



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Gestão de riscos na construção de túneis e obras subterrâneas

DAVID ANDRÉ PRATA GOMES
Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Estruturas

Orientador:

Eng.º Frederico Florentino Simões Melâneo, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina F. X. de Brito Machado, Prof. Coordenadora (ISEL)

Arguentes: Eng.º Frederico Florentino Simões Melâneo, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Mestre Júlio Walter Miguel Fernandes, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Doutor Carlos Jorge A. M. Trancoso Vaz, Prof. Coordenador (ISEL)

Dezembro de 2012



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil

Gestão de riscos na construção de túneis e obras subterrâneas

DAVID ANDRÉ PRATA GOMES
Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização em Estruturas

Orientador:

Eng.º Frederico Florentino Simões Melâneo, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina F. X. de Brito Machado, Prof. Coordenadora (ISEL)

Arguentes: Eng.º Frederico Florentino Simões Melâneo, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Mestre Júlio Walter Miguel Fernandes, Eq. Prof. Adjunto (ISEL)

Doutor Carlos Jorge A. M. Trancoso Vaz, Prof. Coordenador (ISEL)

Dezembro de 2012

“No construction project is risk free. Risk can be managed, minimized, shared, transferred or accepted. It cannot be ignored.”

Sir Michael Anthony Latham, 1994

GESTÃO DE RISCOS NA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS E OBRAS SUBTERRÂNEAS

RESUMO

Na engenharia civil, a construção de túneis e obras subterrâneas sempre foi particularmente afectada por incidentes, nomeadamente colapsos com consequências trágicas, a que nos últimos anos se tem dado uma maior importância. O elevado grau de incerteza que caracteriza este tipo de obras, devido à variável e complexa envolvente geológica, pode muitas vezes sujeitá-las a problemas que põem em causa a sua estabilidade e consequentemente a sua segurança e sustentabilidade económica. A análise destes incidentes e a preocupação de mitigar as suas consequências conduziu a que, organizações internacionais, particularmente as grandes empresas seguradoras, dirigissem a sua atenção para o problema, a ponto de desenvolverem procedimentos adequados à gestão dos riscos que estas obras envolvem.

A gestão de riscos em obras subterrâneas tem cada vez mais um papel relevante neste tipo de empreendimentos na identificação, estudo e mitigação dos perigos que põem em causa a sua construção e consequentemente originam derrapagens financeiras. Deste modo, torna-se uma ferramenta de tomada de decisões importante para os elementos responsáveis actuarem de modo atempado no controlo da obra de forma a evitar qualquer tipo de desvio técnico e económico e garantir a sua qualidade.

Este Trabalho Final de Mestrado pretende fazer um levantamento e uma sistematização da temática da gestão dos riscos que ocorrem durante a construção de túneis e obras subterrâneas. Neste, são abordados, primeiramente os processos e os princípios globais de gestão de riscos em empreendimentos, os diferentes tipos de riscos e a sua respectiva gestão. Seguidamente, é abordada a aplicação destes princípios à geotecnia e construção de obras subterrâneas e os seus procedimentos. São analisados os diversos mecanismos de colapso de túneis, as suas causas prováveis, incluindo a componente geológica, as várias medidas de monitorização e mitigação dos mesmos. Por fim, é feito um breve resumo das ferramentas que podem ser utilizadas na gestão e monitorização do processo de construção, recorrendo a métodos lógicos e matemáticos.

RISK MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION OF TUNNELS AND UNDERGROUND STRUCTURES

ABSTRACT

In civil engineering, the construction of tunnels and underground structures has always been particularly affected by incidents, namely collapses with tragic consequences, which in recent years has been given greater importance. The high degree of uncertainty that characterizes this type of work, due to variable and complex geological environment, can often subject it to problems that jeopardize its stability and hence its security and economic sustainability. The analysis of these incidents and the concern to mitigate its consequences led that international organizations, particularly the large insurance companies, turn their attention to the issue as to develop appropriate procedures to manage the risks that these works involve.

Risk management in underground construction has an increasingly important role in such developments in the identification, study and mitigation of hazards which jeopardize its construction and consequently originate financial overruns. Thus, it becomes an important decision-making tool that allows the responsible elements to act in anticipation in the control of the work in order to avoid any deviation technically and economically and ensure its quality.

This thesis intends to do a survey and systematize the subject of risk management that occurs during the construction of tunnels and underground structures. In it, are addressed primarily processes and global principles of risk management in enterprises, the different types of risks and their respective management. Then, it is discussed the application of these principles to geotechnical and construction of underground structures and its procedures. It analyzes the various mechanisms of collapse of tunnels, their probable causes, including geological component, the various mitigation measures and monitoring thereof. Finally, there is a brief summary of the tools that can be used in the management and monitoring of the construction process, using logical and mathematical methods.

PALAVRAS-CHAVE

Túneis

Obras subterrâneas

Riscos

Gestão de riscos

Colapsos

KEYWORDS

Tunnels

Underground structures

Risks

Risk Management

Collapses

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Eng.º Frederico S. Melâneo, por toda a sua disponibilidade na orientação da presente dissertação final de mestrado e que, com a sua experiência e conhecimentos, acompanhou o seu desenvolvimento.

À minha mãe, pai, irmão e restante família e amigos por todo o apoio e força que me deram ao longo da minha vida de estudante.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objectivos do trabalho	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura do trabalho	4
2. OS RISCOS E A SUA GESTÃO	5
2.1 Evolução histórica.....	5
2.2 Definição de risco.....	8
2.3 Gestão de riscos em empreendimentos	12
2.4 Tipos de riscos e sua gestão	15
2.5 Princípios da gestão de riscos.....	16
2.6 O processo da gestão de riscos	18
3. GESTÃO DE RISCOS NA GEOTECNIA	21
3.1 Enquadramento	21
3.2 Gestão de riscos em túneis e obras subterrâneas	22
3.3 Plano de acção.....	25
3.4 Componentes típicas	28
3.5 Critérios de definição de riscos toleráveis.....	29
4. COLAPSOS EM TÚNEIS E OBRAS SUBTERRÂNEAS	35
4.1 Principais colapsos nos últimos anos	35
4.2 Categorias de colapsos	37
4.2.1 Colapso à luz do dia	37
4.2.2 Colapso subterrâneo	38
4.2.3 <i>Rock burst</i>	40
4.2.4 <i>Squeezing</i>	41
4.2.5 Infiltração e inundação de água.....	42
4.2.6 Colapso do emboquilhamento	43
4.3 Potenciais causas de colapso	44
4.3.1 Causas geológicas imprevistas	44
4.3.1.1 Falhas	44
4.3.1.2 Dobras	46
4.3.1.3 Juntas.....	47
4.3.1.4 Nível freático.....	50

4.3.1.5 Alteração da rocha.....	51
4.3.1.6 Tensões na rocha.....	51
4.3.2 Erros durante a construção de um túnel.....	52
4.3.3 Erros de gestão e controlo.....	53
4.3.4 Interrupções e outras pausas.....	54
4.3.5 Erros de comunicação e organização.....	54
5. MECANISMOS DE COLAPSO.....	55
5.1 Mecanismos de colapso no maciço.....	55
5.2 Mecanismos globais.....	57
5.2.1 Mecanismos de colapso do tipo G1.....	57
5.2.2 Mecanismos de colapso do tipo G2.....	58
5.2.3 Mecanismos de colapso do tipo G3.....	59
5.2.4 Monitorização dos mecanismos globais.....	60
5.3 Mecanismos locais.....	61
5.3.1 Mecanismos de solo deslocante.....	61
5.3.2 Mecanismos de terrenos moles.....	62
5.3.3 Monitorização dos mecanismos locais.....	62
5.4 Mecanismos no suporte de túneis.....	63
5.4.1 Mecanismos no suporte com soleira plana.....	63
5.4.1.1 Mecanismos por deficiência da fundação.....	63
5.4.1.2 Monitorização dos mecanismos por deficiência de fundação.....	64
5.4.1.3 Mecanismos de flexão.....	65
5.4.1.4 Monitorização dos mecanismos de flexão.....	66
5.4.2 Mecanismos no suporte com soleira curva (invert).....	66
5.4.2.1 Mecanismos por flexão.....	66
5.4.2.2 Monitorização dos mecanismos por flexão.....	68
5.4.2.3 Mecanismos por tensão de corte.....	68
5.4.2.4 Monitorização dos mecanismos por tensão de corte.....	70
5.5 Instrumentos de medição.....	70
6. FERRAMENTAS DE GESTÃO.....	73
6.1 Análise de árvore de falhas (<i>Failure Tree Analysis – FTA</i>).....	73
6.2 Análise de árvore de eventos (<i>Event Tree Analysis – ETA</i>).....	75
6.3 Análise de árvore de decisão (<i>Decision Tree Analysis – DTA</i>).....	76
6.4 Método multirrisco.....	77
6.5 Simulação de Monte Carlo.....	77
7. CONCLUSÕES.....	79

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Gravura da cidade de Lisboa depois do sismo de 1755. [http://nytimes.com]	6
Figura 2 – Reactor destruído em Chernobyl após o acidente nesta central nuclear em 1986. [http://boston.com/bigpicture/].....	7
Figura 3 – Assumir um risco. [http://alidavies.com].....	9
Figura 4 – Colapso durante a construção do metro de Shanghai, 2003. A deficiente gestão de riscos em empreendimentos pode levar a efeitos catastróficos. [Munich Re Group, 2006]	14
Figura 5 – O carácter iterativo do processo da gestão de riscos. [http://leadinganswers/typepad.com]	19
Figura 6 – Elementos típicos constituintes de um túnel rodoviário. [5].....	23
Figura 7 – Engenheiro observa os efeitos do desabamento por ruptura na rocha de um túnel urbano. [6].....	24
Figura 8 – Representação do conceito ALARP. [4] (adaptado).....	26
Figura 9 – Colapso no Taegu Metro, Coreia do Sul, 2000, que afectou toda a rua e edifícios adjacentes. [8]	36
Figura 10 – Colapso no metro de Singapura, 2004, que levou à abertura de um buraco com 30 m na Nicoll Highway, adjacente ao túnel. [http://singaporebuilder.com].....	36
Figura 11 – Colapso à luz do dia em Munique, 1994. [http://munichre.com]	37
Figura 12 – Colapso à luz do dia em Lisboa, 2003. [http://fórum-mergulho.com].....	37
Figura 13 – Resultado de um colapso na abóbada de um túnel durante a escavação. [14].....	39
Figura 14 – Colapso da parede lateral de um túnel na Central Eléctrica de Queimado, Brasil, 2002. Foi usada pedra para encher a cavidade onde de seguida se projectou betão. [14].....	39
Figura 15 – Danos causados pela ocorrência de <i>rock burst</i> numa mina na África do Sul. [http://sciencedirect.com]	40
Figura 16 – Ocorrência de <i>squeezing</i> na construção do túnel para a ligação de alta velocidade entre Lyon e Turim. [10].....	41
Figura 17 - Durante a construção do projecto Sauna Hydropower, na Noruega, a pressão dos fluxos de água chegou aos 40 bar. [http://meyco.basf.com]	42
Figura 18 – Colapso do tecto do emboquilhamento de um túnel. [14]	43
Figura 19 – Influência das falhas na escavação de túneis. [5]	45
Figura 20 – Influência das dobras na escavação de túneis. [5]	46
Figura 21 – Túnel perpendicular à estrutura do maciço. [5]	48
Figura 22 – Túnel paralelo à estrutura do maciço. [5]	48

Figura 23 – Influência das juntas na estabilidade dos túneis. [5].....	50
Figura 24 – Bombagem de água de uma frente de escavação inundada. [5].....	51
Figura 25 – Desabamento da frente de escavação (à esquerda) e do topo do túnel (à direita). [5]	55
Figura 26 – Mecanismos globais e locais. [12] (adaptado).....	56
Figura 27 – Mecanismos de colapso globais do tipo G1. [12] (adaptado).....	58
Figura 28 – Mecanismos de colapso globais do tipo G2. [12] (adaptado).....	59
Figura 29 – Mecanismos de colapso globais do tipo G3. [12] (adaptado).....	59
Figura 30 – Configuração de deformação do maciço na geratriz superior do túnel. [12] (adaptado).....	60
Figura 31 – Bacias de assentamentos transversais. [12] (adaptado)	60
Figura 32 – Mecanismos de colapso locais do tipo L1 a L4. [12] (adaptado)	61
Figura 33 – Mecanismos de colapso local do tipo L5. [12] (adaptado)	62
Figura 34 – Equilíbrio do mecanismo em solo deslizante. [12] (adaptado).....	63
Figura 35 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D1. [12] (adaptado)	64
Figura 36 – Gráfico de assentamentos na fundação. [12] (adaptado)	65
Figura 37 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D2. [12] (adaptado)	66
Figura 38 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1A e O1B. [12] (adaptado).....	67
Figura 39 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1C e O1D. [12] (adaptado).....	68
Figura 40 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O2A e O2B. [12] (adaptado).....	69
Figura 41 – Tipos de junta de betonagem entre a calota e a soleira. [12] (adaptado)	69
Figura 42 – Convergências e extensômetros no interior de um túnel. [10].....	70
Figura 43 – Marcas de nivelamento topográfico, extensômetros e inclinômetros na superfície de um túnel. [10].....	71
Figura 44 – Exemplo de uma análise de árvore de falhas de forma a determinar qual o tipo de TBM a utilizar para a escavação de um túnel. [http://sciencedirect.com/science/].....	75

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões do risco. [3]	9
Quadro 2 – Probabilidades de ocorrência e consequências de um evento. [2] (adaptado)	11
Quadro 3 – Uma representação das várias fases do sistema da gestão do risco.	13
Quadro 4 – Os vários tipos de gestão de risco e seus objectivos. [1]	15
Quadro 5 – O processo da gestão de riscos. [2] (adaptado)	20
Quadro 6 – Distribuição dos principais riscos por fases da obra. [13] (adaptado)	22
Quadro 7 – Actividades associadas à gestão de riscos, na perspectiva do Dono de Obra. [1]...	30
Quadro 8 – Frequência de ocorrência durante o período de construção. [4] (adaptado)	32
Quadro 9 – Classificação das consequências. [4] (adaptado)	32
Quadro 10 – Matriz de classificação dos riscos. [4] (adaptado)	33
Quadro 11 – Principais colapsos em túneis e obras subterrâneas entre 1994 e 2010. [The International Association of Engineering Insurers e The International Association of Engineering Insurers]	35
Quadro 12 – Instabilidade das juntas na estrutura de um túnel (paralelo e oblíquo). [5]	49
Quadro 13 – Instabilidade das juntas na estrutura de um túnel (perpendicular). [5]	49



1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O conceito de risco adquiriu um conceito social relevante a partir das últimas décadas do século XX, pois passou a ser uma característica a ter em conta no dia-a-dia das sociedades contemporâneas tecnologicamente desenvolvidas. Com o influente impulso dos meios de comunicação social, o público reconhece o risco como um elemento comum a diferentes situações de potencial perigo e perda.

O significado de risco pode ser definido como o resultante da combinação da probabilidade de um evento com as suas características e está presente explicitamente na nossa actualidade, sendo a sua identificação e mitigação crescentemente assumidas como objectivos fundamentais das sociedades modernas. A gestão de riscos constitui, assim, um aspecto central da gestão estratégica de todas as organizações. Consiste no processo pelo qual estas analisam metodicamente os riscos associados às suas actividades com o objectivo de mitigar danos e indirectamente reduzir encargos.

No entanto, a gestão de riscos não é apenas uma metodologia a ser utilizada nas empresas e nas organizações públicas, mas também em qualquer actividade de curta ou longa duração. Os benefícios e oportunidades decorrentes da sua aplicação devem ser vistos não apenas no contexto da própria actividade em causa mas também em relação aos muitos e variados interessados que podem ser afectados.

A experimentação da aplicação da gestão de riscos em empreendimentos reais é altamente recomendável para que se possam encontrar respostas aos desafios colocados pela indústria da construção. A aquisição de competências em gestão de riscos, a par com os conhecimentos especializados, contribui para que os técnicos de construção fiquem melhor posicionados para servir as suas organizações, os seus clientes e a sociedade em geral. No entanto, a quantificação de riscos associados às actividades de engenharia é frequentemente muito difícil, especialmente em actividades potencialmente perigosas, tanto em relação à avaliação das probabilidades de ocorrência dos eventos como a estimativa das consequências.



No âmbito da Engenharia Civil, a construção de túneis e obras subterrâneas está relacionada com um elevado grau de incerteza devido à complexidade e variabilidade geológica, a qual afecta os custos, o período de construção, a segurança da obra e o impacto no meio envolvente. Para abordar os efeitos destes elementos de incerteza, a gestão de riscos tornou-se, portanto, uma parte comum e vital nos projectos de túneis, como ferramenta para prever e controlar todas as actividades, antes, durante e depois da realização de trabalhos. Isto verificou-se especialmente depois de um conjunto de colapsos fatais que ocorreram na década de 1990. Tais colapsos são causados, geralmente, por uma combinação de factores que podem ser divididos por três grupos principais:

- Condições geológicas desfavoráveis;
- Erros de concepção e planeamento;
- Falhas na execução.

Como forma de auxílio nestas tarefas da gestão de riscos, existem várias metodologias e ferramentas a serem seguidas que, se o não for, podem implicar graves consequências humanas, financeiras e económicas, funcionais, sociais, ambientais e políticas.

1.2 Objectivos do trabalho

Este trabalho pretende apresentar a metodologia de gestão de riscos na fase de escavação e execução da estrutura de um túnel com base nas incertezas geológicas e geotécnicas e as suas consequências sobre as obras subterrâneas em geral. A observação e a monitorização da construção/escavação de túneis, em particular a identificação dos potenciais mecanismos de colapso, é uma actividade importante no acompanhamento contínuo das obras, pois permite observar a sua estabilidade e, caso necessário, introduzir ajustes necessários ao projecto na mitigação dos potenciais riscos.

O objectivo final é apresentar a terminologia e a técnica da avaliação desses riscos geotécnicos e incertezas, a classificação desses riscos, o quadro das condições geológicas e geotécnicas que os poderão potenciar e, em consequência, a metodologia para a sua análise, adaptando-a às diferentes fases do projecto.



Neste sentido, pretende-se levantar e sintetizar as bases essenciais de um instrumento de identificação de riscos, para que os intervenientes nos projectos de obras subterrâneas, particularmente o projectista e o Dono de Obra, possam identificar antecipadamente quais as condições geotécnicas indutoras de riscos e, também, meios de os mitigar, de modo a que as suas consequências tenham o menor impacto nos custos e prazos das obras, e que estas mantenham a sua segurança e a funcionalidade.

O trabalho ir-se-á focalizar nos riscos relacionados com a fase de construção da obra, escavação e estrutura de betão, e não nos riscos financeiros, de operação/manutenção e nos eventuais riscos sobre estruturas terceiras.

1.3 Metodologia

Para a abordagem a este problema, é introduzido o conceito de risco e sua gestão, na perspectiva global, complementando com uma detalhada evolução histórica do mesmo. Serão apresentadas as definições de risco e tipos de riscos, os seus princípios, processos e limitações.

Será estudado o conceito de gestão de riscos no contexto da geotecnia e construção de túneis e obras subterrâneas, serão apresentados os mecanismos de gestão e monitorização envolvidos neste tipo de estruturas, tais como as medidas de controlo e medidas mitigadoras. Na abordagem desta temática, são estudados os modos de ruptura dos túneis, tanto os mecanismos do maciço como os mecanismos da estrutura dos suportes, os principais modos de ruptura, os seus sintomas e as suas prováveis causas para que possam ser avaliados, analisados e identificados através da monitorização de trabalhos. Serão então apresentadas a análise e ferramentas necessárias de forma a lidar com empreendimentos desta natureza, relacionando-as com o contexto de custos e segurança da obra.



1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho é constituído por sete capítulos em que no primeiro é feita a introdução ao tema, enquadrando-o na situação actual e demonstrando a sua relevância para o campo da engenharia civil. São definidos também os objectivos do trabalho e a sua metodologia. No segundo capítulo é feita uma evolução histórica da gestão de riscos até aos dias de hoje e são definidos e explorados os diferentes tipos de riscos e a sua gestão. É explicitado o conceito de gestão de riscos em empreendimentos e os seus princípios e processos. No terceiro capítulo é explicada a importância e aplicação da gestão de riscos na construção de túneis e obras subterrâneas, o plano de acção geral e as componentes dessa gestão, assim como os critérios a tomar para a levar a cabo.

Seguidamente, o quarto capítulo debruça-se sobre as situações de risco, nomeadamente colapsos estruturais, a que a construção de túneis está sujeita. Define-os em categorias e descreve as suas potenciais causas, tanto naturais como humanas. O quinto capítulo explica os vários mecanismos em que ocorrem esses colapsos, dividindo-os em vários tipos conforme a forma do túnel e o meio. O sexto capítulo apresenta de modo resumido as principais ferramentas para controlo e mitigação de riscos que podem ser usadas em obras subterrâneas, recorrendo a modelos lógicos e matemáticos. Por fim, no sétimo capítulo, apresentam-se as conclusões do que foi exposto ao longo do trabalho. Segue-se a lista de referências bibliográficas e bibliografia consultada.



2. OS RISCOS E A SUA GESTÃO

2.1 Evolução histórica

Desde os seus inícios que a Humanidade lida com a vivência de perdas e ganhos decorrentes das contingências, existindo inúmeras evidências históricas de como essa vivência foi encarada e foi evoluindo. A possibilidade de perda, dano, desvantagem, destruição, contingência, perigo ou ameaça sempre foram noções associadas na linguagem corrente ao risco.

O modo de tentar controlar o risco ou de dar resposta às contingências de forma a atenuar angústias é crucial para a génese da actual gestão do risco. Pensa-se que a palavra “risco” derivou do termo latino *risicare*, na Idade Média, que significa “atrever-se” ou “ousar”. Durante o período medieval, a sociedade era predominantemente orientada por explicações baseadas na superstição e tradição, acolhendo a intervenção dos deuses com os quais se poderia estabelecer entendimentos relativos ao destino. Sendo um conceito humano e social, o conceito de risco afirma-se na civilização ocidental a partir do período do Renascimento, começando a ser usado num contexto específico relacionado com os acidentes e perdas de vidas e mercadorias durante o comércio marítimo. Este tipo de acidentes nas rotas navais e prejuízos consequentes levaram ao desenvolvimento dos primeiros sistemas de seguros e impulsionaram o conceito de risco e o seu uso de forma prática, substituindo a noção mais arcaica de boa e má fortuna.

Nos séculos XVI e XVII, o desenvolvimento da teoria e cálculo das probabilidades e da teoria dos jogos de azar constituiu uma das condições indispensáveis para o desenvolvimento da quantificação e gestão de risco. Os mais famosos pensadores matemáticos da época, como Pascal, Leibniz, Huygens, entre outros, estudaram a questão da indecisão perante a incerteza, no contexto dos jogos, introduzindo conceitos importantes. Nos séculos seguintes, a questão das probabilidades conhece desenvolvimentos notáveis e uma das componentes fundamentais do significado do conceito de “risco” é associada ao significado filosófico das probabilidades. [2]

Durante esta época, foram os desenvolvimentos no conhecimento científico e na tecnologia, aliados a uma nova ideologia económica, que levaram a uma transformação e inovação no conceito de gestão de risco. Nesta fase, o Homem vai assumir as suas responsabilidades e fazer uso dos conhecimentos e da racionalidade para fazer face aos perigos e às incertezas. Com o novo pensamento racionalista, passou a dar-se importância à compreensão e interpretação das incertezas e à tentativa de estabelecer previsões e tomar decisões baseadas na Razão. Segundo o engenheiro francês Georges-Yves Kervern, esta fase da Razão inicia-se, simbolicamente, com o terramoto de Lisboa de 1755 (Figura 1) e a conseqüente polémica entre os iluministas franceses Rousseau e Voltaire. Enquanto Voltaire atribui à Natureza e à Providência a responsabilidade pela destruição e perda de vidas, Rousseau chama a atenção para a responsabilidade dos actos e decisões humanas [2]. A sociedade começou então a distinguir, em termos de racionalização, os riscos externos dos riscos construídos. Enquanto os primeiros provinham do exterior da sociedade, ou seja, da Natureza, os segundos surgiam da acção própria da sociedade, do Homem.



Figura 1 – Gravura da cidade de Lisboa depois do sismo de 1755.
[<http://nytimes.com>]

Nos finais do século XIX e inícios do século XX, o aparecimento da industrialização revolucionou a perspectiva do controlo de riscos, na medida em que é acompanhada da ambição de dominar os perigos e avarias nos novos sistemas mecânicos e eléctricos através da ciência e da técnica. A análise de cenários teve uma evolução significativa com o desenvolvimento do armamento durante as duas guerras mundiais, mais concretamente durante o iminente conflito da Guerra Fria entre as duas maiores potências mundiais da altura, os Estados Unidos e a União Soviética.

Também foram cruciais para o desenvolvimento da gestão de risco os modelos de decisão racional nos mercados financeiros e na economia do século XX, com vários autores a darem contribuições importantes às questões das probabilidades objectivas (probabilidade de ocorrência de um evento) e subjectivas (estimativa da viabilidade da ocorrência de um evento), risco e incerteza, sorte, azar e responsabilidade e comportamento dos agentes, consolidando assim a teoria da decisão em clima de incerteza. Assim, em 1950, surge o termo *risk manager* na *Harvard Business Review*, impondo-se o conceito de gestão de risco nas comunidades associadas à gestão financeira e aos seguros, surgindo a “*Risk and Insurance Management Society*”.

A partir dos anos 70, graves acidentes a nível industrial e tecnológico aceleraram o desenvolvimento da gestão e análise de risco, como Seveso (1976), Three Mile Island (1979), Bhopal (1984), Challenger (1986) e Chernobyl (1986) (Figura 2). Relacionado com este último acidente na indústria da energia nuclear, refinaram-se as metodologias e procedimentos que estruturam a gestão do risco em empreendimentos, incluindo a engenharia. Nos anos 90, a abordagem científica do risco já abrange genericamente todas as actividades profissionais, pois os computadores pessoais facultaram uma grande capacidade de acumulação e tratamento de dados [1].



Figura 2 – Reactor destruído em Chernobyl após o acidente nesta central nuclear em 1986. [<http://boston.com/bigpicture/>]



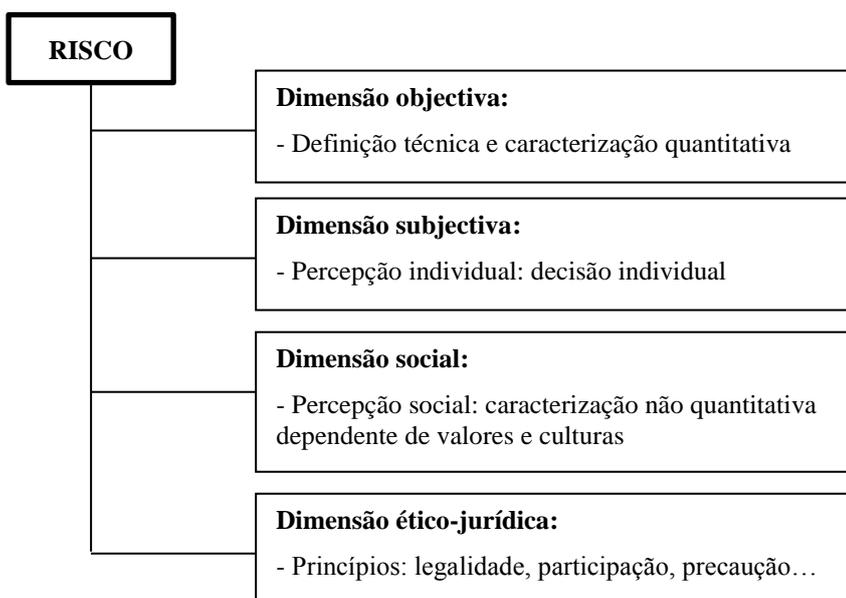
Na passagem do século XX para o século XXI, a gestão e análise de risco é uma área em forte desenvolvimento e expansão. Segundo Betâmio de Almeida (2006) [2], “... as características sociais e culturais das sociedades ocidentais, os efeitos emergentes da globalização e as alterações decorrentes das novas tecnologias intensificaram a importância geral do conceito de “risco”, tornando-o numa característica forte de ideologias dominantes nos domínios da economia, da tecnologia, da política e do social.” Por exemplo, o relatório das Nações Unidas em 2004, relativo à redução de riscos em desastres constituiu um importante contributo para a relação entre risco e desenvolvimento, pois ao se ter em conta o conceito de risco, é possível detectar situações de potencial perigo ou perda e, deste modo, garantir a segurança e medidas eficazes de protecção, evitando incidentes e melhorando a qualidade de vida das sociedades. Assim, o panorama actual propicia uma nova atitude na organização de respostas face às incertezas e às exigências da sociedade contemporânea, nomeadamente no que concerne à responsabilização pelas decisões e à participação pública.

2.2 Definição de risco

O conceito de risco desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, pois tem a capacidade de caracterizar ocorrências incertas, ou seja, desvios relativamente a situações de referência, justificar opções e decisões (variável de decisão) e influenciar a qualidade de vida, incentivando à protecção de pessoas e bens.

O significado atribuído ao conceito de risco, em geral, é a possibilidade de perigo de perda, dano, desvantagem ou destruição de um objecto ou a ocorrência de uma situação. No entanto, a definição de risco varia com a especificidade da aplicação em causa e com o contexto em que esta se realiza, havendo portanto muitas maneiras de se realizar esta definição.

Quadro 1 – Dimensões do risco. [3]



“... Na gestão de riscos não é adequado utilizar o termo comum “risco” com o significado de ‘acaso’ ou ‘incerteza’...”, como é salientado por Cardoso e Gomes (2010) [1], pois em termos simples, risco é a probabilidade de alguma coisa ocorrer, seja ela boa ou má. Assim, risco diz respeito ao valor esperado de um ou mais resultados de um ou mais eventos futuros. Tecnicamente, o valor desses resultados pode ser positivo ou negativo. Contudo, é comum a focar-se apenas nos potenciais danos causados por eventos futuros ou outras consequências negativas, como a redução dos efeitos benéficos ou outro tipo de efeito. O risco pode, então, ser definido como a resultante da combinação da probabilidade de um evento com as suas consequências.

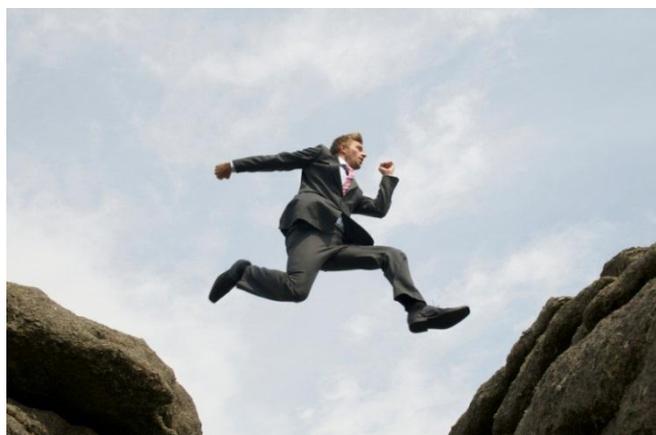


Figura 3 – Assumir um risco. [<http://alidavies.com>]



Em qualquer tipo de empreendimento, há potencialmente a possibilidade de ocorrência de eventos cujas consequências podem constituir quer oportunidades benéficas (positivo) quer ameaças ao sucesso (negativo). A gestão de risco é crescentemente reconhecida como uma metodologia que se preocupa com ambas as perspectivas, positiva e negativa. No campo da segurança é geralmente aceite que as consequências são apenas negativas e, por isso, a gestão de riscos de segurança foca-se na prevenção e mitigação do dano e/ou do prejuízo.

De forma a ultrapassar e resolver as ambiguidades, Hubbard (2009) [7] propõe as seguintes definições, associando ao risco fundamentalmente as consequências negativas dos eventos:

- **Incerteza** – Ausência de certeza completa, o que implica a existência de mais do que uma possibilidade. O verdadeiro resultado (ou consequência, ou estado, ou valor) não é conhecido.
- **Medição da incerteza** – Um conjunto de probabilidades atribuído a um conjunto de possibilidades. Por exemplo: “Há 70% de possibilidades de o mercado duplicar em 5 anos”.
- **Risco** – Uma situação de incerteza em que algumas das possibilidades envolvem perdas, acidentes ou outras consequências indesejáveis.
- **Medição do risco** – Um conjunto de possibilidades a cada uma das quais estão associadas uma probabilidade quantificada e um conjunto de perdas quantificado. Por exemplo: “Há 30% de probabilidades que o poço de petróleo proposto não tenha produção, o que a acontecer gera uma perda de 12 milhões de euros nos custos da prospecção exploratória”.

Segundo estas definições pode haver incerteza sem risco mas não risco sem incerteza. A então chamada definição objectiva ou técnico-científica de risco é aquela que interessa para o presente trabalho. Esta define os riscos como problemas futuros que podem ser evitados ou mitigados, em contraposição com os problemas presentes que têm que ser imediatamente enfrentados. Nesta perspectiva, o risco é uma “medida” composta por uma probabilidade de um acontecimento perigoso e receado, com uma determinada magnitude de impacto, e a intensidade das consequências do evento (efeitos, danos, prejuízos, etc.).

Quantitativamente falando, o risco é proporcional quer às consequências expectáveis de um dado evento, quer à probabilidade de ocorrência desse evento. Matematicamente, o risco (R) pode ser definido simplesmente como o produto da probabilidade de ocorrência de um acidente ($P[Acidente]$) com as perdas esperadas devido a esse acidente (D):

$$R = P[Acidente] \times D$$

= Valor expectável das perdas

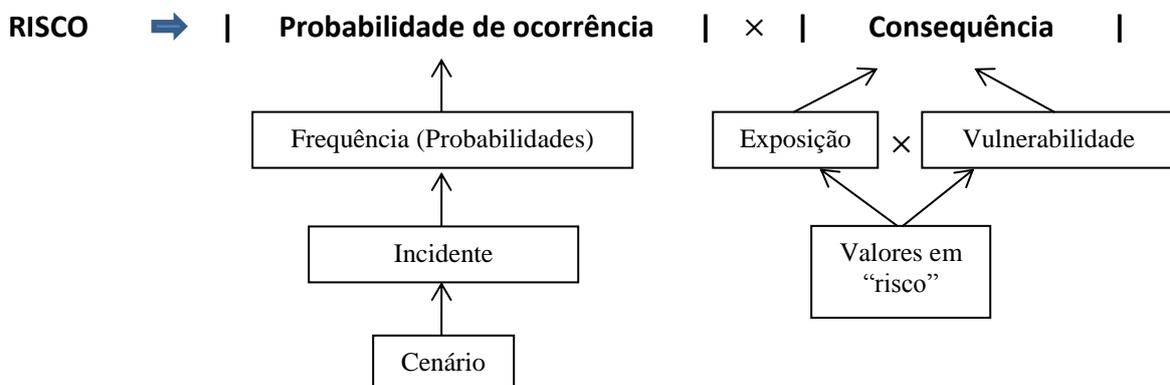
Ou, de forma mais genérica, como o produto da probabilidade de ocorrência de um qualquer evento ($P[Evento]$) com a probabilidade de acontecerem as consequências ($P[Consequências]$) expectáveis devido a esse evento:

$$R = \sum_i P[Evento] \times P[Consequência(i)|Evento]$$

= Valor expectável das perdas e dos ganhos

Assim, como demonstrado no Quadro 2, num dado cenário existe a possibilidade de ocorrência de vários incidentes, cada qual com uma determinada frequência, o que se traduz na probabilidade de ocorrência. A consequência de cada incidente vai depender da relação da exposição com a vulnerabilidade dos valores que são colocados em risco ao se dar o respectivo incidente.

Quadro 2 – Probabilidades de ocorrência e consequências de um evento. [2] (adaptado)





2.3 Gestão de riscos em empreendimentos

Tendo em conta que o risco não pode ser totalmente eliminado, é necessário geri-lo. Este processo consiste em avaliar, controlar, mitigar, planejar, prevenir, proteger e preparar respostas a crises.

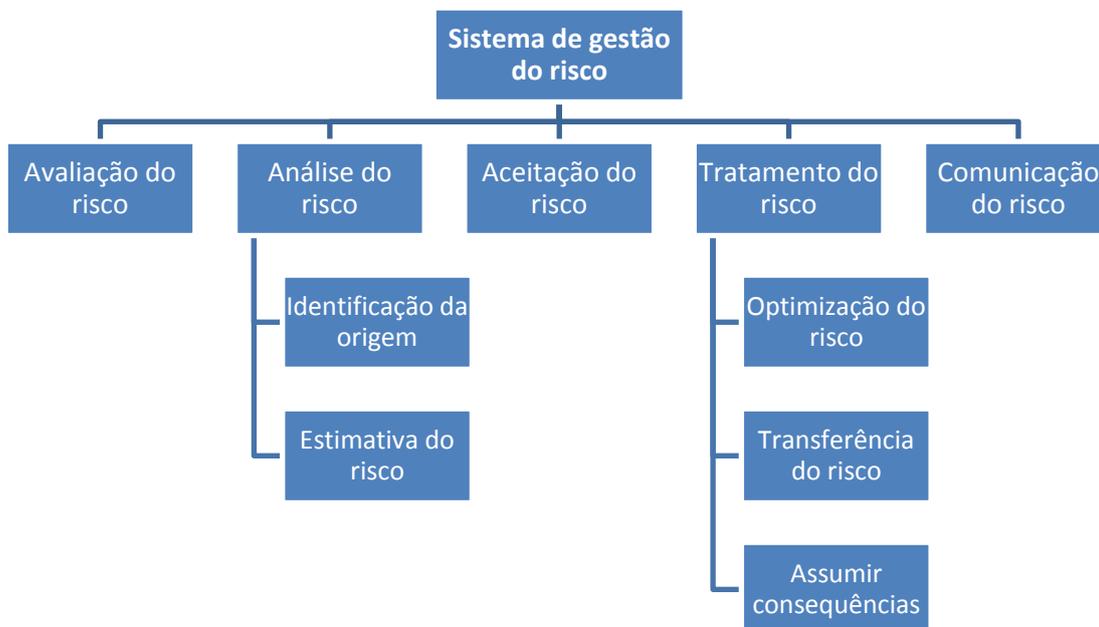
A gestão de riscos é geralmente definida como o processo de tomada de decisão integrando os resultados obtidos da avaliação do risco (avaliação das consequências *a priori*) de modo a deduzir as medidas preventivas adequadas à situação, como novas regras ou planos de emergência, por exemplo, e, em seguida, implementá-las, esperando a ocorrência de determinados eventos. Tem como objectivos a redução e controlo dos riscos para níveis aceitáveis, redução da incerteza na tomada de decisões e o aumento de confiança da população nessas decisões. Este procedimento pode ser dividido num conjunto de actividades:

- **Avaliação do risco** – Processo geral de avaliação e recolha de riscos;
- **Análise do risco** – Utilização sistemática de informações para identificar origens precisas, como objectos ou actividades potenciadoras de consequências, e para estimar o risco através da atribuição de valores para a probabilidade e consequência desses riscos;
- **Aceitação do risco** – A decisão de aceitar o risco;
- **Tratamento do risco** – Processo de selecção e de implementação de medidas para modificar o risco. Estas medidas passam por recusar uma situação de insegurança e removê-la, tomar decisões para minimizar as consequências negativas e maximizar as consequências positivas, partilhar com outra parte o lucro ou prejuízo gerado por uma situação de risco e assumir o lucro e a perda causada por uma condição de insegurança;

- **Comunicação dos riscos** – Troca ou partilha de informação sobre o risco entre o indivíduo que toma a decisão e qualquer pessoa, grupo ou organização que podem afectar, ser afectados ou sentir-se afectados pelo risco.

O Quadro 3 apresenta um organograma onde são representadas as várias fases, referidas anteriormente, do sistema gestão de riscos, de forma generalizada para quaisquer empreendimentos. O procedimento a seguir, desde a identificação do risco até à sua resolução, deve incluir todas estas etapas.

Quadro 3 – Uma representação das várias fases do sistema da gestão do risco.



A gestão dos riscos é um processo através do qual se analisam, metodicamente, os riscos associados às actividades de uma organização com o objectivo de alcançar uma situação sustentável e, desse modo, ao aumento da probabilidade de sucesso, isto é, à redução do insucesso e da incerteza, no que respeita à possibilidade de serem alcançados os objectivos globais da organização.

Esta gestão deve ser um processo contínuo e em constante desenvolvimento que se integre completamente na estratégia da organização, devendo fazer parte da cultura desta, sendo assumida aos seus diferentes níveis, de forma a ser adequada ao papel desempenhado por cada interveniente ou colaborador. A sua implementação de forma adequada deverá contribuir eficazmente para a definição das responsabilidades, para a avaliação dos desempenhos e para a definição dos proveitos, sendo, conseqüentemente, factor da promoção da eficiência operacional em todos os níveis.

A prática da implementação da gestão de riscos requer sempre muita experiência e conhecimento na área em questão, podendo o tratamento e a gestão de riscos ser realizados das mais diversas formas, algumas mais concisas que outras. Deve ter-se sempre presente a diferença entre risco e incerteza, em que, como foi referido, o risco deverá ser sempre medido através do produto do impacto dos eventos e a probabilidade de ocorrência dos mesmos. Enquanto há quem defenda que a avaliação qualitativa de riscos é subjectiva e pouco consistente, também se pode afirmar que a avaliação quantitativa pode carecer de sentido se os números a que se chega tiverem um suporte reduzido da realidade [1].



Figura 4 – Colapso durante a construção do metro de Shanghai, 2003. A deficiente gestão de riscos em empreendimentos pode levar a efeitos catastróficos. [Munich Re Group, 2006]

A má avaliação e organização de riscos, em termos de prioridades, podem causar perdas de tempo desnecessárias por se considerarem como riscos de perdas acontecimentos que não são verosímeis. O avaliar e tratar riscos inverosímeis consome recursos que poderiam ser usados em situações mais rentáveis. Por outro lado, conferir todos processos associados à gestão de riscos o mesmo grau de prioridade pode fazer com que uma organização tenha dificuldade em lhe dar início e, se uma vez iniciados, a impossibilidade os concluir.

2.4 Tipos de riscos e sua gestão

A ISO 31000 (*International Organization for Standardization*) [16] define o risco como sendo “*the effect of uncertainly on objectives*”, ou seja, a consequência da incerteza, positiva ou negativa, no alcance de objectivos. O quadro seguinte apresenta uma combinação útil entre riscos e os correspondentes objectivos para os diferentes tipos de gestão de riscos.

Quadro 4 – Os vários tipos de gestão de risco e seus objectivos. [1]

Tipo de gestão de risco	Objectivos principais
Gestão de risco do empreendimento	Prazo, custo, desempenho, qualidade, âmbito, satisfação dos clientes
Gestão de risco do negócio	Benefício, cota de mercado, competitividade, taxa interna de rendibilidade, reputação, repetição do trabalho
Gestão de risco de segurança estrutural	Baixo nível de acidentes, perda mínima de dias, prémios de seguros reduzidos, conformidade regulamentar
Gestão de riscos técnicos	Desempenho, funcionalidade, fiabilidade, fácil manutenção
Gestão de risco de segurança de pessoas e bens	Segurança da informação, segurança física, segurança dos activos, segurança pessoal



Para além destes e de outros riscos da mesma natureza, também existem os denominados riscos intangíveis associados a actividades de produção de bens e serviços. Só mais recentemente foi dada importância a estes riscos, com uma probabilidade de ocorrência de 100%, mas são ignorados ou não são tidos em conta pelas organizações, devido à falta de capacidade para os identificar adequadamente. Alguns exemplos de riscos intangíveis são:

- Quando na análise de uma dada situação se utilizam dados deficientes, materializa-se um risco que se designa por *risco de conhecimento*;
- Na ocorrência de uma relação difícil entre colaboradores de uma equipa, dá-se o denominado *risco de relacionamento*;
- Estabelece-se um *risco de processo* quando se aplicam procedimentos operacionais inadequados.

A consequência destes riscos é uma redução directa da produtividade, o que resulta num decréscimo dos lucros, dos benefícios e qualidade do serviço, da reputação, da marca comercial e dos salários. A identificação destes riscos e a sua correcta gestão potencia a criação imediata de valor.

2.5 Princípios da gestão de riscos

Para que uma gestão de riscos seja eficaz, a ISO 31000 identifica os seguintes princípios gerais da gestão de riscos que cada organização deve cumprir:

- **Proteger e criar valor** – A gestão de riscos contribui para a realização demonstrável dos objectivos e para a melhoria do desempenho referente, por exemplo, à segurança e saúde das pessoas, à conformidade legal e normativa, à aceitação pública, à protecção do meio ambiente, à qualidade do produto, à gestão de projectos, à eficiência nas operações e à reputação da organização.
- **Integrar-se de forma harmoniosa no processo organizacional** – A gestão de riscos não é uma actividade autónoma separada das principais actividades e processos da organização. A gestão de riscos faz parte das responsabilidades da



administração e é parte integrante de todos os processos organizacionais, incluindo o planeamento estratégico e todos os processos de gestão de projectos.

- **Fazer parte dos processos de tomada de decisão** – A gestão de riscos auxilia quem toma as decisões a fazer escolhas conscientes, antecipar acções e optar por formas alternativas de acção.
- **Tratar directamente a incerteza** – A gestão de riscos, explicitamente, leva em consideração a incerteza, a sua natureza e a forma como ela pode ser tratada.
- **Ser sistemática e estruturada** – Uma abordagem sistemática, oportuna e estruturada para a gestão de riscos contribui para a eficiência e para a obtenção de resultados consistentes, comparáveis e confiáveis.
- **Basear-se na informação disponível credível** – O processo de gestão de riscos deve basear-se em fontes de informação, tais como dados históricos, experiências, cooperação de partes interessadas, observações, previsões e opiniões de especialistas. Ao longo deste processo, quem toma as decisões deve informar-se e ter em consideração quaisquer limitações dos dados ou dos modelos utilizados, ou a possibilidade da divergência entre especialistas.
- **Ser específica, sob medida** – A gestão de riscos está alinhada com o contexto interno e externo da organização e com o perfil do risco.
- **Ter em consideração os factores humanos e culturais** – A gestão de riscos deve reconhecer as capacidades, percepções e intenções do pessoal interno e externo, pois podem facilitar ou dificultar a realização dos objectivos da organização.
- **Ser transparente e inclusiva** – O envolvimento apropriado e oportuno das partes interessadas e, em particular, de quem toma as decisões em todos os níveis da organização, assegura que a gestão de riscos permaneça pertinente e actualizada. O envolvimento também permite que as partes interessadas sejam



devidamente representadas e que as suas opiniões sejam tomadas em consideração na determinação dos critérios de risco.

- **Ser dinâmica, iterativa e adaptável às mudanças** – A gestão de risco deve ser sensível e adaptável às mudanças. À medida que acontecem eventos externos e internos, o contexto e o conhecimento modificam-se, realizam-se nova monitorização e a análise crítica de riscos, novos riscos surgem, outros modificam-se e alguns desaparecem.
- **Ser capaz de incorporar melhoramentos e alargamentos contínuos** – É benéfico que as organizações desenvolvam e implementem estratégias para melhorar a sua maturidade na gestão de riscos juntamente com todos os demais aspectos da organização.

2.6 O processo da gestão de riscos

De acordo com a norma ISO 31000 “*Risk management – Principles and guidelines on implementation*”, o processo de gestão de riscos comporta várias etapas, assim organizadas:

1. Identificação do processo de gestão;
2. Planeamento do processo de gestão;
3. Mapeamento do seguinte:
 - a. O âmbito social da gestão de riscos;
 - b. A identidade e os objectivos das entidades envolvidas ou interessadas;
 - c. As bases em relação às quais se procede à avaliação dos riscos e definição dos eventuais constrangimentos.
4. Definição do enquadramento para a actividade e de uma agenda para a identificação;
5. Desenvolvimento da análise de riscos envolvidos no processo;
6. Mitigação de riscos usando os recursos tecnológicos, humanos e organizacionais disponíveis.

No geral, o processo de gestão de riscos é um processo iterativo (Figura 5) em que nas sucessivas fases se aplica uma sequência de operações conceptualmente similar mas adaptada a cada fase. O mais importante neste processo é a aprendizagem que passa para a fase seguinte.

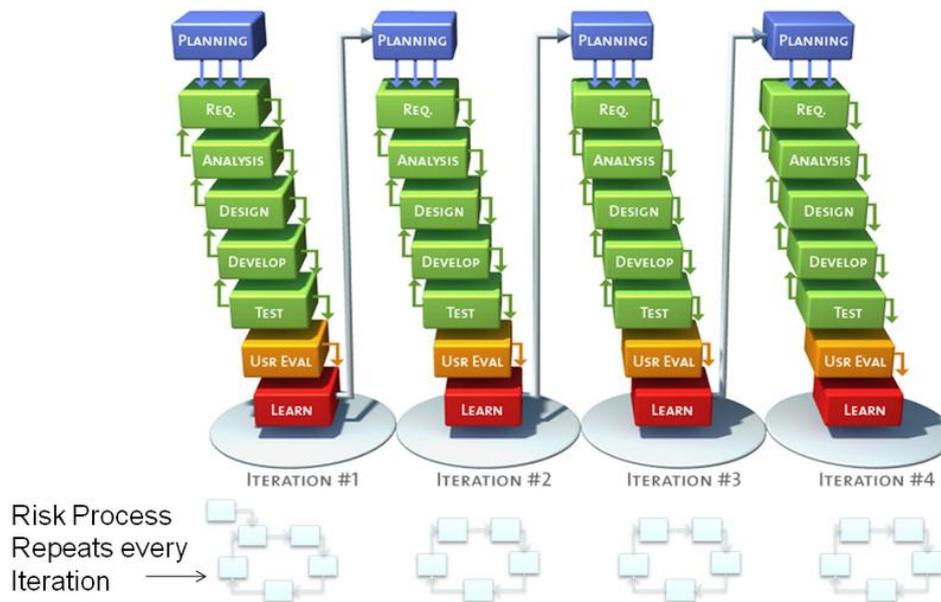
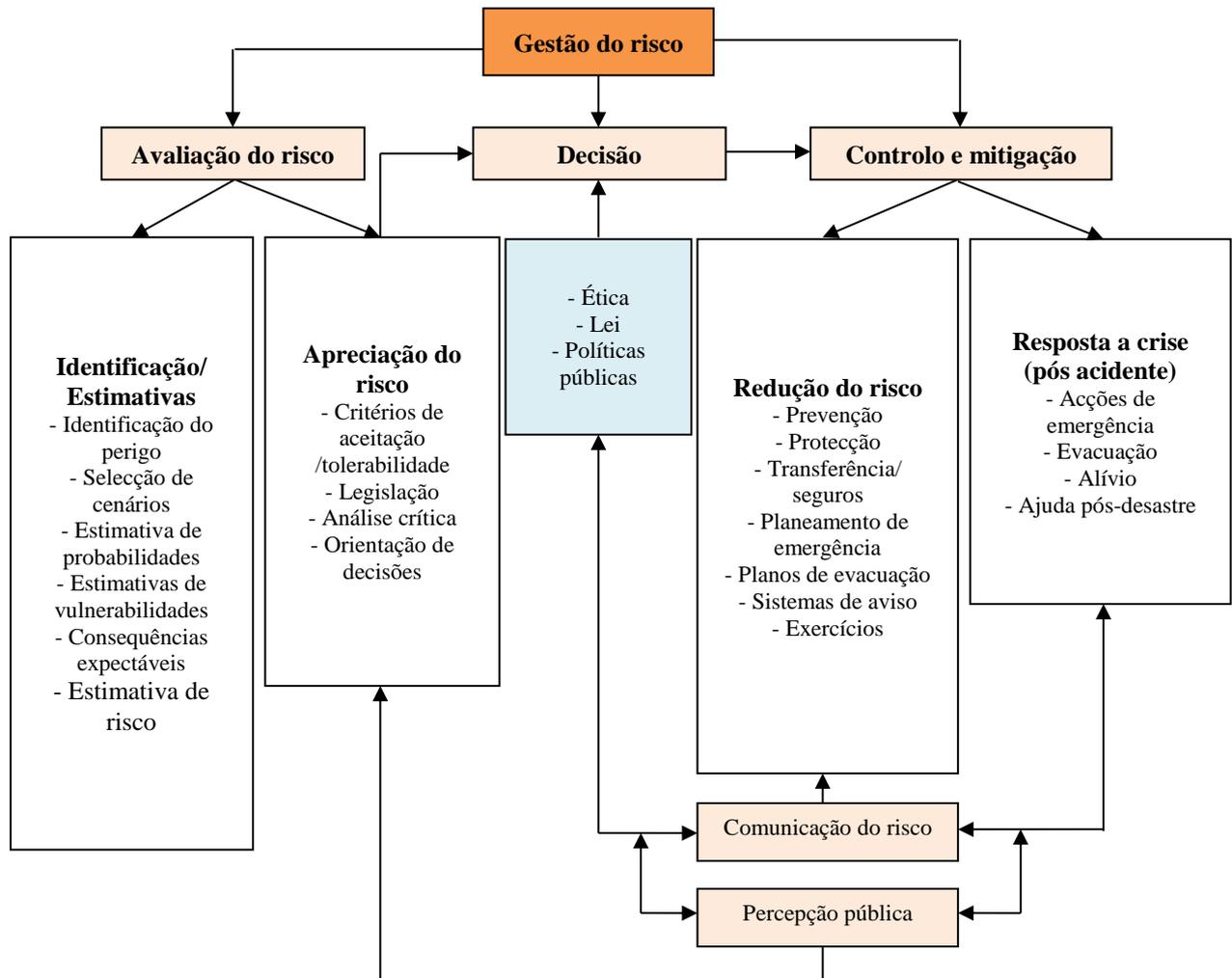


Figura 5 – O carácter iterativo do processo da gestão de riscos.
[<http://leadinganswers/typepad.com>]

Assim, em cada fase incorporam-se as informações recolhidas e as conclusões a que se chegou em todas as fases que a precederam. Este processo passa pela avaliação do risco, onde este deve ser identificado, estimado e analisado, a tomada de decisões e o seu controlo e mitigação, onde se pretende reduzir o risco e dar resposta caso o evento ocorra. Estas fases estão sempre interligadas, como se pode verificar no Quadro 5. A comunicação entre todas as partes envolvidas, por exemplo, deve ser efectuada durante as fases da sua apreciação do risco, tomada de decisões e de controlo e mitigação, assim como a percepção pública deve ser sempre tida em conta durante praticamente todas as fases de gestão do risco.

Quadro 5 – O processo da gestão de riscos. [2] (adaptado)





3. GESTÃO DE RISCOS NA GEOTECNIA

3.1 Enquadramento

No contexto da indústria da construção, em que ocorreram grandes desvios orçamentais e de prazo e em que a segurança e o meio ambiente foram afectados, devido a incidentes resultantes do deficiente conhecimento da natureza geológica e geotécnica dos terrenos, conduziu-se a que se desse importância à questão da gestão dos riscos desta natureza. Para isso, já existem disponíveis ferramentas modernas que ajudam na implementação nos processos de gestão e análise de riscos.

No entanto, independentemente da disponibilidade de conhecimentos e de ferramentas adequadas, a sua implementação e aplicação nas organizações envolvidas, neste caso as empresas de construção, não tem sido fácil. Ainda subsistem sérias barreiras nesta área relacionadas com a motivação profissional, com a insuficiente importância dada ao assunto e com a falta de formação em gestão de riscos geotécnicos, imperando ainda a política do preço mais baixo nos projectos e nas empreitadas, principalmente na presente situação económica, o que impede à nascença esta gestão.

Apesar da importância do assunto, é necessário ter em conta que a aplicação de um qualquer sistema de gestão de riscos geotécnicos não é uma garantia de que nada correrá mal no âmbito do processo de concepção, desenvolvimento e construção dos empreendimentos. No entanto, a implementação da gestão de riscos em grandes empreendimentos é sempre aconselhável para que se encontrem atempadamente soluções para prevenir desvios indesejáveis decorrentes do imponderável geológico.

Os métodos explícitos de gestão de riscos geotécnicos são bastantes recentes e ainda carecem de melhoramentos. Todos os esforços que contribuam para o seu desenvolvimento são benéficos, pelo que é recomendável a actualização e a troca de experiências obtidas de práticas anteriores e, ainda, com a informação vinda de outros sectores e disciplinas. As obras subterrâneas são aquelas cuja componente geológica e geotécnica é de importância capital, onde se tem constatado grandes desvios, quer de custos quer de prazos de execução decorrente das incertezas geológicas e geotécnicas. Assim, é aconselhável apostar-se mais na eliminação/redução das incertezas, através de investigação mais exaustiva previamente, do projecto à execução.

3.2 Gestão de riscos em túneis e obras subterrâneas

As estruturas subterrâneas são cada vez mais a solução para dar uma resposta adequada a questões técnicas em que o recurso a soluções de superfície é insuficiente, quer pela crescente saturação do espaço urbano quer pelo acidentado topográfico em que elas se inserem. A construção deste tipo de obras mostrou que ocorrem desvios com o aumento dos encargos financeiros e expansão dos períodos de execução.

É do conhecimento geral que ocorrem inúmeros incidentes neste tipo de obras e também a importância das suas consequências no processo de construção, pelo que a execução de um túnel exige o máximo de atenção de todos os intervenientes na construção no sentido de prevenir estes acontecimentos. Neste sentido, as empresas de construção começam a dar importância a este assunto e a envolver as seguradoras em todo este processo.

Decorrente das várias fases da vida útil de uma estrutura subterrânea, identificam-se, na generalidade, os períodos e os riscos associados (Quadro 6).

Quadro 6 – Distribuição dos principais riscos por fases da obra. [13] (adaptado)

 CONSTRUÇÃO	Risco →	Escavação – Durante o período de construção o risco está concentrado em colapsos da obra, intoxicação por acumulação de gases tóxicos provenientes de máquinas de combustão e electrocução por utilização de equipamentos eléctricos.
	Risco →	Instalação de equipamentos – Aqui os riscos inerentes são limitados à instalação de sistemas, ou seja, choques eléctricos, quedas, atropelamentos, etc.
 OPERAÇÃO	Risco →	Operação simulada – Todos os riscos inerentes a esta operação estão presentes em escala menor, pois o tráfego está limitado aos funcionários da empresa.
	Risco →	Operação comercial – Pode dividir-se os principais riscos em incêndios, explosões e deslizamento de taludes.

No contexto desta dissertação serão somente analisados os riscos do período de escavação e neste, os de natureza geológica e geotécnica referenciados no Quadro 6 como “*colapsos da obra*”.

A crescente dificuldade de financiamento de projectos torna imperativo que a gestão de riscos desempenhe um papel decisivo na execução de obras subterrâneas, na mitigação das consequências dos incidentes que, nos últimos anos, se verificou uma tendência de aumento em resultado de um certo número de factores [14], tais como:

- A construção de túneis em meios cada vez mais constrangidos;
- A utilização de métodos por técnicos não habilitados;
- Riscos não são devidamente identificados, geridos e controlados;
- A excessiva confiança nalguns métodos;
- A necessidade de cumprir prazos apertados;
- Os orçamentos cada vez mais com margens “esmagadas” pelo mercado.

Este tipo de empreendimentos é caracterizado, principalmente, pelo papel essencial desempenhado pelo terreno envolvente, que na verdade se torna o principal material de construção do projecto, em que a escavação do túnel introduz no meio circundante (terreno) movimentos que ao se propagarem através do maciço poderão produzir algumas desordens nas estruturas existentes na área da sua influência. Estas desordens poderão ter graves consequências com danos materiais e sobre as pessoas.

Assim, os incidentes identificados durante a construção de túneis decorrem da queda de material do maciço, de deformações excessivas, do colapso da estrutura de suporte ou do aparecimento generalizado de água. Cada incidente é um evento não controlado com consequências, obviamente indesejáveis, podendo ocorrer independentemente do método usado na escavação do túnel.

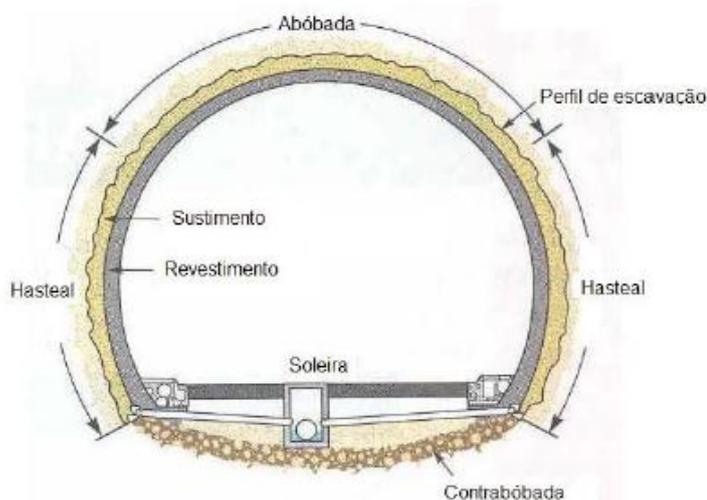


Figura 6 – Elementos típicos constituintes de um túnel rodoviário. [5]

A frequência da ocorrência de situações de incidentes na escavação de túneis é, em regra, superior à dos outros sectores da construção civil, pelo facto de nestes sectores o grau de conhecimento dos materiais e dos métodos construtivos ser, relativamente, maior, mesmo o decorrente das condições geológicas dos terrenos.

O facto de um túnel atravessar um terreno em que as condições geológicas dos locais afectados pela sua construção variam ao longo de um traçado, exige que se tenha em linha de conta os inúmeros factores geotécnicos, tais como a alteração e a fracturação nos maciços rochosos, ou a existência de argilas moles ou areias limpas em solos, em que a presença da água potencia a ocorrência de situações indesejáveis.

Também, a informação de natureza geológica recolhida em fase de projecto, isto é, antes da construção, é quase sempre limitada e insuficiente, quer devido à falta de tempo e recursos financeiros para a sua execução, quer por uma incompleta interpretação, pode originar uma deficiente caracterização geotécnica que afectará necessariamente o desenrolar da obra.

Assim, antes de iniciada a obra, é importante conhecermos e determos os processos pelos quais poderemos efectuar o controlo e a gestão dos riscos originados pelos desvios provocados por uma insuficiente caracterização geotécnica ou os imponderáveis de alguma singularidade geológica.



Figura 7 – Engenheiro observa os efeitos do desabamento por ruptura na rocha de um túnel urbano. [6]



A análise e a gestão de riscos em projectos de túneis são temas abordados em variadas e importantes publicações, onde são apresentados complexos requisitos e orientações a seguir. Destas destacam-se as publicações da *The International Tunnelling Insurance Group* (ITIG) e da *International Tunnelling Association* (ITA), principalmente o documento intitulado *Guidelines for Tunnelling Risk Management: International Tunnelling Association, Working Group N° 2*, de 2004.

3.3 Plano de acção

Nas fases iniciais do empreendimento, a identificação dos riscos associados ao projecto e à construção é uma tarefa essencial a ser desenvolvida. De maneira a constituir uma referência comum para todas as partes envolvidas, Dono de Obra, Projectistas, Seguradoras e Empreiteiros, deve ser definido um plano de acção relativo ao risco.

A título de exemplo, a *International Tunneling Association*, propõe a seguinte organização:

- O âmbito;
- Os objectivos do plano;
- A estratégia de gestão dos riscos.

Que, no contexto do “*Âmbito*”, devem ser incluídos os seguintes riscos ou consequências:

1. Riscos para a saúde e segurança dos trabalhadores, incluindo lesões, ferimentos pessoais e casos de mortalidade;
2. Riscos para a saúde e segurança de terceiros;
3. Riscos para a propriedade de terceiros, especificamente edifícios e estruturas existentes, monumentos e infra-estruturas enterradas;
4. Riscos para o ambiente, incluindo a possibilidade de poluição dos terrenos, dos cursos de água ou do ar e danos na flora e na fauna;

5. Riscos para o Dono de Obra resultantes dos atrasos de execução da obra;
6. Riscos para o Dono de Obra relativos a perdas financeiras e a custos adicionais não previstos.

Quanto aos objectivos, na elaboração do plano de acção devem ser contemplados objectivos gerais e objectivos específicos para cada tipo de risco. Os objectivos gerais do plano de acção relativo aos riscos do empreendimento têm por finalidade garantir uma gestão de riscos adequada em todas as fases do projecto mediante a sucessivamente melhorada e aprofundada:

- Identificação dos perigos;
- Identificação das medidas para eliminar ou minimizar os riscos;
- Implementação de medidas para eliminar e minimizar os riscos sempre que for economicamente viável ou requerido tendo presente os objectivos específicos e as imposições legais relativas à saúde e segurança.

A viabilidade económica pode ser definida através do conceito ALARP (Figura 8), que significa “reduzir todos os riscos cobertos até um nível tão baixo quanto seja razoavelmente praticável” (“as low as reasonably practicable”).



Figura 8 – Representação do conceito ALARP. [4] (adaptado)



O plano de acção relativo aos riscos de um empreendimento pode optar por colocar maior ênfase na minimização do risco global, mediante a redução da aparente ocorrência de eventos com consequências graves, por exemplo, muitas perdas de vidas humanas ou elevada preocupação pública e/ou política. Tal opção é pertinente caso o Dono de Obra considere que os eventos com baixa probabilidade de ocorrência, mas com consequências importantes, são mais preocupantes do que os eventos com elevada probabilidade, associados a consequências pouco significativas, mas se o risco, expresso pelo produto da probabilidade pelas consequências, for o mesmo. O plano de acção relativo aos riscos do empreendimento deve ainda incluir algumas prescrições gerais sobre a distribuição dos riscos entre as partes, devendo ser tomado em consideração o princípio genérico de que a responsabilidade por um dado risco deve ser atribuída à parte que disponha dos meios adequados para o controlar, seja ela o Dono de Obra ou o Empreiteiro.

Para cada tipo de risco, devem ser definidos objectivos mínimos adicionais aos objectivos gerais. Por exemplo, os membros do público em geral devem ser expostos apenas a um risco marginal durante a construção de um túnel ou de uma obra subterrânea, comparável com o risco a que estão sujeitos enquanto utilizadores de edifícios ou de veículos de transporte público ou privado ou quando simplesmente circulam a pé pelas ruas.

O plano de acção deve finalmente incorporar uma estratégia de gestão de riscos. Uma estratégia recomendada consiste em proceder à avaliação de riscos do empreendimento em todas as fases de projecto e de construção, tendo presente as informações disponíveis e as decisões a serem tomadas ou revistas em cada fase. Qualquer estratégia de gestão de riscos deve contemplar, segundo Cardoso e Gomes (2010):

- A definição das responsabilidades de gestão de riscos das diversas partes envolvidas (diferentes departamentos da organização do Dono de Obra, Consultores, Empreiteiros, etc.);
- Uma descrição breve das actividades a serem levadas a cabo nas várias fases do empreendimento de forma a serem alcançados os objectivos;



- Um registo, a ser usado quer para o seguimento quer para a incorporação dos resultados obtidos nas actividades de gestão de riscos, através do qual a informação acerca dos perigos (natureza e importância) identificados fica permanente e livremente acessível; o registo deve ser feito num formato que torne possível a sua compreensão por todas as partes;
- Regras relativas à verificação das hipóteses que foram feitas relativamente à fase operacional do empreendimento;
- Procedimentos de monitorização, auditoria e de revisão.

3.4 Componentes típicas

O processo de identificação dos riscos, segundo a *ITA – International Tunnel Association*, deve contemplar:

- A revisão das experiências operacionais a nível internacional de empreendimentos similares, descritas na literatura;
- O estudo das recomendações genéricas sobre riscos associados ao tipo de obra em causa;
- A discussão com profissionais qualificados e experientes pertencentes à equipa do projecto e a outras organizações relacionadas com o empreendimento.

É muito importante que a identificação dos riscos potenciais siga um procedimento estruturado, como o que, a título de exemplo, se resume seguidamente:

- Riscos genéricos
 - Disputas contratuais
 - Insolvência e problemas institucionais
 - Interferência das autoridades
 - Interferência de terceiras partes
 - Conflitos laborais



- Riscos específicos
 - Ocorrências acidentais
 - Condições adversas não previstas
 - Inadequação dos projectos, das especificações e/ou dos regulamentos
 - Falhas dos principais equipamentos
 - Ritmos de trabalho lentos, abaixo dos padrões aplicáveis

Os riscos específicos devem ser considerados para cada parte do empreendimento, enquanto os riscos genéricos podem ser atendidos geralmente para cada contracto. A experiência tem demonstrado, de acordo com a ITA (2004), que os dez riscos acima enumerados cobrem razoavelmente todos os problemas.

3.5 Critérios de definição de riscos toleráveis

A política de risco definida pelo Dono de Obra deve expressar, em termos gerais, os objectivos do plano de acção relativo aos riscos do empreendimento em questão. Estes devem ser traduzidos em critérios de definição dos riscos toleráveis a ser usados na actividade de avaliação de riscos previstos. Tal deve incluir os critérios de definição dos riscos toleráveis a ser usados na avaliação qualitativa e quantitativa dos riscos. Para cada tipo de risco que seja objecto de uma análise quantitativa, deve ser estabelecido:

- Um limite a partir do qual o risco é considerado inaceitável, pelo que deve ser reduzido, independentemente dos custos;
- Um limite abaixo do qual não é requerida nenhuma redução adicional do risco;
- Uma banda entre os dois limites para a qual devem ser tomadas medidas de mitigação do risco de acordo com as circunstâncias, usando, por exemplo, o princípio ALARP, atrás mencionado.

Os critérios que foram referidos anteriormente devem ser explicados em documento próprio, tendo presente os objectivos do plano de acção relativo aos riscos do empreendimento definidos pela política de risco do Dono de Obra. Devem ser assim definidas pelo Dono de Obra várias actividades a ter em conta relacionadas com a



gestão de riscos da obra, desde a sua fase de estudo prévio até à fase da sua construção, com o envolvimento constante dos Empreiteiros, para que se definam os critérios a ter para a obra em questão. As actividades definidas pelo Dono de Obra nas várias fases da mesma estão representadas no Quadro 7:

Quadro 7 – Actividades associadas à gestão de riscos, na perspectiva do Dono de Obra. [1]

	Dono de Obra	Empreiteiros
Fase de estudos iniciais	<ul style="list-style-type: none">- Definição do plano de acção relativo ao risco- Definição dos critérios de aceitação do risco- Avaliação qualitativa do risco- Avaliação específica (quantitativa) do risco- Documentos de gestão do risco	
	Preparação dos documentos do concurso: <ul style="list-style-type: none">- Descrição dos riscos técnicos significativos- Especificações técnicas para mitigar os riscos- Competências requeridas para a gestão de riscos	
Fase de concurso e de negociação do contrato		Preparação da proposta: <ul style="list-style-type: none">- Sistema de gestão de riscos proposto- Descrição da experiência e da competência em gestão de riscos- Identificação e descrição dos riscos associados à solução técnica proposta- Identificação e descrição das medidas de mitigação de riscos propostos
	Seleção dos Empreiteiros, levando em consideração: <ul style="list-style-type: none">- A capacidade de realização de gestão de riscos- Os riscos decorrentes das soluções técnicas propostas Preparação do contrato, incluindo cláusulas relativas ao risco	
Adjudicação do contrato		
	Equipas de gestão de riscos a trabalhar em conjunto	
	Supervisão da gestão de risco do Empreiteiro	Definição do sistema de gestão de riscos
Fase de construção	Avaliação e mitigação dos riscos do Dono de Obra	Avaliação detalhada do risco com a participação do Dono de Obra
		Medidas de mitigação de risco propostas
	Aprovação das medidas de mitigação de risco propostas pelos Empreiteiros	
		Implementação das medidas de mitigação



A frequência da ocorrência do evento de que se pretende avaliar o risco e a extensão das consequências se esse evento ocorrer, devem ser avaliadas seguindo um sistema de classificação estabelecido especificamente, atendendo às características e dimensão do empreendimento. Do mesmo modo, deve ser definido um sistema de classificação do risco, o qual, baseado na frequência e nas consequências atribuídas a um dado evento no decurso da análise de riscos, conduza a uma classificação do risco e, conseqüentemente, à indicação das acções que devem ser tomadas de acordo com o nível de risco.

As classificações da frequência, das consequências e do risco devem ser estabelecidas entrando em linha de conta com os objectivos do plano de acção relativo aos riscos do empreendimento e tendo presente os critérios de aceitação de riscos definidos para o empreendimento, nos termos já anteriormente referidos.

O sistema de classificação de frequência deve ser comum a todos os tipos de riscos considerados, enquanto o sistema de classificação das consequências tem que ser estabelecido separadamente para cada tipo de risco considerado. Porém, os diferentes sistemas de classificação das consequências devem ser coordenados para que um único sistema de classificação de riscos possa ser usado para todos os riscos considerados. Nos empreendimentos sensíveis dos pontos de vista político, económico ou ambiental e para os quais se pode esperar que a opinião pública venha ter um impacto importante no seu desenvolvimento, a perda de boa vontade (ou de confiança) do público em relação ao empreendimento pode constituir uma consequência que deve ser avaliada.

Para a classificação da frequência, geralmente, entende-se ser aconselhável do ponto de vista da aplicação prática a consideração de 5 classes ou intervalos, como apresentado por Eskesen (2006) e representado no Quadro 8. Neste quadro, a frequência da ocorrência de incidentes é definida de 0 (nunca acontece) a 1 (acontece sempre). Enquanto o intervalo de frequência é o intervalo entre a probabilidade máxima e mínima de ocorrência para cada classe de frequência, o valor central é a mediana, ou seja, o centro da distribuição da variável (valor do meio de todas as probabilidades registadas).

Quadro 8 – Frequência de ocorrência durante o período de construção. [4] (adaptado)

Descrição das classes de frequência	Classes de frequência	Valor central	Intervalo de frequência
Muito provável	5	1	> 0.3
Provável	4	0.1	0.03 – 0.3
Ocasional	3	0.01	0.003 – 0.03
Improvável	2	0.001	0.0003 – 0.003
Muito improvável	1	0.0001	< 0.0003

Também é considerado recomendável adoptar um sistema semelhante com 5 classes ou intervalos para a classificação das consequências. A selecção dos tipos de consequências e a avaliação da sua severidade potencial variam com o âmbito e natureza do empreendimento. O exemplo que se apresenta a seguir (Quadro 9), definido por Eskesen (2006), alinha com o que constitui a prática corrente, mas deve-se ter presente a necessidade de, em cada caso, ter presente as características específicas do empreendimento em causa.

Quadro 9 – Classificação das consequências. [4] (adaptado)

	Desastroso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
Efeitos em trabalhadores e equipas de emergência (Nº de fatalidades/ferimentos)	> 30 M	3<M<30	1-3 M 3-30 F	1-3 FG 3-30 FL	< 3 FL
Efeitos sobre pessoas não envolvidas (Nº de fatalidades/ferimentos)	> 3 M	1-3 M 3-30 F	1-3 FG 3-30 FL	< 3 FL	-
Perdas económicas de terceiros (milhões de euros)	> 3	0.3 a 3	0.03 a 0.3	0.003 a 0.03	< 0.003
Perdas económicas do Dono de Obra (milhões de euros)	> 30	3 a 30	0.3 a 3	0.03 a 0.3	< 0.03
Atrasos na construção (por danos)	> 2 anos	½ a 2 anos	2-6 meses	½-2 meses	< 2 semanas
Efeitos sobre o ambiente	Danos severos permanentes	Danos menores permanentes	Efeitos a longo prazo	Danos severos temporários	Danos menores temporários

M – mortos; F – feridos; FG – feridos graves; FL – feridos ligeiros

Quadro 10 – Matriz de classificação dos riscos. [4] (adaptado)

Frequência	Consequência				
	Desastoso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
Muito provável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejável	Indesejável
Provável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejável	Indesejável	Aceitável
Ocasional	Inaceitável	Indesejável	Indesejável	Aceitável	Aceitável
Improvável	Indesejável	Indesejável	Aceitável	Aceitável	Negligenciável
Muito improvável	Indesejável	Aceitável	Aceitável	Negligenciável	Negligenciável

O Quadro 10 mostra um exemplo de uma matriz de risco (relação da frequência com as consequências), que está de acordo com a prática normalmente corrente. As acções a empreender dependem obviamente da classificação do risco:

- **Inaceitável** – O risco deve ser reduzido pelo menos até ao nível Indesejável, independentemente dos custos das medidas de mitigação;
- **Indesejável** – Devem ser identificadas as medidas de mitigação, as quais serão implementadas desde que os seus custos não sejam desproporcionados face ao nível de redução de riscos que lhes está associado (ALARP);
- **Aceitáveis** – As incertezas devem ser avaliadas/geridas no decurso do projecto, mas não é necessário considerar medidas de mitigação;
- **Negligenciável** – Não é necessário continuar a considerar a incerteza em causa.

A matriz de risco deve ser usada para classificar cada um dos riscos identificados, controlando a magnitude dos riscos individuais, o risco global do empreendimento fica controlado sem haver necessidade de se proceder à sua estimativa.



4. COLAPSOS EM TÚNEIS E OBRAS SUBTERRÂNEAS

4.1 Principais colapsos nos últimos anos

O quadro seguinte demonstra os principais colapsos em túneis e obras subterrâneas, durante a sua construção, entre 1994 e 2010, as suas causas gerais e o seu custo aproximado. Outros acidentes ocorreram no mesmo período mas estes foram os que tiveram mais graves impactos sociais e económicos nos países em questão.

Quadro 11 – Principais colapsos em túneis e obras subterrâneas entre 1994 e 2010. [The International Association of Engineering Insurers]

Ano	Infraestrutura	País	Método	Causa	Custo (€)
1994	Great Belt Link	Dinamarca	TBM	Incêndio	32 milhões
1994	Munich Metro	Alemanha	NATM	Colapso	2 milhões
1994	Heathrow Express Link	Reino Unido	NATM	Colapso	150 milhões
1994	Metro Taipei	Taiwan	TBM	Colapso	12 milhões
1995	Metro Los Angeles	EUA	TBM	Colapso	16 milhões
1995	Metro Taipei	Taiwan	TBM	Colapso	30 milhões
1999	Hull Yorkshire	Reino Unido	TBM	Colapso	64 milhões
1999	Anatolia Motorway	Turquia	TBM	Sismo	121 milhões
2000	Taegu Metro	Coreia do Sul	TBM	Colapso	13 milhões
2000	TAV Bologna-Florence	Itália	NATM	Colapso	5 milhões
2002	Taiwan High Speed Railway	Taiwan	NATM	Colapso	11 milhões
2002	SOCATOP Paris	França	TBM	Colapso	8 milhões
2003	Shanghai Metro	China	Freezing	Colapso	69 milhões
2004	Singapore Metro	Singapura	TBM	Colapso	60 milhões
2005	Barcelona Metro	Espanha	NATM	Colapso	15,5 milhões
2005	Lausanne Metro	Suíça	NATM	Colapso	10,5 milhões
2005	Lane Cove Tunnel	Austrália	NATM	Colapso	16 milhões
2006	Kaohsiung Metro	Taiwan	TBM	Colapso	7,7 milhões
2006	Metro de São Paulo	Brasil	NATM	Colapso	91,5 milhões
2008	Stromovka Tunnel Prague	República Checa	TBM	Colapso	10 milhões
2008	Hangzhou Metro	China	TBM	Colapso	<i>indeterminado</i>
2008	Guangzhou Metro	China	TBM	Colapso	<i>indeterminado</i>
2008	Circle Line 4 Singapore	Singapura	TBM	Colapso	<i>indeterminado</i>
2009	Metro Cologne	Alemanha	TBM	Colapso	365 milhões
2010	Cairo Metro	Egipto	TBM	Colapso	20 milhões
2010	Blanka Tunnel Prague	República Checa	TBM	Colapso	1 milhão
2010	Lake Mead Tunnel	EUA	TBM	Inundação	30,6 milhões



Figura 9 – Colapso no Taegu Metro, Coreia do Sul, 2000, que afectou toda a rua e edifícios adjacentes. [8]



Figura 10 – Colapso no metro de Singapura, 2004, que levou à abertura de um buraco com 30 m na Nicoll Highway, adjacente ao túnel. [http://singaporebuilder.com]

4.2 Categorias de colapsos

É necessário subdividir os colapsos em diferentes categorias de forma a poderem ser descritos e explicados. Estas categorias são seleccionadas conforme vários factores, em que se incluem o local, a extensão, os efeitos, as consequências, as causas, os mecanismos, etc. Neste caso serão demonstradas seis categorias diferentes de colapsos definidas por Seidenfuss (2006) [14], as quais são: colapsos à luz do dia, colapsos subterrâneos, *rock burst*, *squeezing*, inundações e infiltrações de água e colapsos do emboquilhamento. Em seguida, cada categoria é explicada em particular.

4.2.1 Colapso à luz do dia

Dá-se o nome de colapso à luz do dia ao tipo de colapsos em que o maciço é exposto à superfície, geralmente devido à erosão provocada por águas subterrâneas, podendo o túnel tornar-se visível desde a cratera à superfície ou não. A propagação da falha no maciço até à superfície pode ser extremamente rápida dando origem a situações como as que se vêm de seguida, onde um autocarro em Munique, em 1994, estava a passar por uma área que colapsou nesse momento devido ao túnel do metropolitano, ficando preso numa cratera inundada de água e causando a morte a quatro pessoas (Figura 11). Uma situação semelhante verificou-se em Lisboa, em 2003, onde a superfície sob um autocarro em Campolide colapsou devido às intensas chuvas, não causando, no entanto, nenhuma vítima (Figura 12).



Figura 11 – Colapso à luz do dia em Munique, 1994. [<http://munichre.com>]



Figura 12 – Colapso à luz do dia em Lisboa, 2003. [<http://fórum-mergulho.com>]



Outros exemplos notáveis de colapsos à luz do dia foram os acidentes demonstrados anteriormente nas Figuras 9 e 10. No primeiro caso, um acidente de graves consequências deu-se quando, durante a construção de uma linha do metropolitano da cidade sul coreana de Taegu, uma parede de suporte cedeu e parte da escavação colapsou, enterrando um autocarro por debaixo dos escombros. Além da morte de três passageiros, o acidente provocou danos consideráveis nos edifícios circundantes. Esta situação foi provocada por não se ter tido em conta uma carga durante a fase de projecto, o que resultou em condições não previstas no terreno. No segundo caso, durante a escavação de um túnel para a Nicoll Highway MRT em Singapura, um muro de contenção colapsou dando origem a um profundo buraco de 30 metros através das seis faixas da auto-estrada, ao longo de cerca de 150 metros, provocando a morte de três trabalhadores.

4.2.2 Colapso subterrâneo

Esta categoria inclui os colapsos que ocorrem no túnel em construção, afectando pessoas e máquinas, mas que não afectam a superfície e consiste na queda de material e na formação de uma cavidade durante o desmonte de maciços.

Podem ocorrer em qualquer parte da secção do túnel em escavação, principalmente na abóbada (*roof collapse*) ou na parede lateral do túnel (*side-wall caving*), mas também na frente de escavação quando da utilização de meios mecânicos, pois estes podem afectar o volume de terreno que se encontra alguns metros à frente da frente de ataque do túnel fazendo com que o material colapse à frente das ferramentas de corte [14].

Este é provavelmente o tipo de colapso mais comum na construção de túneis. No entanto, é difícil representar a percentagem desta categoria no total de acidentes pois nem todos os colapsos subterrâneos são documentados, ao contrário dos colapsos à luz do dia que, devido ao seu impacto no meio, não passam despercebidos.



Figura 11 – Resultado de um colapso na abóbada de um túnel durante a escavação. [14]



Figura 12 – Colapso da parede lateral de um túnel na Central Eléctrica de Queimado, Brasil, 2002. Foi usada pedra para encher a cavidade onde de seguida se projectou betão. [14]

4.2.3 *Rock burst*

O *rock burst* é um termo usado para descrever uma rotura violenta e espontânea de uma rocha que pode ir desde de a explosão com a projecção de pequenos fragmentos de rocha até ao colapso súbito de grandes secções da parede de um túnel ou escavação. Este fenómeno ocorre em materiais de comportamento frágil quando submetido a grandes tensões e é, por isso, comum nas escavações de minas a grandes profundidades. Quando se dá a abertura de uma galeria de uma mina profunda, a rocha envolvente é libertada de enormes pressões o que pode levá-la a literalmente explodir na sua tentativa de restabelecer o equilíbrio. Devido às grandes profundidades em que esta situação se verifica, este fenómeno não se tem verificado em Portugal por não se realizarem obras a grandes profundidades. No entanto, na África do Sul é responsável pela morte de cerca de 20 mineiros por ano [11].

A frequência e a gravidade do *rock burst* normalmente aumentam com a profundidade. A causa deste aumento é atribuída ao crescente peso do material no recobrimento e, correspondentemente, às tensões crescentes na rocha com a profundidade. No entanto, a profundidade não é o único factor que pode ser atribuído ao *rock burst*, sendo as condições específicas do meio também importantes. Este fenómeno pode verificar-se em escavações pouco profundas, mas com consequências pouco severas. Nas escavações profundas, onde este fenómeno tem tendência a ocorrer, é normal começar a verificar-se *rock burst* após os 600 m de profundidade, tornando-se um problema sério após os 900 m.



Figura 13 – Danos causados pela ocorrência de *rock burst* numa mina na África do Sul. [<http://sciencedirect.com>]

4.2.4 *Squeezing*

O fenómeno de *squeezing* (fluência) ocorre quando material rochoso de pouca resistência se desloca para o interior da escavação do túnel sob a acção da gravidade e do elevado campos de tensões existentes no maciço. Rochas plásticas e semi-plásticas, que são sensíveis às deformações e falhas mesmo com valores de tensões relativamente baixos, são as que mais provavelmente exibem comportamento de *squeezing*.

Os efeitos do *squeezing* tornam-se imediatamente evidentes durante a escavação afectando os hasteais e a frente de escavação. O volume de rocha sujeita a este efeito no túnel avança lentamente, sem um aumento de volume perceptível. Os efeitos do *squeezing* na escavação dependem das características do suporte.



Figura 14 – Ocorrência de *squeezing* na construção do túnel para a ligação de alta velocidade entre Lyon e Turim. [10]

4.2.5 Infiltração e inundação de água

O aparecimento de água na construção de túneis pode causar vários tipos de dificuldades de maior ou menor gravidade, dependendo da sua quantidade (apenas uma infiltração ou uma inundação), da prevenção e das características do maciço. Isto poderá originar alterações no maciço, como a formação de chaminés, e danificar os trabalhos em curso e pôr em causa a segurança das pessoas envolvidas, sendo necessárias intervenções adicionais de modo a resolver o problema. O aparecimento de água em escavações subterrâneas pode dever-se a condições naturais (hidrogeológicas) ou não e influencia o processo de construção, a estabilidade do túnel e do meio envolvente e pode, em caso extremo, levar ao colapso à luz do dia. Uma inundação de água pode ser particularmente crítica se o túnel estiver a ser escavado numa direcção descendente ou a partir de um poço. A estabilidade das paredes estruturais e da frente de escavação pode ficar comprometida pela alta capacidade erosiva de fluxos de água a grande pressão ou pela insuficiente resistência ao corte, fazendo com que possam surgir falhas nas paredes do túnel. A presença de uma máquina TBM (*Tunneling Boring Machine*) pode atrasar este tipo de falhas, [14] seja quando é utilizado o método EPBM (*Earth Pressure Balanced Machine*) ou o método STSM (*Slurry Type Shield Machine*).

É comum que o aparecimento de água seja a fase preliminar de outra categoria de colapso, ou seja, tanto os colapsos à luz do dia como os subterrâneos poderão ter tido origem no aparecimento inesperado de água.



Figura 15 - Durante a construção do projecto Sauna Hydropower, na Noruega, a pressão dos fluxos de água chegou aos 40 bar.
[<http://meyco.basf.com>]

4.2.6 Colapso do emboquilhamento

As áreas de emboquilhamento ou pórtico do túnel frequentemente apresentam alguns dos pontos mais problemáticos durante a escavação do mesmo. Estes problemas que se concentram no emboquilhamento podem dever-se à natureza geológica do terreno, à falta de confinamento na área de recobrimento próxima e descontinuidades do maciço.

Vários factores influenciam os problemas no emboquilhamento como a direcção da escavação, a morfologia do local, as características geomecânicas do terreno, etc. Enquanto é altamente desejável que na localização escolhida para o emboquilhamento exista terreno de boa qualidade numa extensão e altura do túnel, as restrições ambientais e outras considerações relevantes vão, por vezes, afectar a escolha do local do emboquilhamento, fazendo com que neste possa ocorrer materiais de fraca qualidade geotécnica. Quando o terreno é exposto, a execução de um pórtico de betão reforçado nesta situação é um grande auxílio para a progressão dos trabalhos.



Figura 16 – Colapso do tecto do emboquilhamento de um túnel.
[14]



4.3 Potenciais causas de colapso

4.3.1 Causas geológicas imprevistas

Condições geológicas imprevistas são muitas vezes referidas como causa de colapsos. A geologia é o factor mais importante no projecto de execução de um projecto de um túnel, como tem sido apontado por vários autores. O modelo geológico para a execução de um túnel deve abordar aspectos como a estratigrafia, a estrutura do maciço, a litologia, as superfícies de contacto e a distribuição de litologias, a geomorfologia, a espessura e as características do manto de alteração, a espessura dos materiais de recobrimento e a posição e mobilidade da água. Todos estes aspectos fornecem dados para a elaboração do perfil geológico-geotécnico da escavação, que normalmente é um perfil longitudinal apoiado em perfis transversais. Para alcançar um modelo geotécnico adequado é necessário uma investigação bibliográfica da área, uma cartografia geológico-geotécnica da superfície, um estudo hidrogeológico, as classificações geomecânicas, um levantamento das descontinuidades, o uso de técnicas geofísicas, a realização de sondagens assim como ensaios *in situ* e de laboratório.

De seguida, são apresentadas, em resumo, algumas das condições geológicas que têm requerido, na construção de túneis, práticas especiais ou medidas mitigadoras [14].

4.3.1.1 Falhas

Colapsos devido a uma estrutura geológica adversa tendem a acontecer em particular em maciços rochosos onde podem ocorrer falhas. As falhas são fracturas planas nos terrenos que colocam em evidência um movimento relativo e ocorrem quando os terrenos, ao serem dobradas por compressão ou estendidos devido à tracção, acabam por partir. Possuem diferentes escalas, encontrando-se as maiores nas fronteiras das placas tectónicas, e diferentes classificações consoante o sentido do movimento.

As falhas normalmente favorecem o fluxo de água, mas também podem actuar como barreiras impermeáveis devido à existência de materiais mais impermeáveis num dos flancos. No plano de falha é normal a existência de uma zona de material esmagado de um modo grosseiro e/ou muito fino. Esta massa é alterada facilmente contendo muitos vazios que são preenchidos com água da chuva ou pelos níveis freáticos

subterrâneos. A água destas zonas de falhas pode fluir com grande rapidez devido a alta permeabilidade do material esmagado, gerando menor competência aos materiais contínuos.

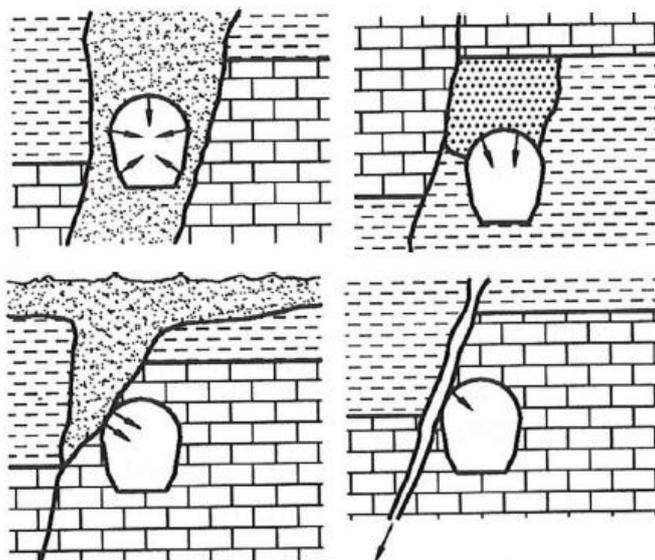


Figura 17 – Influência das falhas na escavação de túneis. [5]

A orientação das falhas em relação ao traçado do túnel assume um papel de grande importância, pois, à medida que a direcção das falhas coincide com a direcção do túnel, os problemas aumentam. Por este motivo, a direcção do túnel deverá ser, sempre que possível, perpendicular à direcção das falhas. A escavação por meio de TBM através de uma zona de falhas em maciços rochosos, por exemplo, pode tornar-se um evento problemático, pois pode dar-se o bloqueio das lâminas da TBM e atrasar a progressão dos trabalhos. Os perigos que as falhas acarretam levam a que sejam estudadas alternativas no traçado do túnel para que a escavação encontre o menor número de falhas possível. Para diminuir estes riscos são realizados reconhecimentos geofísicos e sondagens que permitam determinar a situação das falhas.

O conhecimento antecipado da presença de uma falha permite resolver o problema com mais sucesso do que os inconvenientes causados pelo aparecimento inesperado de uma falha. Os métodos mais utilizados ao atravessar zonas de falhas são injeções de consolidação, enfilagens, *jet-grouting*, pré-drenagem, etc.

4.3.1.2 Dobras

As dobras podem ocorrer em todos os tipos de terrenos e são causadas pela sua deformação plástica, sendo comuns em maciços estratificados. As dobras formam-se quando a força lateral activa sobre o maciço for superior à força de confinamento lateral (devido à rigidez da crosta terrestre) e à força de gravidade (devido ao peso da rocha). A massa de terreno assim é empurrada para cima, formando a dobra, dando origem a fissuras paralelas no eixo da dobra. As dobras normalmente ocorrem em materiais de baixa resistência, como as rochas sedimentares ou metamórficas de comportamentos mais plásticos. Produzem-se em vários tamanhos desde centímetros a quilómetros, sendo que a intensidade da dobra reflecte o grau de distorção localizado e o deslocamento nas diferentes partes do maciço afectado.

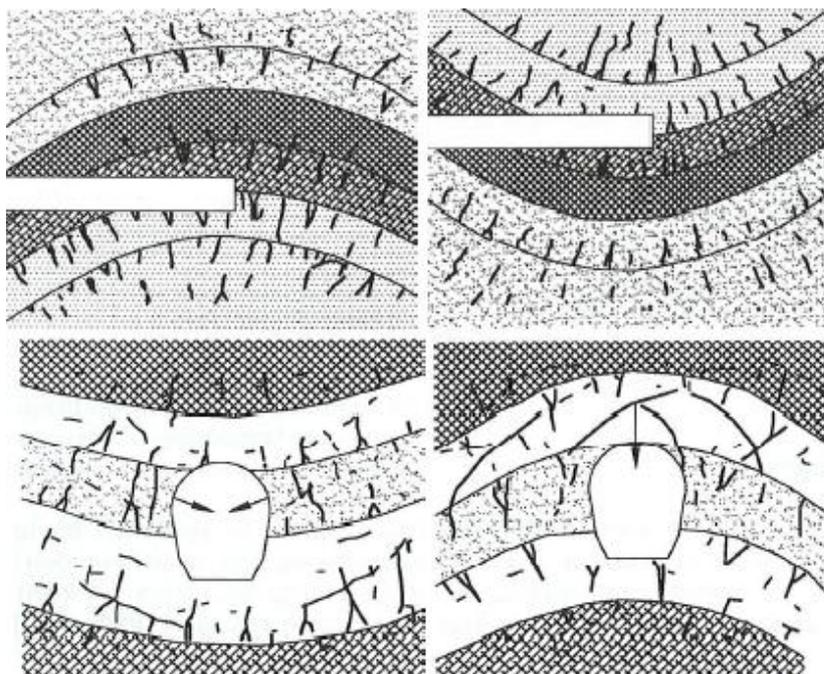


Figura 18 – Influência das dobras na escavação de túneis. [5]

Os problemas comuns encontrados em zonas de dobras verificam-se quando o túnel é escavado numa estrutura anticlinal onde existem estratos de baixa permeabilidade sobre outros de alta permeabilidade e porosidade, onde poderão existir, por exemplo, condições para a criação de gás metano. Por outro lado, se o túnel se escavar numa estrutura sinclinal, onde os estratos de baixa permeabilidade são



intercalados por outros de alta permeabilidade e porosidade, poderá dar origem à criação de depósitos de água, o que pode ser o risco potencial para a escavação. Por fim, se o túnel se localizar dentro de uma estrutura dobrada, há que considerar que o terreno a atravessar estará sujeito a fortes tensões locais, o que pressupõe um alto estado de fracturação dos materiais resistentes.

Se um túnel seguir a direcção do eixo da dobra sofrerá pressões menores se decorrer por uma estrutura anticlinal do que por uma sinclinal. Numa estrutura sinclinal a escavação irá ser afectada pelas águas de filtração do maciço. Se um túnel seguir a direcção perpendicular ao eixo da dobra, as pressões ao longo do seu traçado serão variáveis, dependendo da disposição anticlinal ou sinclinal dos estratos. No caso de uma estrutura anticlinal, no núcleo as pressões são menores do que nos flancos, ocorrendo a situação inversa no caso de uma estrutura sinclinal.

4.3.1.3 Juntas

Quando uma fractura na rocha não apresenta deslocamento visível no plano da fractura, é normalmente referida como junta ou diaclase. As juntas são elementos constantes do maciço rochoso que ocorrem em grupos e essencialmente paralelas umas às outras. O espaçamento entre elas pode ir de poucos a dezenas de centímetros e são usualmente observadas nas superfícies dos maciços rochosos, cuja evidência resulta de efeitos climáticos e de meteorização, devidos, por exemplo, a ciclos de expansão e contracção. O estudo das rochas demonstra que o espaçamento entre as juntas aumenta com a profundidade e que a persistência diminui com a profundidade, o que significa que quanto mais profunda for a zona da junta, mais sólido é o material.

Em relação aos problemas de juntas na estabilidade de túneis, é de realçar que o número de juntas existentes num maciço determina o seu comportamento, nomeadamente o grau que este pode deformar-se sem que se produzam rupturas e alterações na disposição das juntas, fornecendo informações sobre a forma de ruptura das mesmas. Para a formação de blocos, deverão concorrer pelo menos três famílias de juntas, sendo uma condicionante importante para a estabilidade da escavação a atitude relativa das juntas em relação à geometria de escavação. Quando as famílias de juntas estão orientadas em planos principais de debilidade, inclinados em relação à direcção do

túnel (Figura 21), poderão causar blocos instáveis situados maioritariamente nos hasteais e na abóbada do túnel.

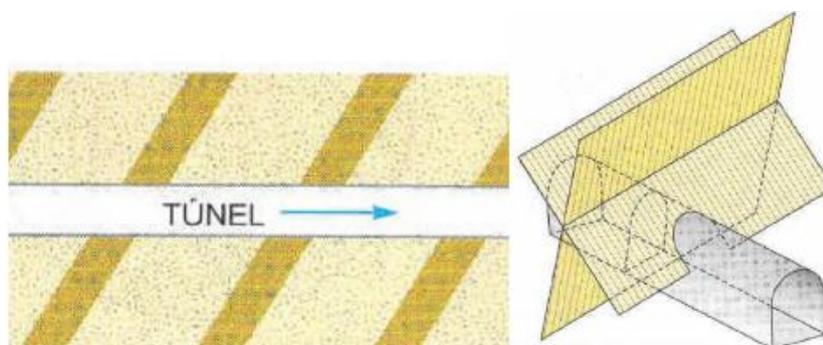


Figura 19 – Túnel perpendicular à estrutura do maciço. [5]

Se predominar a estratificação vertical (Figura 22), poderá ser originada uma situação em que as juntas se abram e os blocos caiam devido ao efeito da gravidade, sendo necessário um sistema de sustimento para o controlo destes blocos instáveis. Se predominar a estratificação horizontal com juntas de debilidade formando ângulos rectos com os planos de estratificação, poderão ocorrer desprendimentos por camadas.

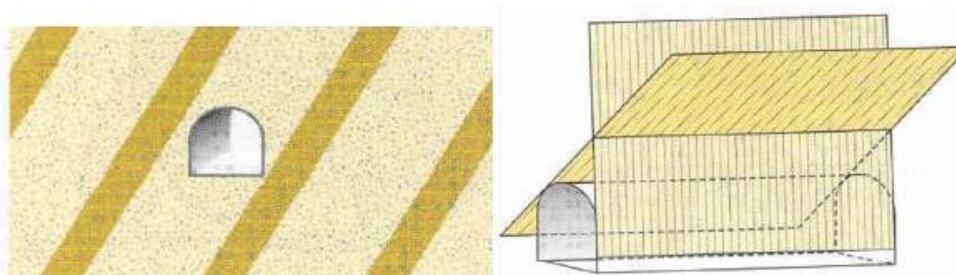
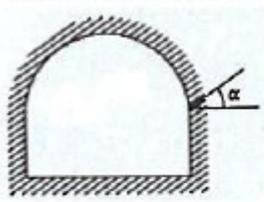
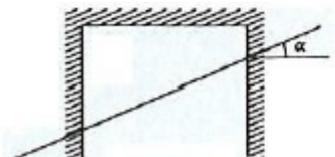


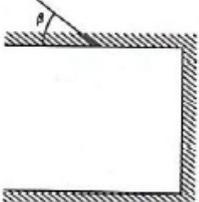
Figura 20 – Túnel paralelo à estrutura do maciço. [5]

Quando o túnel é executado paralelamente à direcção da estratificação, geralmente a frente de escavação é estável, sendo que as condições do tecto tendem a piorar para estratos de baixas inclinações, com a existência de juntas na estratificação alinhada com o túnel. Nos Quadros 12 e 13, são apresentadas as instabilidades no tecto e nos hasteais para as diversas inclinações das juntas.

Quadro 12 – Instabilidade das juntas na estrutura de um túnel (paralelo e oblíquo). [5]

Disposição Geométrica	Inclinação	Tecto	Hasteais
Túnel Paralelo à Estratificação 	$\alpha < 20^\circ$	Rupturas grandes	Estáveis
	$20^\circ < \alpha < 45^\circ$	Rupturas	Estáveis
	$\alpha > 45^\circ$	Estável	Ruptura
Túnel Oblíquo a Estratos Inclinaados 	$\alpha < 45^\circ$	Estável	Estáveis
	$45^\circ < \alpha < 75^\circ$	Estável	Algumas rupturas
	$\alpha > 75^\circ$	Estável	Rupturas

Quadro 13 – Instabilidade das juntas na estrutura de um túnel (perpendicular). [5]

Disposição Geométrica	Inclinação	Tecto	Hasteais
Túnel Perpendicular aos Estratos 	$\beta > 60^\circ$	Estável	Estáveis
	$45^\circ < \beta < 60^\circ$	Alguns desprendimentos	Desprendimentos quando o avanço é contra a inclinação
	$20^\circ < \beta < 45^\circ$	Ruptura do tecto	Muitos desprendimentos
	$\beta < 20^\circ$	Ocorrência de chaminés	Poucos desprendimentos

No caso de execuções de túneis oblíquos a estratos subverticais, as condições da frente de escavação costumam ser estáveis, passando a ser instáveis no atravessamento de falhas e dobras. Quando a execução do túnel é realizada perpendicularmente à estratificação, normalmente os hasteais são estáveis, apresentando problemas de queda de blocos no tecto e na frente de escavação, dependendo da inclinação e da existência de outras juntas. No que diz respeito às pressões sobre o túnel, quando um túnel é executado perpendicularmente à estratificação, suportará pressões menores do que um túnel paralelo aos estratos.

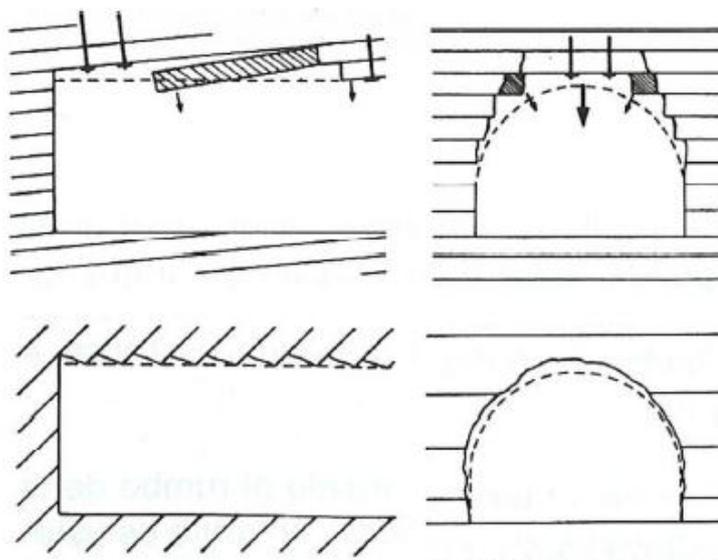


Figura 21 – Influência das juntas na estabilidade dos túneis. [5]

4.3.1.4 Nível freático

Durante a escavação de um túnel é muito comum a interceptação de linhas de água ou aquíferos subterrâneos, o que dá origem a grandes dificuldades na execução da obra. Esta água infiltrada nos maciços poderá ter várias origens em superfície, incluindo depósitos subterrâneos que ficaram retidos aquando da formação das rochas. O túnel é um grande dreno executado nos maciços para o qual afluem as águas dos aquíferos intersectados, levando à diminuição da resistência do maciço, ao aumento das pressões sobre o suporte e revestimento, à expansão e amolecimento das argilas, à possibilidade de originar cavernas em materiais salinos e à diminuição dos rendimentos de escavação.

É importante identificar a origem da água que irrompe nas escavações, que poderá ser de alimentação superficial ou subterrânea. A determinação desta origem e as suas prováveis variações constitui um papel importante do estudo geológico e geotécnico a realizar previamente ao projecto.

Para conhecer e controlar a circulação de água subterrânea numa zona é necessária a realização de um estudo hidrológico e hidrogeológico local, de forma a interpretar, a partir das previsões geológicas das situações dos aquíferos, as direcções mais prováveis de circulação e posição dos níveis freáticos [9].

É necessário igualmente ter em consideração que a água circula pelas discontinuidades e estimar a permeabilidade direccional preferencial. Em zonas próximas do mar e onde se identifique a influência das marés, é importante possuir dados sobre as mesmas.



Figura 22 – Bombagem de água de uma frente de escavação inundada. [5]

A água poderá causar vários problemas na execução de um túnel, tais como instabilidade da escavação provocada por um gradiente hidráulico elevado nos hasteais e frente do túnel e a diminuição das propriedades resistentes do terreno.

4.3.1.5 Alteração da rocha

Os processos naturais químicos e mecânicos (erosão) produzem alteração da rocha que tem uma grande influência na escavação dos túneis, pela redução da sua resistência a qual pode atingir grandes profundidades. O clima e as características topográficas dos locais, em conjunto com o tipo de rocha e a sua estrutura, determinam a profundidade da alteração.

4.3.1.6 Tensões na rocha

O risco de incidentes aumenta quando os túneis são executados a grandes profundidades devido a que as tensões pré-existentes são de elevado valor que, conjugadas com as propriedades mecânicas dos materiais, podem produzir *rock burst* e *squeezing*. Problemas de tensões também têm que ser tidos em conta em situações de



grandes escavações a pouca profundidade, escavações em montanhas acidentadas ou em rochas com condições anormalmente pouco resistentes.

4.3.2 Erros durante a construção de um túnel

Os erros da fase de construção podem resumir-se a uma insuficiente definição do processo de escavação, à execução apressada de trabalhos, ao uso de materiais e ferramentas defeituosas, à violação de especificações técnicas do projecto e à não observância dos regulamentos de segurança no trabalho.

Uma outra variedade de erros na construção foi registada, a qual cobre os aspectos dos trabalhos em obra, com origem na fraca qualificação das pessoas envolvidas.

Sendo difícil referir todos os erros de construção mais comuns, segundo Seidenfuss (2006), os mais comuns serão:

- O revestimento não executado com a espessura especificada;
- O uso de betão projectado com espessura e resistência insuficientes, originando uma perda de resistência no revestimento;
- A instalação em atraso do suporte aumentando o comprimento da distância à frente sem suporte;
- Falha na instalação dos circuitos de congelação do terreno;
- Redução das espessuras do suporte da soleira provisória (invert) por incorporação dos escombros ou “*rebound*” do betão projectado;
- Falha na instalação de pregagens e cambotas;
- Dimensionamento errado da soleira curva (invert);
- Sobrescavação produzida pelo processo desmonte a fogo;
- Reparações no revestimento mal executadas;
- Ignorância ou má interpretação do projecto.



4.3.3 Erros de gestão e controlo

Nunca é possível obter de antemão toda a informação completa sobre um estrato a ser perfurado por um túnel ou antecipar o seu comportamento. Assim sendo, devem ser feitas preparações para efectuar observações e investigações necessárias durante a construção. Esta investigação pretende manter continuamente actualizada a informação recolhida e verificar a validade dos prognósticos. Nela são incluídos mapeamentos das paredes do túnel, medições de deformações, assentamentos, tensões, vibrações e existência de água.

A verificação da estabilidade durante a construção começa com uma comparação entre as várias previsões das fases de projecto e planeamento com as medidas feitas na fase de construção. Se necessário, têm que ser consideradas modificações ao projecto e mudanças nos processos construtivos de forma a assegurar a segurança antes de iniciar a construção. Para este efeito, é feito o planeamento de observações e medições anteriormente à construção. As secções padrão, assim como as secções problemáticas, são escolhidas como pontos a medir e aí são instalados os instrumentos de medição antes ou imediatamente depois do processo de escavação. As condições geotécnicas, tais como a distribuição da estrutura geológica, as propriedades da rocha, falhas e juntas, são registadas enquanto o túnel progride.

Os dados obtidos das várias medições têm que ser imediatamente estudados de forma a verificar se os trabalhos avançam de forma segura como esperado. É necessário comparar os resultados obtidos pelos instrumentos de medição nos vários pontos com aqueles obtidos por uma análise por árvore de eventos, por exemplo. Com base nesses resultados, o comportamento da obra é examinado e é confirmado o estado de segurança.

A possibilidade da ocorrência de infiltrações ou de inundações de água nos túneis e cavernas exige o uso de medidas de controlo antes e durante a construção. Se for bem estabelecida a localização e quantidade de lençóis de água através de investigações na fase de projecto, é aconselhável a escolha de uma nova localização para o túnel ou a instalação de uma eficiente drenagem. Isto verifica-se especialmente quando o maciço rochoso tende a deteriorar-se sob o efeito das águas subterrâneas.



Seidenfuss (2006) aponta como principais as seguintes falhas de gestão e controlo que podem levar ao colapso em túneis:

- Projectistas sem competência ou inexperientes;
- Directores de obra sem competência ou inexperientes;
- Empreiteiros sem competência ou inexperientes
- A incapacidade dos profissionais de aprender com experiências anteriores, boas ou más;
- Deficiente supervisão dos trabalhos de obra;
- Permitir a sequência errada de processos construtivos;
- Não reacção face aos dados de monitorização.

4.3.4 Interrupções e outras pausas

É normal a ocorrência repetida de colapsos depois da uma retoma de trabalhos após uma paragem, seja devido a fins-de-semana, férias ou embargos. Estes colapsos devem-se provavelmente ao resultado da considerável diferença entre a rigidez do betão colocado anteriormente e aquele agora colocado, ainda fresco. Dada a elevada rigidez, na zona do betão anteriormente colocado concentram-se cargas a um nível superior do que era originalmente presumido. Além disto, a retoma de trabalhos causa um distúrbio a uma área que já tinha um estado de tensões consolidado.

4.3.5 Erros de comunicação e organização

Os erros cometidos em comunicação e organização ocorrem em períodos onde existe troca de informações e tomada de decisões [14]. Um exemplo de uma situação onde é necessária a troca de informação é quando se efectuam medições. Nesse caso, os erros mais comuns são:

- Informação não reunida;
- Informação reunida, mas algumas medições que ficaram por fazer;
- Informação reunida, mas interpretada incorrectamente;
- Informação reunida e correctamente interpretada, mas com medições erradas.

5. MECANISMOS DE COLAPSO

5.1 Mecanismos de colapso no maciço

Os conhecimentos dos mecanismos de colapso e dos seus efeitos na escavação de um túnel não devem ser utilizados apenas para evitar os acidentes, mas sim para elaborar e aperfeiçoar os projectos, executar obras mais económicas e realizar intervenções que melhorem o desempenho do túnel. A capacidade de previsão do comportamento dos maciços e no maciço através de modelos matemáticos antes do início das obras é de grande importância para que sejam detectados atempadamente os pontos ou regiões com solicitações de esforços e deformações máximas. Dessa forma, podem-se monitorizar tais regiões com maior pormenorização permitindo a antecipação de possíveis intervenções na obra face ao aparecimento dos primeiros sintomas.



Figura 23 – Desabamento da frente de escavação (à esquerda) e do topo do túnel (à direita). [5]

Quando ocorrem acidentes, é bastante comum terem sido originados pelas condições do maciço, sendo frequente a ocorrência no interior do maciço de zonas pouco resistentes, de infiltrações abundantes de água, de sobrecargas do suporte pelo maciço, etc. Estas situações podem ocorrer, com maior probabilidade, se se der o caso de não ter havido prospecções suficientes, o deficiente controlo do nível freático ou as cargas no suporte não terem sido devidamente equilibradas. É, portanto, necessário atribuir uma especial atenção às características do meio envolvente nas execuções de obras subterrâneas.

Os mecanismos de colapso dos maciços formam-se devido à alteração do seu estado de tensão, geralmente originado pelo processo de escavação ou pelas condições do lençol freático. Tais mecanismos declaram-se, na maioria das vezes, na abóbada da escavação e na frente de avanço do túnel. Uma vez executado o revestimento, os mecanismos no maciço ocorrem somente se a estrutura não oferecer resistência adequada e entrar, ela própria, em colapso.

Nos maciços, os mecanismos de colapso podem ser classificados como locais ou globais dependendo da abrangência dos seus efeitos. Os mecanismos globais verificam-se quando o equilíbrio dos maciços, influenciado pelo estado de tensão, afecta volumes do maciço localizados longe da face (frente) da escavação, enquanto os mecanismos locais são aqueles em que a estabilidade depende apenas do comportamento local nas proximidades da abertura. Na Figura 26 é demonstrada a diferença entre ambos os mecanismos:

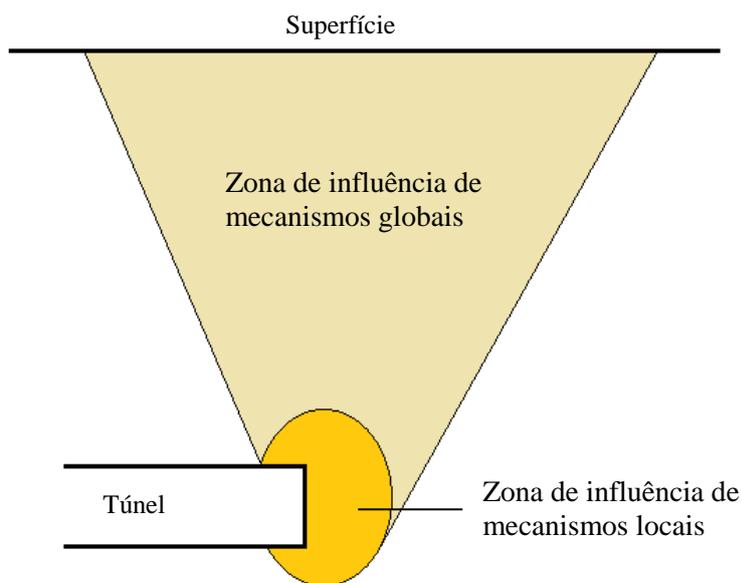


Figura 24 – Mecanismos globais e locais. [12] (adaptado)

Os mecanismos globais interessam por causa das massas de terreno localizadas acima da geratriz superior do túnel, que são em volume bastante superiores à porção de terreno retirada da escavação, mobilizando uma grande massa de terreno que poderá atingir superfície. Como os mecanismos globais envolvem massas de terreno extremamente grandes, é difícil contê-los. Estes mecanismos podem gerar-se como globais, mas também podem ser originados por evolução de mecanismos locais.



No caso dos mecanismos locais, estes ocorrem devido apenas à acção do peso da porção de terreno que se destaca do maciço. Os mecanismos locais envolvem pequenos volumes de terreno e dão-se somente até a pequenas distâncias da frente de escavação, sendo por isso possíveis de serem controladas por intervenções na obra, através de tratamentos localizados ou não, ou por redução da área da superfície escavada e exposta. Muitas vezes, podem mesmo ser contidos após a sua formação, através da aplicação de betão projectado ou de aterros.

Seguidamente, irão ser caracterizados os vários tipos de mecanismos de colapso utilizando o sistema de letras e números apresentado por Murakami e Maffei.

5.2 Mecanismos globais

5.2.1 Mecanismos de colapso do tipo G1

Dentro dos mecanismos globais é possível distinguir vários tipos de mecanismos diferentes. Os mecanismos globais definidos como tipo G1 ocorrem quando se escava um túnel com uma pequena cobertura de solo resistente sob um substrato de solo mole sem rigidez e baixa resistência ao corte, geralmente devido à não detecção de deslocamentos na abóbada.

Os casos do tipo G1A e G1B são exemplos de quando existe um maciço mais resistente no núcleo da frente de escavação subjacente a um estrato de terreno mole. No caso do tipo G1C, este é um mecanismo global provocado pela instabilidade local da abóbada ou da frente de escavação quando se der o caso de blocos acima ou à frente do avanço se formarem, provocando a formação do mecanismo global e permitindo que o terreno invada o túnel. O mecanismo do tipo G1D representa um túnel em maciço de terreno mole, onde o núcleo da frente de escavação sofre a solicitação da sobrecarga do maciço e do alívio provocado pela escavação.

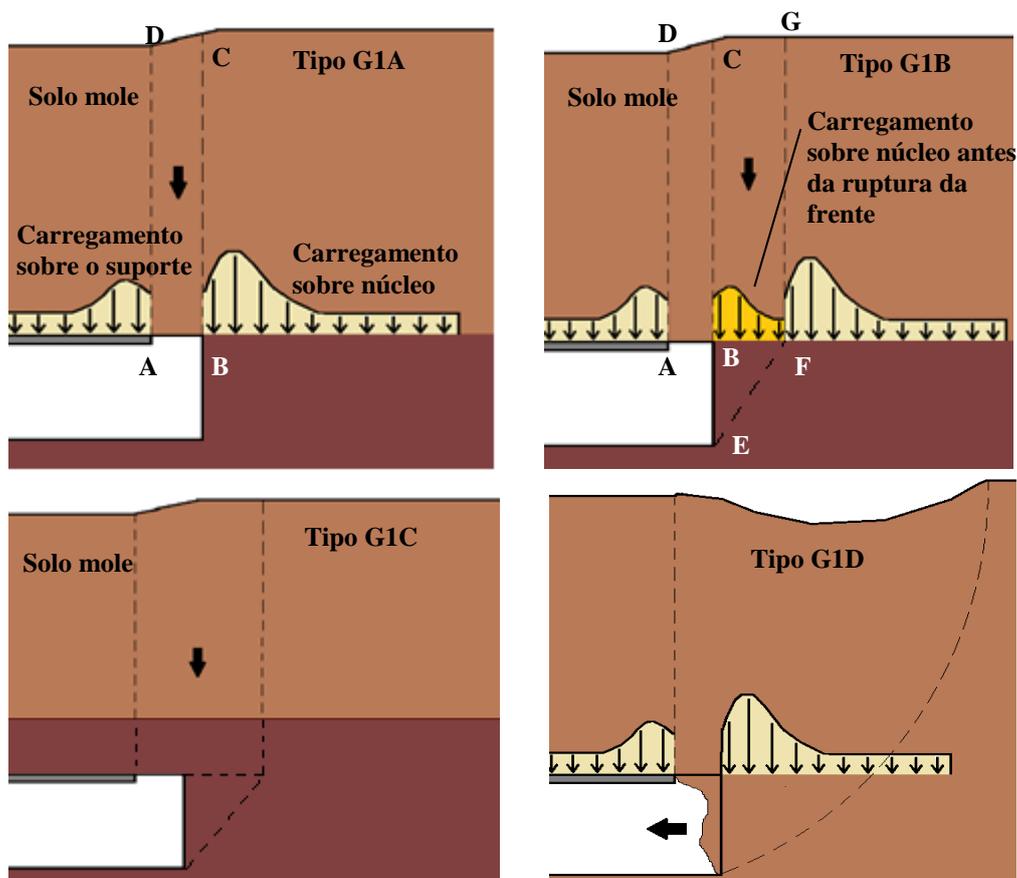


Figura 25 – Mecanismos de colapso globais do tipo G1. [12] (adaptado)

5.2.2 Mecanismos de colapso do tipo G2

Os mecanismos G2 podem ocorrer tanto em maciços resistentes como em maciços pouco resistentes, sendo a sua causa a presença inesperada de vazios, lentículas ou estratificações de argilas moles. Se a resistência do maciço ou do suporte não for suficiente para manter o equilíbrio do sistema, colapsos de grandes proporções podem ocorrer, dependendo da área afectada pela perda de material.

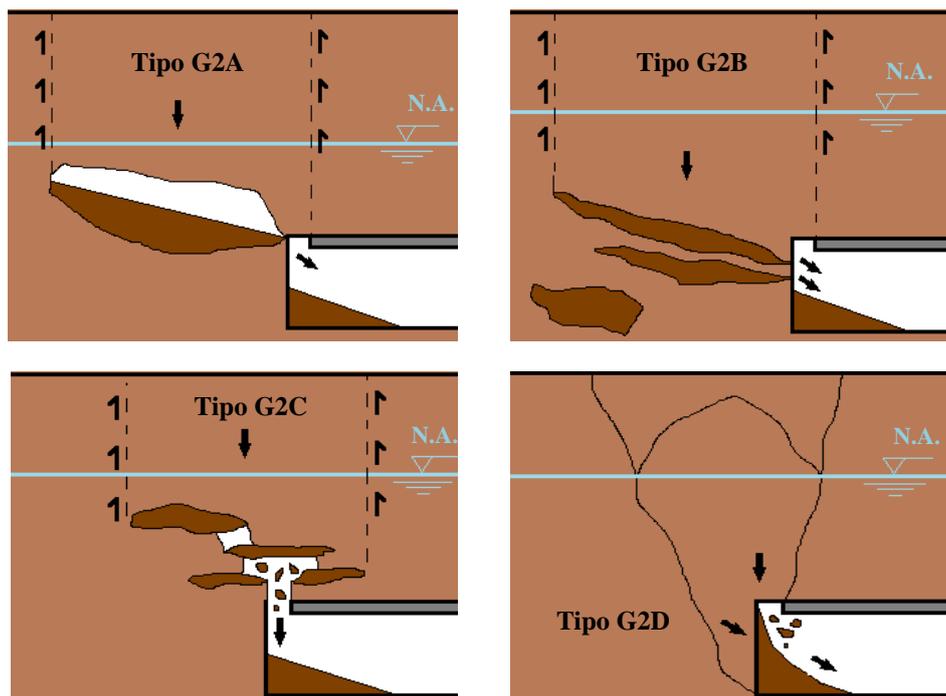


Figura 26 – Mecanismos de colapso globais do tipo G2. [12] (adaptado)

5.2.3 Mecanismos de colapso do tipo G3

Estes mecanismos ocorrem quando os túneis têm fraca cobertura de terreno (C) em relação ao seu diâmetro (D), ou seja, com a relação C/D pequena (menor que 1,5 a 2,0), sendo que nesta condição o “efeito de arco” entre o suporte e o terreno do maciço na frente, é prejudicado pela geometria desfavorável, podendo atingir a superfície. A Figura 29 ilustra este caso:

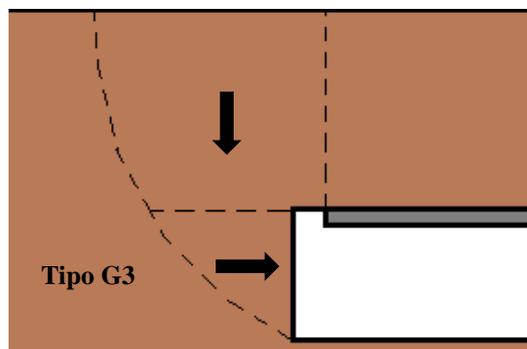


Figura 27 – Mecanismos de colapso globais do tipo G3. [12] (adaptado)

5.2.4 Monitorização dos mecanismos globais

Quando os túneis são executados em maciços com potencial para a formação de mecanismos globais, deve ser dada especial atenção aos deslocamentos observados durante as obras.

Os mecanismos do tipo G1 caracterizam-se por apresentar curvas de assentamentos longitudinais com intensidades maiores na frente de escavação do que atrás, indicando possibilidade de instabilização. Porém, a constatação desse tipo de curva depende do espaçamento entre os instrumentos de medição de assentamentos, isto é, se esses instrumentos estiverem demasiado afastados uns dos outros, a mudança de forma do perfil dos assentamentos sobre o túnel pode não ser detectada. Na Figura 30 ilustra-se este tipo de monitorização.

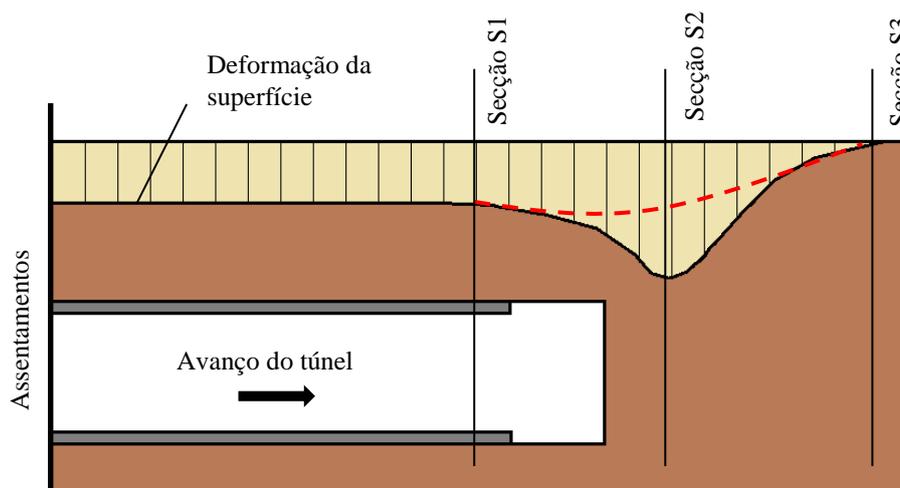


Figura 28 – Configuração de deformação do maciço na geratriz superior do túnel. [12] (adaptado)

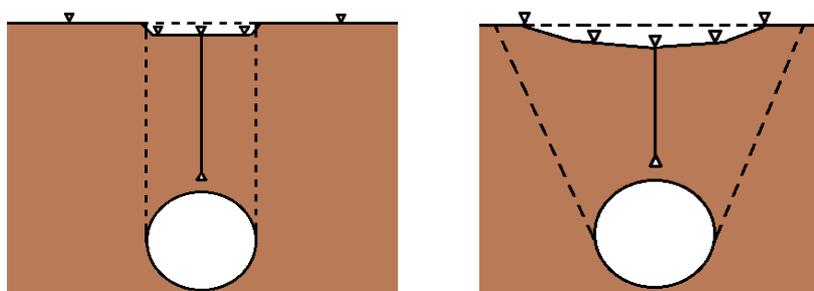


Figura 29 – Bacias de assentamentos transversais. [12] (adaptado)

Nos casos do tipo G2 a monitorização é difícil, uma vez que a instabilização inicial é local e normalmente evolui muito rapidamente. A melhor forma de obstar à formação dos mecanismos do tipo G2 é através da prospecção exaustiva do maciço a ser escavado, com sondagens em avanço, procurando antever ao máximo as situações de colapso em potencial. Juntamente com a prospecção, deve realizar-se a inspeção visual do maciço exposto, com especial atenção aos deslizamentos, infiltrações de água e perda de material do maciço.

5.3 Mecanismos locais

5.3.1 Mecanismos de solo deslocante

Estes mecanismos são designados pelos tipos L1 a L4. São mecanismos caracterizados como locais, pois formam-se placas de terreno que deslizam pelo tecto ou pela frente de escavação, progressivamente, com o tempo, ou seja, o mecanismo decorre do peso não suportado da placa de terreno. Se o suporte for instalado logo após a ocorrência dos deslizamentos e os vazios não forem rapidamente preenchidos, a instabilização continua até que o vazio criado se encontre preenchido com o terreno instabilizado.

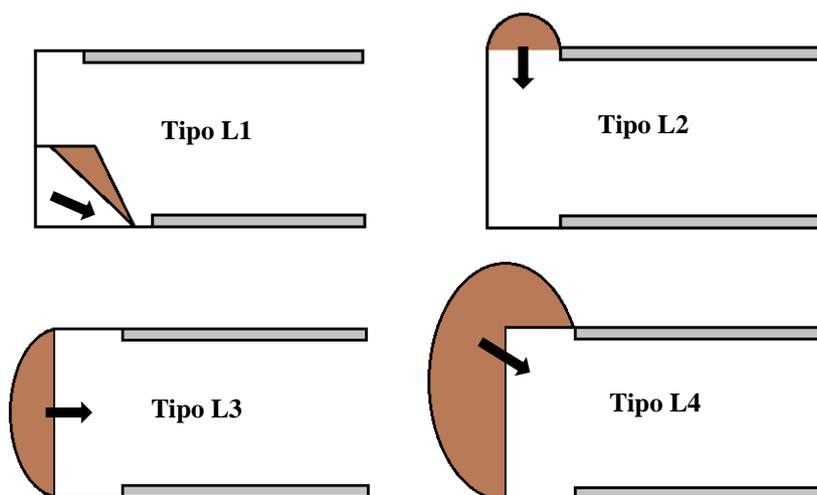


Figura 30 – Mecanismos de colapso locais do tipo L1 a L4. [12]
(adaptado)

5.3.2 Mecanismos de terrenos moles

Este é um mecanismo representado pelo tipo L5. A instabilização decorre de um escorregamento de terreno que só pára quando o talude formado pelo material atinge o seu ângulo de atrito natural, sendo portanto um mecanismo local (Figura 33).

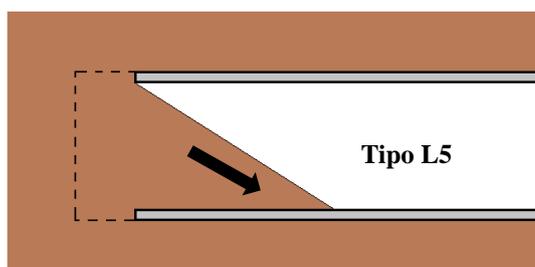


Figura 31 – Mecanismos de colapso local do tipo L5. [12] (adaptado)

5.3.3 Monitorização dos mecanismos locais

Os mecanismos locais são de difícil detecção, uma vez que, como o seu próprio nome indica, a sua abrangência é local e os seus efeitos, na maioria das vezes, não são detectados pelos instrumentos de observação pelo facto destes se encontrarem instalados em secções equidistantes.

Embora os mecanismos locais, por vezes, não sejam tão prejudiciais para a obra como os globais, face à sua pequena abrangência, podem causar ferimentos ou até a morte de pessoas que estejam a trabalhar no local da queda de blocos. Para que as obras sejam executadas com segurança evitando-se os mecanismos locais, os maciços devem ser devidamente tratados, principalmente na abóbada e frente da escavação, com o uso de enfilagens, injeções, *jet-grouting* e outros tipos de tratamento.

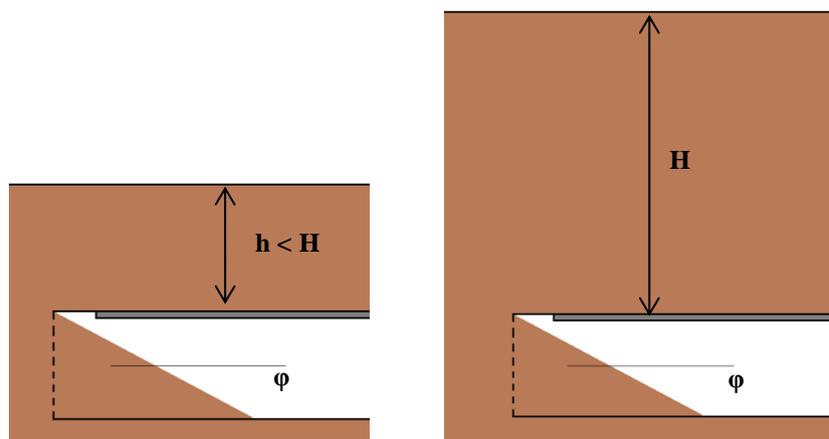


Figura 32 – Equilíbrio do mecanismo em solo deslizante. [12] (adaptado)

5.4 Mecanismos no suporte de túneis

Os mecanismos de colapso dos suportes dos túneis declaram-se quando a solicitação na estrutura gera esforços que ultrapassam os seus limites de resistência. Estes podem ser devidos a carregamentos excessivos, a suportes de resistência insuficientes ou a deficiente instalação dos mesmos. Carregamentos excessivos podem ser provocados por comportamentos imprevistos do maciço ou por deformações impostas resultantes da alteração do estado de equilíbrio do conjunto maciço-estrutura provocada pela escavação, a insuficiência pode resultar de dimensionamento inadequado e/ou de instalação deficientemente executada.

Os mecanismos de rotura que decorrem dos suportes, podem levar a estrutura a colapso, a qual pode ser acompanhado pela rotura dos maciços.

5.4.1 Mecanismos no suporte com soleira plana

5.4.1.1 Mecanismos por deficiência da fundação

Os mecanismos causados por deficiência da fundação serão designados por D1 e representam os mecanismos provocados por uma fundação insuficiente, resultando na rotura do terreno. Estes mecanismos ocorrem em secções de túneis de soleira plana, quando a carga solicitante na sapata da calota é maior que a carga admissível para o

terreno, ou seja, quando o carregamento aumenta ou quando a capacidade de carga da fundação diminui, resultando em rotura e assentamentos excessivos da estrutura. O caso em que a capacidade de carga diminui está relacionado com as situações em que o terreno ao nível da fundação é de fraca qualidade geotécnica ou reduz propriedades em presença de água. Neste caso, deverão ser dimensionadas sapatas para redução das pressões transmitidas à fundação.

Os assentamentos da fundação da sapata podem resultar em diferentes mecanismos, conforme o comportamento que a estrutura apresenta, conforme representado pelos casos D1A, D1B e D1C.

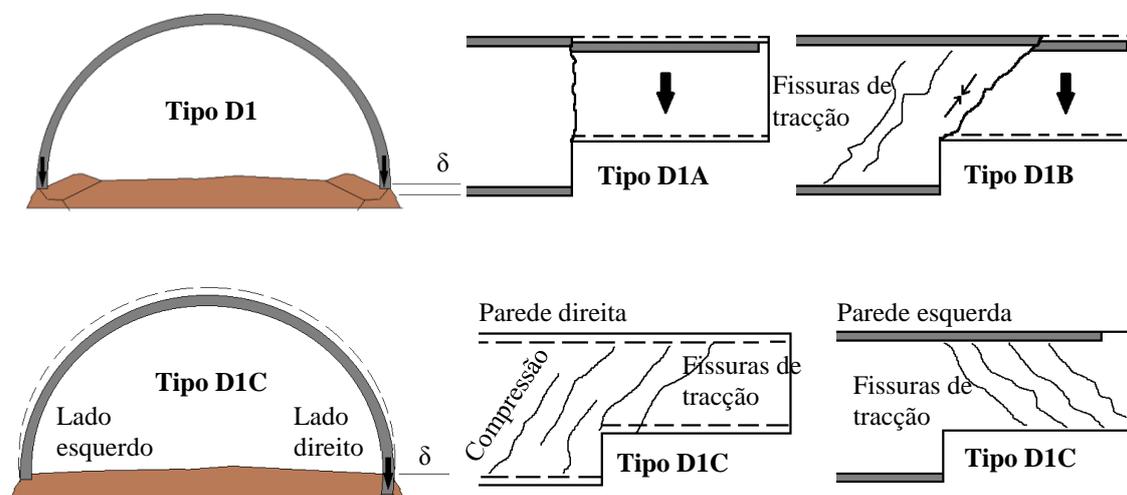


Figura 33 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D1. [12] (adaptado)

5.4.1.2 Monitorização dos mecanismos por deficiência de fundação

Os mecanismos de assentamento de fundação são detectados pela monitorização das bases de convergência e/ou alvos topográficos. Nos gráficos de assentamentos em função do tempo (Figura 36), a curva deve apresentar uma forma com tendência à estabilização, isto é, com velocidades (a velocidade é igual à razão entre o assentamento e o comprimento de avanço) decrescentes (curva 1). A curva 2 apresenta assentamentos com velocidades crescentes, indicando possível formação de mecanismos. Na curva 3, os assentamentos ocorrem com a frente de escavação parada, demonstrando a falta de equilíbrio da casca. Nas curvas 2 e 3 é necessário saber se o problema é realmente da fundação ou rotura da frente.

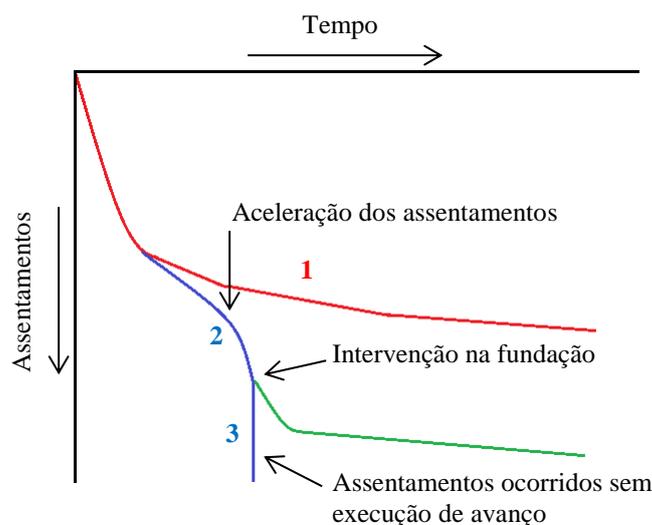


Figura 34 – Gráfico de assentamentos na fundação. [12] (adaptado)

5.4.1.3 Mecanismos de flexão

Os mecanismos de flexão são designados por D2, em que as flexões no suporte aberto são provocadas pela solicitação do maciço que age lateralmente com as acções de impulso e verticalmente com as acções da sobrecarga.

O mecanismo de convergência identificado pelo caso D2A pode ser provocado pelo levantamento do piso devido ao alívio produzido pela escavação, juntamente com o carregamento lateral devido aos impulsos.

O mecanismo de divergência identificado pelo caso D2B ocorre normalmente em consequência da geometria mal concebida da secção (secções que apresentam uma relação entre o raio e a altura de escavação muito grande).

O caso D2C ocorre em situações de carregamento assimétrico, geralmente quando o túnel é executado em maciços com superfícies inclinadas (túneis superficiais abertos em vertentes ou encostas). O carregamento não equilibrado promove a distorção da secção, solicitando a estrutura à flexão.

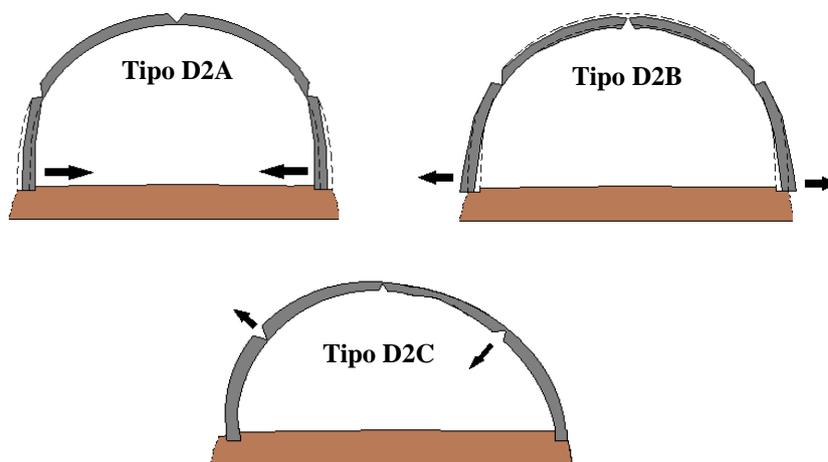


Figura 35 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira plana do tipo D2. [12] (adaptado)

5.4.1.4 Monitorização dos mecanismos de flexão

Os mecanismos de abertura e fecho da estrutura de suporte são monitorizados através de medidas de convergência das cordas internas. A verificação da deformação da abóbada por flexão no caso D2B pode ser feita através da análise comparativa entre os assentamentos dos pinos do tecto e do piso. Em caso positivo, os assentamentos dos pinos do tecto passam a ser maiores do que os do piso. O caso D2C pode ser detectado pelas convergências das diagonais, as quais devem passar a convergir de um lado e a divergir do outro. Entretanto, quando se esperam deformações por distorção (corte) da secção, torna-se mais eficiente adoptar cordas de medição de convergência adicionais que passam pelos “rins” da secção, pois as cordas que passam pela geratriz superior são pouco sensíveis a estas deformações. Juntamente com as convergências, podem-se utilizar inclinómetros nas laterais do túnel para monitorizar os deslocamentos do maciço [12].

5.4.2 Mecanismos no suporte com soleira curva (invert)

5.4.2.1 Mecanismos por flexão

Os mecanismos na estrutura de suporte com anel completo provocados por flexão são designados por O1, sendo a flexão na casca provocada pela deformação do suporte, o qual procura o equilíbrio mobilizando as pressões de confinamento

necessárias em cada região, conforme as solicitações do maciço. Quando a forma da secção é mal concebida, as deformações necessárias para que a estrutura entre em equilíbrio tornam-se muito grandes e ocorrem à custa de esforços de flexão. Quando se esgota a capacidade de flexão numa secção, a casca rotula nesse ponto passando a trabalhar como uma articulação, com as rotações, porém, limitadas pela capacidade da rótula plástica. A vantagem de um suporte com o anel fechado está na sua capacidade de se manter estável mesmo com uma série de articulações, procurando o equilíbrio através de esforços de compressão, desde que se consiga manter o confinamento necessário. A casca perde equilíbrio quando os efeitos de segunda ordem se tornam significativos, provocando encurvadura por flexão-compressão (analogamente ao caso D2B). Estes mecanismos são ilustrados na Figura 38 pelos casos O1A e O1B.

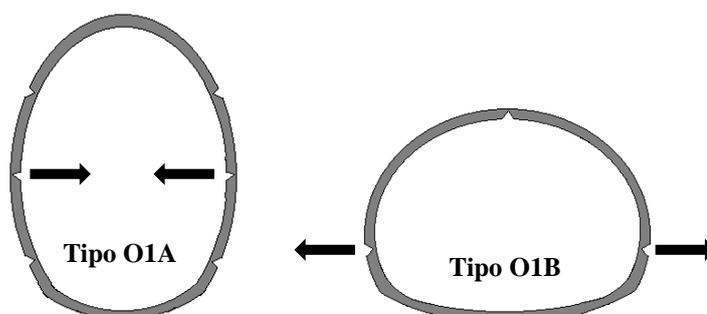


Figura 36 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1A e O1B. [12] (adaptado)

O caso O1C é um colapso por flexão da soleira curva. Este caso ocorre por geometria concebida desfavoravelmente, ou por presença de um substrato rígido tangente ao arco. A geometria do arco deve ser bem elaborada para que os esforços da fundação sejam transferidos ao máximo por esforços de compressão da casca. Quando a curvatura do arco é muito pequena, predomina a transferência de carga por esforços de corte e flexão, aos quais se torna difícil resistir face à espessura reduzida dos revestimentos usuais. O caso O1D ocorre analogamente ao caso D2C, por carregamentos assimétricos. Estes esforços são representados na Figura 39.

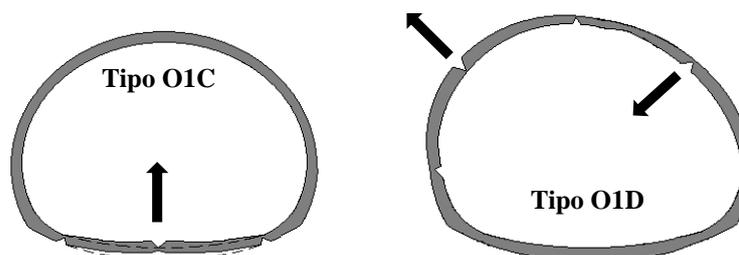


Figura 37 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O1C e O1D. [12] (adaptado)

5.4.2.2 Monitorização dos mecanismos por flexão

A monitorização neste caso faz-se da mesma forma que no caso do tipo D2, através da análise das medidas de convergências e divergências, dos assentamentos dos pinos e dos inclinómetros, com excepção do caso O1C que deve ser evitado, verificando-se sempre o tipo de material encontrado sob a soleira antes da sua betonagem.

5.4.2.3 Mecanismos por tensão de corte

Os mecanismos provocados pela tensão tangencial são designados por O2, podendo ter origem em deficiências no projecto ou na execução em obra. No projecto, a falha pode ocorrer no dimensionamento aos esforços, nas pormenorizações inadequadas das ligações e na geometria concebida desfavoravelmente [12].

Existem dois pontos críticos para a ocorrência de ruptura por tensão tangencial, na região lateral da secção, onde ocorrem as juntas de betonagem entre a calota e o arco, e no arco, próximo da calota, onde se concentram os esforços cortantes. No primeiro caso, representado pelo caso O2A, o ponto crítico é a ligação da calota com a soleira, região que na fase anterior estava próxima da soleira, onde se verifica a acumulação de detritos (“*rebound*”) e material da escavação. Na Figura 41 ilustram-se alguns tipos de ligação da soleira com a calota. Como se pode observar, todos os detalhes dependem de uma boa aderência entre as diversas camadas de betão projectado.

O mau desempenho das ligações pode resultar em colapsos da estrutura, muitas vezes sem aviso. A ruptura neste ponto pode ocorrer também pelo subdimensionamento da casca aos esforços de compressão. Como a casca nesta função trabalha como um pilar, a ruptura ocorre por corte, como ilustrado no tipo O2A na Figura 40.

O segundo caso, representado pelo tipo O2B, ocorre quando a soleira curva é usada como fundação, isto é, este é usado para distribuir a carga da casca reduzindo as tensões no solo. Porém, a forma inadequada da soleira contribui significativamente para que a transferência dos esforços ocorra por corte, e não por forças normais. Tais esforços de corte costumam ser grandes e, nestes casos, necessitam de uma armadura adequada, a qual é de difícil pormenorização e execução. A ruptura apresentada pelo caso O2B ocorre sempre próxima das paredes laterais, onde actua o maior esforço cortante. O problema pode agravar-se com a má execução da ligação calota-soleira nessa área, como já foi referido anteriormente.

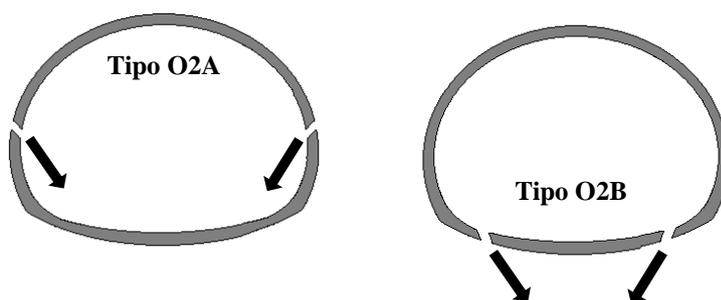


Figura 38 – Mecanismos de colapso no suporte com soleira curva do tipo O2A e O2B. [12] (adaptado)

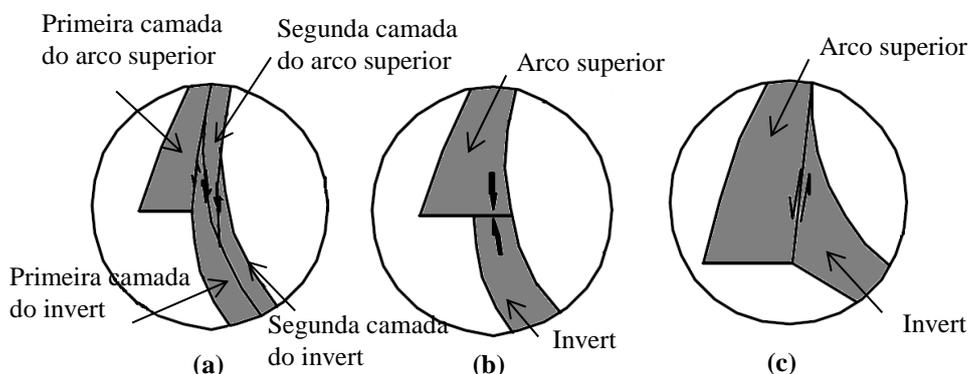


Figura 39 – Tipos de junta de betonagem entre a calota e a soleira. [12] (adaptado)

5.4.2.4 Monitorização dos mecanismos por tensão de corte

A monitorização dos mecanismos provocados por corte não é possível por se tratar de colapsos frágeis e sem aviso prévio. Neste caso, deve realizar-se uma boa e eficiente fiscalização dos trabalhos de campo, garantindo a correcta execução das ligações. Deve ainda garantir-se, acima de tudo, a elaboração de um projecto robusto, através de um bom dimensionamento dos elementos de suporte. Nas ligações entre a calota e a soleira, deve dar-se preferência às soluções que privilegiem a transferência de carga por compressão (Figura 41b) e não por corte.

5.5 Instrumentos de medição

Os principais instrumentos utilizados para medir estados de deformação e deslocamentos que podem levar a mecanismos de colapso, são:

- **Convergências** no interior do túnel por variação da medida de cordas estabelecidas em pontos fixos na parede do túnel (representados na Figura 40 por C12, C13, C23, C14, C15 e C45);
- **Extensómetros** colocados no interior do túnel por diferença de níveis em marcas de referência ou da variação do comprimento de uma grandeza geométrica estabelecida no contorno interior do túnel (representados na Figura 40 por EM1, EM2, EM3, EM4 e EM5);

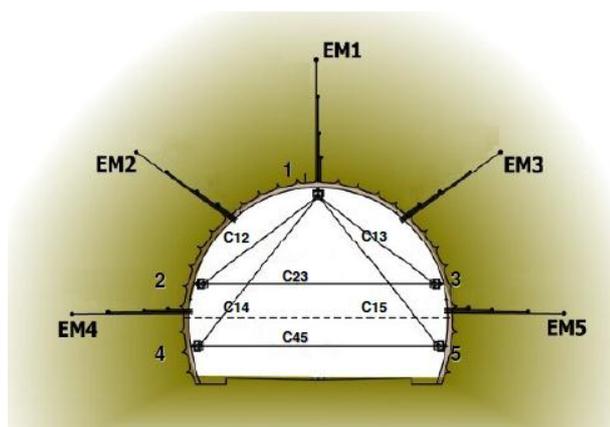


Figura 40 – Convergências e extensómetros no interior de um túnel. [10]

- **Marcas de nivelamento topográfico** à superfície de forma a medirem os assentamentos (representados na Figura 41 por M1, M2, M3, M4 e M5);
- **Extensómetros** colocados à superfície em furos de sondagens por diferença de níveis em marcas de referência seladas no interior do terreno (representados na Figura 41 por E1 e E2);
- **Inclinómetros** instalados no terreno no interior de furos de sondagens (representados na Figura 41 por I1).

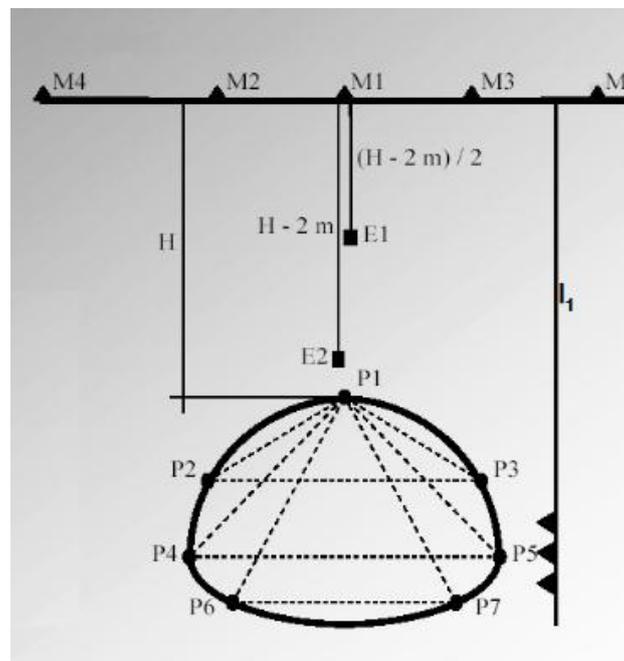


Figura 41 – Marcas de nivelamento topográfico, extensómetros e inclinómetros na superfície de um túnel. [10]



6. FERRAMENTAS DE GESTÃO DE RISCOS

Os juízos e percepções sobre os riscos durante o planeamento e no decurso das diferentes fases de desenvolvimento do projecto e construção de um túnel ou de uma obra subterrânea requerem o uso de ferramentas apropriadas. As ferramentas de avaliação dos riscos permitem resolver problemas relacionados com a identificação, a descrição, a estimativa e a apreciação dos riscos, face aos critérios pré-estabelecidos, e a sua cadeia de eventos. As ferramentas existentes não são específicas das obras subterrâneas, pois possuem um carácter genérico, mas são usadas maioritariamente no campo da engenharia.

6.1 Análise de árvore de falhas (*Failure Tree Analysis – FTA*)

A análise de árvore de falhas pode ser empregue para estudar uma única ou um conjunto de circunstâncias interligadas que precedem um evento negativo. Consiste num processo lógico e dedutivo que, partindo de um evento indesejado e pré-definido (evento topo), procura determinar as possíveis causas desse evento. A análise de falhas pode ser utilizada para uma avaliação qualitativa (determinação das falhas básicas) e quantitativa (probabilidade de ocorrência de um evento).

Este tipo de análise foi desenvolvido pelos engenheiros do laboratório da *Bell Telephone Company*, no início dos anos 60, e tem recebido contínuos desenvolvimentos na área da avaliação matemática. A exposição feita em seguida é baseada nas técnicas actuais da análise de árvore de falhas, porém, outros métodos e técnicas estão a ser desenvolvidos e utilizados em aplicações específicas. Em resumo, as cinco etapas básicas utilizadas na análise de árvore de falhas são:

1. Escolha do evento não desejado a ser analisado e definir a configuração do sistema, módulo, ciclo de vida e ambiente do objectivo do estudo;
2. Obtenção de informações, desenhos e qualquer outro tipo de informação disponível para se ter um bom entendimento do sistema a ser analisado;
3. Construção do diagrama lógico da árvore de falhas;



4. Avaliação do diagrama lógico (utilizando os enfoques objectivos definidos);
5. Preparação de um resumo das conclusões da análise de árvore de falhas para ser apresentado e analisado pelos elementos de gestão.

A análise de árvore de falhas pretende identificar as combinações das falhas nos equipamentos ou componentes de um sistema ou erros humanos que podem resultar em acidente. A análise pode ser feita num contexto de projecto, onde se procura descobrir modalidades de falhas ocultas que resultam das combinações das falhas de equipamentos ou componentes e de erros de operação (humanos), ou então num contexto de operação (durante a construção, neste caso) onde se estudam as características dos procedimentos de operação e do operador a fim de identificar combinações potenciais de falhas que resultem em acidentes. Os resultados são obtidos através de uma listagem dos conjuntos de falhas do equipamento e/ou operação que possam resultar num acidente específico. Estes podem ser qualitativos, quando são classificados de acordo com a sua importância, ou quantitativos, quando as probabilidades das falhas são conhecidas.

Este tipo de análise deve ser realizado por um analista especializado com consultas a engenheiros e pessoal com experiência no sistema incluída na análise. Quando feito em equipa, torna-se mais eficiente, pois cada membro pode concentrar-se numa árvore individual (série de eventos). O tempo e custo necessários para realizar a análise dependem da complexidade do sistema a ser analisado. O estudo de acidentes potenciais durante a construção de um túnel poderá levar várias semanas, dada complexidade deste tipo de empreendimentos.

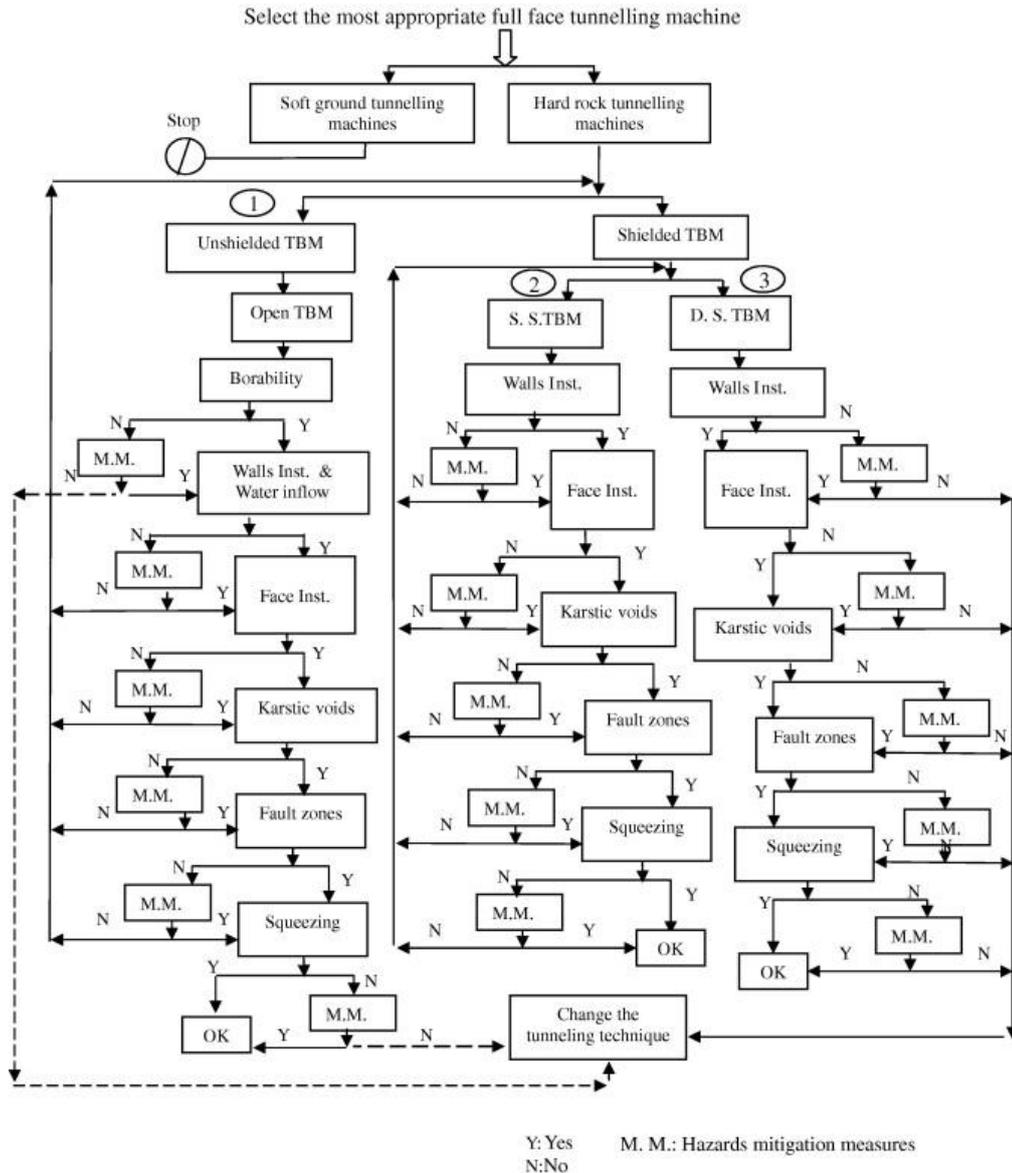


Figura 42 – Exemplo de uma análise de árvore de falhas de forma a determinar quais os tipos de TBM a utilizar para a escavação de um túnel. [<http://sciencedirect.com/science/>]

6.2 Análise de árvore de eventos (*Event Tree Analysis – ETA*)

A descrição do desenvolvimento de um processo a partir de um evento inicial, contemplando as possíveis consequências até um estado final, pode ser feita usando uma análise de árvore de eventos. Esta análise está intimamente ligada à análise de árvore de falhas, pois a última é frequentemente utilizada para quantificar os eventos do sistema que fazem parte da sequência da árvore de eventos.



Nas aplicações de análise de riscos, o evento inicial da árvore de eventos é, em geral, a falha de um componente ou subsistema, sendo os eventos subsequentes determinados pelas características do sistema. Para o traçado da árvore de eventos, são seguidas as seguintes etapas básicas:

1. Definir o evento inicial que pode conduzir ao acidente;
2. Definir os sistemas de segurança (acções) que podem amortecer o efeito do evento inicial;
3. Combinar numa árvore lógica de decisões as várias sequências de acontecimentos que podem surgir a partir do evento inicial;
4. Uma vez construída a árvore de eventos, calcular as probabilidades associadas a cada ramo do sistema que conduza a um acidente.

Tal como a análise de árvore de falhas, a análise de árvore de eventos também pode ser utilizada em sistemas grandes e complexos, tais como a construção de um túnel. Estas são especialmente direccionadas para representar e analisar mecanismos de redundância.

6.3 Análise de árvore de decisão (*Decision Tree Analysis – DTA*)

As análises de árvore de decisão são usadas na busca da melhor decisão baseada na informação disponível. Muitas das decisões que são tomadas na construção subterrânea contêm grandes incertezas, as quais podem ser apresentadas de uma forma estruturada usando este método, o que pode facilitar o processo de decisão.

A árvore de decisão consiste num diagrama que descreve uma decisão sob consideração e as implicações de escolher uma ou outra das alternativas possíveis. Ela incorpora probabilidades de riscos e os custos de recompensas de cada caminho lógico dos eventos e decisões futuras. Resolvendo a árvore de decisão, quem tem a responsabilidade de tomar as decisões tem a indicação de quais são as que produzem os valores esperados e todas as suas implicações incertas, custos, recompensas e decisões subsequentes.



6.4 Método multirrisco

Este método é aproximado para calcular funções com variáveis estocásticas (variáveis cujo valor, num dado instante do tempo, é retirado aleatoriamente da distribuição de probabilidades dos valores possíveis) e usado para a estimação de custos e de prazos. O método apresenta mais utilidade quando existe um elevado grau de incerteza. No caso da avaliação de custos o método segue os seguintes sete passos sequenciais:

1. Identificação das (algumas) principais parcelas independentes que integram o custo global;
2. Estimação do custo de cada parcela através de 3 valores: mínimo, mais provável e máximo;
3. O valor expectável e o grau de incerteza são calculados para cada parcela;
4. O valor total do custo e a sua variância são calculados;
5. Se a variância total é demasiado elevada, a parcela que tem a maior influência na incerteza é dividida em sub-parcelas independentes;
6. Os passos 2 a 5 são repetidos até que se alcance um valor aceitável para a variância total;
7. O resultado é apresentado através do valor médio e do desvio padrão do custo total.

O método pressupõe que as parcelas são estatisticamente independentes.

6.5 Simulação de Monte Carlo

As estimativas que se encontram nas obras subterrâneas incluem frequentemente equações com diversas variáveis estocásticas. As soluções analíticas para este tipo de problemas podem ser muito complicadas, mesmo quando é possível estabelecer uma expressão analítica, porque se não o for tais soluções não são obviamente possíveis. Usando uma simulação de Monte Carlo podem ser obtidas soluções aproximadas.



O método de Monte Carlo é um processo de amostragem cujo objectivo é permitir a observação do desempenho de uma variável de interesse em razão do comportamento de variáveis que encerram elementos de incerteza. Embora seja um conceito simples, a operacionalização desse processo requer o auxílio de alguns métodos matemáticos. De entre os mais conhecidos e utilizados, está o método da transformada inversa, que faz uso das propriedades dos números aleatórios e da função distribuição acumulada de uma variável aleatória. As etapas básicas do processo de simulação são as seguintes:

1. Desenvolvimento conceptual do modelo do sistema ou do problema a ser estudado.
2. Construção do modelo de simulação. Isto inclui o desenvolvimento de fórmulas e equações apropriadas, a recolha de dados necessários, a determinação das distribuições de probabilidades associadas às variáveis de entrada e, finalmente, a construção ou definição de uma forma de registo para os dados.
3. Verificação e validação do modelo. A verificação refere-se ao processo que confere se o modelo está livre de erros de lógica, ou seja, se o modelo faz aquilo que deveria fazer. A validação tem por objectivo avaliar se o modelo construído é uma representação razoavelmente credível do sistema ou problema estudado.
4. Execução de representações gráficas de experiências com a utilização do modelo. Esta etapa envolve a determinação de questões a serem respondidas pelo modelo com o intuito de auxiliar o decisor a alcançar o seu objectivo.
5. Realização de experiências e análise de resultados. Nesta última etapa, com base nas experiências feitas, as simulações são realizadas para que se obtenha o conjunto de informações especificado, que pode ser transmitido aos tomadores de decisão em forma de relatórios pré-definidos em conjunto com os mesmos.



7. CONCLUSÕES

Actualmente, a gestão de riscos tem vindo a constituir cada vez mais uma parte integrante no planeamento e na construção de qualquer grande projecto de construção, que na última década tem vindo a ser desenvolvido para ser aplicado à construção de túneis e obras subterrâneas.

Os sistemas de gestão de risco têm contribuído para que os desafios e incertezas colocados pela construção de grandes empreendimentos subterrâneos (cavernas de grande dimensão para centrais hidroeléctricas, por exemplo) em ambientes geologicamente complexos tenham vindo a ser ultrapassados, com uma diminuição de incidentes ocorridos nas mesmas e, conseqüentemente, com redução das derrapagens financeiras dos empreendimentos. Contudo, esses sistemas não possuem a capacidade de previsão ou de resolução de todas as dificuldades que empreendimentos dessa magnitude acarretam, havendo sempre a possibilidade da ocorrência de acidentes mesmo que se tenha tido em conta todos os aparentes factores de risco. A gestão de riscos dá um contributo útil e importante para o controlo técnico dos empreendimentos na observância do cumprimento das especificações técnicas, na garantia das condições de segurança e da qualidade requeridas, através da previsão e na definição atempada das medidas mitigadoras para eventuais situações de risco previamente identificadas. Embora estes factores importantes sejam garantidos através de uma eficaz gestão de riscos, esta ainda não tem conseguido, até ao momento, prever e solucionar problemas nos domínios do controlo de custos e de prazos da obra.

Ao realizar a presente dissertação procurou-se efectuar uma análise do estado de arte sobre o tema, verificando-se que a bibliografia portuguesa acerca do assunto ainda é escassa, havendo, contudo, autores que abordam esta temática ao nível de dissertações académicas e através de acções de formação levadas a cabo pela Comissão Portuguesa de Túneis e Obras Subterrâneas. A nível internacional, a maioria dos estudos segue as directivas da *ITA – International Tunnelling Association* e da *British Tunnelling Society*, já que estas instituições são as que apresentam os mais completos relatórios ao nível da gestão de riscos em obras subterrâneas.



Como sugestão para futuros trabalhos nesta área, é importante um estudo mais detalhado às análises e métodos de gestão de riscos, aos sistemas lógicos e matemáticos por detrás desses métodos e a sua aplicação prática e contribuição para a construção de túneis e obras subterrâneas, de forma a entender a importância dos resultados obtidos e os benefícios que estes trazem a estes tipos de empreendimentos.



LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARDOSO, António Silva, GOMES, António Topa – *Gestão dos Riscos de Construção. Instrumentação e Observação. Planos e Medidas de Emergência.*, 2º Curso da Comissão Portuguesa de Túneis e Obras Subterrâneas, LNEC, 2009.
- [2] DE ALMEIDA, A. Betâmio – *Introdução à Gestão de Riscos – Avaliação de Riscos, Segurança e Fiabilidade*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.
- [3] DE ALMEIDA, A. Betâmio – *Incertezas e Riscos no Contexto da Engenharia*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.
- [4] ESKESEN, Søren Degn – *ITA WG 2 – Guidelines for Tunnelling Risk Assessment*, International Tunnelling Association, Seoul, 2006.
- [5] GONÇALVES, António J. R. – *Execução de Túneis nas Formações Vulcânicas da Ilha da Madeira: O Caso do Túnel 1 da Nova Ligação Vasco Gil-Fundoa à Cota 500*, Universidade da Madeira, 2009.
- [6] GUILART, Moustafa Hamze – *Metodologia para a Interpretação do Monitoramento de Escavações Subterrâneas*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [7] HUBBARD, Doug – *The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It*, John Wiley & Sons, 2009.
- [8] KNIGHTS, Martin – *Are We Managing the Risks in Tunnelling?*, Jacobs Engineering.
- [9] LÓPEZ, J. R. D. – *Influencia de las Condiciones Geológicas del Terreno en el Diseño y Construcción de Túneles*, Manual de Túneles y Obras Subterráneas, Madrid, 1997.
- [10] MELÂNEO, Frederico – *Obras Subterrâneas – Capítulo 9: Instrumentação e Observação de Obras*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [11] MONROE, James, WICANDER, Reed – *The Changing Earth: Exploring Geology and Evolution*, West Publishing Company, 1997.
- [12] MURAKAMI, Cláudio e MAFFEI, Carlos M. – *A Observação de Mecanismos de Colapso no Acompanhamento Técnico de Túneis em Solo*.
- [13] SCABBIA, André Gonçalves – *Túneis Rodoviários – Proposta de Avaliação de Conformidade para Liberação ao Uso e Operação Comercial*, EESC/USP, Brasil, 2007.



[14] SEIDENFUSS, Timo – *Collapses in Tunnelling*, Stuttgart University of Applied Sciences, Lausanne, 2006.

[15] ZIHRI, Ghassan – *Risques Liés aux Ouvrages Souterrains: Constituiton d'une Échelles de Dommages*, Institut National Polytechnique de Lorraine, França, 2004.

[16] ISSO/DIS 31000 (2009). *A Risk Management Standard*, Institute of Risk Management / Association of Insurance and Risk Managers / National Forum for Risk Management in the Public Sector, Londres.



BIBLIOGRAFIA

- ADEYEMO, Ade – *Risk Management of Tunnelling Projects*, Zurich, Reino Unido, 2011.
- ARAÚJO, Vagner Pereira – *Gestão de Riscos Operacionais*, São Paulo, 2006.
- ARNAL, C., MESSIN, M., SALMON, R., VERDEL, T. e ZIHRI, G. – *Risques Liés aux Ouvrages Souterrains. Détermination d'une Échelle de Dommages.*, BRGM, França, 2003.
- BIANCHI, Gianpino, PIRAUD, Jean, ROBERT, Alain-Alex e EGAL, Emmanuel – *Presentation de l'Activite du GT 32 de l'Aftes: Reflexions sur la Caracterisation des Incertitudes et Risques Geotechniques en Travaux Souterrains*, CETU, França, 2011.
- BITAR, Omar, IYOMASA, Wilson e CABRAL JR., Marsis – *Geotecnologia – Tendências e Desafios*, SciELO, São Paulo, 2000.
- BOOS, Roman, MARKUS, Braun, HANGEN, Peter, HOCH, Christopher, POPP, Robert, HARTMUT, Reiner, SCHMID, Gerhard e WANNICK, Heiko – *Systèmes de Transport Souterrains – Potentialités et Risques qu'Abritent Ces Systèmes Pour l'Industrie des Assurances*, Münchener Rück, Munique, 2005.
- BRAVERY, P., CROSS, S., GALLAGHER, R., HAUTEFEUILLE, O., REINER, H., SPENCER, M., SMITH P., STOLFA, A. e WANNICK, H. – *A Code of Practice for Risk Management Of Tunnel Works*, The International Tunnelling Insurance Group, 2006.
- DA CRUZ, Sybele Segala – *Gestão de Segurança e Saúde Ocupacional nas Empresas de Construção Civil*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- DIX, Arnold, SMITH, Martin – *Risk Management in Tunnelling – A Systematic Framework for the Contractual Apportionment of Construction Risk*, International Tunnelling Association.
- DUARTE, Dayse, LEITE, Maria e PONTES, Rosemeri – *Uma Filosofia para o Gerenciamento dos Riscos na Construção Civil*, Universidade Federal de Pernambuco, 1998.
- ESKESEN, S. D., TENGBORB, P., KAMPMANN, J., VEICHERTS, T. H. – *Guidelines for Tunnelling Risk Management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004.
- FEMELAND, Michèle, RABIER, Mikael e ROBERT, Florent – *Qualite du Suivi des Travaux de Tunnel*, CETU, France, 2011.



GAILLARD, Cédric, HUMBERT, Emmanuel, RIVAL, Fabien e ROBERT, Alain – *Le Management des Risques Géotechniques est-il Toujours Pertinent?*, CETU, France, 2011.

HELMAN, Horácio, ANDERY, Paulo R. – *Análise de Falhas – Aplicação dos Métodos de FMEA – FTA*, Escola de Engenharia da UFMG, Brasil, 1995.

KOCHEN, Roberto – *Gestão de Riscos na Construção*, GeoCompany, Brasil, 2007.

LAMONT, Donald R. – *Occupational Health & Safety Risk Management in Tunnel Works*, International Tunnelling Association.

LANDRIN, Hervé, BLÜCKERT, Chris, PERRIN, Jean-Paul, STACEY, Steve e STOLFA, Alessandro – *ALOP/DSU Coverage for Tunnel Risks?*, The International Association of Engineering Insurers, Boston, 2006.

REINER, Hartmut – *Developments in the Tunnelling Industry Following Introduction of the Tunnelling Code for Practice*, Munich RE, IMIA Annual Conference, Holanda, 2011.

ŠEJNOHA, J., JARUŠKOVÁ, D., ŠPAČKOVÁ, O. e NOVOTNÁ, E. – *Risk Quantification for Tunnel Excavation Process*, World Academy of Science, Engineering and Technology, República Checa, 2009.

TOURNERY, Hubert e ROBERT, Alain – *Management des Risques des Ouvrages Souterrains: Enjeux, Bilan et Perspectives*, CETU, França, 2011.

TRICLOT, Jacques e GHOZAYEL, Salah – *Retour d'Experience sur les Pratiques Contractuelles du Management des Risques dans les Travaux Souterrains*, CETU, França, 2011.

WAGNER, Harald – *Risk Evaluation and Control in Underground Construction*, International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, Banguécoque, 2006.

WANNICK, Heiko P. – *The Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works – Future Tunnelling Insurance from the Insurers Point of View*, International Tunnelling Association, Seoul, 2006.

YOO, Woong-Suk – *Korean Risk Management Practices: A Contractor's Perspective*, International Tunnelling Association, Seoul, 2006.

