: an International Conference on Geotechnical & Geological Engineering* (pp. 692–707). Melbourne. Retrieved from http://www.rockmass.net/files/Kovari&Lunardi_on_Observational_method.pdf.
- Ladeira, J., Espósito, T., & Naghettini, M. (2007). Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico. In *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – SBRH, 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – 8º SILUSBA* (p. 20). São Paulo - Brasil. Retrieved from http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/d27f62dd4dd4fedb0059caf2c10581ab_325347561cf292b434b74adcc60c1f33.pdf
- Landim, P. M. B. (2000). Análise estatística de dados geológicos multivariados. Retrieved October 8, 2012, from <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Landim, P. M. B. (2010). Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. Retrieved October 8, 2012, from <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/>
- Leca, E., & Eskesen, S. (2006). Guidelines fo tunnelling risk assessment. Seoul. Retrieved April 29, 2012, from http://www.itaaites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAs-sociation/ProducAndPublication/OpenSession/OS_2006_1_leca.pdf
- Leu, S., & Adi, T. (2011). Probabilistic prediction of tunnel geology using a Hybrid Neural-HMM. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (24), 658–665.
- Leu, S.-S., & Adi, T. J. W. (2011). Probabilistic prediction of tunnel geology using a Hybrid Neural-HMM. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(4), 658–665. <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.02.010>
- Lima, C., Resende, E., Esteves, C., & Neves, J. (2012). Bemposta II powerhouse shaft. Geotechnical characterization, design and construction. In Qian & Zhou (Eds.), *Harmonising Rock Engineering and the Environment* (pp. 193–198). London: Taylor and Francis Group.
- Lima, C., Resende, M., Plasencia, N., & Esteves, C. (2002). Venda Nova II hydroelectric scheme powerhouse Geotechnics and design. *ISRM News*, 7(2), 37–41.
- LNEG-LGM. (2010). *Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:1 000 000*. 3ª edição.
- Longo, S. (2006). *Análise e gestão do risco geotécnico em túneis - Dissertação de Doutoramento*. Universidade Técnica de Lisboa.
- López Jimeno, C. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: López Jimeno, C.
- Lunardi, P. (2000). The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rock and soils. *Tunnels & Tunnelling International*, (May), 3–30.
- Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils*. Springer.
- Machado, M. (2003). Controlo de deslocamentos através de processos topográficos simplificados. In *Encontro nacional de geodesia aplicada – LNEC* (p. 51). Lisboa.
- Mahtab, M., & Grasso, P. (1992). Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock. *Geodata*.
- Marinos, P., Antoniou, A., Novack, M., Benissi, G., Rovolis, G., Papadatos, I., & Angelidaki, K.

- (1998). TBM excavation in weak and heterogeneous rock masses for the Athens metro. In *8th International AEG Congress*. Balkema.
- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In *Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering* (pp. 1422–1446). Melbourne: Technomic publishers.
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Econ. Geol.*, (58), 1246–1266.
- Matias, F. V., Almeida, J. A., & Chichorro, M. (2015). A Multistep Methodology for Building a Stochastic Model of Gold Grades in the Disseminated and Complex Deposit of Casas Novas in Alentejo, Southern Portugal. *Resource Geology*, 65(4), 361–374.
- Matos, A. C., Sousa, L. R., Kleberger, J., & Pinto, P. L. (2006). *Geotechnical risk in rock tunnels*. London: Taylor & Francis.
- Miranda, T. (n.d.). Application of Data Mining techniques for the development of new geomechanical characterization models for rock masses.
- Miranda, T. (2007). *Geomechanical parameters evaluation in underground structures. Artificial intelligence, Bayesian probabilities and inverse methods - Dissertação Doutoramento*. Universidade do Minho.
- Miranda, T., Correia, A. G., Eclaircy-Caudron, S., Dias, D., Lima, C., & Sousa, L. R. (2007). Numerical analysis of the Venda Nova II powerhouse complex. In *5th Int. Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*. Guimarães.
- Miranda, T., Correia, G., Silva, C., & Sousa, L. R. (2006). Desenvolvimento de Sistemas de Inteligência Artificial para Análise de Risco em Túneis. In *III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia* (pp. 155–160). Curitiba.
- Miranda, T., Correia, G., & Sousa, L. R. (2007). Use of AI techniques and updating in geomechanical characterisation. In *11th Congress of the International Society for Rock Mechanics : courses* (p. 31). IISBOA: isrm. Retrieved from <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/8790>
- Mohamed, E.-G. (2006). A simplified approach for risk analysis in design-build construction projects. In *Proceeding of 2006 Associated Schools of Construction Region III Conference* (p. 8).
- Moreira, M. (1997). Introdução às redes neuronais artificiais. Retrieved January 2, 2013, from http://ltodi.est.ips.pt/mmoreira/PUBLICACOES_P/introducao_redes_neuronais_1997.pdf
- Moreno, T. E. (1980). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los túneles de pajares. In *II Curso de sostenimientos activos en galerías y túneles. Fundación Gomez-Parto*. Madrid.
- Moritz, B., & Goldberger, H. (2006). Application of the observational method in heterogeneous rock mass with low overburden. *Felsbau*, 2(1).
- Muller, L. (1990). Removing misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method. *Tunnels & Tunnelling*, (Summer 1990), 15–18.
- NGI. (2013). *Using the Q system. Rock mass classification and support design*. Oslo.
- Nicholson, D., Tse, C., & Penny, C. (1999). *The observational method in ground engineering – principles and applications. Report 185*. London.
- Nord, G. (2006a). TBM Versus drill and blast the choice of tunnelling method. In *International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology* (pp. 205–218). Subang, Selangor, Malaysia.
- Nord, G. (2006b). TBM Versus Drill and Blast, the choice of tunnelling method. In *International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology* (pp. 205–218). Subang, Selangor, Malaysia.
- Noronha, F., & Ribeiro, L. (1983). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 e Notícia*

- Explicativa da Folha 6-A (Montalegre)*. Lisboa.
- NP EN 1997-1. (2010). *Eurocódigo 7 Projeto geotécnico, Parte 1: Regras gerais*. Monte da Caparica.
- Oliveira, A., & Amaral, V. (2007). A análise factorial de correspondências na investigação em psicologia: Uma aplicação ao estudo das representações sociais do suicídio adolescente. *Análise Psicológica*, 25(2), 271–293.
- Oliveira, C., Gama, V., Rodrigues, R., & Santo, A. (2012). Central do Reforço de Potência do Escalão de Alqueva. In *Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012* (p. 10). Porto.
- Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T., & Monteiro, J. H. (1992). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:500000*.
- Oliveira, R. (1977). Cartografia geológica de túneis. *Revista Geotecnia*, (20), 111–119.
- Oliveira, R. (2014). Apresentação de túneis em Portugal. In R. Pistone & A. Pinto da Cunha (Eds.), *Túneis em Portugal* (1st ed., p. IX). Lisboa: Comissão Portuguesa de Túneis.
- Oliveira, P., & Santos, V. (2014). Geological and Geotechnical difference on both sides of the same tunnel. In G. Lollino (Ed.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6. IAGE XII Congress* (pp. 47–51). Turin.
- Oreste, P. (2009). The convergence-confinement method: Roles and limits in modern geomechanical tunnel design. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 757–771.
- Ozturk, C. A., & Nasuf, E. (2002). Geostatistical assessment of rock zones for tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(3), 275–285.
- Palmer, J., Caspel, H., & Fricker, S. (n.d.). Minimizing risks inherent in tunnel projects. Retrieved April 11, 2012, from www.tcm-2.org/presentations/Wednesday/330_RiskRiskMngmnt_Palmer_Caspe_Fricker.pdf
- Palmström, A. (1995). *Rmi — a rock mass characterization system for rock engineering purposes - Dissertação de Doutoramento*. University of Oslo, Norway.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*, (20), 362–377.
- Panet, M. (2001). Recommendations on the convergence-confinement method. Retrieved February 23, 2012, from http://www.aftes_asso.fr/publications_recommandations.html
- Panet, M., & Guenot, A. (1982). Analysis of convergence behind the face of a tunnel. In *Proc. of the International Symposium Tunnelling* (pp. 197–204). London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, D., & Maertens, J. (2007). The observational method in geotechnics. Retrieved April 12, 2012, from http://www.arup.com/_assets/_download/41a6acb0-dd6e-06ac-f7c03c57bf321ba5.pdf
- Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187. <http://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
- Pereira, E. (1987). *Estudo geológico estrutural da região de Celorico de Bastos e sua interpretação geodinâmica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Marques, F., Munhá, J., Castro, P., Meireles, C., ... Ferreira, N. (2000). *Carta Geológica de Portugal à escala 1:200000 – Folha 2*.
- Pereira, H. G. (1983). Métodos Gerais de Análise de Dados. In *Encontros sobre métodos quantitativos aplicados às variáveis regionalizadas*. Lisboa: INIC, CVRM.
- Pereira, H. G., Albuquerque, T., Ribeiro, J., Sousa, A. J., & Brito, G. (1994). Estimação geoestatística de um índice de qualidade em rochas ornamentais. *Revista GeoSistemas*, 101–107.

- Pereira, H. G., Brito, M. G., Albuquerque, T., & J., R. (1992). Geostatistical estimation of a summary recovery index for marble quarries. In A. Soares (Ed.), *Geostatistics Troia '92, IV Internacional Geostatistical Congress* (pp. 1029 – 1040). Kluwer Academic Publishers.
- Pimenta, L. (2008). *Abordagens de riscos em barragens de aterro - Dissertação de Doutoramento*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Pimenta, L. (2012). Gestão e análise de riscos em barragens de aterro. Algumas aplicações práticas. In *VI Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia* (pp. 9–14). Lisboa: SPG.
- Pinto, T. (2010). *Construção e Instrumentação dos Túneis do Marão - Dissertação de Mestrado*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Pistone, R., & Pinto da Cunha, A. (1999). Aplicação do método observacional à construção de túneis rodoviários em rocha. *Revista Geotecnia*, (86), 81–94.
- Plasencia, N. (2003). *Obras subterrâneas – Aspectos da contribuição da geologia de engenharia na concepção e projecto - Dissertação de Mestrado*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Plasencia, N. (2014). Túneis hidroelétricos. In R. Pistone & A. Pinto da Cunha (Eds.), *Túneis em Portugal* (1st ed., pp. 348–425). Lisboa: Comissão Portuguesa de Túneis.
- Powderham, A. J. (1994). An overview of the observational method: development in cut and cover and bored tunnelling projects. *Geotechnique*, 4(44), 619–636.
- Powderham, A. J. (1998). No TitleThe observational method – application through progressive modification. *Proc. Journal ASCE/BSCE*, 2(13), 87–110.
- Powderham, A. J. (2002). The observational method-learning from projects. *PROCEEDINGS-INSTITUTION OF CIVIL*, 115(1), 1–10. Retrieved from <http://www.tunnels.mottmac.com/files/page/1614/OM-LearningProjects.pdf>
- Powderham, A. J., & Nicholson, D. P. (1996). *The way forward. The observational method in geotechnical engineering*. London: Thomas Telford.
- Powell, D., & Silverton, T. (2003). Managing risk on major tunnelling contracts. In *Conference in Mumbai* (p. 9).
- Priest, S., & Hudson, J. (1976). Discontinuity spacing in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, (13), 135–148.
- Quental, P., Almeida, J. A., & Simões, M. (2012). Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. *Advances in Water Resources*, (39), 18–32.
- Rabcewicz, L. V. (1964). The new austrian tunneling method. Part I, Part II e Part III. *Water Power*, (November 1964, December 1964, January 1965), 453–457, 511–515, 19–24.
- Reis, E. (2001). *Estatística multivariada aplicada* (2ª ed). Silabo.
- Reis, E. (2008). *Estatística descritiva* (7ª ed.). Silabo.
- Ribeiro, A. (2006). A evolução geodinâmica de Portugal. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kulberg (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (pp. 1–27). Évora: Universidade de Évora.
- Ribeiro, A., Silva, J., Dias, R., Araújo, A., Marques, F., Merino, H., & Fonseca, P. (1988). Geodynamics and deep structure of the Variscan Fold Belt in Ibéria. In *Proceedings of the fifth workshop on the European Geotraverse (EGT)* (pp. 57–64). Project - The Iberia Peninsula.
- Ribeiro, P. (2009). *Projecto do troço superior do poço da central do reforço de potência de bemposta - Dissertação de Mestrado*. Universidade do Porto.
- Rodrigues-Carvalho, J. A., & David, J. M. C. (1986). A influência dos estudos geológicos-geotécnicos no projecto e no custo de construção de túneis. *Geotecnia*, (46), 25–33.

- Romana, M. (n.d.). Formatos normalizados para la toma de datos de campo a usar em las clasificaciones geomecánicas RMR Q y SMR, 10.
- Romana, M. (1981). New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. In *Proc. Int. Symp. Rock Mechanics Mining Civ. Works* (pp. 59–63). Zacatecas, Mexico: ISRM.
- Rozek, J., & Loganathan, N. (2009). Geotechnical baseline report as an underground management tool. Retrieved September 22, 2011, from <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/O-01/O-01-05.pdf>
- Rutledge, J. C., & Preston, R. L. (1978). Experience with engineering classifications of rock for the prediction of tunnel support. In *Proceedings of the International Tunnelling Symposium* (p. A-3-1. 7). Tokyo.
- Sá, A., Meireles, C., Coke, C., & Gutiérrez-Marco, J. (2005). *Unidades litoestratigráficas do Ordovícico da região de Trás-os-Montes (Zona Centro-Ibérica, Portugal)* (Comunicações Geológicas No. 92).
- Santos, R. (2006). *Enquadramento das análises de risco em geotecnia - Dissertação de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa.
- Santos, R., Caldeira, L., & Serra, J. (2008). Aplicação da FMEA/FMECA a uma barragem de retenção de rejeitados. *Revista Geotecnia*, (114), 113–142.
- Santos, V., Coke, C., & Olivença, P. (2013). Camada Seixinhos no interior do Túnel do Marão. *Geonovas*, (26), 23–32.
- Santos, V., & Olivença, P. (2012). Acompanhamento geológico-geotécnico de obras subterrâneas em rocha. *Geonovas*, (25), 53–66.
- Santos, V., Silva, A. P., & Brito, M. G. (2014). Prediction of RMR Ahead Excavation Front in D&B Tunnelling. In G. Lollino (Ed.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6. IAGE XII Congress* (pp. 415–419). Turin.
- Schubert, P. (2004). Geotechnical risk management in tunnelling. In *Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels* (p. 12). Aveiro.
- Schubert, W. (2008). The Development of the Observational Method. *Geomechanics and Tunnelling*. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.200800035/abstract>
- Scoble, M., & Muftuoglu, Y. (1984). Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection. *Mining Science Technology*, (1), 305–322.
- Seidenfub, T. (2006). *Collapses in tunnelling - Dissertação de Mestrado*. Stugard University of Applied Sciences. Retrieved from <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/Thesis/ThesisSeidenfuss.pdf>
- Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Hmidi, J. (2008). Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 318–325.
- Silva, A. J. ., Soares, A., Almeida, J., Ramos, L., & Carvalho, J. (1997). A multi-step approach for modelling oil reservoir lithologies and petrophysical attributes based on the integration of geostatistics and geology. In E. Y. Baafi & N. A. Schofield (Eds.), *Geostatistics Wollongong '96* (pp. 327–338). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sinfield, J., & Einstein, H. (1996). Evaluation of tunneling technology using the decision aids for tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4(11), 491–504.
- Singh, R. N., Denby, B., & Egretli, I. (1987). Development of a new rippability index for coal measures excavations. In *Proceedings of the 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics* (pp. 935–943). Tucson: Balkema.

- Soares, A. (1989). *Morfologia geoestatística de recursos minerais*. LMPM / IST - UTL.
- Soares, A. (2006). *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente* (2ª ed.). Lisboa: IST press.
- Sousa, A. (2000). Análise geoestatística de dados. Retrieved from <http://biomonitor.ist.utl.pt/~ajsousa/textos/angeodad.pdf>
- Sousa, L. R. (2000). Aspectos inovadores no projecto e construção de estruturas subterrâneas. In *VII Congresso Nacional de Geotecnia* (pp. 1313–1373). Porto: SPG. Retrieved from <http://www.engenhariacivil.com/aspectos-inovadores-no-projecto-e-construcao-de-estruturas-subterraneas-em-2012-10-14>
- Sousa, M. (1982). *Litoestratigrafia e estrutura do Complexo Xisto-Grauváquico Ante-Ordovícico - Grupo do Douro (Nordeste de Portugal) - Dissertação de Doutoramento*. Universidade de Coimbra.
- Sousa, R. L. (2010). *Risk analysis for tunnelling projects - Dissertação de Doutoramento*. MIT.
- Sousa, R. L., & Einstein, H. (2012). Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (27), 86–100.
- Stack, B. (1982). *Handbook of mining and tunnelling machinery*. John Wiley and Sons.
- Steiner, W., & Irngartinger, S. (2011). Risk Analysis and Observational Methods in practice : what do new codes improve ? *Analysis*, 471–479.
- Steinergímsson, J., Grov, E., & Nilson, B. (2002). The significance of mixed-face conditions for TBM performance. *World Tunnelling. Annual Tecnical Review*, 435–441.
- Szechy, K. (1970). *Art of tunnelling* (Enghlis Ed). Budapest: Akademiai Kiado.
- Tamames, C. (1983). Fourteen years of experience on rock bolting in Spain. In O. Stephansson (Ed.), *Proc. Int. Symp. Rock Bolting* (pp. 295–311). Abisko.
- Tarkoy, P. (1995). Comparing TBMs with drill+blast excavation. *Tunnels & Tunnelling*, (October 1995).
- Tarkoy, P., & Byram, J. (1991). The advantages of tunnel boring : a qualitative/quantitative comparison of D&B and TBM excavation. *Hong Kong Engineer*, (Janeiro 1991).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3th Editio). Ney york: John Wiley & Sons.
- Thomas, A. (2009). *Sprayed Concrete Lined Tunnels. An introduction*. New York: Taylor & Francis.
- Thomas, A., & Banyai, J. (2007). Risk management of the constrution of tunnels using tunnel boring machines (TBMs). In *Underground space - 4th Dimension of Metropolises - Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly* (pp. 1618–1623). Prague.
- Udd, J., & Wang, H. A. (1985). A comparison of some approaches to the classification of rock masses for geotechnical purposes. In E. Ashworth (Ed.), *Proc. 26th US Symp. Rock Mechanics* (pp. 69–78). Rapid City: Balkema.
- Vallejo, L., Ferrer, M., OrtuñoL., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Vanicek. (2011). Risk in geotechnical engineering and profession prestige. In Vogt, Schuppener, Straub, & Bräu (Eds.), *ISGSR 2011: 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk* (pp. 3–9).
- Vick, S. (2002). *Degrees of belief. Subjective probability and engineering judgement*. (A. Press, Ed.). Amer Society of Civil Engineers.

- Ward, S. (1999). Requirements for an effective project risk management process. *Project Management Journal*, 3(30), 37–43.
- Weaver, J. (1975). Geological factors significant in the assessment of rippability. *Civil Engineering South Africa*, (17 (12)), 313–316.
- Wood, M. (1987). To NATM or not to NATM. *Felsbau*, 1(5), 26–30.
- Xu, S., Grasso, P., Mahtab, A., & Einstein, H. (1997). Decision aids in tunneling: Exemple application for selecting the best construction scheme. *World Tunnelling. 10th Anniversary Issue*, 9.
- Yamamoto, J. (2009). Pós-processamento das Estimativas de Krigagem com Deriva Externa. *Revista Do Instituto de Geociências - USP*, 9(3), 89–101.
- You, K., & Barnes, R. (1997). Infill sampling design for tunnel rock classification. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2(34), 207–215.
- Zetterlund, M., & Ericsson, L. (2008). Characterisation of hard rock according to the observational method and value of information analysis. Retrieved April 10, 2012, from <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2008/data/pdf/19.PDF>

APÊNDICES

APÊNDICE I

DISTRIBUIÇÃO DE VALORES DE RMR POR CLASSES

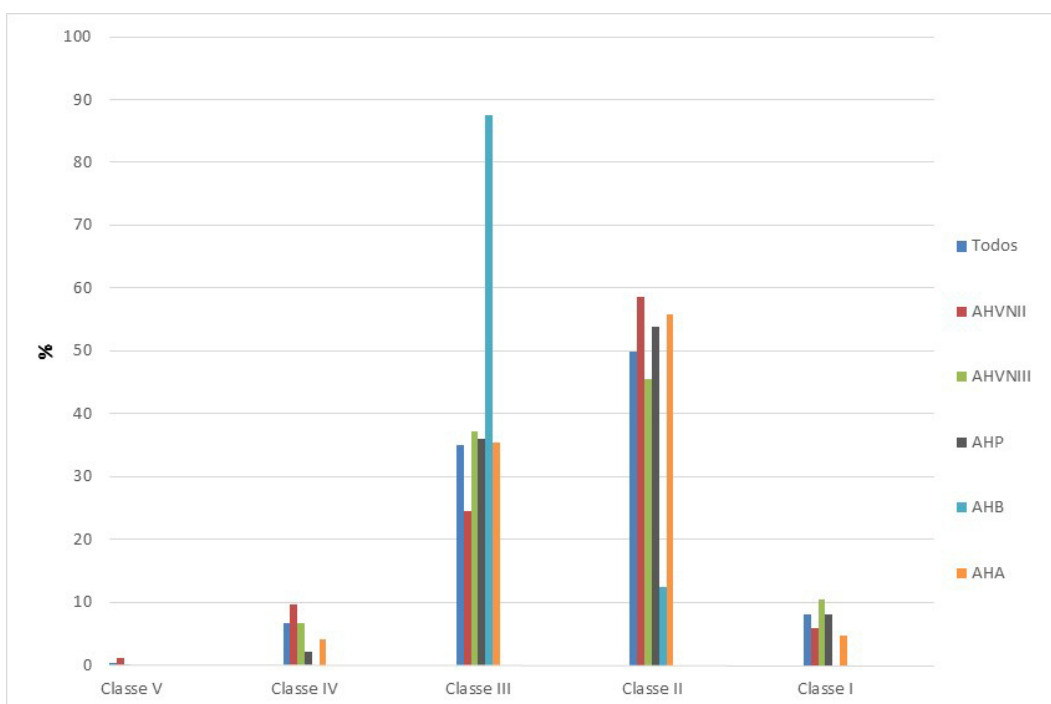


Figura A1.1 – Distribuição dos valores de RMR por classe de qualidade definida por Bieniawski (1989)

Tabela A1.1 – AHVNII: frequência do RMR no caso de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	1.2	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	0	0	0.0	0.0		
15<x<=20	12	12	1.2	1.2		
20<x<=25	5	17	0.5	1.6	9.7	IV
25<x<=30	14	31	1.4	3.0		
30<x<=35	12	43	1.2	4.2		
35<x<=40	70	113	6.8	10.9		
40<x<=45	32	145	3.1	14.0	24.6	III
45<x<=50	60	205	5.8	19.8		
50<x<=55	88	293	8.5	28.3		
55<x<=60	75	368	7.2	35.5		
60<x<=65	128	496	12.4	47.9	58.6	II
65<x<=70	123	619	11.9	59.7		
70<x<=75	257	876	24.8	84.6		
75<x<=80	99	975	9.6	94.1		
80<x<=85	53	1028	5.1	99.2	5.9	I
85<x<=90	8	1036	0.8	100.0		
90<x<=95	0	1036	0.0	100.0		
95<x<=100	0	1036	0.0	100.0		

Tabela A1.2 – AHVNIII: frequência do RMR no caso de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	0.1	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	2	2	0.1	0.1		
15<x<=20	2	4	0.1	0.2		
20<x<=25	8	12	0.4	0.7	6.7	IV
25<x<=30	20	32	1.1	1.8		
30<x<=35	28	60	1.6	3.4		
35<x<=40	63	123	3.5	6.9		
40<x<=45	107	230	6.0	12.9	37.2	III
45<x<=50	175	405	9.8	22.7		
50<x<=55	172	577	9.6	32.3		
55<x<=60	210	787	11.8	44.1		
60<x<=65	167	954	9.4	53.4	45.5	II
65<x<=70	146	1100	8.2	61.6		
70<x<=75	341	1441	19.1	80.7		
75<x<=80	158	1599	8.8	89.5		
80<x<=85	107	1706	6.0	95.5	10.5	I
85<x<=90	56	1762	3.1	98.7		
90<x<=95	24	1786	1.3	100.0		
95<x<=100	0	1786	0.0	100.0		

Tabela A1.3 – AHP: frequência do RMR no caso de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	0.0	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	0	0	0.0	0.0		
15<x<=20	0	0	0.0	0.0		
20<x<=25	0	0	0.0	0.0		
25<x<=30	0	0	0.0	0.0	2.2	IV
30<x<=35	5	5	1.0	1.0		
35<x<=40	6	11	1.2	2.3		
40<x<=45	11	22	2.3	4.5	35.9	III
45<x<=50	19	41	3.9	8.4		
50<x<=55	69	110	14.1	22.5		
55<x<=60	76	186	15.6	38.1		
60<x<=65	67	253	13.7	51.8	53.9	II
65<x<=70	61	314	12.5	64.3		
70<x<=75	77	391	15.8	80.1		
75<x<=80	58	449	11.9	92.0		
80<x<=85	25	474	5.1	97.1	8.0	I
85<x<=90	12	486	2.5	99.6		
90<x<=95	2	488	0.4	100.0		
95<x<=100	0	488	0.0	100.0		

Tabela A1.4 – AHB: frequência do RMR no caso de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	0.0	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	0	0	0.0	0.0		
15<x<=20	0	0	0.0	0.0		
20<x<=25	0	0	0.0	0.0		
25<x<=30	0	0	0.0	0.0	0.0	IV
30<x<=35	0	0	0.0	0.0		
35<x<=40	0	0	0.0	0.0		
40<x<=45	6	6	5.0	5.0		
45<x<=50	14	20	11.7	16.7	87.5	III
50<x<=55	43	63	35.8	52.5		
55<x<=60	42	105	35.0	87.5		
60<x<=65	13	118	10.8	98.3	12.5	II
65<x<=70	2	120	1.7	100.0		
70<x<=75	0	120	0.0	100.0		
75<x<=80	0	120	0.0	100.0		
80<x<=85	0	120	0.0	100.0		
85<x<=90	0	120	0.0	100.0	0.0	I
90<x<=95	0	120	0.0	100.0		
95<x<=100	0	120	0.0	100.0		

Tabela A1.5 – AHA: frequência do RMR no caso de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	0.0	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	0	0	0.0	0.0		
15<x<=20	0	0	0.0	0.0		
20<x<=25	0	0	0.0	0.0		
25<x<=30	2	2	0.9	0.9	4.1	IV
30<x<=35	4	6	1.8	2.8		
35<x<=40	3	9	1.4	4.1		
40<x<=45	7	16	3.2	7.4	35.5	III
45<x<=50	20	36	9.2	16.6		
50<x<=55	26	62	12.0	28.6		
55<x<=60	24	86	11.1	39.6		
60<x<=65	28	114	12.9	52.5	55.8	II
65<x<=70	20	134	9.2	61.8		
70<x<=75	50	184	23.0	84.8		
75<x<=80	23	207	10.6	95.4		
80<x<=85	5	212	2.3	97.7	4.6	I
85<x<=90	3	215	1.4	99.1		
90<x<=95	2	217	0.9	100.0		
95<x<=100	0	217	0.0	100.0		

Tabela A1.6 - Frequência do RMR em todos os casos de estudo

Intervalo	Número de casos	Número de casos acumulado	Porcentagem	Porcentagem acumulada	Porcentagem por classes RMR	Classe (Bieniawski, 1989)
0<x<=5	0	0	0.0	0.0	0.4	V
5<x<=10	0	0	0.0	0.0		
10<x<=15	2	2	0.1	0.1		
15<x<=20	14	16	0.4	0.4		
20<x<=25	13	29	0.4	0.8	6.6	IV
25<x<=30	36	65	1.0	1.8		
30<x<=35	49	114	1.3	3.1		
35<x<=40	142	256	3.9	7.0		
40<x<=45	163	419	4.5	11.5	35.0	III
45<x<=50	288	707	7.9	19.4		
50<x<=55	398	1105	10.9	30.3		
55<x<=60	427	1532	11.7	42.0		
60<x<=65	403	1935	11.1	53.1	49.9	II
65<x<=70	352	2287	9.7	62.7		
70<x<=75	725	3012	19.9	82.6		
75<x<=80	338	3350	9.3	91.9		
80<x<=85	190	3540	5.2	97.1	8.1	I
85<x<=90	79	3619	2.2	99.2		
90<x<=95	28	3647	0.8	100.0		
95<x<=100	0	0	0.0	100.0		

APÊNDICE II

CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES RMR-Q

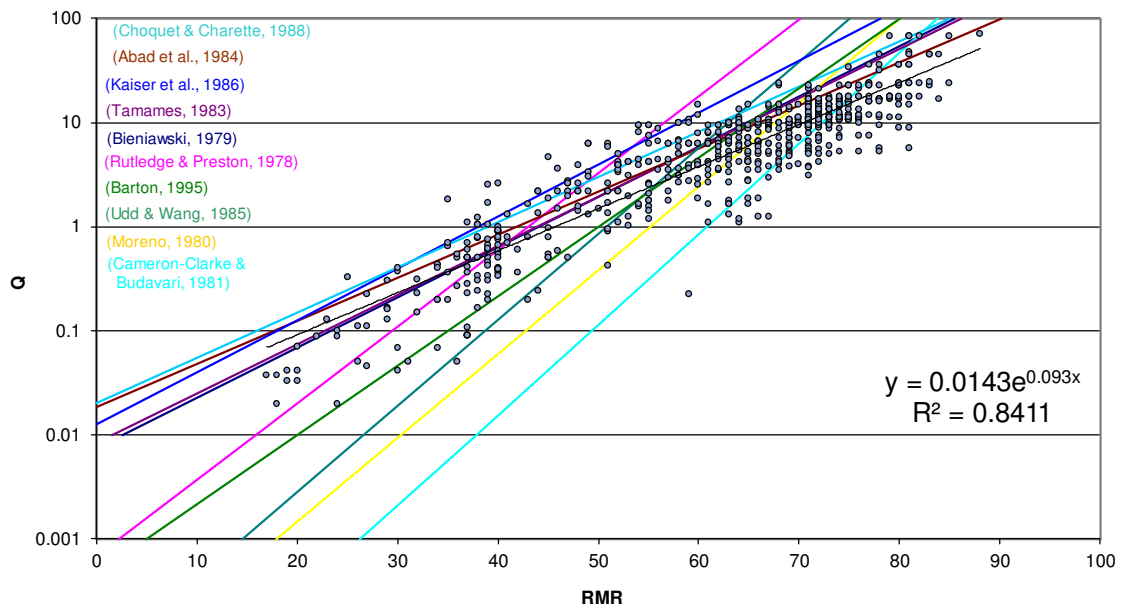


Figura A2.1 - Correlação entre os índices RMR e Q observados em AHVNII e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

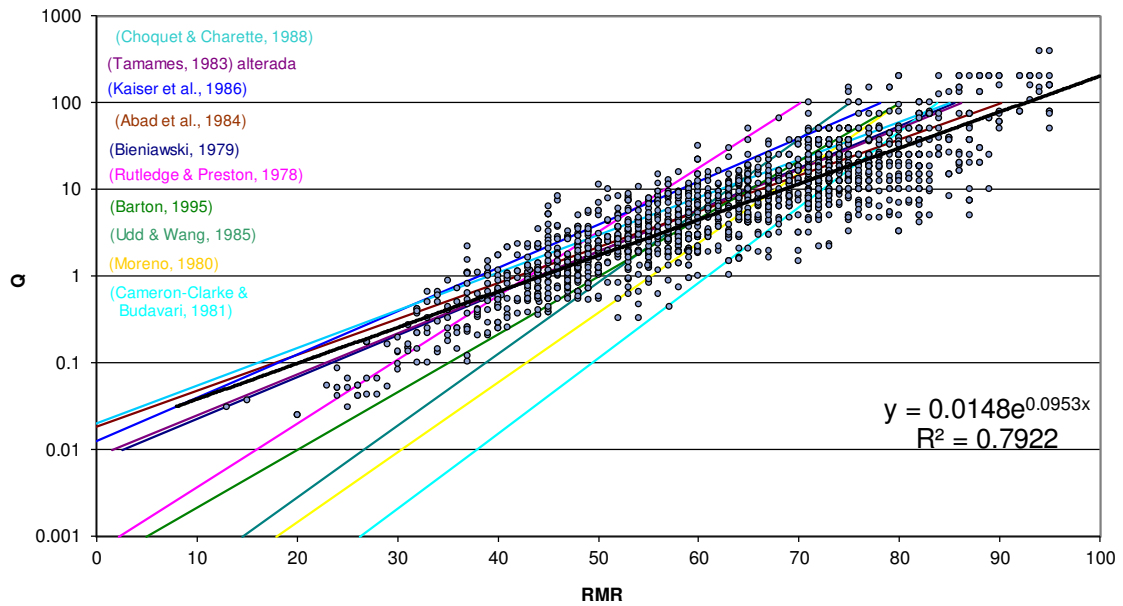


Figura A2.2 - Correlação entre os índices RMR e Q observados em AHVNIII e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

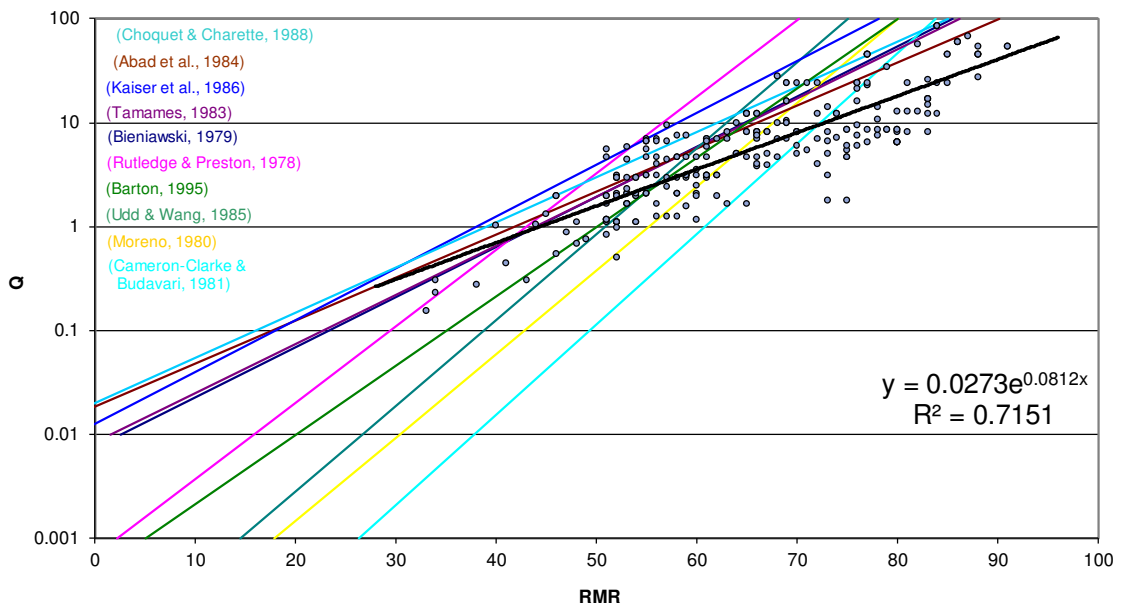


Figura A2.3 - Correlação entre os índices RMR e Q observados em AHP e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

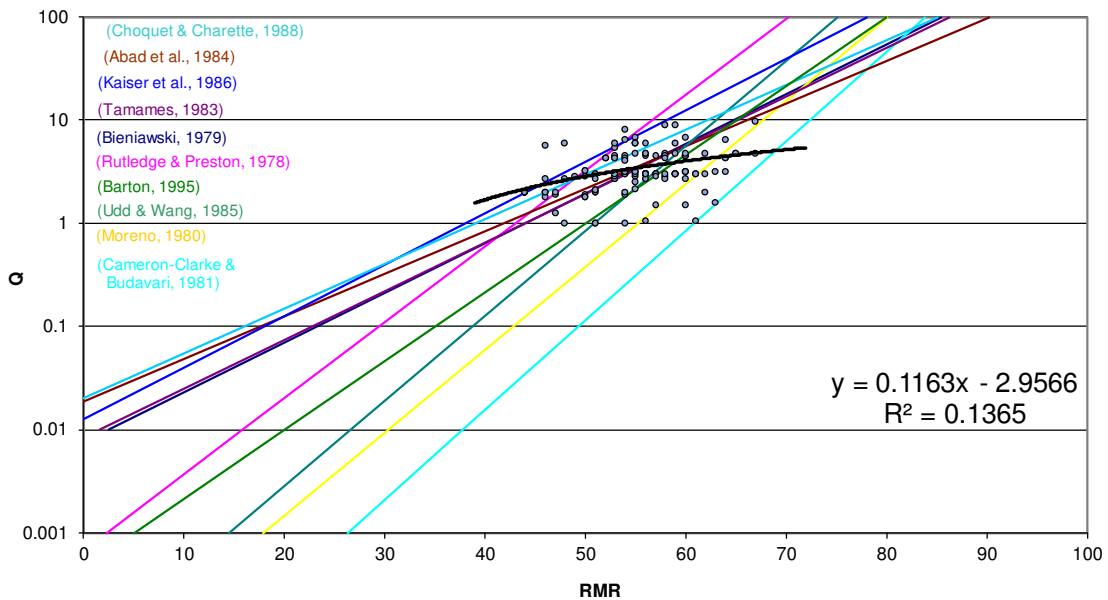


Figura A2.4 - Correlação entre os índices RMR e Q observados em AHB e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

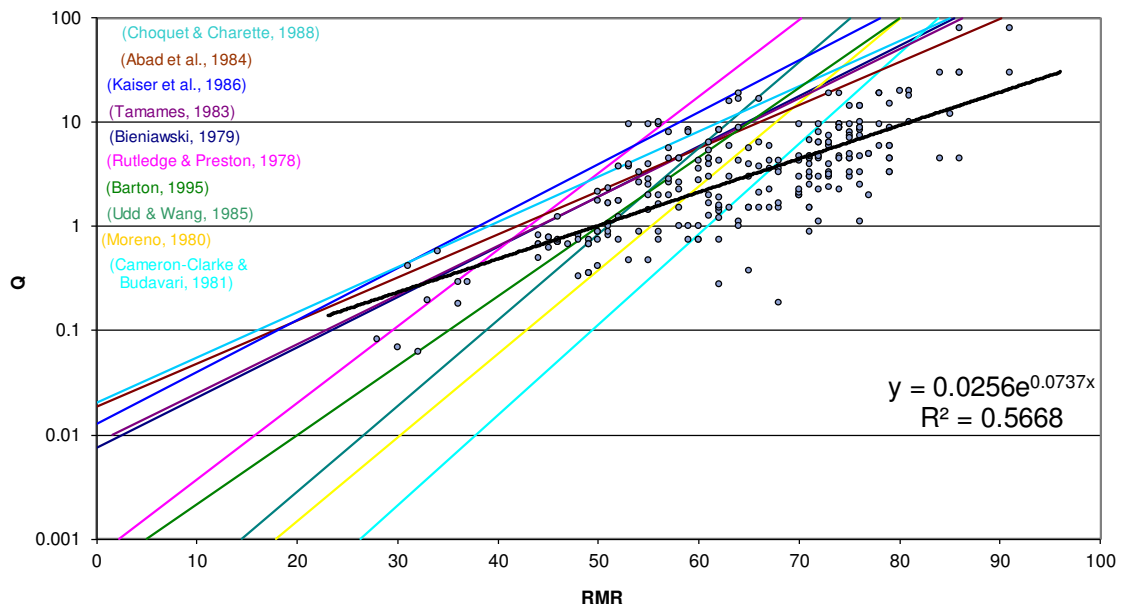


Figura A2.5 - Correlação entre os índices RMR e Q observados em AHA e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

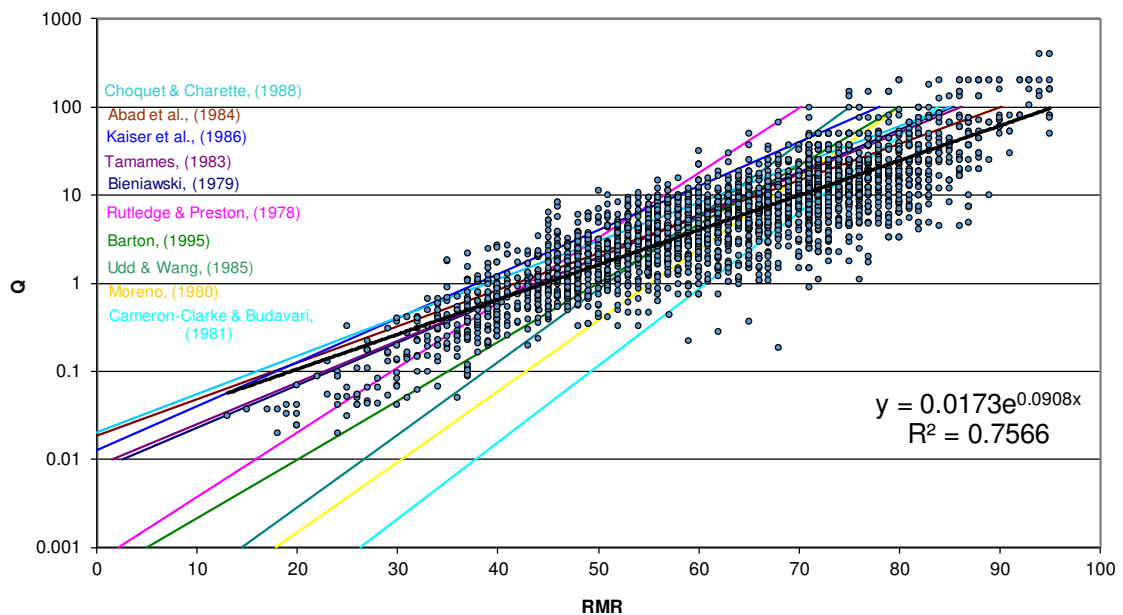


Figura A2.6 - Correlação entre os índices RMR e Q observados nos casos de estudo considerados e comparação com alguns exemplos de correlações disponíveis na bibliografia

APÊNDICE III

PARÂMETROS DESCRITORES DA QUALIDADE DO MACIÇO

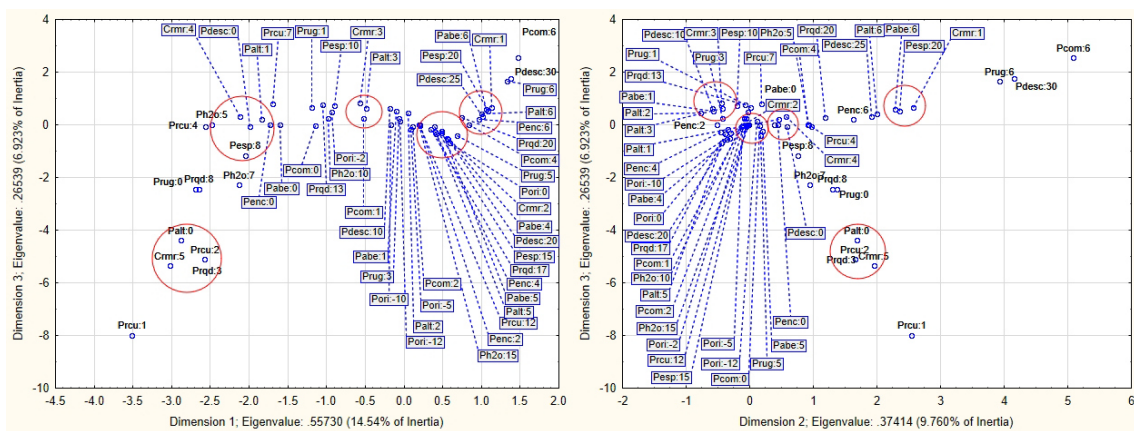
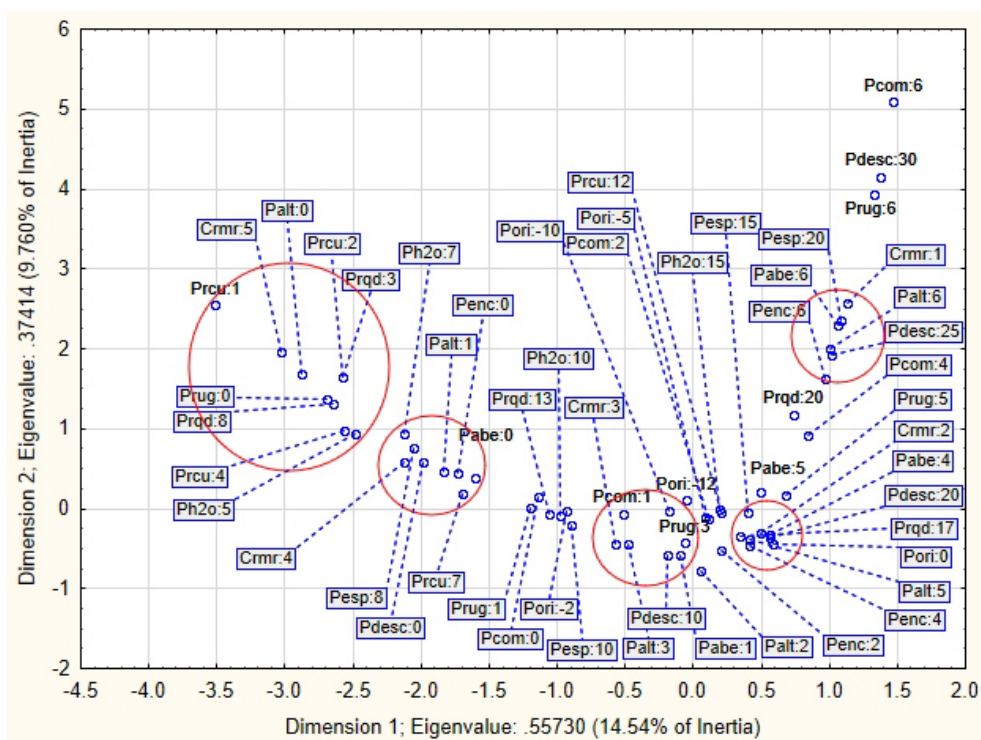


Figura A3.1 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR no caso de estudo do AHVNII

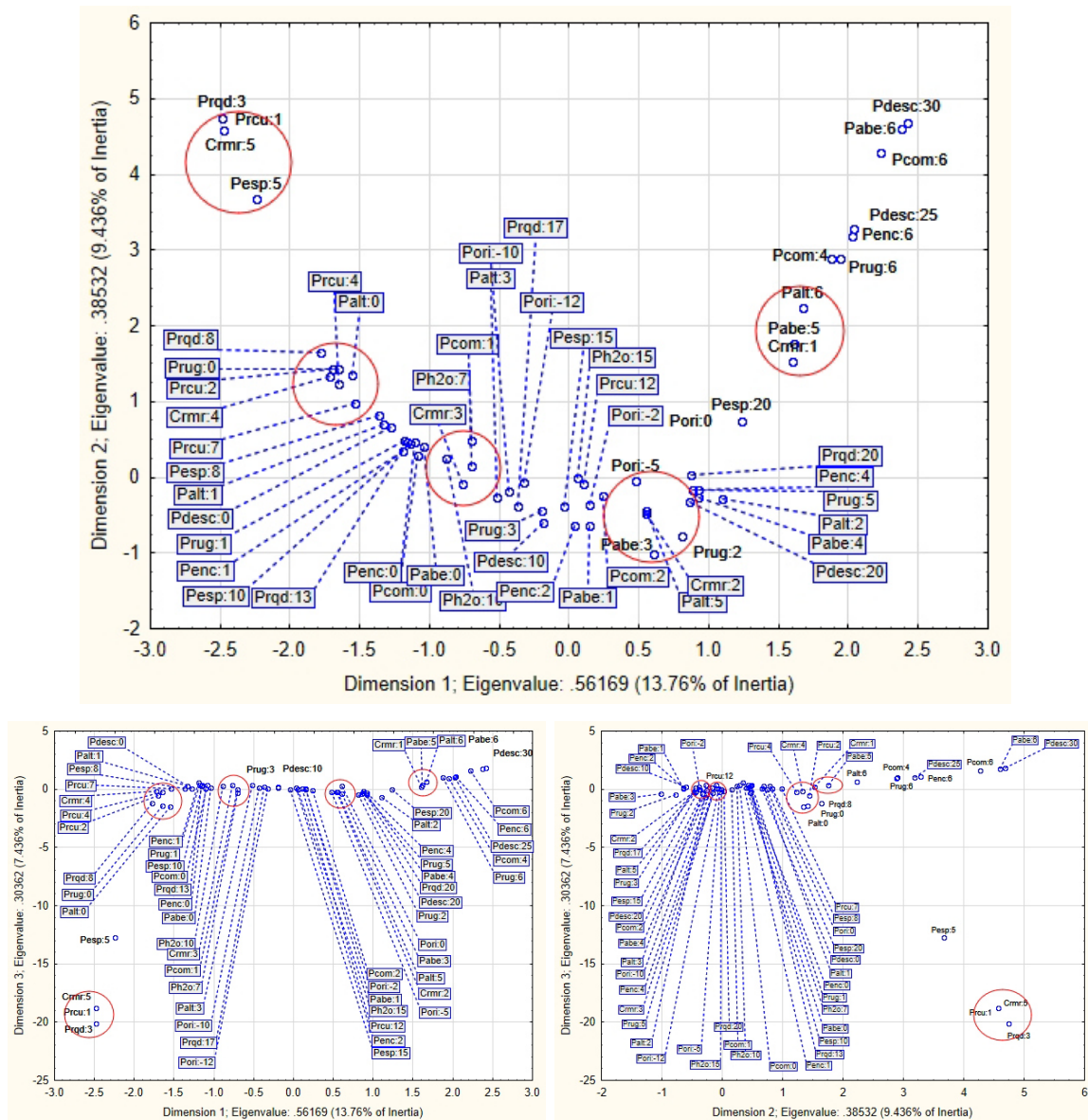


Figura A3.2 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR no caso de estudo do AHVNIII

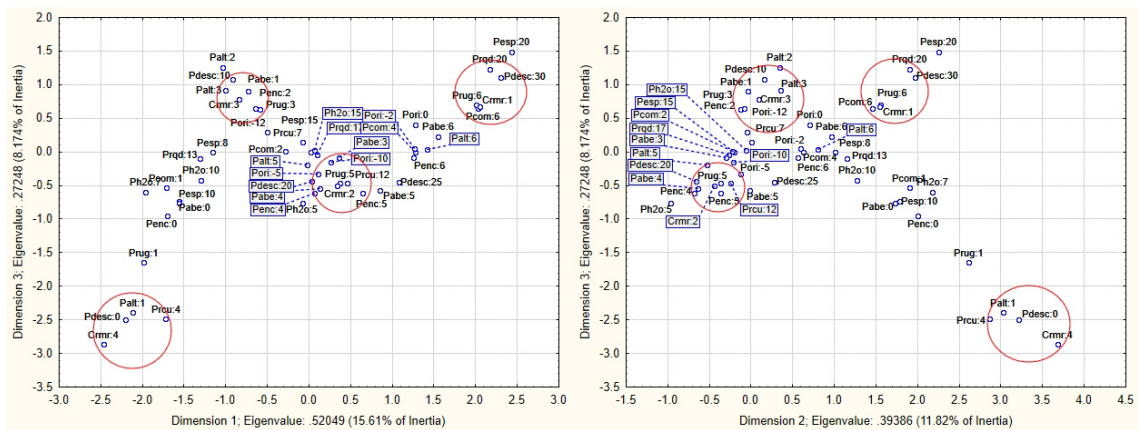
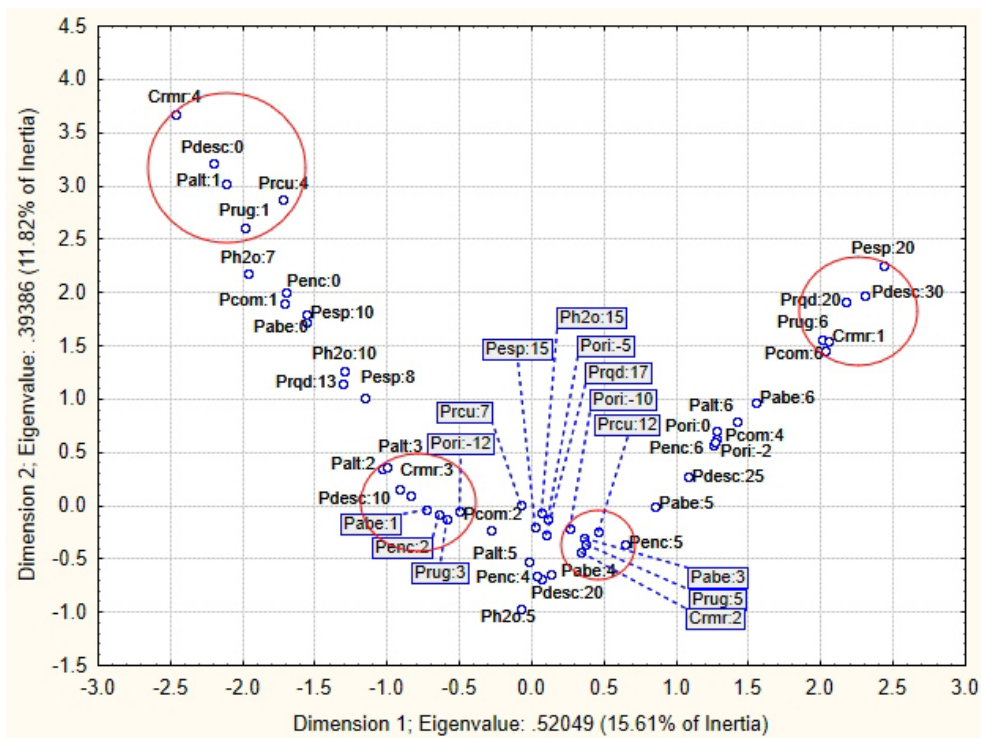


Figura A3.3 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR no caso de estudo do AHP

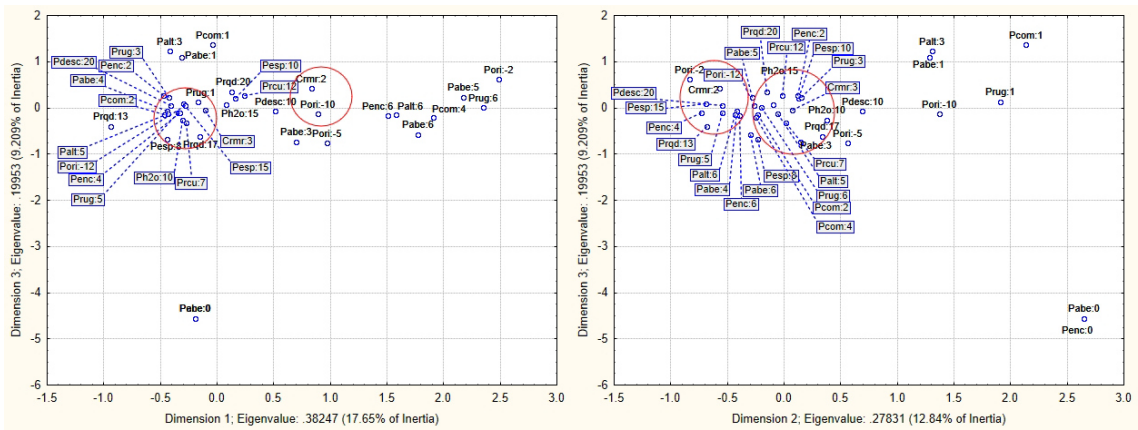
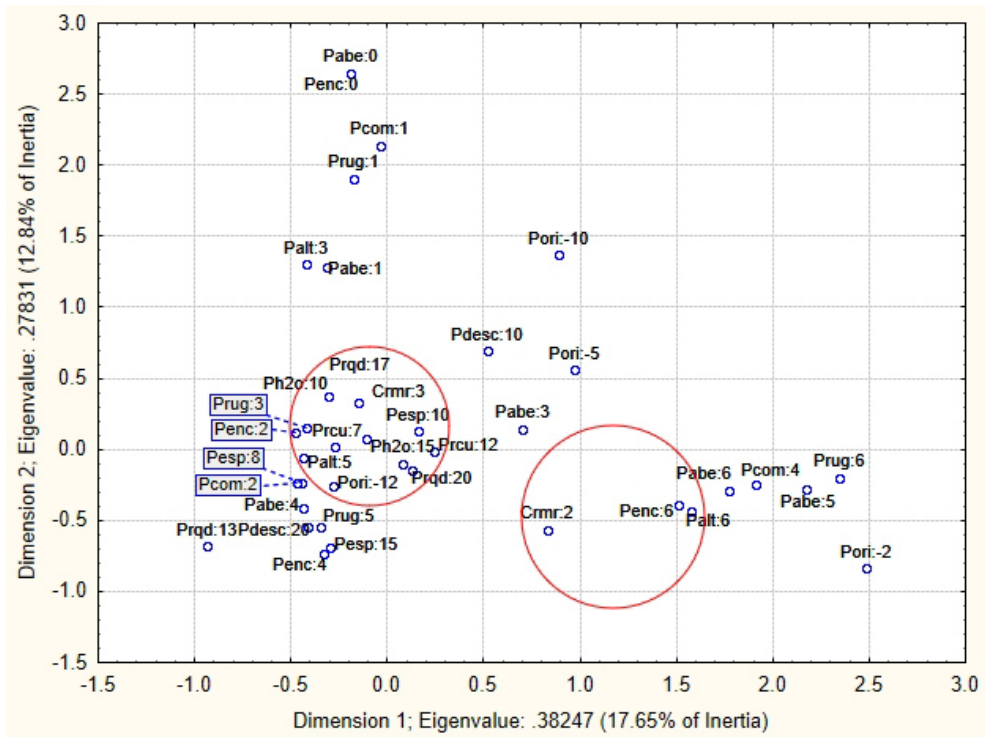


Figura A3.4 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR no caso de estudo do AHB

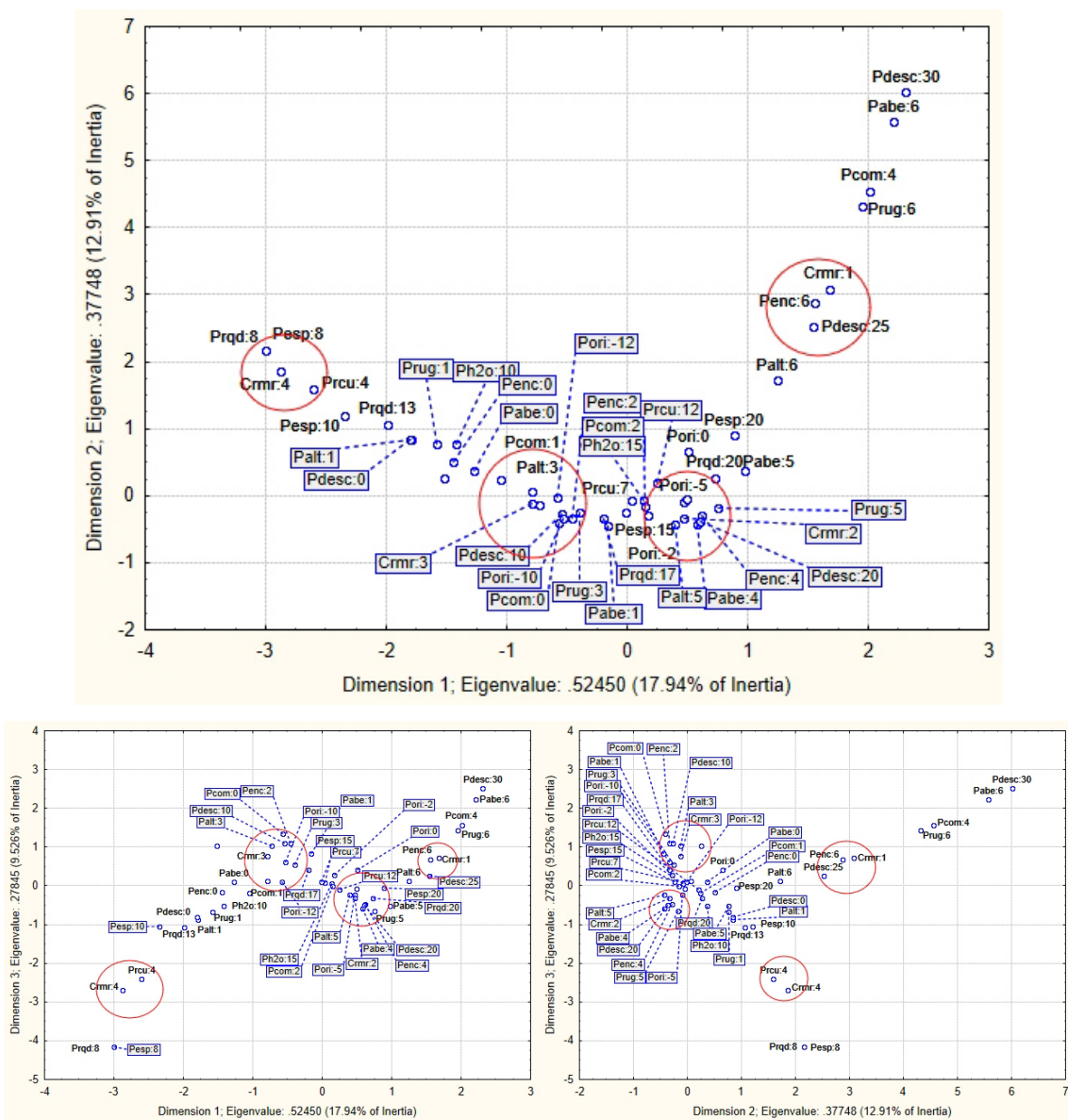


Figura A3.5 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR no caso de estudo do AHA

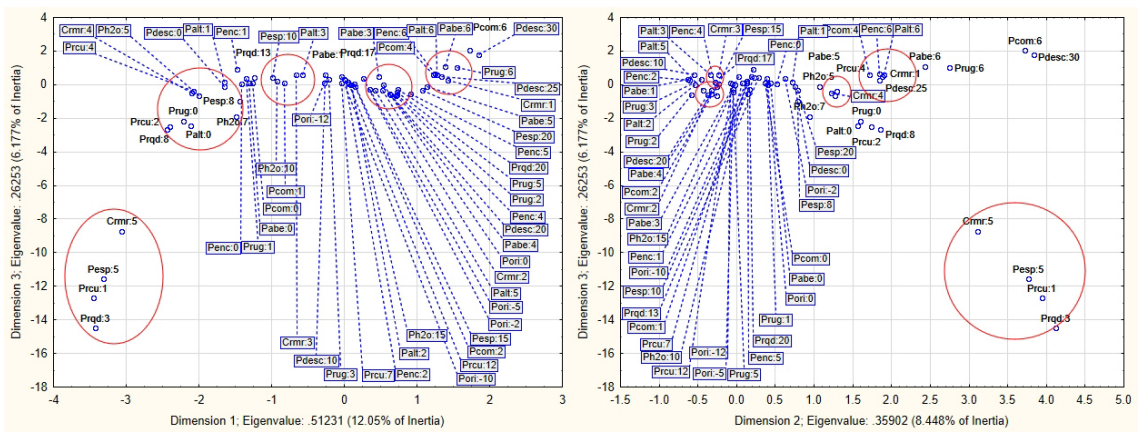
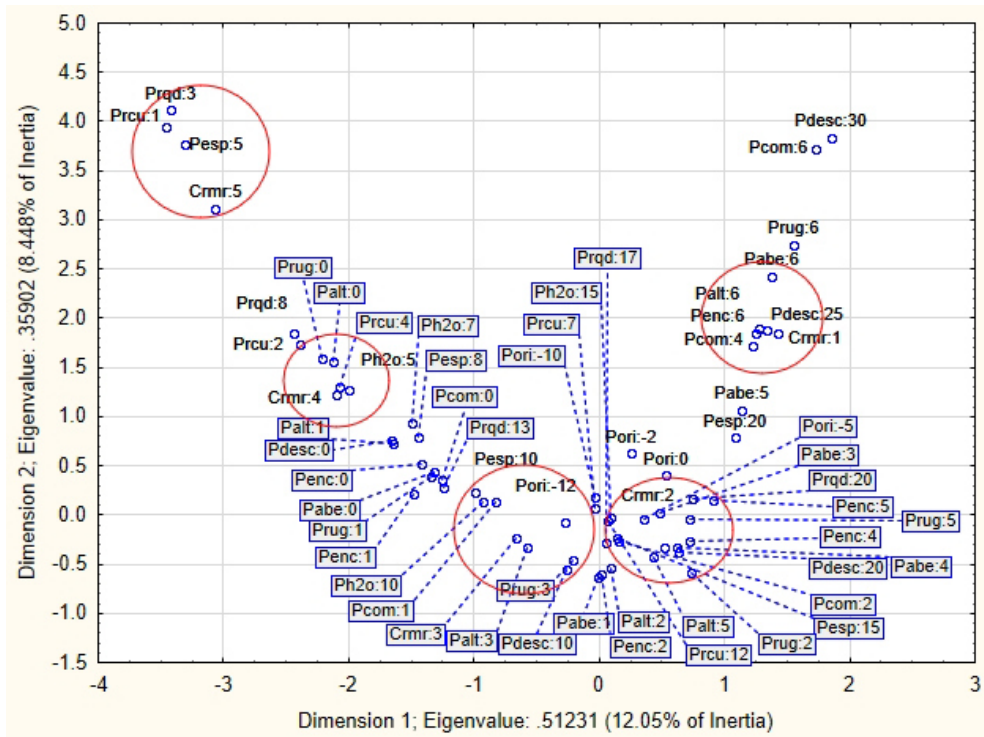


Figura A3.6 - AFC dos parâmetros que servem de base ao cálculo do índice RMR em todos os casos de estudo

APÊNDICE IV

ESTATÍSTICA DA AMPLITUDE DOS SEMIVARIOGRAMAS

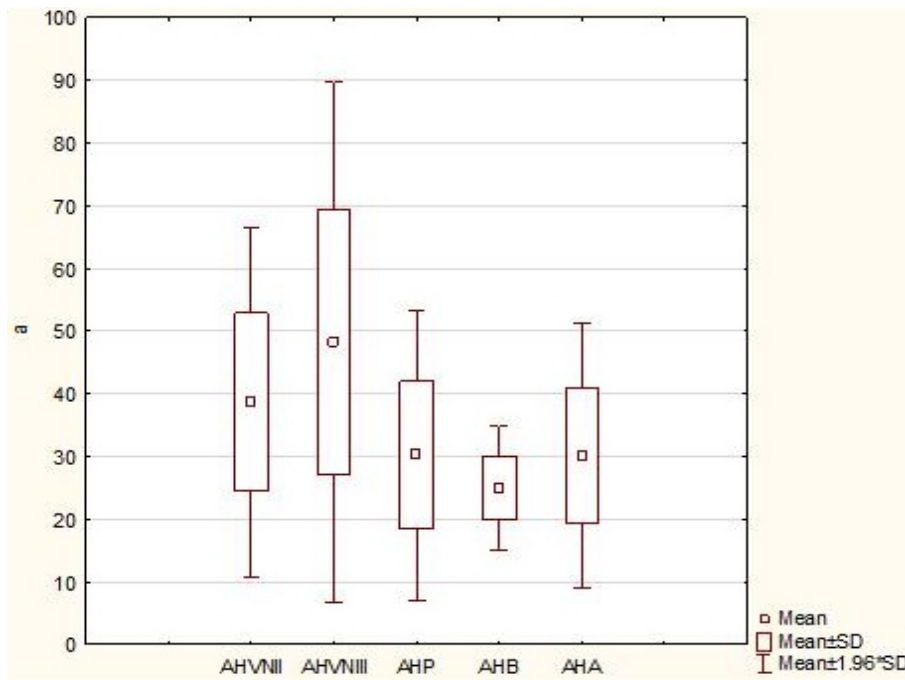


Figura A4.1 – Estatística da amplitude (a) dos semivariogramas nos casos de estudo concluídos

Tabela A4.1 – Estatística descritiva da amplitude (a) dos semivariogramas nos casos de estudo concluídos

	TOTAL	AHVNII	AHVNIII	AHP	AHB	AHA
Número de observações	3647	1036	1786	488	120	217
Média	41	39	48	30	25	30
Desvio padrão	19	14	21	12	5	11
Máximo	124	75	124	60	36	56
Mínimo	3	3	5	6	7	8

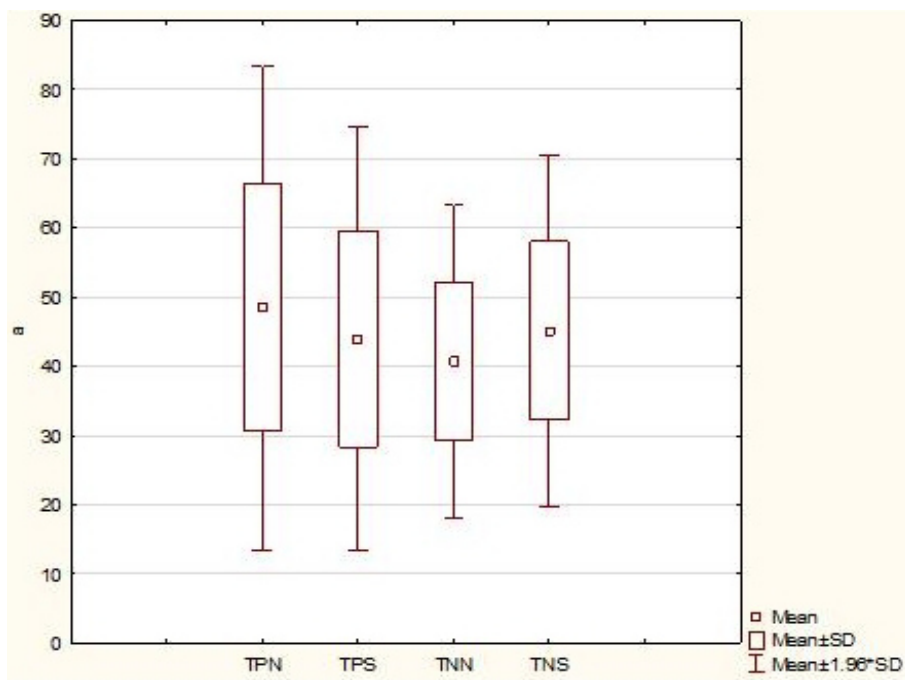


Figura A4.2 - Estatística da amplitude (a) dos semivariogramas verificado nas diferentes frentes de escavação do TM

Tabela A4.2 – Estatística descritiva da amplitude (a) dos semivariogramas nas diferentes frentes de escavação do TM

	TPN	TPS	TNN	TNS
Número de observações	499	508	784	799
Média	48	44	41	45
Desvio padrão	18	16	12	13
Máximo	130	75	123	70
Mínimo	10	5	6	6

APÊNDICE V

CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE RMR OBSERVADO E
ESTIMADO POR DIFERENTE METODOLOGIAS
(TABELAS)

Tabela A5.1 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no AHVNII

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.714	0.716	0.682	0.805	0.733	0.808
RMRregr3	0.714	1.000	0.845	0.632	0.872	0.799	0.887
RMRregr5	0.716	0.845	1.000	0.776	0.882	0.812	0.865
RMRregr10	0.682	0.632	0.776	1.000	0.809	0.762	0.773
RMRkrig	0.805	0.872	0.882	0.809	1.000	0.894	0.949
RMRrn	0.733	0.799	0.812	0.762	0.894	1.000	0.868
RMRexp	0.808	0.887	0.865	0.773	0.949	0.868	1.000

Tabela A5.2 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no AHVNIII

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.860	0.858	0.828	0.900	0.881	0.895
RMRregr3	0.860	1.000	0.925	0.808	0.943	0.865	0.946
RMRregr5	0.858	0.925	1.000	0.891	0.947	0.878	0.925
RMRregr10	0.828	0.808	0.891	1.000	0.905	0.868	0.871
RMRkrig	0.900	0.943	0.947	0.905	1.000	0.930	0.976
RMRrn	0.881	0.865	0.878	0.868	0.930	1.000	0.912
RMRexp	0.895	0.946	0.925	0.871	0.976	0.912	1.000

Tabela A5.3 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no AHP

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.811	0.852	0.803	0.879	0.792	0.823
RMRregr3	0.811	1.000	0.897	0.778	0.913	0.680	0.878
RMRregr5	0.852	0.897	1.000	0.876	0.934	0.746	0.871
RMRregr10	0.803	0.778	0.876	1.000	0.882	0.782	0.785
RMRkrig	0.879	0.913	0.934	0.882	1.000	0.832	0.912
RMRrn	0.792	0.680	0.746	0.782	0.832	1.000	0.722
RMRexp	0.823	0.878	0.871	0.785	0.912	0.722	1.000

Tabela A5.4 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no AHB

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.580	0.575	0.585	0.610	0.541	0.623
RMRregr3	0.580	1.000	0.812	0.627	0.875	0.647	0.872
RMRregr5	0.575	0.812	1.000	0.781	0.870	0.681	0.821
RMRregr10	0.585	0.627	0.781	1.000	0.761	0.716	0.746
RMRkrig	0.610	0.875	0.870	0.761	1.000	0.788	0.910
RMRrn	0.541	0.647	0.681	0.716	0.788	1.000	0.710
RMRexp	0.623	0.872	0.821	0.746	0.910	0.710	1.000

Tabela A5.5 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no AHA

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.814	0.837	0.805	0.878	0.795	0.875
RMRregr3	0.814	1.000	0.884	0.774	0.924	0.769	0.941
RMRregr5	0.837	0.884	1.000	0.891	0.924	0.820	0.906
RMRregr10	0.805	0.774	0.891	1.000	0.889	0.794	0.853
RMRkrig	0.878	0.924	0.924	0.889	1.000	0.874	0.966
RMRrn	0.795	0.769	0.820	0.794	0.874	1.000	0.837
RMRexp	0.875	0.941	0.906	0.853	0.966	0.837	1.000

Tabela A5.6 - Correlação entre valores de RMR observado e estimado por cada um dos métodos no conjunto de todos os casos de estudo

	RMRobs	RMRregr3	RMRregr5	RMRregr10	RMRkrig	RMRrn	RMRexp
RMRobs	1.000	0.805	0.812	0.782	0.869	0.825	0.861
RMRregr3	0.805	1.000	0.893	0.747	0.915	0.821	0.919
RMRregr5	0.812	0.893	1.000	0.854	0.924	0.842	0.900
RMRregr10	0.782	0.747	0.854	1.000	0.874	0.826	0.834
RMRkrig	0.869	0.915	0.924	0.874	1.000	0.909	0.962
RMRrn	0.825	0.821	0.842	0.826	0.909	1.000	0.878
RMRexp	0.861	0.919	0.900	0.834	0.962	0.878	1.000

APÊNDICE VI

CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE RMR OBSERVADO E
ESTIMADO POR DIFERENTE METODOLOGIAS
(GRÁFICOS)

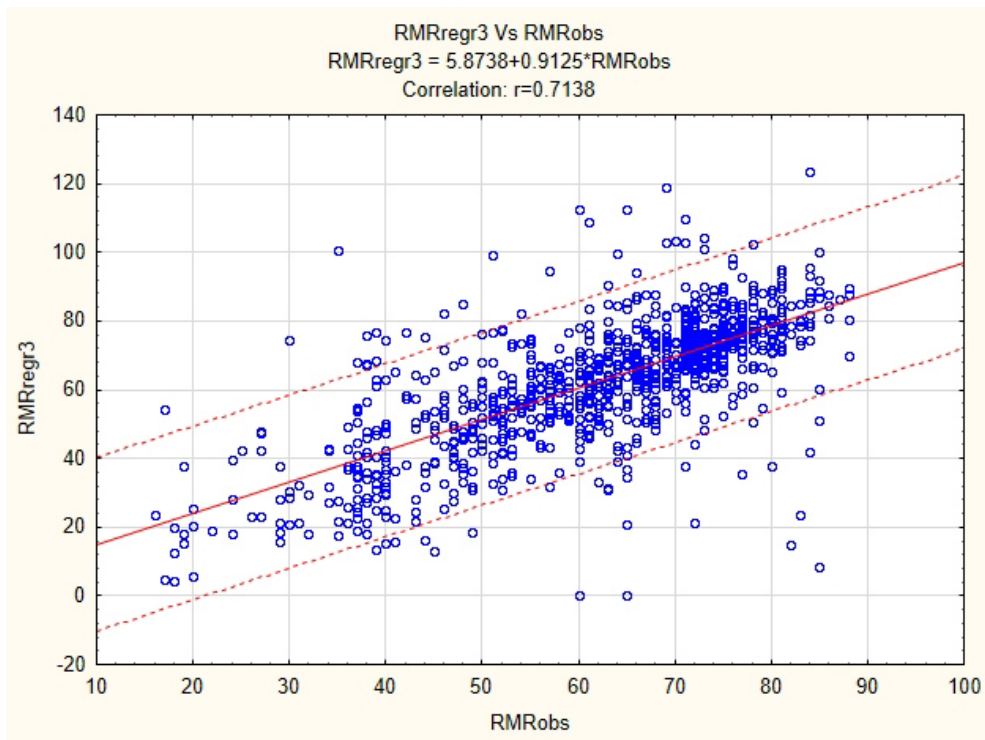


Figura A6.1 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

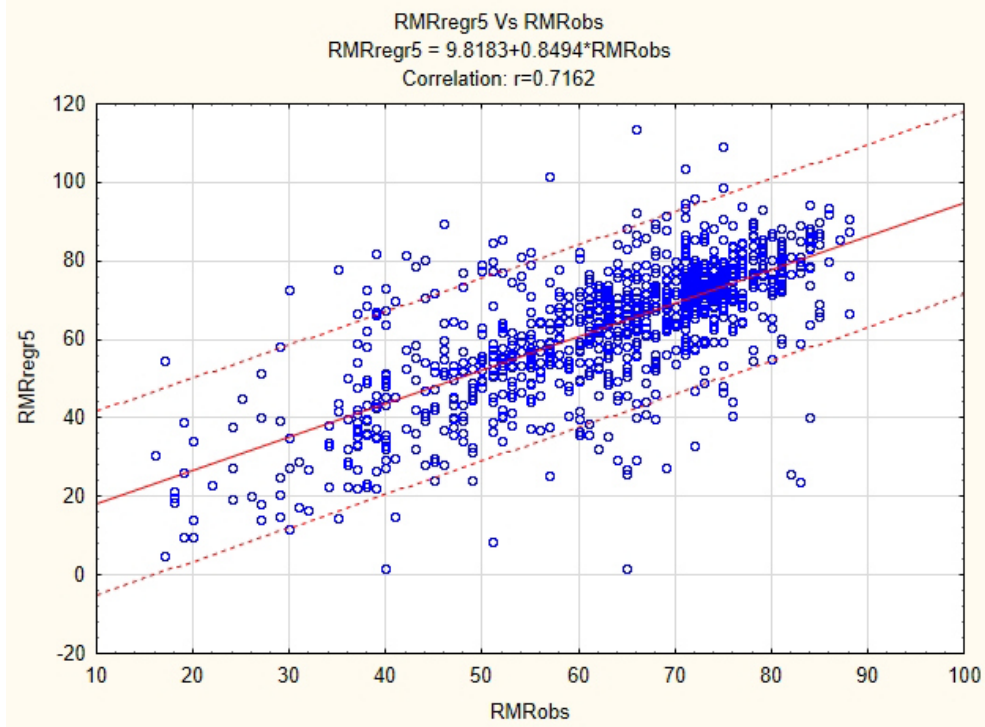


Figura A6.2 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

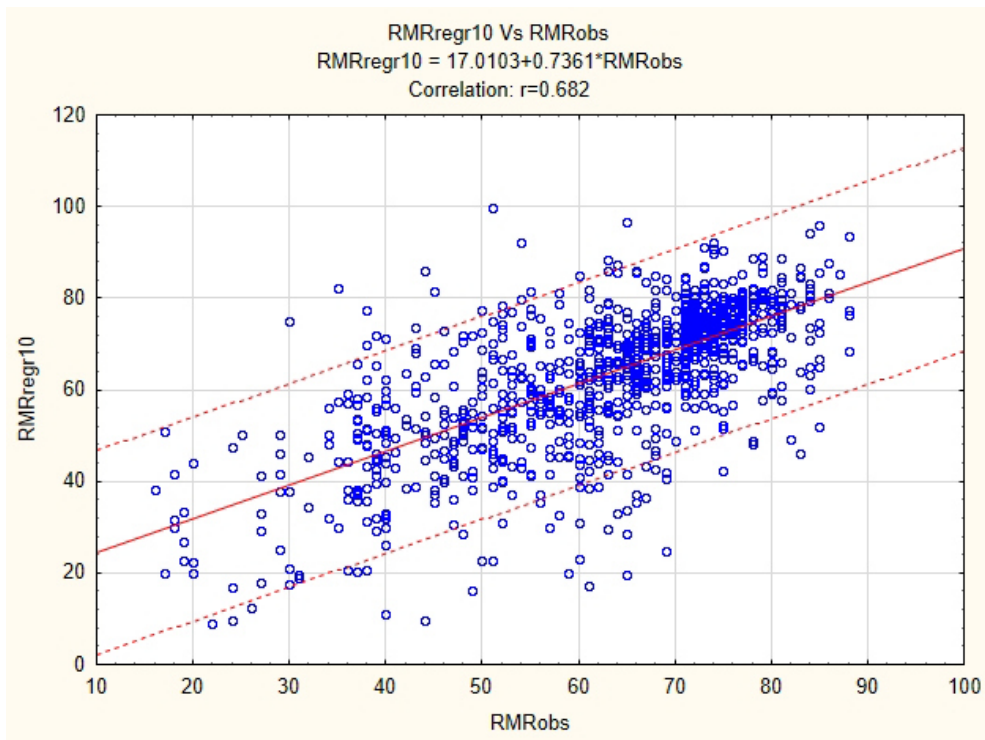


Figura A6.3 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

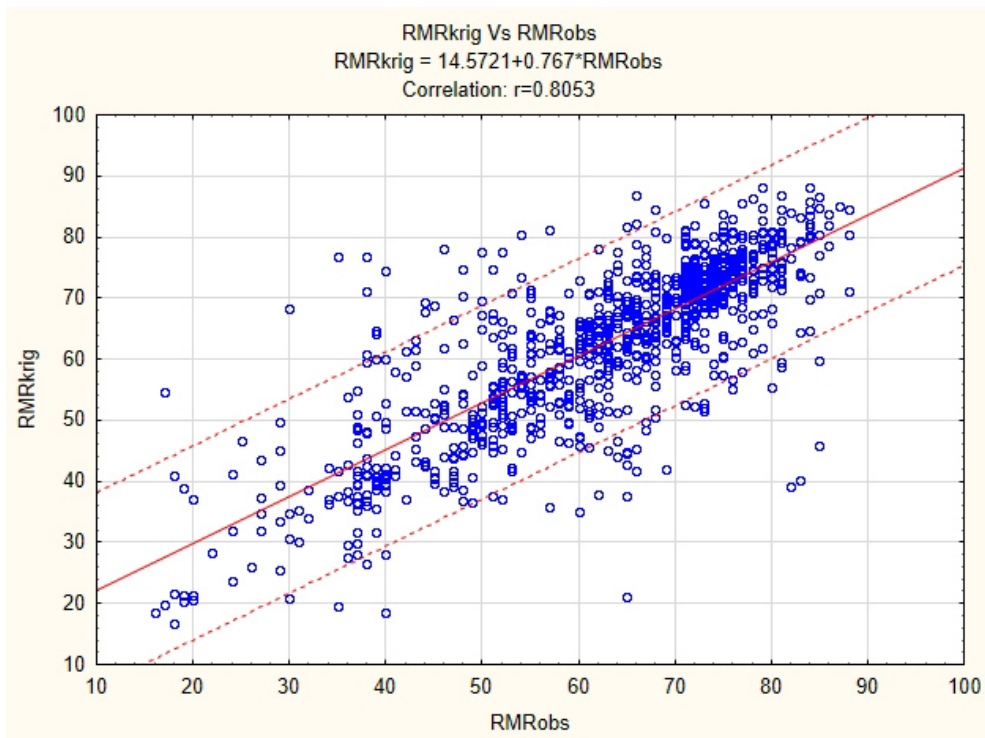


Figura A6.4 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado por krigagem

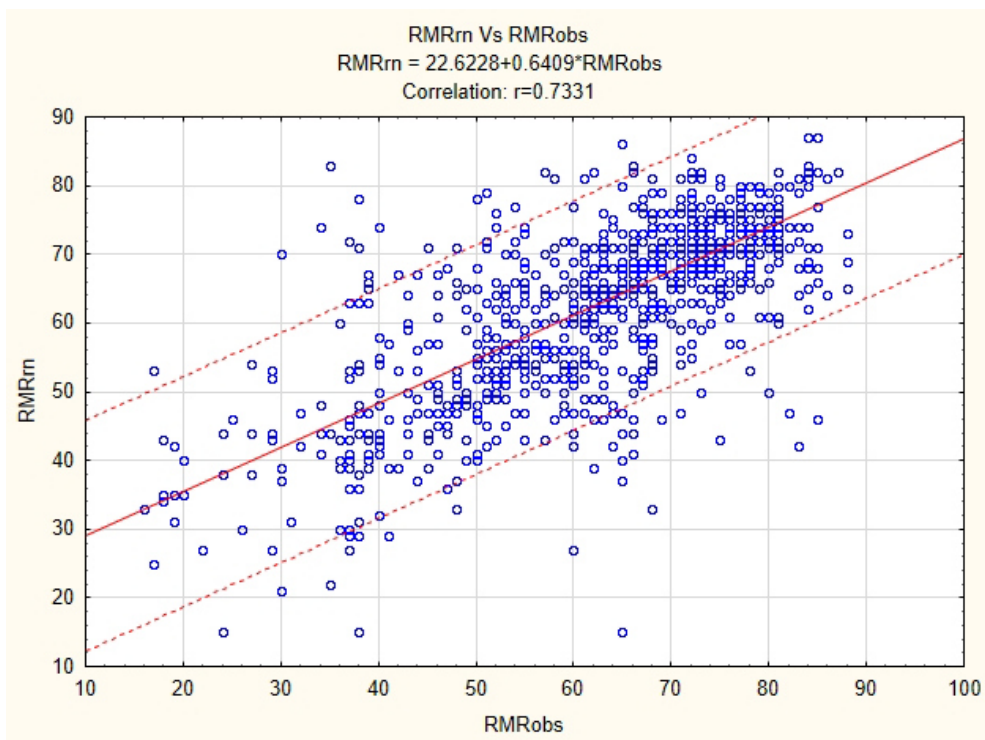


Figura A6.5 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

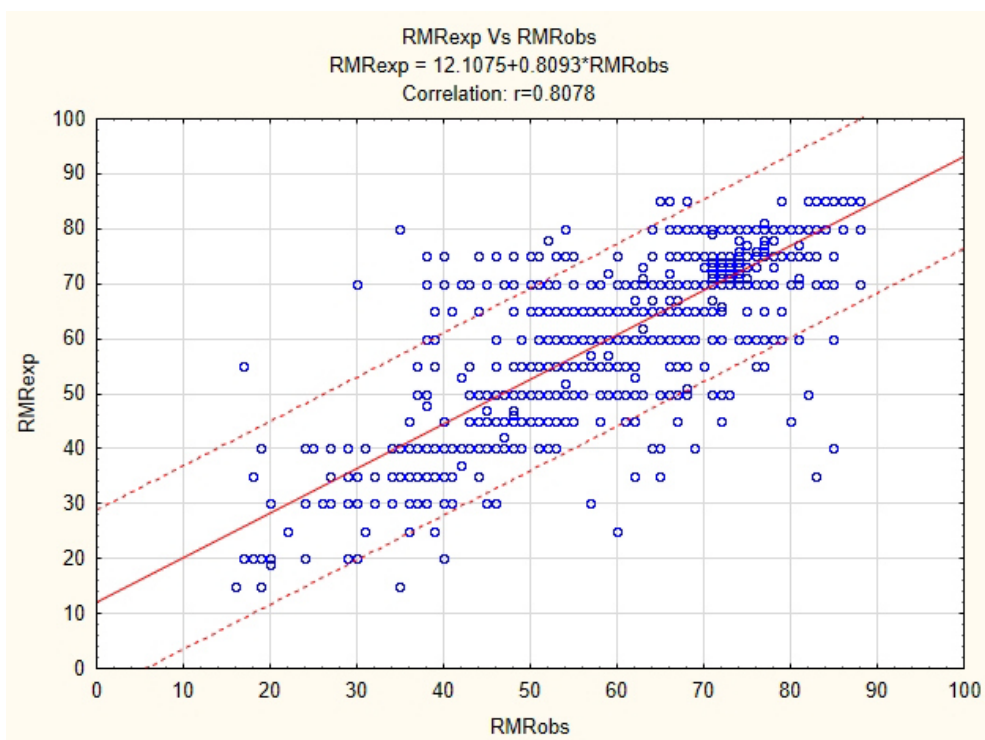


Figura A6.6 – AHVNII: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por um especialista

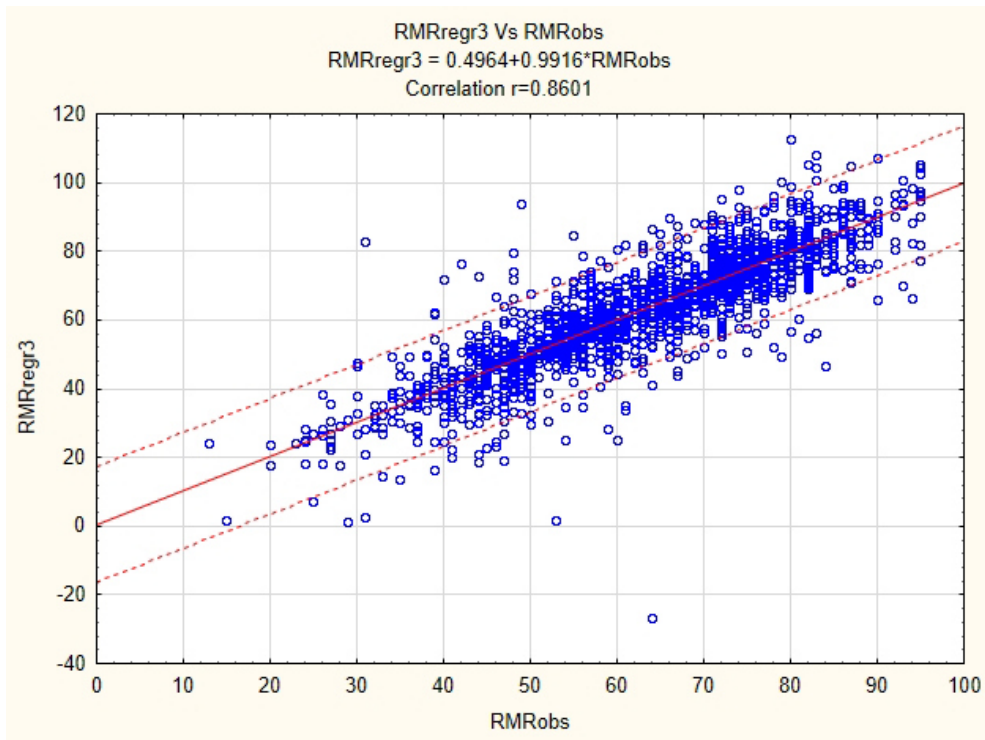


Figura A6.7 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

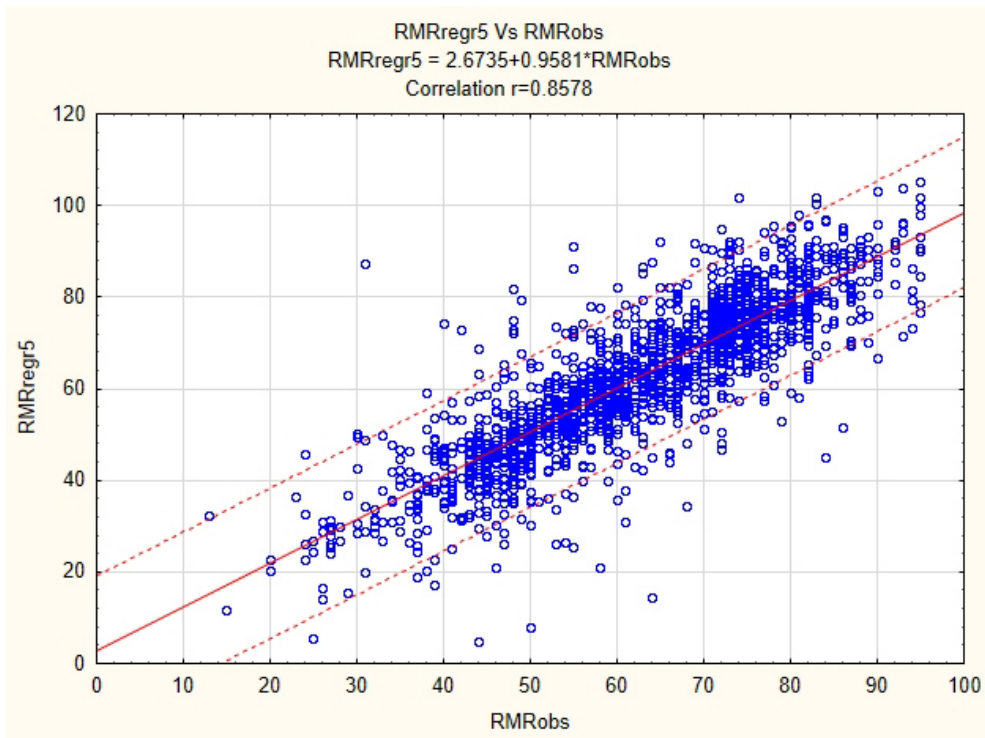


Figura A6.8 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

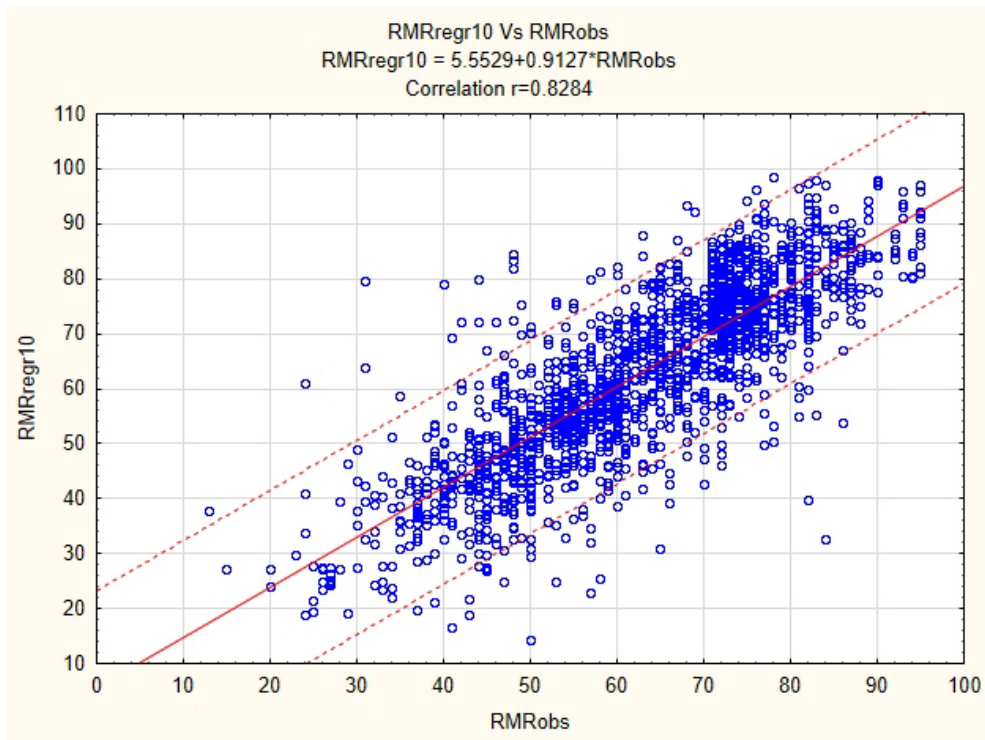


Figura A6.9 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

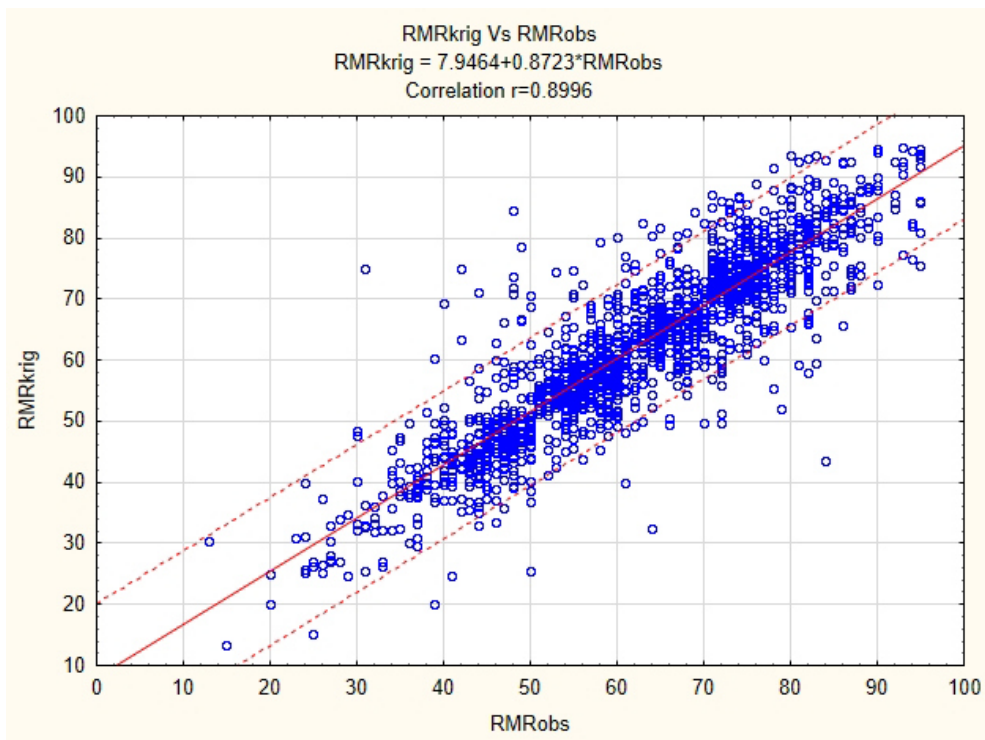


Figura A6.10 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado por krigagem

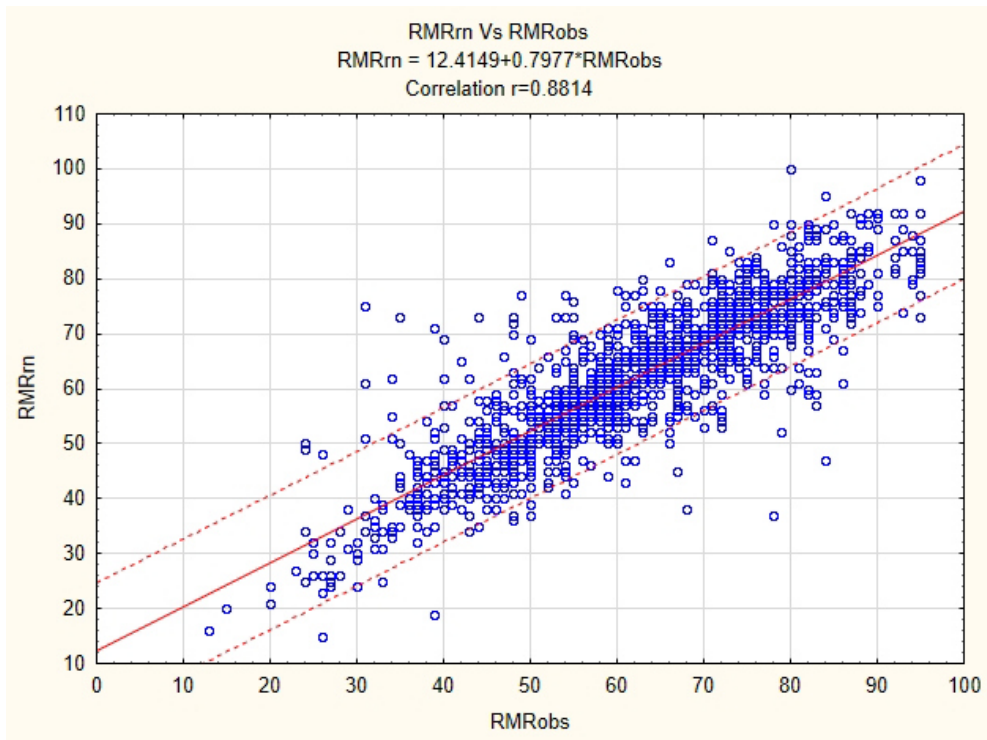


Figura A6.11 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

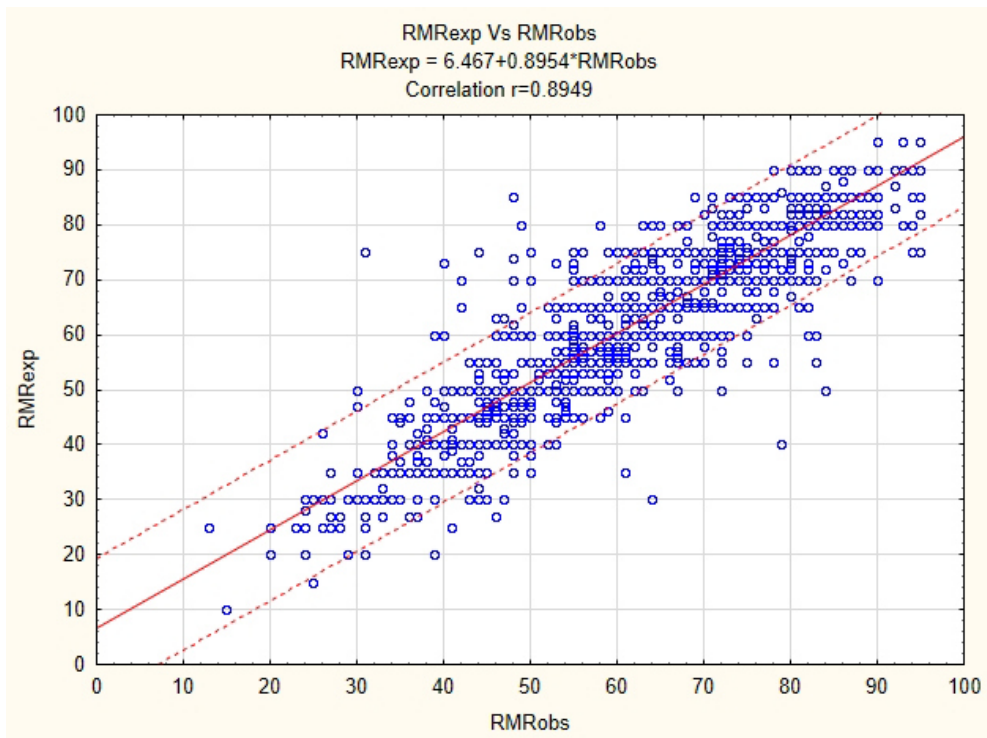


Figura A6.12 – AHVNIII: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por um especialista

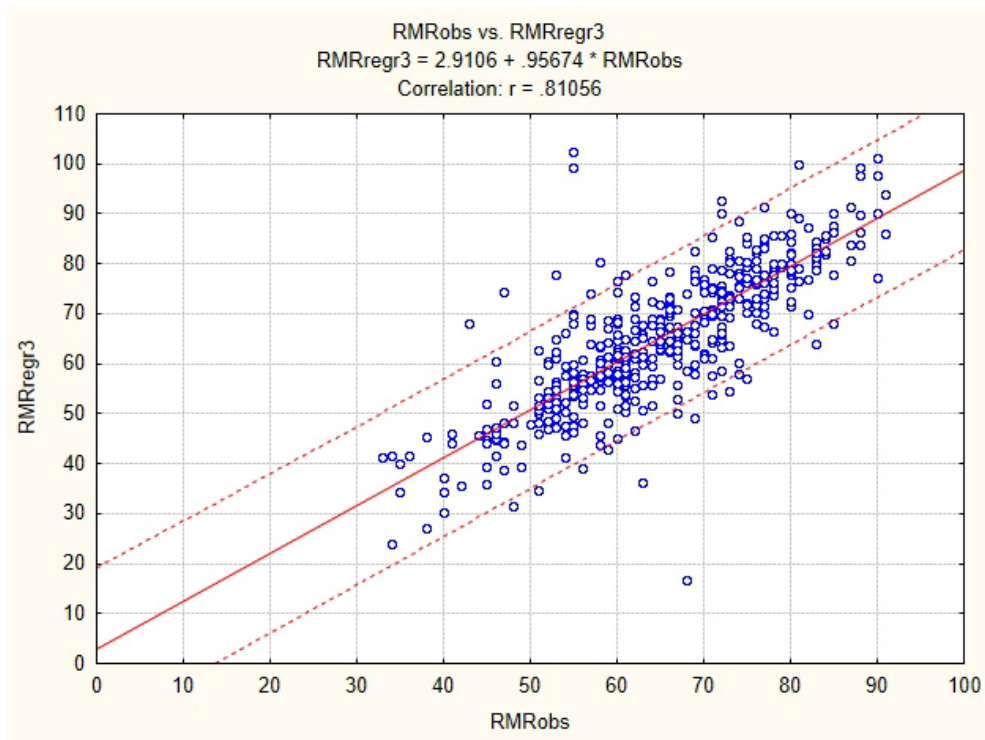


Figura A6.13 – AHP: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

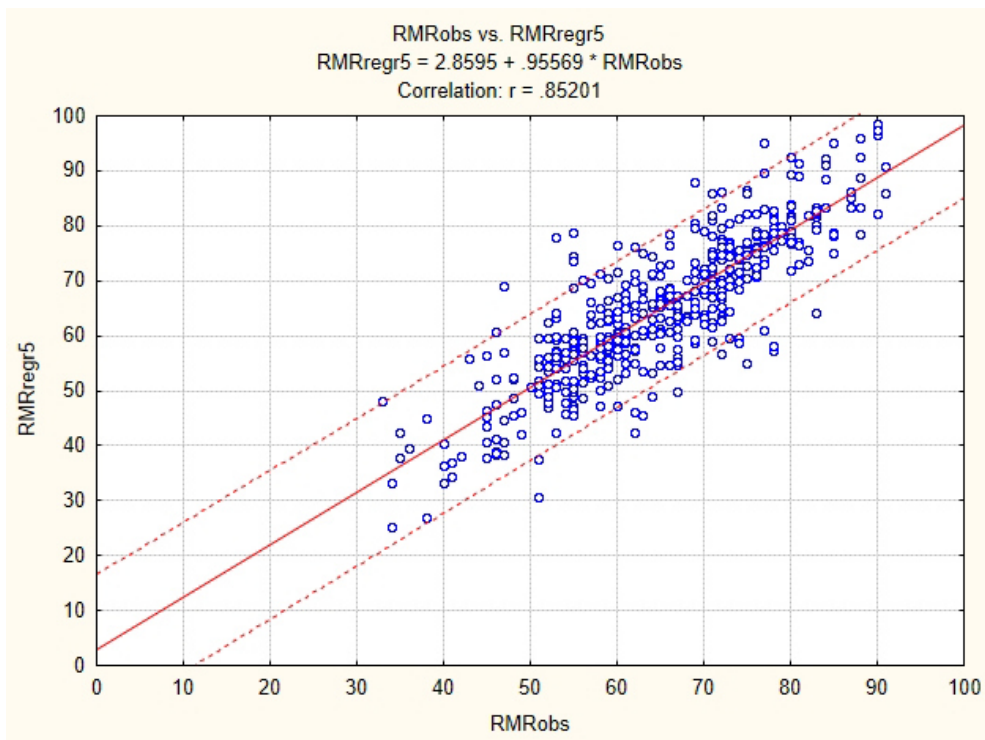


Figura A6.14 – AHP: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

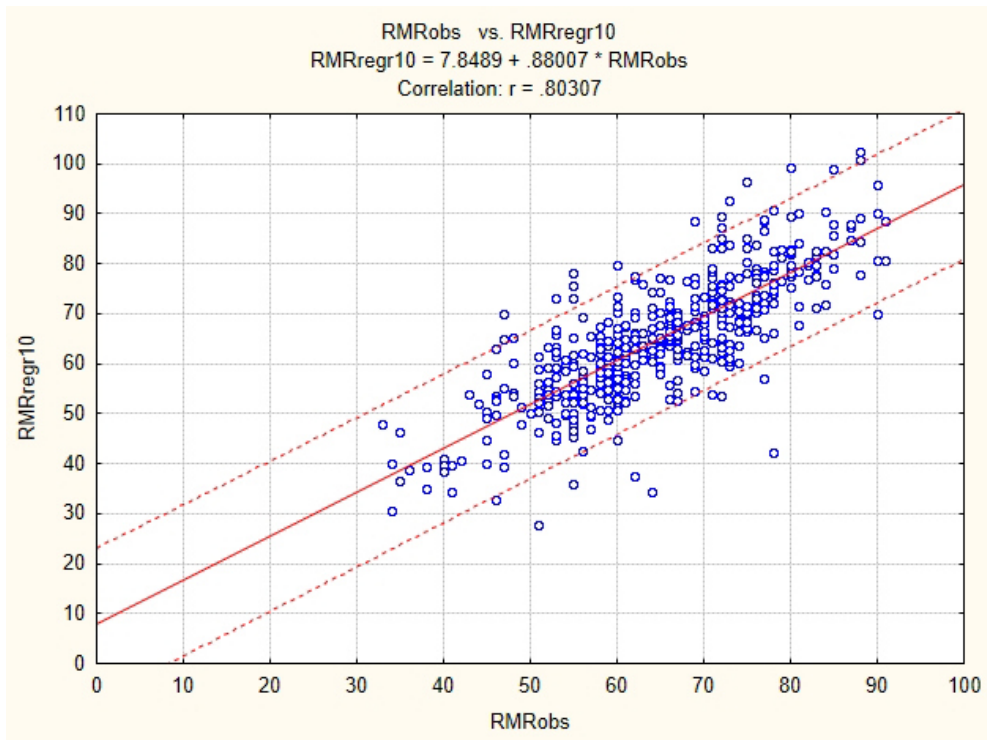


Figura A6.15 – AHP: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

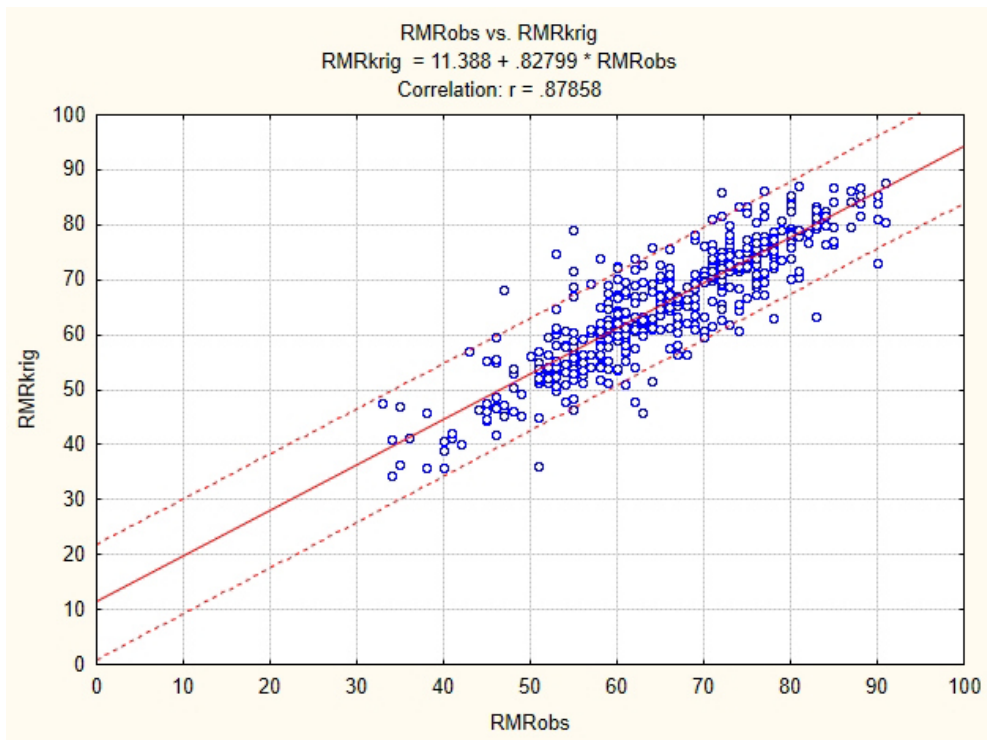


Figura A6.16 – AHP: correlação RMR observado e estimado por krigagem

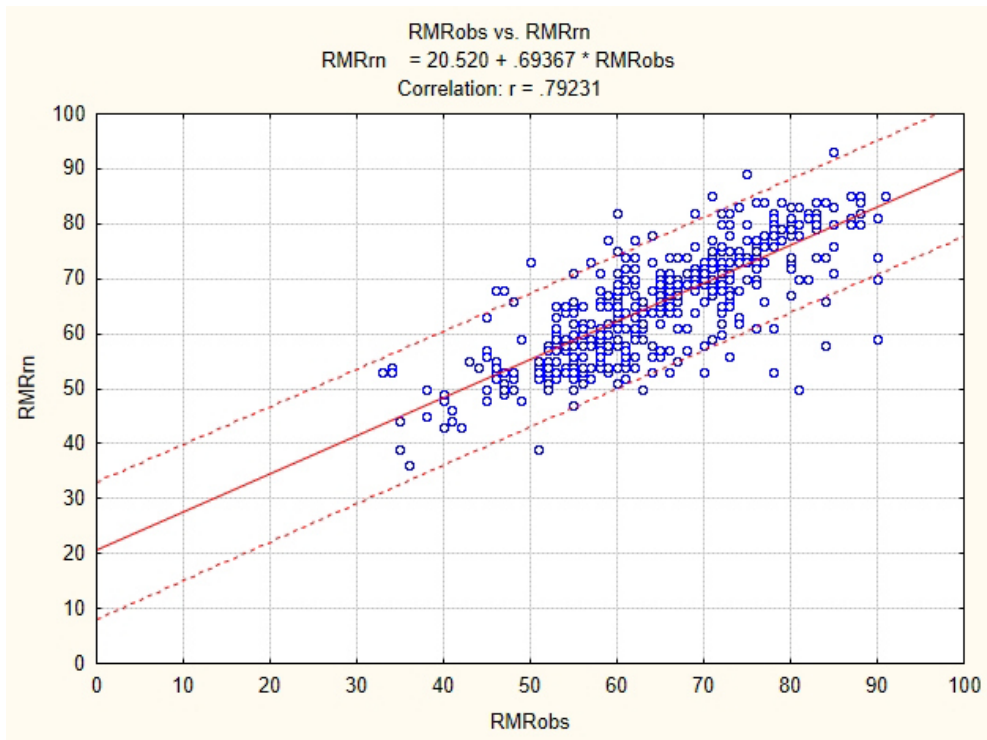


Figura A6.17 – AHP: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

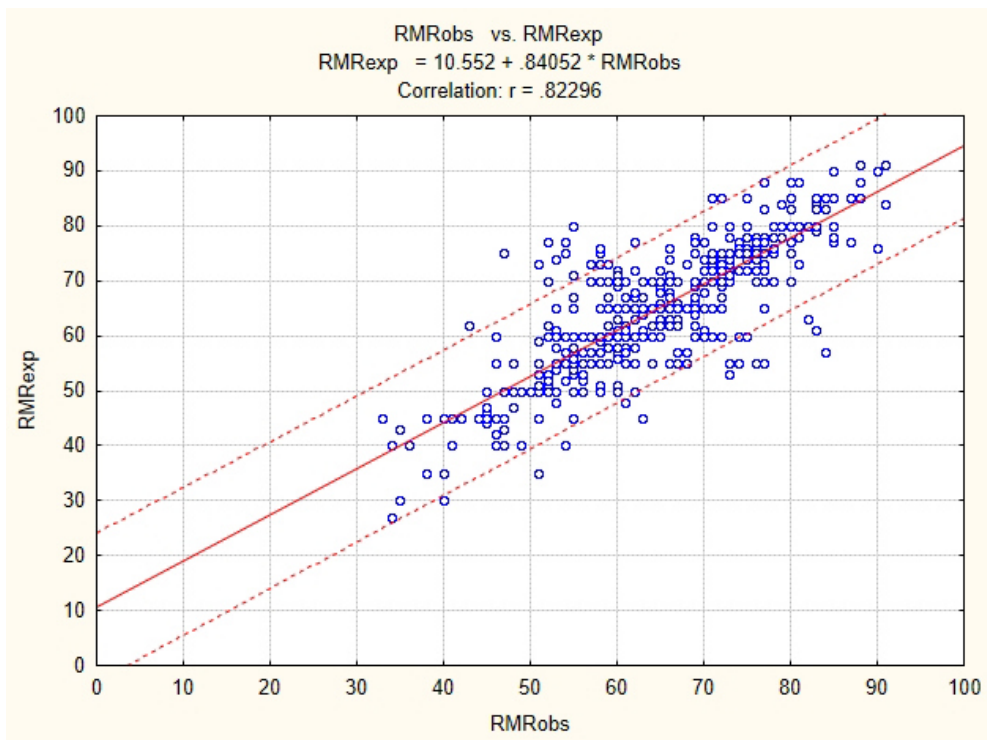


Figura A6.18 – AHP: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por especialista

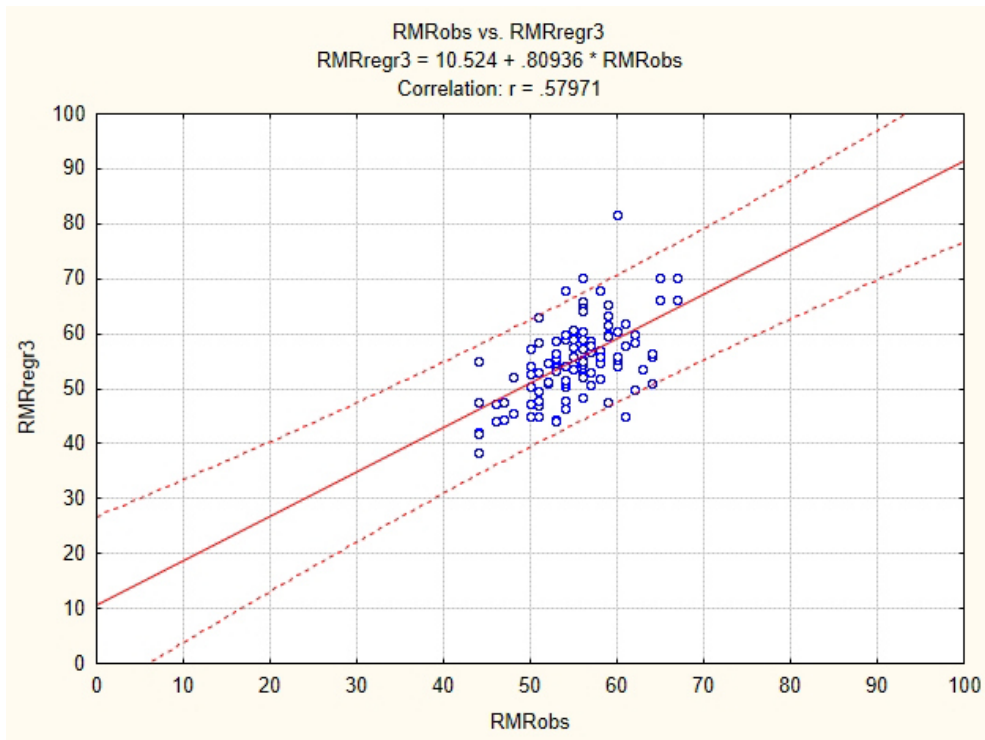


Figura A6.19 – AHB: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

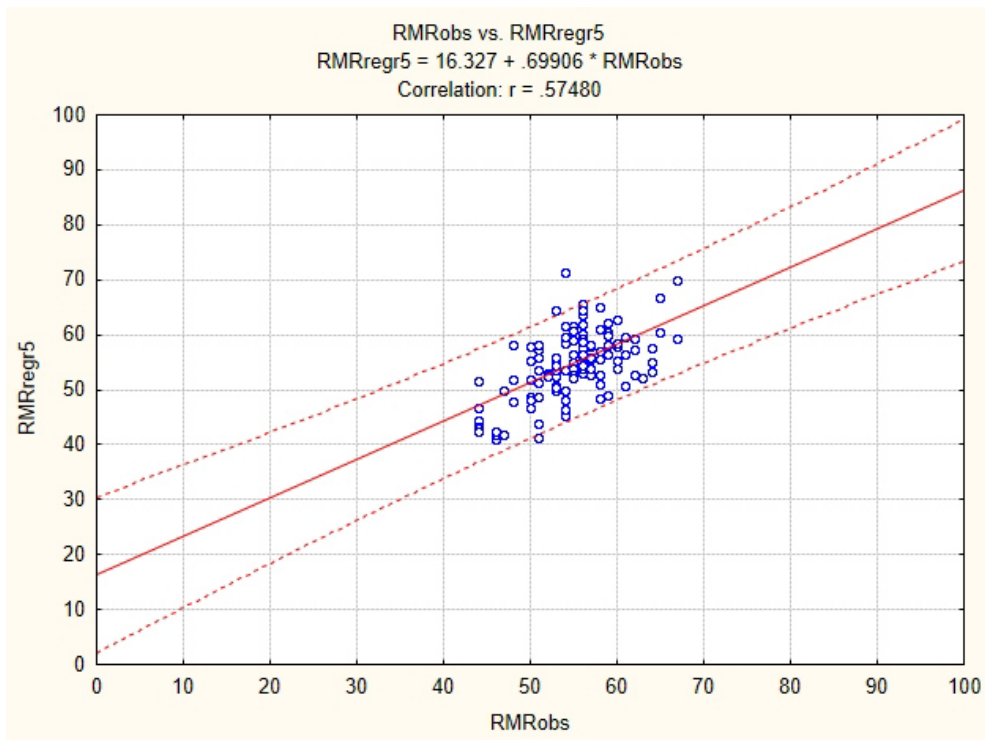


Figura A6.20 – AHB: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

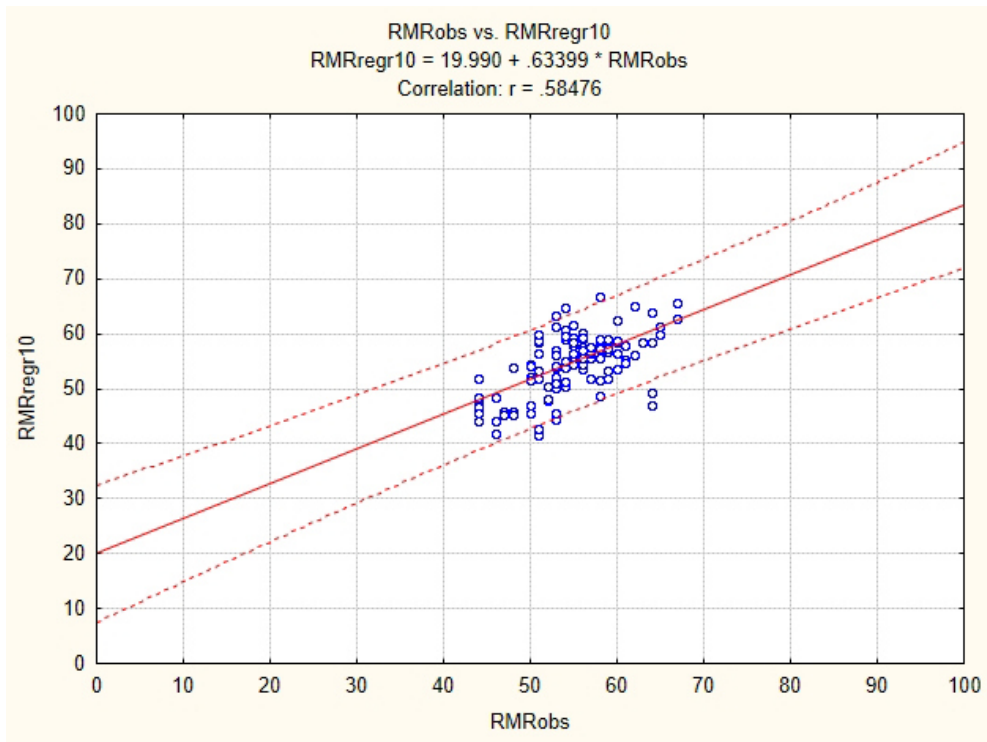


Figura A6.21 – AHB: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

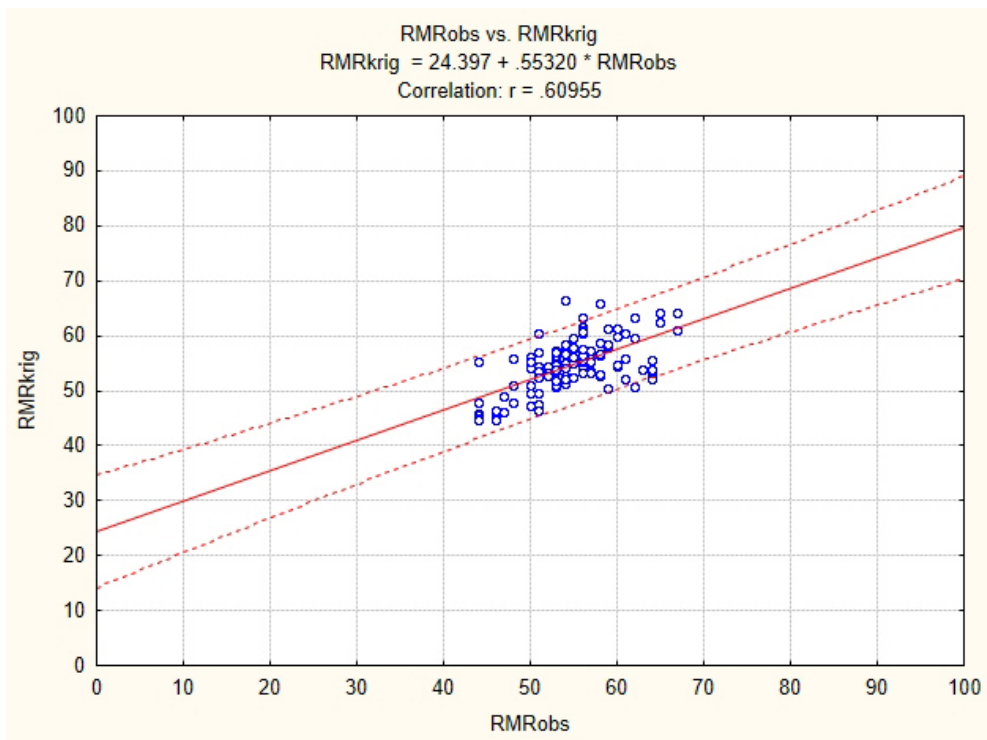


Figura A6.22 – AHB: correlação RMR observado e estimado por krigagem

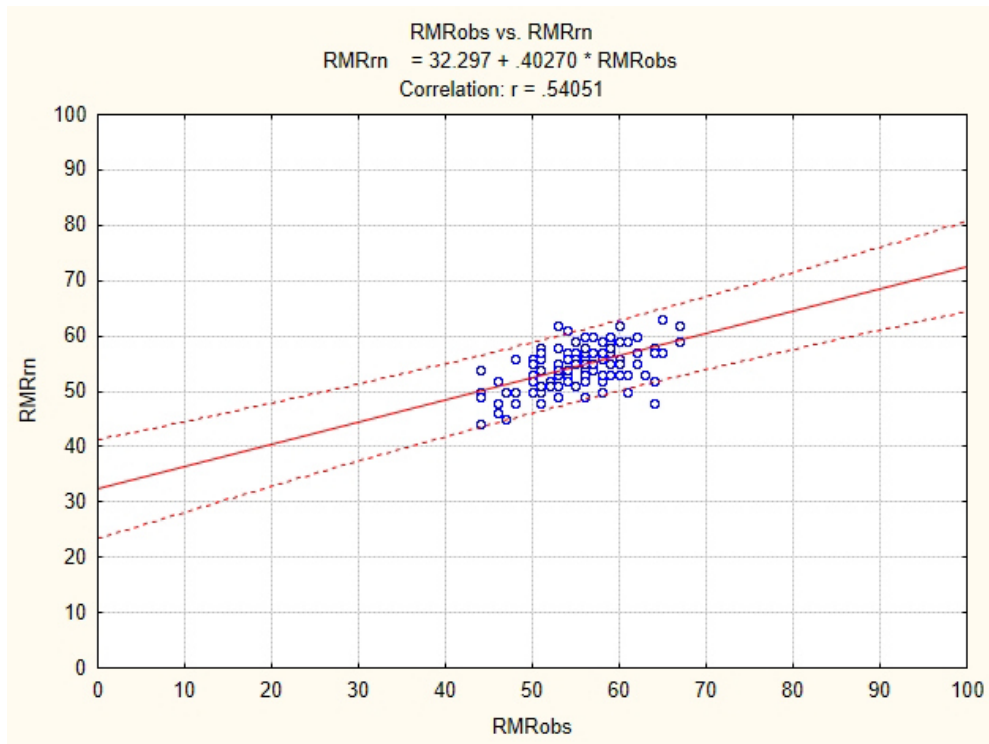


Figura A6.23 – AHB: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

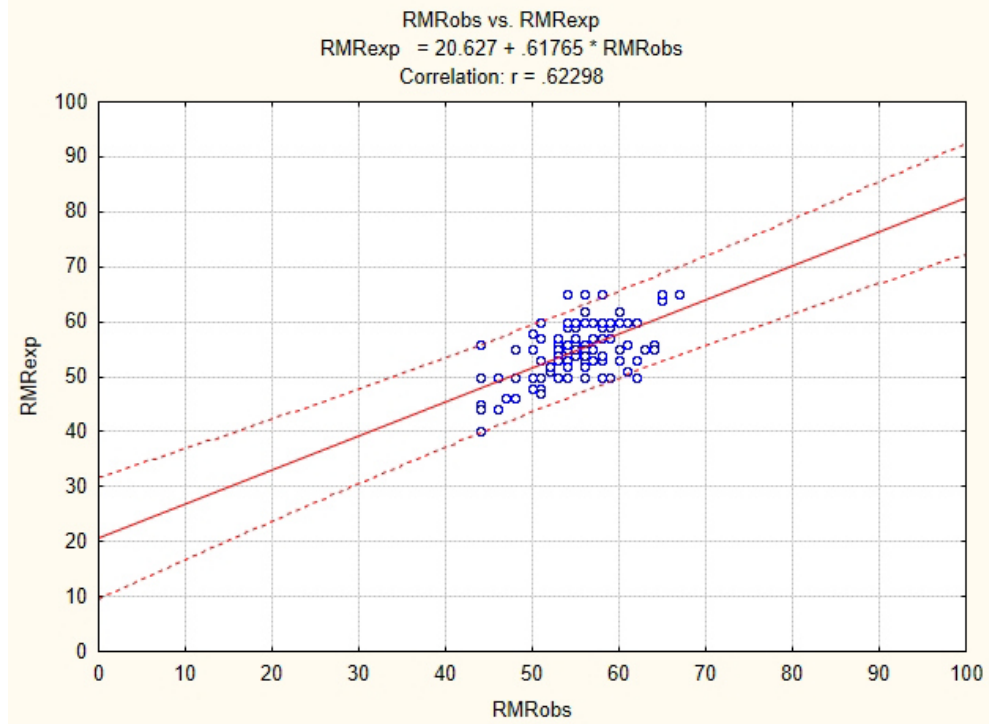


Figura A6.24 – AHB: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por especialista

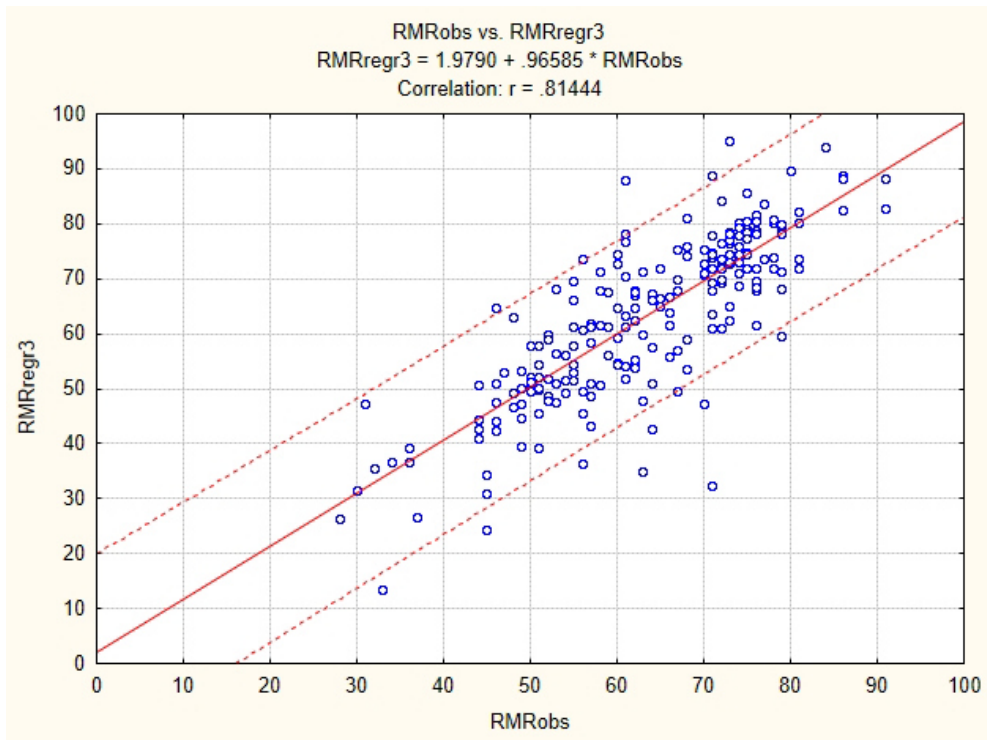


Figura A6.25 – AHA: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

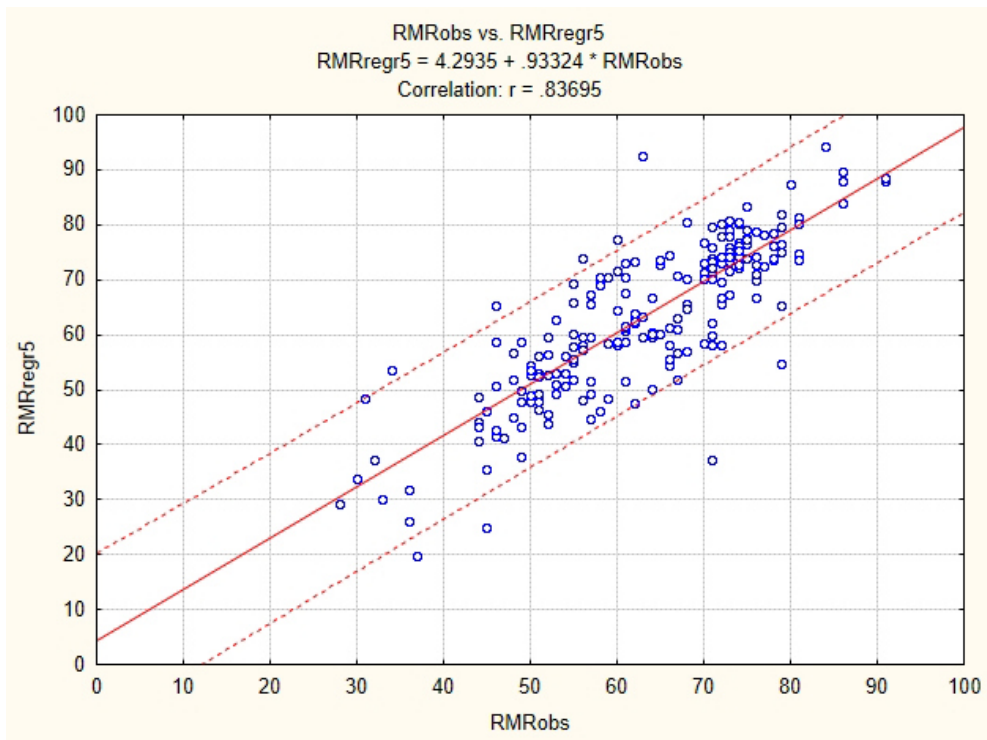


Figura A6.26 – AHA: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

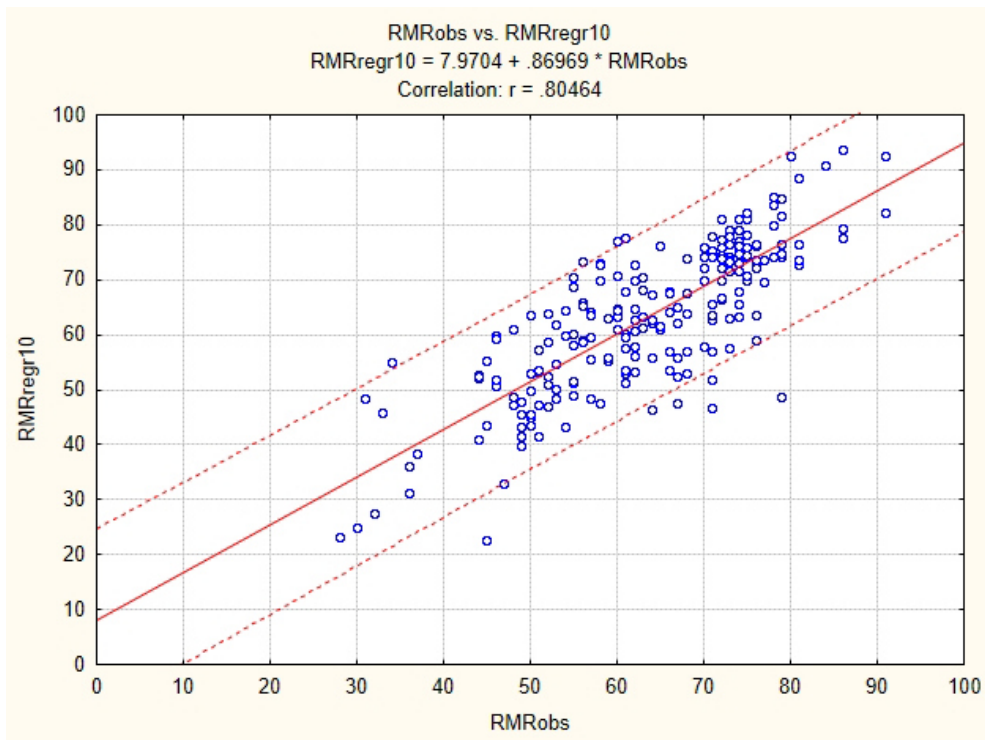


Figura A6.27 – AHA: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

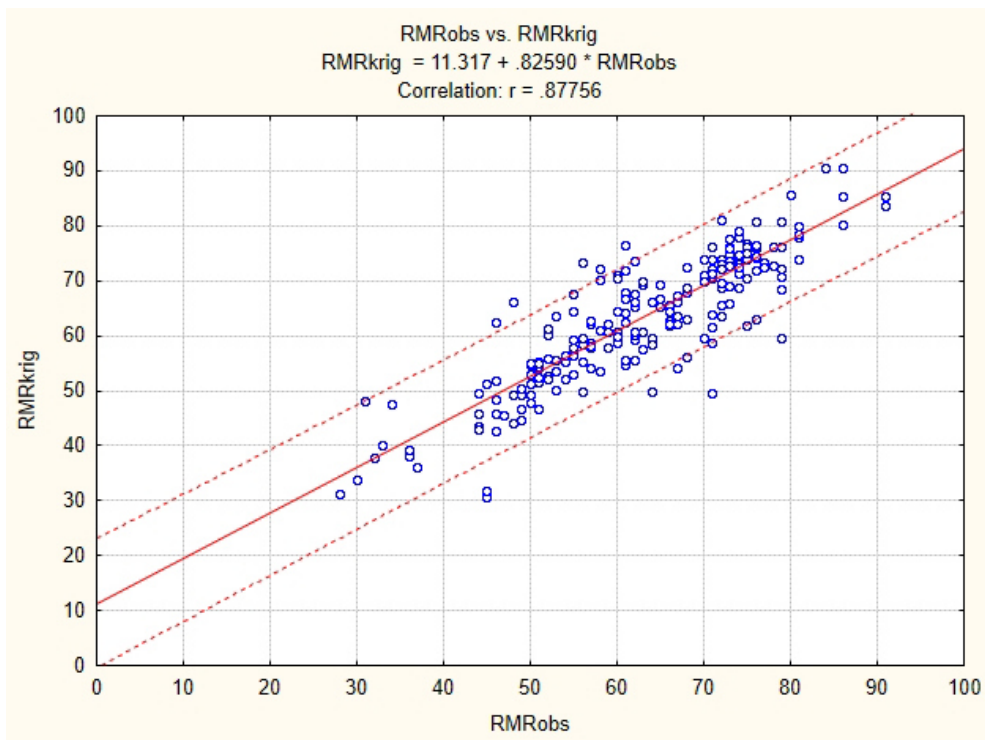


Figura A6.28 – AHA: correlação RMR observado e estimado por krigagem

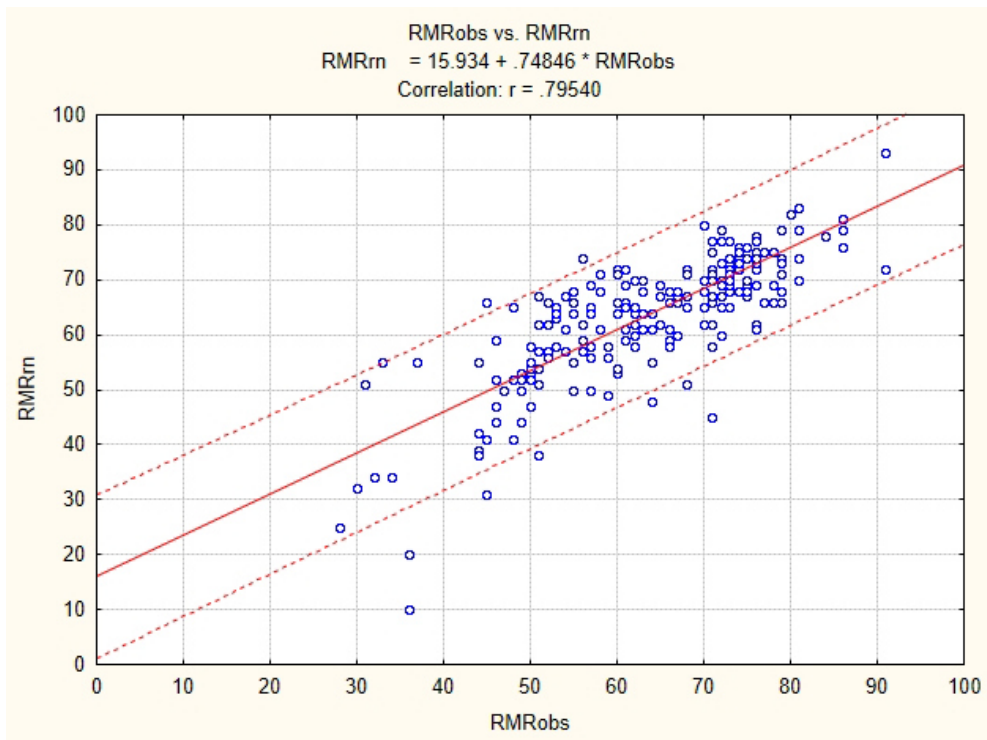


Figura A6.29 – AHA: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

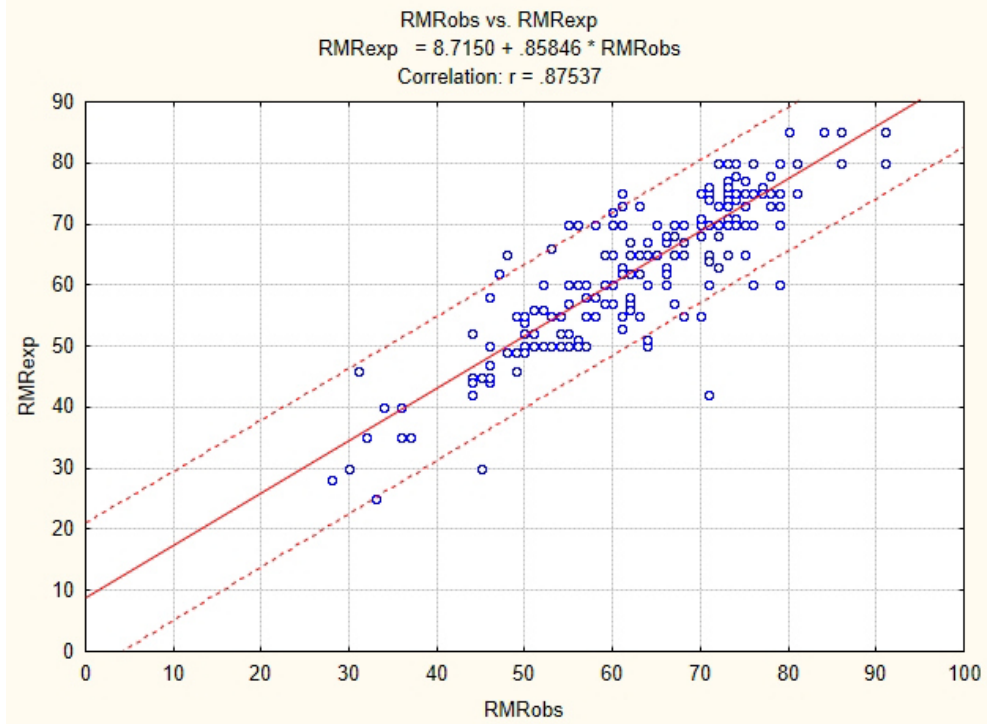


Figura A6.30 – AHA: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por especialista

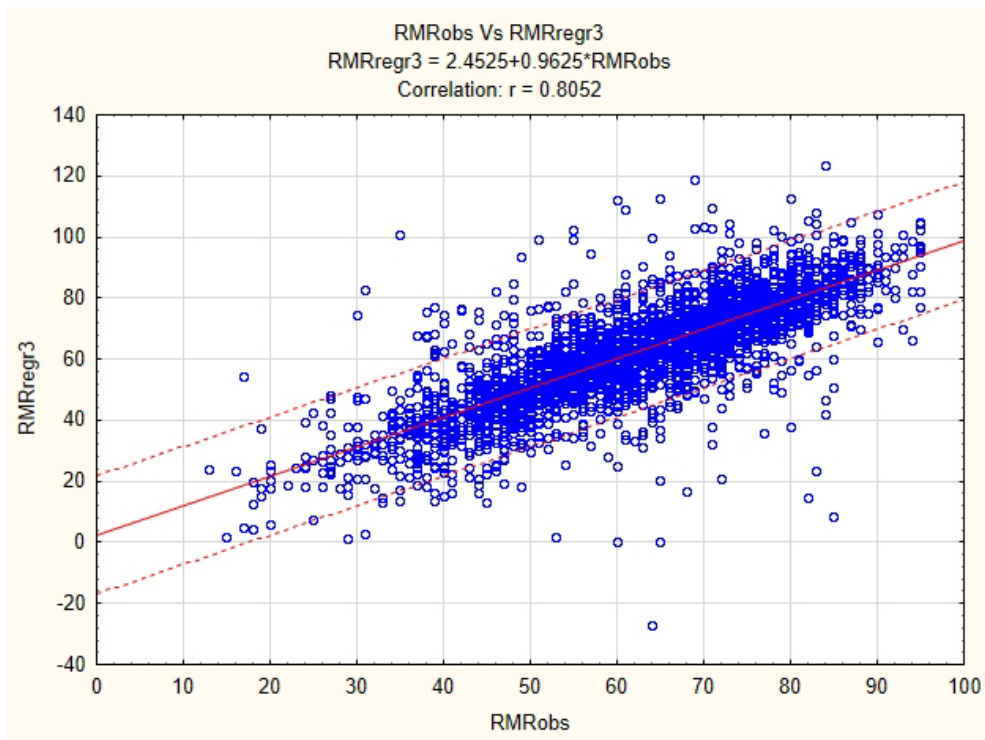


Figura A6.31 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 3 valores

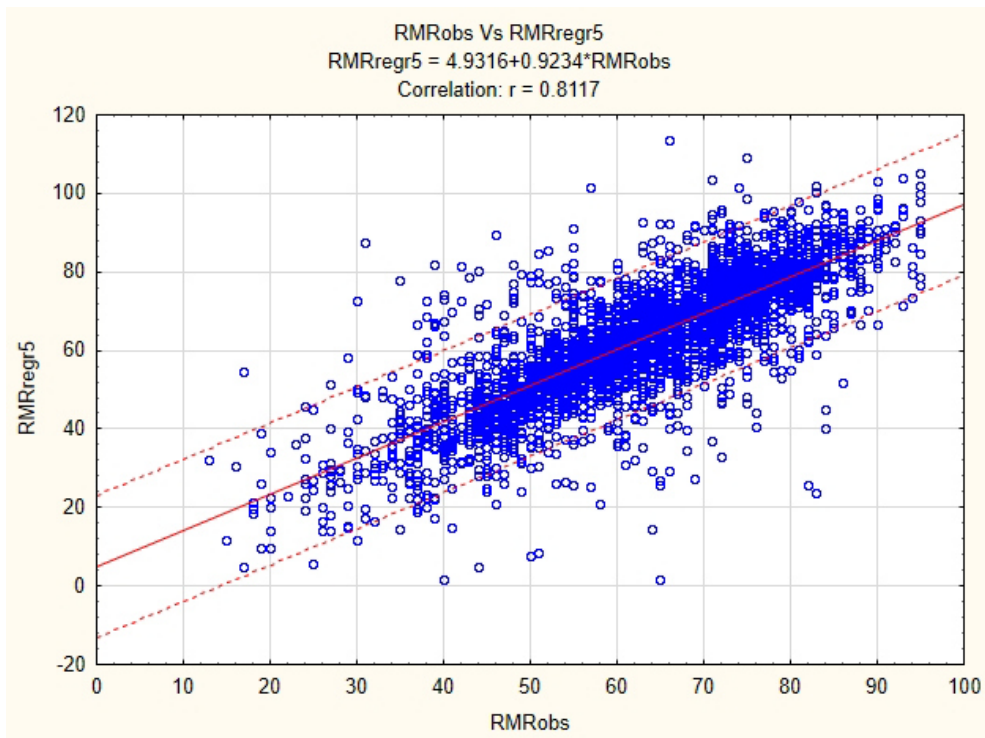


Figura A6.32 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 5 valores

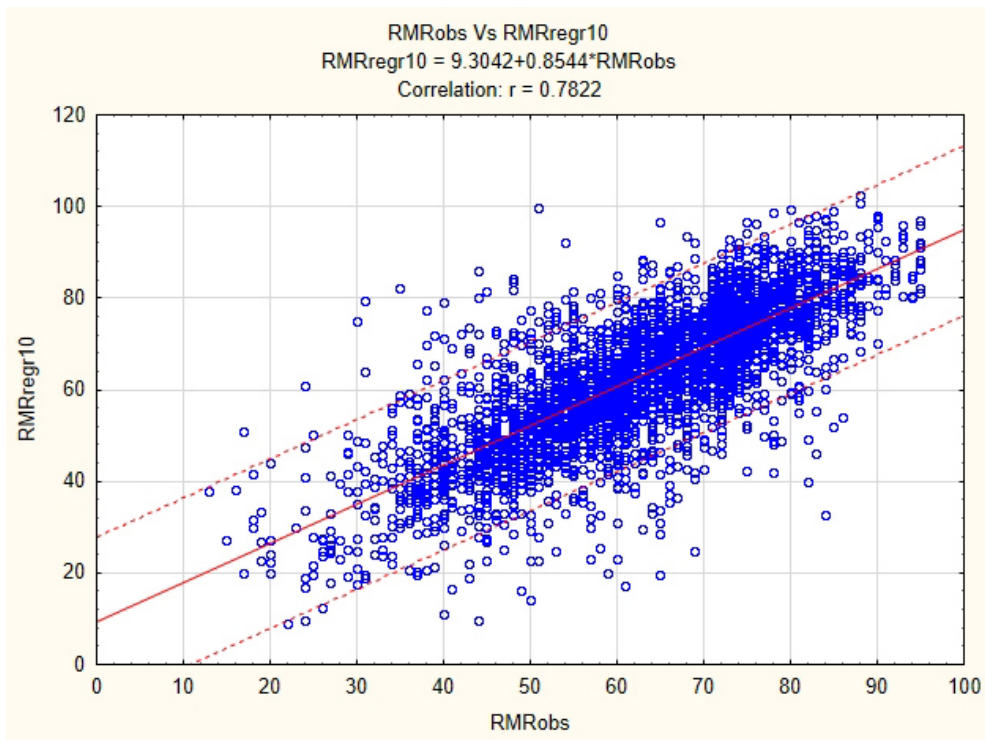


Figura A6.33 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado por regressão com base nos últimos 10 valores

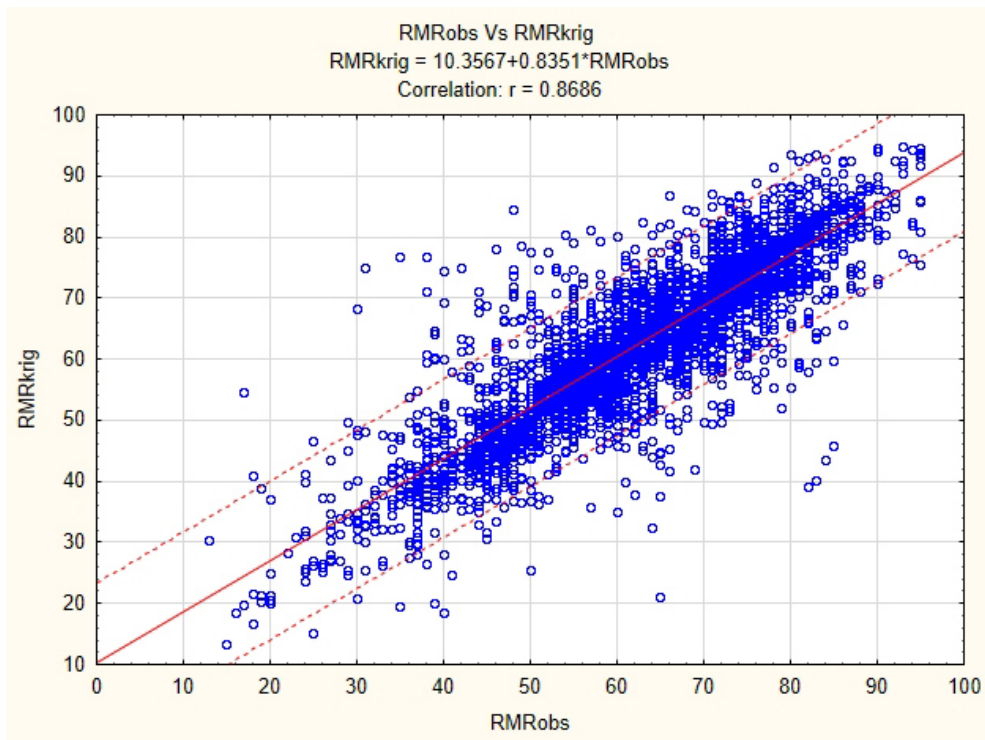


Figura A6.34 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado por krigagem

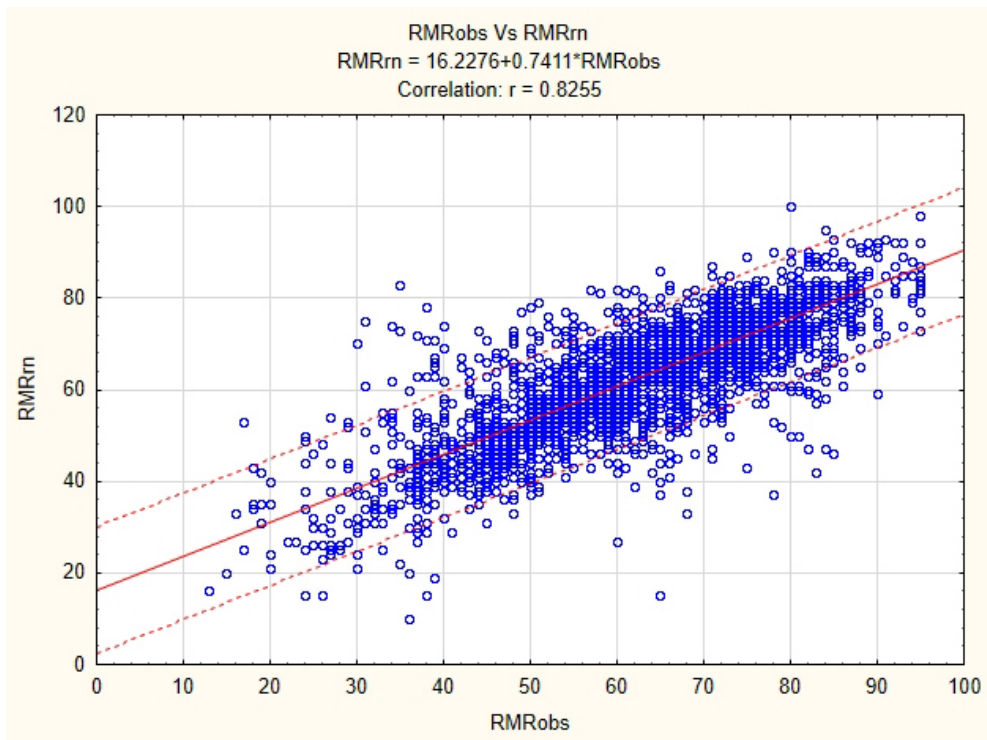


Figura A6.35 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado por redes neurais

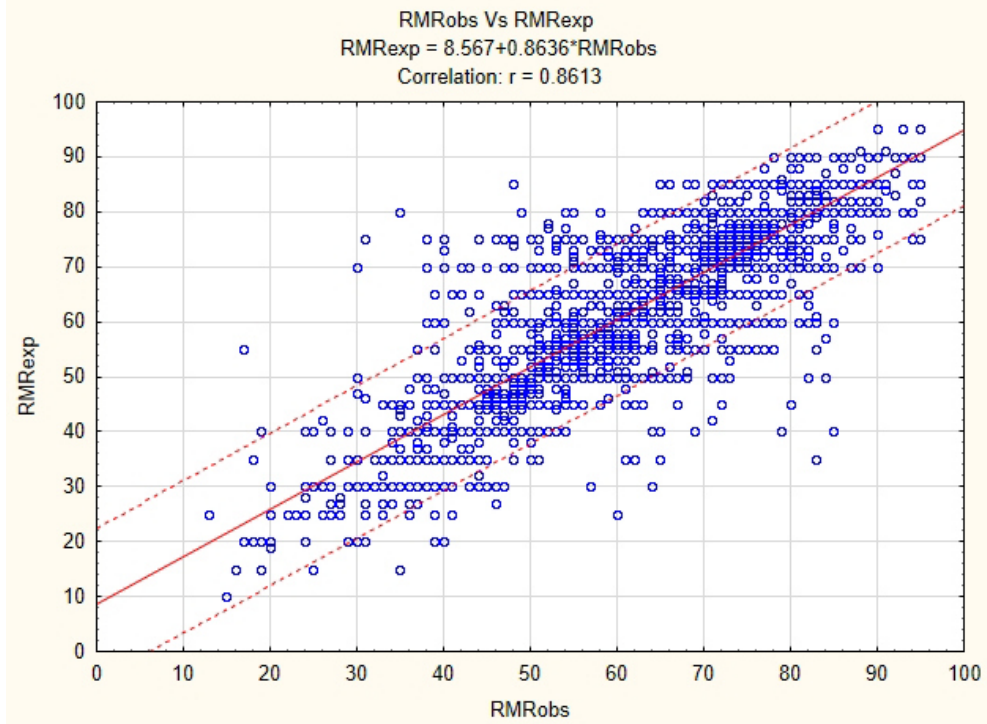


Figura A6.36 – Conjunto dos casos de estudo: correlação RMR observado e estimado de modo expedito por um especialista

APÊNDICE VII

CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE RMR OBSERVADO E ERRO ABSOLUTO DAS
DIFERENTES METODOLOGIAS DE ESTIMAÇÃO
(GRÁFICOS)

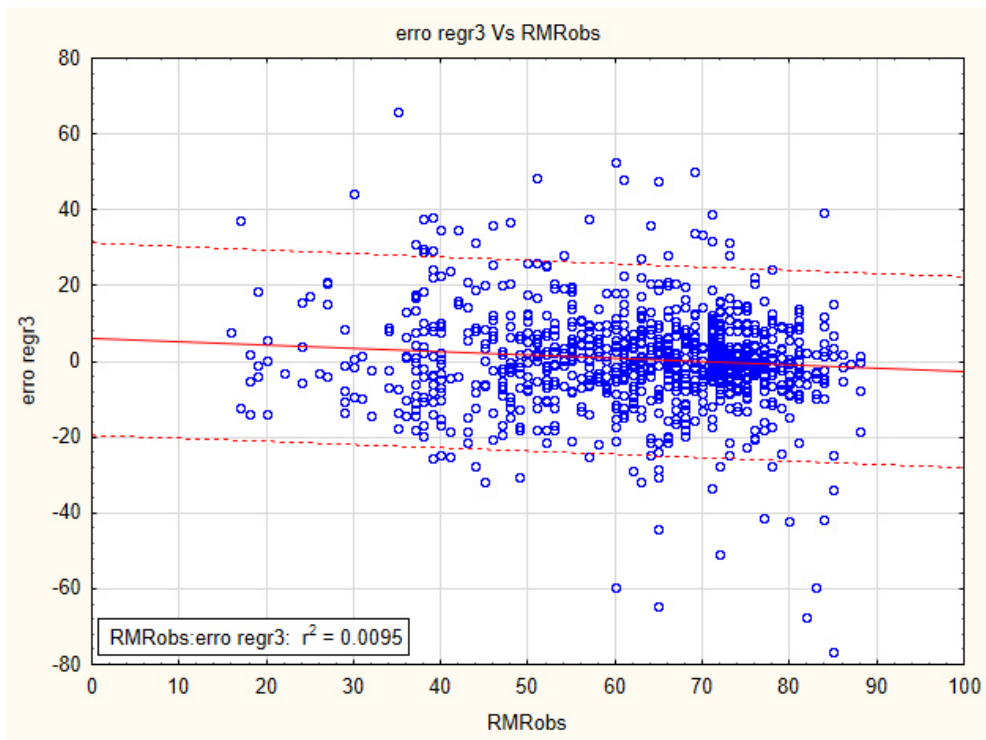


Figura A7.1 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

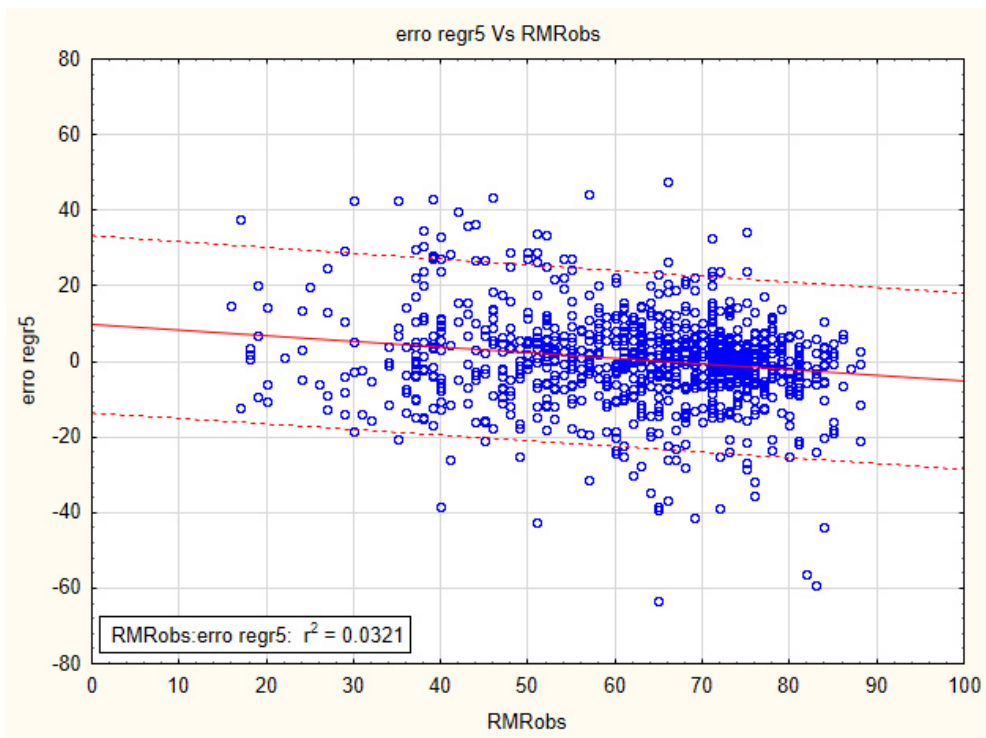


Figura A7.2 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

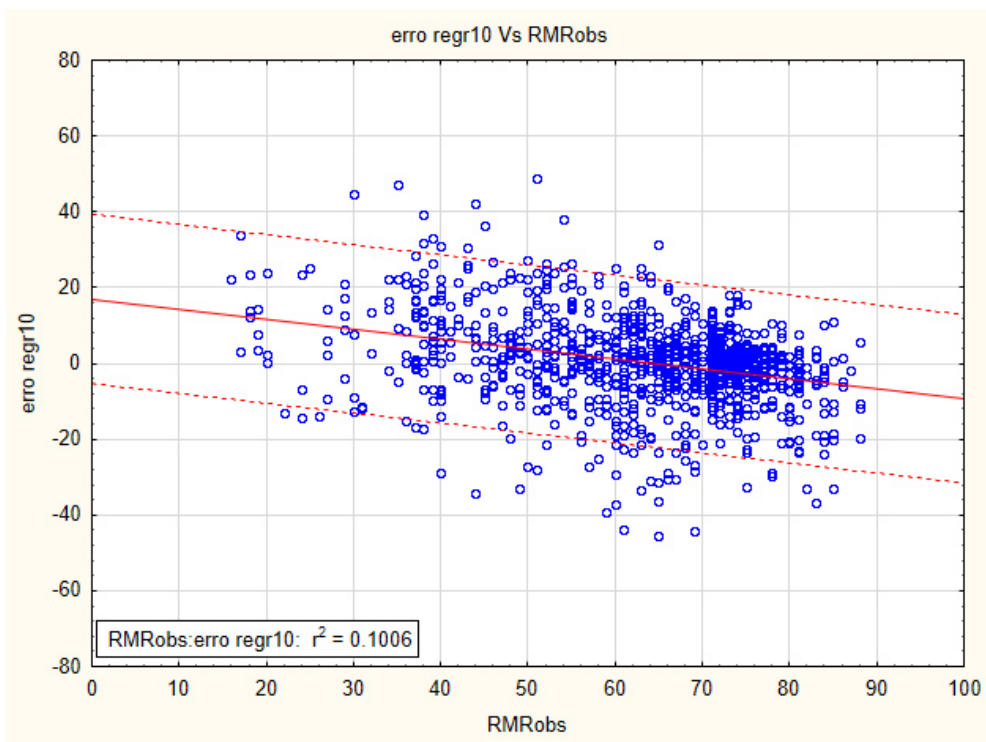


Figura A7.3 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

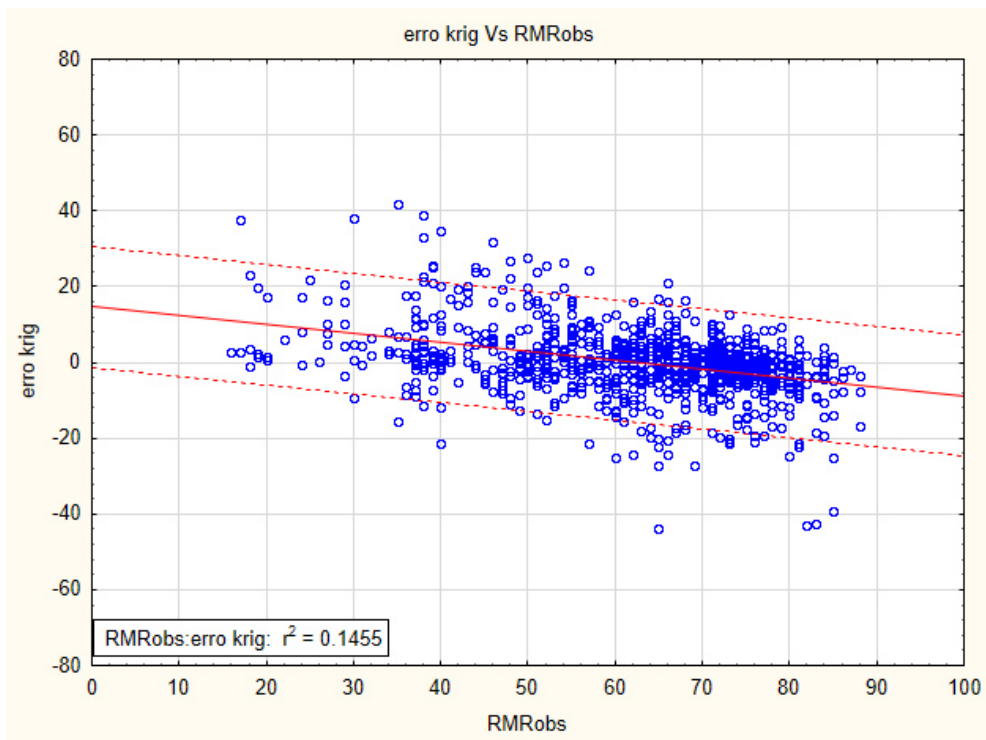


Figura A7.4 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

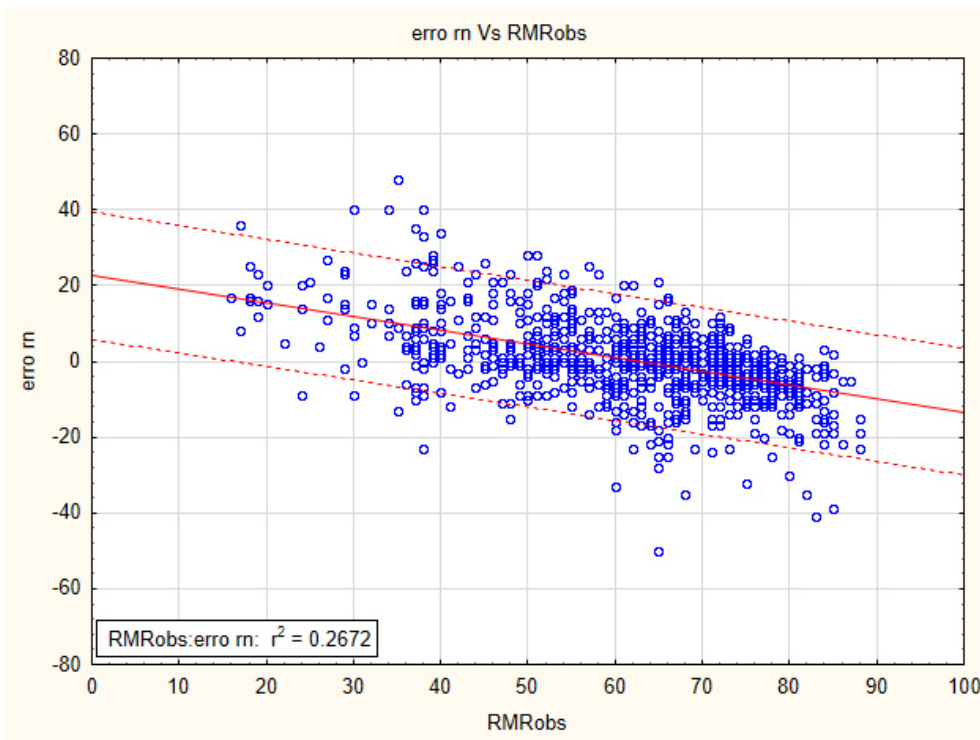


Figura A7.5 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neurais

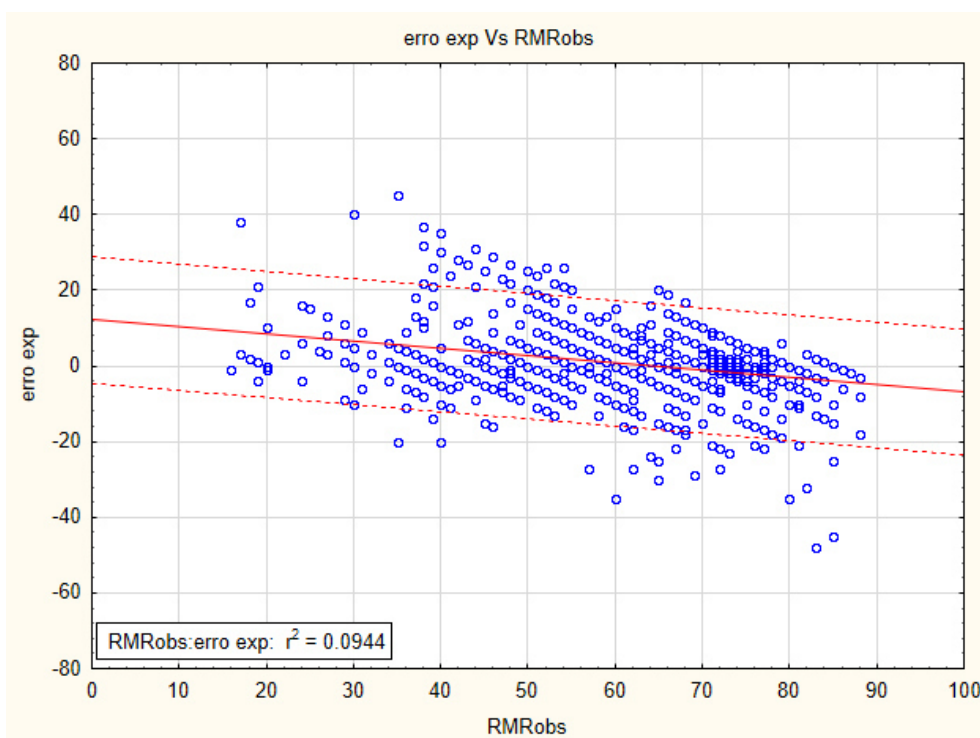


Figura A7.6 – AHVNII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

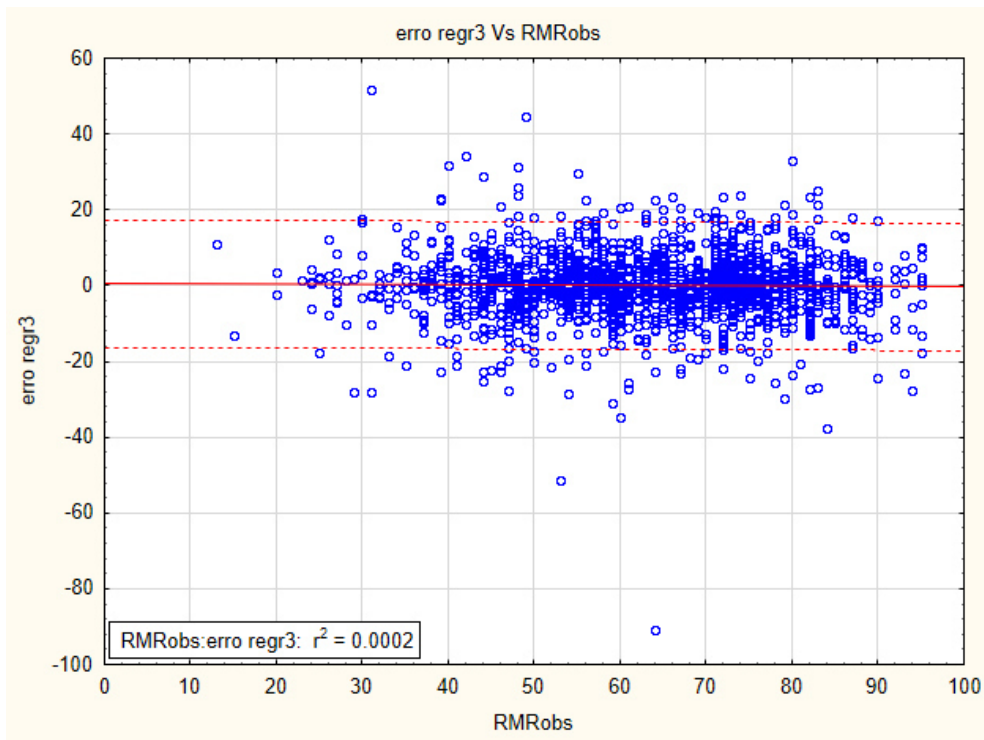


Figura A7.7 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

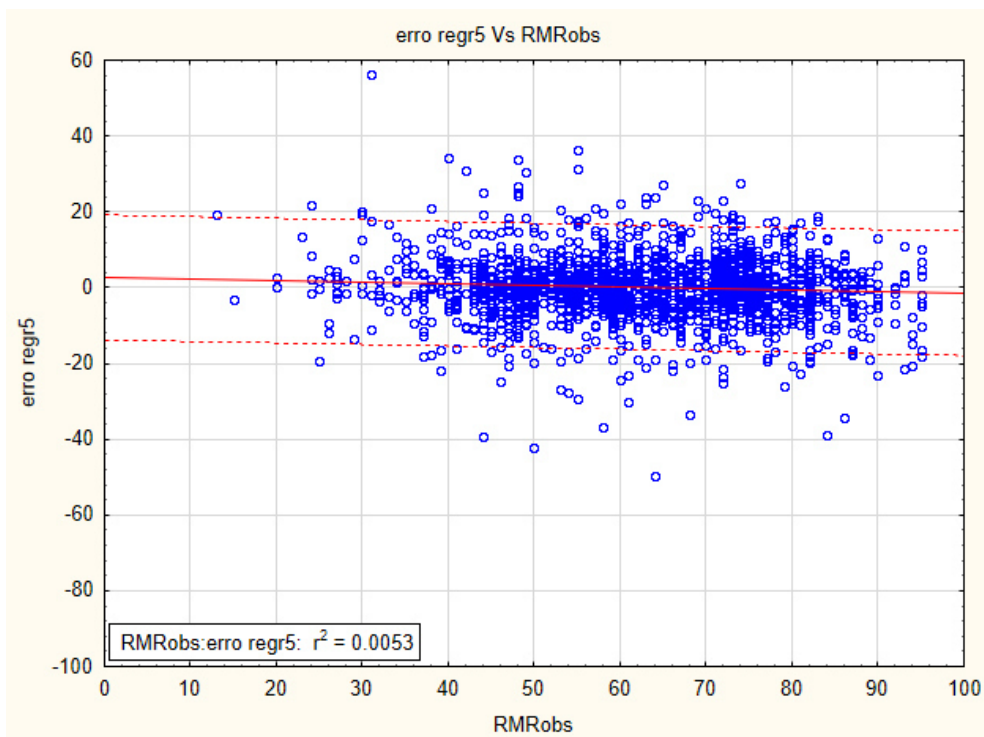


Figura A7.8 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

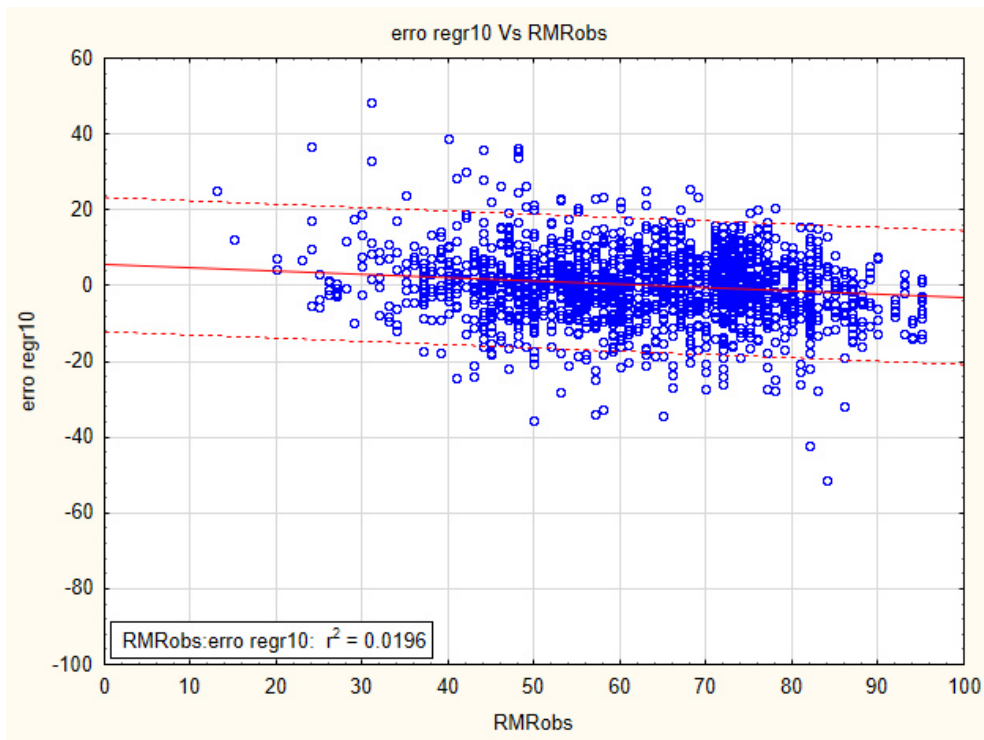


Figura A7.9 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

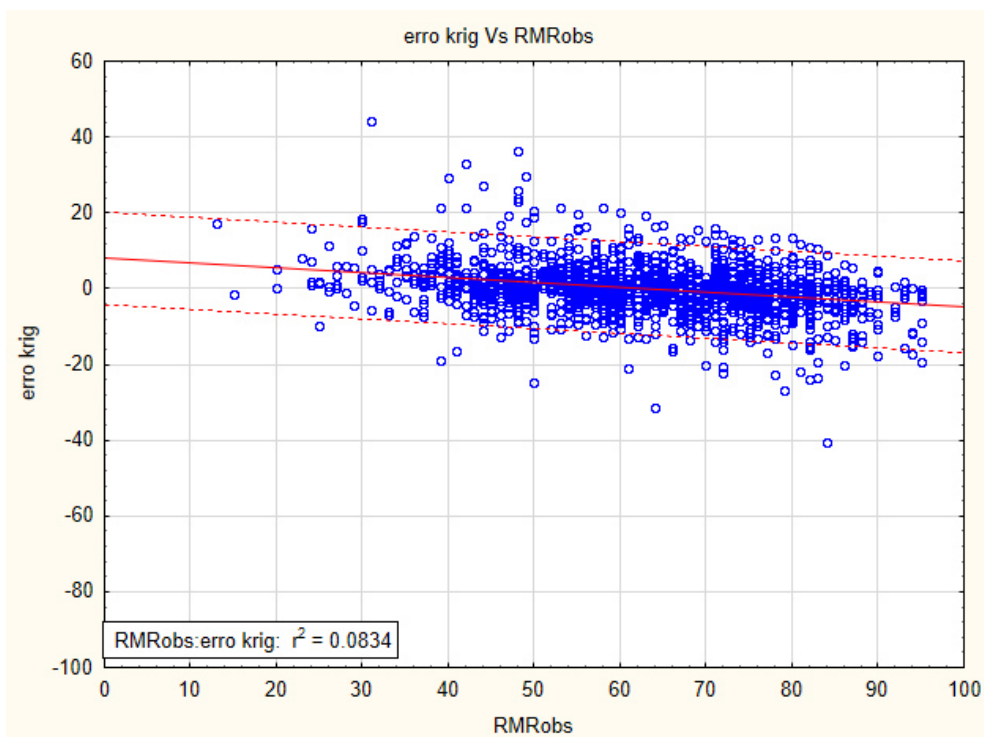


Figura A7.10 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

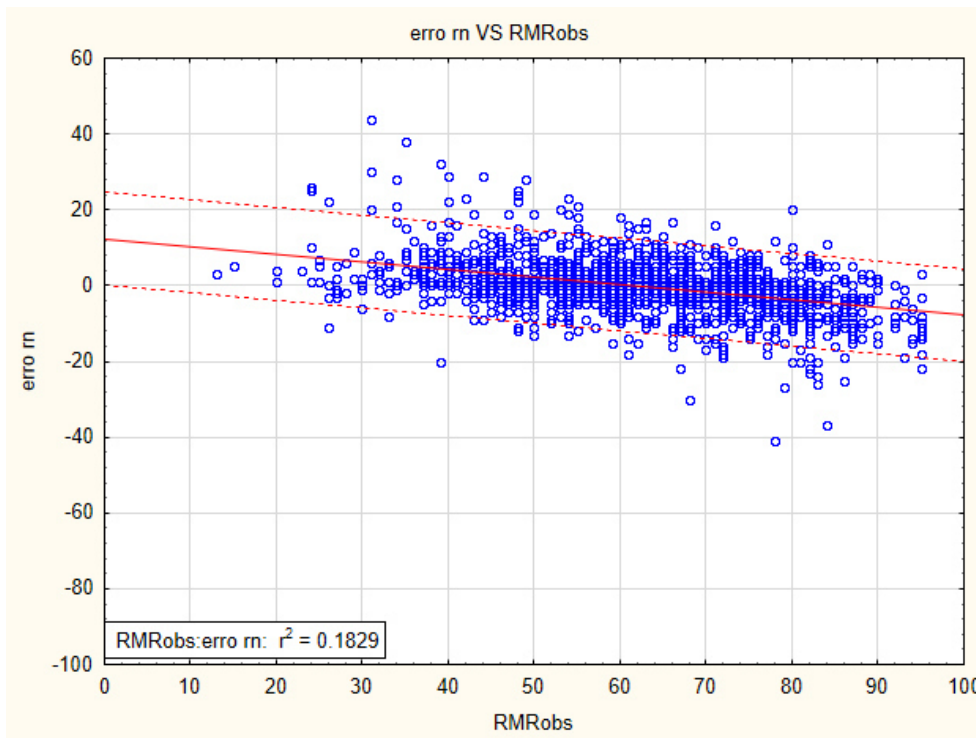


Figura A7.11 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neurais

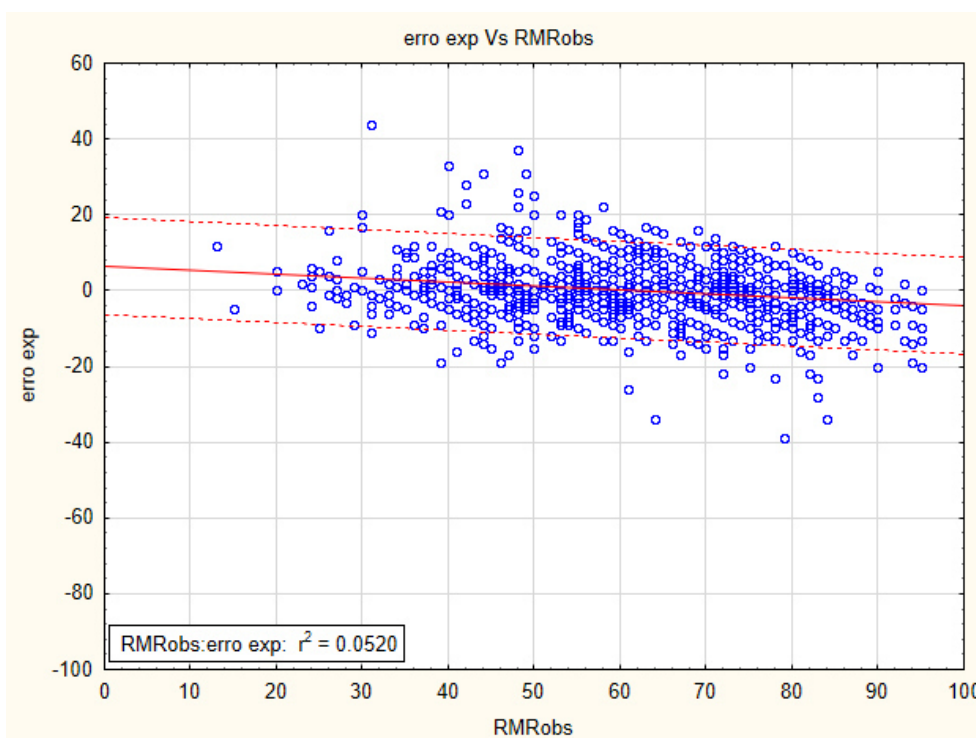


Figura A7.12 – AHVNIII: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

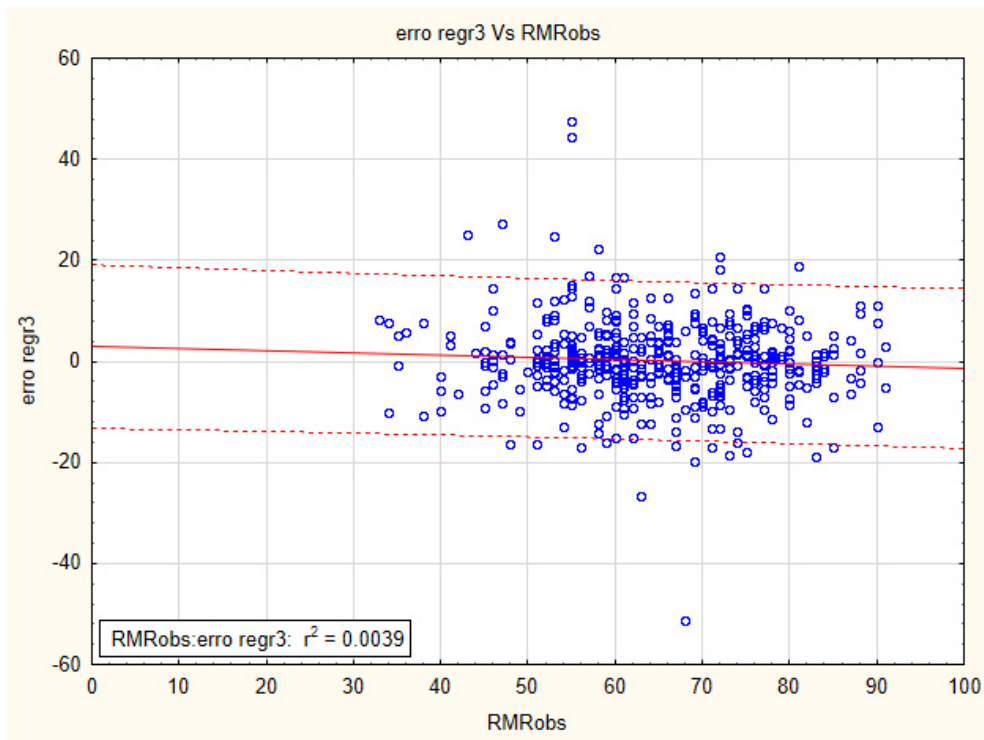


Figura A7.13 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

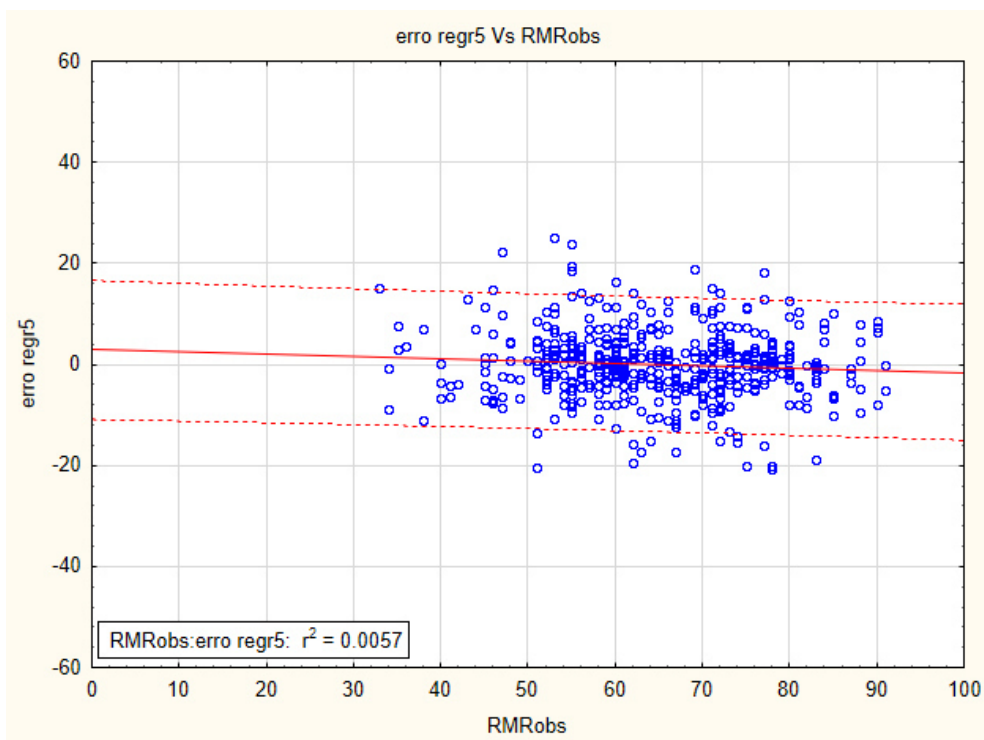


Figura A7.14 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

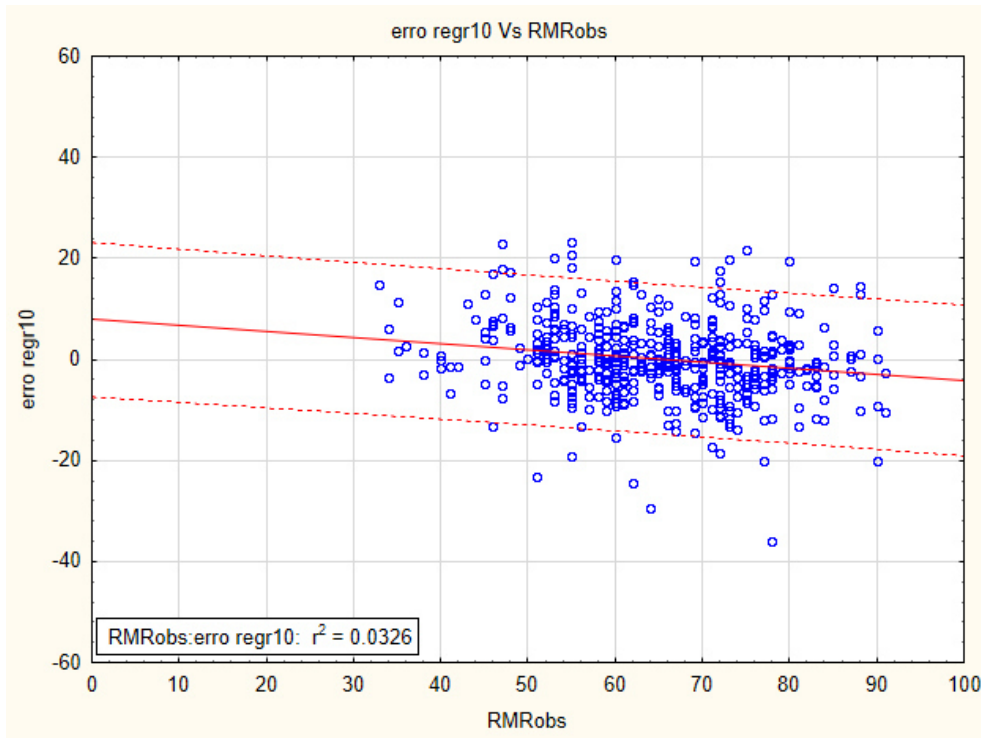


Figura A7.15 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

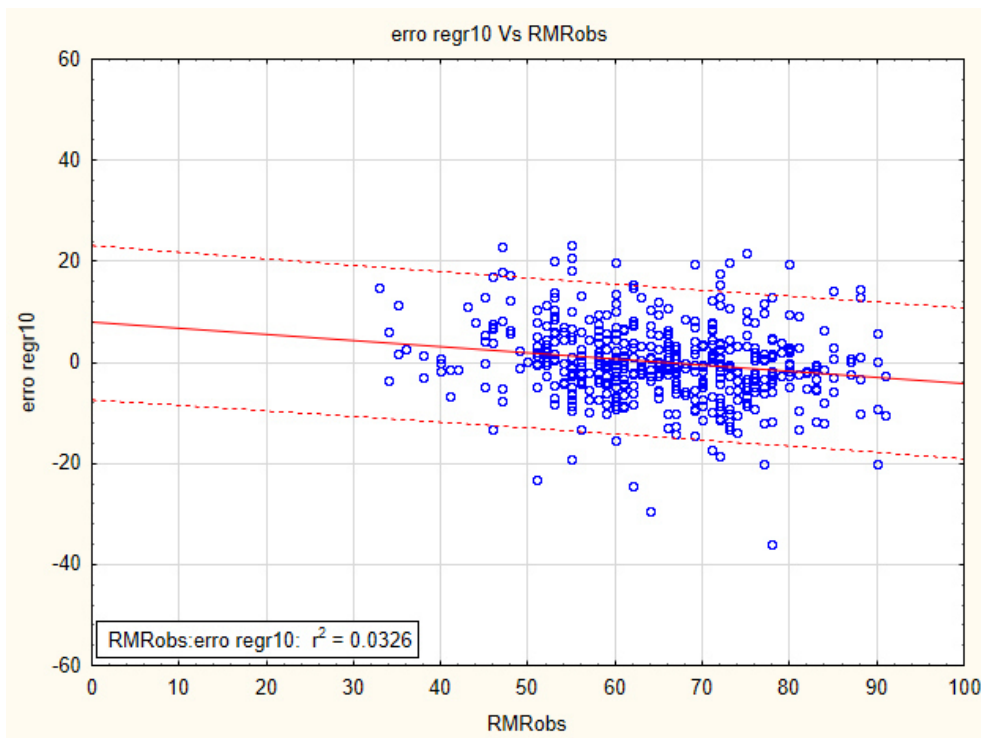


Figura A7.16 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

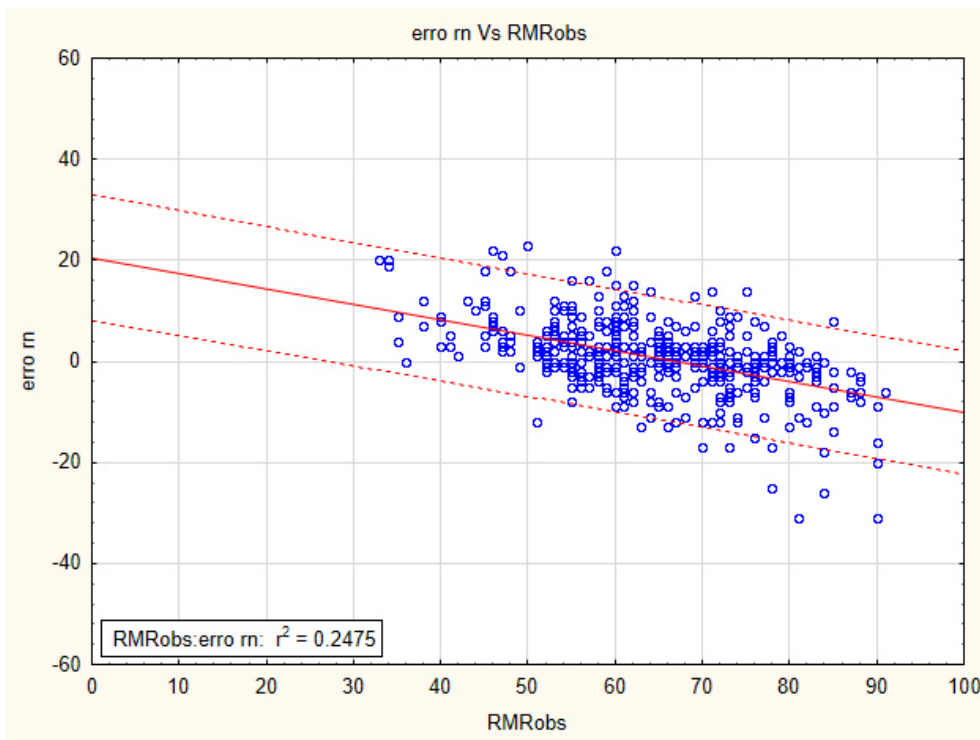


Figura A7.17 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neuronais

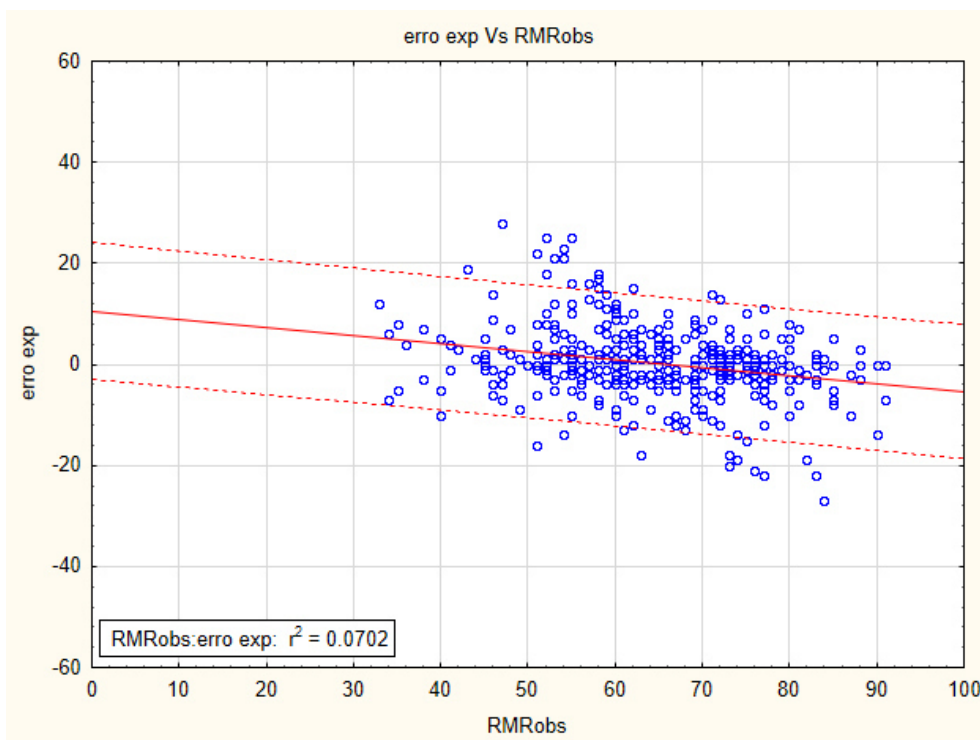


Figura A7.18 – AHP: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

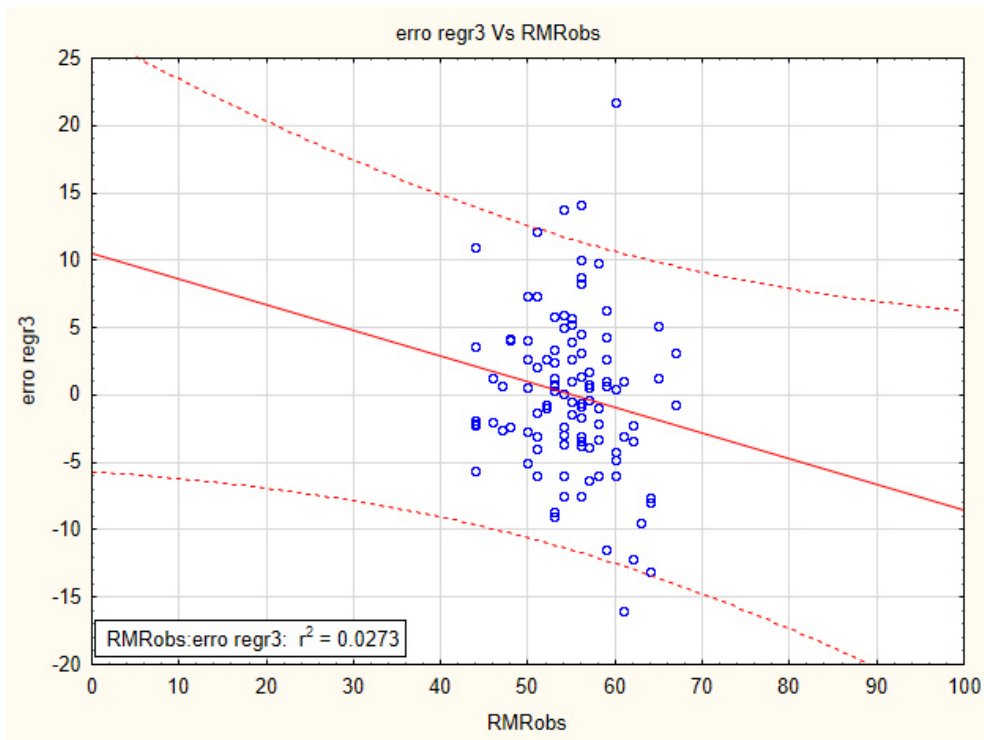


Figura A7.19 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

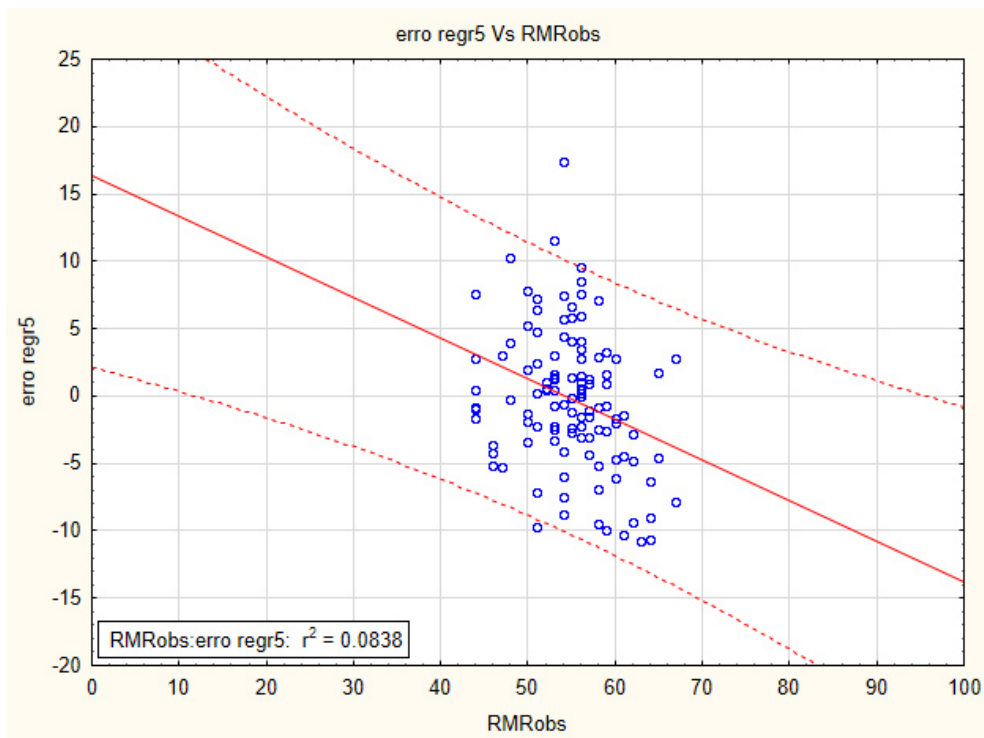


Figura A7.20 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

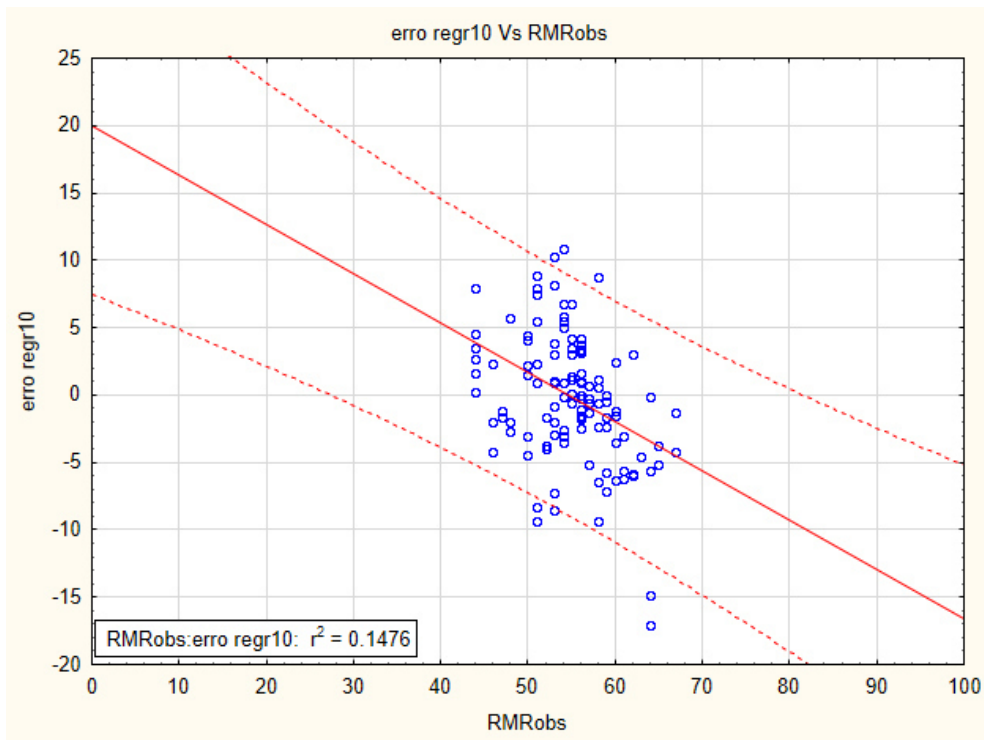


Figura A7.21 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

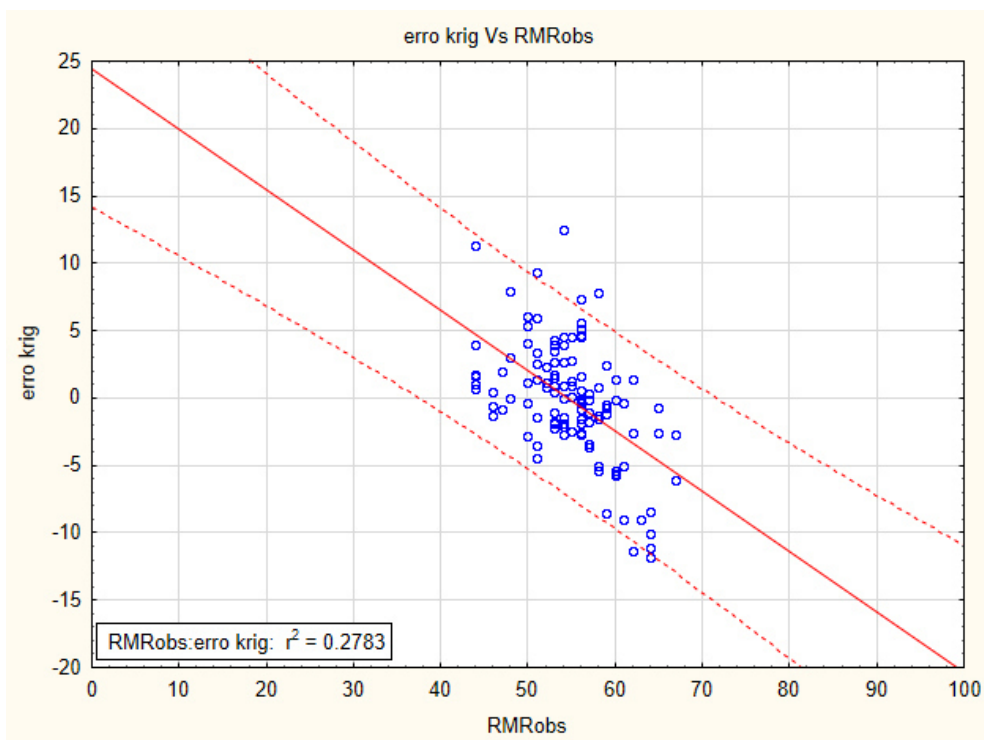


Figura A7.22 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

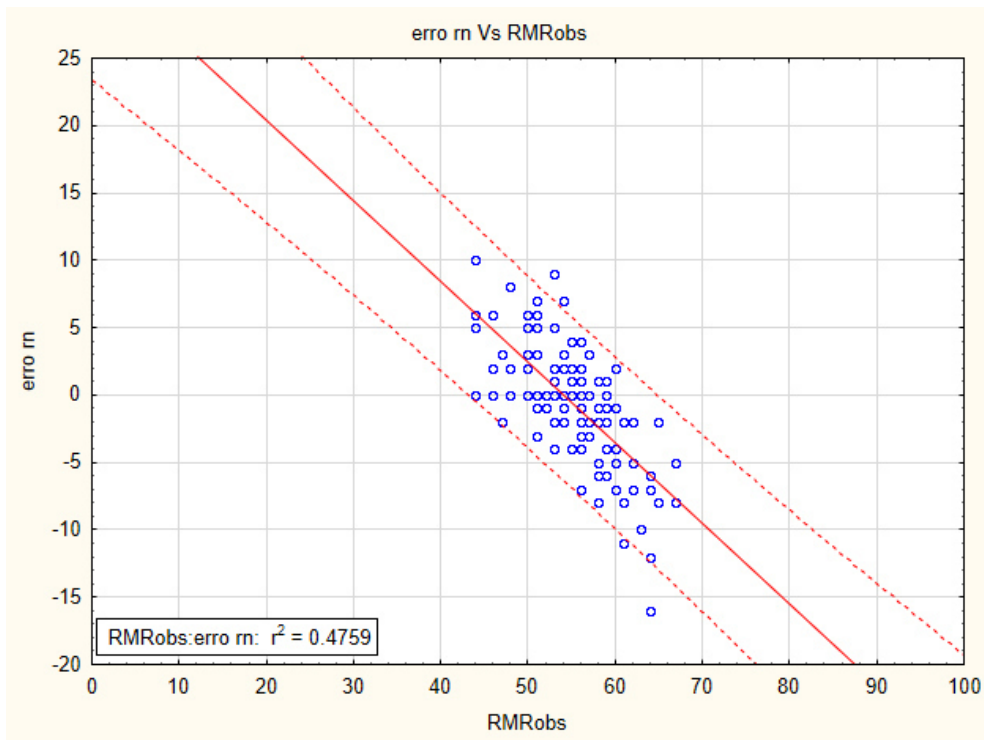


Figura A7.23 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neurais

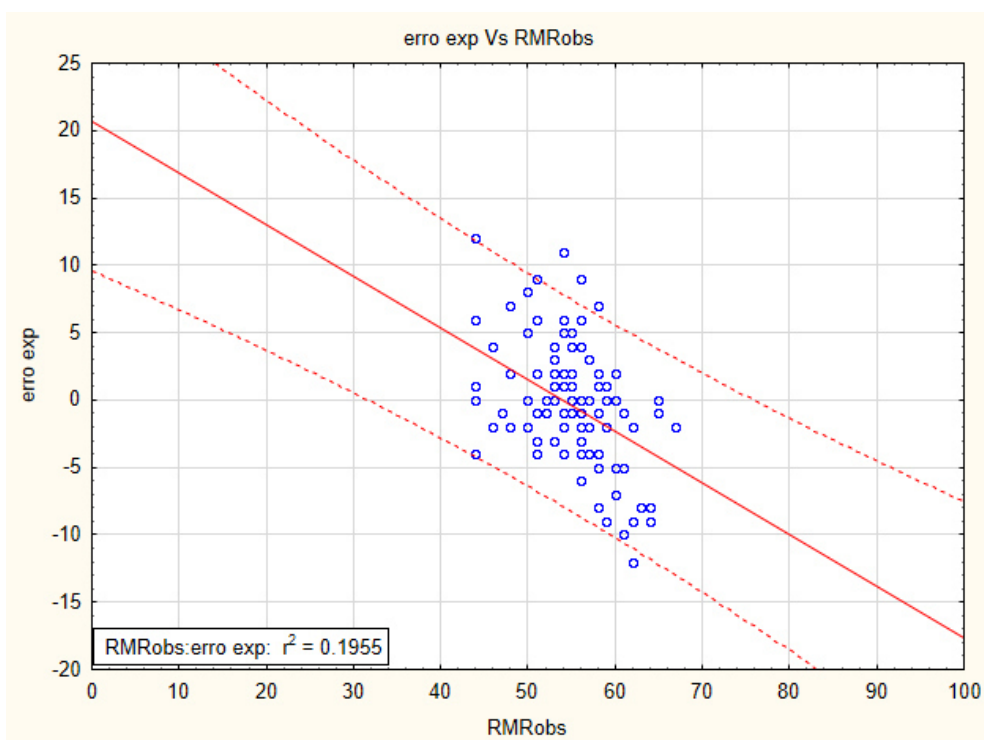


Figura A7.24 – AHB: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

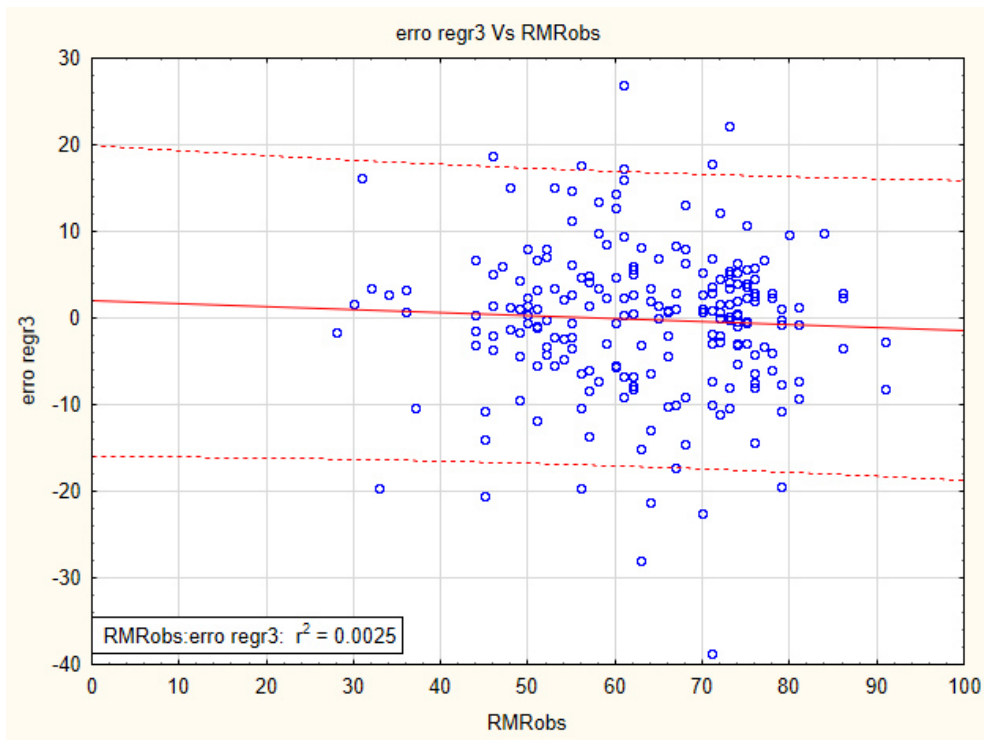


Figura A7.25 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

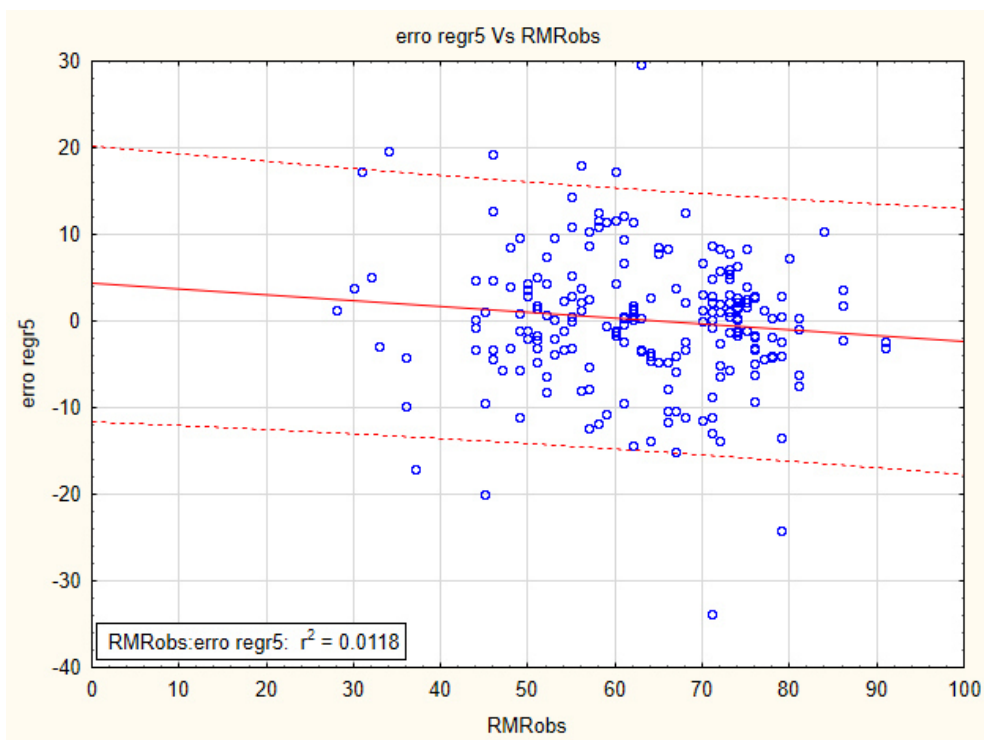


Figura A7.26 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

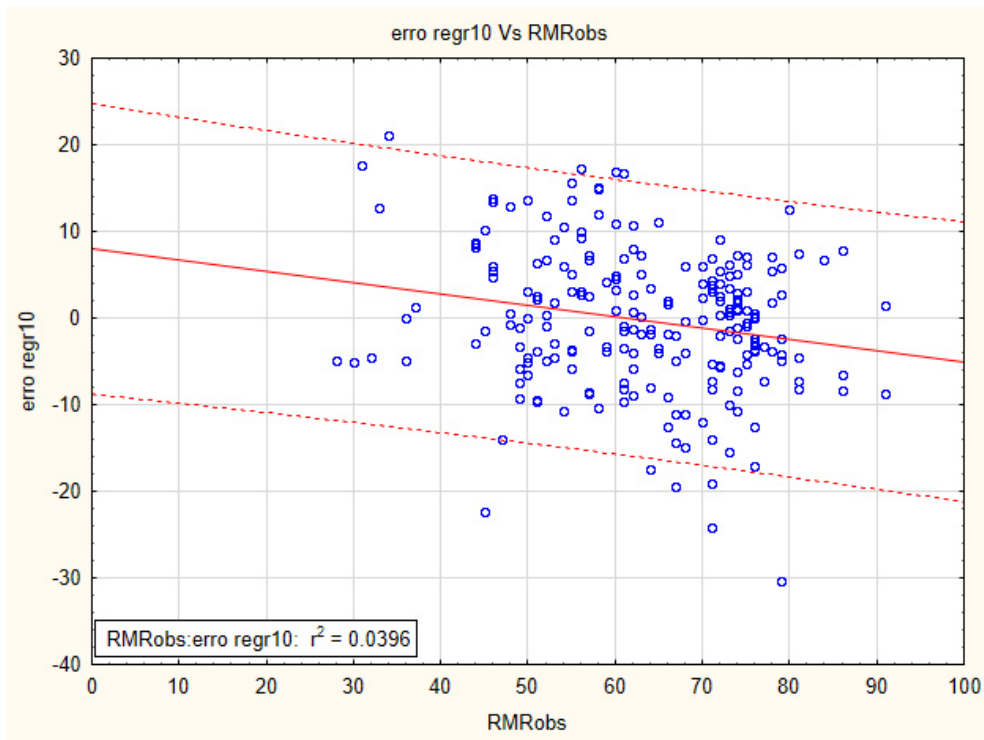


Figura A7.27 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

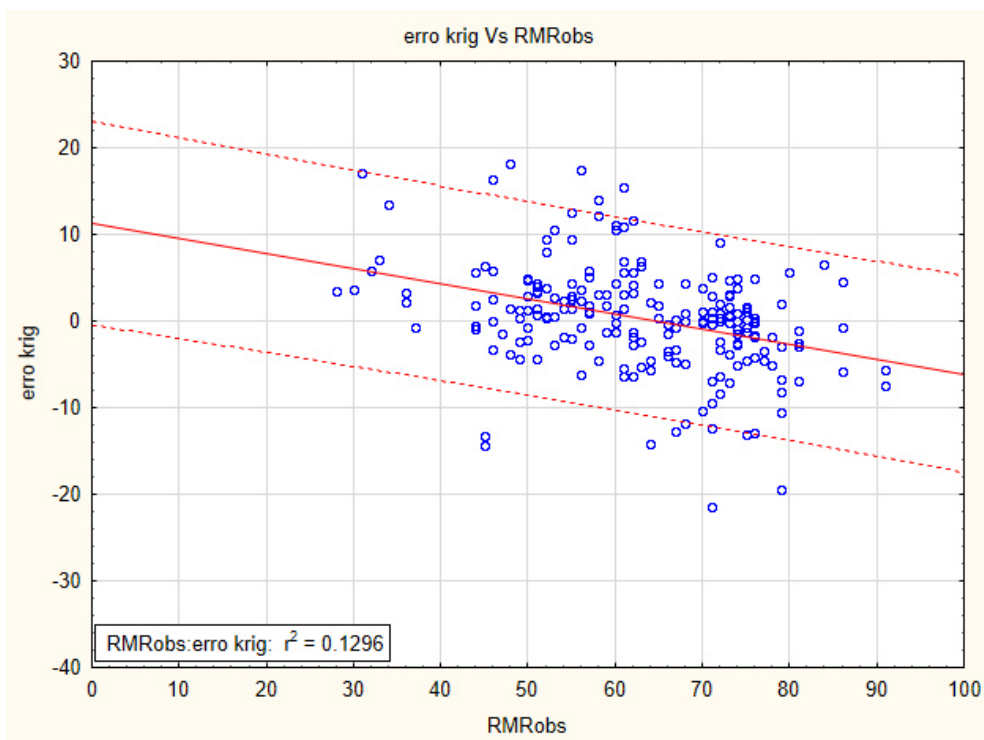


Figura A7.28 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

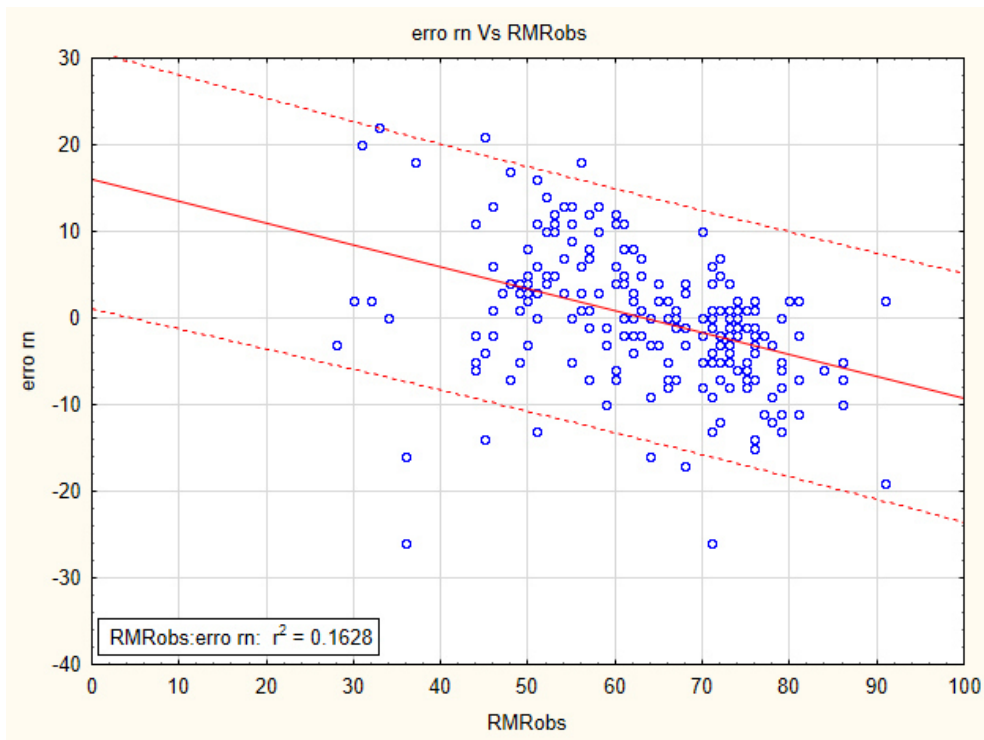


Figura A7.29 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neurais

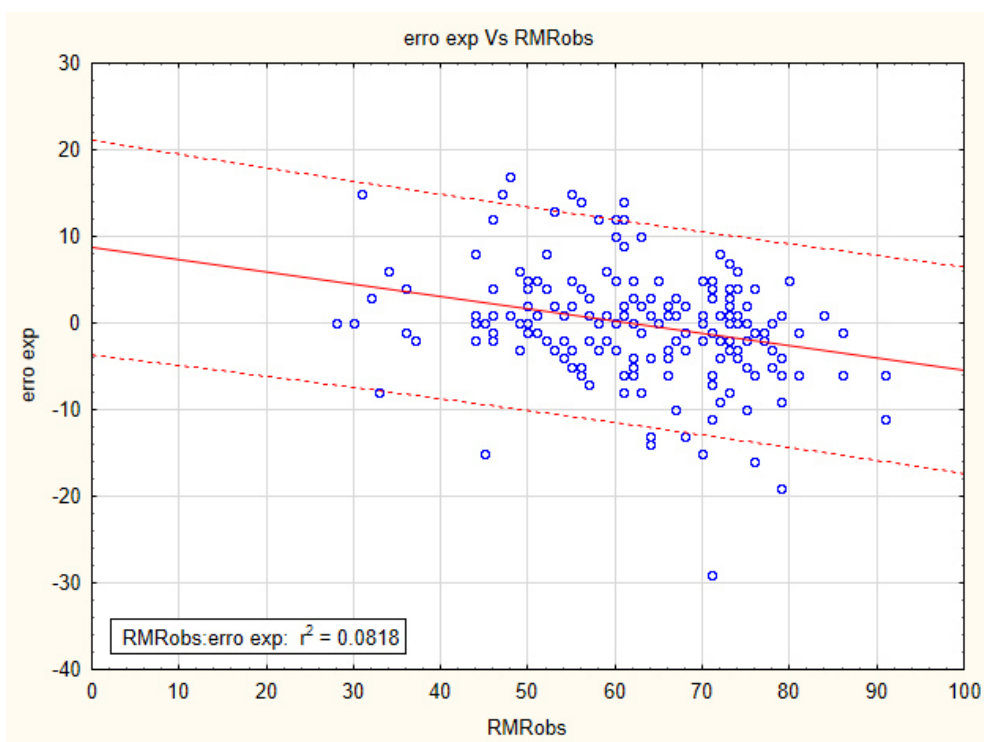


Figura A7.30 – AHA: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

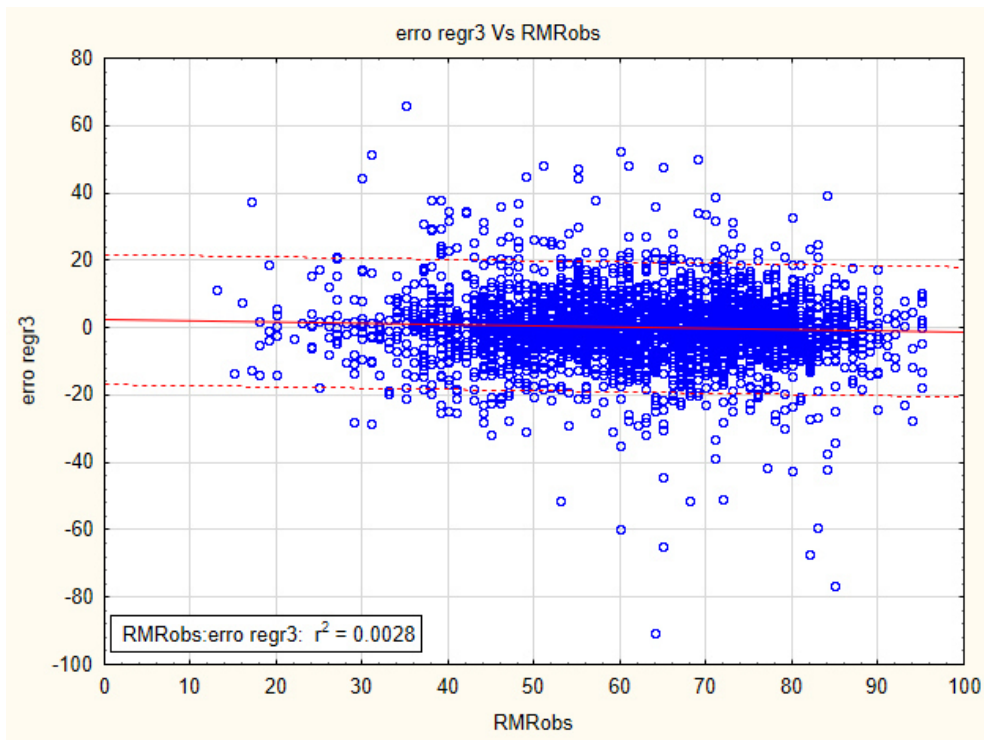


Figura A7.31 – Conjunto de todos os casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

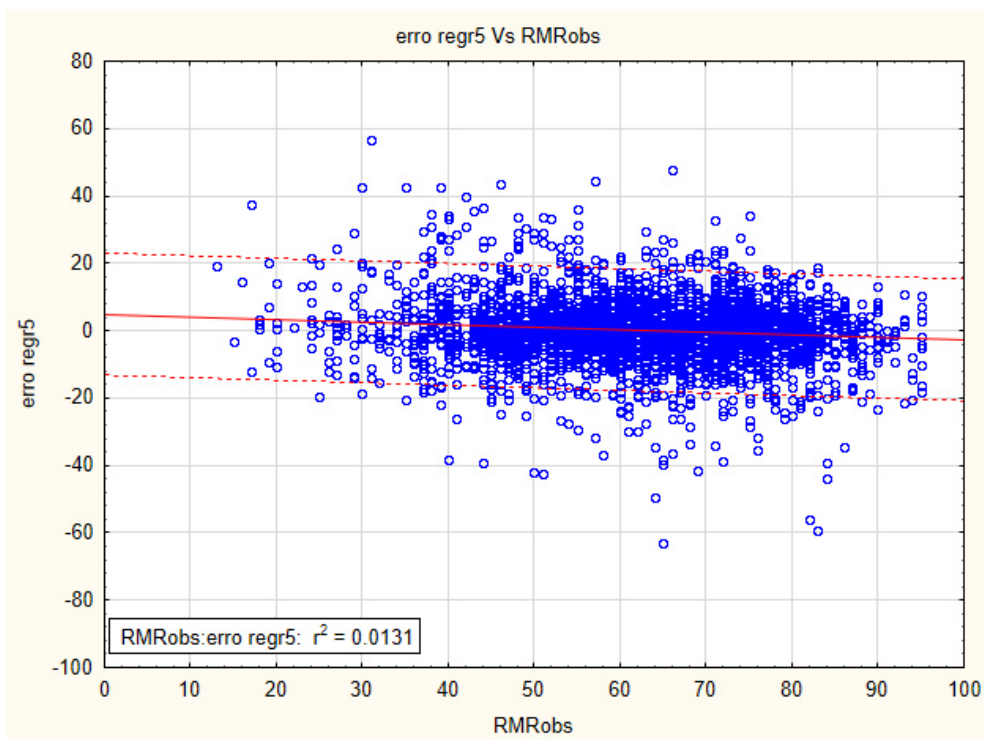


Figura A7.32 – Conjunto de todos os casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

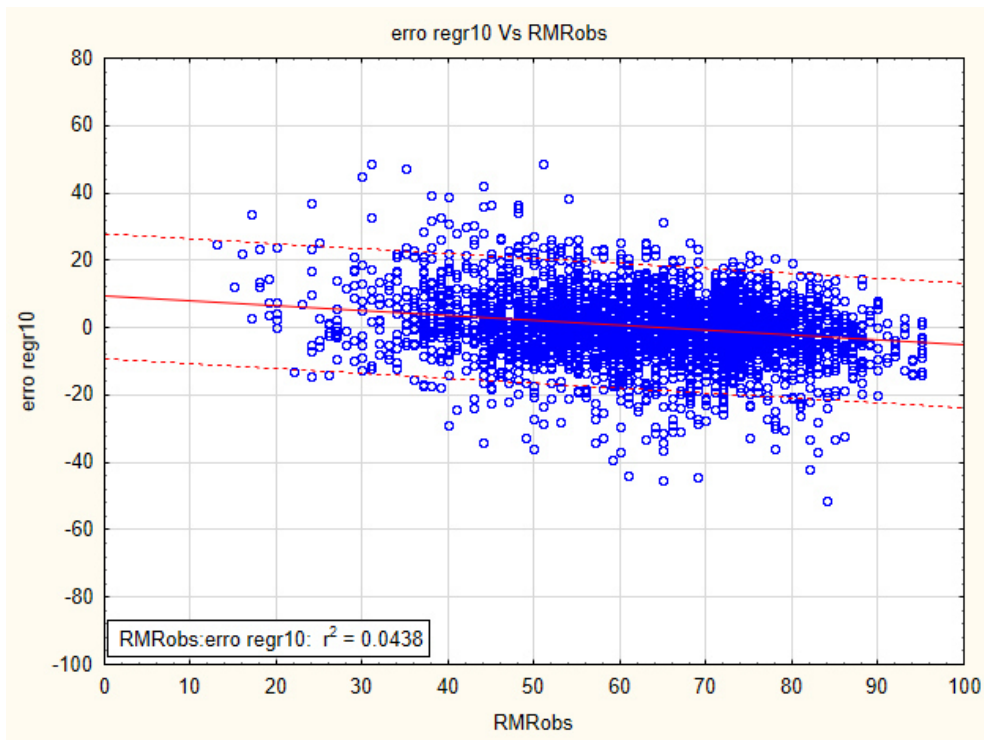


Figura A7.33 – Conjunto de todos os casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

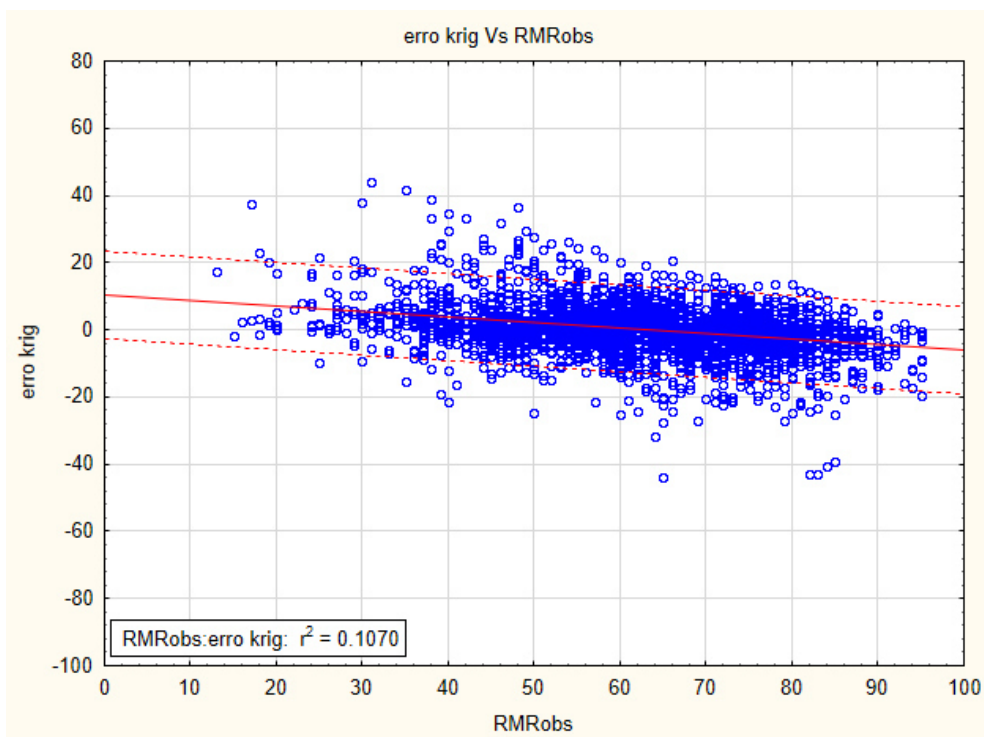


Figura A7.34 – Conjunto de todos os casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por krigagem

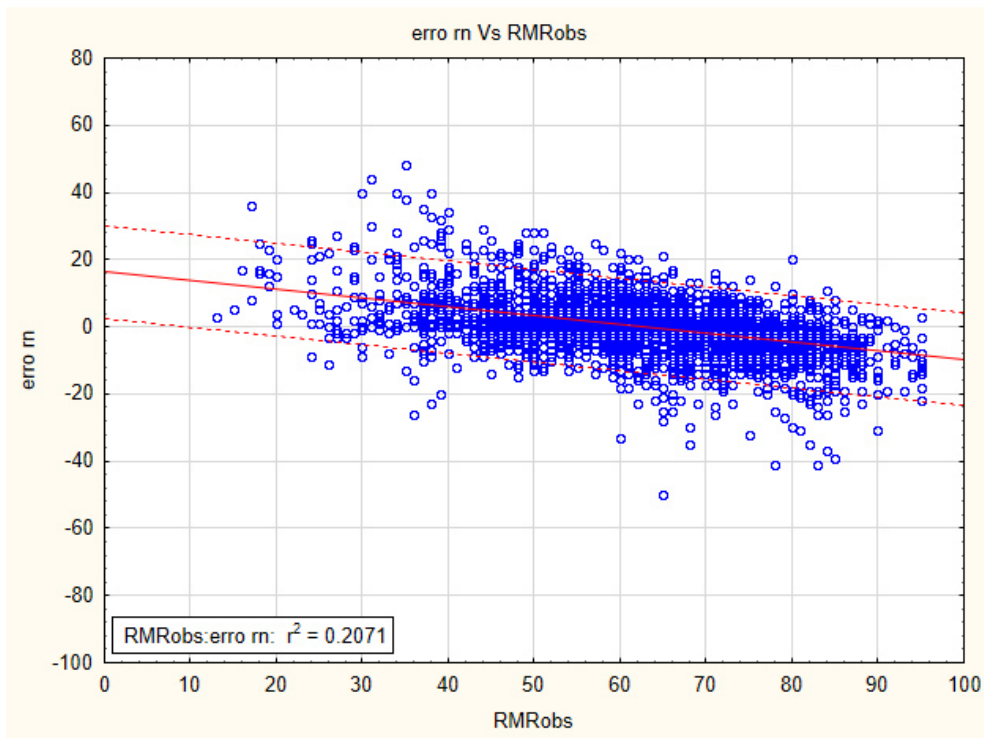


Figura A7.35 – Conjunto de todos os casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por redes neuronais

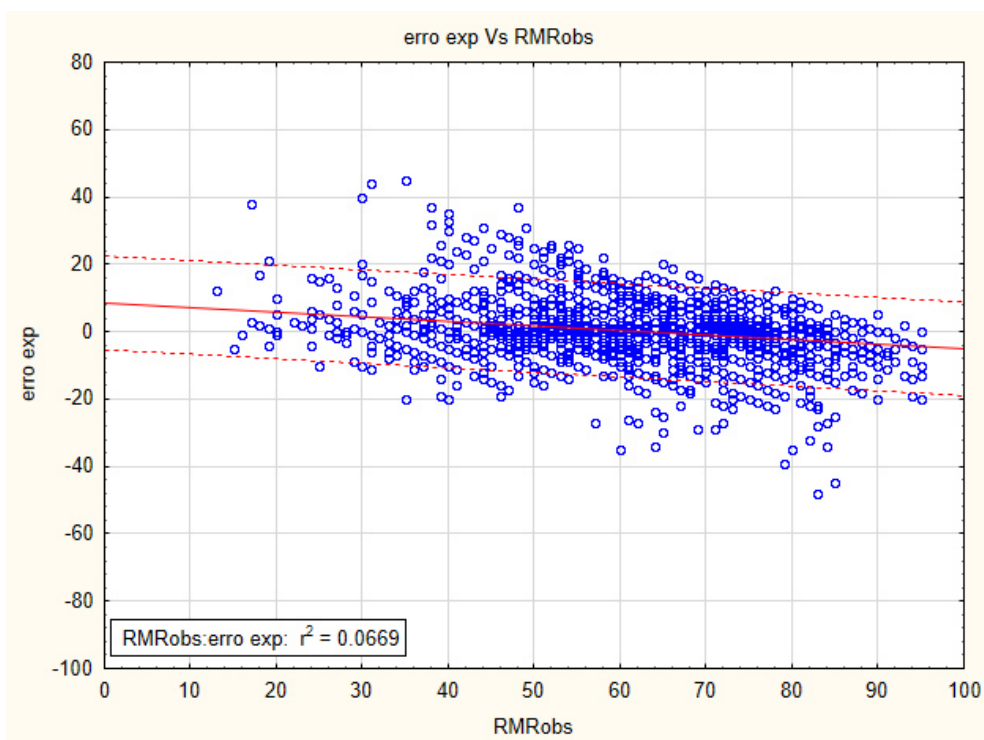


Figura A7.36 – Conjunto dos casos de estudo: correlação entre RMR observado e erro absoluto da estimação por modo expedito por um especialista

APÊNDICE VIII

ÍNDICE RMR OBSERVADO AO LONGO DAS ESCAVAÇÕES E ERRO ABSOLUTO DAS
DIFERENTES METODOLOGIAS
(GRÁFICOS)

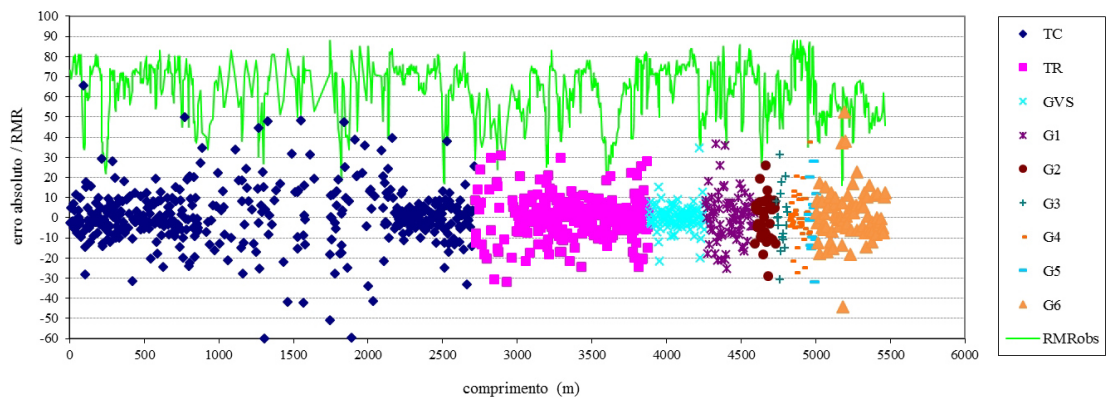


Figura A8.1 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

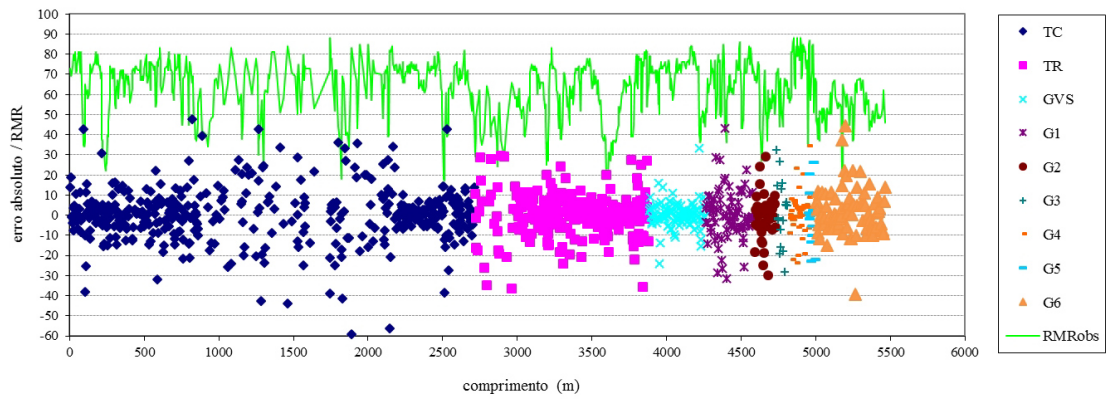


Figura A8.2 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

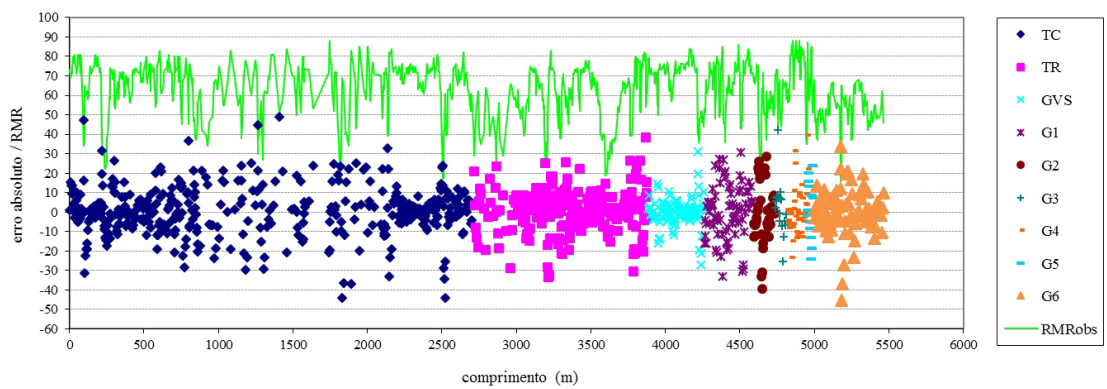


Figura A8.3 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

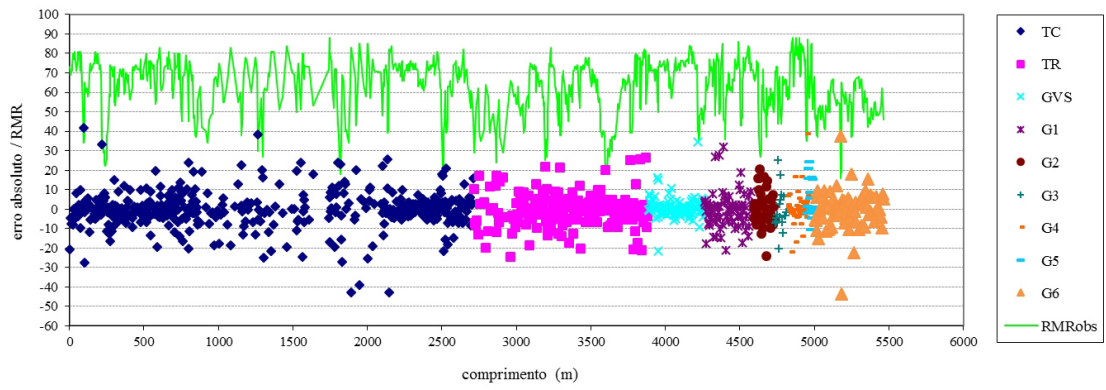


Figura A8.4 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por krigagem

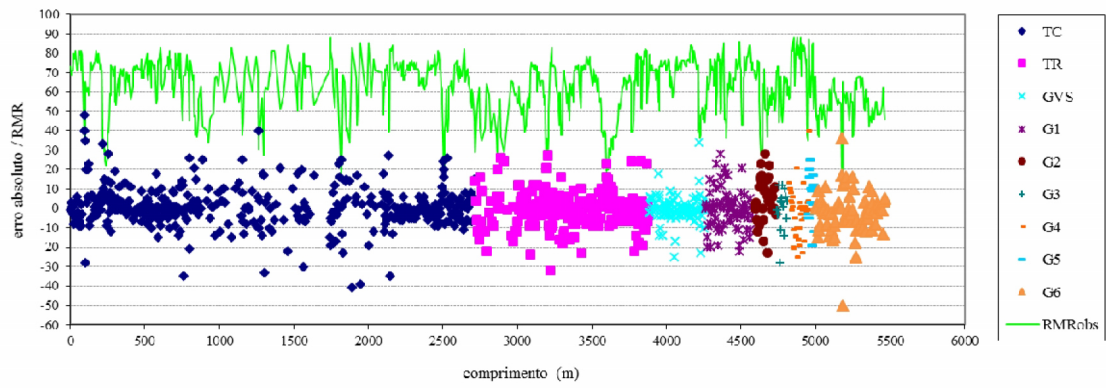


Figura A8.5 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por redes neurais

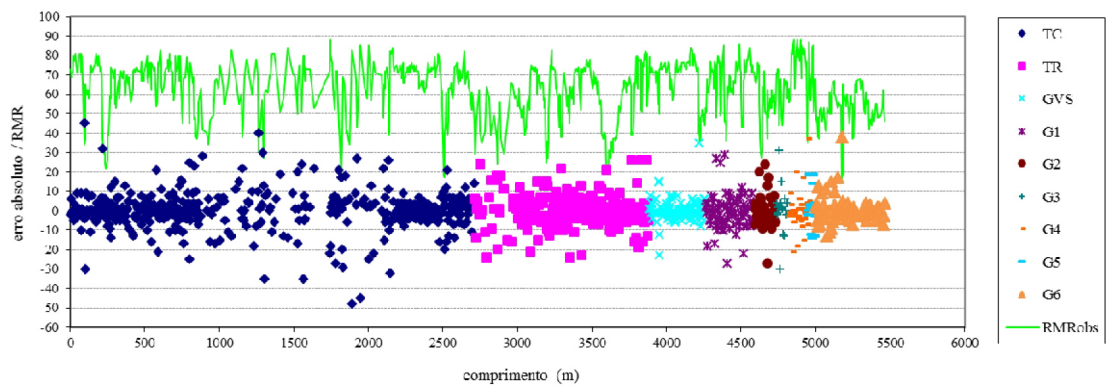


Figura A8.6 – AHVNII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por modo empírico por um especialista

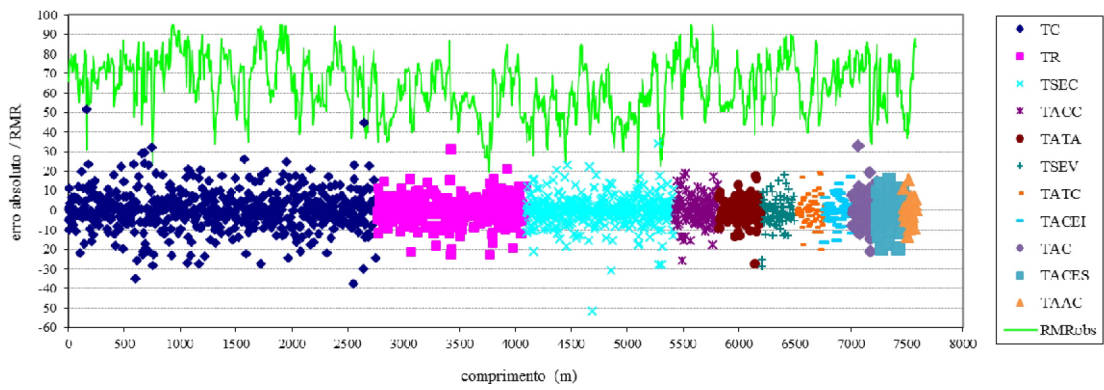


Figura A8.7 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 3 valores

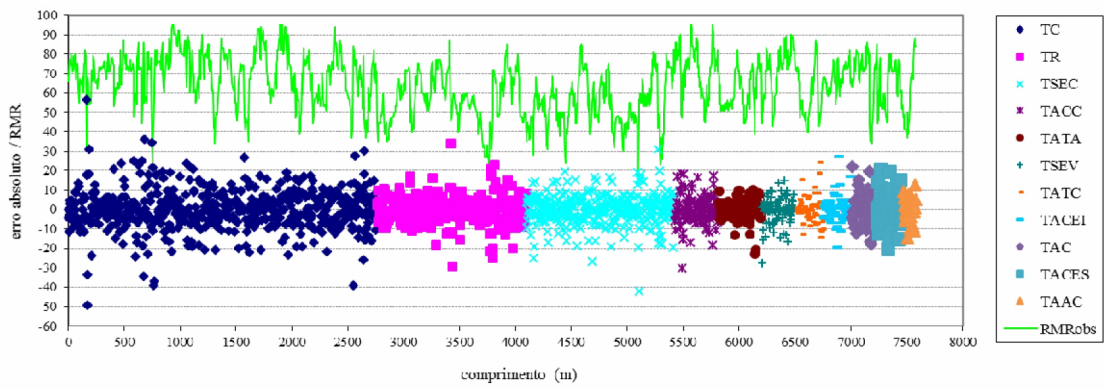


Figura A8.8 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 5 valores

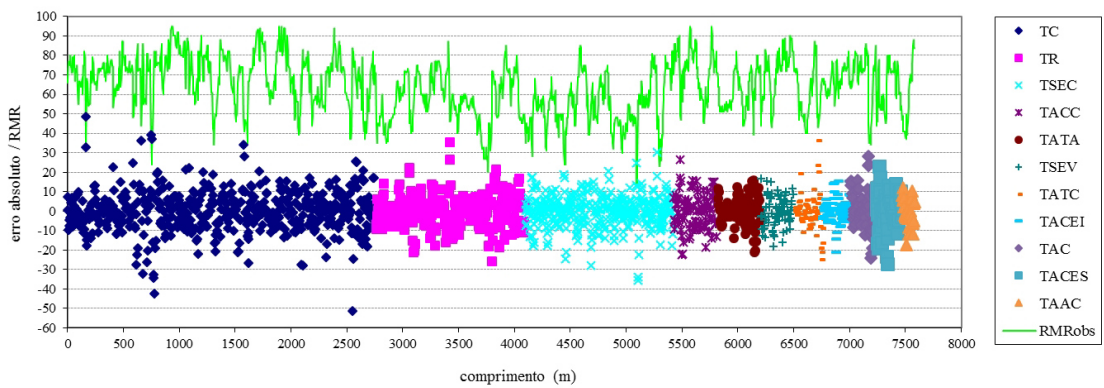


Figura A8.9 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por regressão com base nos últimos 10 valores

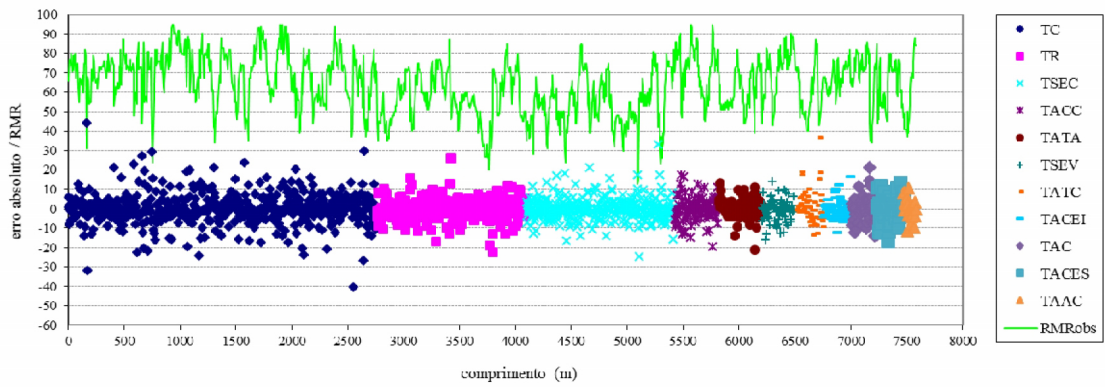


Figura A8.10 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por krigagem

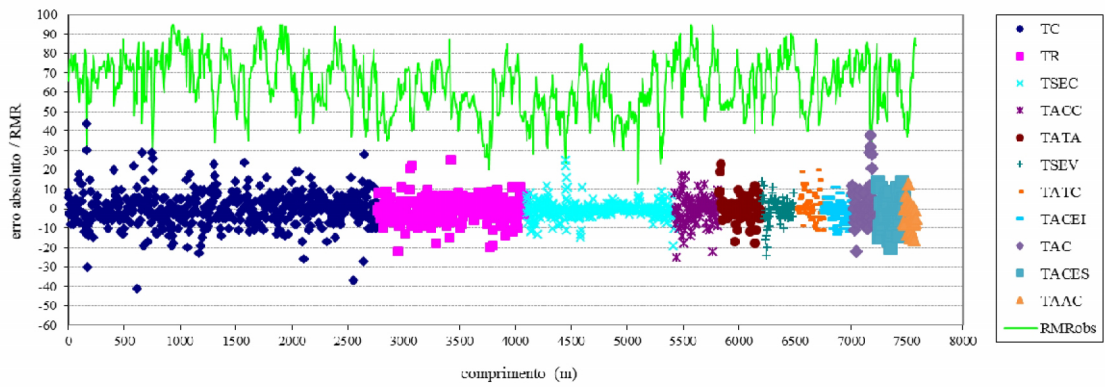


Figura A8.11 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por redes neurais

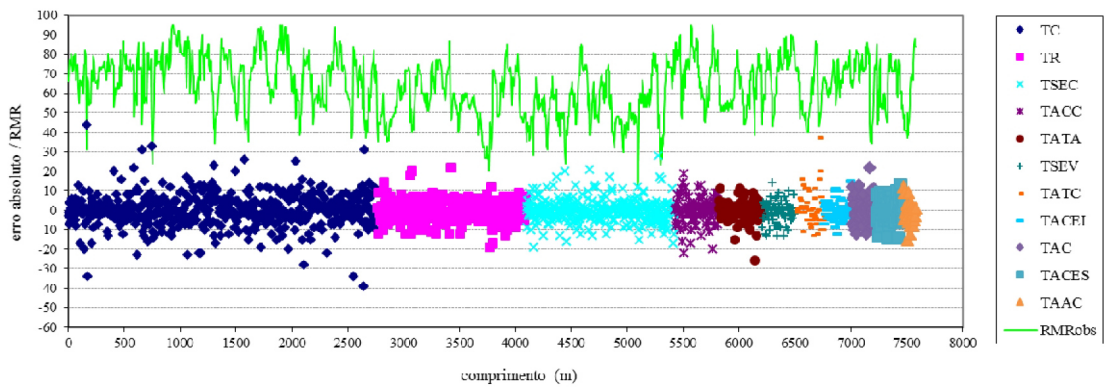


Figura A8.12 – AHVNIII: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por modo empírico por um especialista

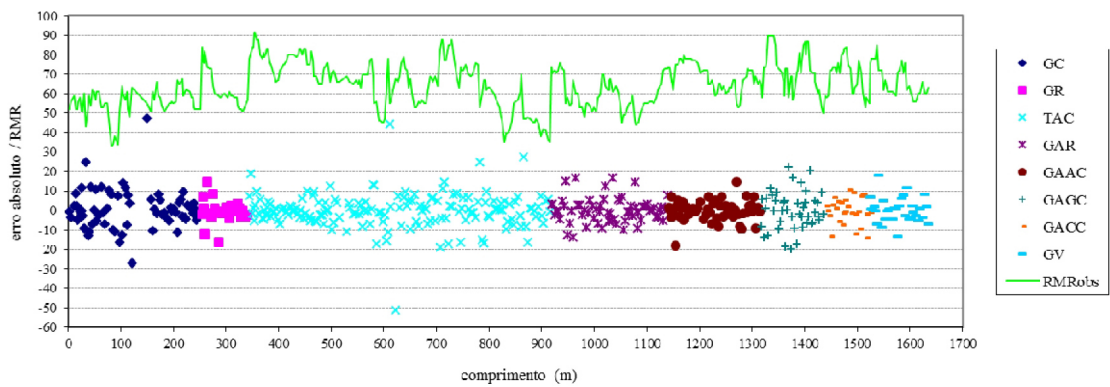


Figura A8.13 – AHP: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 3 valores

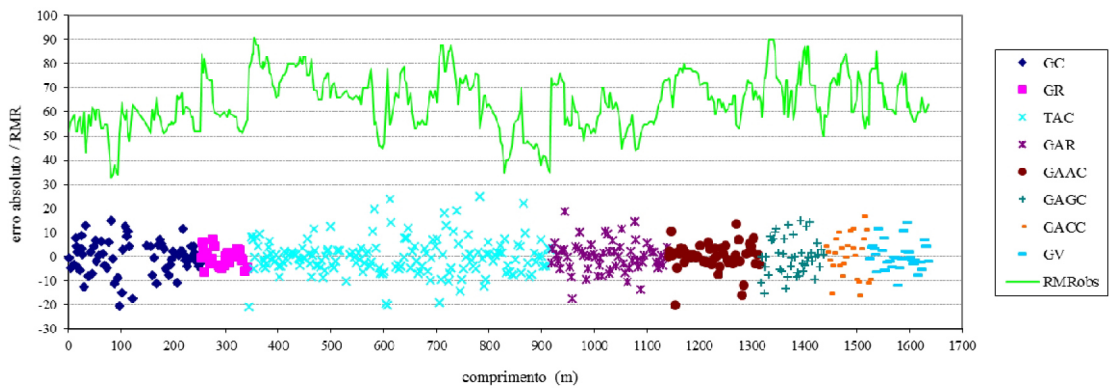


Figura A8.14 – AHP: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 5 valores

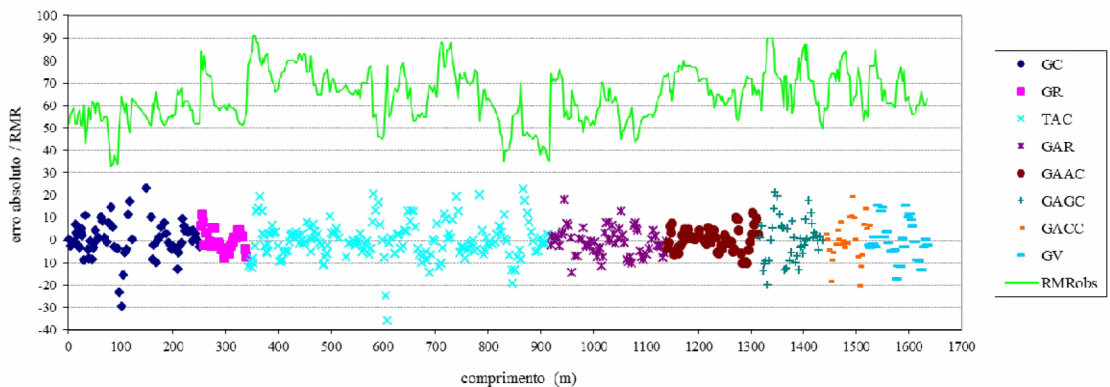


Figura A8.15 – AHP: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 10 valores

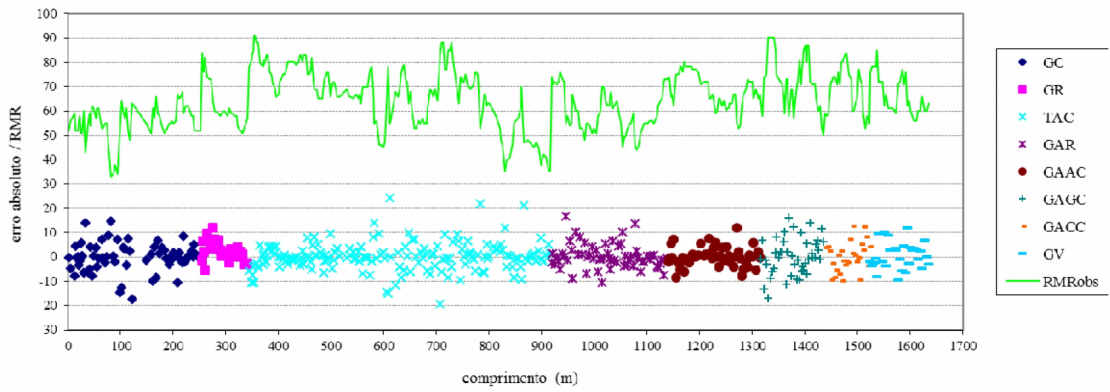


Figura A8.16 – AHP: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por krigagem

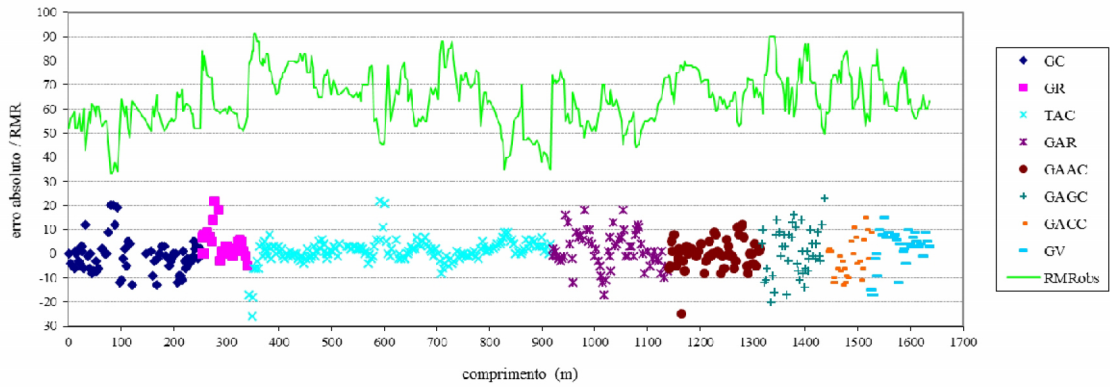


Figura A8.17 – AHP: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por redes neurais

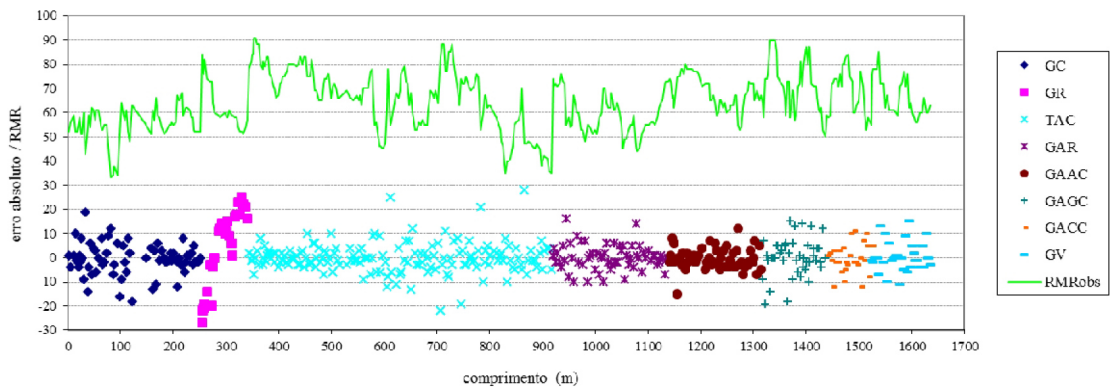


Figura A8.18 – AHP: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por modo empírico por um especialista

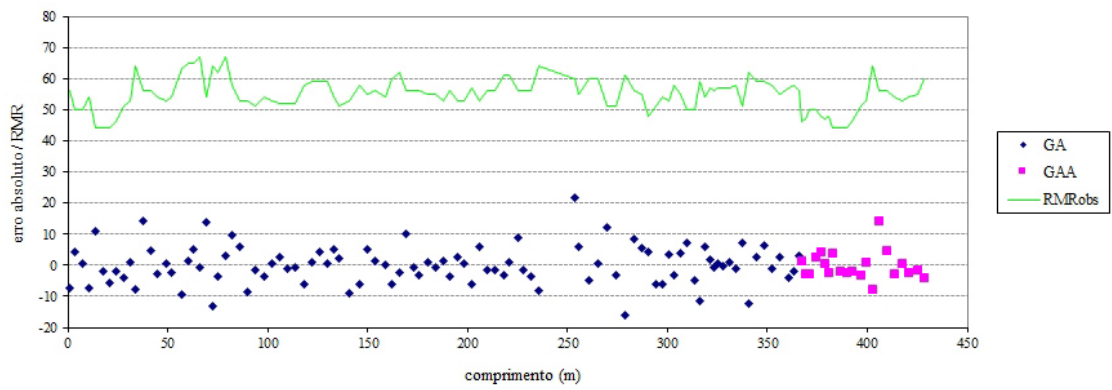


Figura A8.19 – AHB: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 3 valores

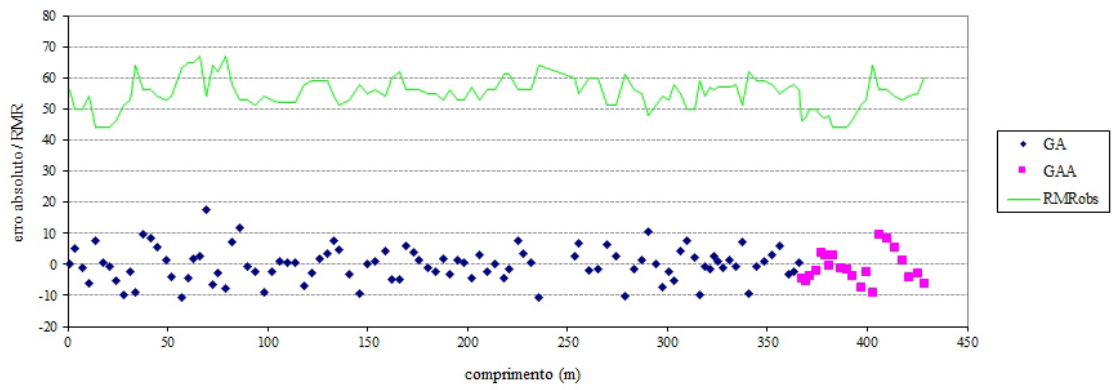


Figura A8.20 – AHB: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 5 valores

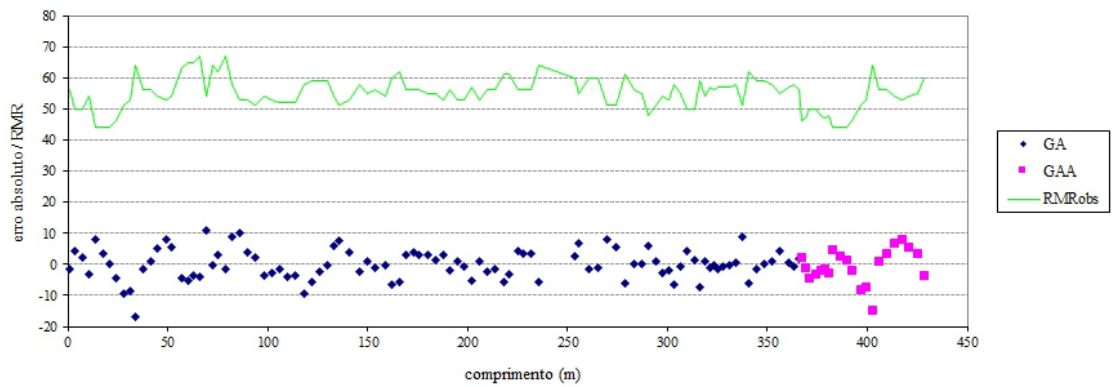


Figura A8.21 – AHB: ndice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 10 valores

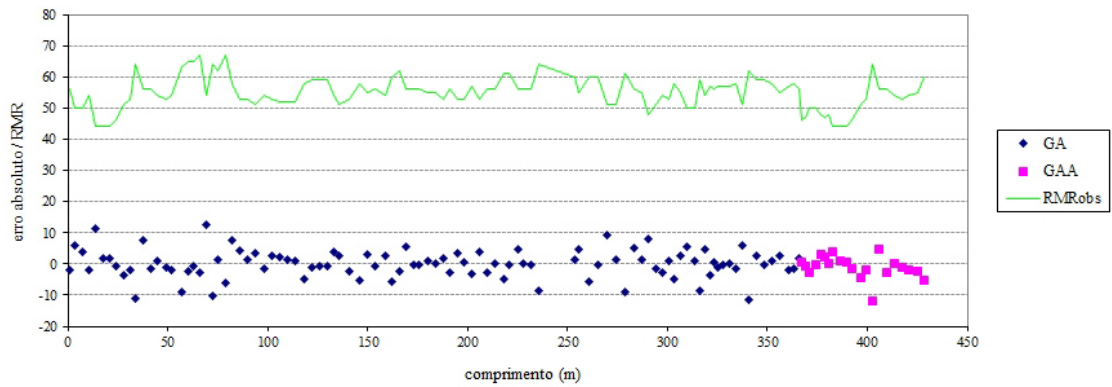


Figura A8.22 – AHB: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimativa por krigagem

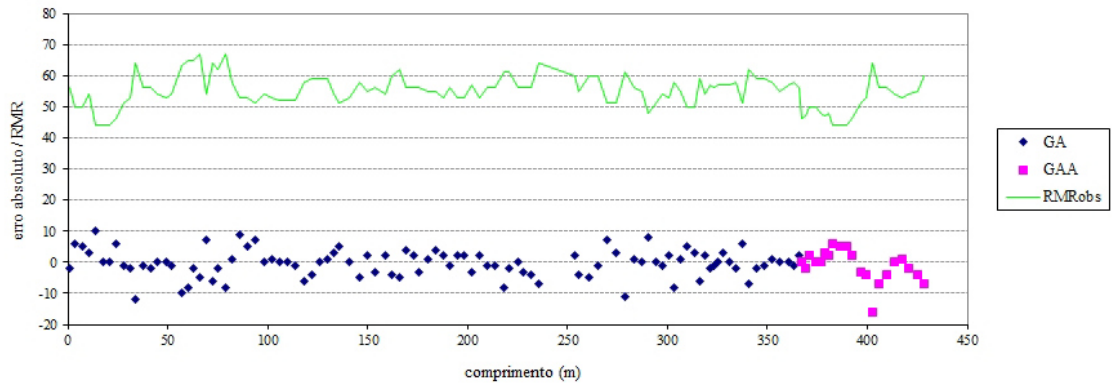


Figura A8.23 – AHB: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimativa por redes neurais

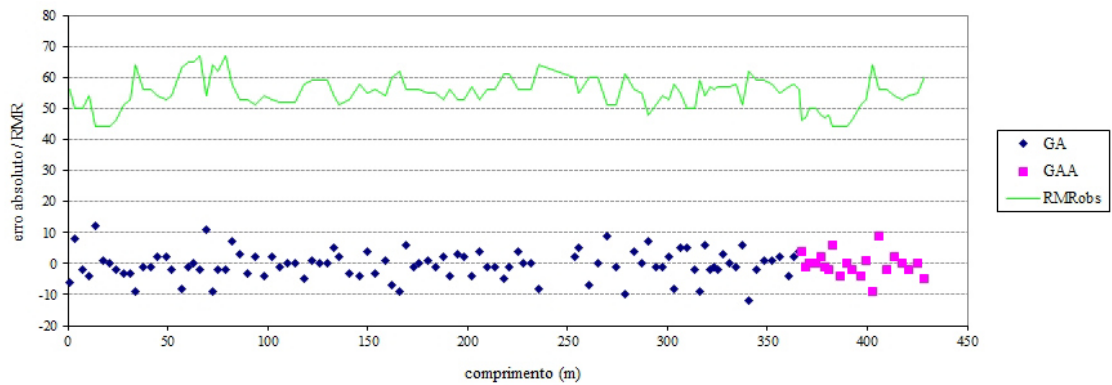


Figura A8.24 – AHB: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimativa por modo empírico por um especialista

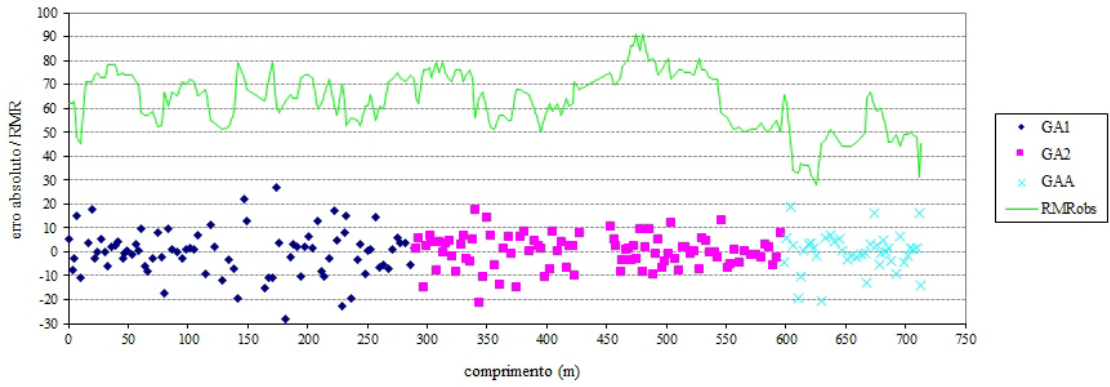


Figura A8.25 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 3 valores

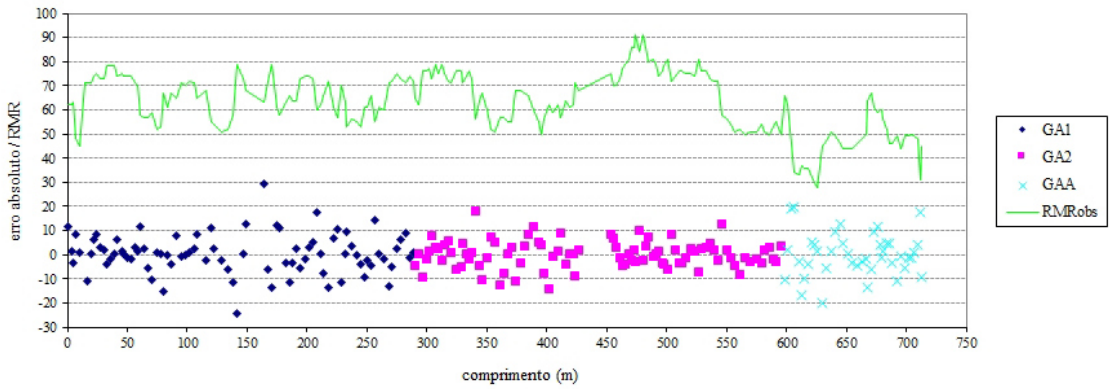


Figura A8.26 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 5 valores

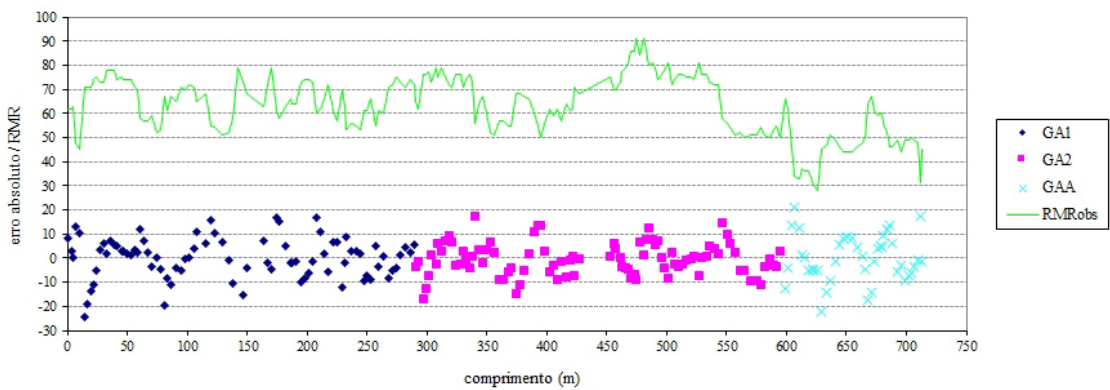


Figura A8.27 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavao e erro absoluto da estimacão por regressão com base nos últimos 10 valores

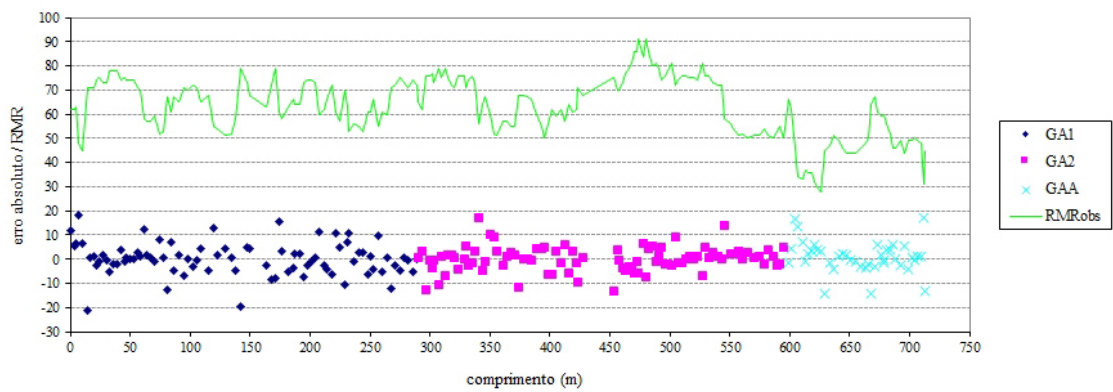


Figura A8.28 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por krigagem

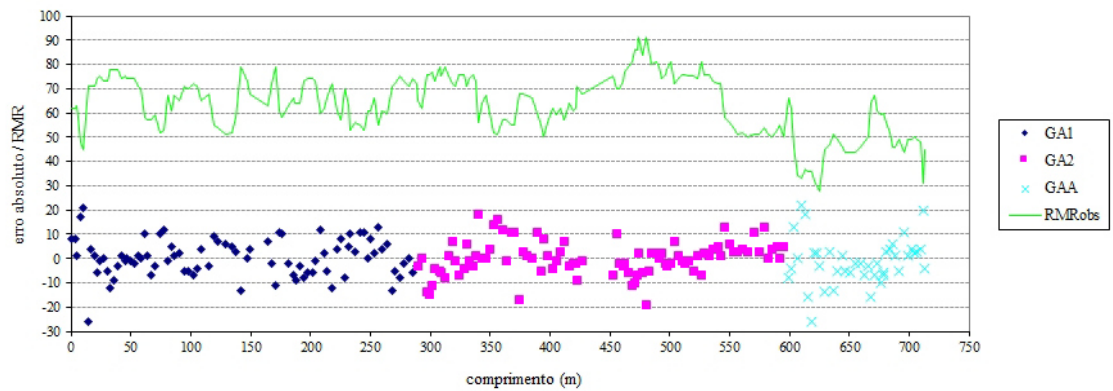


Figura A8.29 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por redes neurais

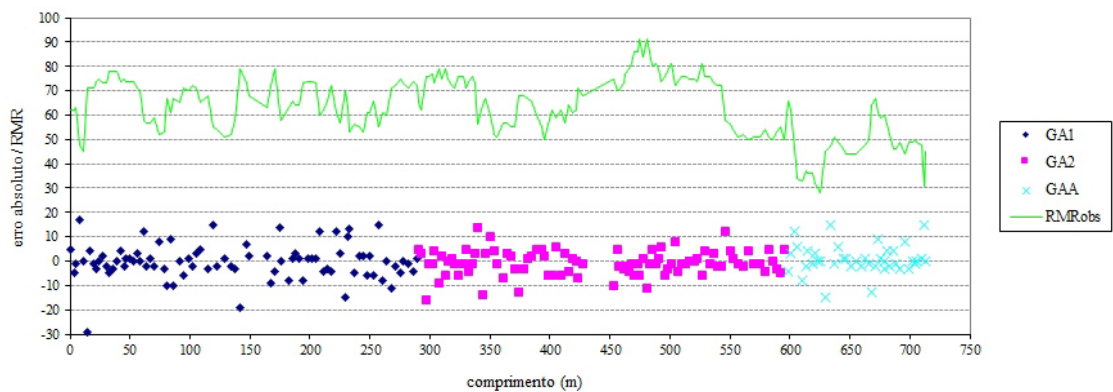


Figura A8.30 – AHA: índice RMR observado ao longo da escavação e erro absoluto da estimação por modo empírico por um especialista

APÊNDICE IX

GESTÃO DE RISCOS NA FASE INICIAL DA CONSTRUÇÃO

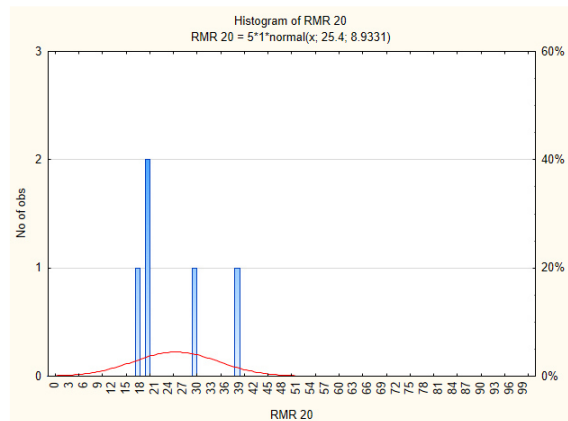
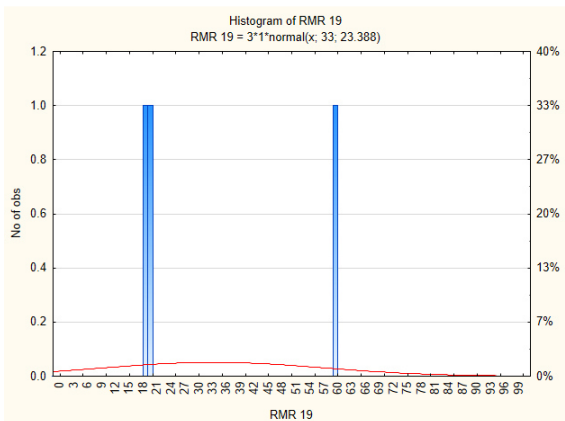
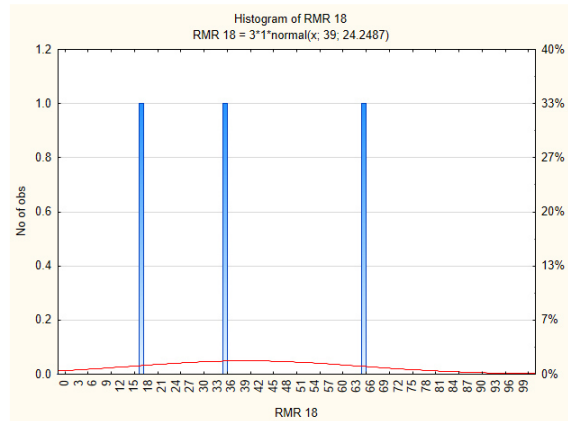
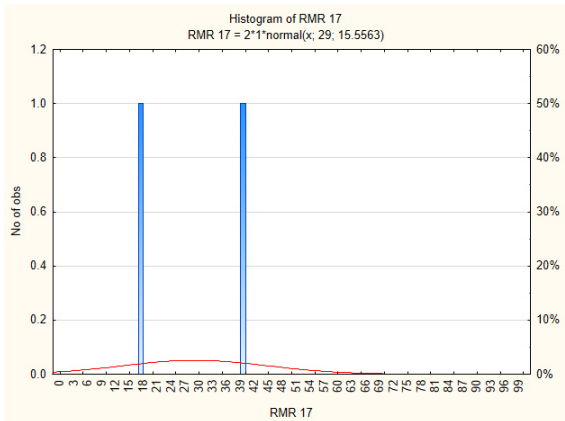
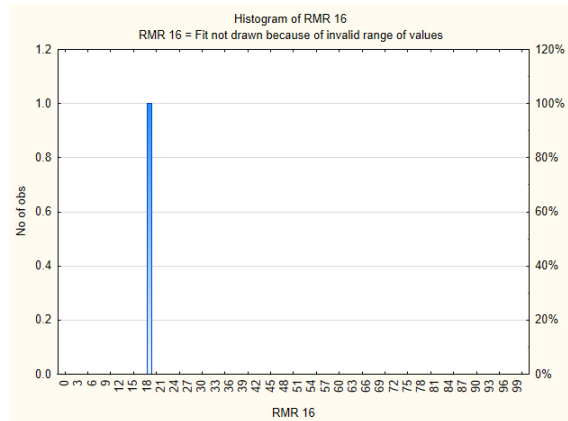
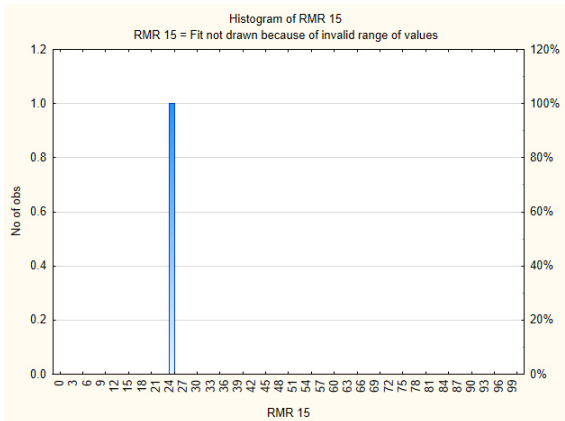
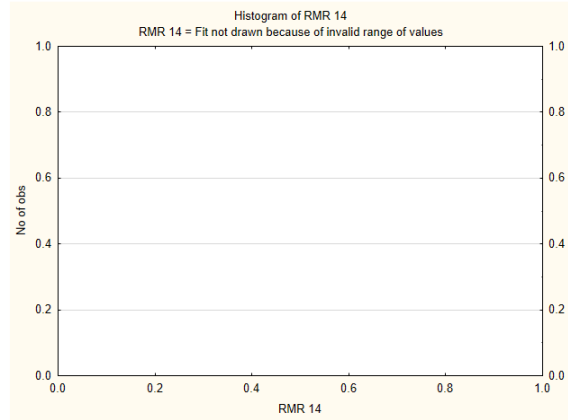
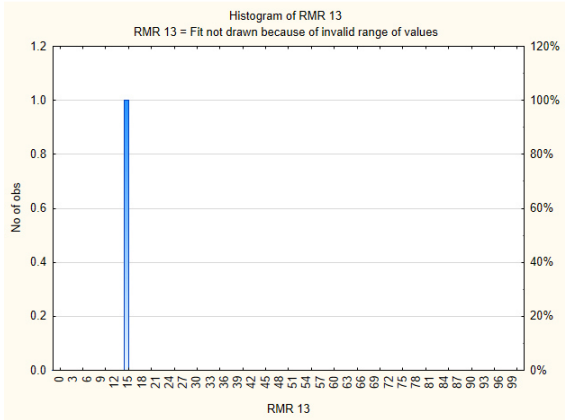
Tabela A9.1 – Lista de verificação desenvolvida para aplicar na fase inicial da construção

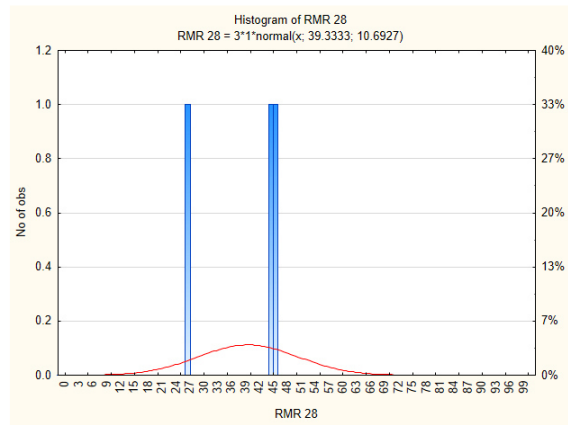
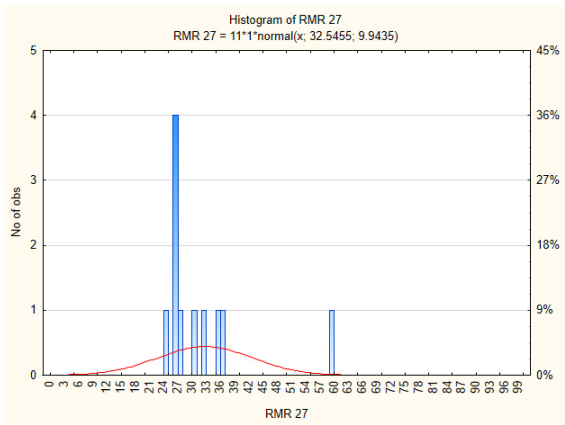
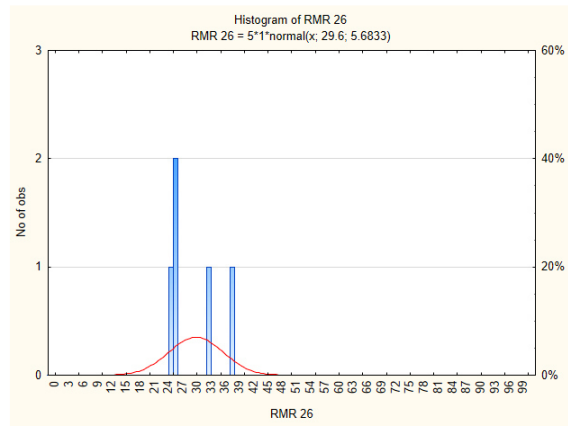
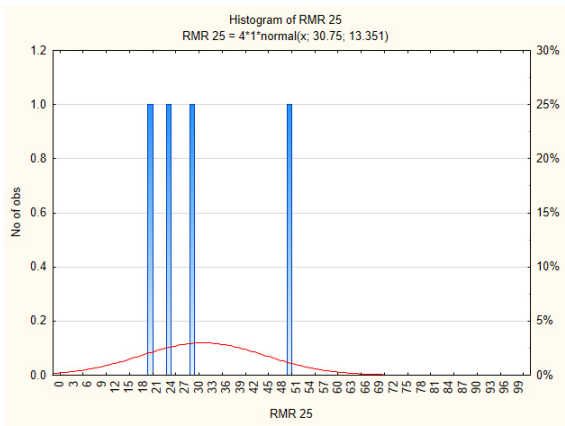
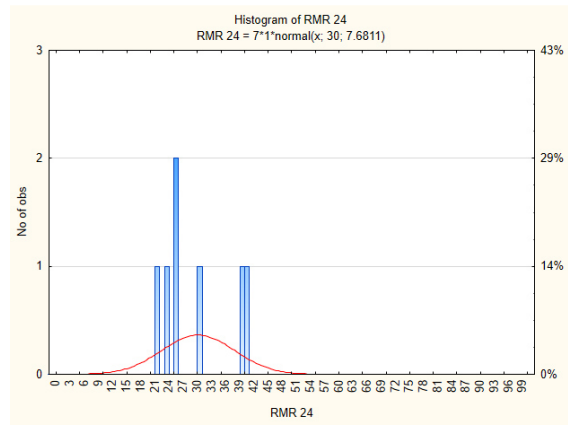
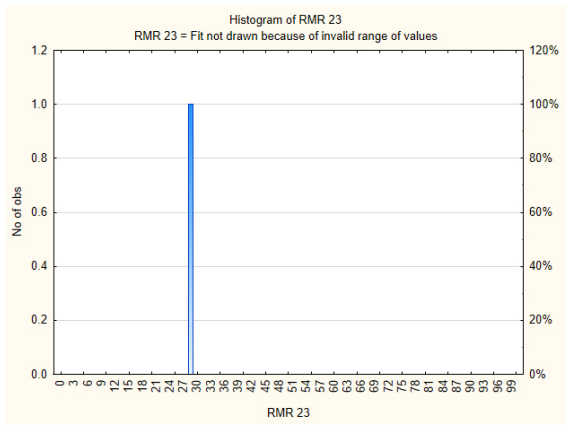
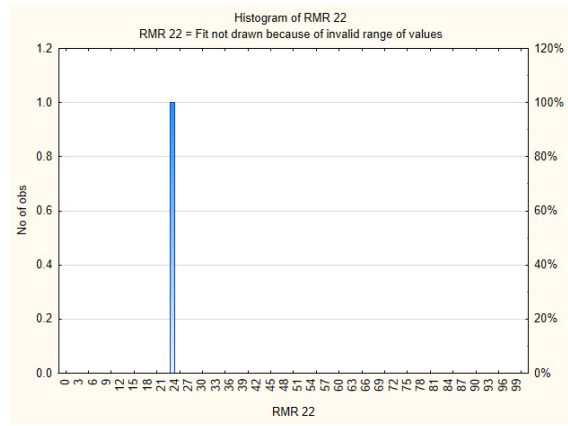
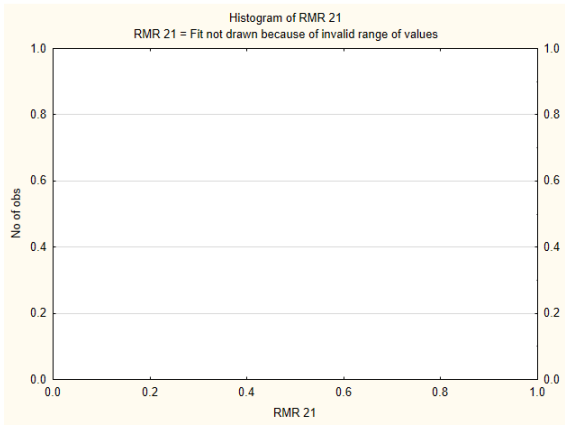
Risco	Perigo	Deteção	Dano potencial /Consequência	Medidas eliminatórias ou mitigadoras	Medidas optimizadoras	Risco residual
R1.1 Conhecimento insuficiente dos riscos geotécnicos	A ausência de um processo de gestão de riscos na fase anterior à construtiva leva à impossibilidade de identificar, analisar e avaliar os riscos Ausência de medidas de mitigação ou eliminação dos riscos	Verificar os documentos existentes e disponíveis que chegam à fase construtiva	Instabilidade da escavação; perda de vidas; desgaste e/ou perda de equipamentos. Riscos mais frequentes e potencialmente com consequências mais significativas. Todos os riscos têm de ser geridos na fase construtiva com eventual acréscimo de custos financeiros e prazo de execução	Análise das particularidades da obra e do cenário geotécnico em que se insere Síntese de riscos de obras semelhantes Definição do sistema de gestão de risco geotécnico	Integração do sistema de gestão de risco nas metodologias executivas	Eventual presença de riscos que não é possível eliminar sem alteração de localização do túnel
R1.3 Estudos geológicos pouco desenvolvidos ou pormenorizados	Ocorrência de cenários geológicos não previstos Conhecimento incompleto das condições geológicas Incapacidade de identificação e caracterização de situações particulares, como zonas tectonizadas	Analisar os elementos disponíveis e identificar as zonas onde existem dúvidas Identificar a presença de zonas tectonizadas e avaliar a informação disponível Realizar nova interpretação dos dados	Ausência de métodos e meios (equipamentos) para responder a variações do terreno e passar por zonas adversas com fracas características do maciço Custos acrescidos com mobilização de equipamentos não previstos Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Realização de estudos geológicos Realização de prospeção e ensaios	Desenvolver plano de prospeção e ensaios faseado, de modo a diluir custo ao longo do tempo e adaptar às necessidades	Eventual presença de cenários geológicos imprevisíveis Eventual impossibilidade de desenvolver o conhecimento existente por falta de tempo ou de meios
R1.3 Conhecimento insuficiente das condições geológicas	Caracterização geológica inadequada: - Levantamentos de superfície insuficientes - Perfis geológicos interpretativos insuficientes - Prospeção insuficiente para caracterizar o maciço - Variabilidade das condições geológicas	Analisar os elementos disponíveis Comparar dos elementos disponíveis com habitualmente realizado em outros projetos semelhantes Analisar a complexidade geológica e rever os elementos disponíveis	Informação insuficiente para o projeto Metodologias construtivas desadequadas Meios de execução (equipamentos e organograma) desadequados Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Realização de estudos geológicos Realização de prospeção em avanço	Desenvolver plano de prospeção para a frente de escavação quando se verificar indícios de variação do maciço	Cenários não previstos (ex. zonas tectonizadas) Eventual impossibilidade de definir as condições geológicas na totalidade por falta de tempo ou de meios
R1.4 Conhecimento insuficiente das condições hidrogeológicas	Indefinição das condições hidrogeológicas regionais Ausência de estudo de caudais afluentes à escavação	Verificar os estudos realizados Realizar nova interpretação dos dados	Impossibilidade de definir plano de bombagem Afetação de eventuais aquíferos e meio ambiente envolvente com potencial rebaixo do nível freático e alteração dos caudais de nascentes e linhas de água Eventual afetação das captações de terceiros Potencial instabilidade da escavação Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Realização de estudos hidrogeológicos Avaliação de potenciais aquíferos Estimação de caudais afluentes	Abordagem à escavação do túnel pelo lado ascendente se possível	Eventual impossibilidade de contornar aquíferos Problemas de estabilidade
R1.5 Conhecimento insuficiente das características geotécnicas do maciço	Estudos geológicos geotécnicos pouco desenvolvidos que impossibilitem a identificação das características mais prováveis e/ou mais gravosas Concentração de tensões	Analisar os elementos disponíveis e confirmar a caracterização realizada. Realizar nova interpretação dos dados	Informação insuficiente para o projeto Impossibilidade de utilizar o MO <i>ab initio</i> Impossibilidade de adequação imediata da contenção às reais condições encontrada Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Caracterização do maciço Realização de ensaios Criação ou desenvolvimento de modelos geotécnicos	Caracterização faseada e sectorizada, adaptada ao faseamento da obra Modelos geotécnicos evolutivos com adição de novos dados	Eventual ocorrência de cenários não previstos Eventual impossibilidade de analisar dados por falta de tempo ou de meios
R1.6 Ausência de RGR	Informação insuficiente sobre as condições geotécnicas de referência	Analisa os documentos disponíveis na fase inicial da construção	Ausência de conhecimento geotécnico claro e de abordagem desadequada à fase construtiva. Disputas judiciais com inerentes custos financeiros	Realização de um RGR ainda na fase inicial da construção	Realização do RGR com a colaboração dos especialistas das diferentes entidades envolvidas na construção	Eventual constatação da presença de cenários não contemplados na proposta de execução vencedora
R1.7 Indefinição do zonamento geotécnico	Caracterização do maciço insuficiente Omissão de enquadramento do maciço em zonas geotécnicas Omissão dos cenários geotécnicos a atravessar pela escavação	Verificar a existência de zonamento geotécnico no projeto e características consideradas em cada uma das zonas e sua fundamentação	Impossibilidade de definir contenção adequada para os cenários geotécnicos que possam ocorrer Possibilidade de deformação exagerada e eventual colapso por défice de contenção Custos acrescidos por défice ou excesso de contenção Dilatação do prazo de execução	Caracterização do maciço e realização de um zonamento geotécnico Adoção de metodologias eficientes perante as características do zonamento	Adequar a contenção necessária para garantir a estabilidade da escavação a cada zona geotécnica abordagem dinâmica de verificação da contenção	Possibilidade de zonamento desajustado relativamente à contenção preconizada
R1.8 Omissões ou insuficiência de estudos de comportamento mecânico do maciço	Omissão do estudo de comportamento geomecânico do maciço (modelação): - Deformações espectáveis na periferia da escavação - Estudo de fracturação com identificação de potenciais blocos e cunhas prováveis de se destacarem	Verificar os elementos disponíveis sobre estudo de fracturação do maciço e o seu desenvolvimento na previsão da presença de blocos e cunhas na periferia da escavação	Excesso ou défice de contenção preconizada no projeto perante as reais condições encontradas Possibilidade de deformação exagerada e eventual colapso por défice de contenção Perda de vidas e de equipamentos Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Desenvolvimento dos estudos geológicos e geotécnicos Contemplar possibilidade de cenários adversos Confirmação dos pressupostos do projeto e sua revisão	Faseamento dos estudos adaptado às necessidades das frentes de obra Inclusão de novos dados disponíveis da deformação do maciço	Possibilidade de ocorrência de comportamento não previsto

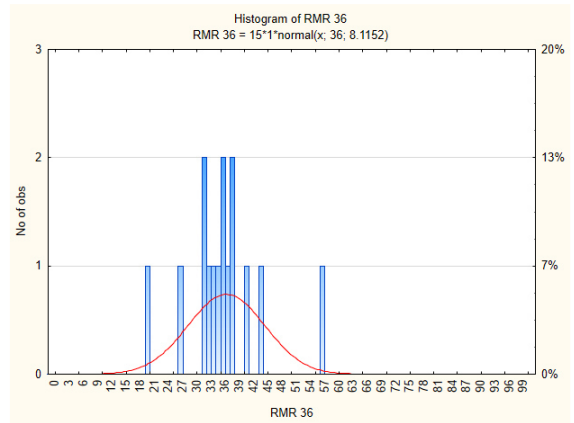
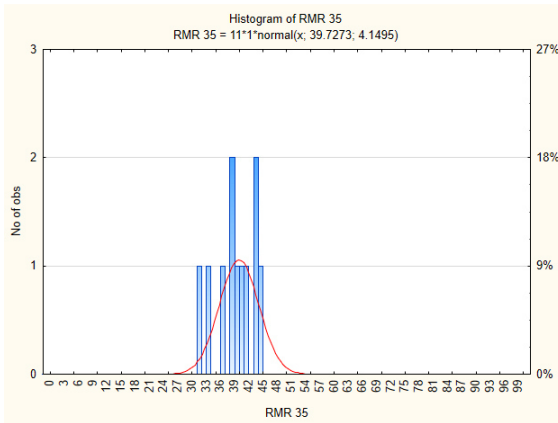
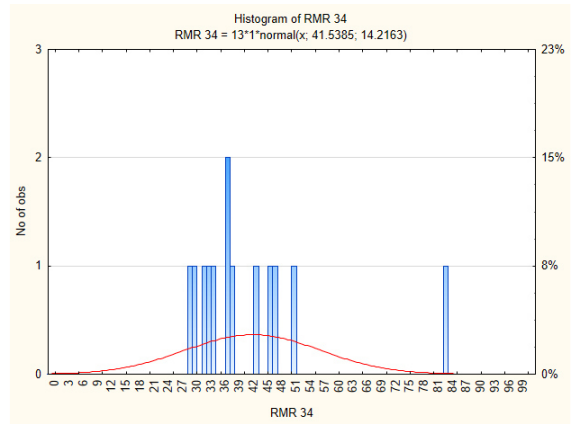
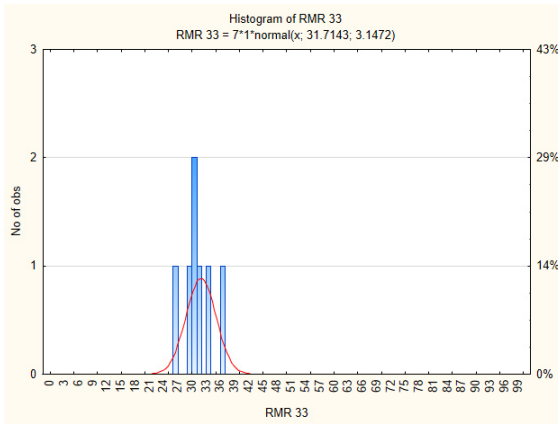
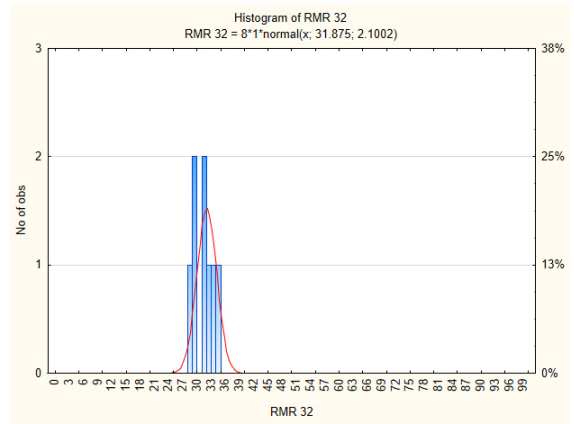
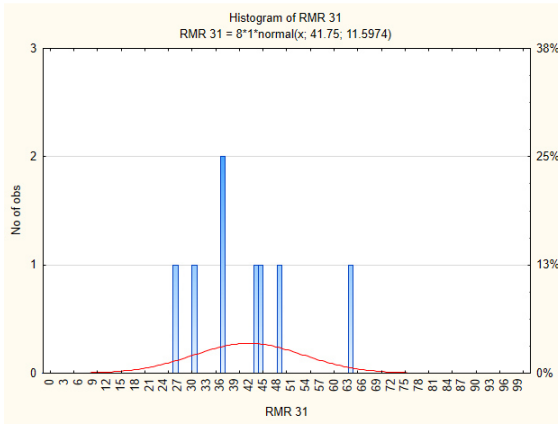
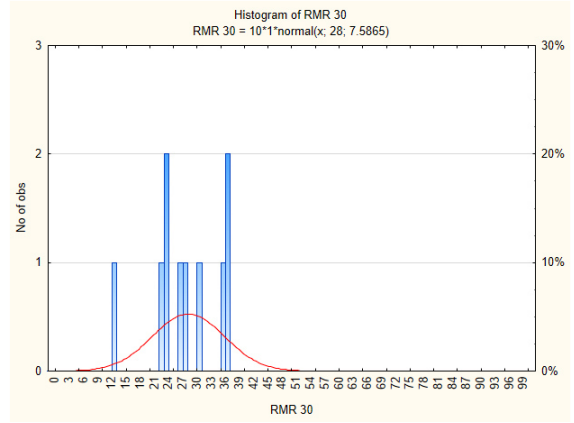
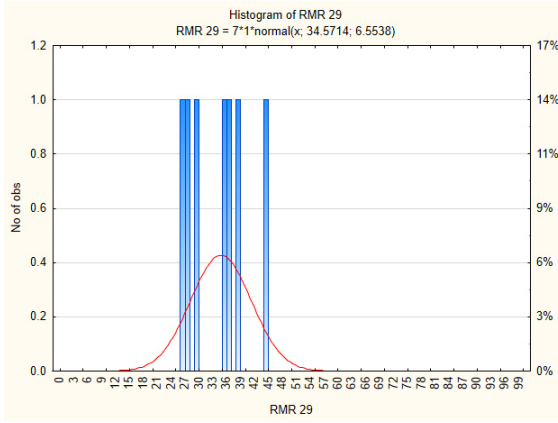
Risco	Perigo	Deteção	Dano potencial /Consequência	Medidas eliminatórias ou mitigadoras	Medidas optimizadoras	Risco residual
R1.9 Ausência ou inadequação do plano de instrumentação geotécnica	Ausência de plano de instrumentação com definição de dispositivos de observação adequados e sua localização Impossibilidade de medição das deformações do maciço	Verificar se o projeto contempla um plano de instrumentação	Possibilidade de ocorrência de deformações e instabilidade sem serem detetadas Impossibilidade de intervenção atempada em caso de deformações excessivas Perda de vidas e equipamentos Impossibilidade de otimizar contenção Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Elaboração ou desenvolvimento do plano de instrumentação Reforço de contenção	Revisão da quantidade de equipamentos e localização em função das deformações observadas	Ocorrência de deformação excessiva entre pontos com dispositivos de observação
R1.10 Ausência ou inadequação do plano de monitorização	Ausência de plano de monitorização com definição de frequência mínima de leituras e níveis de alerta e alarme para a deformações medidas Impossibilidade de medição das deformações do maciço Falta de monitorização	Verificar se o projeto contempla um plano de monitorização, o qual pode estar integrado no plano de instrumentação	Possibilidade de ocorrência de deformações excessivas e instabilidade sem serem detetadas Impossibilidade de intervenção atempada em caso de deformações excessivas Perda de vidas e equipamentos Impossibilidade de otimizar contenção Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Elaboração ou desenvolvimento do plano de monitorização Reforço de contenção	Adequar a frequência de leituras à dimensão ou taxa de evolução das deformações observadas	Ocorrência de deformação excessiva entre leituras sucessivas
R1.11 Ausência ou omissão de recurso ao MO	Impossibilidade de resposta célere e adequada à heterogeneidade do maciço Falta de flexibilidade de medidas a implementar na ocorrência de cenários não contemplados	Verificar as metodologias preconizadas para abordagem à construção Verificar se o recurso ao MO está previsto ou no mínimo a uma metodologia semelhante baseada na mesma filosofia	Resposta a novas situações que impossibilitem intervenções atempadas, com défice ou excesso de contenção. Possibilidade de ocorrência de instabilidade da escavação Perda de vidas e equipamentos Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Verificação dos estudos geológicos e geotécnicos Definição das características mais prováveis e das mais adversas do maciço e comparação com o observado no local Implementação do MO	Aplicar contenção de forma faseada e monitorizar as deformações para otimizar a quantidade de contenção aplicada Revisão periódica do projeto, com inclusão de novos dados	Possibilidade do terreno observado ser diferente do preconizado
R1.12 Inflexibilidade do projeto na adaptação às reais condições	Ausência de consideração de cenários heterogéneos Falta de soluções variantes que se adaptem às reais condições geológicas e geotécnicas encontradas Impossibilidade de recurso ao MO	Verificar os elementos do projeto Verificar justificação para o maciço ter sido considerado homogéneo	Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Desenvolvimento do projeto considerando a possibilidade de ocorrência de diferentes cenários geotécnicos Acompanhamento permanente da execução por parte do projetista	Considerar a possibilidade de ocorrência de novos cenários geológicos e geotécnicos Considerar os novos dados disponíveis Considerar soluções alternativas mais adequadas	Medidas preconizadas desajustadas das condições geotécnicas observadas
R1.13 Não antecipação de cenários geotécnicos adversos	Ausência de prospeção na frente de escavação	Verificar as metodologias de acompanhamento da escavação no âmbito da geologia e geotecnia que considerem a hipótese de realizar prospeção em avanço	Impossibilidade em detetar variações bruscas da resistência do terreno, de zonas tectonizadas e com água Impossibilidade de mobilização de meios adequados atempadamente	Prospeção na frente de escavação Consideração da furação para utilização de explosivo para verificar a qualidade do terreno	Realização de prospeção integrada com os ciclos de escavação. Análise dos tempos de furação/escavação.	Possibilidade de não detetar situações graves porque a prospeção é pontual
R1.14 Ausência de abordagem técnico-científica	A abordagem à escavação segue o princípio de escavar primeiro e só depois realizar os estudos (<i>drive as we go</i>) Falha de conhecimentos técnicos Ocorrência de cenários não previstos	Verificar elementos disponíveis em projeto que permitam a construção	Meios desadequados na abordagem à construção Possibilidade de colapso por intervenções desadequadas Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Acompanhamento permanente por parte de especialistas nas diferentes áreas de estudo envolvidas na construção	Implementação de gestão de riscos que permita a optimização dos procedimentos executivos mantendo o nível de risco em tolerável	Falta de comunicação atempada entre especialista que leve à tomada de decisões tardias
R1.15 Falha na identificação das reais condições do maciço	Ausência de acompanhamento técnico por operadores experientes e especialistas	Verificar a presença de técnicos experientes e especialista no acompanhamento da obra	Impossibilidade de identificação atempada de cenários adversos Possibilidade de colapso Meios e metodologias desadequados Perda de vidas e equipamentos Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Acompanhamento da fase construtiva por parte de especialista na área da engenharia geológica Definição de metodologias a implementar para deteção de situações de risco	Interligar a gestão de riscos geotécnicos no acompanhamento técnico da obra para adequar o projeto e metodologias de execução às reais condições observadas	Utilização de metodologias demasiado simplistas ou complexas que impeçam a transmissão adequada de dados
R1.16 Produtividade baixa	Metodologias e equipamentos desadequados para as condições geológicas e geotécnicas reais	Verificar adequação das metodologias e equipamentos previstos para a construção relativamente às condições geológicas e geotécnicas presentes	Custos acrescidos com danos e eventual desgaste nos equipamentos. Prazo de execução acrescido por falta de rentabilidade dos equipamentos na execução	Revisões contínuas do projeto Contratação de entidades, técnicos e operacionais experientes neste tipo de obras Disponibilização de equipamentos adequados	Formação contínua das pessoas envolvidas	Falta de justificação para adaptação dos pressupostos do projeto Mobilização de meios adequados Avaria dos equipamentos
R1.17 Ausência de circuito de informação definido	Falha ou atraso na transmissão de informação de novos dados e elementos relevantes para o curso da construção ou de situações adversas Falha de informação em tempo útil	Verificar a existência de um procedimento para correspondência e troca de informação	Impossibilidade de adequação das medidas e métodos a implementar perante as reais condições geológicas e geotécnicas encontradas. Falta de fundamentação para as medidas necessárias ao desenvolvimento da construção Acréscimo de custos financeiros e do prazo de execução	Definição de circuitos de informação de modo simples e claro, com informação organizada, concisa e objetiva	-	Possibilidade de falha humana na transmissão da informação

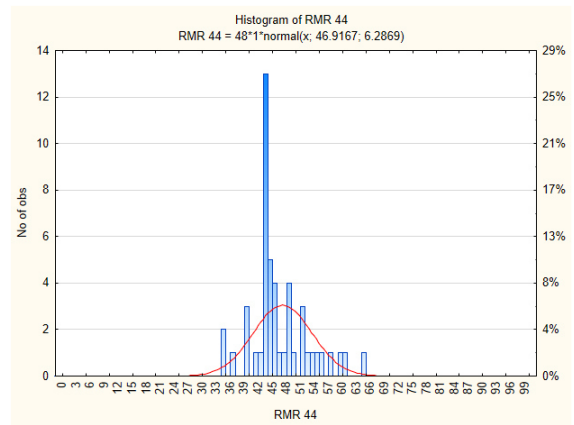
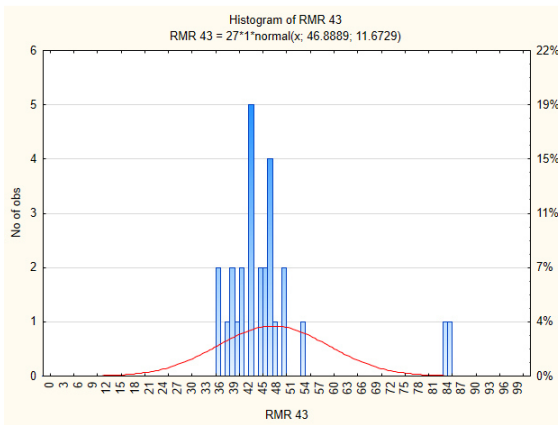
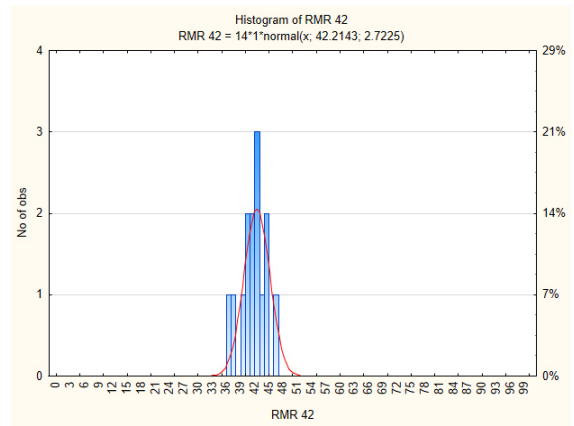
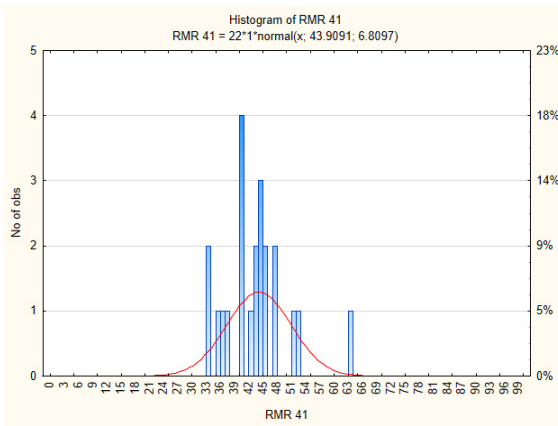
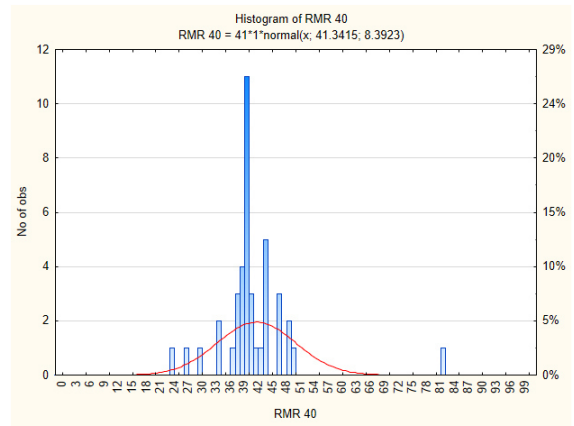
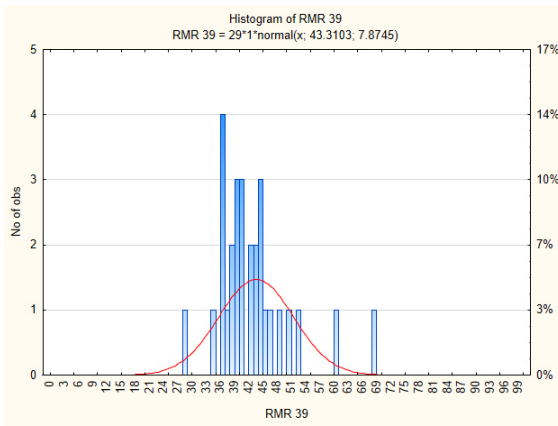
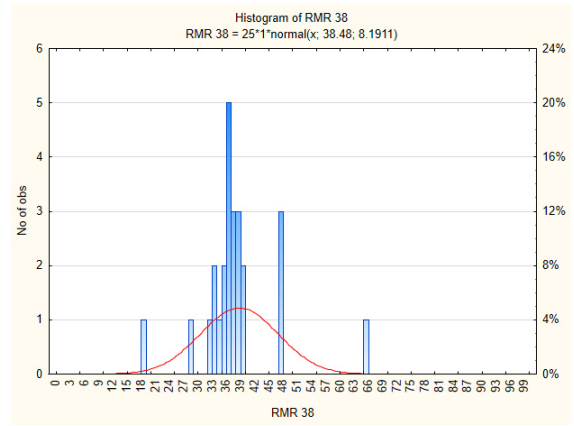
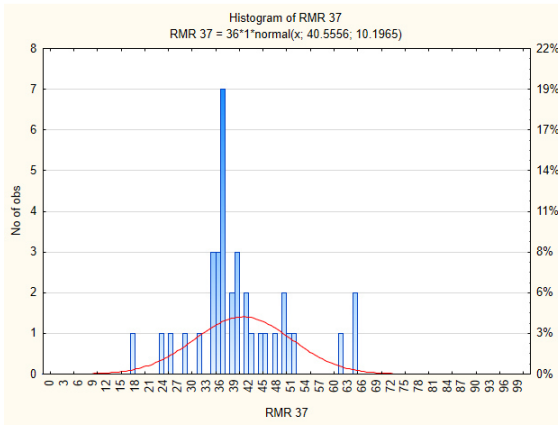
APÊNDICE X

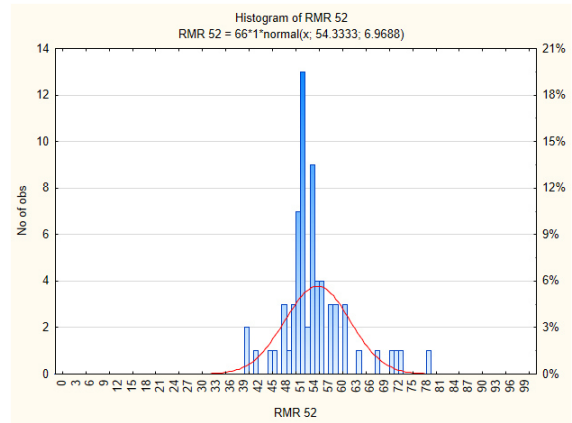
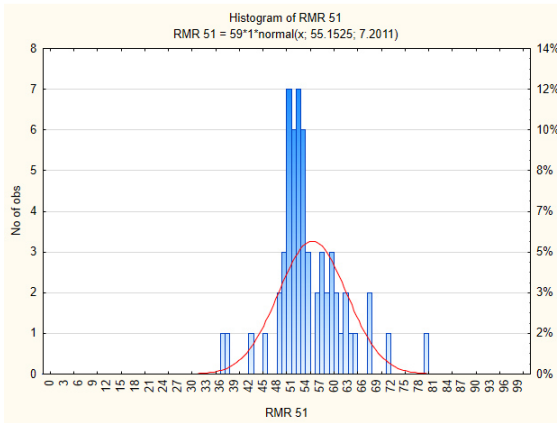
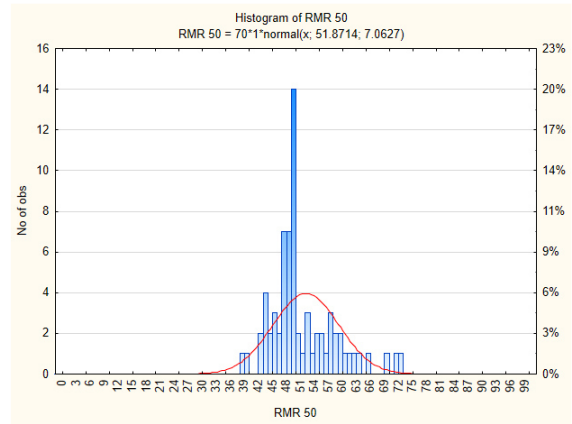
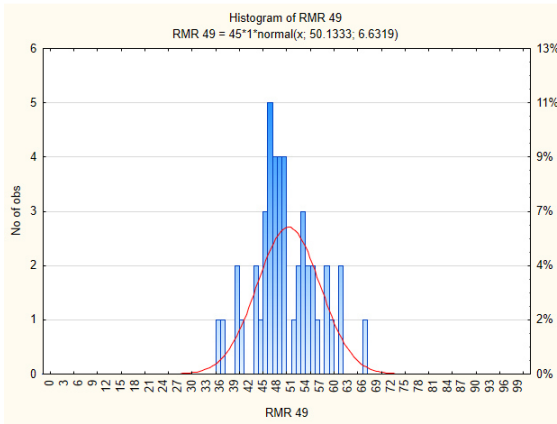
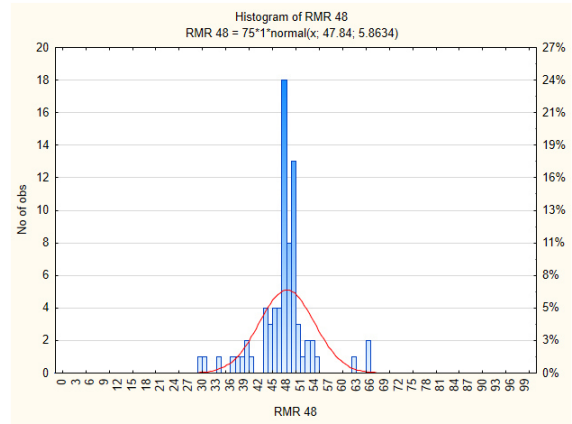
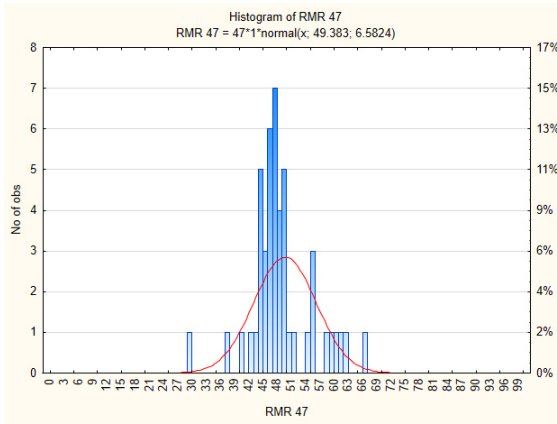
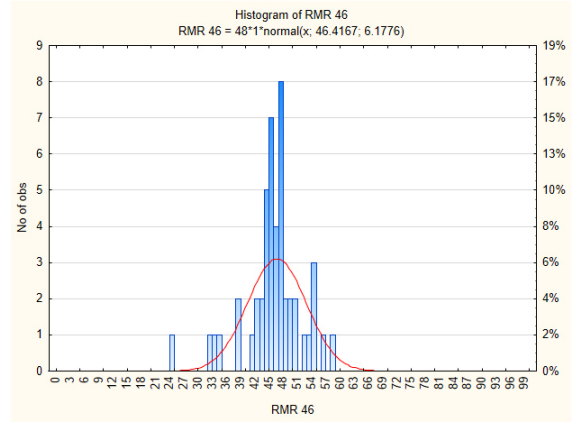
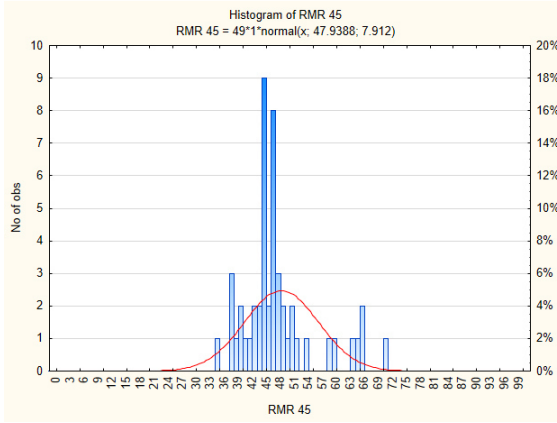
OCORRÊNCIA DOS VALORES DE RMR NA FRENTE SEGUINTE

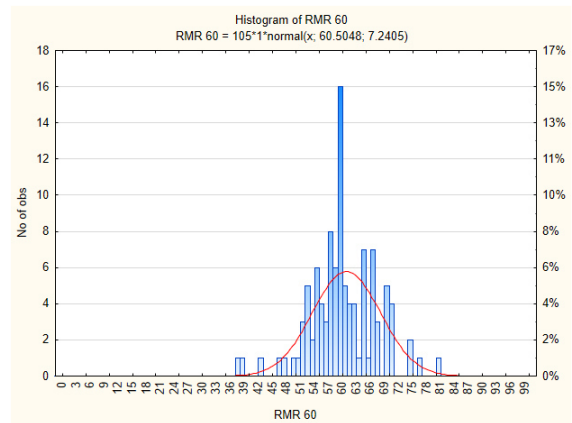
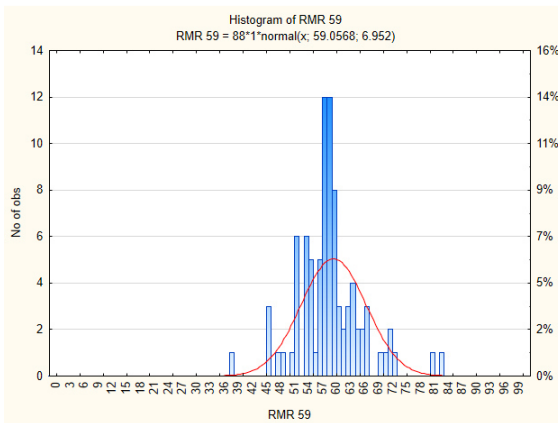
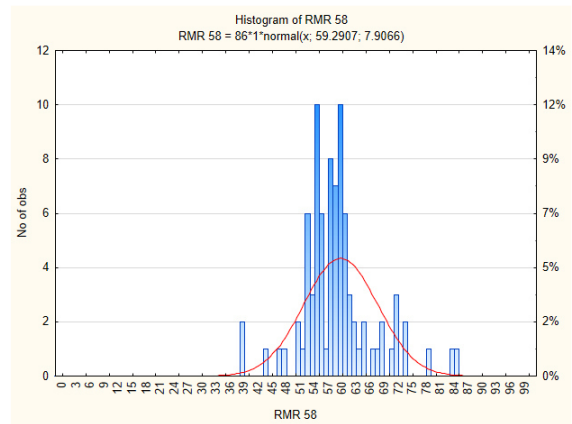
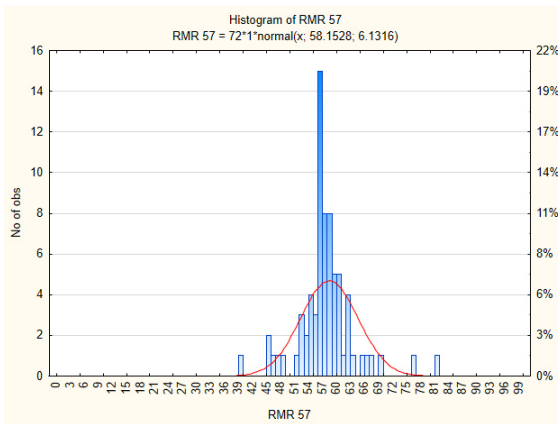
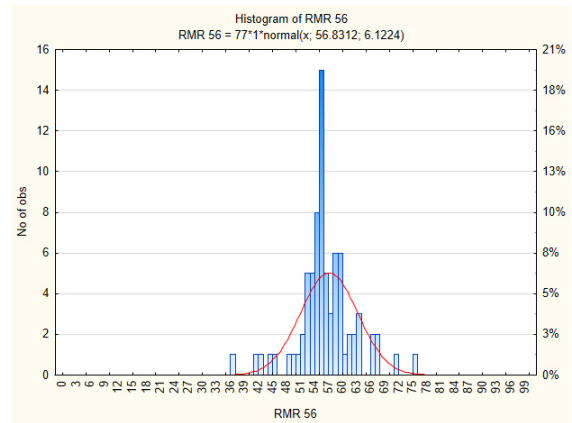
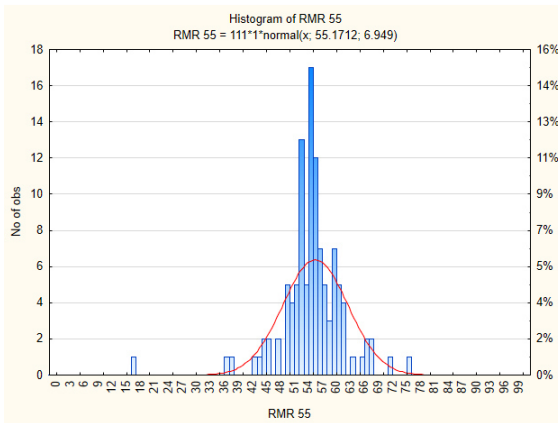
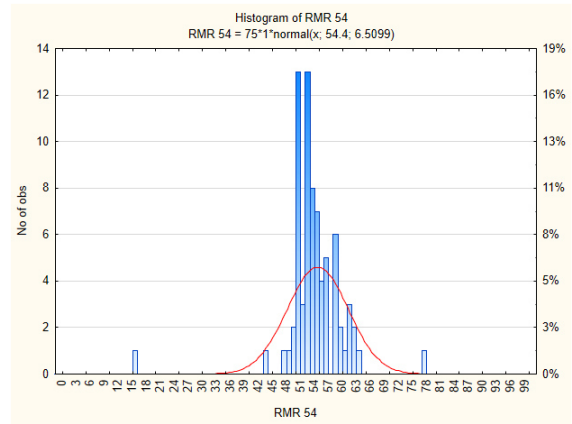
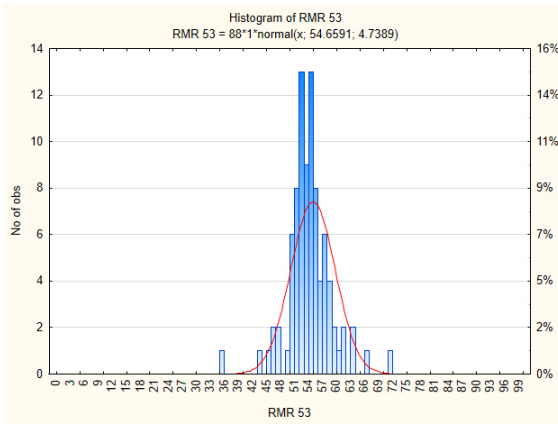


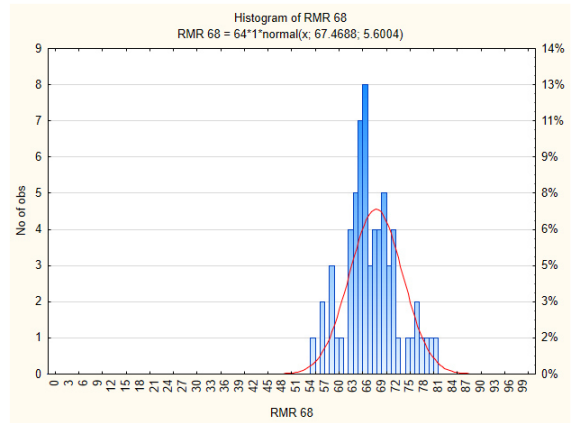
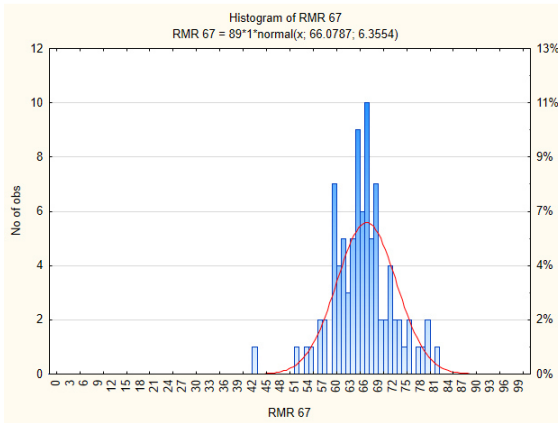
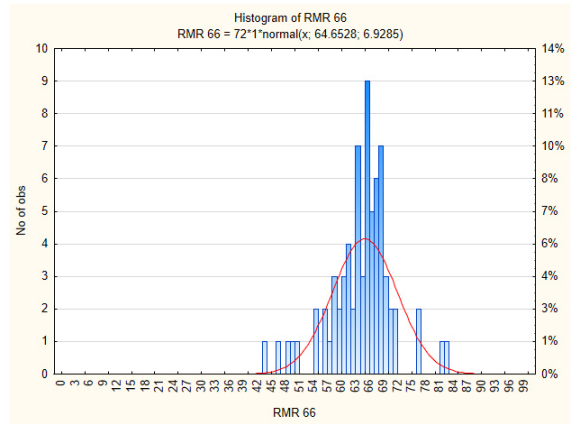
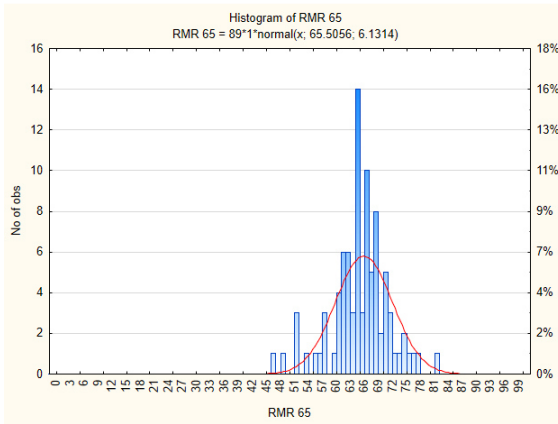
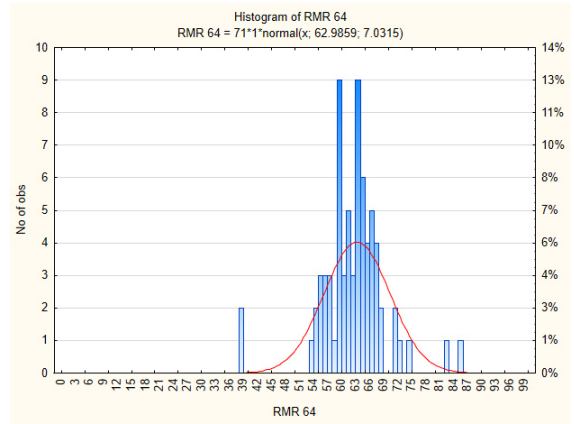
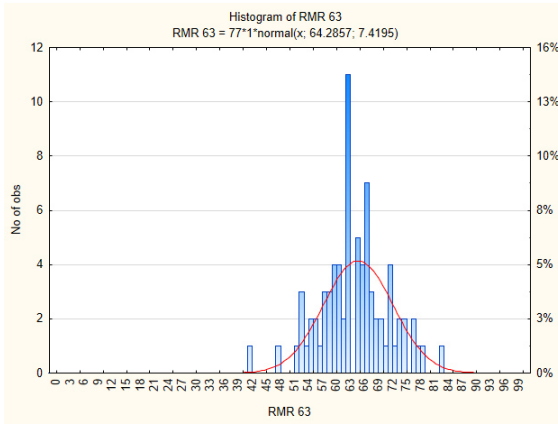
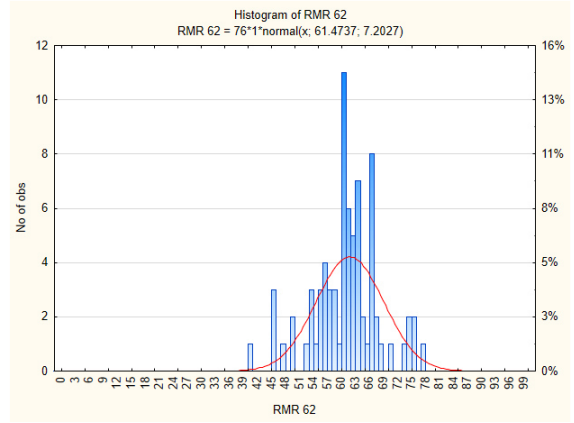
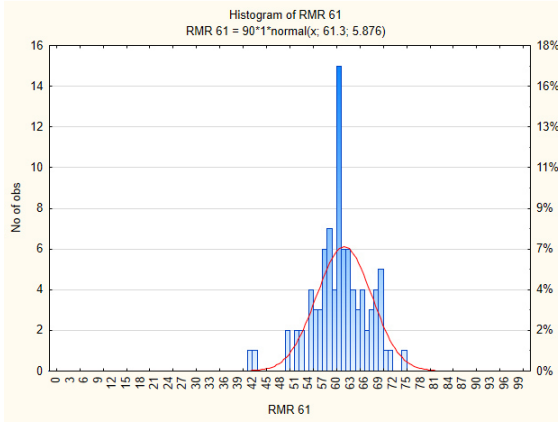


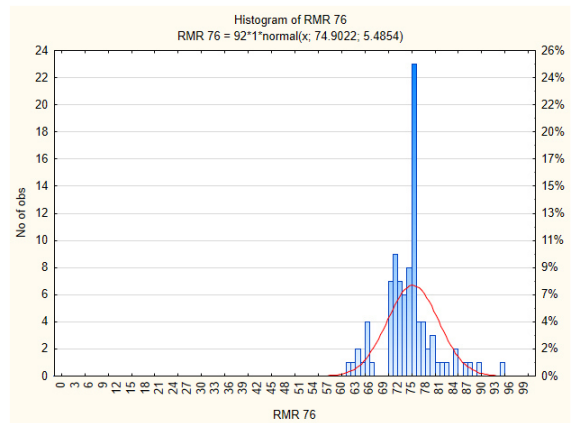
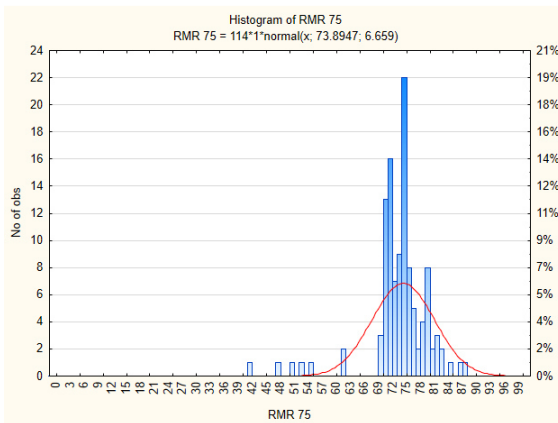
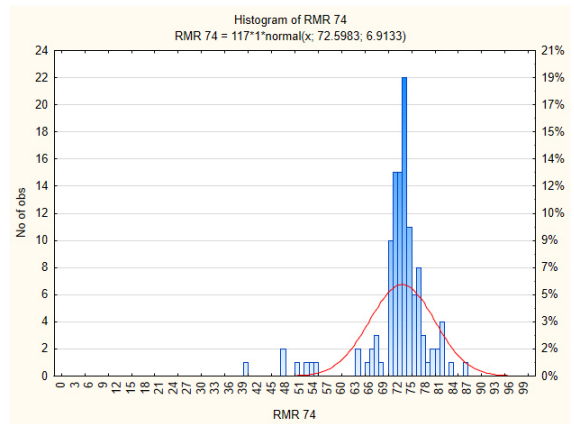
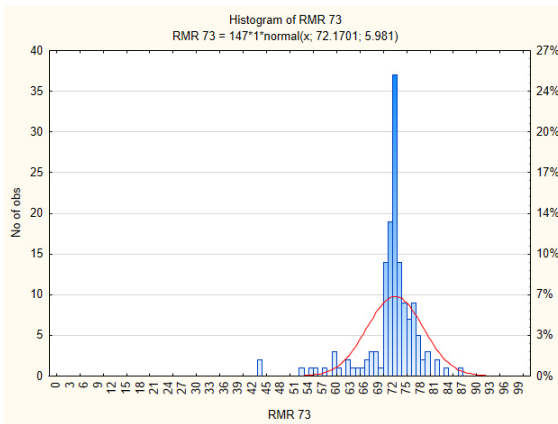
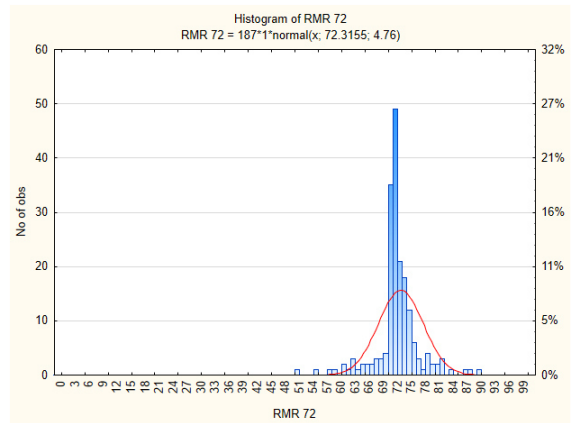
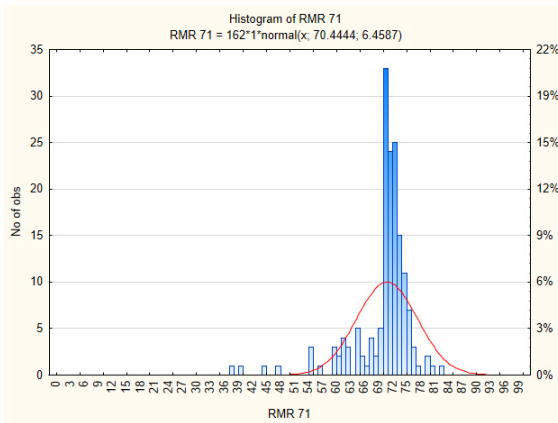
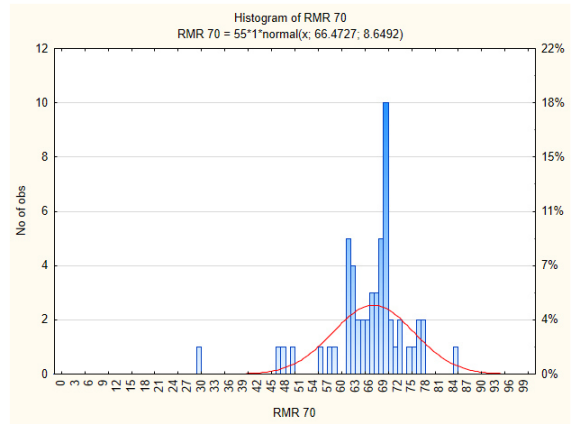
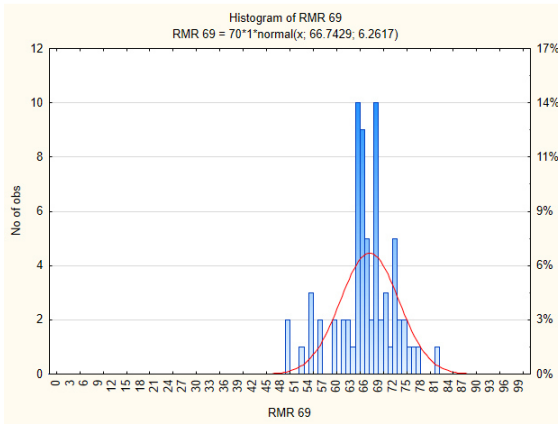


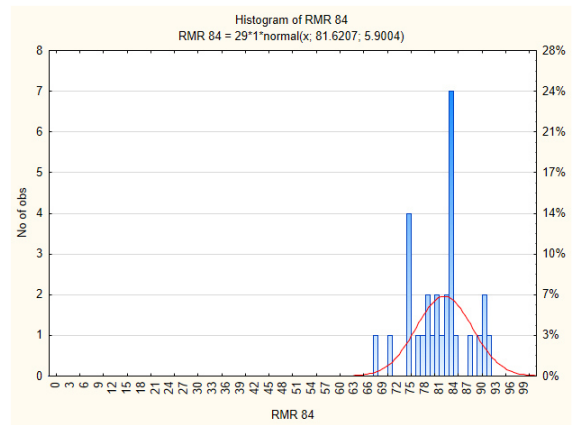
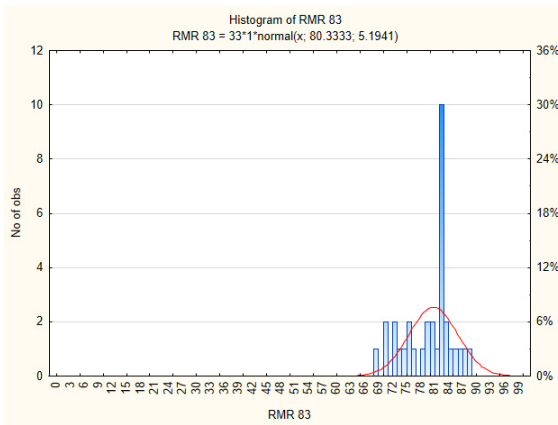
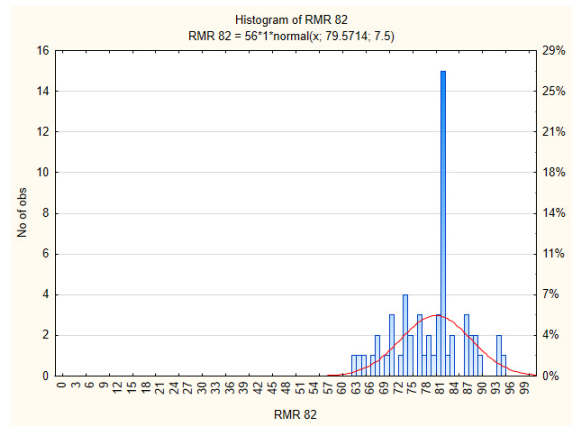
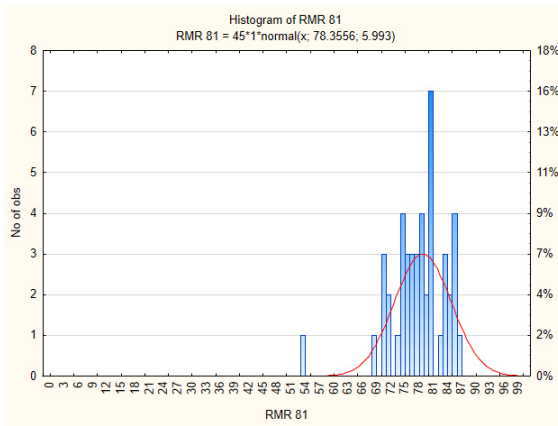
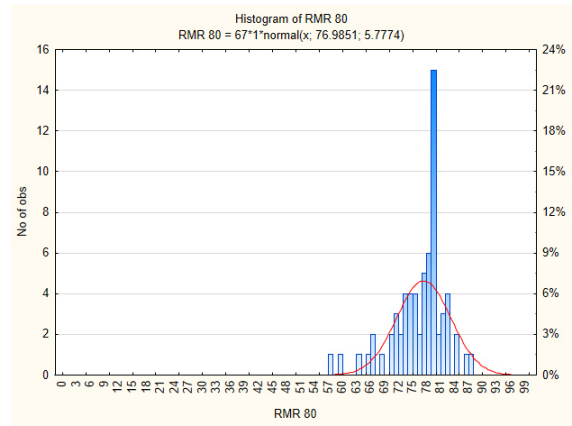
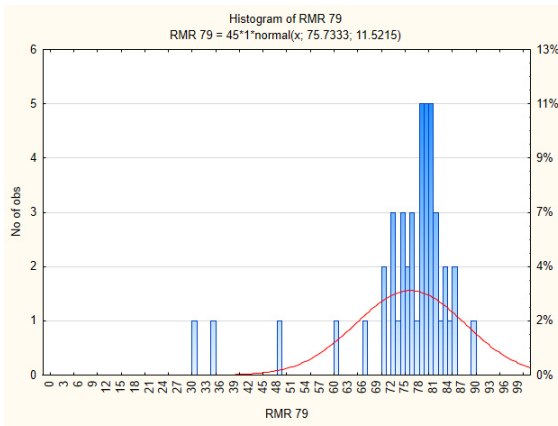
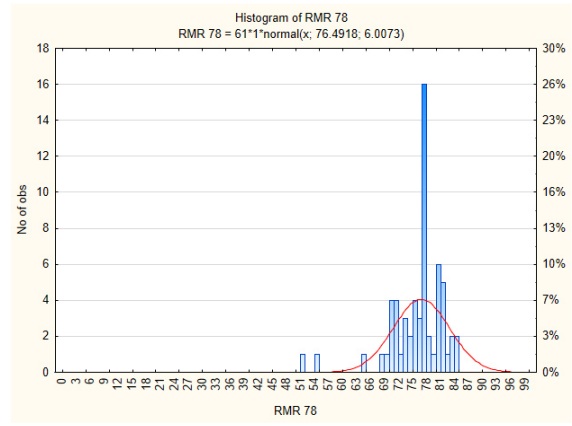
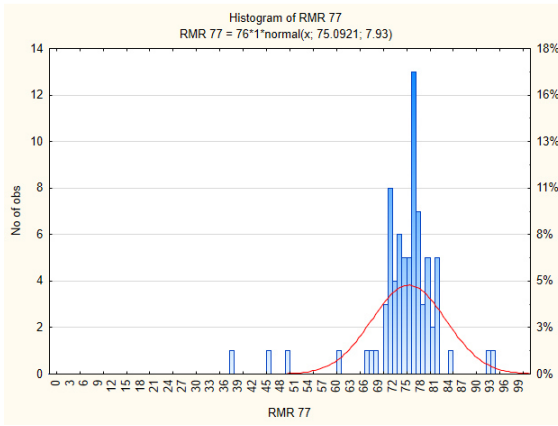


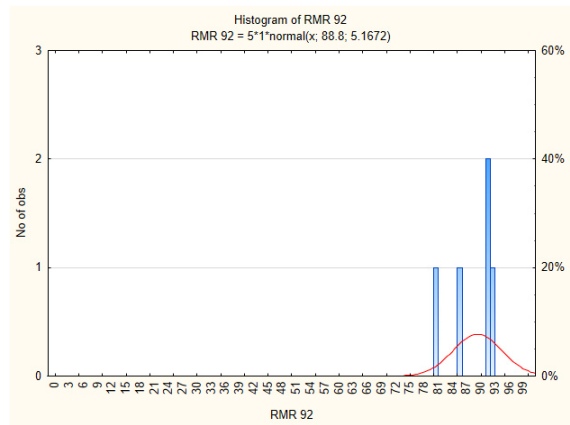
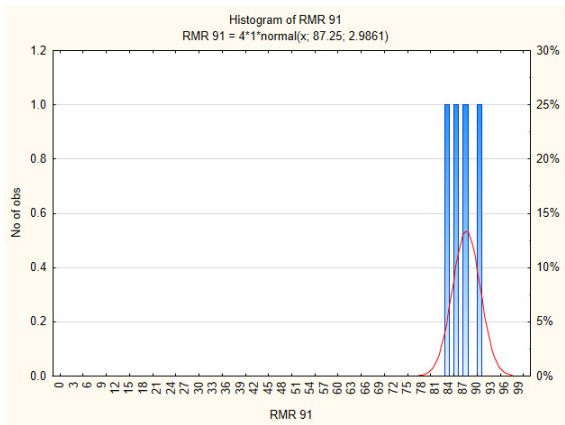
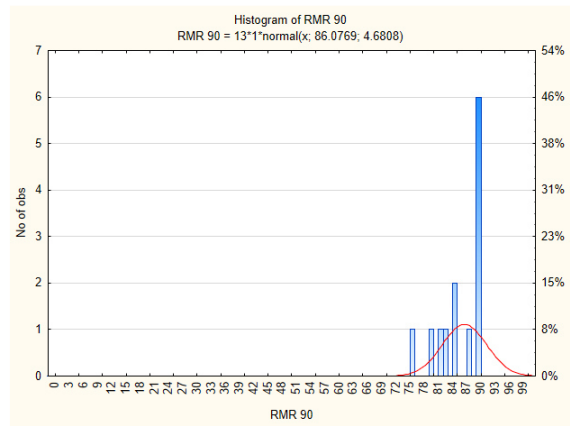
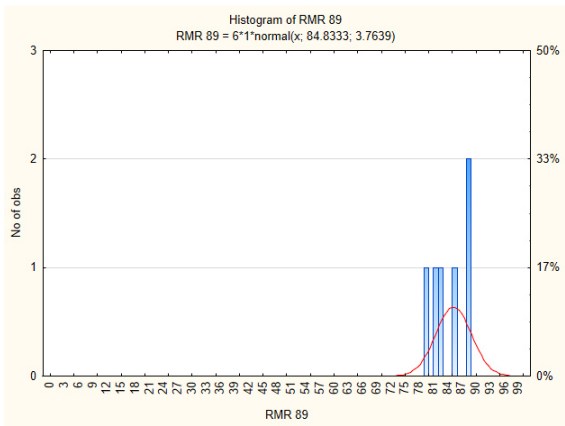
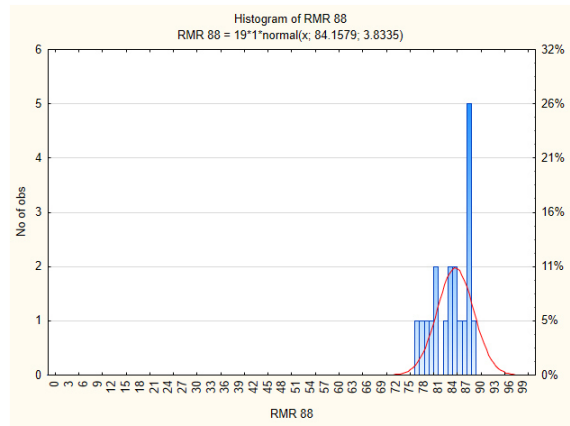
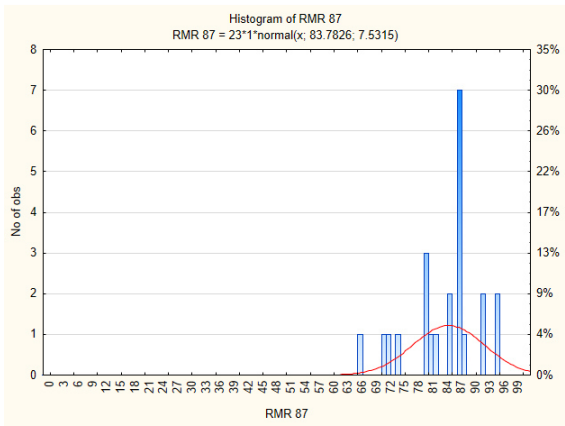
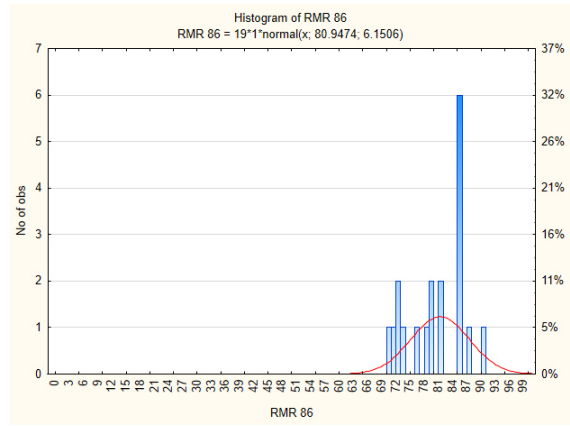
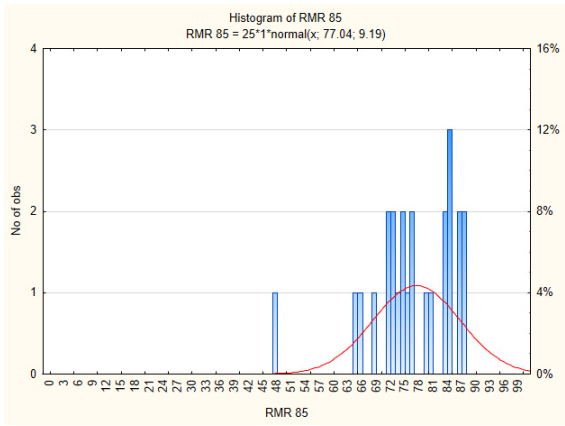


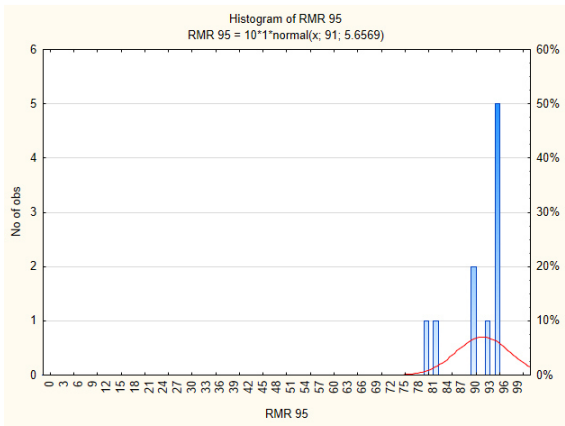
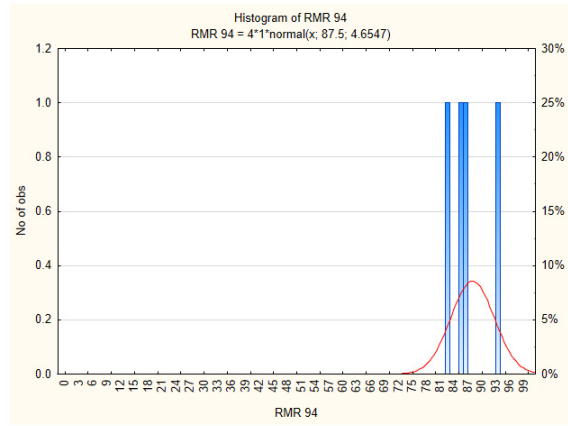
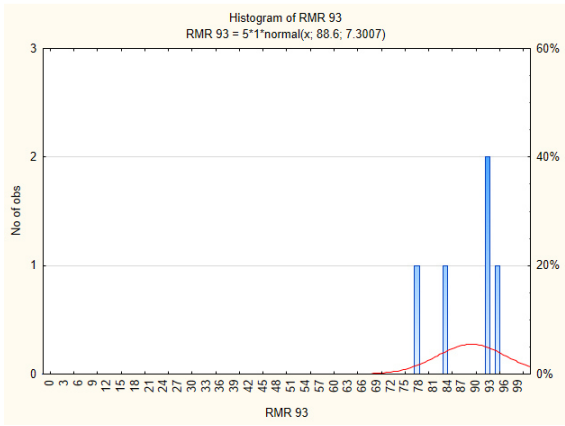












APÊNDICE XI

GESTÃO DE RISCOS NA FRENTE DE ESCAVAÇÃO

Tabela A11.1 - Lista de verificação desenvolvida para aplicar na frente de escavação

Risco	Perigo	Deteção	Dano potencial /Consequência	Medidas eliminatórias ou mitigadoras	Medidas optimizadoras	Risco residual
R2.1 Caracterização insuficiente da frente de escavação	Impossibilidade de análise de situações de rotura do maciço	Levantamentos geológicos e geotécnicos pouco pormenorizados Queda de material de modo descontrolado sem identificação dos mecanismos de rotura	Colapso ou queda isolada de blocos ou cunhas Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Acompanhamento da escavação por técnicos experientes apoiados por especialistas, utilizando metodologias com resultados comprovados	Avaliação periódica dos elementos recolhidos e verificação dos pressupostos e adequabilidade do projeto	Más condições de iluminação e visibilidade que impeçam caracterização rigorosa
R2.2 Erro na classificação geomecânica do maciço	Falta de meios e condições para a caracterização do maciço (segurança na frente de escavação, ensaios morosos) Falha na caracterização do maciço Erro na determinação da qualidade do maciço	Levantamentos geológicos e geotécnicos pouco pormenorizados Ausência ou realização de apenas uma classificação geomecânica	Défice ou excesso de contenção e do tempo de aplicação Possibilidade de instabilidade Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Utilização de pelo menos duas classificações geomecânicas, em que uma serve de verificação e validação da outra por recurso a correlações empíricas	Correlacionar os resultados das diferentes classificações com as deformações medidas para tentar determinar a mais adequada ao maciço presente	Diferença entre as duas classificações não justificada pela classificação. Possibilidade de erro nas duas classificações
R2.3 Falha na identificação da presença de cunhas e blocos	Ausência de projeção estereográfica das descontinuidades Ausência ou erro de caracterização das descontinuidades	Análise dos dados, pouco desenvolvida, com ausência de análise cinemática das descontinuidades	Possibilidade de situações de instabilidade por blocos ou cunhas Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Análise expedita na frente de escavação das descontinuidades ocorrentes e conjugação entre si. Realização de análise cinemática das descontinuidades ocorrentes, com identificação específica dos blocos ou cunhas suscetíveis de queda	Utilização de modelos simplificados, que permitam uma análise rápida e eficiente por parte do operador	Presença de descontinuidades que promovam a queda imediata, antes de terminada a análise. Descontinuidades aleatórias que provoquem instabilidade
R2.4 Falha na determinação do modo de rotura do maciço	Ausência ou erro de caracterização do maciço	Ausência de interpretação de dados e de estudo das características do maciço Ausência de informação sobre o modo de rotura e mecanismos associados	Impossibilitando o controlo da estabilidade da escavação Possibilidade de situações de instabilidade Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Avaliação das características do terreno ocorrente e enquadramento genérico em solo ou rocha, com rutura por descompressão generalizada ou por descontinuidades	-	Presença de terreno com características mistas que levem a dúvidas sobre o comportamento
R2.5 Ausência de controlo da afluência de água	Instalação de pressão de água nas descontinuidades, com lavagem do material de preenchimento mais fino	Ausência de registos de medição de caudais Ausência de metodologia de medição de caudais	Potenciação de queda de blocos e cunhas ou de colapso da escavação Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Medição de caudais afluentes e análise da sua variação Aplicação de drenos orientados. Furos de captação. Impermeabilização do maciço	Encaminhamento direto da água afluente para dispensar tratamento industrial. Aproveitamento da água para utilização no estaleiro	Grande afluência imprevista de modo imediato após avanço da escavação
R2.6 Insuficiente execução do saneamento da frente	Falha na execução de saneamento Falha de remoção de blocos e cunhas soltos na periferia da escavação	Ausência de procedimento de saneamento Ausência de indicações sobre blocos e cunhas a sanear Ausência de verificação de execução do saneamento	Possibilidade de queda de blocos e cunhas enquanto se desenvolvem atividades na frente de escavação Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Implementação de metodologias de escavação com ciclos que prevejam a execução de todos os procedimentos, que promovam a segurança imediata e a longo prazo	-	Saneamento incompleto, com possibilidade de queda de alguns blocos que não tenham sido saneados
R2.7 Falha na aplicação de contenção	Aplicação de contenção em défice perante as características do maciço	Ausência de informação sobre a contenção a aplicar Ausência de verificação da contenção aplicada	Desperdício de recurso com o tempo e custo associado em caso de aplicação de contenção excessiva Instabilidade em caso de défice de contenção, com possibilidade de perda de vidas e/ou equipamentos Custos acrescidos	Verificação da contenção efetivamente aplicada comparativamente com a preconizada no projeto e validação da contenção pela análise das deformações medidas	Verificação periódica da adequabilidade da contenção preconizada, avaliando tanto o seu eventual défice como excesso	Possibilidade de verificação tardia de contenção desadequada
R2.8 Falha no cumprimento do tempo de autossustentação na aplicação de contenção	Atraso na aplicação da contenção, ultrapassando o tempo de autossustentação do maciço	Ausência de indicação do tempo de autossustentação do maciço perante as características observadas Ausência de procedimento do período de tempo máximo até aplicação da contenção	Possibilidade de instabilidade antes da contenção se encontrar totalmente aplicada e funcional Possibilidade de colapso Perda de vida e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Identificação do tempo de autossustentação do maciço Aplicação imediata de elementos estabilizadores do terreno em caso de necessidade	Integrar no ciclo de escavação a aplicação da contenção prevista em projeto de modo a evitar a utilização de contenção extraordinária	Queda isolada de terreno logo após avanço da escavação. Tempo autoportante muito reduzido que impossibilite aplicar a contenção
R2.9 Falha no circuito de informação	Informação não chegar em tempo útil aos vários intervenientes para possibilitar decisões atempadas	Verificar a existência e implementação de um procedimento para correspondência e troca de informação	Intervenção fora do tempo e com meios desadequados perante a qualidade do maciço presente Aplicação de contenção desadequada Possibilidade de instabilidade Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo acrescidos	Confirmação da emissão/receção da informação pelos vários intervenientes, em particular nas situações mais gravosas	-	Possibilidade de falha humana na transmissão da informação

APÊNDICE XII

GESTÃO DE RISCOS NO TRECHO ESCAVADO

Tabela A12.1 - Lista de verificação desenvolvida para aplicar no trecho escavado

Risco	Perigo	Deteção	Dano potencial /Consequência	Medidas eliminatórias ou mitigadoras	Medidas optimizadoras	Risco residual
R3.1 Falha na instalação dos dispositivos de observação preconizados	Não instalação dos instrumentos preconizados Impossibilidade de medir as deformações	Ausência de instalação dos dispositivos de observação nos locais previstos em projeto	Impossibilidade de detetar rotura do maciço Impossibilidade de intervenção atempada para garantia da estabilidade Possibilidade de colapso Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Sensibilização de alguns intervenientes na obra para a importância da observação. Instalação dos dispositivos de observação com a máxima urgência e início das leituras	Adequar a quantidade e localização dos dispositivos de observação às reais condições geológicas e geotécnicas encontradas	-
R3.2 Falha na instalação atempada dos dispositivos de observação	Instalação tardia dos dispositivos de observação	Ausência de instalação imediata dos dispositivos de observação	Deformação medida inferior à real Possibilidade de instabilidade sem atingir os níveis de alerta e alarme definidos Possibilidade de colapso Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Instalação dos dispositivos de observação com a máxima urgência e início das leituras	Adequar a quantidade e localização dos dispositivos de observação às reais condições geológicas e geotécnicas encontradas	-
R3.3 Falha na localização adequada dos dispositivos de observação	Espaçamento elevado entre locais de observação	Ocorrência de fenómenos de instabilidade entre pontos observados sem que sejam detetados pelos dispositivos de observação	Instabilidade da escavação Possibilidade de rotura do maciço entre zonas monitorizadas Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Realização de inspeções visuais periódicas com registo contínuo das ocorrências observadas. Reforço de contenção em caso de necessidade. Instalação de mais dispositivos de observação	Avaliação constante das deformações no sentido de adequar o espaçamento entre secções à qualidade do terreno e contenção aplicada. Integrar as inspeções visuais nas visitas habituais para observação da frente de escavação.	Possibilidade de ocorrência de outros locais instáveis não contemplados com dispositivos de observação
R3.4 Falha na frequência de leituras adequada	Falha ou deteção tardia das deformações devido a intervalo de tempo grande entre leituras consecutivas	Ocorrência de fenómenos de instabilidade entre leituras sem que sejam detetadas deformações	Possibilidade de instabilidade entre leituras Impossibilidade de intervenção atempada Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Adequar a frequência de leituras aos deslocamentos observados, à qualidade do maciço e/ou quantidade de contenção aplicada, ao faseamento construtivo e à utilização da galeria	-	Possibilidade de ocorrências de deformações entre leituras sucessivas
R3.5 Falha no tratamento de dados	Tratamento inadequado da informação que impossibilite uma interpretação objetiva	Ausência de tratamento das leituras Apresentação de dados de forma complexa que impeça a interpretação	Impossibilidade de detetar deformações do maciço Possibilidade de instabilidade Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Técnicos experientes neste tipo de trabalho apoiados por especialista. Apresentação de fácil e rápida interpretação. Informação disponibilizada a todos os envolvidos na obra	Adaptação do tratamento de dados e apresentação de resultados à dinâmica da construção	Possibilidade de dificuldade de interpretação por alguns dos envolvidos
R3.6 Falha no tratamento atempado da informação	Tratamento de dados passado tempo após a leitura	Ausência de tratamento imediato após leituras	Impossibilidade de deteção atempada das deformações Eventual impossibilidade de intervenção atempada Possibilidade de instabilidade não detetada Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Tratamento de dados imediatamente após cada leitura. Análise simultânea ou com a máxima brevidade por um especialista. Informação disponibilizada a todos os envolvidos na obra	-	-
R3.7 Deformação excessiva do maciço	Deformação excessiva do maciço	Verificação de deformação com indícios de instabilidade sem que sejam implementados procedimentos de reparação	Instabilidade da escavação e eventual rotura do maciço Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Ponderar a necessidade de reforço da contenção ou outras medidas estabilizadoras sempre que os níveis de alerta definidos em projeto sejam ultrapassados	Realizar avaliações periódicas para eventual revisão da quantidade de contenção aplicada na frente de escavação para que não sejam necessários reforços	Possibilidade de ocorrência de deformações, mesmo após reforço de contenção
R3.8 Elevada taxa de evolução da deformação	Deformação acelerada do maciço que leve à rotura em curto prazo	Verificação de deformação com indícios de instabilidade sem que sejam implementados procedimentos de reparação	Impossibilidade de intervenção atempada Possibilidade de colapso Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Reforço de contenção ou outras medidas estabilizadoras sempre que a taxa de evolução das deformações aumente significativamente, mesmo que isso aconteça antes de serem atingidos os níveis de alerta definidos em projeto	Realizar avaliações periódicas para eventual revisão da quantidade de contenção aplicada na frente de escavação para que não sejam necessários reforços	Possibilidade de ocorrência de deformações, mesmo após reforço de contenção
R3.9 Falha na deteção de situações de instabilidade pela monitorização	Deformação do maciço em zonas não contempladas com dispositivos de observação	Verificação de patologias na contenção e fenómenos de instabilidade como queda isolada de blocos	Instabilidade da escavação e rotura do maciço fora das zonas monitorizadas Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Utilização de diferentes dispositivos de observação para obter redundância dos resultados. Adequar a localização dos dispositivos às condições geológicas e geotécnicas	Avaliação periódica do erro obtido recorrendo a secções estabilizadas e necessidade de utilização de vários equipamentos	Possibilidade de ocorrência de deformações entre locais observados e entre leituras sucessivas

Risco	Perigo	Deteção	Dano potencial /Consequência	Medidas eliminatórias ou mitigadoras	Medidas optimizadoras	Risco residual
R3.10 Falha nas inspeções visuais	Falha humana na identificação das situações, ou falta de condições iluminação, poeira, meios elevatórios) para realizar as inspeções	Constatação da presença de patologias em estado adiantado ou gravoso	Queda localizada de material. Colapso da escavação	Afetação prioritária de equipamentos e garantia das condições de iluminação e ventilação	-	Possibilidade não detetar novas situações ocorrentes. Avaria de equipamentos necessários à realização da atividade
R3.11 Falha no circuito de informação	Informação chega tardiamente ao centro de decisão ou nem chegar	Verificar a existência e implementação de um procedimento para correspondência e troca de informação	Impossibilidade de definição e implementação de medidas atempadamente Possibilidade de instabilidade e colapso da escavação Perda de vidas e equipamentos Custos e prazo de execução acrescidos	Confirmação da emissão/receção da informação pelos vários intervenientes, em particular nas situações mais gravosas. Definição de mecanismos de alerta redundantes que garantam a emissão/receção de informação	-	-

APÊNDICE XIII

ESTIMAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO NO AVANÇO DE ESCAVAÇÃO
SEGUINTE (TABELAS)

Tabela A13.1 - Estimação da qualidade do maciço no avanço de escavação seguinte – Túnel Poente Norte

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1	49	III	47	41	53	48	42	54	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3	48	III	48	42	54	50	44	56	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
5	46	III	48	42	54	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
7	46	III	46	40	52	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
11	47	III	46	40	52	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
13	48	III	47	41	53	48	42	54	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
15	47	III	48	42	54	48	42	54	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
17	47	III	47	41	53	46	40	52	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
19	47	III	47	41	53	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
21	42	III	47	41	53	47	41	53	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
23	48	III	43	37	49	40	34	46	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
26	50	III	48	42	54	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
29	45	III	49	43	55	52	46	58	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
35	45	III	45	39	51	47	41	53	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
38	39	IV	45	39	51	45	39	51	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
42	37	IV	40	34	46	37	31	43	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
47	40	III	39	33	45	35	29	41	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
49	42	III	41	35	47	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
51	45	III	43	37	49	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
56,5	42	III	45	39	51	47	41	53	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
58,5	43	III	42	36	48	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
60,5	44	III	43	37	49	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
62,5	46	III	44	38	50	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
64,5	48	III	46	40	52	47	41	53	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
68,5	46	III	47	41	53	49	43	55	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
70,5	47	III	46	40	52	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
76	41	III	45	39	51	48	42	54	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
78	46	III	41	35	47	40	34	46	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
81,5	46	III	46	40	52	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
87	45	III	45	39	51	46	40	52	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
92	49	III	45	39	51	45	39	51	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
94,5	49	III	49	43	55	48	42	54	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
97,5	49	III	49	43	55	50	44	56	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
100,5	47	III	49	43	55	50	44	56	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
105	43	III	46	40	52	46	40	52	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
111,5	44	III	43	37	49	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
114	43	III	44	38	50	45	39	51	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
120	43	III	44	38	50	44	38	50	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
125,5	45	III	44	38	50	43	37	49	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
133	50	III	45	39	51	47	41	53	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
136,5	49	III	50	44	56	52	46	58	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
142,5	46	III	49	43	55	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
149	38	IV	46	40	52	44	38	50	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
153	41	III	38	32	44	40	34	46	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
156	44	III	41	35	47	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
160,5	46	III	44	38	50	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
163,5	43	III	46	40	52	45	39	51	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
166,5	45	III	43	37	49	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
169,5	42	III	45	39	51	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
171,5	42	III	42	36	48	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
174,5	39	IV	42	36	48	45	39	51	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
176,5	37	IV	39	33	45	41	35	47	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
178,5	37	IV	37	31	43	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
180,5	37	IV	37	31	43	39	33	45	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
187	41	III	38	32	44	39	33	45	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
192,5	41	III	42	36	48	45	39	51	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
196	42	III	42	36	48	43	37	49	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
199,5	48	III	42	36	48	45	39	51	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
202,5	48	III	47	41	53	48	42	54	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
204	50	III	47	41	53	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
206	52	III	49	43	55	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
207,5	52	III	51	45	57	53	47	59	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
213	57	III	50	44	56	54	48	60	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
217	57	III	55	49	61	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
221	57	III	54	48	60	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
226,5	56	III	55	49	61	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
231	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
235,5	56	III	55	49	61	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
238	43	III	55	49	61	56	50	62	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
240	43	III	43	37	49	43	37	49	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
242	46	III	43	37	49	43	37	49	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
246,5	46	III	47	41	53	48	42	54	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
248,5	48	III	46	40	52	46	40	52	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
256	53	III	50	44	56	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
261,5	55	III	54	48	60	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
268	44	III	56	50	62	56	50	62	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
271	47	III	44	38	50	43	37	49	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
274	47	III	47	41	53	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
278	46	III	46	40	52	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
281,5	48	III	46	40	52	44	38	50	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
285	45	III	49	43	55	47	41	53	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
288	44	III	46	40	52	47	41	53	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
293	44	III	45	39	51	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
295,5	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
299	44	III	45	39	51	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
301	45	III	44	38	50	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
303	46	III	45	39	51	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
305,5	44	III	46	40	52	47	41	53	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
310	46	III	44	38	50	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
317	46	III	46	40	52	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
320,5	46	III	46	40	52	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
326	45	III	46	40	52	46	40	52	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
328	46	III	45	39	51	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
332,5	43	III	46	40	52	47	41	53	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
336,5	45	III	43	37	49	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
342,5	51	III	45	39	51	47	41	53	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
346	54	III	51	45	57	53	47	59	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
349,5	56	III	53	47	59	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
352,5	55	III	55	49	61	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
356	55	III	54	48	60	54	48	60	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
366	56	III	51	45	57	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
369	58	III	55	49	61	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
376	56	III	56	50	62	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
380,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
384	57	III	54	48	60	54	48	60	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
388	58	III	57	51	63	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
389	58	III	58	52	64	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
390,5	55	III	58	52	64	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
395	51	III	55	49	61	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
397,5	49	III	51	45	57	50	44	56	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
402	51	III	49	43	55	47	41	53	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
408	54	III	52	46	58	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
413	46	III	54	48	60	55	49	61	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
420	34	IV	47	41	53	43	37	49	42	28	56	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
422	34	IV	35	29	41	33	27	39	42	28	56	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
428,5	32	IV	37	31	43	37	31	43	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
432	28	IV	34	28	40	33	27	39	39	28	50	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
438	37	IV	31	25	37	25	19	31	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
444	44	III	39	33	45	42	36	48	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
447,5	51	III	45	39	51	47	41	53	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
450	52	III	52	46	58	54	48	60	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
454	52	III	53	47	59	54	48	60	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
458	53	III	52	46	58	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
462	52	III	52	46	58	54	48	60	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
466	52	III	51	45	57	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
470,5	52	III	50	44	56	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
477	52	III	48	42	54	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
485,5	50	III	50	44	56	52	46	58	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
489	49	III	50	44	56	49	43	55	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
493	48	III	49	43	55	50	44	56	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
496,5	47	III	48	42	54	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
501	47	III	48	42	54	46	40	52	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
504,5	46	III	47	41	53	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
508	46	III	46	40	52	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
511,5	46	III	46	40	52	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
518,5	49	III	47	41	53	46	40	52	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
522,5	52	III	49	43	55	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
526	51	III	52	46	58	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
530	52	III	51	45	57	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
538,5	52	III	51	45	57	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
542	52	III	52	46	58	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
545,5	52	III	52	46	58	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
551	52	III	51	45	57	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
555	52	III	51	45	57	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
559	52	III	52	46	58	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
565	52	III	52	46	58	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
570	52	III	52	46	58	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
574	53	III	52	46	58	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
578	52	III	53	47	59	54	48	60	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
582,5	53	III	52	46	58	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
587,5	52	III	53	47	59	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
591,5	54	III	52	46	58	52	46	58	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
593,5	54	III	54	48	60	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
597,5	53	III	54	48	60	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
599,5	56	III	53	47	59	52	46	58	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
608,5	56	III	56	50	62	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
613	56	III	56	50	62	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
618	58	III	56	50	62	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
628	59	III	57	51	63	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
637	59	III	58	52	64	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
642	59	III	58	52	64	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
646,5	58	III	59	53	65	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
651	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
656,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
660,5	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
665	57	III	57	51	63	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
669,5	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
675	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
679	58	III	57	51	63	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
683	58	III	58	52	64	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
687	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
691,5	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
696,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
701,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
710,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
715,5	57	III	59	53	65	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
725	59	III	57	51	63	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
730	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
735	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
740,5	57	III	59	53	65	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
746	57	III	57	51	63	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
750,5	55	III	57	51	63	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
755,5	54	III	55	49	61	53	47	59	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
760,5	56	III	54	48	60	53	47	59	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
765,5	58	III	56	50	62	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
770	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
780	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
785	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
789,5	57	III	57	51	63	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
794,5	60	II	57	51	63	58	52	64	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
799	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
804	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
814,5	61	II	60	54	66	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
820	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
825	59	III	60	54	66	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
830	57	III	59	53	65	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
840	59	III	57	51	63	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
851	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
861	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
866	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
870,5	58	III	59	53	65	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
875	59	III	58	52	64	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
880,5	57	III	59	53	65	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
890	56	III	57	51	63	54	48	60	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
894,5	57	III	56	50	62	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
899,5	67	II	57	51	63	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
907,5	61	II	67	61	73	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
913	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
917,5	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
921,5	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
926,5	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
931,5	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
936	56	III	61	55	67	61	55	67	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
941	56	III	56	50	62	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
945,5	57	III	56	50	62	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
954,5	55	III	58	52	64	58	52	64	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
965	55	III	55	49	61	54	48	60	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
973,5	51	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
976	42	III	51	45	57	37	31	43	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
979,5	40	III	42	36	48	37	31	43	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
981,5	40	III	40	34	46	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
984	39	IV	40	34	46	37	31	43	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
987	39	IV	39	33	45	39	33	45	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
990	42	III	39	33	45	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
994,5	52	III	42	36	48	60	54	66	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
999	54	III	52	46	58	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1004,5	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1014,5	52	III	54	48	60	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1020	55	III	52	46	58	58	52	64	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1025	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1029,5	58	III	54	48	60	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1034	59	III	57	51	63	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1045	53	III	57	51	63	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1050	13	V	52	46	58	52	46	58	-	-	-	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
1052	9	V	14	8	20	10	4	16	-	-	-	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
1052,8	9	V	10	4	16	5	-1	11	-	-	-	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
1056	9	V	9	3	15	9	3	15	-	-	-	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
1057	17	V	9	3	15	9	3	15	29	13	45	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
1060,6	29	IV	17	11	23	24	18	30	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1062,2	29	IV	29	23	35	35	29	41	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1064,2	29	IV	29	23	35	30	24	36	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1065,4	30	IV	29	23	35	30	24	36	28	20	36	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1069	38	IV	30	24	36	30	24	36	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1072,5	41	III	38	32	44	42	36	48	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1077	44	III	40	34	46	42	36	48	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1083	48	III	43	37	49	47	41	53	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1086,5	50	III	48	42	54	47	41	53	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1091	52	III	49	43	55	52	46	58	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1100	54	III	51	45	57	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1104,5	59	III	53	47	59	54	48	60	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1108,5	59	III	58	52	64	61	55	67	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1112,5	59	III	58	52	64	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1117	59	III	58	52	64	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1120,5	60	II	59	53	65	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1124,5	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1129	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1132,5	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1136,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1146	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1151	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1156	58	III	58	52	64	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1160,5	57	III	58	52	64	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1166	56	III	57	51	63	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1170,5	54	III	56	50	62	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1176	55	III	54	48	60	52	46	58	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1181	56	III	55	49	61	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1185,5	56	III	56	50	62	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1190,5	55	III	56	50	62	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1195,5	51	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1200	40	III	51	45	57	48	42	54	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1201,5	38	IV	40	34	46	30	24	36	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1207,5	40	III	38	32	44	35	29	41	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1211,5	40	III	40	34	46	44	38	50	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1215	41	III	40	34	46	40	34	46	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1218,5	43	III	41	35	47	44	38	50	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1221	32	IV	44	38	50	45	39	51	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1224	34	IV	32	26	38	30	24	36	42	28	56	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1225	38	IV	34	28	40	35	29	41	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1228,5	37	IV	38	32	44	40	34	46	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1230,5	38	IV	37	31	43	40	34	46	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1232,5	44	III	38	32	44	38	32	44	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1235	58	III	44	38	50	45	39	51	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1239,5	64	II	58	52	64	58	52	64	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1243	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1246	65	II	62	56	68	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1250	53	III	64	58	70	65	59	71	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1252,5	67	II	53	47	59	50	44	56	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1256	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1259,5	71	II	66	60	72	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1263,5	66	II	70	64	76	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1269	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1272,5	65	II	68	62	74	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1277,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1281	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1284,5	69	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1288	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1292,5	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1298	68	II	68	62	74	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1302,5	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1306	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1309	68	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1314	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1318	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1322	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1326	70	II	65	59	71	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1330	65	II	70	64	76	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1333	63	II	65	59	71	68	62	74	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1336,5	66	II	63	57	69	60	54	66	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1340,5	69	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1344	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1347	67	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1351,5	64	II	67	61	73	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1355	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1359	67	II	64	58	70	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1363	66	II	67	61	73	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1366,5	71	II	66	60	72	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1369,5	65	II	71	65	77	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1374	59	III	65	59	71	68	62	74	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1379	51	III	59	53	65	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1383	49	III	51	45	57	45	39	51	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1386,5	48	III	49	43	55	50	44	56	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1390	50	III	48	42	54	45	39	51	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1393	53	III	51	45	57	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1397	59	III	53	47	59	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1401	63	II	59	53	65	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1405,5	61	II	63	57	69	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1409	64	II	61	55	67	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1412,5	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1416	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1418,5	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1421	60	II	62	56	68	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1425,5	61	II	60	54	66	55	49	61	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1429,5	58	III	61	55	67	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1434	59	III	58	52	64	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1437,5	64	II	59	53	65	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1441	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1445	69	II	63	57	69	62	56	68	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1448	67	II	69	63	75	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1451,5	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1456	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1460	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1464	73	II	68	62	74	68	62	74	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1467,5	67	II	73	67	79	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1471	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1473,5	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1477,5	67	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1481,5	70	II	67	61	73	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1485,5	64	II	70	64	76	70	64	76	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1489,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1493	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1497,5	69	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1501,5	72	II	69	63	75	69	63	75	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1506	74	II	72	66	78	70	64	76	73	66	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1510	72	II	74	68	80	70	64	76	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1515	71	II	72	66	78	72	66	78	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1519	71	II	71	65	77	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1523,5	66	II	71	65	77	71	65	77	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1526,5	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1531	68	II	64	58	70	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1535,5	66	II	68	62	74	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1539,5	60	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1544,5	51	III	60	54	66	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1549,5	51	III	51	45	57	45	39	51	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1553,5	50	III	51	45	57	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1557	24	IV	50	44	56	50	44	56	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1558,5	24	IV	25	19	31	20	14	26	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1560	24	IV	25	19	31	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1562,5	24	IV	25	19	31	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1564,5	24	IV	24	18	30	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1567	24	IV	25	19	31	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1570,5	38	IV	25	19	31	24	18	30	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1574,5	41	III	39	33	45	45	39	51	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1577,5	44	III	41	35	47	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1580,5	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1584,5	54	III	44	38	50	45	39	51	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1589	52	III	53	47	59	60	54	66	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1593	63	II	51	45	57	55	49	61	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1597,5	69	II	62	56	68	60	54	66	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1602	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1605	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1608	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1613	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1618	71	II	68	62	74	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1622,5	71	II	71	65	77	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1626,5	72	II	71	65	77	71	65	77	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1630,5	72	II	72	66	78	73	67	79	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1635	65	II	72	66	78	72	66	78	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1639,5	52	III	65	59	71	60	54	66	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1644,5	59	III	52	46	58	50	44	56	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1647,5	60	II	59	53	65	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1651,5	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1657	58	III	63	57	69	65	59	71	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1661	61	II	58	52	64	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1665,5	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1670	60	II	61	55	67	61	55	67	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1674	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1678,5	60	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1682	55	III	60	54	66	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1687	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1690,5	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1692	54	III	54	48	60	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1696	57	III	54	48	60	54	48	60	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1699,5	59	III	57	51	63	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1703,5	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1708	64	II	59	53	65	59	53	65	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1710	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1714	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1718	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1722,5	62	II	66	60	72	66	60	72	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1726,5	68	II	62	56	68	60	54	66	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1730,5	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1735	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1738,5	65	II	63	57	69	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1742,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1747	65	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1751	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1756	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1759,5	57	III	64	58	70	65	59	71	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1764	52	III	57	51	63	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1769	60	II	52	46	58	50	44	56	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1773,5	57	III	60	54	66	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1778	56	III	57	51	63	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1782,5	57	III	56	50	62	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1786,5	52	III	57	51	63	57	51	63	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1790,5	61	II	52	46	58	50	44	56	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1795	67	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1797,5	69	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1803	67	II	69	63	75	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1807,5	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1811,5	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1816	67	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1818	67	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1822,5	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1827	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1831,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1836	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1840,5	69	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1843,5	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1848,5	70	II	69	63	75	69	63	75	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1853	69	II	70	64	76	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1857,5	67	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1862	65	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1866	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1871	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1875,5	58	III	64	58	70	64	58	70	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1879	59	III	58	52	64	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1883	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1886	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1891	57	III	58	52	64	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1894,5	55	III	57	51	63	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1899	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1902,5	57	III	55	49	61	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1906,5	59	III	57	51	63	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1910	56	III	59	53	65	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1913	55	III	56	50	62	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1916,5	56	III	55	49	61	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1920	56	III	56	50	62	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1924	59	III	56	50	62	56	50	62	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1928	62	II	59	53	65	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1930,5	59	III	62	56	68	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1934,5	58	III	59	53	65	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1936,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1939	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1942,5	57	III	59	53	65	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1946	56	III	57	51	63	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1949,5	57	III	56	50	62	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1953,5	60	II	57	51	63	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1955,5	53	III	55	49	61	62	56	68	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1958,5	53	III	53	47	59	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1961	51	III	53	47	59	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1963,5	52	III	51	45	57	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1966	56	III	52	46	58	53	47	59	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1968,5	54	III	56	50	62	58	52	64	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1973	43	III	54	48	60	55	49	61	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1977	43	III	43	37	49	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1980,5	42	III	43	37	49	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1982,5	44	III	42	36	48	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1986,5	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1989	43	III	44	38	50	44	38	50	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1992,5	43	III	43	37	49	42	36	48	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1994,5	44	III	43	37	49	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1996,5	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1999	37	IV	44	38	50	44	38	50	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2001	37	IV	37	31	43	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2003	33	IV	37	31	43	37	31	43	32	29	35	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2005	31	IV	33	27	39	30	24	36	42	30	54	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2008	29	IV	31	25	37	28	22	34	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2012	29	IV	29	23	35	29	23	35	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2015	26	IV	29	23	35	29	23	35	30	24	36	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2020	21	IV	26	20	32	23	17	29	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2023	21	IV	21	15	27	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2027	20	IV	21	15	27	21	15	27	25	16	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2029,5	28	IV	20	14	26	20	14	26	39	28	50	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2032	35	IV	28	22	34	33	27	39	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2034	27	IV	35	29	41	40	34	46	33	23	43	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2036	29	IV	27	21	33	25	19	31	35	28	42	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2038	30	IV	29	23	35	30	24	36	28	20	36	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2040	30	IV	30	24	36	30	24	36	28	20	36	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02

Tabela 13.2 - Estimação da qualidade do maciço no avanço de escavação seguinte – Túnel Poente Sul

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1	46	III	46	40	52	48	42	54	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3	44	III	45	39	51	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
5	43	III	44	38	50	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
7	44	III	43	37	49	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
12	42	III	44	38	50	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
13,5	44	III	43	37	49	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
18	46	III	45	39	51	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
22	47	III	45	39	51	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
25,5	47	III	46	40	52	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
31,34	47	III	45	39	51	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
35,5	46	III	46	40	52	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
38,5	46	III	45	39	51	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
44,5	46	III	45	39	51	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
47,5	42	III	46	40	52	46	40	52	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
50	42	III	43	37	49	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
52,5	43	III	44	38	50	42	36	48	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
54,5	47	III	44	38	50	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
58	47	III	47	41	53	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
60,5	45	III	46	40	52	47	41	53	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
65	45	III	45	39	51	43	37	49	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
69	45	III	45	39	51	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
74,5	45	III	45	39	51	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
81	40	III	45	39	51	45	39	51	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
84	40	III	42	36	48	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
91	47	III	43	37	49	40	34	46	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
97	45	III	45	39	51	47	41	53	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
100	47	III	45	39	51	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
107	45	III	46	40	52	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
110	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
117	42	III	44	38	50	45	39	51	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
124	42	III	44	38	50	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
127,5	43	III	43	37	49	42	36	48	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
134	45	III	44	38	50	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
137,5	47	III	45	39	51	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
143,5	47	III	45	39	51	45	39	51	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
147	46	III	46	40	52	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
151	46	III	45	39	51	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
154	45	III	45	39	51	47	41	53	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
161	46	III	44	38	50	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
164,5	48	III	46	40	52	45	39	51	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
171	46	III	46	40	52	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
176	42	III	45	39	51	47	41	53	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
181	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
183	46	III	45	39	51	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
185	45	III	46	40	52	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
190	40	III	45	39	51	45	39	51	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
192,5	40	III	41	35	47	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
197,5	39	IV	41	35	47	40	34	46	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
202,5	43	III	41	35	47	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
207	52	III	44	38	50	45	39	51	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
209	52	III	52	46	58	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
210,75	54	III	51	45	57	52	46	58	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
215,75	51	III	52	46	58	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
219	51	III	49	43	55	52	46	58	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
224,5	48	III	49	43	55	51	45	57	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
227	52	III	47	41	53	45	39	51	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
233	57	III	50	44	56	52	46	58	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
239,5	50	III	55	49	61	60	54	66	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
246,5	50	III	50	44	56	48	42	54	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
249,5	50	III	50	44	56	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
253	50	III	50	44	56	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
256,5	52	III	50	44	56	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
262,5	53	III	52	46	58	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
272	52	III	53	47	59	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
275,5	51	III	52	46	58	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
277,2	54	III	51	45	57	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
282,5	53	III	54	48	60	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
286,5	53	III	53	47	59	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
293	44	III	53	47	59	52	46	58	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
296	45	III	44	38	50	43	37	49	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
301	46	III	46	40	52	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
304	51	III	46	40	52	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
306	50	III	51	45	57	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
310	54	III	50	44	56	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
315,5	55	III	54	48	60	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
320,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
328	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
332	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
334	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
341,5	55	III	53	47	59	54	48	60	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
343	56	III	55	49	61	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
350	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
355	55	III	53	47	59	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
358	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
360	58	III	55	49	61	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
362,5	58	III	58	52	64	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
363,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
368	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
371	57	III	57	51	63	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
377,5	57	III	57	51	63	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
380,7	56	III	57	51	63	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
386	56	III	56	50	62	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
389,5	56	III	56	50	62	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
392	57	III	56	50	62	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
395	56	III	57	51	63	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
399,5	53	III	56	50	62	56	50	62	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
403	56	III	53	47	59	50	44	56	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
406,5	53	III	56	50	62	56	50	62	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
414,5	42	III	53	47	59	56	50	62	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
419,5	42	III	42	36	48	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
423,5	42	III	42	36	48	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
427,5	51	III	42	36	48	42	36	48	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
435,5	54	III	52	46	58	56	50	62	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
439,5	52	III	54	48	60	56	50	62	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
444,5	52	III	53	47	59	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
448	53	III	52	46	58	53	47	59	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
456	52	III	54	48	60	56	50	62	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
460	51	III	52	46	58	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
469	53	III	49	43	55	53	47	59	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
477,5	48	III	51	45	57	53	47	59	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
482	50	III	48	42	54	45	39	51	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
488,5	51	III	50	44	56	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
493	53	III	51	45	57	53	47	59	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
496,5	48	III	53	47	59	53	47	59	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
501,5	50	III	48	42	54	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
505	50	III	50	44	56	52	46	58	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
508,5	50	III	50	44	56	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
511,5	50	III	50	44	56	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
520,1	49	III	51	45	57	50	44	56	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
524,5	48	III	49	43	55	50	44	56	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
528,5	46	III	48	42	54	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
532,5	45	III	46	40	52	45	39	51	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
539,5	50	III	46	40	52	47	41	53	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
542,5	53	III	50	44	56	53	47	59	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
546,5	55	III	53	47	59	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
551,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
555,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
563	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
567	58	III	55	49	61	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
571,5	57	III	57	51	63	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
575	58	III	56	50	62	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
578,5	58	III	57	51	63	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
582	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
588,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
592	56	III	58	52	64	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
596	57	III	56	50	62	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
599,5	57	III	57	51	63	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
605	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
609,5	59	III	57	51	63	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
616	59	III	59	53	65	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
620	60	II	59	53	65	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
624	59	III	60	54	66	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
628,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
631,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
636	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
640	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
644	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
649	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
654	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
663	59	III	58	52	64	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
666	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
670,5	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
675,5	57	III	58	52	64	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
680	56	III	57	51	63	59	53	65	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
689	58	III	56	50	62	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
693	56	III	58	52	64	59	53	65	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
702	58	III	56	50	62	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
706,5	59	III	58	52	64	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
711	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
715,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
720	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
724	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
728	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
732,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
736,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
740,5	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
745,5	58	III	58	52	64	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
749,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
755	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
759,5	57	III	57	51	63	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
764,5	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
769	54	III	57	51	63	57	51	63	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
774	58	III	54	48	60	52	46	58	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
778	54	III	58	52	64	58	52	64	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
783,5	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
788	54	III	54	48	60	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
797,5	53	III	54	48	60	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
803	53	III	54	48	60	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
807,5	56	III	54	48	60	53	47	59	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
812,5	56	III	56	50	62	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
821,5	57	III	56	50	62	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
825,5	56	III	57	51	63	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
830	57	III	56	50	62	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
839,5	58	III	56	50	62	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
844	58	III	57	51	63	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
849	56	III	57	51	63	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
854,5	57	III	56	50	62	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
865,5	58	III	56	50	62	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
870,5	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
875	55	III	57	51	63	58	52	64	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
880	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
884	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
889	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
893,5	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
897,5	58	III	56	50	62	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
903	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
908	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
911	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
915,5	56	III	59	53	65	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
919	56	III	56	50	62	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
924,5	57	III	56	50	62	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
930	57	III	57	51	63	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
935,5	58	III	57	51	63	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
939,5	59	III	58	52	64	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
945	59	III	59	53	65	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
950,5	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
961	57	III	58	52	64	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
966	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
971	56	III	57	51	63	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
976,5	56	III	56	50	62	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
981,5	55	III	56	50	62	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
986	55	III	55	49	61	56	50	62	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
991	52	III	55	49	61	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
996	52	III	53	47	59	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1007	53	III	53	47	59	52	46	58	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1018	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1023,5	54	III	56	50	62	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1028	55	III	54	48	60	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1033	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1038,5	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1044	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1047	57	III	54	48	60	53	47	59	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1053	55	III	57	51	63	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1059	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1062	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1065,5	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1069	53	III	54	48	60	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1072	55	III	53	47	59	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1075	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1078	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1081	54	III	55	49	61	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1084	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1086,5	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1089,5	56	III	56	50	62	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1092	55	III	56	50	62	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1098,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1102,5	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1105	57	III	55	49	61	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1108,5	56	III	57	51	63	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1112	55	III	56	50	62	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1115,5	56	III	55	49	61	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1118,5	54	III	56	50	62	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1125,5	55	III	54	48	60	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1129	57	III	55	49	61	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1132	57	III	57	51	63	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1140,5	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1145	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1149,5	59	III	57	51	63	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1157	58	III	59	53	65	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1160,5	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1165	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1169	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1172,5	58	III	59	53	65	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1177	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1186	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1191	57	III	57	51	63	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1195	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1204,5	58	III	57	51	63	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1208,5	58	III	58	52	64	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1213,5	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1223	56	III	57	51	63	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1227,5	51	III	56	50	62	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1232,5	53	III	52	46	58	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1238	49	III	54	48	60	55	49	61	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1243	41	III	50	44	56	50	44	56	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1244,2	40	III	42	36	48	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1247,2	40	III	41	35	47	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1256	40	III	43	37	49	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1259,5	46	III	41	35	47	40	34	46	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1264,5	46	III	47	41	53	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1274	50	III	49	43	55	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1279,5	58	III	50	44	56	54	48	60	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1284,5	56	III	57	51	63	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1292,5	56	III	54	48	60	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1297,5	56	III	54	48	60	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1301	56	III	55	49	61	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1305	57	III	54	48	60	56	50	62	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1310	54	III	55	49	61	56	50	62	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1314	54	III	53	47	59	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1318	53	III	54	48	60	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1322	53	III	53	47	59	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1325,5	57	III	53	47	59	53	47	59	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1329,5	58	III	57	51	63	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1333,5	58	III	58	52	64	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1338	58	III	58	52	64	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1343	58	III	58	52	64	58	52	64	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1347,5	57	III	58	52	64	58	52	64	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1351	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1354,5	65	II	57	51	63	58	52	64	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1358	61	II	59	53	65	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1363,5	65	II	65	59	71	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1367,5	62	II	61	55	67	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1371,5	63	II	65	59	71	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1376	64	II	62	56	68	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1380,5	61	II	63	57	69	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1384	59	III	64	58	70	62	56	68	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1387	55	III	61	55	67	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1389	57	III	59	53	65	50	44	56	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1392	57	III	55	49	61	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1395	54	III	57	51	63	57	51	63	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1398,5	66	II	57	51	63	55	49	61	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1401,5	62	II	54	48	60	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1405	67	II	66	60	72	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1409	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1413	57	III	67	61	73	65	59	71	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1417	63	II	65	59	71	55	49	61	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1421	64	II	57	51	63	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1425	67	II	63	57	69	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1429,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1433	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1436,5	67	II	65	59	71	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1440	71	II	69	63	75	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1442,5	70	II	67	61	73	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1447,5	67	II	71	65	77	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1451,5	70	II	70	64	76	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1455	70	II	67	61	73	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1459	69	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1462,5	65	II	70	64	76	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1465	64	II	69	63	75	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1469	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1472,5	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1476	65	II	65	59	71	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1478,5	63	II	62	56	68	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1481,5	66	II	65	59	71	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1485,5	61	II	63	57	69	67	61	73	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1489,5	61	II	62	56	68	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1493	68	II	61	55	67	61	55	67	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1497	62	II	61	55	67	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1499,5	70	II	68	62	74	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1504	71	II	62	56	68	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1508	76	II	70	64	76	70	64	76	75	70	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1511	74	II	71	65	77	75	69	81	73	66	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1515	71	II	76	70	82	75	69	81	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1519,5	71	II	74	68	80	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1523,5	73	II	71	65	77	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1528	73	II	71	65	77	75	69	81	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1532	74	II	73	67	79	73	67	79	73	66	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1536	73	II	73	67	79	75	69	81	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1538,5	71	II	74	68	80	73	67	79	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1541,5	71	II	73	67	79	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1544,5	72	II	71	65	77	71	65	77	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1548,5	73	II	71	65	77	72	66	78	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1552,5	75	II	72	66	78	73	67	79	74	67	81	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1555	72	II	73	67	79	75	69	81	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1557	72	II	75	69	81	72	66	78	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1561	72	II	72	66	78	72	66	78	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1564	68	II	72	66	78	72	66	78	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1567	71	II	72	66	78	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1570,5	74	II	68	62	74	70	64	76	73	66	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1574	72	II	71	65	77	73	67	79	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1577,5	67	II	72	66	78	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1582,5	70	II	72	66	78	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1585	70	II	67	61	73	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1589	67	II	70	64	76	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1591,5	67	II	70	64	76	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1595,5	63	II	67	61	73	67	61	73	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1598	61	II	67	61	73	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1601	57	III	63	57	69	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1603,5	60	II	61	55	67	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1607	60	II	57	51	63	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1611	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1615	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1617,5	65	II	60	54	66	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1622	68	II	64	58	70	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1625	69	II	65	59	71	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1629	69	II	68	62	74	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1633,5	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1636,5	70	II	69	63	75	69	63	75	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1640	65	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1644	68	II	70	64	76	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1648,5	67	II	65	59	71	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1652	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1656	64	II	67	61	73	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1660	65	II	66	60	72	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1664	67	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1668,5	63	II	65	59	71	68	62	74	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1672	65	II	67	61	73	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1674,5	67	II	63	57	69	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1678	69	II	65	59	71	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1683	67	II	67	61	73	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1686,5	64	II	69	63	75	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1690,5	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1694,5	64	II	64	58	70	68	62	74	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1699	63	II	66	60	72	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1703,5	64	II	64	58	70	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1705	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1709,5	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1713,5	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1718,5	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1722,5	67	II	66	60	72	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1726,5	65	II	66	60	72	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1731	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1735,5	65	II	65	59	71	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1739,5	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1744	69	II	65	59	71	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1748,5	68	II	67	61	73	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1752	68	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1756	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1761	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1765	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1769	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1773	66	II	69	63	75	69	63	75	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1777	68	II	69	63	75	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1782,5	69	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1785,5	69	II	68	62	74	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1789	70	II	69	63	75	69	63	75	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1794,5	68	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1799	68	II	70	64	76	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1804	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1809,5	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1814,5	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1819,5	67	II	69	63	75	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1824,5	67	II	65	59	71	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1829,5	67	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1835	44	III	67	61	73	67	61	73	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1839,5	44	III	67	61	73	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1844	54	III	44	38	50	45	39	51	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1849	60	II	45	39	51	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1853,5	58	III	55	49	61	65	59	71	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1857,5	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1862	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1866,5	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1871	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1874,5	64	II	59	53	65	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1878,5	64	II	60	54	66	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1882,5	60	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1886,5	63	II	64	58	70	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1891	63	II	60	54	66	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1895	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1900	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1903,5	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1907	65	II	62	56	68	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1912	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1915,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1918	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1923	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1926	64	II	68	62	74	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1929,5	65	II	66	60	72	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1933	59	III	64	58	70	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1937	51	III	65	59	71	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1941,5	50	III	59	53	65	45	39	51	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1946,5	43	III	51	45	57	50	44	56	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1950	43	III	51	45	57	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1954,5	43	III	44	38	50	43	37	49	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1958,5	24	IV	44	38	50	43	37	49	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1961	24	IV	44	38	50	20	14	26	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1963	24	IV	25	19	31	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1966	24	IV	24	18	30	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1969,5	24	IV	25	19	31	24	18	30	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1973	43	III	25	19	31	24	18	30	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1975,5	44	III	25	19	31	50	44	56	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1979,5	24	IV	43	37	49	45	39	51	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1983	41	III	44	38	50	24	18	30	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1986	39	IV	24	18	30	40	34	46	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1988	41	III	41	35	47	40	34	46	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1991	43	III	39	33	45	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1993,5	20	IV	41	35	47	40	34	46	25	16	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
1998	21	IV	43	37	49	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2000	22	IV	20	14	26	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2004	20	IV	21	15	27	20	14	26	25	16	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2008	17	V	22	16	28	20	14	26	29	13	45	0,00	0,06	0,06	0,31	0,56
2013	22	IV	20	14	26	15	9	21	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2016,5	35	IV	17	11	23	20	14	26	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2021,5	40	III	22	16	28	40	34	46				0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2024	42	III	35	29	41	43	37	49	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2026,5	42	III	40	34	46	43	37	49	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2030	44	III	42	36	48	42	36	48	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2034	32	IV	42	36	48	45	39	51	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2036	37	IV	44	38	50	30	24	36	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2041	36	IV	32	26	38	35	29	41	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2046	37	IV	37	31	43	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2050	42	III	36	30	42	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2052,5	40	III	37	31	43	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2054	40	III	42	36	48	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2056	41	III	40	34	46	40	34	46	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2058,5	41	III	40	34	46	42	36	48	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2060	42	III	41	35	47	41	35	47	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2061,5	43	III	41	35	47	42	36	48	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2063,5	44	III	42	36	48	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2066	41	III	43	37	49	45	39	51	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2068,5	36	IV	44	38	50	40	34	46	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2070	41	III	41	35	47	30	24	36	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2074,5	20	IV	41	35	47	40	34	46	25	16	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2082	20	IV	20	14	26	15	9	21	25	16	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2085	22	IV	20	14	26	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2087	22	IV	22	16	28	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2088,5	24	IV	22	16	28	22	16	28	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2093,5	24	IV	25	19	31	25	19	31	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2095,5	22	IV	24	18	30	24	18	30	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2098,5	22	IV	23	17	29	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2102,5	35	IV	22	16	28	20	14	26	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2107,5	35	IV	35	29	41	30	24	36	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2109,5	38	IV	35	29	41	35	29	41	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2114	24	IV	38	32	44	40	34	46	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2117,5	24	IV	24	18	30	20	14	26	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2121	38	IV	24	18	30	24	18	30	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2125	24	IV	37	31	43	35	29	41	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2128,5	23	IV	24	18	30	24	18	30	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2130,5	22	IV	23	17	29	22	16	28	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2133	38	IV	22	16	28	20	14	26	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2138	44	III	38	32	44	30	24	36	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2140	44	III	44	38	50	50	44	56	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2143,5	39	IV	44	38	50	44	38	50	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2146,5	39	IV	39	33	45	30	24	36	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2148,5	38	IV	39	33	45	35	29	41	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
2150,5	40	III	38	32	44	37	31	43	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2155	43	III	39	33	45	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2158,5	50	III	42	36	48	45	39	51	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Tabela 13.3 - Estimação da qualidade do maciço no avanço de escavação seguinte – Túnel Nascente Norte

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1	53	III	50	44	56	51	45	57	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2	52	III	51	45	57	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
4	51	III	50	44	56	51	45	57	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
6	52	III	50	44	56	51	45	57	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
8	51	III	51	45	57	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
8,6	50	III	51	45	57	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
13	47	III	50	44	56	48	42	54	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
18	40	III	50	44	56	45	39	51	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
23	44	III	47	41	53	35	29	41	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
27	41	III	46	40	52	45	39	51	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
31	42	III	43	37	49	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
36,8	50	III	44	38	50	44	38	50	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
39,2	51	III	50	44	56	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
43,6	55	III	50	44	56	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
47,6	56	III	53	47	59	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
51,4	56	III	54	48	60	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
55,1	56	III	54	48	60	56	50	62	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
59	54	III	54	48	60	56	50	62	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
64	54	III	52	46	58	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
69	53	III	52	46	58	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
73,7	56	III	52	46	58	53	47	59	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
79,2	55	III	55	49	61	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
85,5	60	II	55	49	61	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
89	60	II	60	54	66	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
94	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
99,6	58	III	60	54	66	62	56	68	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
103	59	III	58	52	64	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
108	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
111,7	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
117,4	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
123,4	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
132,7	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
139,3	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
146,2	64	II	62	56	68	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
149,5	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
154	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
158	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
160,5	64	II	65	59	71	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
164	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
172	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
176	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
183	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
186,5	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
189,6	65	II	63	57	69	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
193,6	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
203	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
207	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
211	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
218,5	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
222	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
227	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
230	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
234,5	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
238,5	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
243	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
252	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
256,5	62	II	62	56	68	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
260,3	64	II	62	56	68	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
264,5	65	II	64	58	70	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
269	65	II	65	59	71	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
273,5	47	III	65	59	71	65	59	71	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
277	46	III	48	42	54	35	29	41	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
280,5	44	III	46	40	52	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
284	50	III	45	39	51	45	39	51	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
289,5	49	III	51	45	57	60	54	66	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
293,5	46	III	49	43	55	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
297,7	48	III	48	42	54	45	39	51	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
301,5	58	III	49	43	55	50	44	56	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
304,6	63	II	58	52	64	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
309	54	III	62	56	68	65	59	71	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
313	58	III	52	46	58	50	44	56	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
320	60	II	53	47	59	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
323,5	62	II	58	52	64	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
331,5	63	II	59	53	65	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
335	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
338,5	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
342,5	62	II	58	52	64	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
346,5	65	II	61	55	67	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
350	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
355	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
359,5	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
363	63	II	63	57	69	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
367	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
370,4	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
374	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
376	60	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
379,5	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
382,5	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
386,5	57	III	64	58	70	64	58	70	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
389,5	60	II	64	58	70	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
393	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
397	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
405	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
409	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
414	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
418,5	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
423	64	II	62	56	68	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
430	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
433	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
437,5	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
441	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
445	60	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
448	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
452	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
456	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
460	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
463,5	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
468	65	II	63	57	69	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
472	66	II	65	59	71	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
475	59	III	66	60	72	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
480	53	III	59	53	65	60	54	66	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
485	53	III	53	47	59	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
488,5	56	III	53	47	59	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
493	59	III	57	51	63	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
497	65	II	59	53	65	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
501,5	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
506	62	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
510	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
514	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
518	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
522	61	II	61	55	67	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
527	63	II	60	54	66	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
531	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
534,5	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
543	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
546	63	II	63	57	69	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
552	66	II	63	57	69	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
556	62	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
560	60	II	65	59	71	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
564,5	59	III	60	54	66	56	50	62	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
569	64	II	60	54	66	58	52	64	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
573,5	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
582	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
585,5	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
590	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
594	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
599	62	II	61	55	67	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
602,5	61	II	62	56	68	64	58	70	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
603	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
607	58	III	61	55	67	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
611	62	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
615,5	62	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
620	64	II	62	56	68	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
625,5	64	II	63	57	69	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
630,5	60	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
634	60	II	60	54	66	58	52	64	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
639	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
643,5	64	II	61	55	67	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
648	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
652,5	60	II	62	56	68	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
657	61	II	60	54	66	59	53	65	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
661	63	II	61	55	67	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
665,5	64	II	63	57	69	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
670	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
674,5	60	II	63	57	69	61	55	67	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
680	60	II	60	54	66	61	55	67	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
684,5	63	II	60	54	66	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
689,5	57	III	63	57	69	64	58	70	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
694,5	61	II	58	52	64	55	49	61	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
699	64	II	61	55	67	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
704	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
712,5	55	III	63	57	69	61	55	67	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
717	61	II	63	57	69	53	47	59	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
721	54	III	61	55	67	64	58	70	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
725,5	56	III	55	49	61	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
729,5	60	II	57	51	63	61	55	67	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
739	57	III	61	55	67	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
743,5	60	II	57	51	63	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
747,5	60	II	60	54	66	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
751,5	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
755	62	II	62	56	68	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
759,5	60	II	61	55	67	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
768	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
772,5	58	III	63	57	69	64	58	70	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
776	65	II	58	52	64	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
781	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
785	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
789,5	62	II	63	57	69	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
793,5	57	III	62	56	68	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
797,5	58	III	57	51	63	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
802	63	II	58	52	64	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
807	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
811,5	63	II	63	57	69	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
816,5	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
821	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
825,5	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
830	63	II	60	54	66	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
834	59	III	63	57	69	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
839	61	II	59	53	65	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
843,5	64	II	61	55	67	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
848	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
852,5	60	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
857,5	62	II	60	54	66	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
862,5	60	II	62	56	68	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
867	62	II	60	54	66	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
871,5	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
876	64	II	61	55	67	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
881	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
886	57	III	63	57	69	62	56	68	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
891	57	III	58	52	64	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
895	59	III	57	51	63	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
899,5	63	II	59	53	65	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
904	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
908,5	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
912	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
915,5	60	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
919,5	54	III	60	54	66	57	51	63	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
924,5	55	III	54	48	60	53	47	59	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
929	58	III	55	49	61	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
933	61	II	58	52	64	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
937,5	62	II	61	55	67	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
942	64	II	62	56	68	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
946	61	II	64	58	70	64	58	70	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
950,5	60	II	61	55	67	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
955,5	60	II	60	54	66	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
960,5	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
965	56	III	59	53	65	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
969,5	56	III	56	50	62	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
974	61	II	56	50	62	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
979	61	II	61	55	67	64	58	70	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
983,5	63	II	61	55	67	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
987,5	64	II	63	57	69	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
996	60	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1001,5	60	II	60	54	66	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1006	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1011	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1015	55	III	59	53	65	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1024	58	III	56	50	62	54	48	60	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1031	58	III	59	53	65	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1035,5	58	III	58	52	64	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1039,5	58	III	59	53	65	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1044	60	II	59	53	65	58	52	64	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1048	61	II	60	54	66	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1053	55	III	61	55	67	61	55	67	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1058	60	II	55	49	61	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1067,5	60	II	60	54	66	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1072,5	65	II	60	54	66	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1077	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1081	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1084	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1088	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1093	62	II	61	55	67	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1097,5	59	III	62	56	68	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1103	63	II	58	52	64	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1108	61	II	63	57	69	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1112,5	64	II	61	55	67	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1116,5	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1126	59	III	62	56	68	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1130	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1140,5	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1145	64	II	61	55	67	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1149,5	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1154	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1159	64	II	63	57	69	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1163,5	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1168	61	II	62	56	68	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1173	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1178	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1183	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1187,5	60	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1193	61	II	61	55	67	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1198	63	II	61	55	67	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1201,5	65	II	63	57	69	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1206	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1211	65	II	63	57	69	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1215,5	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1221	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1225,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1230,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1236	60	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1245,5	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1250	58	III	60	54	66	63	57	69	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1254,5	62	II	59	53	65	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1262,5	65	II	63	57	69	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1267	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1271	61	II	63	57	69	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1276	63	II	61	55	67	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1280	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1284,5	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1288	65	II	63	57	69	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1292	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1297	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1301,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1306,5	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1310,5	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1320	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1324	61	II	62	56	68	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1328,5	65	II	61	55	67	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1333,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1337,5	61	II	64	58	70	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1342,5	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1346,5	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1351	59	III	62	56	68	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1355	55	III	59	53	65	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1360	57	III	56	50	62	50	44	56	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1365	57	III	57	51	63	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1369,5	60	II	57	51	63	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1374,5	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1379,5	64	II	61	55	67	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1384,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1389	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1394	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1399	66	II	63	57	69	61	55	67	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1403,5	62	II	65	59	71	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1408	63	II	61	55	67	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1412	58	III	62	56	68	63	57	69	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1417	59	III	58	52	64	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1421,5	57	III	59	53	65	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1431	59	III	58	52	64	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1436	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1441	63	II	61	55	67	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1445,5	61	II	63	57	69	64	58	70	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1455	58	III	62	56	68	61	55	67	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1459	58	III	58	52	64	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1464	64	II	58	52	64	58	52	64	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1468	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1473	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1482	66	II	63	57	69	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1487	63	II	66	60	72	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1496	66	II	62	56	68	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1500,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1505,5	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1510	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1515	61	II	64	58	70	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1519,5	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1524	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1529	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1537,5	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1542,5	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1547,5	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1552,5	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1557,5	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1562	61	II	63	57	69	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1567	66	II	61	55	67	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1571,5	67	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1576	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1585	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1589,5	65	II	64	58	70	61	55	67	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1594	63	II	65	59	71	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1598,5	63	II	63	57	69	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1602,5	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1607	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1611,5	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1621	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1625,5	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1635	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1639,5	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1649	53	III	61	55	67	63	57	69	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1653,5	55	III	53	47	59	48	42	54	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1658	55	III	55	49	61	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1663	55	III	56	50	62	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1668,5	56	III	56	50	62	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1673	62	II	57	51	63	58	52	64	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1678,5	61	II	63	57	69	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1684	64	II	62	56	68	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1688,5	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1693	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1697,5	60	II	59	53	65	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1702,5	65	II	59	53	65	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1708	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1712	64	II	65	59	71	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1716,5	69	II	63	57	69	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1720,5	68	II	69	63	75	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1726	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1734,5	65	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1739,5	61	II	64	58	70	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1744	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1748	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1752,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1757	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1761	68	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1765	65	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1768	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1777	69	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1782	66	II	68	62	74	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1786	68	II	66	60	72	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1789,5	67	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1794	71	II	67	61	73	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1798	67	II	71	65	77	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1802,5	68	II	67	61	73	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1806,5	68	II	68	62	74	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1811	66	II	68	62	74	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1815,5	65	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1820,5	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1825	65	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1829,5	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1834	62	II	66	60	72	67	61	73	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1842,5	66	II	63	57	69	60	54	66	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1847	63	II	66	60	72	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1851	66	II	63	57	69	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1855,5	63	II	66	60	72	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1860	61	II	63	57	69	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1864,5	57	III	61	55	67	65	59	71	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1869,5	55	III	58	52	64	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1874	54	III	56	50	62	53	47	59	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1878	55	III	55	49	61	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1881,5	59	III	55	49	61	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1885	63	II	59	53	65	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1889	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1893	61	II	64	58	70	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1902	58	III	61	55	67	63	57	69	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1906,5	62	II	58	52	64	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1911,5	67	II	61	55	67	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1915,5	66	II	66	60	72	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1924	68	II	65	59	71	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1928,5	67	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1936,5	67	II	65	59	71	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1942	65	II	66	60	72	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1947	70	II	65	59	71	64	58	70	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1952	65	II	69	63	75	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1957	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1962	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1966	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1970,5	71	II	68	62	74	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1975,5	68	II	71	65	77	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1980,5	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1985,5	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1989,5	71	II	68	62	74	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1995	70	II	71	65	77	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2000	72	II	70	64	76	68	62	74	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2004,5	66	II	72	66	78	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2009,5	69	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2014,5	62	II	69	63	75	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2019	66	II	62	56	68	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2023,5	71	II	66	60	72	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2027,5	71	II	71	65	77	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2032,5	68	II	71	65	77	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2037,5	63	II	69	63	75	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2042	66	II	63	57	69	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2046,5	63	II	66	60	72	68	62	74	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2051	68	II	63	57	69	63	57	69	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2060	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2064,5	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2069	62	II	68	62	74	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2073	58	III	62	56	68	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2078	59	III	59	53	65	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2082,5	63	II	59	53	65	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2087	61	II	63	57	69	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2091,5	59	III	62	56	68	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2096	62	II	60	54	66	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2101	71	II	63	57	69	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2105	67	II	71	65	77	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2109	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2113,5	66	II	67	61	73	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2118	70	II	65	59	71	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2122	67	II	69	63	75	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2132,5	70	II	65	59	71	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2136,5	70	II	70	64	76	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2141	69	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2146,5	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2150	66	II	69	63	75	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2155	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2159,5	60	II	68	62	74	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2164	59	III	60	54	66	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2168	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2173	58	III	65	59	71	67	61	73	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2178	64	II	59	53	65	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2186,5	70	II	65	59	71	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2190,5	70	II	70	64	76	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2200	68	II	70	64	76	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2215	70	II	66	60	72	67	61	73	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2219,5	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2224,5	67	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2230	66	II	66	60	72	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2234,5	60	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2239,5	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2244	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2248	61	II	62	56	68	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2253	59	III	62	56	68	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2257,5	67	II	60	54	66	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2262,5	70	II	68	62	74	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2267	64	II	70	64	76	70	64	76	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2272	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2276,5	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2281	64	II	62	56	68	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2286	67	II	63	57	69	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2290,5	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2295,5	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2300	63	II	64	58	70	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2304,5	65	II	63	57	69	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2309	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2313,5	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2318	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2322	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2327	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2331,5	67	II	63	57	69	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2336,5	67	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2341	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2345,5	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2355	69	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2359,5	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2364,5	68	II	68	62	74	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2369,5	71	II	68	62	74	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2373,5	70	II	71	65	77	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2378,5	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2383	72	II	68	62	74	67	61	73	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2387	71	II	71	65	77	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2391	70	II	71	65	77	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2396,5	73	II	70	64	76	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2401	72	II	73	67	79	72	66	78	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2405,5	70	II	72	66	78	72	66	78	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2410,5	72	II	70	64	76	68	62	74	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2415	72	II	72	66	78	70	64	76	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2420	65	II	72	66	78	72	66	78	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2425	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2429,5	64	II	66	60	72	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2434	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2439	66	II	68	62	74	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2443,5	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2448	69	II	67	61	73	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2452	71	II	71	65	77	66	60	72	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2455,5	66	II	71	65	77	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2458	69	II	66	60	72	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2461,5	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2464,5	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2469	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2472,5	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2476	62	II	67	61	73	66	60	72	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2479	67	II	62	56	68	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2484,5	62	II	67	61	73	69	63	75	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2489,5	67	II	62	56	68	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2493,5	70	II	67	61	73	62	56	68	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2498	67	II	70	64	76	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2502,5	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2507	68	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2511	66	II	68	62	74	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2514	65	II	66	60	72	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
2518	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2523	62	II	66	60	72	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2526,5	55	III	62	56	68	65	59	71	55	48	62	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2529	53	III	55	49	61	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2531,5	55	III	53	47	59	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2536,5	51	III	55	49	61	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2541	56	III	51	45	57	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2544	54	III	56	50	62	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2549	51	III	54	48	60	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2553	66	II	51	45	57	55	49	61	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2558	67	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2562,5	66	II	67	61	73	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2567	63	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2571	61	II	63	57	69	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2575	52	III	61	55	67	65	59	71	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2580	56	III	52	46	58	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2584	56	III	56	50	62	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2588,5	63	II	56	50	62	56	50	62	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2592	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2596	64	II	64	58	70	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2600	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2604	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2608	62	II	68	62	74	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2612	62	II	62	56	68	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2616,5	56	III	62	56	68	62	56	68	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2621,5	58	III	56	50	62	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2626	62	II	58	52	64	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2630,5	66	II	62	56	68	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2635	66	II	66	60	72	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2638,5	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2643,5	64	II	64	58	70	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2648	69	II	64	58	70	64	58	70	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2652	65	II	69	63	75	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2656	62	II	65	59	71	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2661	66	II	62	56	68	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2665	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2670	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2674	68	II	64	58	70	62	56	68	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2678	68	II	68	62	74	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2683,5	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2688	65	II	65	59	71	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2692,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2696,5	61	II	64	58	70	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2701	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2705	56	III	61	55	67	61	55	67	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2709	59	III	56	50	62	50	44	56	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2712	56	III	59	53	65	62	56	68	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2716	58	III	56	50	62	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2720,5	59	III	58	52	64	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2724	65	II	59	53	65	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2729	66	II	65	59	71	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2733,5	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2738	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2741	69	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2745	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2749,5	68	II	68	62	74	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2754	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2757,5	68	II	66	60	72	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2762	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2765,5	68	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2771,5	66	II	68	62	74	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2775	65	II	66	60	72	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2779	64	II	65	59	71	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2783,5	66	II	64	58	70	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2788	67	II	66	60	72	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2790,5	65	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2795	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2799	67	II	67	61	73	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2805	64	II	67	61	73	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2808	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2813	64	II	62	56	68	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2817	68	II	64	58	70	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2820,5	71	II	68	62	74	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2824,5	70	II	71	65	77	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2828,5	73	II	70	64	76	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2834	73	II	73	67	79	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2838	72	II	73	67	79	73	67	79	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2842	69	II	72	66	78	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2848	70	II	69	63	75	67	61	73	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2852	65	II	70	64	76	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2855,5	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2860,5	61	II	64	58	70	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2865	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2869	67	II	65	59	71	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2874	69	II	67	61	73	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2878	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2882,5	72	II	69	63	75	70	64	76	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2888	62	II	72	66	78	73	67	79	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2892	61	II	62	56	68	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2896	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2900	64	II	62	56	68	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2903,5	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2907,5	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2911,5	68	II	68	62	74	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2916,5	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2921	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2924,5	65	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2928,5	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2933,5	67	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2936,5	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2940,5	70	II	66	60	72	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2944,5	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2949	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2954	67	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2958,5	68	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2963	66	II	68	62	74	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2967	69	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2971,5	68	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2976	68	II	68	62	74	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2980	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2984	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2988	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2992,5	62	II	68	62	74	68	62	74	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2996	65	II	62	56	68	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3000	54	III	65	59	71	67	61	73	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3005	55	III	55	49	61	52	46	58	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3009	59	III	59	53	65	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3014	59	III	60	54	66	64	58	70	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3017,5	62	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3022,5	68	II	63	57	69	64	58	70	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3026	67	II	67	61	73	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3030	68	II	66	60	72	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3034	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3037,5	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3042	69	II	68	62	74	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3045,5	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3049,5	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3054,5	62	II	68	62	74	67	61	73	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3058,5	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3063	62	II	63	57	69	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3067,5	63	II	62	56	68	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3072,5	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3076	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3080	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3084,5	63	II	66	60	72	67	61	73	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3088,5	56	III	63	57	69	62	56	68	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3091,5	52	III	56	50	62	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3095	52	III	52	46	58	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3099,5	57	III	52	46	58	52	46	58	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3103,5	54	III	57	51	63	60	54	66	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3107	59	III	55	49	61	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3111	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3115,5	66	II	62	56	68	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3118,5	62	II	65	59	71	66	60	72	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
3121	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3124	68	II	63	57	69	63	57	69	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3128,5	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3133	62	II	65	59	71	66	60	72	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3135,5	59	III	62	56	68	62	56	68	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3140	65	II	59	53	65	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3144,5	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3148,5	69	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3152,5	66	II	69	63	75	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3156,5	61	II	66	60	72	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3161	69	II	61	55	67	60	54	66	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3165	69	II	69	63	75	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3169,5	62	II	69	63	75	69	63	75	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3174	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3178,5	61	II	65	59	71	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3182	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3188	44	III	65	59	71	65	59	71	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3189,5	44	III	45	39	51	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3193,5	56	III	46	40	52	44	38	50	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3198	57	III	57	51	63	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3202	57	III	58	52	64	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3206	53	III	58	52	64	57	51	63	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3210,5	53	III	55	49	61	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3215	54	III	52	46	58	53	47	59	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3217,5	54	III	53	47	59	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3220,5	52	III	54	48	60	54	48	60	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3225	55	III	52	46	58	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3228,5	53	III	55	49	61	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3233,5	50	III	53	47	59	52	46	58	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3237	51	III	50	44	56	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3243	52	III	51	45	57	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3247	57	III	52	46	58	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3251,5	56	III	57	51	63	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3256,5	56	III	56	50	62	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3261	58	III	56	50	62	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3264	56	III	58	52	64	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3266,5	58	III	56	50	62	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3269,5	59	III	58	52	64	56	50	62	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3273,5	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3277	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3280	58	III	58	52	64	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3283,5	59	III	58	52	64	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3288	57	III	59	53	65	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3292,5	59	III	57	51	63	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3296,5	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3300	42	III	59	53	65	59	53	65	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3303	47	III	42	36	48	40	34	46	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3306,5	50	III	47	41	53	50	44	56	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
3310,5	49	III	50	44	56	55	49	61	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3314	47	III	49	43	55	50	44	56	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3318	56	III	48	42	54	45	39	51	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3322	54	III	57	51	63	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3325,5	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3329,5	54	III	56	50	62	56	50	62	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3333	44	III	54	48	60	55	49	61	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3337	53	III	44	38	50	42	36	48	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3342,5	52	III	52	46	58	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3346	51	III	52	46	58	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3350	53	III	51	45	57	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3353	53	III	53	47	59	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3357	54	III	53	47	59	53	47	59	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3360	54	III	54	48	60	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3364	58	III	54	48	60	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3368	61	II	58	52	64	59	53	65	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3372,5	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3377	58	III	61	55	67	61	55	67	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3381,5	56	III	58	52	64	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3385	53	III	56	50	62	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3389	36	IV	53	47	59	50	44	56	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3393	40	III	37	31	43	30	24	36	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3396	38	IV	41	35	47	43	37	49	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3398,5	38	IV	39	33	45	36	30	42	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3401	43	III	39	33	45	38	32	44	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3404,5	43	III	44	38	50	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3407	44	III	44	38	50	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3409,5	44	III	44	38	50	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3412,5	44	III	45	39	51	44	38	50	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3415,5	42	III	44	38	50	44	38	50	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3418	43	III	42	36	48	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3420,5	43	III	43	37	49	43	37	49	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3423	44	III	43	37	49	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3425	44	III	44	38	50	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3428	44	III	44	38	50	44	38	50	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3431,5	44	III	44	38	50	44	38	50	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3435	44	III	44	38	50	44	38	50	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3438,5	43	III	44	38	50	44	38	50	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3441	42	III	43	37	49	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3443	31	IV	42	36	48	42	36	48	42	30	54	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3447	36	IV	31	25	37	30	24	36	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3449,5	37	IV	36	30	42	40	34	46	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3451,5	37	IV	37	31	43	40	34	46	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3454	37	IV	37	31	43	37	31	43	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3459	36	IV	37	31	43	37	31	43	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3461,5	36	IV	36	30	42	35	29	41	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3464	23	IV	36	30	42	36	30	42	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3465	23	IV	24	18	30	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte									Probabilidade de ocorrência de classe				
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			I	II	III	IV	V
3467	23	IV	24	18	30	23	17	29	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3471,5	38	IV	23	17	29	23	17	29	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3474	38	IV	38	32	44	40	34	46	38	30	46	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3476	41	III	38	32	44	38	32	44	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3478,5	35	IV	41	35	47	40	34	46	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3481	31	IV	35	29	41	30	24	36	42	30	54	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3483,5	33	IV	31	25	37	30	24	36	32	29	35	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3486	35	IV	33	27	39	35	29	41	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3488	37	IV	35	29	41	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3490	36	IV	36	30	42	40	34	46	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3492	37	IV	35	29	41	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3496	21	IV	37	31	43	38	32	44	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3500	23	IV	22	16	28	20	14	26	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3502	23	IV	24	18	30	25	19	31	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3506	32	IV	24	18	30	23	17	29	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3510	32	IV	32	26	38	35	29	41	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3512,5	32	IV	32	26	38	32	26	38	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3515	42	III	32	26	38	32	26	38	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3518,5	48	III	42	36	48	40	34	46	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3521	49	III	47	41	53	45	39	51	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3523,5	52	III	48	42	54	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3526	53	III	51	45	57	50	44	56	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3530	50	III	52	46	58	55	49	61	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3532,5	31	IV	50	44	56	50	44	56	42	30	54	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3536	35	IV	30	24	36	25	19	31	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3539	35	IV	34	28	40	35	29	41	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3541	35	IV	35	29	41	35	29	41	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02

Tabela 13.4 - Estimação da qualidade do maciço no avanço de escavação seguinte – Túnel Nascente Sul

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimção RMR + desvio padrão Krigagem			Estimção RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1	46	III	43	37	49	50	44	56	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2,3	46	III	44	38	50	45	39	51	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
5,3	32	IV	44	38	50	47	41	53	32	30	34	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
8,7	46	III	37	31	43	46	40	52	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
14,6	47	III	45	39	51	30	24	36	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
17	47	III	45	39	51	47	41	53	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
19,3	46	III	45	39	51	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
21,3	46	III	45	39	51	47	41	53	46	40	52	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
24,3	44	III	46	40	52	45	39	51	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
27,1	45	III	44	38	50	46	40	52	48	40	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
29,3	44	III	45	39	51	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
33,3	44	III	44	38	50	47	41	53	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
35,3	52	III	43	37	49	45	39	51	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
39,9	54	III	50	44	56	44	38	50	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
42,6	54	III	52	46	58	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
44,7	54	III	53	47	59	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
49,3	54	III	51	45	57	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
52,1	53	III	52	46	58	54	48	60	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
56,3	54	III	52	46	58	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
59	54	III	53	47	59	54	48	60	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
61,3	55	III	53	47	59	54	48	60	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
63,8	56	III	54	48	60	54	48	60	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
69,3	57	III	55	49	61	54	48	60	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
73,3	57	III	56	50	62	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
75,8	57	III	57	51	63	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
81,1	50	III	56	50	62	57	51	63	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
83,8	50	III	50	44	56	57	51	63	52	45	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
83,8	49	III	50	44	56	45	39	51	50	43	57	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
86,6	52	III	50	44	56	50	44	56	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
89,8	51	III	52	46	58	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
94,8	51	III	52	46	58	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
101,8	54	III	53	47	59	51	45	57	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
107,3	52	III	54	48	60	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
113,3	54	III	53	47	59	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
116,8	59	III	54	48	60	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
119,8	58	III	59	53	65	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
121,8	55	III	58	52	64	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
125,3	56	III	55	49	61	54	48	60	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
128,8	56	III	56	50	62	57	51	63	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
131,8	58	III	56	50	62	56	50	62	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
141,3	61	II	56	50	62	58	52	64	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
143,6	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
149,8	63	II	60	54	66	61	55	67	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
154,3	60	II	62	56	68	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
158,8	62	II	60	54	66	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
161,3	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
169	59	III	60	54	66	62	56	68	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
174	58	III	59	53	65	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
177,3	62	II	58	52	64	56	50	62	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
180,3	60	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
184,8	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
187,8	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
190,8	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
196	64	II	61	55	67	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
200,3	65	II	63	57	69	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
208,8	65	II	64	58	70	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
212,8	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
221,3	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
225,8	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
229,3	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
233,8	67	II	65	59	71	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
238,3	64	II	66	60	72	68	62	74	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
241,8	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
246,1	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
249,3	58	III	64	58	70	64	58	70	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
258,8	58	III	60	54	66	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
263,5	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
268,3	57	III	63	57	69	64	58	70	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
271,3	61	II	58	52	64	55	49	61	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
274,3	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
277,3	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
280,3	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
282,8	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
286,3	58	III	60	54	66	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
289,8	55	III	58	52	64	60	54	66	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
294,3	53	III	56	50	62	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
299,8	47	III	55	49	61	50	44	56	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
303,8	53	III	49	43	55	45	39	51	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
305,3	60	II	53	47	59	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
309,3	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
316,3	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
319,3	61	II	60	54	66	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
322,3	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
326,3	62	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
329,8	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
334,8	61	II	60	54	66	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
339,3	63	II	60	54	66	61	55	67	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
342,3	61	II	63	57	69	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
345,8	61	II	61	55	67	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
349,3	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
353,3	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
358,8	61	II	61	55	67	61	55	67	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
363,3	63	II	61	55	67	61	55	67	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
367,3	65	II	63	57	69	61	55	67	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
370,3	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
374,3	63	II	63	57	69	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
377,3	65	II	63	57	69	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
381,3	64	II	65	59	71	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
385,8	63	II	64	58	70	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
393,3	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
396,3	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
400,3	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
403,8	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
407,8	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
410,8	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
415,3	63	II	61	55	67	61	55	67	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
419,8	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
428,3	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
432,8	62	II	60	54	66	61	55	67	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
437,3	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
441,3	59	III	61	55	67	61	55	67	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
445,3	60	II	59	53	65	61	55	67	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
449,3	57	III	60	54	66	61	55	67	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
453,3	59	III	57	51	63	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
457,3	62	II	59	53	65	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
460,3	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
464,7	60	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
468,8	62	II	60	54	66	58	52	64	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
472,8	64	II	62	56	68	61	55	67	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
476,3	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
479,8	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
484,3	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
487,3	62	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
491,3	54	III	62	56	68	60	54	66	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
495,3	63	II	54	48	60	50	44	56	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
499,3	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
503,8	62	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
507,8	65	II	62	56	68	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
512,3	69	II	65	59	71	63	57	69	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
516,8	67	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
520,8	70	II	67	61	73	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
524,8	59	III	70	64	76	68	62	74	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
528,8	64	II	59	53	65	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
532,8	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
540,8	65	II	62	56	68	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
544,8	60	II	65	59	71	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
549,3	60	II	60	54	66	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
553,8	64	II	60	54	66	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
557,8	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
562,8	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
572,3	60	II	63	57	69	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
576,8	65	II	60	54	66	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
585,3	55	III	65	59	71	63	57	69	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
589,8	62	II	55	49	61	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
594,3	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
598,8	63	II	60	54	66	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
602,8	56	III	63	57	69	63	57	69	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
606,8	59	III	56	50	62	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
611,8	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
616,3	63	II	61	55	67	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
620,8	66	II	63	57	69	60	54	66	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
624,3	59	III	66	60	72	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
628,8	67	II	59	53	65	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
632,8	60	II	67	61	73	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
637,3	64	II	60	54	66	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
641,3	59	III	64	58	70	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
645,3	60	II	59	53	65	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
649,3	60	II	60	54	66	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
654,3	60	II	60	54	66	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
661,3	58	III	60	54	66	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
665,8	59	III	58	52	64	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
669,3	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
673,3	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
677,8	61	II	62	56	68	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
682,8	64	II	61	55	67	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
686,8	61	II	64	58	70	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
691,8	63	II	61	55	67	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
695,3	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
699,8	61	II	61	55	67	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
704,3	64	II	61	55	67	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
708,3	61	II	64	58	70	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
712,3	63	II	61	55	67	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
716,8	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
720,8	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
725,3	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
728,8	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
733,3	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
737,3	65	II	64	58	70	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
740,8	66	II	65	59	71	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
745,3	60	II	66	60	72	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
749,8	62	II	60	54	66	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
753,3	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
757,8	62	II	60	54	66	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
761,8	62	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
765,8	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
770,3	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
774,3	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
778,8	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
783,8	54	III	64	58	70	63	57	69	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
788,3	62	II	54	48	60	50	44	56	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
792,8	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
797,3	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
800,3	57	III	61	55	67	63	57	69	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
804,8	61	II	57	51	63	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
808,8	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
817,3	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
821,8	61	II	61	55	67	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
825,8	60	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
830,3	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
834,8	68	II	61	55	67	60	54	66	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
838,8	68	II	68	62	74	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
843,3	70	II	68	62	74	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
847,8	67	II	69	63	75	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
852,8	66	II	67	61	73	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
856,8	60	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
861,3	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
866,3	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
870,8	61	II	59	53	65	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
875,8	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
880,3	61	II	62	56	68	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
884,3	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
887,8	62	II	62	56	68	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
892,8	63	II	62	56	68	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
897,3	60	II	63	57	69	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
901,3	64	II	60	54	66	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
904,3	65	II	64	58	70	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
907,8	61	II	65	59	71	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
911,8	60	II	61	55	67	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
916,3	62	II	60	54	66	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
921,3	65	II	62	56	68	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
925,8	64	II	65	59	71	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
929,8	61	II	64	58	70	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
933,8	67	II	61	55	67	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
938,3	62	II	67	61	73	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
943,3	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
947,3	63	II	61	55	67	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
951,3	62	II	63	57	69	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
956,3	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
960,3	56	III	61	55	67	62	56	68	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
964,3	57	III	56	50	62	62	56	68	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
968,3	63	II	57	51	63	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
972,3	63	II	63	57	69	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
976,3	59	III	63	57	69	62	56	68	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
981,3	61	II	59	53	65	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
985,3	61	II	61	55	67	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
989,3	57	III	61	55	67	62	56	68	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
997,3	62	II	57	51	63	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1000,8	65	II	62	56	68	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1005,8	64	II	62	56	68	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1014,8	60	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1019,8	62	II	60	54	66	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1024,3	61	II	62	56	68	62	56	68	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1028,8	60	II	61	55	67	62	56	68	61	54	68	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1034,3	64	II	60	54	66	62	56	68	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1038,8	62	II	64	58	70	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1042,3	56	III	62	56	68	62	56	68	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1046,8	63	II	56	50	62	59	53	65	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1051,3	64	II	63	57	69	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1055,8	65	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1060,3	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1064,8	61	II	65	59	71	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1069,3	63	II	61	55	67	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1074,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1079,3	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1083,8	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1087,8	65	II	64	58	70	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1092,3	62	II	65	59	71	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1096,3	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1101,3	60	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1105,3	63	II	60	54	66	62	56	68	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1109,8	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1114,3	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1118,8	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1123,3	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1128,3	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1133,3	61	II	64	58	70	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1138,3	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1142,8	66	II	62	56	68	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1148,3	66	II	66	60	72	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1153,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1157,8	63	II	66	60	72	66	60	72	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1162,8	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1167,8	65	II	64	58	70	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1171,8	64	II	65	59	71	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1181,3	64	II	64	58	70	64	58	70	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1184,3	65	II	64	58	70	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1189,3	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1194,3	65	II	63	57	69	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1198,8	65	II	65	59	71	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1203,8	62	II	65	59	71	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1207,8	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1212,3	63	II	64	58	70	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1216,8	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1225,8	63	II	61	55	67	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1230,3	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1239,3	61	II	61	55	67	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1244,3	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
1249,3	59	III	62	56	68	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1254,3	59	III	59	53	65	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1258,8	62	II	59	53	65	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1263,3	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1268,3	58	III	60	54	66	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1272,8	62	II	58	52	64	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1282,3	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1287,3	61	II	63	57	69	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1291,8	63	II	61	55	67	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1296,3	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1300,8	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1309,8	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1314,3	60	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1323,8	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1328,3	60	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1332,8	58	III	60	54	66	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1337,8	57	III	58	52	64	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1342,3	60	II	57	51	63	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1347,8	62	II	60	54	66	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1352,3	60	II	62	56	68	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1356,8	63	II	60	54	66	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1361,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1365,8	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1370,8	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1374,8	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1380,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1384,8	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1389,8	61	II	64	58	70	64	58	70	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1393,8	64	II	61	55	67	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1398,8	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1402,8	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1406,8	63	II	63	57	69	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1411,8	66	II	63	57	69	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1415,8	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1424,8	65	II	64	58	70	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1429,3	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1433,8	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1438,3	61	II	62	56	68	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1442,8	59	III	61	55	67	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1447,8	60	II	59	53	65	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1452,3	59	III	60	54	66	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1456,8	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1461,3	62	II	59	53	65	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1466,3	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1469,3	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1474,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1478,8	62	II	64	58	70	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1482,3	64	II	62	56	68	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1488,3	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1492,8	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1497,3	65	II	63	57	69	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1501,3	67	II	65	59	71	64	58	70	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1505,3	62	II	67	61	73	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1514,8	65	II	62	56	68	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1518,3	64	II	65	59	71	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1523,3	64	II	64	58	70	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1527,3	63	II	64	58	70	64	58	70	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1531,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1535,3	62	II	64	58	70	64	58	70	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1539,8	67	II	62	56	68	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1544,3	65	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1548,3	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1552,8	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1557,3	68	II	63	57	69	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1561,3	65	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1565,3	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1569,3	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1573,8	67	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1578,3	65	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1582,8	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1587,3	66	II	63	57	69	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1591,8	67	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1596,3	65	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1601,3	64	II	65	59	71	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1605,8	60	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1610,3	61	II	60	54	66	63	57	69	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1615,3	62	II	61	55	67	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1619,8	65	II	62	56	68	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1623,8	60	II	65	59	71	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1627,8	54	III	60	54	66	67	61	73	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1632,8	54	III	54	48	60	63	57	69	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1637,3	55	III	55	49	61	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1642,3	61	II	56	50	62	54	48	60	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1646,3	61	II	61	55	67	54	48	60	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1650,8	63	II	61	55	67	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1655,8	62	II	63	57	69	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1660,3	63	II	62	56	68	63	57	69	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1664,8	59	III	63	57	69	63	57	69	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1670,3	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1675,3	60	II	58	52	64	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1680,3	63	II	59	53	65	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1684,8	66	II	62	56	68	63	57	69	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1688,8	68	II	66	60	72	63	57	69	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1693,8	65	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1699,3	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1703,8	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1708,8	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1713,3	67	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1717,8	63	II	66	60	72	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1722,3	68	II	63	57	69	63	57	69	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1730,3	66	II	67	61	73	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1733,8	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1738,3	71	II	68	62	74	67	61	73	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1742,8	68	II	71	65	77	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1747,8	65	II	68	62	74	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1751,8	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1756,3	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1760,8	67	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1765,3	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1769,3	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1772,8	67	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1776,8	71	II	67	61	73	67	61	73	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1780,8	67	II	71	65	77	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1785,3	67	II	71	65	77	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1788,3	65	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1792,3	67	II	65	59	71	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1796,3	64	II	67	61	73	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1800,8	70	II	64	58	70	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1804,8	67	II	70	64	76	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1809,3	71	II	67	61	73	67	61	73	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1813,3	66	II	71	65	77	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1817,3	65	II	66	60	72	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1821,3	68	II	65	59	71	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1825,8	65	II	68	62	74	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1830,3	67	II	65	59	71	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1834,3	67	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1838,8	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1842,8	65	II	66	60	72	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1846,8	63	II	65	59	71	67	61	73	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1851,8	62	II	63	57	69	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1855,8	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1864,3	60	II	65	59	71	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1869,3	67	II	60	54	66	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1873,3	65	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1877,3	68	II	65	59	71	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1882,3	64	II	68	62	74	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1886,3	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1891,3	64	II	62	56	68	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1895,3	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1899,8	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1904,3	59	III	62	56	68	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1909,3	57	III	59	53	65	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1914,3	56	III	57	51	63	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
1918,8	59	III	56	50	62	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
1923,3	62	II	59	53	65	63	57	69	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1927,3	65	II	62	56	68	63	57	69	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1931,8	67	II	65	59	71	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1935,8	67	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1940,8	70	II	67	61	73	67	61	73	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1944,8	71	II	70	64	76	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1950,3	69	II	71	65	77	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1954,8	70	II	69	63	75	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1959,8	68	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1963,8	74	II	68	62	74	65	59	71	73	66	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1967,8	70	II	74	68	80	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1972,8	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1978,3	67	II	70	64	76	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1982,8	67	II	67	61	73	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1987,3	71	II	67	61	73	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1991,8	71	II	71	65	77	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
1996,3	70	II	71	65	77	71	65	77	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2000,8	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2009,8	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2017,8	71	II	70	64	76	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2023,3	66	II	71	65	77	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2027,8	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2032,3	70	II	68	62	74	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2035,8	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2040,8	66	II	68	62	74	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2049,3	68	II	66	60	72	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2053,8	68	II	68	62	74	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2057,8	72	II	68	62	74	68	62	74	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2061,8	70	II	72	66	78	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2066,3	64	II	70	64	76	70	64	76	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2069,8	67	II	64	58	70	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2074,8	72	II	67	61	73	70	64	76	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2079,3	66	II	72	66	78	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2083,8	67	II	66	60	72	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2087,8	65	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2092,8	69	II	65	59	71	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2097,8	72	II	69	63	75	67	61	73	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2101,8	71	II	72	66	78	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2106,3	68	II	71	65	77	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2110,3	70	II	68	62	74	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2118,3	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2122,8	69	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2131,3	66	II	69	63	75	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2135,8	70	II	66	60	72	67	61	73	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2144,8	66	II	69	63	75	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2148,8	68	II	66	60	72	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2152,8	68	II	68	62	74	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2156,8	70	II	68	62	74	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
2161,3	70	II	70	64	76	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2165,3	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2169,8	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2174,8	65	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2179,8	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2184,3	70	II	67	61	73	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2188,8	66	II	70	64	76	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2193,3	69	II	66	60	72	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2197,3	66	II	69	63	75	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2202,3	65	II	66	60	72	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2207,3	72	II	65	59	71	67	61	73	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2216,3	73	II	72	66	78	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2221,3	70	II	73	67	79	73	67	79	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2225,3	70	II	70	64	76	70	64	76	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2229,8	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2234,3	70	II	68	62	74	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2239,3	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2243,8	73	II	68	62	74	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2248,3	72	II	73	67	79	72	66	78	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2255,3	77	II	72	66	78	72	66	78	75	67	83	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2259,3	72	II	77	71	83	75	69	81	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2263,3	73	II	72	66	78	72	66	78	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2266,3	72	II	73	67	79	75	69	81	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2270,3	71	II	72	66	78	73	67	79	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2275,3	64	II	71	65	77	70	64	76	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2279,3	60	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2283,3	66	II	61	55	67	55	49	61	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2287,8	66	II	66	60	72	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2291,3	65	II	66	60	72	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2299,8	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2303,3	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2307,8	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2311,3	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2314,8	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2318,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2321,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2325,3	70	II	66	60	72	66	60	72	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2329,3	71	II	70	64	76	72	66	78	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2333,3	70	II	71	65	77	72	66	78	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2337,3	71	II	70	64	76	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2339,8	72	II	71	65	77	72	66	78	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2344,3	66	II	72	66	78	72	66	78	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2348,3	59	III	66	60	72	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2351,3	68	II	59	53	65	55	49	61	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2354,3	68	II	68	62	74	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2358,3	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2361,3	70	II	68	62	74	68	62	74	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2365,3	76	II	70	64	76	70	64	76	75	70	80	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
2370,8	81	I	76	70	82	72	66	78	78	72	84	0,61	0,38	0,01	0,00	0,00
2375,8	70	II	80	74	86	75	69	81	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2380,3	68	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2382,3	72	II	68	62	74	65	59	71	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2386,8	69	II	72	66	78	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2389,3	67	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2394,3	67	II	68	62	74	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2398,3	69	II	69	63	75	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2403,3	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2408,3	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2413,8	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2417,8	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2422,3	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2426,3	65	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2430,8	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2434,8	62	II	63	57	69	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2438,8	55	III	62	56	68	62	56	68	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2443,8	68	II	56	50	62	55	49	61	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2447,3	66	II	68	62	74	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2452,3	65	II	66	60	72	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2456,8	65	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2461,8	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2465,8	66	II	65	59	71	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2470,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2474,3	69	II	66	60	72	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2478,3	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2483,8	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2487,3	62	II	67	61	73	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2492,3	66	II	62	56	68	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2496,8	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2500,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2504,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2508,8	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2512,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2516,3	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2519,8	67	II	66	60	72	66	60	72	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2523,3	69	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2528,3	67	II	69	63	75	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2532,3	68	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2536,3	64	II	68	62	74	68	62	74	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2540,3	67	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2545,3	67	II	67	61	73	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2548,8	67	II	67	61	73	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2553,8	64	II	67	61	73	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2558,3	63	II	64	58	70	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2562,3	66	II	63	57	69	60	54	66	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2566,3	68	II	66	60	72	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2570,3	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
2574,8	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2578,3	59	III	66	60	72	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2582,8	64	II	59	53	65	60	54	66	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2586,8	67	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2591,3	63	II	67	61	73	68	62	74	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2595,3	67	II	63	57	69	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2599,3	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2603,3	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2607,3	68	II	67	61	73	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2610,8	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2614,8	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2618,8	68	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2623,3	66	II	68	62	74	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2627,8	64	II	66	60	72	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2631,8	62	II	64	58	70	62	56	68	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2636,8	62	II	62	56	68	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2641,3	67	II	62	56	68	62	56	68	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2644,8	64	II	67	61	73	68	62	74	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2650,3	64	II	64	58	70	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2653,8	66	II	64	58	70	64	58	70	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2658,3	64	II	66	60	72	68	62	74	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2662,8	61	II	64	58	70	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2667,3	63	II	61	55	67	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2671,3	64	II	63	57	69	63	57	69	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2675,3	67	II	64	58	70	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2679,3	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2684,8	61	II	68	62	74	68	62	74	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2689,8	56	III	61	55	67	60	54	66	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2694,3	60	II	56	50	62	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2697,8	54	III	60	54	66	65	59	71	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2702,3	57	III	55	49	61	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2706,8	57	III	58	52	64	60	54	66	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2711,3	62	II	57	51	63	57	51	63	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2714,3	66	II	62	56	68	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2718,3	68	II	66	60	72	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2723,3	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2728,3	69	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2733,8	72	II	68	62	74	69	63	75	72	67	77	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2737,3	71	II	72	66	78	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2741,3	68	II	71	65	77	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2746,3	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2751,3	64	II	67	61	73	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2755,8	68	II	64	58	70	62	56	68	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2760,3	71	II	68	62	74	69	63	75	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2764,3	69	II	71	65	77	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2768,3	67	II	69	63	75	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2773,3	71	II	67	61	73	65	59	71	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2777,3	71	II	71	65	77	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
												I	II	III	IV	V
2781,3	69	II	71	65	77	71	65	77	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2785,8	68	II	69	63	75	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2790,3	65	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2794,3	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2799,3	69	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2803,3	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2807,3	69	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2813,3	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2817,8	71	II	68	62	74	68	62	74	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2821,8	71	II	71	65	77	70	64	76	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2826,3	71	II	71	65	77	71	65	77	70	64	76	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2830,3	75	II	71	65	77	71	65	77	74	67	81	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2835,3	75	II	75	69	81	70	64	76	74	67	81	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2839,8	75	II	75	69	81	75	69	81	74	67	81	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2844,3	67	II	75	69	81	75	69	81	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2848,8	68	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2853,3	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2855,8	66	II	67	61	73	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2861,3	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2866,3	69	II	70	64	76	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2869,8	67	II	69	63	75	69	63	75	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2873,8	69	II	67	61	73	67	61	73	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2877,8	68	II	67	61	73	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2882,8	66	II	68	62	74	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2886,3	66	II	66	60	72	67	61	73	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2890,8	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2895,3	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2898,8	66	II	66	60	72	66	60	72	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2902,3	63	II	66	60	72	66	60	72	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2906,3	59	III	63	57	69	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2911,3	56	III	59	53	65	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2916,3	59	III	56	50	62	55	49	61	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
2921,3	65	II	59	53	65	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2926,3	66	II	65	59	71	68	62	74	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2931,3	63	II	66	60	72	66	60	72	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2935,3	65	II	63	57	69	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2939,3	67	II	65	59	71	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2943,3	68	II	67	61	73	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2948,8	69	II	68	62	74	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2952,8	70	II	69	63	75	69	63	75	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2956,8	73	II	70	64	76	70	64	76	72	66	78	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2960,8	70	II	73	67	79	72	66	78	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2964,8	67	II	70	64	76	70	64	76	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2969,3	69	II	67	61	73	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2973,3	66	II	69	63	75	70	64	76	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2978,3	60	II	66	60	72	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2982,3	65	II	60	54	66	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2986,8	61	II	65	59	71	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
2991,3	63	II	61	55	67	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
2995,8	69	II	63	57	69	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3000,3	69	II	69	63	75	70	64	76	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3004,3	68	II	69	63	75	69	63	75	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3008,3	65	II	68	62	74	67	61	73	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3014,3	61	II	65	59	71	65	59	71	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3018,3	62	II	61	55	67	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3021,3	65	II	62	56	68	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3025,3	66	II	65	59	71	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3031,3	68	II	66	60	72	65	59	71	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3034,8	64	II	68	62	74	70	64	76	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3037,8	66	II	64	58	70	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3041,3	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3045,8	59	III	64	58	70	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3050,8	58	III	59	53	65	60	54	66	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3054,8	59	III	58	52	64	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3058,3	62	II	59	53	65	60	54	66	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3062,8	64	II	62	56	68	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3067,3	62	II	64	58	70	65	59	71	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3071,3	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3075,3	65	II	63	57	69	65	59	71	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3077,8	70	II	65	59	71	65	59	71	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3083,3	62	II	70	64	76	70	64	76	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3087,3	63	II	62	56	68	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3092,3	66	II	63	57	69	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3094,8	70	II	66	60	72	66	60	72	66	57	75	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3098,8	68	II	70	64	76	68	62	74	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3103,8	67	II	68	62	74	68	62	74	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3107,8	64	II	67	61	73	65	59	71	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3111,8	65	II	64	58	70	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3115,8	63	II	65	59	71	65	59	71	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3119,8	66	II	63	57	69	62	56	68	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3123,8	66	II	66	60	72	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3128,3	64	II	66	60	72	66	60	72	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3131,3	66	II	64	58	70	65	59	71	65	58	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3135,3	69	II	66	60	72	66	60	72	67	61	73	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3139,3	63	II	69	63	75	70	64	76	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3142,8	61	II	63	57	69	60	54	66	61	55	67	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3146,3	59	III	61	55	67	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3149,8	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3153,8	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3157,8	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3161,3	57	III	59	53	65	57	51	63	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3164,3	55	III	57	51	63	57	51	63	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3168,3	58	III	55	49	61	55	49	61	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3172,8	59	III	58	52	64	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3176,8	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3179,3	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00

Avanço da escavação (m)	Frete de escavação		Frete seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
3185,3	58	III	59	53	65	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3187,3	58	III	58	52	64	57	51	63	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3191,8	56	III	58	52	64	58	52	64	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3195,8	55	III	56	50	62	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3199,8	56	III	55	49	61	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3203,3	59	III	56	50	62	58	52	64	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3206,8	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3212,3	57	III	59	53	65	59	53	65	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3214,8	55	III	57	51	63	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3217,8	53	III	55	49	61	57	51	63	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3221,8	54	III	53	47	59	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3225,8	56	III	54	48	60	55	49	61	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3231,3	57	III	56	50	62	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3236,3	58	III	57	51	63	59	53	65	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3240,3	62	II	58	52	64	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3244,3	65	II	61	55	67	60	54	66	66	60	72	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3249,3	64	II	64	58	70	67	61	73	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3253,8	63	II	64	58	70	60	54	66	64	57	71	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3258,3	59	III	62	56	68	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3261,3	59	III	59	53	65	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3264,3	64	II	59	53	65	59	53	65	63	56	70	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3268,3	59	III	64	58	70	65	59	71	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3272,3	59	III	59	53	65	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3275,3	54	III	59	53	65	59	53	65	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3278,3	55	III	54	48	60	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3282,3	53	III	55	49	61	55	49	61	55	50	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3285,8	55	III	53	47	59	55	49	61	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3289,3	60	II	55	49	61	55	49	61	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3292,3	60	II	60	54	66	59	53	65	61	54	68	0,06	0,82	0,12	0,01	0,00
3295,3	59	III	60	54	66	60	54	66	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3298,8	56	III	59	53	65	59	53	65	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3303,3	58	III	56	50	62	53	47	59	59	51	67	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3307,8	56	III	58	52	64	59	53	65	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3311,8	59	III	56	50	62	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3315,3	54	III	59	53	65	59	53	65	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3318,8	57	III	54	48	60	55	49	61	58	52	64	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3322,3	59	III	57	51	63	57	51	63	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3326,3	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3330,3	59	III	59	53	65	59	53	65	59	52	66	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3334,3	56	III	59	53	65	59	53	65	57	51	63	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3338,8	41	III	56	50	62	53	47	59	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3341,3	40	III	41	35	47	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3343,3	40	III	40	34	46	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3346,3	39	IV	40	34	46	40	34	46	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3348,8	39	IV	40	34	46	38	32	44	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3352,3	41	III	41	35	47	39	33	45	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3355,3	24	IV	43	37	49	45	39	51	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3358,8	24	IV	28	22	34	20	14	26	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02

Avanço da escavação (m)	Frente de escavação		Frente seguinte													
	RMR observado	Classe	Estimação RMR + desvio padrão Krigagem			Estimação RMR + desvio padrão especialista			RMR provável + desvio padrão (Anexo X)			Probabilidade de ocorrência de classe				
			I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV
3361,3	23	IV	27	21	33	24	18	30	-	-	-	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3363,3	24	IV	24	18	30	20	14	26	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3366,3	24	IV	24	18	30	23	17	29	30	22	38	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3367,8	36	IV	24	18	30	24	18	30	36	28	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3369,8	40	III	36	30	42	40	34	46	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3372,3	44	III	40	34	46	40	34	46	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3375,3	55	III	44	38	50	50	44	56	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3377,8	47	III	55	49	61	60	54	66	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3380,3	51	III	47	41	53	45	39	51	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3383,3	54	III	50	44	56	55	49	61	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3387,3	47	III	53	47	59	55	49	61	49	42	56	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3391,3	51	III	46	40	52	45	39	51	55	48	62	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3395,3	54	III	50	44	56	50	44	56	54	48	60	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3398,8	52	III	53	47	59	55	49	61	54	47	61	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3402,3	48	III	53	47	59	50	44	56	48	42	54	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3405,8	43	III	48	42	54	48	42	54	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3408,8	43	III	43	37	49	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3412,8	42	III	43	37	49	43	37	49	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3415,3	42	III	42	36	48	42	36	48	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3418,8	39	IV	42	36	48	42	36	48	43	35	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3421,3	41	III	40	34	46	38	32	44	44	37	50	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3423,8	42	III	41	35	47	40	34	46	42	39	45	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3426,3	43	III	43	37	49	45	39	51	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3428,8	40	III	43	37	49	43	37	49	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3432,8	43	III	40	34	46	40	34	46	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3433,8	44	III	43	37	49	43	37	49	47	41	53	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3439,8	43	III	44	38	50	45	39	51	47	35	59	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00
3441,3	37	IV	43	37	49	43	37	49	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3443,3	35	IV	37	31	43	35	29	41	40	36	44	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3446,3	37	IV	35	29	41	35	29	41	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3450,8	37	IV	37	31	43	37	31	43	41	31	51	0,01	0,03	0,27	0,67	0,02
3453,8	40	III	37	31	43	37	31	43	41	33	49	0,01	0,16	0,79	0,05	0,00