

# **ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO ARRANQUE EM PREGAGENS INSTRUMENTADAS**

Caso de Estudo – Barragem de Ribeiradio

**HUGO RODRIGO DOS SANTOS TELES PAMPLONA ALVES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor António Topa Gomes

---

Co-Orientador: Engenheiro Sandro Paulo de Oliveira Gomes

JULHO DE 2012

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais e Irmã

*“O homem não é nada além daquilo que a educação faz dele.”*

*Kant*



## AGRADECIMENTOS

Gostava de agradecer antes de mais ao Professor António Topa Gomes e ao Engenheiro Sandro Gomes pela disponibilidade, paciência e sabedoria demonstrada que em muito serviu-me de exemplo para me tornar um melhor profissional na etapa que se sucede.

Ao Doutor Eric Mendes, pela disponibilidade demonstrada para a localização da zona dos ensaios

Ao Eng. Paulo Santos pela sempre disponibilidade e pelo companheirismo na altura da realização dos ensaios porque sem ele não teria sido possível a sua realização

Ao Engenheiro Carlos Costa pelo ajuda disponibilizada sempre de uma forma afável e bem disposta na qual contagiou-nos na realização dos ensaios e afins.

Um especial agradecimento ao encarregado, Sr. Adelino por me acolher de uma forma sempre positiva e bem disposta, e por demonstrar um empenho inexcedível no desenrolar de todo o processo.

Um muito obrigado ao encarregado, Sr. Jorge Eugénio, pela paciência no processo de montagem.

Ao Engenheiro Geólogo Daniel Rodrigues e à Engenheira Ana Silva, responsáveis pela SolData no Aproveitamento Hidroelétrico pela forma como foram atenciosos e sempre disponíveis para auxiliar em todo o processo de montagem, o meu muito obrigado.

A todos os funcionários da Rodio, em particular ao Daniel Salvado, Hugo Sampaio, Nelson Valente, Nelson Carvalho e ao Saldanha pela disponibilidade e paciência em todo o processo de preparação, furação e selagem das pregagens.

Às entidades envolvidas no Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida, EDP, ACE Ribeiradio-Ermida, pela sua autorização e disponibilidade para realização dos ensaios no Aproveitamento Hidroelétrico.

Às técnicas do laboratório da FEUP, Cláudia e Daniela, pela disponibilidade que demonstraram na realização dos ensaios requisitados.

Aos Meus colegas de fim de curso pelas noites passadas a trabalhar e pela entre ajuda demonstrada por todos, porque sem ela, com toda a certeza que esta dissertação ficaria mais pobre.

À Sara, pelo apoio que sempre me demonstrou em todas as horas, sendo a minha fonte de força, determinação e inspiração para que não me deixasse abater nas horas de infortúnio.



## RESUMO

A presente dissertação realizou-se em protocolo com a RODIO PORTUGAL, SA no Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida e teve como objetivo a análise da resistência de pregagens com recurso a extensómetros de corda vibrante.

De forma a contextualizar a dissertação, realizou-se uma apresentação do empreendimento em que se referenciou os pontos principais como a sua localização, intervenientes, caracterização geológica e por fim a referência à principal estrutura existente, a Barragem de Ribeiradio.

Sendo esta dissertação realizada em ambiente empresarial é de particular interesse a componente prática dos trabalhos realizados *In Situ* do principal objeto de estudo, as pregagens tornando-se imprescindível dar-se referência ao método construtivo adotado assim como aos materiais e equipamentos utilizados em todo o processo.

Foram realizadas duas pregagens em solo residual de granito, tendo sido posteriormente ensaiadas à rotura e comparados os resultados com publicações de referência através de uma abordagem teórica.

Após uma análise teórica, procedeu-se a uma análise experimental através dos dados retirados dos extensómetros instalados no varão de aço, para avaliar a extensão. Aplicando-se a, Lei de Hooke, derivou-se o valor da tensão de corte na interface calda-maciço.

Por fim foi realizado uma modelação no programa PLAXIS® do tipo deformação plana, de forma a comparar os valores do ensaio com a modelação realizada. A dissertação termina com uma comparação entre os valores do modelo numérico e os valores de ensaio.

Palavras Chave: Pregagem, Tensão de Corte, Extensómetros, Solo Residual Granito



## **ABSTRACT**

The present thesis is defined as a case study in protocol with RODIO PORTUGAL, SA in the Hydropower and pumped-storage hydroelectricity Ribeiradio - Ermida and aimed to analyze the strength of nailing with resource to the vibrating strain gauges.

In order to contextualize the thesis, held a presentation of the Hydropower and pumped-storage hydroelectricity that had as main points of their location, people involved, its characterization and geological references to the enterprise itself, its primary structure - Ribeiradio Dam.

Because of this thesis is a case study, it became important to carry out a methodology for this type of work, in this specific case the nailing, based on the work developed in the enterprise, as well as all materials and equipment used in the process.

There were made two nailing on residual soil of granite, and was subsequently tested to failure and compared the results with reference publications through a theoretical method.

After a theoretical analysis was conducted over a scan through the experimental data obtained from the strain gauges installed on the steel rod to determine the extent, which in turn, by the application of some formulas, such as the Hooke's law, leads to a shear-stress on the link grout-soil.

Finally were performed with a modeling the program PLAXIS®, plane strain, in one nail (nail nº 4) in order to compare the values of the test performed with the modeling.

Keywords: Nail, Strain Gauge, Shear Stress Gauge, Residual Granite Soil



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	I
<b>RESUMO</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	V
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	1
1.2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA .....	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE .....	3
<b>2. O EMPREENDIMENTO: APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE RIBEIRADIO-ERMIDA</b> .....	5
2.1. APRESENTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO .....	5
2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	7
2.3. BARRAGEM DE RIBEIRADIO .....	11
<b>3. PREGAGENS</b> .....	13
3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO .....	13
3.2. PREGAGENS NO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE RIBEIRADIO - ERMIDA .....	15
3.2.1. METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTOS DE PREGAGENS .....	15
3.2.2. ABORDAGENS TEÓRICAS DE ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO ARRANQUE DAS PREGAGENS .....	16
3.2.3. MATERIAIS .....	21
3.2.3.1. Aço .....	21
3.2.3.2. Centralizadores e Espaçadores .....	23
3.2.3.3. Cimento .....	24
3.2.3.4. Superplastificante .....	24
3.2.3.5. Malhasol .....	25
3.2.3.6. Tubos de drenagem .....	26
3.2.4. EQUIPAMENTOS .....	27
3.2.4.1. Furação .....	27
3.2.4.2. Projeção de Betão .....	29
3.2.4.3. Elevação .....	31

3.2.4.4.	Produção e Injeção de Calda de Cimento.....	32
3.2.5.	METODOLOGIA DE EXECUÇÃO “IN SITU” .....	33
3.2.5.1.	Preparação dos Varões.....	33
3.2.5.2.	Colocação da mangueira de injeção .....	35
3.2.5.3.	Realização do Furo.....	36
3.2.5.4.	Colocação da Pregagem .....	39
3.2.5.5.	Injeção da Pregagem.....	40
3.2.5.6.	Projeção de Betão .....	40
3.2.5.7.	Aperto .....	41
<b>3.3.</b>	<b>NORMAS.....</b>	<b>43</b>
3.3.1.	NORMA EN14490.....	43
3.3.1.1.	Materiais .....	43
3.3.1.2.	Execução .....	47
3.3.1.3.	Supervisão, Ensaios e Monitorização .....	49
3.3.2.	NORMA FHWA, 2003 .....	52
3.3.2.1.	Materiais .....	52
3.3.2.2.	Execução .....	53
3.3.2.3.	Inspeção de Construção e Monitorização de Desempenho.....	55
3.3.3.	ENSAIOS NORMATIVOS “IN SITU”.....	58
3.3.3.1.	Ensaio de Fluidiez .....	58
3.3.3.2.	Ensaio de Exsudação .....	60
3.3.3.3.	Balança Baroid .....	61
3.3.3.4.	Ensaio à Compressão Uniaxial .....	61
<b>4.</b>	<b>PREGAGENS INSTRUMENTADAS .....</b>	<b>63</b>
4.1.	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ZONA DOS ENSAIOS.....	63
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS PREGAGENS A ENSAIAR .....	65
4.3.	PROCESSO CONSTRUTIVO DAS PREGAGENS INSTRUMENTADAS.....	66
4.3.1.	FASEAMENTO CONSTRUTIVO .....	66
4.3.2.	ELEMENTOS DE LEITURA .....	69
4.3.2.1.	Extensómetros.....	69
4.3.2.2.	Defletómetros .....	72
4.3.2.3.	Macaco Hidráulico BVA/HDC10003 .....	73

<b>4.4. FURAÇÃO</b> .....	74
4.4.1. PREGAGEM Nº2 .....	75
4.4.2. PREGAGEM Nº4 .....	76
<b>4.5. SELAGEM</b> .....	77
4.5.1. MATERIAIS .....	77
4.5.2. ENSAIOS NORMATIVOS .....	79
<b>4.6. ENSAIOS</b> .....	84
4.6.1. PROTOCOLO DE ENSAIO.....	84
4.6.2. MONTAGEM DO ENSAIO.....	84
<b>5. ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	87
<b>5.1. CASO DE ESTUDO DE REFERÊNCIA</b> .....	87
5.1.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PREGAGENS SELADAS DIFERENCIALMENTE ATRAVÉS DE ENSAIOS EM PROTÓTIPOS – GOMES, 2011 .....	87
<b>5.2. RESISTÊNCIA AO CORTE DO SOLO</b> .....	88
5.2.1. RESISTÊNCIA AO CORTE – VALOR DE REFERÊNCIA, GOMES (2011) .....	89
5.2.2. RESISTÊNCIA AO CORTE – CASO DE ESTUDO .....	89
5.2.2.1. Resultados Obtidos .....	90
5.2.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	92
<b>5.3. ELEMENTOS TEÓRICOS</b> .....	94
<b>5.4. ELEMENTOS ANALISADOS</b> .....	95
5.4.1. PLACA DE CARGA – DESLOCAMENTO DA CHAPA.....	95
5.4.2. ÊMBOLO – DESLOCAMENTO DA “CABEÇA” DA PREGAGEM.....	95
5.4.3. EXTENSÓMETROS – EXTENSÃO DO VARÃO DE AÇO .....	95
<b>5.5. VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS</b> .....	96
5.5.1. PREGAGEM Nº2 .....	96
5.5.1.1. Defletômetros .....	96
5.5.1.2. Extensômetros.....	98
5.5.2. PREGAGEM Nº 4.....	101
5.5.2.1. Defletômetros .....	101
5.5.2.2. Extensômetros.....	102
<b>5.6. TENSÃO DE CORTE</b> .....	105
5.6.1. ABORDAGEM CLÁSSICA.....	105

5.6.1.1.	Valores de Referência – Gomes (2011) .....	105
5.6.1.2.	Valores do Caso de Estudo .....	107
5.6.1.3.	Comparação de Resultados .....	110
5.6.2.	ABORDAGEM EXPERIMENTAL .....	112
5.6.2.1.	Áreas de Influência .....	112
5.6.2.2.	Pregagem nº 2 .....	114
5.6.2.3.	Pregagem nº 4 .....	118
<b>5.7.</b>	<b>FLUÊNCIA</b> .....	<b>127</b>
5.7.1.	PREGAGEM Nº 2 .....	127
5.7.2.	PREGAGEM Nº 4 .....	131
<b>6.</b>	<b>MODELAÇÃO NUMÉRICA – PLAXIS®</b> .....	<b>135</b>
6.1.	INTRODUÇÃO AO PLAXIS® .....	135
6.2.	MODELO – DEFORMAÇÃO PLANA .....	135
6.2.1.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CARGAS A APLICAR .....	135
6.2.2.	GEOMETRIA .....	137
6.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	138
6.3.1.	INTRODUÇÃO .....	138
6.3.2.	CARGA VS DESLOCAMENTO .....	139
6.3.3.	ANÁLISE DA FORÇA AXIAL .....	140
6.3.4.	ANÁLISE DA TENSÃO DE CORTE .....	142
6.4.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	147
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO E POSSÍVEIS DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>149</b>
7.1.	CONCLUSÃO .....	149
7.2.	POSSÍVEIS DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	151
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>153</b>
<b>ANEXOS</b>	.....	<b>155</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma Representativo da Tese.....	3
Figura 2.1 -Localização do Empreendimento: a) Mapa de Portugal [1], b) Zona Centro [2] .....	5
Figura 2.2 – Modelação Tridimensional da Barragem de Ermida [4].....	6
Figura 2.3 - Modelação Tridimensional da Barragem de Ribeiradio [4] .....	6
Figura 2.4 – Taludes Pregados no Escalão de Jusante – Ermida.....	7
Figura 2.5 - Principais Unidades Geotectónicas [6].....	8
Figura 2.6 - Prospecção Geotécnica no AHRE [7] .....	8
Figura 2.7 - Caracterização Geológica do AHRE [4] citado por Sandro Gomes .....	10
Figura 2.8 - Alçado de Montante - Barragem Ribeiradio [4].....	11
Figura 2.9 - Alçado de Jusante - Barragem de Ribeiradio [4].....	11
Figura 3.1 – Impedimento do levantamento hidráulico [9].....	14
Figura 3.2 - Estabilização de taludes [9].....	14
Figura 3.3 - Contenção de Paredes de Suporte [9].....	14
Figura 3.4 - Método de Shen [10] .....	15
Figura 3.5 - Método de Stocker [10].....	16
Figura 3.6 - Método de Juran [10].....	16
Figura 3.7 – Ábaco para determinação do atrito unitário, Areia [10] .....	17
Figura 3.8 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Argila [10].....	18
Figura 3.9 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Cascalho [10] .....	18
Figura 3.10 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Margas [10].....	18
Figura 3.11 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Rochas Alteradas [10].....	19
Figura 3.12 - Abaco para Determinação do $\tau$ através do SPT, Areia [9].....	20
Figura 3.13 - Ábaco para Determinação do $\tau$ através do SPT, Argila [9].....	20
Figura 3.14 - Ábacos para Determinação do t através do SPT, Margas [9] .....	21
Figura 3.15 - Ábacos para Determinação do t através do SPT, Rocha Alterada [9].....	21
Figura 3.16 - Varões Galvanizados vs Varões não Galvanizados.....	21
Figura 3.17 - Sistema GEWI [11] .....	22
Figura 3.18 - Varões GEWI e Acopladores .....	22
Figura 3.19 - Colocação dos Acopladores.....	22
Figura 3.20 - Tubo Selagem.....	23
Figura 3.21 - Tubo de Selagem instalado.....	23
Figura 3.22 - Varão GEWI com espaçador [11] .....	23
Figura 3.23 – Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m <sup>3</sup> de cimento CEM II/B-L 32.5N [12] .....	24
Figura 3.24 - Aplicação do Rheobuild 561 .....	25
Figura 3.25 - Pormenor Tubo de Drenagem [15].....	26
Figura 3.26 – Drenos com manta geotêxtil .....	27
Figura 3.27 - ROC L6 .....	28
Figura 3.28 - ROC LMEAC-500C.....	28
Figura 3.29 - BBC 120 .....	29
Figura 3.30 - BBC120 em utilização.....	29
Figura 3.31 - Alcance de Trabalho do "Robot" [18] .....	29
Figura 3.32 –Fornecimento de betão através da autobetoneira ao "Robot" .....	30
Figura 3.33 - Projetor de Betão - Via seca (ACI 506R-05, 2005 citado por Marta Santos).....	30
Figura 3.34 - Projetor de Betão - Via Húmida (ACI 506R-05, 2005 citado por Marta Santos).....	31
Figura 3.35 - Manitou Maniscopic .....	31

Figura 3.36 - Tanque de água da Central de calda de cimento.....	32
Figura 3.37 - Central de calda de cimento.....	32
Figura 3.38 - Varão GEWI com rosca.....	33
Figura 3.39 - Roscadora em funcionamento.....	33
Figura 3.40 - Resíduos do Enroscamento.....	34
Figura 3.41 - Processo de alisamento dos Varões.....	34
Figura 3.42 – Varões de “cabeça” Alisada.....	34
Figura 3.43 - Verificação das Roscas.....	35
Figura 3.44 - Varões Roscados.....	35
Figura 3.45 - Mangueira de Injeção.....	35
Figura 3.46 – Furo alternativo.....	35
Figura 3.47 – Varas para furação Wireline [21].....	36
Figura 3.48 - Coroas de diamante impregnado [22].....	36
Figura 3.49 - Classificação das Coroas da Boart Longyear [23].....	37
Figura 3.50 - Varas com a Coroa Wireline [20].....	37
Figura 3.51- Tipos de Bits [17].....	38
Figura 3.52 - Martelo de Superfície Vs. Martelo de Fundo de Furo [17].....	38
Figura 3.53- Furação do L6.....	39
Figura 3.54 - Furação do LM500.....	39
Figura 3.55 – Colocação de Pregagens.....	40
Figura 3.56 - Colocação de Pregagens com o auxílio do Manitou.....	40
Figura 3.57 - Mangueira de Injeção.....	40
Figura 3.58 -Injeção de Calda.....	40
Figura 3.59 - Malhasol.....	41
Figura 3.60 -Bico de Projeção.....	41
Figura 3.61 - Chapas de Aperto.....	41
Figura 3.62 - Aperto em AHRE.....	41
Figura 3.63 - Elementos de um Ensaio [26].....	56
Figura 3.64 - Exemplo de Instrumentação [26].....	57
Figura 3.65 - Cone de Marsh.....	58
Figura 3.66 - Ensaio de Fluidez.....	59
Figura 3.67 - Provetes de Exsudação.....	60
Figura 3.68 - Amostra de Exsudação.....	60
Figura 3.69 - Balança de Baroid.....	61
Figura 3.70 - Colocação da Calda nos Moldes.....	62
Figura 3.71 - Descofragem dos Provetes.....	62
Figura 3.72 - Prensa de Compressão.....	62
Figura 3.73 - Provetes Ensaaiados.....	62
Figura 4.1 - Detecção de Solo Residual de Granito - Doutor Eric Mendes.....	63
Figura 4.2 - Solo Residual de Granito.....	63
Figura 4.3 - Localização da pregagem no AHRE.....	64
Figura 4.4 - Identificação das Pregagens.....	64
Figura 4.5 - Pregagem instrumentadas.....	65
Figura 4.6 - Definição dos comprimentos de selagem e livre.....	66
Figura 4.7 - Soldagem dos Apoios dos Extensômetros.....	67
Figura 4.8 - Instalação dos Extensômetros.....	67
Figura 4.9 - Unidade de Leitura dos Extensômetros.....	68

Figura 4.10 - Colocação da Proteção dos Extensômetros .....	68
Figura 4.11 - Tubo de Injeção .....	68
Figura 4.12 - Espuma Expansiva.....	69
Figura 4.13 - Extensômetros de Corda Vibrante - TSR/5.5/T [29] .....	70
Figura 4.14 - Defletômetro de Estilete [7] .....	72
Figura 4.15 - Defletômetro de roldana .....	73
Figura 4.16 - Macaco BVA/HDC 10005 .....	73
Figura 4.17 – Furação em Ribeiradio.....	74
Figura 4.18 - Manômetros de Leitura - LMEAC LM500-C .....	74
Figura 4.19 – Evolução da Profundidade de Furação- Pregagem 2 .....	75
Figura 4.20 - Evolução das Características do ROC LM500C – Pregagem 2 .....	76
Figura 4.21 - Evolução da Profundidade de Furação - Pregagem 4.....	76
Figura 4.22 - Evolução das Características do ROC LM500C – Pregagem 4 .....	77
Figura 4.23 - Existência de Fissuras no Solo .....	78
Figura 4.24 - Aumento da Secção devido à Oscilação das Varas de Furação.....	79
Figura 4.25 - Ensaio de Exsudação - Pregagem 2.....	80
Figura 4.26 - Provete da Exsudação - Pregagem 2.....	80
Figura 4.27 - Balança de Baroid – Pregagem 2.....	81
Figura 4.28 - Cone de Marsh - Pregagem 2 .....	81
Figura 4.29 - Provetes cúbicos nos moldes - Pregagem 2.....	81
Figura 4.30 - Ensaio à Compressão Uniaxial .....	81
Figura 4.31 - Previsão da Resistência à Compressão Uniaxial dos Provetes Cúbicos – Pregagem 2 e 4 .....	82
Figura 4.32 - Aplicação do Betão Projetado .....	85
Figura 4.33 - Molde para Ensaio.....	85
Figura 4.34 - Montagem do Ensaio de Arranque .....	85
Figura 4.35 - Defletômetros - Pregagem nº 4.....	86
Figura 4.36 - Extensômetros - Pregagem nº4.....	86
Figura 5.1 - Localização dos Ensaios de Referência - Sandro Gomes [7] .....	87
Figura 5.2 - Instrumento de Ensaio Corte Direto [31] .....	88
Figura 5.3 - Estabilização do Molde .....	89
Figura 5.4 - Amostra no Molde.....	89
Figura 5.5 - Amostra protegida com Película Aderente.....	90
Figura 5.6 - Identificação das Amostras Retiradas.....	90
Figura 5.7 - Resistência de Pico do solo ensaiado .....	90
Figura 5.8 - Diagrama $\tau$ - $\sigma$ - Características máximas de rotura.....	91
Figura 5.9 - Resistência Residual do solo ensaiado .....	91
Figura 5.10 - Diagrama $\tau$ - $\sigma$ - Características residuais do Solo .....	92
Figura 5.11 - Extensômetro munido de sensor de temperatura .....	94
Figura 5.12 - Leitura dos Defletômetros .....	96
Figura 5.13 - Leitura dos Extensômetros .....	96
Figura 5.14 - Deslocamentos no Instante Inicial - Pregagem nº 2 .....	96
Figura 5.15 - Deslocamentos após 1 minuto - Pregagem nº 2.....	97
Figura 5.16 - Estado do Acoplador após o Ensaio .....	97
Figura 5.17 - Evolução da Extensão - Extensômetro 1 - Pregagem 2.....	98
Figura 5.18 - Evolução da Extensão - Extensômetro 2 - Pregagem 2.....	98
Figura 5.19 - Evolução da Extensão - Extensômetro 3 - Pregagem 2.....	99

Figura 5.20 - Evolução da Extensão - Extensómetro 4 - Pregagem 2 .....	99
Figura 5.21 - Evolução da Temperatura durante o Ensaio - Pregagem nº 2 .....	99
Figura 5.22 - Deslocamentos no Instante Inicial - Pregagem nº 4.....	101
Figura 5.23 - Deslocamentos Após 1 minuto - Pregagem nº 4.....	101
Figura 5.24 - Evolução da Extensão - Extensómetro 1 - Pregagem 4 .....	102
Figura 5.25 - Evolução da Extensão - Extensómetro 2 - Pregagem 4 .....	102
Figura 5.26 - Evolução da Extensão - Extensómetro 3 - Pregagem 4 .....	103
Figura 5.27 - Evolução da Extensão - Extensómetro 4 - Pregagem 4 .....	103
Figura 5.28 - Evolução da Extensão - Extensómetro 5 - Pregagem 4 .....	103
Figura 5.29 - Evolução da Temperatura durante o Ensaio - Pregagem nº 4.....	104
Figura 5.30 - Tensão de Corte em função da relação A/C [7].....	106
Figura 5.31 - Tensão de Corte – Abordagem Clássica - Pregagem 2 e 4.....	109
Figura 5.32 - Abordagem Clássica - Comparação de Resultados .....	110
Figura 5.33 - Organograma do Processo de Tratamento de Dados .....	112
Figura 5.34 - Aumento de Secção no Comprimento de Selagem - Pregagem nº 4 .....	113
Figura 5.35 - Fissuração da Calda de Selagem.....	114
Figura 5.36 – Evolução da Força N em cada extensómetro - Pregagem nº 2.....	114
Figura 5.37 – Evolução da Força N em cada extensómetro, c/ troca dos extensómetros 1 e 4 - Pregagem nº 2.....	115
Figura 5.38 - Eventual Fenómeno de Rotura do Extensómetro 2 - Pregagem nº 2.....	115
Figura 5.39 - Evolução da Tensão de Corte com troca dos Extensómetros 1 e 4 - Diferentes Patamares de Carga.....	116
Figura 5.40 - Tensão de Corte - Antes da Rotura - Pregagem nº 2 .....	117
Figura 5.41 - Evolução da Força N em cada extensómetro – S/ Fissuração da Calda de Selagem - Pregagem nº 4.....	118
Figura 5.42 – Tensão de Corte no Comprimento Livre - Pregagem nº 4 .....	119
Figura 5.43 - Evolução da Força N em cada extensómetro – C/ Fissuração da Calda de Selagem - Pregagem nº 4.....	119
Figura 5.44 - Evolução da Força N em cada extensómetro – C/ Fissuração da Calda de Selagem, Excluindo Extensómetro 2 -Pregagem nº 4 .....	120
Figura 5.45 - Evolução da Tensão de Corte - C/Fissuração da Calda de Selagem - Pregagem nº4 ....	121
Figura 5.46 - Evolução da Tensão de Corte - C/Fissuração da Calda de Selagem e S/Extensómetro 2 - Pregagem nº 4.....	121
Figura 5.47 - Controlo de Selagem - Paker [33].....	123
Figura 5.48 - Força Dissipada entre Extensómetros – C/Fissuração da Calda de Selagem – Carga 100 kN .....	123
Figura 5.49 - Força Dissipada entre Extensómetros – C/Fissuração da Calda de Selagem - S/Extensómetro 2 – Carga 100 kN .....	123
Figura 5.50 - Patamar de Fluência - Êmbolo - Pregagem nº 2 .....	127
Figura 5.51 - Patamar de Fluência - Chapa - Pregagem nº 2.....	128
Figura 5.52 - Patamar de Fluência - Carga 100 kN – Pregagem nº 2 .....	128
Figura 5.53 - Patamar de Fluência - Carga 200 kN – Pregagem nº 2 .....	129
Figura 5.54 - Patamar de Fluência - Carga 250 kN – Pregagem nº 2 .....	129
Figura 5.55 - Patamar de Fluência – Carga 300 kN – Pregagem nº 2 .....	130
Figura 5.56 - Patamar de Fluência – Carga 325 kN – Pregagem nº 2 .....	130
Figura 5.57 - Patamar de Fluência – Carga 350 kN – Pregagem nº 2 .....	131
Figura 5.58 - Patamar de Fluência - Êmbolo - Pregagem nº 4 .....	131

Figura 5.59 - Patamar de Fluência - Chapa - Pregagem nº 4 .....	132
Figura 5.60 - Patamar de Fluência – Carga 350 kN - Pregagem nº 4.....	132
Figura 5.61 - Patamar de Fluência - Carga 200 kN – Pregagem nº 4.....	133
Figura 5.62 - Patamar de Fluência - Carga 250 kN – Pregagem nº 4.....	133
Figura 5.63 - Patamar de Fluência - Carga 300 kN – Pregagem nº 4.....	134
Figura 6.1 - Variação do Módulo de Deformabilidade Real vs Teórico .....	136
Figura 6.2 - Propriedades dos Materiais - Modelo Deformação Plana .....	136
Figura 6.3 - Modelação da Deformação Plana .....	137
Figura 6.4 - Perfil da zona de Ensaio .....	137
Figura 6.5 - Geração da Malha.....	137
Figura 6.6 - Pormenor da Interface .....	138
Figura 6.7 – Interface gráfica representativa da rotura – S.R.Granito 17kN/m <sup>3</sup> - Plaxis® .....	138
Figura 6.8 – Interface gráfica representativa da rotura – S.R.Granito 14kN/m <sup>3</sup> - Plaxis® .....	138
Figura 6.9 – Deslocamentos equivalentes nos Modelos em estudo - PLAXIS .....	139
Figura 6.10 – Pormenor dos Deslocamentos na zona da Pregagem - PLAXIS .....	139
Figura 6.11 - Deslocamentos do Êmbolo.....	140
Figura 6.12 - Evolução da Força Axial no Comprimento de Selagem – S.R.Granito 17kN/m <sup>3</sup> - PLAXIS®.....	141
Figura 6.13 - Evolução da Força Axial no Comprimento de Selagem – S.R.Granito 14kN/m <sup>3</sup> - PLAXIS®.....	141
Figura 6.14 – Comparação da evolução da força Axial no Comprimento de Selagem na Rotura .....	142
Figura 6.15 – Evolução da Tensão de Corte – S.R.Granito 17kN/m <sup>3</sup> - Comprimento de Selagem .....	142
Figura 6.16 - Evolução da Tensão de Corte – S.R.Granito 14kN/m <sup>3</sup> - Comprimento de Selagem .....	143
Figura 6.17 - Deformação do Comprimento de Selagem na Rotura .....	143
Figura 6.18 - Tensão de Corte Relativa na Rotura – Comprimento de Selagem .....	144
Figura 6.19 - Tensão de Corte - Rotura – Comprimento de Selagem .....	144
Figura 6.20 - Evolução da Tensão de Corte no Comprimento de Selagem na Rotura - Pregagem nº 4 .....	144
Figura 6.21 - Evolução do Regime Imposto no Solo - Elástico, Plástico e Tensão .....	146
Figura 6.22 - Regime Imposto ao longo do Comprimento de Selagem - Rotura - S.R.Granito (γ=17kN/m <sup>3</sup> ).....	146
Figura 6.23 - Pontos Plastificados na Rotura - Pregagem nº 4.....	147

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Quadro Resumo da Prospecção Geológica/Geotécnica no AHRE [4] citado por Sandro Gomes.....	8
Tabela 2.2 - Características do Escalão Principal – Ribeiradio [8] citado por Sandro Gomes, 2011....	12
Tabela 3.1 - Processo Construtivo [10] .....	17
Tabela 3.2 - Coeficiente $\alpha$ [9].....	20
Tabela 3.3 - Características de Varões de Aço Correntes .....	21
Tabela 3.4 - Características Mecânicas - Varões GEWI [11].....	23
Tabela 3.5 - Valores de Referência da Resistência à Compressão Uniaxial [12].....	24
Tabela 3.6 - Características Físicas da Rede Electrossoldada AQ50 [14].....	26
Tabela 3.7- Características Mecânicas da Rede Electrossoldada [14] .....	26
Tabela 3.8 - Características da Manta Geotêxtil [15] .....	27
Tabela 3.9 - Via Seca vs Via Húmida [19].....	31
Tabela 3.10 - Valores de Aperto de Varões em AHRE [24] .....	42
Tabela 3.11 - Indicação da Perda de Espessura dos Varões de Aço devido à Corrosão [10].....	45
Tabela 3.12 - Método Geral de Avaliação da Corrosão [25].....	46
Tabela 3.13 - Classificação do Solo quanto à Corrosividade [25].....	47
Tabela 3.14 - Tipos de Injeção adequados ao Tipo de Furação [25] .....	48
Tabela 3.15 - Tipos de Injeção [25].....	49
Tabela 3.16 - Ensaio de Carga [25].....	50
Tabela 3.17 - Frequência Mínima de Ensaio de Carga [25] .....	51
Tabela 3.18 - Métodos de Furação e Procedimentos [26] .....	54
Tabela 3.19 - Resultados Exigidos do Ensaio de Fluidez [27] .....	59
Tabela 4.1 - Materiais das Pregagens Instrumentadas.....	65
Tabela 4.2 -Características das Pregagens.....	66
Tabela 4.3 - Calendarização das Pregagens em Estudo.....	66
Tabela 4.4 - Especificações dos extensómetros [29] .....	70
Tabela 4.5 - Intervalo de Leitura dos Extensómetros [29] .....	70
Tabela 4.6 - Leituras dos Extensómetros - Fase Preparação e Colocação no Furo - Pregagem nº2.....	71
Tabela 4.7 - Leituras dos Extensómetros - Fase Preparação e Colocação no Furo - Pregagem nº4.....	71
Tabela 4.8 - Especificações do Macaco Hidráulico [24].....	74
Tabela 4.9 - Quantidades da Calda de Cimento .....	77
Tabela 4.10 – Volumes Teóricos vs Volumes Injetados .....	78
Tabela 4.11 – Volumes efetivos – Pregagem nº 2 .....	78
Tabela 4.12 - Temperaturas durante as Selagens.....	79
Tabela 4.13 - Características Físicas da Calda de Selagem - Pregagem nº2 e Pregagem nº4 .....	80
Tabela 4.14 - Resultados dos Ensaio à Compressão Uniaxial - Pregagem 2 e Pregagem 4 .....	82
Tabela 4.15 - Leitura dos Extensómetros - Selagem – Pregagem nº 2 .....	83
Tabela 4.16 - Leitura dos Extensómetros - Selagem – Pregagem nº 4 .....	83
Tabela 5.1 - Valores de Referência – Características Resistentes do Solo [7] .....	89
Tabela 5.2 - Valores de Caso de Estudo – Características Resistentes do Solo .....	92
Tabela 5.3 - Comparação das Características Resistentes - Valores de Referência Vs Caso de Estudo.....	93
Tabela 5.4 - Valores Experimentais obtidos por Sandro Gomes, 2011 - Solo Residual de Granito [7] .....	105
Tabela 5.5 – Tensão de Corte – Comprimento de Selagem 2.5 m – Pregagem nº 2 .....	107
Tabela 5.6 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 4 m - Pregagem nº 2 .....	107
Tabela 5.7 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 3 m - Pregagem nº 4 .....	108

Tabela 5.8 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 5 m - Pregagem nº 4 .....	108
Tabela 5.9 -Quadro Resumo - Tensão de Corte - Abordagem Clássica – Ensaio Realizados .....	108
Tabela 5.10 - Resumo da Tensão de Corte dos Ensaios (Referência e Atuais).....	110
Tabela 5.11 - Valores de Força N - Extensómetro 1 e 2 - Pregagem nº 4.....	122
Tabela 5.12 - Força dissipada ao longo da Pregagem C/Fissuração da Calda - Pregagem nº 4.....	125
Tabela 5.13 - Força dissipada ao longo da Pregagem C/Fissuração da Calda, S/Extensómetro 2 - Pregagem nº 4.....	126
Tabela 6.1 - Fases de Aplicação de Carga.....	137
Tabela 6.2 - Deslocamento do êmbolo - Plaxis - Pregagem nº 4 .....	140
Tabela 6.3 - Comparação dos Valores de Tensão de Corte.....	147

## **SIMBOLOGIA**

$\text{hm}^3$  – Hectómetro cubico

GWh – Giga Watt-hora

MW – Mega Watt

kN – Kilo-Newton

mm - milímetros

WC – W + C – Tungsténio (Volfrâmio) + Carbono (Símbolo Químico)

r.p.m. – Rotações Por Minuto

## **ALFABETO GREGO**

$\pi$  – Constante Matemática

$\tau$  – Resistência lateral unitária

$\mu\epsilon$  - Microextensão

$\epsilon$  - Extensão

$\sigma$  – Tensão Normal

$\Omega$  – Área

$\phi'$  - Ângulo de Atrito

$\phi'_{\text{Pico}}$  – Ângulo de Atrito de Pico

$\phi'_{\text{Residual}}$  – Ângulo de Atrito Residual

$c'$  - Coesão

$c'_{\text{Pico}}$  – Coesão de Pico

$c'_{\text{Residual}}$  – Coesão Residual

## **ACRÓNIMOS E SIGLAS**

AHRE – Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio - Ermida

PIN – Potencial Interesse Nacional

PNBEPH – Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico

EDP – Eletricidade de Portugal

FCC – Fomento de Construcciones y Contratas S.A.

RCC – Ramalho Rosa Cobetar S.A.

PGABV - Plano Geral de Aproveitamento da Bacia do Vouga

NATM – New Austrian Tunneling Method

LCPC – Laboratório Central de Pontes e Estradas

PVC – Polyvinyl Chloride – Policloreto de vinil

CEN – Comité Européen de Normalisation

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil



# 1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em protocolo com a empresa RODIO Portugal SA para a realização de ensaios de pregagens instrumentadas com extensómetros de corda vibrante.

O objetivo primordial destes ensaios foi de analisar a resistência ao arranque destas pregagens em solo residual de granito, realizando-se posteriormente a uma análise dos resultados comparando-os com os ensaios realizados no mesmo empreendimento por Gomes, 2011 [1].

A existência de obras como o Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida (AHRE), sendo uma obra em que é aplicado um grande reforço de taludes, tornam possível a realização de ensaios de forma a avaliar de forma cuidada e tendo em conta alguns fatores que até então não seriam muito explorados como a extensão do elemento de reforço – varão de aço – refletindo a capacidade resistente das pregagens.

A normalização de trabalhos geotécnicos como as pregagens, é em termos gerais muito reduzida, havendo informação mais extensa em muros pregados.

A normalização destes trabalhos são realizados com base em duas normas, FHWA [2] sendo a norma norte americana e a norma europeia EN14490 [3].

## 1.1. OBJETIVOS

A realização desta dissertação no âmbito do protocolo com a RODIO Portugal, SA teve como objetivo os seguintes pontos:

- Pesquisa bibliográfica sobre ensaios de arranque em pregagens;
- Definição de um esquema de instrumentação para pregagens;
- Preparação de pregagens instrumentadas para serem instrumentadas;
- Realização de ensaios de arranque em pregagens;
- Análise dos resultados de instrumentação e comparação com referências bibliográficas
- Elaboração de um modelo numérico para simulação do arranque de pregagens

## 1.2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA

Esta dissertação é composta por seis capítulos que têm como objetivo expor o tema abordado, tendo sido feito uma pesquisa, bibliográfica e de campo, acerca de pregagens.

No capítulo dois inicia-se com um enquadramento da obra na qual foram realizados os ensaios, onde se caracteriza geologicamente e geotecnicamente o solo existente, finalizando-se com a caracterização da barragem de Ribeiradio, sendo a principal estrutura em construção na zona dos ensaios realizados.

No capítulo três procede-se a um breve enquadramento histórico das pregagens ao longo do tempo, fazendo referência ao seu dimensionamento e métodos de previsão da tensão de corte. Posteriormente, realiza-se um faseamento do processo construtivo na realização de pregagens com base num acompanhamento de campo, sendo catalogado com imagens e documentação. Este capítulo termina com uma breve descrição das normas em vigor para a realização deste tipo de trabalhos, focando-se somente nos principais pontos de interesse.

O objetivo principal desta dissertação inicia-se no capítulo quatro onde se começa por fazer uma localização dos ensaios a realizar no AHRE. Realizando-se de seguida o procedimento de instrumentação das pregagens sendo concluído com a sua furação, selagem e posterior ensaio de arranque à rotura.

No capítulo cinco, inicia-se a análise dos resultados através de um tratamento dos dados adquiridos a partir dos extensómetros. A análise da tensão de corte foi um dos aspetos a ter em conta neste capítulo onde se realizou uma abordagem teórica e experimental comparando-a com os dados obtidos por Gomes, 2011 [1]. Por fim a fluência nas pregagens foi alvo de um especial olhar aos aspetos que podiam levar a uma cedência dos varões de aço, podendo-se destacar uma possível rotura.

Por fim no capítulo seis procedeu-se a uma modelação numérica - Deformação Plana – de modo a simular e compreender o comportamento do maciço em estudo.

### 1.3. ESTRUTURA DA TESE

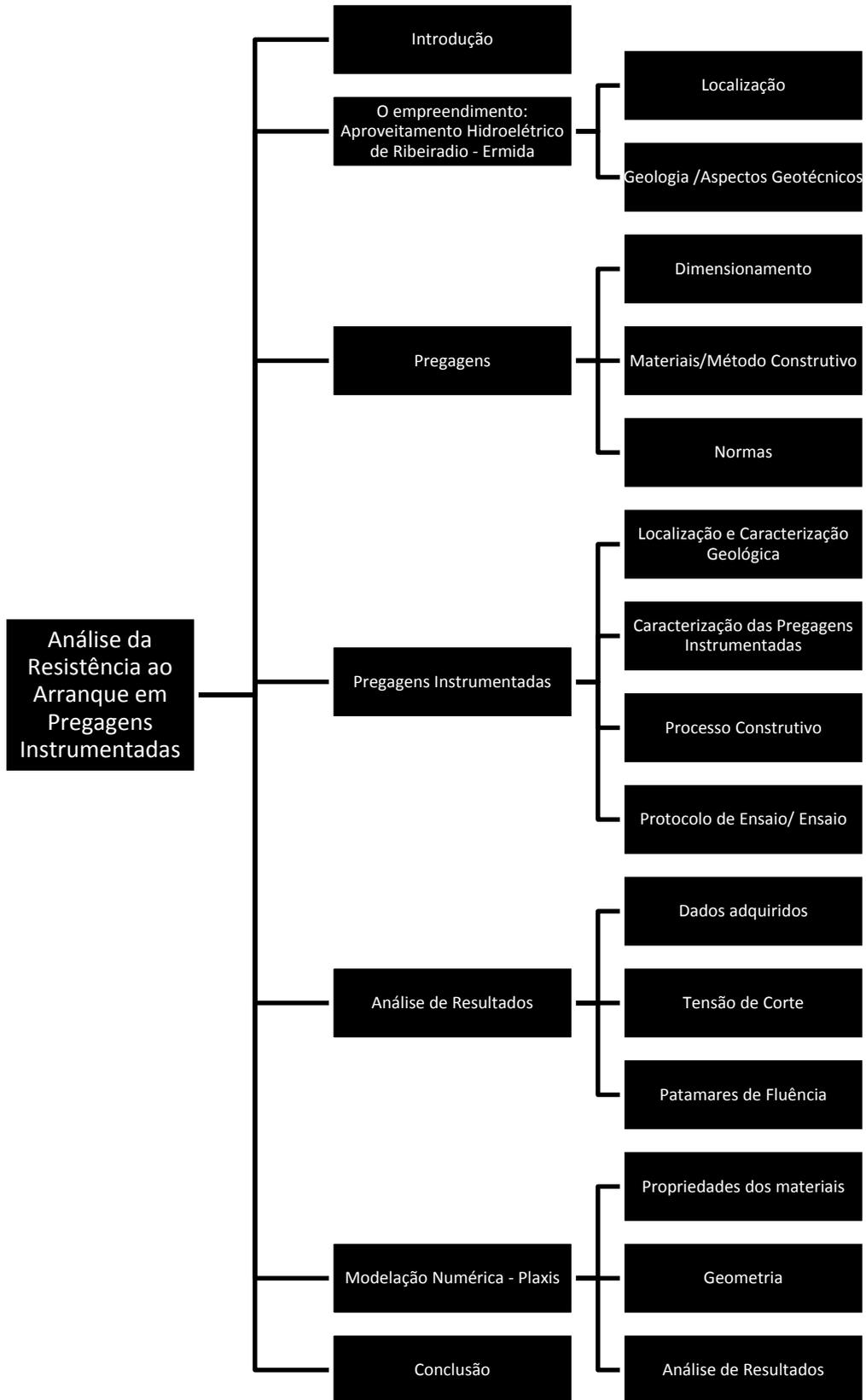


Figura 1.1 - Fluxograma Representativo da Tese



## 2.

# O EMPREENDIMENTO: APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE RIBEIRADIO-ERMIDA

### 2.1. APRESENTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida (AHRE) é um empreendimento com Potencial Interesse Nacional (PIN) embora não esteja integrado no Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), plano este que teve como objetivo aumentar a capacidade de produção hídrica de modo a que Portugal atingisse os objetivos fundamentais para o Sistema Energético Nacional. A construção deste empreendimento tem em termos de sustentabilidade e segurança energética um importante fator a favor, de forma a cumprir com os objetivos impostos pela União Europeia. O concurso foi proposto inicialmente pelo Estado Português mas devido a avanços e recuos, e devido à grave crise financeira acabou por ter um financiamento privado, financiamento este dado pela GREENVOUGA, a sociedade gestora do AHRE que consiste numa parceria entre a EDP e a Martifer Renewables, embora esta última esteja com uma participação residual. O Empreiteiro Geral ficou a cargo de um consórcio entre FCC (45%), RRC (10%) e a Opway (45%) sendo os trabalhos geotécnicos adjudicados - pregagens, contenção de taludes, etc. - à empresa RODIO Portugal.

Este empreendimento situa-se na região centro de Portugal na confluência entre os concelhos de Sever do Vouga e Oliveira de Frades nas localidades de Ermida e Ribeiradio respetivamente -Figura 2.1.

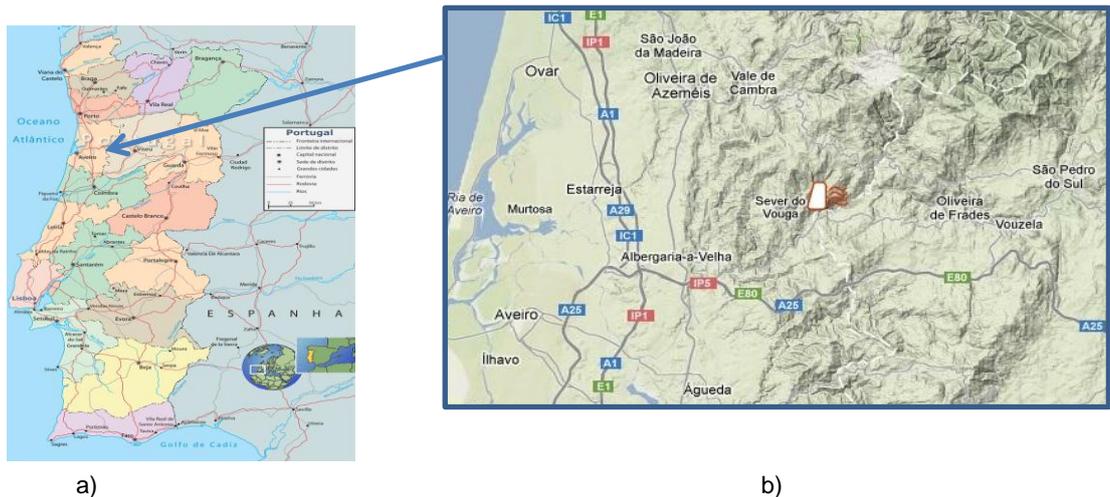


Figura 2.1 -Localização do Empreendimento: a) Mapa de Portugal [4], b) Zona Centro [5]

O AHRE é composto por duas infraestruturas – Escalão de Ribeiradio e Escalão de Ermida – em que a sua realização prende-se essencialmente pela produção de energia hidroelétrica e garantindo os volumes necessário de água para a região em termos de uso doméstico, industrial e regadio.

Este Aproveitamento é circundado por várias localidades de reduzida densidade populacional, não originando grandes condicionamentos de tráfego nas vias municipais. O acesso ao escalão de jusante – Ermida – é feito pela estrada municipal 569 que será submersa devido ao enchimento da bacia hidrográfica da barragem de Ermida, levando à sua reconstrução a uma cota mais elevada com a finalidade de se repor as ligações entre as localidades [6].

A Figura 2.2 e Figura 2.3 são uma modelação digital da barragem de Ermida e Ribeiradio respetivamente. No que se refere ao Escalão de Ermida, este tem como finalidade a modulação dos elevados caudais turbinados do escalão de montante – Ribeiradio evitando assim alterações muito significativas dos níveis de água podendo afetar o abastecimento feito a partir de albufeiras a jusante [7]. No caso da barragem de Ribeiradio, sendo esta a estrutura principal do AHRE, a sua construção leva a um aumento da potência fornecida para a rede elétrica nacional, sendo instalada uma central única e exclusivamente neste escalão.

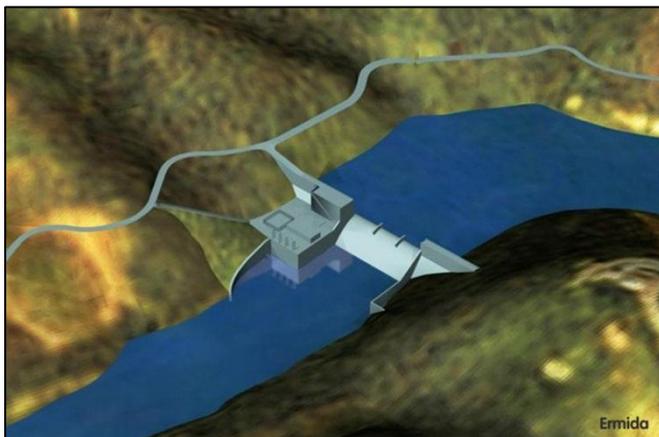


Figura 2.2 – Modelação Tridimensional da Barragem de Ermida [7]



Figura 2.3 - Modelação Tridimensional da Barragem de Ribeiradio [7]

O AHRE irá produzir um armazenamento de  $87 \text{ hm}^3$  de água com uma previsão de ter uma produção média anual de 134 GWh com uma potência de 82MW. A produção desta energia a partir de uma fonte limpa como a água implica uma redução de 67000 toneladas de  $\text{CO}_2$  expelidas para a atmosfera através das centrais elétricas a petróleo e seus derivados [7].



Figura 2.4 – Taludes Pregados no Escalão de Jusante – Ermida

## 2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A caracterização geológica-geotécnica desta região foi iniciada em meados dos anos 70, com os estudos do Plano Geral de Aproveitamento da Bacia do Vouga (PGABV), que desde então era visto como um investimento essencial para o desenvolvimento de importantes sectores económicos como o energético e o agrícola para esta região [8].

Posteriormente, foi realizado em 1995 uma complementarização/retificação de estudos geológicos-geotécnicos devido à realização dos Estudos Prévios para o concurso que havia ser anulado em 2001 devido a verificar-se que as características geológicas do local eram débeis, retomando o seu concurso e inicialização dos trabalhos em 2008, onde foi proposto outro local para a implantação da barragem de Ribeiradio, sendo este a aproximadamente 500 metros a jusante do inicialmente previsto.

Devido à complementarização destes estudos geotécnicos com a elaboração de prospeções concluiu-se que a caracterização geológica anteriormente realizada com o PGABV, deveria ser complementada com a realização de ensaios adicionais para uma melhor caracterização geológica e para a obtenção de forma cuidada dos valores resistentes do solo existente nas zonas de implantação das barragens que constituem o AHRE.

Esta região é caracterizada pela divisão entre duas unidades geotectónicas fundamentais designadas por Zona Centro-Ibérica e a Orla Ocidental -Figura 2.5. A zona Centro-Ibérica é uma “...zona heterogénea, onde existem áreas com metamorfismo de vários graus e de vários tipos, e outras áreas com abundantes formações granitóides.” [8]. Nas zonas de maior grau de metamorfose apresenta-se uma sequência flischóide com frequente recorrências de fácies, denotando-se claramente os xistos e os grauvaques, sendo estas formações normalmente designadas por *Complexo Xisto-Grauváquico*.

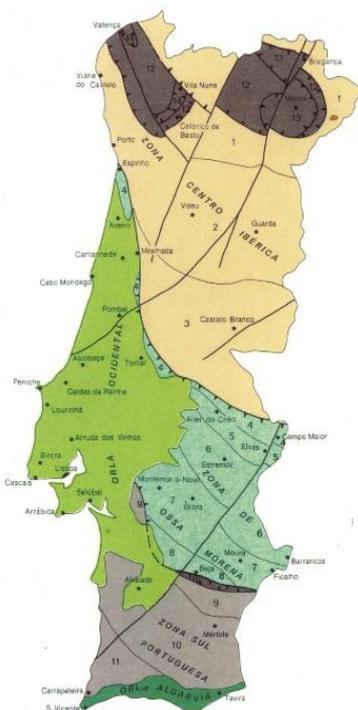


Figura 2.5 - Principais Unidades Geotectónicas [9]

A prospeção geológica/geotécnica no AHRE, teve como base um plano de prospeção mecânica, prospeção geofísica, ensaios “in situ” e de laboratório, que se iniciaram em 2002. Após estes, foram realizados ensaios, como demonstra a Figura 2.6 em maior numero e com uma maior variedade nas zonas onde era necessária uma análise geotécnica mais detalhada, como o eixo das barragens em construção. De modo a ter se uma maior percepção da quantidade de prospeções e sondagem realizadas a Tabela 2.1 resume esses elementos.



Figura 2.6 - Prospeção Geotécnica no AHRE [1]

Tabela 2.1 - Quadro Resumo da Prospeção Geológica/Geotécnica no AHRE [7] citado por Gomes [1]

Tipo de Trabalho	Eixo		Circuito Hidráulico	Açude de jusante e bacia de amortecimento	TOTAL
	MD	ME			
<b>Prospeção Mecânica</b>					
Trincheiras	4	4	-	-	8
Galerias	1+2	2+1	2	-	8
Sondagens	7	6	6	3	22
<b>Prospeção Sísmica</b>					
Perfis de Retração	7	6	2+5	-	20
Perfis de Refração em galerias	3	3	2	-	8
Leques Sísmicos	6	4	-	-	10
<b>Ensaio <i>in situ</i></b>					
Lugeon	56	46	37	16	155
Dilatômetros	11	11	9	-	31
Macacos Planos (LFJ)	1	2	-	-	3
<b>Ensaio de Laboratório</b>					
Compressão Uniaxial	13	9	7	-	29
Propagação de Ultrassons	13	9	7	-	29
Deslizamento de diaclases	7	7	-	-	14

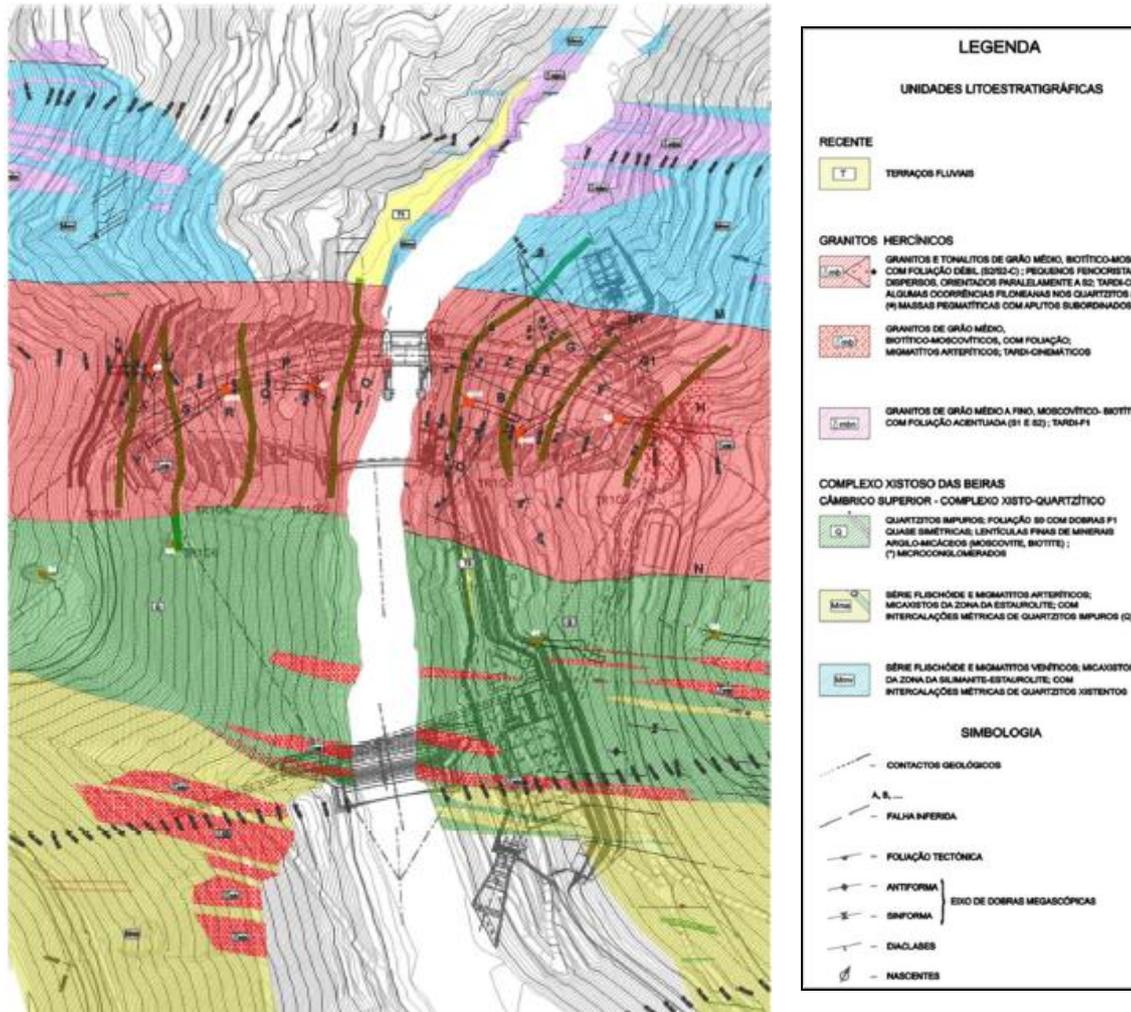


Figura 2.7 - Caracterização Geológica do AHRE [7] citado por Sandro Gomes

Após a prospeção geotécnica realizou-se um mapeamento da zona tendo em conta os resultados obtidos nesses trabalhos de prospeção, definindo 4 tipos de zonas geológicas como se apresenta na Figura 2.7.

A secção a azul a montante (em cima na Figura 2.7), é caracterizada por micaxistos, sendo que alguns chegam a quartzitos xistosos. Esta caracterização aflora nas partes ocidentais de Ribeiradio e de Vilarinho e podem ser bancadas de quartzitos xistóides. [1]

A secção a vermelho, é constituída por granitos hercínicos precoces, alternando a sua espessura de menos de 1 metro até aos 30 metros, sendo que nos de menor espessura são mais evidentes os sinais de estiramento e é marcada a foliação tectónica. [1]

A secção imediatamente abaixo da anterior, de cor esverdeada, é composta pela formação metamórfica quartzítica impura na sua maioria brancos com um grau de cristalização mais apurado com contactos absolutamente claros com as bancadas de micaxistos inferiores. [1]

Por fim a última secção exposta na Figura 2.7, com uma tonalidade amarelada, é constituída por uma formação com um alto grau de metamorfose de fácies flischóide de micaxistos e migmatitos arteríticos intruída por granitos de grão médio foliados. [1]

### 2.3. BARRAGEM DE RIBEIRADIO

A barragem de Ribeiradio é o escalão principal do AHRE, situando-se no Vale de Lafões, na freguesia de Ribeiradio.

Este escalão terá o coroamento situado à cota 112m, com um desenvolvimento de 262 m e uma espessura de 9 m. [1] A barragem encontra-se dividida em 15 blocos mediante - Figura 2.8 e Figura 2.9 - 14 juntas de contração afastadas entre si de 17,0 m na zona central. Para garantir o monolitismo e a estanqueidade da barragem, as juntas serão injetadas com caldas de cimento ou argamassas, estando divididas em compartimentos estanques através de lâminas de PVC afastadas em altura de 20 m. [1]

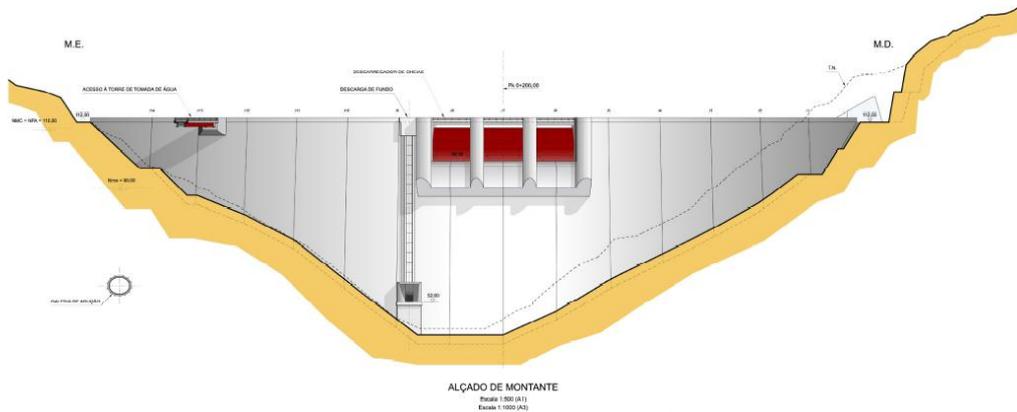


Figura 2.8 - Alçado de Montante - Barragem Ribeiradio [7]

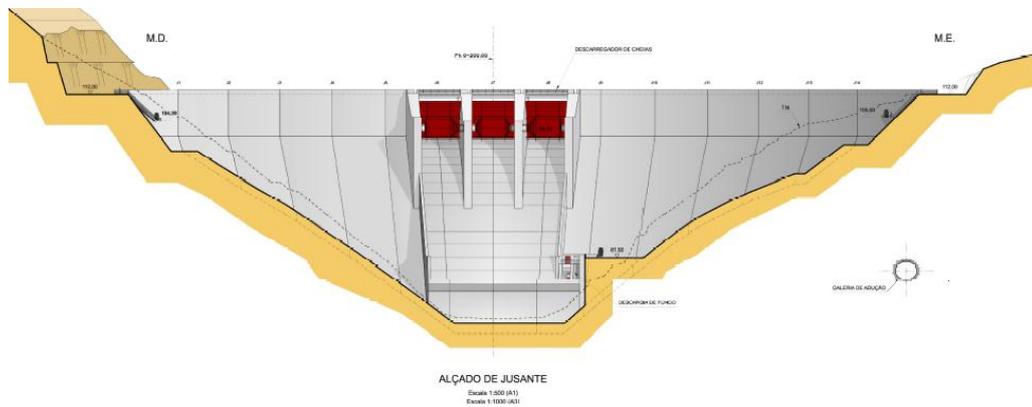


Figura 2.9 - Alçado de Jusante - Barragem de Ribeiradio [7]

A estrutura apresenta características que influenciam em grande escala a sua zona de implantação, estando apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características do Escalão Principal – Ribeiradio [10] citado por Sandro Gomes, 2011

Bacia Hidrográfica	
Área Total da Bacia	945 km <sup>2</sup>
Precipitação média Anual na Bacia (1954/55 a 2003/04)	1330 mm
Afluência média anual (1954/55 a 2003/04)	841 hm <sup>3</sup>
Albufeira	
Nível de pleno armazenamento	110,0
Nível mínimo de exploração normal (NmEn)	100,0
Volume total no nível de pleno armazenamento e de máxima cheia	136,4 hm <sup>3</sup>
Volume útil normal de exploração	49,0 hm <sup>3</sup>
Área inundada ao nível de pleno armazenamento e máxima cheia	561 ha
Barragem	
Material	Betão Convencional
Tipo Estrutural	Gravidade
Cota de Coroamento	112,0 m
Altura Máxima acima da Fundação	74 m
Desenvolvimento do Coroamento	262 m
Largura no Coroamento	9 m
Largura na base do Rio	55,5 m
Volume de Betão	260 000 m <sup>3</sup>

## 3. PREGAGENS

### 3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO

A utilização de pregagens como sistema de reforço do solo, surgiu como uma extensão das pregagens em rochas usadas no sistema NATM, sendo utilizado o betão projetado com pregagens em rochas como meio de reforço para obras subterrâneas [11]. A primeira utilização das pregagens na Europa foi na década de 70, coincidindo numa época de grande crise mundial – Crise Petrolífera (1973-1979). Estas utilizações registaram-se em França em 1972 na realização de um projeto ferroviário perto de Versalhes e na Alemanha em 1976 foi realizado a primeira grande pesquisa pela Universidade de Karlsruhe. Posteriormente em 1986 devido à grande utilização desta técnica em França, foi elaborado um programa designado por Programa Clouterre que se baseou na realização de 3 projetos em grande escala com a finalidade de elaborar uma metodologia de modo a tornar este sistema num projeto normativo [11]. Hoje em dia são realizadas centenas de milhões de pregagens em todo o mundo, devido a ter uma grande versatilidade em qualquer tipo de geometria de escavação, ser de simples aplicação, a operação ser totalmente mecanizada e ser uma aplicação de custo relativamente reduzido. [12]

As pregagens são um método de contenção que ao longo dos tempos foram evoluindo levando a diferentes métodos de realização, destacando-se:

- Pregagens amarradas mecanicamente
- Pregagens injetadas
- Pregagens de cabo injetadas
- Pregagens amarradas por atrito

No AHRE foram realizadas pregagens injetadas com calda de cimento, onde o elemento de reforço são varões de aço podendo ser varões normais ou varões GEWI, o que no caso destes últimos, permite a mobilização de maiores esforços [11]. A utilização do cimento como material de injeção traz vantagens em termos de proteção contra a corrosão dos varões, protegendo em toda a volta do varão de aço, o que num empreendimento como o AHRE é muito importante devido à existência de água em muitas zonas de pregagens, levando até que se proceda à galvanização dos varões de aço como medida adicional contra a corrosão.

Atualmente as pregagens podem ser ativas ou passivas podendo estas ser pré-esforçadas ou não, mas tendo sempre como objetivo serem utilizadas com os seguintes propósitos:

- Impedimento do levantamento hidráulico - Figura 3.1
- Estabilização de taludes com pregagens e drenagem - Figura 3.2
- Suporte de obras de contenção - Figura 3.3
- Outras aplicações (ensaios de cargas em estacas, pontes suspensas, etc.)

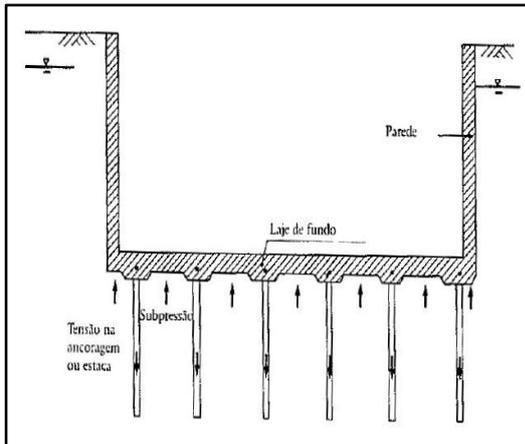


Figura 3.1 – Impedimento do levantamento hidráulico [11]

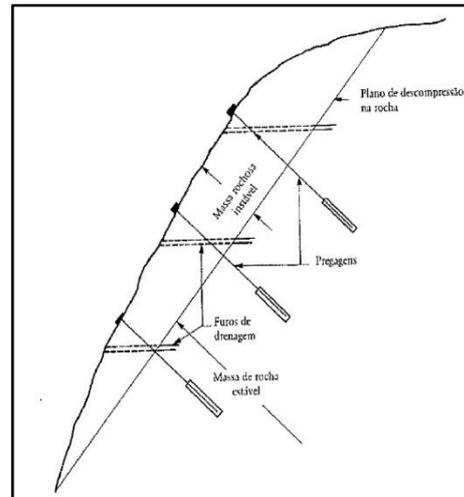


Figura 3.2 - Estabilização de taludes - Ancoragens [11]

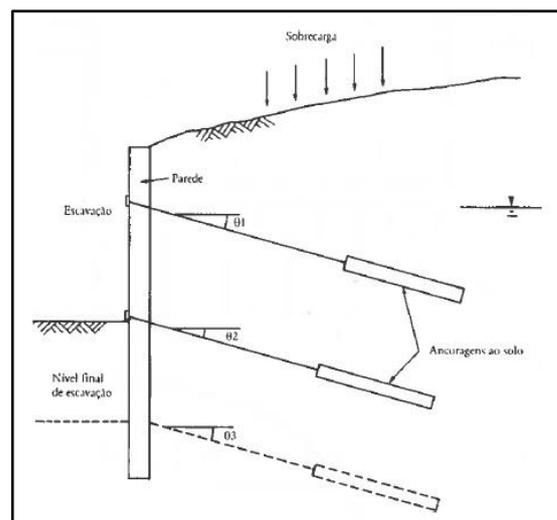


Figura 3.3 - Contenção de Paredes de Suporte - Ancoragens [11]

### 3.2. PREGAGENS NO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE RIBEIRADIO - ERMIDA

#### 3.2.1. METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTOS DE PREGAGENS

O dimensionamento teórico das pregagens iniciou-se a partir de diversos métodos que foram desenvolvidos à entrada da década de 80 [11].

As pregagens podem sofrer vários tipos de rotura :

- Rotura dos varões de aço,
- Perda de atrito entre o bolbo de selagem e o maciço,
- Instabilidade na Fase de Escavação,
- Deslizamento Global do Solo Reforçado.

Devido à grande utilização de pregagens como medida de reforço ou contenção a nível global, houve a necessidade de normalizar o seu dimensionamento tendo sido proposto por diversos autores algumas teorias que no seu entender caracterizavam o melhor comportamento das pregagens.

O manual “Recommandations Clouterre, 1991”, foi um documento elaborado com a informação do “Projet National Clouterre”, que compila toda a informação até 1990 referente a pregagens ou ancoragens. Neste documento são referidos alguns métodos para o dimensionamento de pregagens que seriam os mais importantes até então.

- *Método de Shen*: Foi desenvolvido na Universidade da Califórnia (EUA) em 1978 e assumia que as potenciais superfícies de rotura são parábolas de eixo vertical, e que o solo seria homogêneo e sem presença de água com uma geometria simples - Figura 3.4.

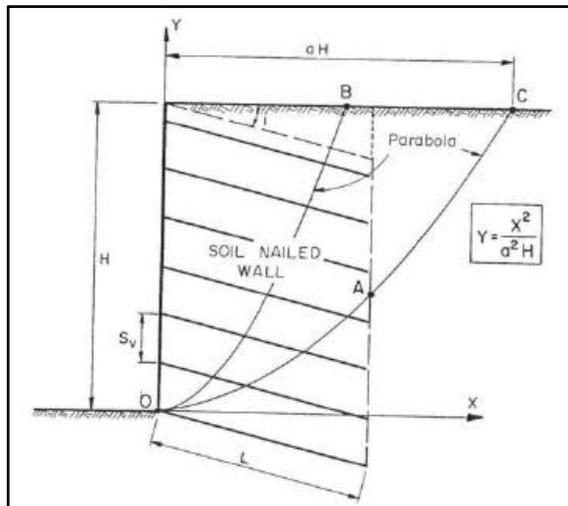


Figura 3.4 - Método de Shen [12]

- *Método de Stocker (1979)*: É mais conhecido como o “Método Alemão”, foi preconizado como o nome indica por Stocker, e propôs o Método de Equilíbrio Limite usando superfícies de rotura bilineares. O fator de segurança global da estrutura é determinado a partir do rácio entre as forças resistentes (tensão nas pregagens e a resistência ao corte do solo na superfície de rotura) e as forças desestabilizadoras (Peso do solo e as Cargas) - Figura 3.5.



necessitam da realização de ensaios prévios de modo a validar os pressupostos para o dimensionamento das pregagens.

$$T_L = \pi D L_a q_s \quad 3.1)$$

Sendo:

D é o diâmetro de furação

$L_a$  é o comprimento de selagem

$q_s$  é o atrito unitário entre o maciço e o bolbo de selagem

$T_L$  é a capacidade resistente da pregagem

Tabela 3.1 - Processo Construtivo [12]

Solo	Figura	Processo Construtivo		
		Injeção por Gravidade	Injeção a Baixa pressão	Cravados
Areia	Figura 3.7	S1		S3
Argila/Silte	Figura 3.8	G1	G2	G3
Cascalho	Figura 3.9	A1		
Margas	Figura 3.10	M1		
Rocha Alterada	Figura 3.11	R1		

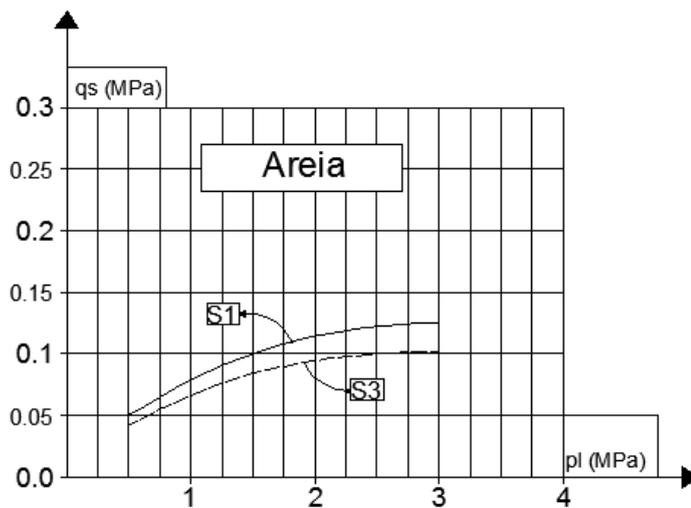


Figura 3.7 – Ábaco para determinação do atrito unitário, Areia [12]

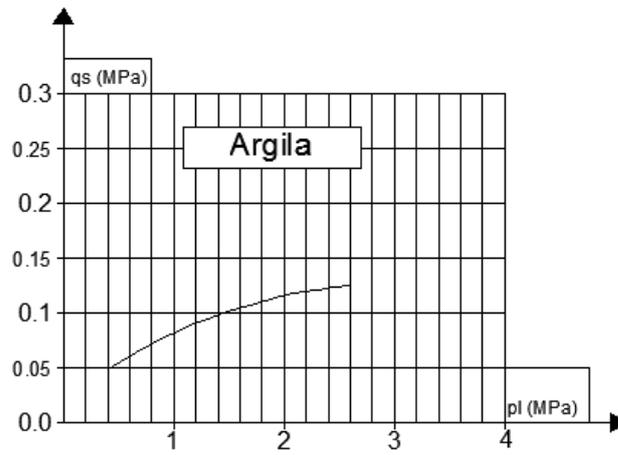


Figura 3.8 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Argila [12]

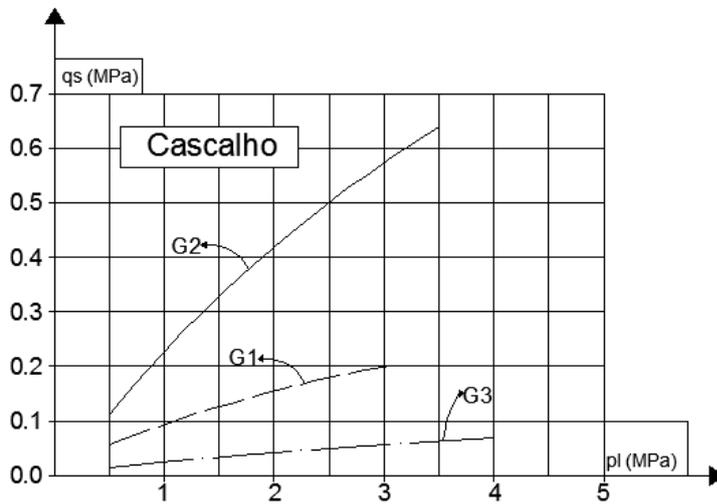


Figura 3.9 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Cascalho [12]

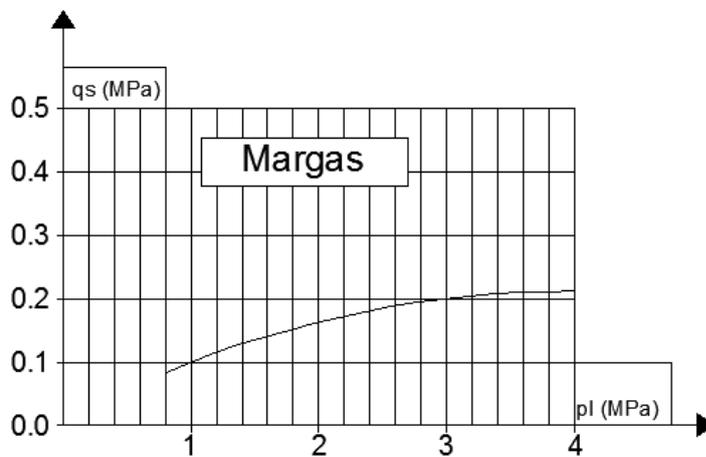


Figura 3.10 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Margas [12]

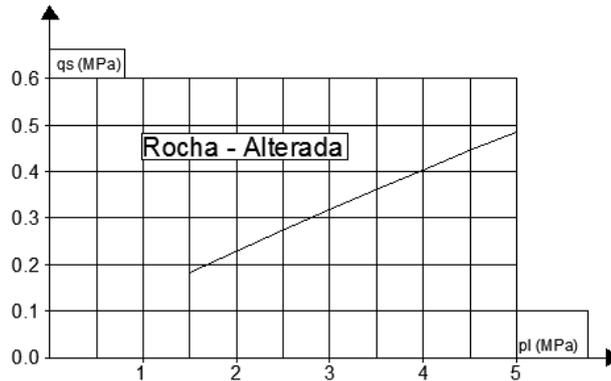


Figura 3.11 - Ábaco para determinação do atrito unitário, Rochas Alteradas [12]

A realização destes ensaios prévios (“in situ” ou em laboratório) referidos por Coelho (1996) [11] é efetuada com os seguintes objetivos:

- Identificação do solo
- Determinação dos parâmetros resistentes do solo ( $c'$  e  $\phi$ )
- Avaliar o atrito unitário, com base em ensaios pressiométricos (mínimo de 6 ensaios para validar pressupostos, de acordo com as Recommendations Clousterre, 1991)

➤ *Tecnologia das Fundações, Silvério Coelho, 1996*

O método enunciado neste elemento bibliográfico de Silvério Coelho é o método de Bustamante, que resultou na realização de ensaios de verdadeira grandeza no LCPC de Paris. Para a determinação da capacidade resistente das pregagens segundo Bustamante deve-se ter em conta o tipo de injeção a utilizar:

- Injeção Repetitiva e Seletiva (IRS): consiste na injeção do furo em pontos particulares do bolbo de selagem com o auxílio de um “...duplo obturador em tubo com válvulas-Manchete, o que permite forçar a injeção na zona da manchete escolhida (seletividade), e repetir a operação, em princípio, diversas vezes (repetitividade).” [11].
- Injeção Global Unitária (IGU): realiza-se com um simples obturador a injeção é feita por gravidade, sendo a utilizada exclusivamente no AHRE, preenchendo o volume do furo sendo dada como terminada a injeção quando a calda de cimento surge na boca do furo. [11]

Contudo é necessário recordar que a aplicação destas injeções depende de 2 fatores importantes, o tipo de terreno e a pressão admissível. Sendo que para pressões superiores à pressão limite do terreno deve-se utilizar o IRS, caso as pressões aplicadas sejam inferiores utiliza-se o IGU. A capacidade de carga da pregagens é dada pela fórmula:

$$T_L = \tau \cdot \pi \cdot D_s L_s \quad 3.2)$$

Onde:

$\tau$  – Tensão de Corte (tendo em conta o solo - Figura 3.12 a Figura 3.15)

$D_s$  - Diâmetro médio, sendo  $D_s = \alpha \cdot D_d$

$\alpha$  – Coeficiente de majoração tendo em conta o tipo de solo - Tabela 3.2

$D_d$  - Diâmetro de Perfuração

$L_s$  - Comprimento de Selagem

Tabela 3.2 - Coeficiente  $\alpha$  [11]

Solo	Coeficiente		Quantidades de Mínimas de Calda Aconselhadas - Vs
	IRS	IGU	
Seixo	1,8	1,3 a 1,4	1,5Vs
Seixo Arenoso	1,6 a 1,8	1,2 a 1,4	1,5Vs
Areia c/ Seixo	1,5 a 1,6	1,2 a 1,3	1,5Vs
Areia Grossa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5Vs
Areia Média	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5Vs
Areia Fina	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5Vs
Areia Siltosa	1,4 a 1,5	1,1 a 1,2	1,5 a 2 Vs para IRS e 1,5Vs para IGU
Silte	1,4 a 1,6	1,1 a 1,2	2 Vs para IRS e 1,5Vs para IGU
Argila	1,8 a 2,0	1,2	2,5 a 3 Vs para IRS e 1,5 a 2 Vs para IGU
Marga ou Calcário Margoso	1,8	1,1 a 1,2	1,5 a 2 Vs para camada compacta
Rocha alterada ou fragmentada	1,2	1,1	1,1 a 1,5 Vs para camada finamente fissurada e 2 Vs ou mais para camada fraturada

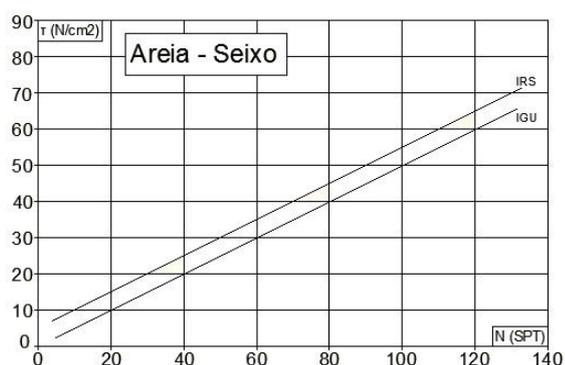


Figura 3.12 - Abaco para Determinação do  $\tau$  através do SPT, Areia [11]

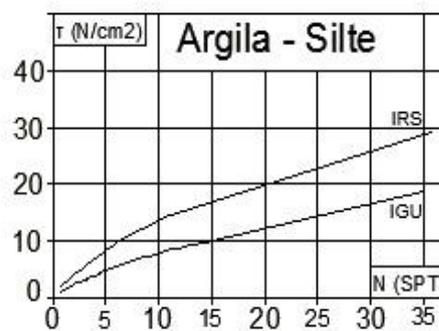


Figura 3.13 - Ábaco para Determinação do  $\tau$  através do SPT, Argila [11]

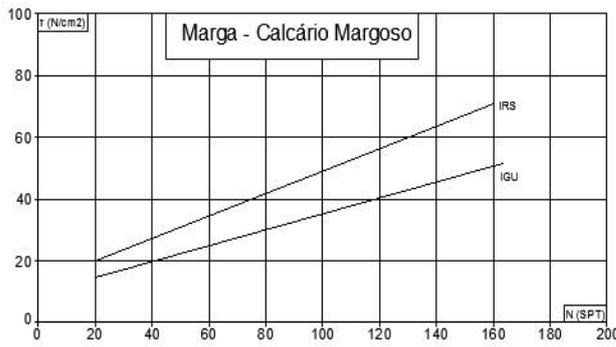


Figura 3.14 - Ábacos para Determinação do  $\tau$  através do SPT, Margas [11]

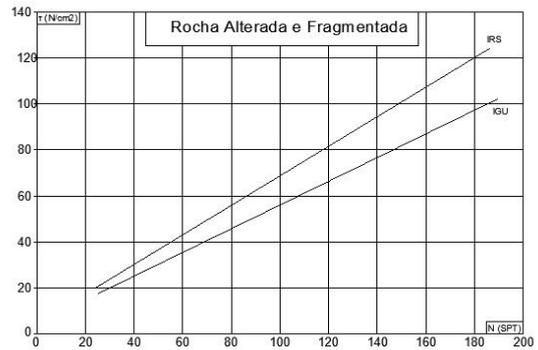


Figura 3.15 - Ábacos para Determinação do  $\tau$  através do SPT, Rocha Alterada [11]

### 3.2.3. MATERIAIS

Os materiais a utilizar nas pregagens têm uma influência preponderante na capacidade resistente da pregagem. Ao longo dos tempos foram usados diversos tipos de materiais à medida que as solicitações vão pedindo exigências maiores tanto em termos de proteção dos materiais devido a problemas como a corrosão das armaduras como em termos de resistência usando-se cargas cada vez mais elevadas.

No âmbito desta dissertação, que estudou o AHRE, tem-se em consideração os materiais utilizados no referido empreendimento com uma breve descrição de algumas alternativas que podem ser tomadas.

#### 3.2.3.1. Aço

- Varões de Aço Corrente

A utilização de varões não se ficou apenas pelos GEWI, aplicando-se também varões normais de aço que serão posteriormente roscados em estaleiro. Os diâmetros a utilizar serão de 25 mm e 32 mm sempre com a valia de serem galvanizados - Figura 3.16.

Tabela 3.3 - Características de Varões de Aço Correntes

Características		
Tipo de Aço	E – Módulo de Elasticidade	Tensão de Cedência
S500	200 GPa	500 MPa

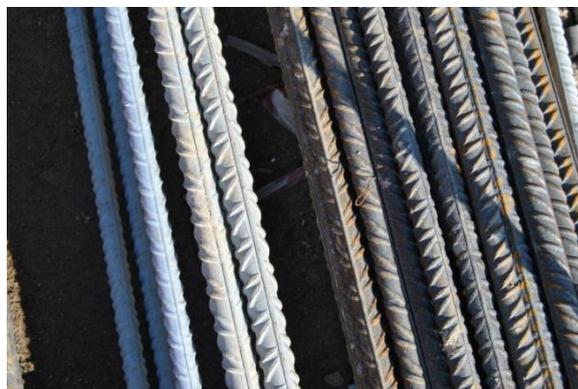


Figura 3.16 - Varões Galvanizados vs Varões não Galvanizados

- Varões GEWI

Este sistema é composto por barras e componentes de alta capacidade, com uma rosca robusta por toda a sua extensão, tornando o roscamento mais facilitado em situações de maior delicadeza devido a um ambiente mais agressivo - Figura 3.19. Os varões GEWI têm a particularidade de se poder cortar em qualquer ponto do varão, devido a serem facilmente acopladas para vários comprimentos de varão utilizando acopladores ou também designados por luvas de emenda. [13]

Nas Figura 3.17 é demonstrativa de como funciona o sistema GEWI, onde os varões são roscados e utiliza-se luvas de emenda de modo a prolongar o varão sem que haja perda de resistência. A aplicação deste sistema no AHRE pode ser vista na Figura 3.18 e Figura 3.19.



Figura 3.17 - Sistema GEWI [13]



Figura 3.18 - Varões GEWI e Acopladores



Figura 3.19 - Colocação dos Acopladores

A utilização do Sistema GEWI no AHRE, não se ficou só pelas vantagens em termos de facilidade de manobra em zonas de difícil acesso ou na facilidade de incremento do comprimento dos varões, mas sim pelo aumento de capacidade resistente - Tabela 3.4. Estes varões possuem em relação aos varões normais a hipótese de serem entregues ao cliente com pintura anticorrosiva ou galvanizados, o que sucedeu no empreendimento do AHRE. Este tratamento é utilizado devido a algumas pregagens após o término da empreitada, serem submetidas a ambientes submersos devido ao enchimento da bacia das barragens de Ermida e Ribeiradio. De referir ainda que no AHRE foram utilizados varões GEWI com diâmetro 32 mm e 40 mm. [13]

Tabela 3.4 - Características Mecânicas - Varões GEWI [13]

Diâmetro [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Classe do Aço	Carga de Cedência [kN]	Carga de Rotura [kN]
Φ32	804	BST 500S	402	442
Φ40	1257	BST 500S	628	691
Φ50	1963	BST 500S	982	1080
Φ63.5	3167	S555/700	1758	2217

### 3.2.3.2. Centralizadores e Espaçadores

- Tubo de Selagem

O tubo de selagem - Figura 3.20 - é um tubo em PVC que tem uma resistência na ordem dos 0,6 a 0,8 MPa de Pressão [1], com cerca de 1,6 mm de diâmetro, tendo sido utilizado no AHRE como um requisito do Dono de Obra, que tem como objetivos primordiais:

- 1) Injetar a calda de cimento a partir do fundo do furo
- 2) Função de centralizador da armadura dentro do furo - Figura 3.21



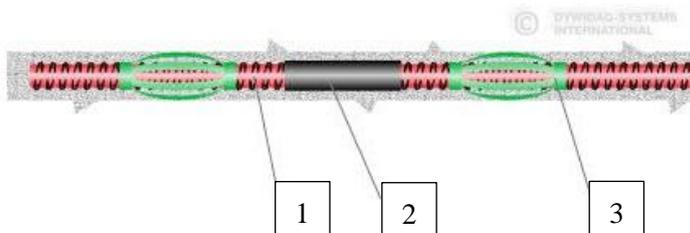
Figura 3.20 - Tubo Selagem



Figura 3.21 - Tubo de Selagem instalado

- Espaçadores

Estes elementos são geralmente utilizados em varões GEWI sendo o seu material em PVC. A sua colocação nos varões é definida segundo um espaçamento de 1 a 2,5 metros sendo que o primeiro deve ser colocado a 0,5 metros do fundo do furo, com a finalidade de garantir um recobrimento mínimo para a armadura [1] - Figura 3.22.



- 1 – Varão GEWI
- 2 – Acoplador
- 3 – Espaçador

Figura 3.22 - Varão GEWI com espaçador [13]

### 3.2.3.3. Cimento

Na realização da calda para efetuar as injeções das pregagens no AHRE, é utilizado Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32.5N, produzidos na fábrica da SECIL na Maceira-Liz, em que a sua composição química é definida com 65% a 79% de Clínquer Portland, 21 a 35% de calcário e de 0% a 5% de outros constituintes. O transporte é feito em paletes de 45 sacos de 40kg . [14]

Este cimento é caracterizado pela sua excelente trabalhabilidade e um baixo calor de hidratação tendo um desenvolvimento mais lento nas resistências, embora os valores das resistências finais tenham valores da classe indicada como se pode ver pela Figura 3.23 e Tabela 3.5.

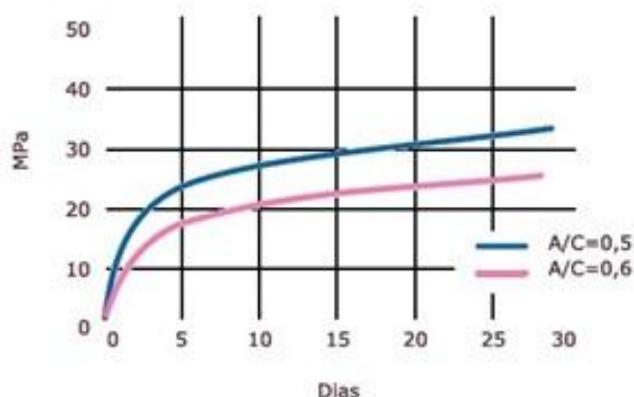


Figura 3.23 – Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II/B-L 32.5N [14]

Tabela 3.5 - Valores de Referência da Resistência à Compressão Uniaxial [14]

Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)			NP EN 196-1
Resistência aos Primeiros Dias		Resistência de Referência	
2 dias	7 dias	28 dias	
-	> 16	> 32,5 e ≤ 52,5	

### 3.2.3.4. Superplastificante

O Rheobuild 561 é um adjuvante líquido superplastificante e forte redutor de água de base química polimérica com uma tonalidade castanha - Figura 3.24 - indicado para realizar betões rheoplásticos com baixa perda de trabalhabilidade. Estes betões rheoplásticos caracterizam-se por elevada fluidez sem que haja segregação, com abaixamento mínimo de 200 mm (slump). [15]



Figura 3.24 - Aplicação do Rheobuild 561

A utilização deste adjuvante geralmente é associada a uma dosagem de 0,9 a 1,4 kg por 100 kg de cimento podendo esta dosagem ser superior ou inferior em função da relação A/C ou da granulometria usada na amassadura, sendo recomendável a realização de ensaios prévios. [15]

- Vantagens

Estado Fresco:

1. Trabalhabilidade. Alcançam-se abaixamentos, vulgarmente designado por “Slump”, de 200 mm a partir de betões de consistência seca.
2. Melhoria da tixotropia e coesão da massa;
3. Diminui a segregação e a exsudação;
4. Diminui o calor de hidratação;
5. Retarda o início de presa;
6. Estende o período de trabalhabilidade.

Estado Endurecido

1. Aumenta a resistências mecânica final do betão;
2. Melhora o rendimento cimentício.
3. Diminui a permeabilidade.
4. Melhora a durabilidade.

### 3.2.3.5. Malhasol

A rede electrossoldada é usada como elemento de resistência à tração nos taludes existentes no AHRE, em que são fixadas com o auxílio de grampos. A rede utilizada é a AQ50 do tipo de aço A500 ER com as características dimensionais e mecânicas expostas na Tabela 3.6 e Tabela 3.7 respetivamente.

Tabela 3.6 - Características Físicas da Rede Electrossoldada AQ50 [16]

Espaçamento longitudinal	Espaçamento Transversal	Diâmetro Longitudinal	Diâmetro Transversal
100 mm	100 mm	5 mm	5 mm
Dimensão do Painel		6 x 2,4 m <sup>2</sup>	

Tabela 3.7- Características Mecânicas da Rede Electrossoldada [16]

Tensão de Rotura (Rm)	Limite Elástico 0.2% (Rp 0.2)	Relação Rm/Rp 0.2	Rcs (kN)
≥550 MPa	> 500 MPa	≥ 1,05	≥ 2,946

### 3.2.3.6. Tubos de drenagem

A utilização dos tubos de drenagem em obras como a do AHRE, é de extrema importância destinando-se a drenar a água existente no maciço de modo a evitar pressões neutras que minoram a capacidade resistente do solo, levando à diminuição das tensões efetivas.

A estrutura dos drenos é de parede simples corrugada interior e exteriormente - Figura 3.25 – devendo a superfície interna apresentar-se lisa e sem defeitos de modo a permitir um eficaz escoamento hidráulico. [17]

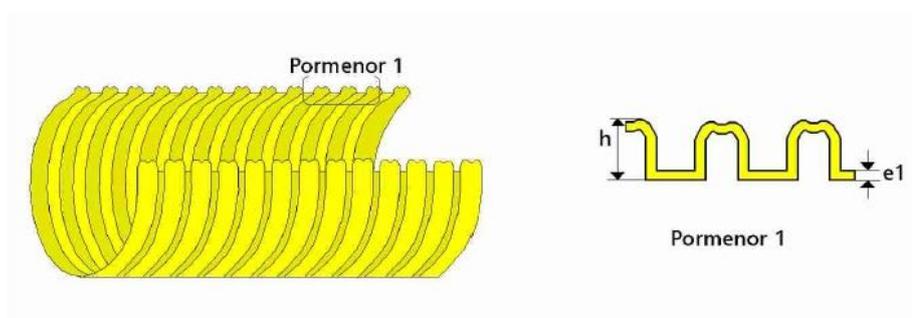


Figura 3.25 - Pormenor Tubo de Drenagem [17]

A utilização destes tubos em solos em que as partículas são de reduzidas dimensões obrigando à utilização de uma manta geotêxtil de modo a não haver arrastamento das partículas finas - Figura 3.26. Esta Manta Geotêxtil deve cumprir os requisitos de qualidade, em termo de resistência ao rasgamento, resistência à tração, etc. - Tabela 3.8 - de modo a garantir a qualidade necessária para uma boa drenagem



Figura 3.26 – Drenos com manta geotêxtil

Tabela 3.8 - Características da Manta Geotêxtil [17]

Manta Geotêxtil	
Peso (g/cm <sup>2</sup> )	135
Espessura (mm)	2,1
Resistência à Tração (kN/m)	> 7
Alongamento na Rotura (%)	> 70
Resistência ao Rasgamento (N)	> 200
Abertura de Filtração (µm)	150
Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)	51

#### 3.2.4. EQUIPAMENTOS

Numa obra como o AHRE foram utilizados variadíssimos equipamentos para a realização dos trabalhos geotécnicos, sendo dado mais importância nesta dissertação aos equipamentos utilizados no processo de pregagens nesta obra em concreto.

##### 3.2.4.1. Furação

A furação no AHRE para a realização das pregagens é feita em simultâneo para os furos de drenagem sendo estes realizados com um diâmetro superior. Essa furação foi realizada através de vários equipamentos com diferentes características devido às condicionantes que a obra impõe. Essas condicionantes podem ser de ordem física (local de aplicação, tipo de solo, etc.) ou de projeto (largura do furo, comprimento da pregagem, etc.). Os equipamentos utilizados são o ROC L6, ROC LMEAC-500C e o BBC120.

O ROC L6, mais designado em obra de “L6”, é um equipamento de alta capacidade de furação com o auxílio de ar comprimido chegando a atingir os 25 bars em rocha e funciona com martelo fundo de furo. O L6 tem a possibilidade de realizar furos de grandes dimensões devido ao acoplamento mecânico das barras de furação por parte do próprio equipamento, realizando furos de maiores dimensões a partir de 102 mm e/ou para profundidades superiores a 20m - Figura 3.27.



Figura 3.27 - ROC L6

O ROC LMEAC-500C, mais apelidado de LM500, é um equipamento de menores dimensões relativamente ao L6 e realiza a furação com martelo de superfície e é munido com um acoplador mecânico de varas tal como foi descrito para o L6. É de referir que a furação é feita através de um martelo de superfície, levando a um processo demasiado ruidoso [18] - Figura 3.28.



Figura 3.28 - ROC LMEAC-500C

Por fim nos equipamentos de furação, o BBC 120 - Figura 3.29 - é um equipamento mais portátil utilizado no AHRE na realização dos furos. É uma perfuradora robusta com um pistão de grandes dimensões sendo ideal para aplicações em rocha. Utiliza ar comprimido para a realização do furo e as varas são colocadas manualmente, sendo a gama de diâmetro do furo entre os 76 mm e os 102 mm, trabalhando a uma pressão de 6 bar possuindo um comprimento de cerca de 78cm [19]

No empreendimento de AHRE foi utilizado este equipamento devido a essa portabilidade anteriormente dita, sendo uma vantagem para zonas onde o L6 e o LM500 não alcançariam, por exemplo em taludes escavados de grandes dimensões - Figura 3.30.



Figura 3.29 - BBC 120



Figura 3.30 - BBC120 em utilização

### 3.2.4.2. Projeção de Betão

No AHRE é utilizado a projeção de betão como medida de contenção nos taludes. Para a realização deste processo no AHRE utiliza-se um equipamento designado por Putzmeister Sika-PM407, mas vulgarmente chamado por “Robot” devido ao seu braço de projeção ser manobrado a partir de controlo remoto por parte do manobrador. Este equipamento é muito versátil em relação à sua fácil maneabilidade devido a ter vários pontos de articulação - Figura 3.31 - de modo que seja relativamente fácil aceder a terrenos acidentados para a realização da projeção de betão, sendo que o fornecimento de betão é normalmente efetuado a partir de autobetoneiras - Figura 3.32

O PM407 realiza a projeção de betão através de ar comprimido e é composto por [20]:

- Máquina de projeção de betão
- Bomba de betão
- Unidade de dosagem de líquido (adjuvantes)
- Compressor
- Tanque Acelerador
- Enrolador de cabo até 50 m

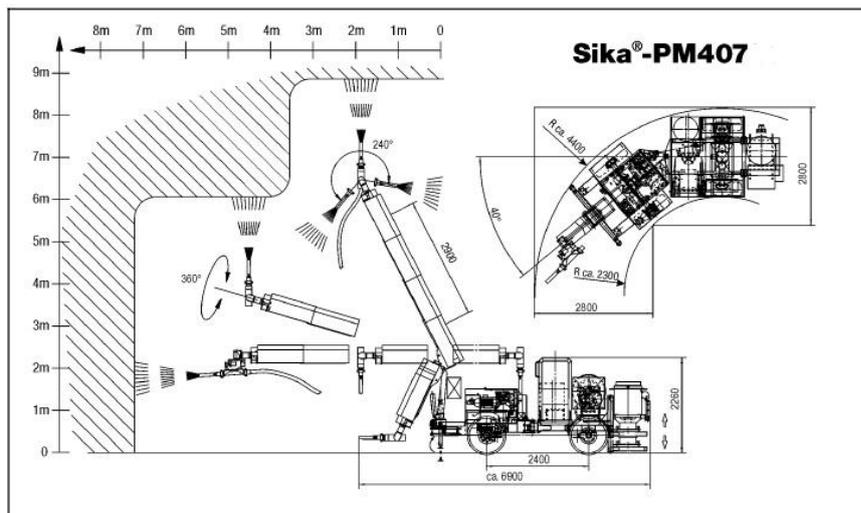


Figura 3.31 - Alcance de Trabalho do "Robot" [20]



Figura 3.32 –Fornecimento de betão através da autobetoneira ao "Robot"

Este sistema define-se como um processo contínuo de projeção de betão ou argamassa. A projeção de betão pode ser realizada através de duas metodologias:

- Via Seca
- Via Húmida

Na via seca, a mistura do cimento e dos agregados é feita a seco e levada até ao bico sob pressão aonde irá ser misturada com a água e os aditivos que entram no processo a partir de uma entrada controlada pelo manobrador tendo a vantagem de poder controlar a consistência da mistura - Figura 3.33.

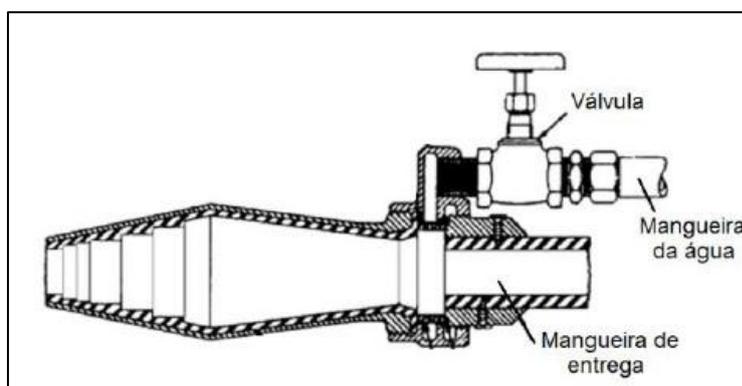


Figura 3.33 - Projeter de Betão - Via seca (ACI 506R-05, 2005 citado por Marta Santos)

A via húmida por seu lado, utiliza betão pronto que é entregue através de camiões autobetoneiras no caso do AHRE. Para a realização desta via é necessário equipamentos como o Putzmeister Sika-PM407 (“Robot”), para a realização da bombagem do material com o auxílio de ar comprimido para o aumento da velocidade de projeção desde o reservatório de entrega do material até ao bico de projeção - Figura 3.34.

De referir que no AHRE, a projeção de betão através do “Robot” realizou-se através da via húmida com um aditivo MEYCO SA 160 da BASF para que dê mais aderência ao betão e diminua o tempo de presa.

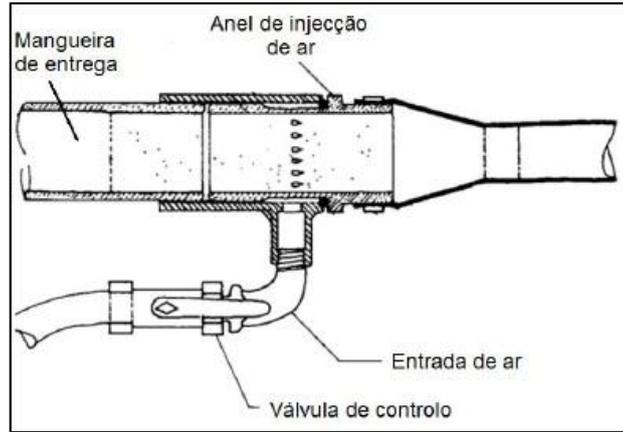


Figura 3.34 - Projetor de Betão - Via Húmida (ACI 506R-05, 2005 citado por Marta Santos)

Na Tabela 3.9 estão referenciadas as diferenças existentes em termos de trabalhabilidade das duas vias sendo a via húmida a mais propícia em locais fechados devido à sua baixa formação de pó não levando à falta de visibilidade que pode ser causadora de graves acidentes de trabalho.

Tabela 3.9 - Via Seca vs Via Húmida [21]

	Via Seca	Via Húmida
Formação de Pó	Alta	Baixa
Reflexão	Alta	Baixa
Facilidade de Projeção	Alta	Baixa
Equipamento Utilizado	Simples	Complexo

### 3.2.4.3. Elevação

Estes equipamentos de elevação são imprescindíveis numa obra como o AHRE, devido a isso utiliza-se um Manitou Maniscopic, com uma altura de elevação de 13 m e com uma capacidade aproximada de 3,5 toneladas. Este equipamento é muitas vezes utilizado para a colocação em altura de pregagens ou drenos nos respetivos furos. Sendo também utilizado para todas as manobras que necessitam de um equipamento com função de empilhadora - Figura 3.35.



Figura 3.35 - Manitou Maniscopic

#### 3.2.4.4. Produção e Injeção de Calda de Cimento

A produção de calda de cimento é realizada por uma central de injeção portátil “in situ” designada por UNIGROUT - Figura 3.37. Essa portabilidade é essencial devido às diversas localizações que são realizadas as pregagens sendo a água transportada num tanque portátil - Figura 3.36. A central é composta por um misturador CEMIX 203H, um agitador CEMAG 402H e por uma bomba injetora PUMPAC.

O misturador CEMIX 203H é do tipo coloidal de alta velocidade e elevadas tensões de corte, capaz de produzir uma calda muito uniforme, livre de grómulos ou agregados, sendo o processo de dessegregamento das partículas de cimento repartido em duas fases, a primeira no turbilhão gerado no interior da cuba pela alta velocidade de rotação do impulsor (1450-1500 rpm.), e a segunda fase pela ação de corte criada pela turbulência gerada pelo desenho particular do carter impulsor. É de referir ainda que a capacidade do motor hidráulico é de cerca de 11 cm<sup>3</sup>/r.

O agitador que tem uma capacidade aproximadamente o dobro da cuba do misturador permite que a calda esteja sempre disponível para ser injetada pela bomba quando as operações de mistura e agitação se efetuam em simultâneo. Este agitador é munido de lâminas excêntricas para que possam criar correntes opostas de modo a manter a calda em suspensão e sempre livre das bolhas de ar em suspensão através de uma rotação moderada (60-70 rpm.), tendo o motor hidráulico a capacidade de 200 cm<sup>3</sup>/r.

Por fim, a bomba injetora que realiza a injeção da calda de cimento para o respetivo furo de pregagem, é de cilindro simples e êmbolo de duplo efeito, que realizam a bombagem da maior parte das caldas utilizadas em selagem e consolidação. Esta bomba PUMPAC tem inserido um sistema hidráulico de regulação independente de pressão e caudal, contudo tem a desvantagem da pressão e o caudal máximo não poderem ser atingidos em simultâneo. Este equipamento tem capacidade para injetar um caudal de 200 l/min se for utilizado um cilindro de injeção de 150 mm de diâmetro - Figura 3.37.



Figura 3.36 - Tanque de água da Central de calda de cimento



Figura 3.37 - Central de calda de cimento

### 3.2.5. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO “IN SITU”

A realização desta dissertação em meio empresarial, na RODIO, faz com que os processos construtivos possam ter um acompanhamento mais fidedigno com o que se desenrola numa obra, que por vezes diferem muito de uma metodologia teórica. Nesta perspetiva esta secção ilustra o normal desenvolvimento de uma pregagens no AHRE, sendo mais focado nos materiais que são adotados nesta obra em particular e as suas condicionantes fazendo sempre referência a possíveis alternativas que se realizam neste processo.

A realização das pregagens é um processo que sofre ligeiras alterações tendo em conta o tipo de material, as condições de implantação das pregagens e sobretudo as exigências do dono de obra.

#### 3.2.5.1. Preparação dos Varões

Neste tópico é preciso distinguir a preparação do varão GEWI de um varão normal. Como foi tratado anteriormente em 3.2.2.1 os varões GEWI possuem um sistema de enroscamento próprio - Figura 3.38 - não acontecendo o mesmo com os varões normais que possuem nervuras que não são preparadas para a utilização de porcas.



Figura 3.38 - Varão GEWI com rosca

No AHRE foram utilizados estes dois tipos de varões de modo a haver uma redução de custos, em zonas em que as cargas não fossem tão elevadas utilizou-se varões normais de aço sendo que houve a necessidade de dotar o estaleiro de uma roscadora - Figura 3.39.

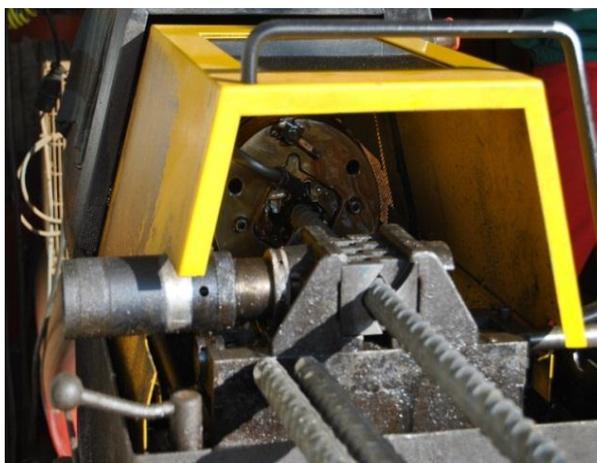


Figura 3.39 - Roscadora em funcionamento

Esta máquina realiza o roscamento dos varões para diferentes tipos de diâmetros com a lubrificação a óleo de modo a não quebrar, devido à fricção do aço, os “dentes” da máquina. Os resíduos expelidos dos varões roscados são depositados num recipiente na máquina com o óleo utilizado, sendo retirado no dia seguinte para um recipiente próprio depois de uma filtragem do óleo, restando apenas os resíduos de aço – Figura 3.40



Figura 3.40 - Resíduos do Enroscamento

Numa fase antecedente ao enroscamento é necessário alguma preparação do varão. Começa-se por cortar o varão no comprimento pedido em projeto para as diversas localizações em obra, de seguida procede-se ao roscamento, sendo necessário o alisamento da cabeça - Figura 3.42 - do varão que inicialmente é posto na roscadora, com dois objetivos sempre presentes:

- Não deterioração dos “dentes” da máquina por parte das nervuras do varão;
- Melhor colocação no orifício da enroscadora do varão.

Não esquecer, que neste processo deve estar sempre presente como se indica nas figuras os equipamentos de proteção individual - Botas de biqueira de aço, capacete de proteção, óculos de proteção, luvas de proteção e o colete refletor – sendo que no alisamento de varões deve-se retirar o colete devido à propensão do seu material levar a um possível foco de incêndio, como se pode verificar na Figura 3.41.



Figura 3.41 - Processo de alisamento dos Varões

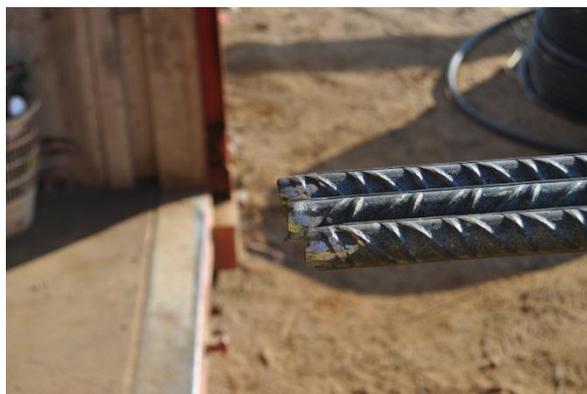


Figura 3.42 – Varões de “cabeça” Alisada

O processo de enroscamento dos varões leva cerca de 45 a 60 segundos, e é concluído com um jacto de ar comprimido com a finalidade de retirar os resíduos soltos que perduram após o processo nos varões. De seguida é feita uma verificação com uma rosca de modo a verificar que o enroscamento foi realizado com sucesso - Figura 3.43 - caso não fosse esse o resultados teria que se colocar de novo na enroscadora de modo a retificar a rosca. Na Figura 3.44 é visível os varões após a realização do processo.



Figura 3.43 - Verificação das Roscas



Figura 3.44 - Varões Roscados

### 3.2.5.2. Colocação da mangueira de injeção

Esta fase realiza-se após a preparação dos varões de aço, e baseia-se na colocação em espiral em torno do varão de aço da mangueira de injeção -Figura 3.45 - que funciona também como centralizador. Este processo deve-se realizar com algumas precauções. A mangueira de injeção da calda de cimento é colocada desde o início do varão de aço. Como medida de prevenção de evitar o entupimento da mangueira no local de saída da calda de cimento após a sua colocação no furo, devido ao material do solo, deve-se cortar uma pequena abertura de modo a haver uma alternativa de saída da calda evitando assim o entupimento - Figura 3.46.



Figura 3.45 - Mangueira de Injeção



Figura 3.46 – Furo alternativo

### 3.2.5.3. Realização do Furo

A furação é um processo que varia tendo em conta o tipo de utilidade para que é efetuada. É utilizado um sistema de corte que é designado por Bit ou Coroas. Estes Bits ou Coroas acoplados a barras de furação perfuram o solo, podendo estas varas serem acopladas sequencialmente tendo em conta o comprimento do furo que está previamente definido. Este processo é acompanhado por um sistema de limpeza do furo que no caso dos equipamentos no AHRE é o ar comprimido mas como alternativa poderia usar a água, bentonite ou até mesmo calda de cimento.

O furo deve ser realizado imediatamente antes da colocação da pregagens e respetiva selagem, de modo a evitar possíveis quedas de material o que pode levar à oclusão do furo levando a uma redução da capacidade resistente da pregagem.

Este processo de furação pode ser dividido em:

- Furação à Rotação;
- Furação à Rotopercussão.

- Furação à rotação

A furação à rotação é um método que se baseia no movimento rotacional das varas, sendo um método não destrutivo o que é benéfico para o caso das sondagens porque elabora uma furação com recolha de amostra contínua – metodologia wireline. Esta metodologia é utilizada para a caracterização do solo sendo utilizadas varas apropriadas – Figura 3.47. [22]



Figura 3.47 – Varas para furação Wireline [23]

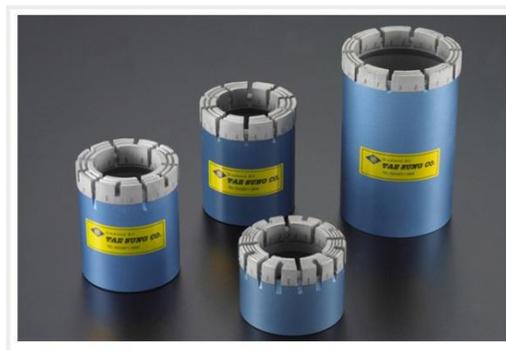


Figura 3.48 - Coroas de diamante impregnado [24]

Esta metodologia wireline utiliza coroas de corte - Figura 3.48 - que atualmente são utilizados com diamante impregnado devido a ser um material bastante resistente para o corte de solo duro como no caso do granito. Estas coroas são dotadas de um orifício no seu interior de modo a permitir a carotagem através do posterior enchimento das varas acima da coroa, para uma caracterização do solo com amostras. Deve-se ainda referir que este método de wireline é viável em rocha não muito fraturada ou em solo, medianamente a muito, compacto de modo a permitir a sua carotagem. Contudo na furação à rotação deve-se o utilizar a água como elemento de arrefecimento da coroa para que esta não se desgaste devido à fricção com o solo e acabar por danificá-la.

A utilização das coroas varia de solo para solo. Num solo como o solo residual do granito utiliza-se uma coroa com maior resistência ao desgaste -Figura 3.49.

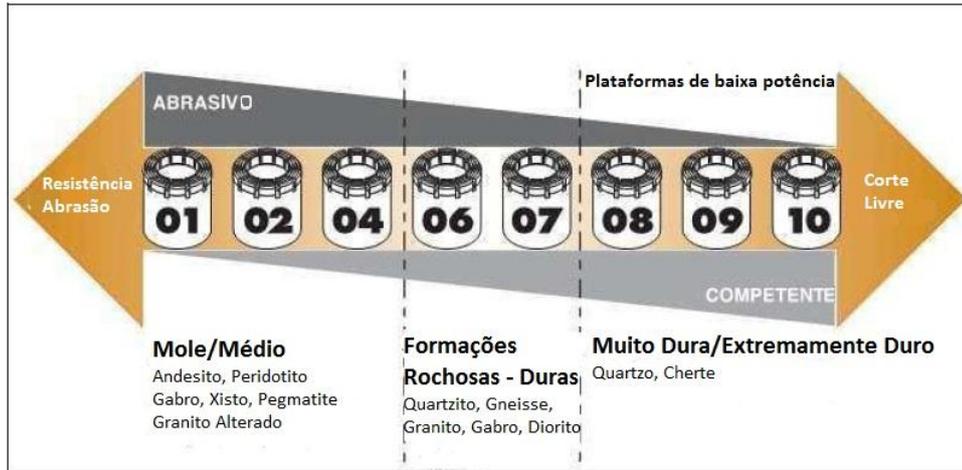


Figura 3.49 - Classificação das Coroas da Boart Longyear [25]

Uma das grandes vantagens deste método é a presença de um dispositivo designado por “pescador”, situa-se na extremidade superior e esta conectada ao guincho wireline e é utilizado para puxar o amostrador para a superfície fazendo que não seja necessário a extração das varas evitando assim um processo moroso de retirar as varas para posterior extração do amostrador [1]. Outra vantagem deste método comparativamente com o método tradicional é a elevada percentagem de recuperação da amostra, a maior velocidade de extração e a menor energia dispendida para a extração da amostra - Figura 3.50.



Figura 3.50 - Varas com a Coroa Wireline [22]

- Furação à Rotopercussão

A furação à rotopercussão é realizada com dois movimentos principais, a rotação e a percussão. Este método de furação é do tipo destrutivo, não havendo possibilidade de recuperação de amostra não sendo portanto apropriada para sondagens. Este método é utilizado a maior parte das vezes para a realização da furação de pregagens, sendo utilizado uma ferramenta de corte designada por bit, que é composta por elementos com uma dureza capaz de perfurar os maciços mesmo se possuírem uma elevada resistência [1]. Estes elementos são compostos por carbureto de tungstênio (WC), que é um elemento químico inorgânico e insolúvel, que pertence à família dos materiais cerâmicos sendo o seu

ponto de fusão de cerca de 2870°C tornando-o no metal com o mais alto ponto de fusão e o de maior resistência fazendo com que seja dispensável a água como elemento de arrefecimento devido a nunca chegar a estas temperaturas aquando da perfuração.

Os bits são elementos que possuem vários formatos tendo em conta o tipo de solo, a abrasão que irão sofrer, o teor de água e a dureza do solo a furar, sendo ajustados ao diâmetro do furo que se pretende realizar - Figura 3.51.

### Bits de Perfuração - Variedades Padrão



Figura 3.51- Tipos de Bits [19]

Neste tipo de furação à Rotopercussão são utilizadas dois tipos de martelo:

- Martelo de Superfície.
- Martelo de Fundo de Furo.

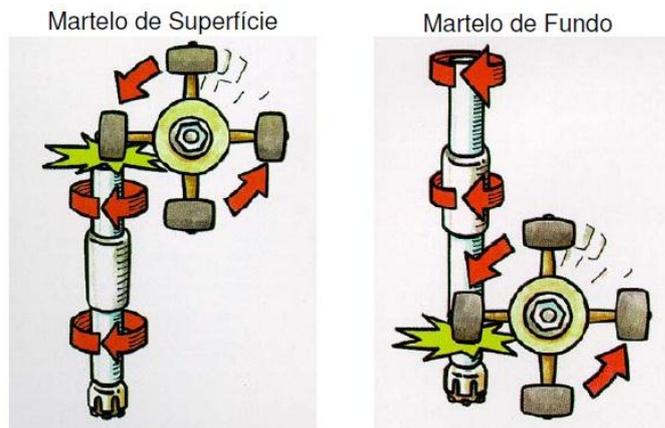


Figura 3.52 - Martelo de Superfície Vs. Martelo de Fundo de Furo [19]

A Figura 3.52, ilustra bem a diferença das duas técnicas, em que no caso do martelo de superfície além do movimento rotativo das varas imposto pelo equipamento de furação é também realizado um movimento percussivo à superfície do furo, tal como o nome indica, sendo transmitido através das varas de perfuração. Ao contrario, o martelo de fundo de furo realiza através da injeção de ar comprimido levando o bit a uma compressão contra o terreno, tendo a tendência para expandir e provocar um movimento ascendente e descendente com uma elevada pressão [6].

Como foi descrito em 3.2.4.1, os vários equipamentos que realizam a furação no AHRE, são constituídos por estes dois métodos de rotopercussão.

No caso do ROC L6, este possui um martelo de fundo de furo, sendo utilizado para furos de maiores dimensões ou para pregagens com maior comprimento. Realizando uma furação à rotopercussão, este utiliza o ar comprimido que é produzido pelo próprio equipamento para a limpeza dos detritos deixados no furo pela realização da furação.

No LM500 e no BBC120 são utilizados martelos de superfície, sendo de uma forma comparativa com o martelo de fundo de furo (ROC L6), mais ruidosos mas com um rendimento muito superior, realizando furos de menor diâmetro e comprimento.



Figura 3.53- Furação do L6



Figura 3.54 - Furação do LM500

#### 3.2.5.4. Colocação da Pregagem

O processo de colocação das pregagens nos furos deve ser realizado no menor espaço de tempo após a furação, de modo a evitar possíveis quedas de terreno que poderá levar a uma oclusão do furo, originando uma diminuição da resistência da pregagem. Esta rapidez no processo seria o mais conveniente para uma utilização da capacidade máxima resistente da pregagem, contudo devido ao reduzido tempo de realização dos trabalho que é comum em obras desta envergadura, e para uma rápida realização dos furos (aumento do rendimento do equipamento) realiza-se a furação de várias pregagens consecutivamente, para posteriormente colocar as pregagens todas em simultâneo - Figura 3.55 e Figura 3.56.



Figura 3.55 – Colocação de Pregagens



Figura 3.56 - Colocação de Pregagens com o auxílio do Manitou

### 3.2.5.5. Injeção da Pregagem

A injeção é realizada logo após a colocação das pregagens no furo para evitar a queda de material do maciço furado para o interior do furo, fazendo com que a calda de cimento consiga preencher na totalidade o furo. Este aspeto é de especial relevância devido à calda funcionar também como um protetor da armadura contra a corrosão ao dificultar a entrada de água até aos varões de aço. A injeção é feita pela central de injeção UNIGROUT, com um caudal de 0 a 120 l/min - Figura 3.57.

Anteriormente à injeção são realizados ensaios, sendo estes explicados em 3.3.3, de modo a garantir as especificações impostas pelo Dono de Obra.

No procedimento de injeção deve-se ter algumas precauções com a mangueira de injeção devido à pressão instalada imposta pela central de modo a bombear a calda até ao furo - Figura 3.58.



Figura 3.57 - Mangueira de Injeção



Figura 3.58 - Injeção de Calda

### 3.2.5.6. Projeção de Betão

No AHRE foi realizado projeção de betão com diferentes especificações dependendo do estado de fragmentação do solo ou do tipo de solo. Em certas zonas são usadas várias camadas de betão projetado com utilização de malhasol ou tripla torção ou simplesmente sem qualquer tipo de malha - Figura 3.59 - como medida de proteção dos taludes. A utilização de betão projetado simples é do tipo auxiliar, devido a este possuir uma função estrutural negligenciável, na estabilidade do talude pregados. Este tipo de betão projetado é usado também como medida protetora dos taludes devido à

erosão que pode ocorrer tanto devido ao vento como às águas da chuva levando a uma desfragmentação do solo e posterior perda de capacidade resistente. Ao contrário a utilização de malhasol faz com que o betão projetado seja do tipo estrutural, ou seja, este poderá sustentar algumas cargas transmitidas pelo terreno sendo os esforços mais importantes de compressão e corte, podendo surgir momentos fletores com alguma importância. [21].

A aplicação do betão projetado faz com que o impacto deste no talude promova a sua compactação levando a um aumento da resistência evitando assim a utilização de compactadores tradicionais - Figura 3.60. Adicionalmente evita a infiltração de águas e a deterioração superficial do maciço.



Figura 3.59 - Malhasol



Figura 3.60 - Bico de Projção

### 3.2.5.7. Aperto

O aperto das pregagens surge no final do processo e são utilizadas chapas de aço - Figura 3.61 - podendo ser ou não galvanizadas sendo um requisito por parte do Dono de Obra dependendo do local aonde estão a ser efetuadas as pregagens. O aperto aplicado no AHRE, depende do tipo de varão que se está a aplicar - Figura 3.62.



Figura 3.61 - Chapas de Aperto



Figura 3.62 - Aperto em AHRE

A aplicação do aperto das porcas é dada pelo artigo 59º do regulamento de estruturas de aço para edifícios, em que especifica que o binário a aplicar depende diretamente do diâmetro nominal da rosca e da força a aplicar na pregagem resumindo-se na fórmula abaixo.

$$M_p = 0.18 \times d \times F_{pd} \quad 3.3)$$

Sendo:

$M_p$  – momento de Aperto (N.m)

$d$  – Diâmetro Nominal da rosca (mm)

$F_{pd}$  – Força a aplicar na pregagem (N)

Sendo aplicados no AHRE, os valores de momento de binário apresentados na Tabela 3.10, sendo estes controlados através da chave dinamométrica.

Tabela 3.10 - Valores de Aperto de Varões em AHRE

Tipo de Aço		Diâmetro (mm)	Aperto
Normal		25	100 N.m
		32	128 N.m
	S/ Comprimento Livre	-	120 N.m
GEWI	C/ Comprimento Livre	32	Aperto 70%-1370 N.m Descompressão
			Aperto 50%-971.2 N.m
	25		Aperto 70%-652.5 N.m
			Descompressão Aperto 50%-472.5 N.m

### 3.3. NORMAS

A aplicação de Normas para este tipo de trabalhos, é de uma forma geral, muito abrangente aos trabalhos geotécnicos deste género. Na Europa é usada a norma EN14490, que designa-se por “Execução de Trabalhos Especiais em Geotecnia – Solo Pregado”, enquanto que nos Estados Unidos da América é usado o FHWA0-IF-03-017 – Soil Nail Walls. Estas normas servem para padronizar os procedimentos que se devem tomar na preparação, instalação e monitorização (ensaio e métodos de controlo) de trabalhos utilizando pregagens, fazendo ainda referência aos requisitos mínimos ou normativos de propriedades dos materiais a utilizar num sistema de solo pregado.

#### 3.3.1. NORMA EN14490

Esta norma foi elaborada pelo Comité Europeu de Normalização – CEN – num conjunto de representantes de dez países sendo aprovada a 25 de Abril de 2010. A elaboração desta norma teve por base o apoio ao “Eurocódigo 7: Projeto Geotécnico” de modo a garantir a boa prática de trabalhos geotécnicos especiais com a utilização de pregagens.

Na Norma EN14490 é referido vários pontos fulcrais no faseamento construtivo de trabalhos de solos pregados, tais como [3]:

- Informação precisa para a execução dos trabalhos;
- Investigação Geotécnica;
- Materiais;
- Considerações no Dimensionamento;
- Execução;
- Supervisão, Ensaio e Monitorização.

Contudo embora a norma EN14490 [3], refira estes pontos, estes são analisados de uma forma muito vaga, sendo para o efeito referido no âmbito desta tese os três pontos principais, sendo eles os Materiais, Execução e por fim a Supervisão, Ensaio e Monitorização.

##### 3.3.1.1. Materiais

Os materiais na norma EN14490 [3], são divididos em 3 grandes grupos:

- Sistema de Solo Pregado
- Sistema de Frente
- Sistema de Drenagem

Nestes três sistemas que caracteriza os materiais, deve-se ter em conta que os materiais são mutuamente compatíveis devendo assegurar a estabilidade da estrutura sendo que os limites de serviço não serão excedidos [3].

Sistema de Solo Pregado:	▸ Elemento de Reforço:	Os varões necessitam de um alongamento de pelo menos 5% na rotura; Varões de Aço sólidos devem estar em conformidade segundo a EN10080 e os de secção oca com a EN10210 e EN10219; A proteção contra a corrosão de aço de alta resistência e pré-esforçado de aço devem estar em conformidade com a norma EN 1537; Se um elemento de reforço de aço é galvanizado, esse revestimento galvanizado realizado por imersão a quente devem obedecer aos requisitos da norma EN ISO 1461.
	Elemento de Reforço Não-Metálico:	Devem possuir um comportamento dúctil.
	Juntas e Acoplamentos:	A proteção à corrosão destes elementos têm de ser compatíveis com o dos elementos de reforço.
	Calda:	Deve ser compatível com o elemento de reforço; A escolha da calda deve ter em conta a agressividade do meio, a permeabilidade do solo e o dimensionamento e características da pregagem; A relação Água/Cimento deve ser apropriada para as condições do solo, sistema de pregagem, método construtivo e requisitos de resistência e durabilidade A relação água/cimento máxima admissível deve ser de 0,55; Adjuvantes podem ser utilizados para melhorar a trabalhabilidade, durabilidade, reduzir a retração e desenvolvimento da resistência Adjuvantes que contem mais do que 0,1% de cloretos, sulfatos ou nitratos não devem ser utilizados com pena de poder danificar o elemento de reforço. Deve atingir pelo menos 5MPa imediatamente antes da colocação da pregagem em serviço e no mínimo de 25MPa ao fim de 28 dias.
Sistema de Frente	▸ Painéis e Blocos Pré-Moldados:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Devem estar em conformidade com a EN206;</li><li>• Se forem reforçados devem seguir a Norma EN10080.</li></ul>
	▸ Betão Projetado ou Moldado “In Situ”:	<ul style="list-style-type: none"><li>• Adjuvantes e Aditivos podem ser usados em Betão Projetado;</li><li>• Os agregados utilizados para betão projetado</li></ul>

devem ser armazenados sob uma cobertura e devem ser bem graduado para atingir a taxa de pulverização desejado.

- Malhasol
  - Deve estar em conformidade com a EN10080
  - Se for galvanizada deve estar em conformidade com a norma EN ISO 1461
  - Os revestimentos de fios devem cumprir os requisitos mínimos da norma EN 10244 (todas as partes) e EN 10245 (todas as partes) para revestimento orgânico extrudado.
- Geosintéticos
  - Devem estar em conformidade com a EN13251

Sistema de Drenagem ➤ Todos os Sistemas de drenagem devem seguir as normas europeias e devem ser respetivamente documentadas durante a execução.

Nos trabalhos geotécnicos a presença de água é uma constante fazendo com que a corrosão seja uma desvantagem para os elementos de reforço podendo levar à sua deterioração e posterior rotura. Sendo assim, a norma EN14490 [3] usa dados históricos, retirados de pregagens do solo, estacas-pranchas de papelão ondulado e estruturas de aço enterrados, instalados em ambientes similares com diferentes níveis de agressividade do solo baseada nas “Recommandations Clouterre 1991” de modo a prever a perda de espessura dos varões de aço devido à corrosão [3] - Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Indicação da Perda de Espessura dos Varões de Aço devido à Corrosão [12]

Índice Geral/Classificação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
	≤ 18 Meses	1.5 Anos até ≤ 30 Anos	30 Anos até ≤ 100 Anos
≤ 4/IV	0	2 mm	4 mm
5 a 8/III	0	4 mm	8 mm
9a 12/II	2 mm	8 mm	Bainha de Plástico
>13/IV	Usar Bainha de Plástico		

De forma a classificar o ambiente envolvente da zona das pregagens tendo em conta a efeito da corrosão, a norma europeia 14490 [3] leva a um método geral de avaliação da corrosão tendo em conta o tipo de solo, a resistividade, o teor de humidade e por fim o pH como esta exposto na Tabela 3.12.

Este Índice Geral é adquirido a partir do método geral de avaliação da corrosão - Tabela 3.12 e Tabela 3.13:

Tabela 3.12 - Método Geral de Avaliação da Corrosão [3]

Critério	Características	Critério – A
Tipo de Solo	Textura	
	Pesado, Plástico, Impermeável pegajoso	2
	Areia Argilosa	1
	Leve, Permeável, Arenoso, Solos Incoesivos	0
	Pantanosos	8
	Lixo Industrial	
	Clínquer, Cinzas de Carvão	8
	Resíduos de Construção (Gesso, Tijolo)	4
	Líquidos Poluentes	
	Águas Residuais Industriais	6
Águas com Sais de Degelo	8	
Resistividade ( $\Omega$ -cm)	$p < 1000$	5
	$1000 < p < 2000$	3
	$2000 < p < 5000$	2
	$5000 < p$	0
Teor de Humidade	Nível Freático – Água Salobra	8
	Nível Freático – Água Pura	4
	Acima do Nível Freático – Solo Húmido	2
	Acima do Nível Freático – Solo Seco	0
pH	$< 4$	4
	4 a 5	3
	5 a 6	2
	6	0
Índice Global	Soma dos Valores de A acima	

Tabela 3.13 - Classificação do Solo quanto à Corrosividade [3]

Classificação do Solo	Classificação	Índice Global
Altamente Corrosivo	I	13 ou Maior
Corrosivo	II	9 a 12
Medianamente Corrosivo	III	5 a 8
Pouco corrosivo	IV	4 ou Menos

A calda de cimento usada em pregagem funciona como um elemento de proteção contra a corrosão, devido à alcalinidade provida do cimento hidratado, desde que o pH se mantenha numa gama de valores entre os 9,5 e os 13,5. No caso da calda de cimento não funcionar como proteção de forma correta a norma 14490 propõe a utilização de revestimentos tais como o galvanizamento ou a utilização de resinas epoxy, sendo o período de proteção dependente da espessura a que se utilize nestes revestimentos. [3]

### 3.3.1.2. Execução

A execução dos trabalhos segundo a norma EN14490, inclui cinco processos base:

- Trabalhos Preliminares
- Escavação/Preparação da Frente
- Instalação da Pregagem
- Instalação da Drenagem
- Instalação do Sistema de Frente e Conexão com a cabeça das Pregagens

Estes cinco processos, estão descritos de uma forma muito genérica nesta norma europeia, contudo a instalação da pregagem é um dos aspetos com mais matéria relevante para esta dissertação. Sendo assim irá-se procurar expor de forma clara os tópicos abordados nesta secção demonstrando algumas das técnicas de furação e procedimentos de injeção da calda de cimento [3].

A designação de Instalação de Pregagem, em que inclui a furação, colocação da pregagem e selagem, é chave de todo o processo, originando o reforço do talude após esta operação, sendo que as operações posterior são aplicações do método construtivo de modo a garantir a fiabilidade do reforço [3].

- Furação

A furação é realizada com equipamento adequado podendo ser realizada segundo a aplicação de dois métodos distintos:

- Métodos de instalação Orientada

Neste método as pregagens são cravadas no solo com o auxílio de macacos hidráulicos, ou com uma ação percussiva, vibratória ou balística para penetrar no solo. O elemento de reforço deve ter uma rigidez aceitável de modo a evitar a encurvadura no processo de cravação. [3]

➤ Métodos de Instalação Perfurada

Neste tipo de instalação estão inseridos os dois métodos de Rotação e Rotação-Percussão de modo a proceder à penetração no solo. Nestes métodos deve ser assegurado o diâmetro nominal do furo para todo o comprimento da pregagem que está no pré-dimensionada em projeto [3].

Na colocação da pregagem se não houver uma espessura mínima entre o elemento de reforço e o solo para que a calda de cimento garanta uma proteção adequada contra a corrosão, deve-se proceder à colocação de espaçadores de modo a garantir essa espessura mínima.

Este método de furação deve ser usado em solos estáveis com o auxílio de ar comprimido ou água, devido a esta ter uma densidade maior para aumentar a capacidade de suporte do furo para taxas inferiores de perfuração de modo a não danificar o bit e em solos instáveis com a utilização de fluido estabilizador ie. Bentonite. [3] É recomendável a colocação das pregagens imediatamente após a furação.

No caso de pregagens autoperfurantes, os elementos de reforço são ajustados ao bit de furação sendo instalados ao mesmo tempo que a furação é efetuada. A furação é pelo método de rotação-percussão através de barras ocas sendo a velocidade de furação ajustada às características do solo de modo a garantir o diâmetro preconizado em projeto.

• Injeção

A injeção pressurizada é utilizada de modo a aumentar a resistência ao arranque das pregagens em comparação com uma injeção por gravidade, devido a reduzir o índice de vazios na calda aumentando a compacidade da calda de selagem e respetivamente a sua resistência - Tabela 3.14 e Tabela 3.15.

Tabela 3.14 - Tipos de Injeção adequados ao Tipo de Furação [3]

Tipo de Furação	Método	Tipo de injeção	Observações
Instalação Orientada		Pressurizada	Efetua-se durante a cravação ou no fim através do elemento de reforço.
		Gravidade	
Instalação Perfurada	Rotação	Pressurizada	Pode ser iniciada durante a perfuração a partir do elemento de reforço no fim da perfuração ou no fim da perfuração através de um tubo de injeção.
	Rotação-Percussão	Gravidade	
	Autoperfurantes		Pressurizada Gravidade

Tabela 3.15 - Tipos de Injeção [3]

Tipo de Injeção	Características
Injeção por Gravidade	Pressão no furo não pode exceder a pressão gravítica Deve-se utilizar um tubo de injeção com diâmetro interno não inferior a 15mm
Injeção Pressurizada	A pressão de injeção deve ser ajustada dependendo da suscetibilidade da calda ao penetrar no solo, havendo uma redução na velocidade no processo de furação dentro do anel em torno do elemento de reforço (pregagens autoperfurantes). Após a injeção por gravidade pode ser acoplado um tubo de injeção a um invólucro de modo a exercer uma pressão na calda inserida no furo.

A injeção deve ser um processo contínuo sem interrupções de modo a não haver contaminação da calda com o solo para que se verifique uma proteção adequada do elemento de reforço, caso não se verifique a contaminação deve-se proceder à remoção de uma forma controlada. [3]

### 3.3.1.3. Supervisão, Ensaio e Monitorização

A norma EN14490, atesta que todos os procedimentos devem estar em conformidade com o Eurocódigo 7, e que estes devem ser realizados por pessoas qualificadas e com experiência adequada para assegurar que todas as especificações no dimensionamento e requisitos devem ser cumpridos tal como estão expostos em projeto, e que qualquer anomalia ou disparidade com o projeto deve ser de imediato reportado às pessoas responsáveis [3].

- Supervisão

A supervisão é um conjunto de medidas que se realizam de modo a verificar o correto funcionamento dos trabalhos sendo elas [3]:

- Inspeção visual do material escavado de modo a confirmar com as condições do solo consideradas em projeto;
- Inspeção visual do bit de perfuração de modo a confirmar que está de acordo com as condições de solo previstas no dimensionamento;
- Avaliação de conformidade das propriedades e aspetos relevantes do solo (espessura, grau de fracturação, etc);
- Monitorização durante as operações;
- Assegurar que altura de escavação máxima não será excedida e que a orientação, espaçamento e comprimento são os preconizados em projeto;
- Assegurar que o furo está limpo e que o solo no seu interior não tenha colapsado;
- Assegurar que a Proteção do elemento de reforço contra a corrosão está íntegro.
- Aferir a qualidade da calda de injeção
- Aferir a conexão entre o elemento de reforço e o sistema de frente.

- Ensaios

Os ensaios propostos pela norma EN14490, podem ser expostos em três diferentes categorias [3]:

- Ensaios de Carga para verificar a resistência última ao arranque das pregagens e as suas características em relação à fluência;
- Ensaios aos materiais de modo a verificar a sua resistência à Tração e Fluência, ie. Ensaios de Tração dos Varões de Aço;
- Ensaios de Avaliação da Estabilidade da Frente de modo a garantir a sua estabilidade durante a escavação.

Os Ensaios de Carga devem ser realizados em locais de acordo com todos os intervenientes em obra, sendo que estes devem ser distribuídos por toda a zona do maciço de modo a avaliar o comportamento de uma pregagem num determinado local e a sua frequência de realização - Tabela 3.17 - deve ser em função da sua categoria.

Estes ensaios de carga são divididos em 2 tipos de ensaios - Tabela 3.16:

- Ensaios Prévios
- Ensaios de Receção

Tabela 3.16 - Ensaios de Carga [3]

	Tipo de Ensaio de Carga	
	Ensaio Prévio	Ensaio de Receção
Objetivo do Ensaio	Verificar a resistência última da pregagem usada no dimensionamento	Para demonstrar o comportamento satisfatório da pregagem na aplicação de carga pelo projetista
Quando deve ser ensaiado	Antes, durante e depois dos trabalhos	Durante e no fim dos trabalhos
Tipo de Pregagem	Rotura	Serviço
Medidas de não conformidade do Ensaio	Verificar o método de instalação da pregagem ou aumentar no comprimento da pregagem	Consultar o Projetista de modo a tomar uma decisão para ser aprovada e dar aval à continuação dos trabalhos
Comentários	A cada diferente camada de solo	Ter em atenção que realizar um ensaio de receção, não se deve levar à rotura a pregagem e não danificar a proteção à corrosão

Tabela 3.17 - Frequência Mínima de Ensaios de Carga [3]

Tipos de Ensaios	Frequência mínima sugerida para realização dos Ensaios de Carga	
	Ensaio Prévio	Ensaio de Receção
Categoria Geotécnica 1 Risco Insignificante de Propriedade e/ou Vida	Opcional	Opcional
Categoria Geotécnica 2 Sem risco anormal à Propriedade e/ou Vida	Se não houver dados comparáveis do mesmo tipo de solo:  Um mínimo de três pregagens à rotura, com pelo menos uma pregagem à rotura por tipo de solo diferente.	2%, mínimo de três Ensaios
Categoria Geotécnica 3 Todas as Estruturas que não se insiram na Categoria 1 e 2	Mínimo de cinco pregagens à rotura com pelo menos dois ensaios à rotura por tipo de solo.	3%, mínimo de cinco Ensaios

- Monitorização

A monitorização deste tipo de trabalhos deve estar de acordo com a norma EN1997-1:2004, havendo a monitorização em dois casos específicos [3]:

Durante a Construção:

- Monitorização dos movimentos verticais e horizontais à medida que se desenrolam os trabalhos
- Se os movimentos aproximarem ou excederem os valores limites, deve-se aplicar medidas de estabilização definidas em projeto.
- A inspeção visual do solo escavado deve ser efetuado de modo a reparar em sinais de água de modo a proceder a um sistema de drenagem adequado.
- Se o dimensionamento for sensível a alterações devido à existência de água no solo, deve-se instalar piezómetros deve-se proceder a um acompanhamento.

Longo Prazo:

- A circulação das obras ou estruturas adjacentes e encostas;
- Carga-teste para pregagens de rotura ou pregagens de serviço;
- A eficiência dos sistemas de drenagem;
- Alterações nas águas subterrâneas e hidrogeologia;
- A degradação das unhas de solo e sistemas que enfrentam;
- As forças das pregagens instaladas no solo;

### 3.3.2. NORMA FHWA, 2003

Esta norma foi induzida pelo Federal Highway Administration , pertencente ao departamento de Transportes dos Estados Unidos, e teve como base a boa prática para análise, dimensionamento e construção de muros pregados em aplicações rodoviárias, sendo útil para qualquer tipo de aplicações deste tipo de trabalhos.

Esta norma foi publicada em Março de 2003 e é conhecida pelo relatório nº FHWA0-IF-03-017, sendo a norma mais completa existente para descrever os materiais e tipos de fases existentes para aplicação de muros pregados. Devido à exaustiva informação existente nesta norma, faz-se referência a três pontos fulcrais, sendo eles, os materiais, execução e ensaios/monitorização para que se possa ter um termo de comparação entre as duas normas expostas. [2]

#### 3.3.2.1. Materiais

- Varões de Aço:
- Podem ser ocos ou sólidos. Geralmente possuem uma resistência à tração aproximadamente de 420 MPa. Os varões com resistência à tração de 665 MPa e superior, 1035 MPa podem ser usados em solo pregado, mas deve-se dar preferência a varões com a resistência à tração mais baixas (420MPa) devido a estas serem mais dúcteis e menos susceptíveis à corrosão.
  - Os diâmetros aceitáveis para solos pregados devem ser o 19, 22, 25, 29, 32, 36 e 43 mm, chegando até 18 metros de comprimento. Para diâmetros inferiores a 25 mm não devem ser efetuadas pregagens de grande comprimento devido a tenderem a encurvar excessivamente durante o manuseamento e instalação.
- Calda de Selagem:
- É uma calda composta por cimento e água somente e é servida para ocupar o espaço anelar entre o elemento de reforço e o solo circundante. Pode ser usado Cimento do tipo I, II, III e IV, sendo que o cimento tipo I é o mais recomendado para a maioria das aplicações, o cimento tipo II endurece mais lentamente, produz menos calor e é mais resistente à ação corrosiva dos sulfatos do que o cimento do tipo I. Por fim o cimento do tipo III endurece mais rápido e é usado quando a argamassa necessita de ganhar presa mais rapidamente.
  - A relação Água/Cimento para a calda deve variar tipicamente entre os 0,4 e os 0,5. Sendo que a necessidade de realizar uma calda com uma relação água/cimento mais baixa pode dever-se ao controlo de fugas de calda em solos granulares altamente permeáveis ou em rocha altamente fraturada.
  - Independentemente da alta viscosidade da calda poder suportar o elemento de reforço de modo a este cumprir o recobrimento mínimo de calda, deve-se utilizar centralizadores de modo a garantir esse recobrimento.
  - Os adjuvantes geralmente não são utilizados, contudo para aumentar a sua trabalhabilidade
  - A calda deve ser logo bombeada após a colocação do varão de aço ser colocado no furo de modo a evitar possíveis desabamento do solo para dentro do furo levando à sua obturação ou possível contaminação da calda com o solo, levando a um risco de corrosão da armadura. A injeção é feita através de um tubo de injeção com um diâmetro entre 9,5 e 19 mm, sendo uma injeção suave e continua.

Centralizadores: ➤ São produtos realizados em PVC ou outro material sintético que são instalados em varias localizações da barra de aço ao longo do seu comprimento. Estes centralizadores garantem uma espessura mínima de calda que cubra toda a barra de aço. Geralmente são instalados no máximo de 2,5 em 2,5 metros com o mínimo de 0,5 metros do fim da pregagem.

### 3.3.2.2. Execução

As fases de execução de muros pregados preconizado pelo FHWA é em tudo semelhante ao descrito na norma EN14490 salvo a inclusão de uma fase referente a níveis subsequentes, envolvendo as fases [2]:

1. Escavação
2. Furação
3. Instalação e selagem das pregagens
4. Construção temporária da frente com betão projetado
5. Construção de níveis subsequentes (repete-se os passos 1 a 4)
6. Construção definitiva da frente

- Furação

A furação para as pregagens podem ser efetuados usando um dos mais diversos métodos de furação:

- Rotação
- Percussão
- Trado
- Rotação/Percussão

O projetista pode usar a Tabela 3.18, como forma de guia, de modo a selecionar o equipamento e o método de furação mais apropriado tendo em conta as condições do solo e as características da pregagem tais como o comprimento e o diâmetro.

A utilização de brocas de perfuração na furação é a mais comumente utilizada devido às elevadas taxas de instalação das pregagens e ao baixo custo associado a este tipo de furação.

A seleção do método de perfuração pode também ser controlada pela disponibilidade local de equipamento. No entanto, o engenheiro de projeto podem, ocasionalmente, limitar a escolha dos métodos de perfuração e/ou procedimentos com base nas condições do subsolo ou necessidades de outros projetos. Por exemplo, as restrições podem ser impostas a certos métodos de perfuração, se for considerado que eles podem ter um efeito adverso sobre a integridade das estruturas adjacentes ou utilitários subterrâneos. [2]

Tabela 3.18 - Métodos de Furação e Procedimentos [2]

Equipamento de Furação	Método de Furação	Furo Aberto ?	Entubado ?	Diâmetro do Furo	Tipos de Bit	Modo de remoção de resíduos	Comentários
Trado	Barra Orientada - Kelley	Sim	Não	100-300/ 4-12	Rocha, Solo	Mecânica	Métodos hidráulicos, trado rotativos para perfurar solos competentes ou rocha.
	Haste Seccionada Sólida	Sim	Não				
	Haste Seccionada Oca	Sim	Sim			Mecânica (Ar Comprimido)	
	Haste Contínua Sólida	Sim	Não			Mecânica	
	Haste Contínua Oca	Sim	Sim			Mecânica (Ar Comprimido)	
Rotação	Haste de Rotação a Ar - Simples	Sim	Não	100-200/ 4-8	Desgaste	Ar Comprimido	Métodos hidráulicos rotativos para perfurar solos competentes, rock, ou condições terreno misto (martelos pneumáticos disponível).
	Rotação Dupla a Ar	Sim	Sim				
	Haste de Trado - Secção sólida	Sim	Não	100-300/ 4-12	Rocha, Solo	Mecânica	Métodos hidráulicos, trado rotativos para perfurar solos competentes ou rocha.
	Haste de Trado - Secção oca-	Sim	Sim			Mecânica (auxílio de ar)	
Ar	Haste de Rotação a Ar - Simples	Sim	Não	100-300/ 4-12	Desgaste	Ar Comprimido	Métodos pneumáticos rotativos para perfuração não espeleológicos solos competentes

- Injeção

A injeção da calda de selagem pode ter uma grande influência na resistência das pregagens, quando estas tiverem no seu pleno funcionamento. A forte ligação pode ser conseguida em solos granulares ou em rocha fissurada a partir de uma injeção sob pressão. Esta pressão aumenta a resistência ao arrancamento em relação ao método do furo aberto, que se realiza por gravidade, este aumento é devido a vários mecanismos, incluindo o aumento da pressão de confinamento em torno do bolbo de calda de selagem, a maior compactação do material circundante, o aumento do diâmetro efetivo da calda de selagem [2].

### 3.3.2.3. Inspeção de Construção e Monitorização de Desempenho

A inspeção é um compromisso feito entre ambas as partes – Dono de Obra e Empreiteiro – sendo que o empreiteiro terá que seguir os planos de projeto e suas especificações, enquanto que o Dono de Obra é assegurar o estrito cumprimento dessas especificações.

Essas especificações que devem ser asseguradas por parte do Dono de Obra é iniciado pelo conhecimento dos seguintes fatores [2]:

- Planos, especificações e requisitos de ensaio;
- Condições do solo local relevantes para a realização dos trabalhos;
- Os requisitos mínimos dos materiais e tolerância admissíveis
- Sequencia dos trabalhos;
- Qualificação do Empreiteiro para cumprir com os requisitos mínimos de execução de trabalhos deste tipo, de modo a cumprir com a sua exigência.

- Ensaios

Ensaios à Rotura:

- São realizados para verificar o cumprimento da capacidade ao arranque da pregagem. Estes ensaios devem ser levados à rotura ou a uma carga de ensaio que possua um fator de segurança ao arranque. O numero de ensaios à rotura depende da dimensão dos trabalhos a efetuar e/ou dos diferentes tipos de solo existente. [2]
- No mínimo dois ensaios deste género devem ser realizados em cada estrato de solo de solo encontrado. [2]

Este tipo de ensaio - Figura 3.63 - são usados também para a determinação do fator de segurança de dimensionamento. Se o fator de segurança para o arranque for de 2,0, então a carga de teste deve ser verificada nos 200% da capacidade de carga ao arranque permitida. A validação destes ensaios é feita segundo dois pontos:

1. Não ocorrência do arranque da pregagem na carga de 200% da carga de dimensionamento.
2. O deslocamento total medido no dobro da carga de dimensionamento terá excedido 80% do movimento elástico teórico do comprimento livre (UL), ou seja,  $\Delta L \geq \Delta L_{\min}$  onde  $\Delta L_{\min}$  é dado por:

$$\Delta L_{min} = 0.8 \times \frac{P \times (UL)}{E \times A} \quad 3.4)$$

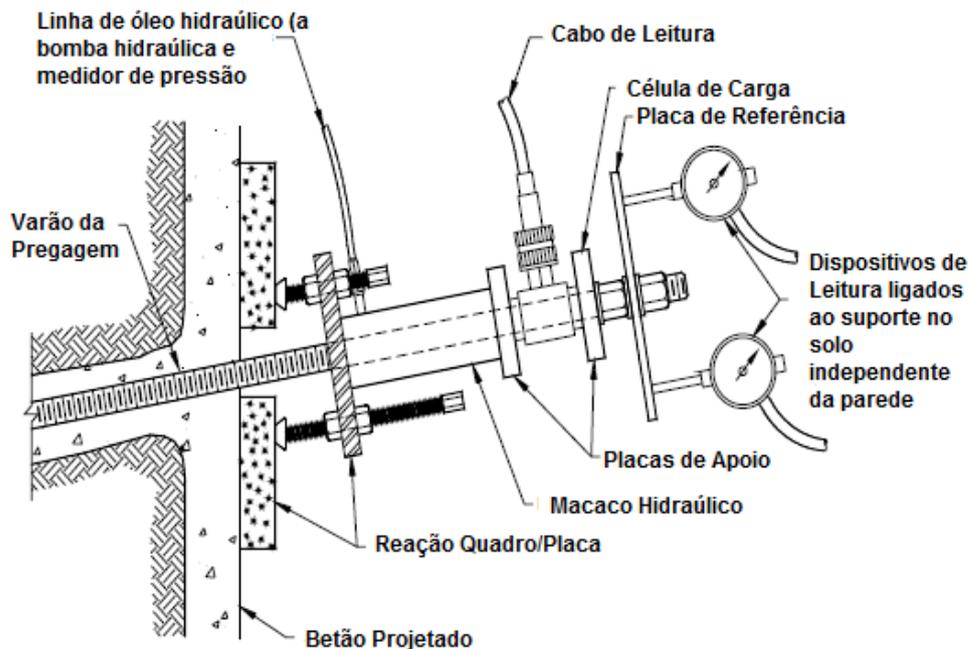
Onde:

P - Carga de Ensaio Máximo;

UL - Comprimento Livre

A - Secção do varão de aço da pregagem

E - Modulo de Elasticidade do Aço



Source Porterfield et al. (1994).

Figura 3.63 - Elementos de um Ensaio [2]

Ensaio de Serviço:

- Estes ensaios são realizados durante a construção com uma percentagem específica, tipicamente 5% do número total de pregagens a realizar. Estes ensaios servem para um controlo de boa execução por parte do empreiteiro. As pregagens, nestes tipos de ensaios, são testadas até a uma força de cerca de 150% da força de dimensionamento. [2]

Estes ensaios é um ensaio de ciclo único, sendo que a carga é aplicada em incrementos até a uma carga máxima de 150% a carga de dimensionamento. Sendo que os critérios são em tudo idênticos ao do ensaio à rotura embora a carga seja de 150% da carga de dimensionamento.

Ensaio de Fluência:

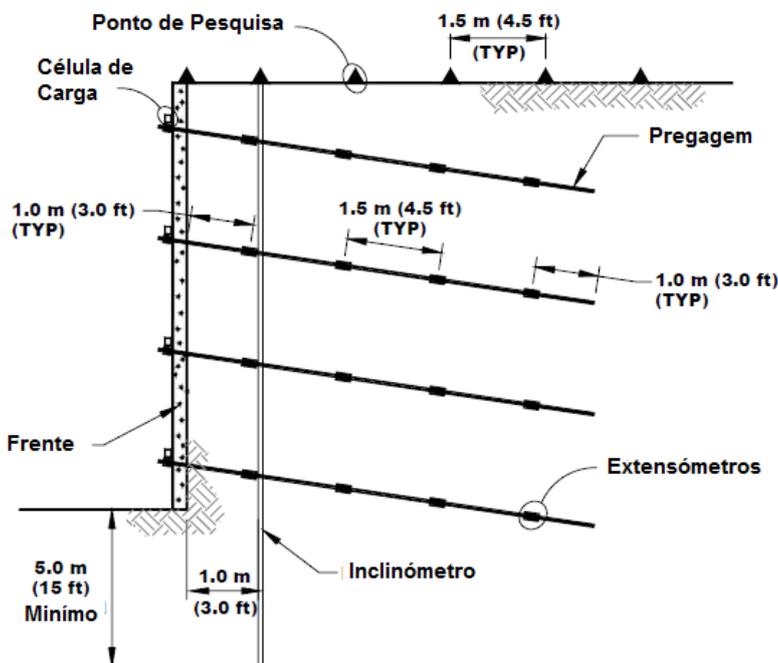
- Estes ensaios são realizados numa ultima fase de verificação e de teste. Este tipo de ensaio consiste na medição do deslocamento da pregagem a uma carga constante durante o especifico tempo, assegurando que estas irão suportar as cargas previstas na sua vida. [2]

A validação deste ensaio consiste que o movimento de fluência num período de leituras entre 1 a 10 minutos na carga máxima do ensaio, seja inferior a 1mm ou que o movimento de fluência entre 6 a 60 minutos seja inferior a 2mm para a mesma carga.

- Monitorização

A monitorização deve ser tido em conta em qualquer tipo de estrutura ou solo. A recomendação de uma monitorização do desempenho da estrutura deve ser tido sempre em conta. Esta monitorização é realizada com o auxílio de inclinómetros, extensómetros, células de carga, medidores de pressão ou miras topográficas. [2]

É recomendável a monitorização durante um período aproximadamente de 2 anos apos a conclusão da construção de modo a verificar a deformação da estrutura e a tensão sofrida pelas pregagens em função da carga, tempo e alterações ambientais (ex. ciclos de gelo-degelo). [2]



Source Byrne et al. (1998).

Figura 3.64 - Exemplo de Instrumentação [2]

Na Figura 3.64 está exemplificado alguma instrumentação que se pode utilizar na monitorização de diversos parâmetros, sendo eles [2]:

- Movimentos verticais e horizontais da frente;
- Movimentos particulares ou deterioração dos elementos da frente;
- Drenagem do solo;
- Carga nas pregagens, com especial atenção para a magnitude e localização da carga máxima;
- Distribuição das cargas ao longo da pregagem devido às sobrecargas não expectáveis;
- Variação da carga nas pregagens em função do tempo;
- Carga das pregagem na frente;
- Temperatura;
- Efeitos da chuva nos trabalhos realizados.

### 3.3.3. ENSAIOS NORMATIVOS “IN SITU”

Os ensaios normativos “in situ” são uma ferramenta utilizada pela fiscalização, de modo a garantir que as especificações são cumpridas tal como é definido em projeto. No processo construtivo das pregagens são utilizados alguns ensaios para garantir a conformidade.

No caso dos materiais usados em obra estes devem ser vistoriados de modo a garantir a conformidade com todos os aspetos que possam pôr em causa o seu comportamento esperado. Aos varões a utilizar em pregagens deve ser testado numa proporção conforme o exigido pelas normas.

A calda de cimento a utilizar nas pregagens devem garantir os requisitos segundo os ensaios na norma EN447:

- Ensaio de Fluides
- Ensaio de Exsudação
- Balança Baroid
- Resistência à Compressão Uniaxial

#### 3.3.3.1. Ensaio de Fluides

Este ensaio serve para medir a viscosidade da calda utilizando o conhecido cone de Marsh - Figura 3.65.

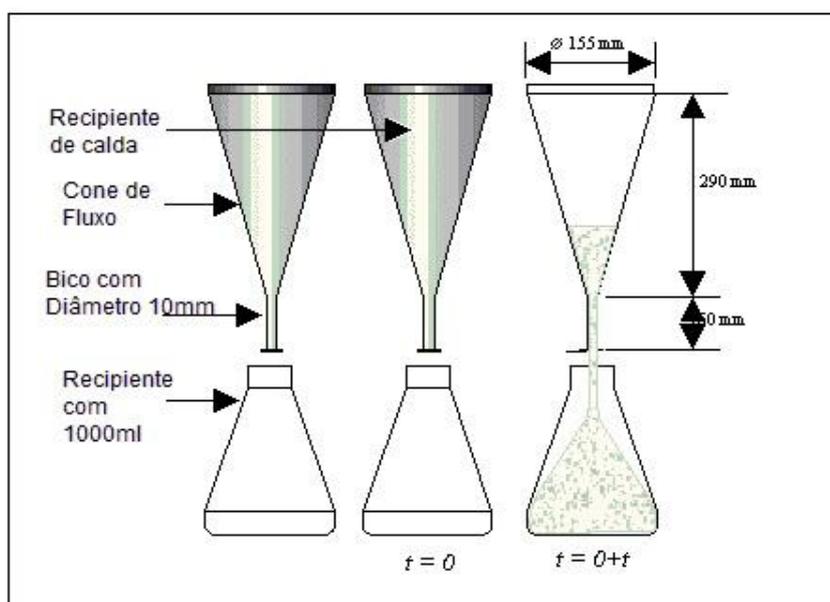


Figura 3.65 - Cone de Marsh

O protocolo deste ensaio é definido em 5 passos:

1. Antes do ensaio deve-se proceder ao humedecimento do cone de Marsh, devendo ter o cuidado de se limpar antecipadamente qualquer resíduo que esteja no orifício do cone ou na grelha de passagem de calda no início do cone;
2. Deve-se proceder ao tamponamento do cone de Marsh e colocação do peneiro com abertura de 1.5mm para evitar eventuais grumos que possam vir na calda de cimento;

3. Proceder ao enchimento do cone de Marsh com aproximadamente 1.7 litros de calda de cimento até à base do peneiro e posterior preparação do cronómetro para iniciar o ensaio - Figura 3.66;
4. Com um recipiente abaixo do orifício inferior do cone de Marsh deve-se retirar o dedo do orifício e iniciar a contagem do tempo simultaneamente;
5. Terminar a contagem do tempo quando o recipiente totalizar 1 litro de calda no seu interior.



Figura 3.66 - Ensaio de Fluidez

No fim do ensaio deve-se proceder à lavagem de todo o material para que não seja de difícil limpeza no ensaio posterior.

A validade deste ensaio é aceite quando se cumpre com os requisitos expostos na Tabela 3.19.

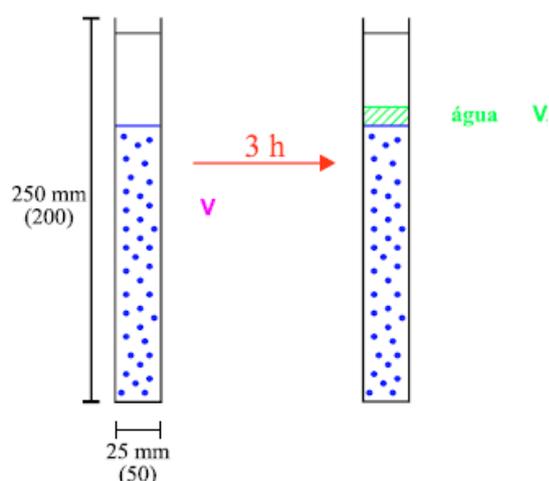
Tabela 3.19 - Resultados Exigidos do Ensaio de Fluidez [26]

Resultados Exigidos	
Tempo de escoamento medida logo a seguir ao fabrico	< 25 segundos
Dois valores medidos 30min após (mantendo entretanto a agitação)	< 25 segundos
À saída da bainha	< 10 segundos

### 3.3.3.2. Ensaio de Exsudação

O ensaio de exsudação baseia-se na medição da quantidade de água que surge à superfície da calda de cimento após 3 horas de imobilização da calda num plano horizontal, sendo evitada a evaporação da água através do tamponamento do orifício do provete. Após a realização do ensaio retira-se o provete da amostra realizada - Figura 3.68. O protocolo de Ensaio é o preconizado abaixo:

1. Deve-se colocar o provete munido de um escala milimétrica numa zona plana, não sujeita a perturbações que possam falsear o ensaio, como por exemplo, vibrações ou outro tipo de condicionante;
2. Deve-se colocar a calda dentro do provete até à marca de 150mm e posterior registo da altura inicial;
3. De seguida deve-se vedar o topo do provete de modo a não permitir evaporação da água - Figura 3.67;
4. Deve-se proceder à leitura após a primeira, segunda e terceira hora após o início do ensaio e registar a altura da calda de cimento



Resultado Pretendido:

$$\frac{V_1}{V} < 2\%$$

Para a proveta de 50mm de diâmetro verter a calda na proveta aproximadamente até a altura de 150mm e proceder como explicado anteriormente.

- até ± 150 mm se Ø50



Figura 3.67 - Provetes de Exsudação



Figura 3.68 - Amostra de Exsudação

### 3.3.3.3. Balança Baroid

A balança de Baroid - Figura 3.69 - é usada para a determinação de uma forma rápida da densidade da calda, sendo um dos requisitos propostos pelos donos de obra devido ao controlo em termos de relação água-cimento. O intervalo de valores de densidades exigidas vai do 1.97 a 2.02 g/cm<sup>3</sup>.

O protocolo de ensaio é composto pelas seguintes fases:

1. Deve-se proceder à limpeza do equipamento com água, de modo a retirar todos os resíduos que possam ter ficado da ultima utilização do equipamento;
2. Coloca-se a calda a ensaiar no recipiente da balança até transbordar;
3. De seguida coloca-se a tampa e calca-se até ficar bem fechada, levando o excesso de calda ter que sair pelo orifício que se situa no meio da tampa;
4. Posteriormente passa-se à limpeza do excesso de calda que se mantém na parte exterior do recipiente, obturando-se o orifício da tampa com o dedo para que não entre água para o seu interior levando a um falseamento dos resultados;
5. Por fim coloca-se a balança no seu suporte e equilibra-se. Quando o equilíbrio for atingido procede-se ao registo da densidade.



Figura 3.69 - Balança de Baroid

### 3.3.3.4. Ensaio à Compressão Uniaxial

O ensaio à compressão uniaxial é realizado em provetes cúbicos com arestas de 10 cm, sendo utilizado para validar a tensão de compressão destes provetes aos 3, 7 e 28 dias.

O protocolo de ensaio é dado pelos seguintes passos:

1. Antes da utilização dos moldes, deve-se lubrificar com óleo ou outro lubrificante, de forma a ser mais fácil a remoção dos provetes dos moldes;
2. Coloca-se a calda nos moldes e coloca-se os moldes num sitio fora do contacto direto do sol;
3. Após 2 dias descofra-se os provetes com o auxilio de ar comprimido, identificando os provetes com a data de fabrico da calda e uma informação adicional de modo a diferenciar de outros provetes em estudo e colocam-se em água - Figura 3.71;
4. Ensaia-se os provetes nas idades recomendadas, registando-se a tensão à compressão uniaxial dos provetes, realizando posteriormente uma gráfico representativo - Figura 3.72 e Figura 3.73.



Figura 3.70 - Colocação da Calda nos Moldes



Figura 3.71 - Descofragem dos Provetes



Figura 3.72 - Prensa de Compressão



Figura 3.73 - Provetes Ensaiaados

## 4. PREGAGENS INSTRUMENTADAS

Neste capítulo inicia-se o estudo aos ensaios de pregagens instrumentadas que foram realizados de modo a avaliar a capacidade resistente utilizando um comprimento de selagem e um comprimento livre, sendo este definido pela utilização de um tubo PVC.

Estas pregagens instrumentadas foram realizadas no Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida (AHRE), no âmbito do protocolo com a RODIO Portugal, SA que forneceram os equipamentos e a mão-de-obra necessária de modo a garantir a execução, para que se caracteriza-se o seu comportamento.

Os ensaios realizados tiveram como princípio a realização de 2 pregagens munidas com extensómetros de corda vibrante, de modo, a verificar a extensão dos varões de aço em zonas de maior importância com a finalidade de analisar a tensão de corte efetivamente mobilizada ao longo do seu comprimento.

### 4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ZONA DOS ENSAIOS

A localização do local a ensaiar no AHRE, teve como base 3 fatores:

- Num local com espaço suficiente para ensaiar 2 pregagens com diferentes comprimentos (4 e 5 metros);
- Numa zona que não fosse de importância relevante para a obra e que não impedisse o normal desenrolar dos trabalhos;
- Em solo residual de Granito.

O local adotado foi no eixo 12 da Barragem de Ribeiradio, sendo um zona de acesso da margem direita da mesma sendo visível a sua localização na Figura 4.3. O local foi escolhido com a colaboração do Doutor Eric Mendes, Geólogo da Rodio - Figura 4.1 - sendo caracterizado por uma zona em solo residual de Granito até à profundidade adequada ao comprimento das pregagens a ensaiar - Figura 4.2.



Figura 4.1 - Detecção de Solo Residual de Granito



Figura 4.2 – Face do Solo Residual de Granito

A definição da posição a instalar as pregagens foi aleatória tendo sido o único fator relevante a colocação destas em solo residual de granito. Na Figura 4.4 está representada a posição das pregagens, sendo que a pregagem nº 2 se situa numa posição ligeiramente superior à da pregagem nº 4.

A análise do terreno acima das pregagens é de alguma forma relevante para os modelos numéricos que se realizam no Capítulo 6, tendo uma inclinação de cerca de 20° com a horizontal, com uma altura aproximada de 3 a 4 metros e com uma vegetação densa após o talude sendo visível na Figura 4.4.



Figura 4.3 - Localização da pregagem no AHRE



Figura 4.4 - Identificação das Pregagens

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PREGAGENS A ENSAIAR

As pregagens inseridas no âmbito destes ensaios foram realizadas com os materiais apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Materiais das Pregagens Instrumentadas

Materiais	
Aço	GEWI – Diâmetro: 32mm
Cimento	CEM II/B-L 32,5N
Superplastificante	Rheobuild 561

Na implantação das pregagens foram atribuídos comprimentos totais, livres e de selagem de acordo com as condicionantes que poderiam surgir no terreno a ensaiar como por exemplo a alteração do maciço levando a um tipo de material diferentes propriedades do definido.

As pregagens a instrumentar tiveram a numeração abaixo definida, devido à realização em simultânea de outras duas pregagens com a numeração de 1 e 3 sendo que estas localizaram-se noutra local, com características geotécnicas diferentes das realizadas nesta dissertação.

Estas pregagens foram efetuadas com um comprimento livre definido por um tubo de PVC, em que a sua função foi de isolar o elemento de reforço da selagem não criando tensões entre a calda de selagem e o aço diminuindo assim o atrito entre estes elementos - Figura 4.5.



Figura 4.5 - Pregagem instrumentadas

As pregagens em estudo foram definidas em pontos que se pudessem ser influenciados sendo que em outros aspetos como a idade do ensaio foram condicionados pela altura mais oportuna de modo a evitar perturbações ao normal desenvolvimento da obra. Sendo assim na Tabela 4.2 estão descritos os comprimentos totais, livre e de selagem realizados nas pregagens, tal como a geologia onde se efetuou os ensaios e o numero de extensómetros a utilizar em cada pregagem.

Tabela 4.2 -Características das Pregagens

Pregagem	Comprimento Total [m]	Comprimento Livre [m]	Comprimento Selagem [m]	Geologia	Idade do Ensaio	Relação A/C	Nº Extensômetros
Nº 2	4	1,5	2,5	Solo	8	0,3	4
Nº 4	5	2	3	Residual Granito	3		5

Sendo assim na Tabela 4.3, estão definidas as datas em que se realizou o processo até à sua finalização com a realização dos ensaios propriamente dito. Em forma de síntese, nota-se que o processo para a pregagem nº 2 teve uma duração de 23 dias e a pregagem nº 4 uma duração de 8 dias.

Tabela 4.3 - Calendarização das Pregagens em Estudo

	Montagem	Colocação no Furo	Selagem	Ensaio
Pregagem 2	27-04-2012	11-05-2012	11-05-2012	19-05-2012
Pregagem 4	24-05-2012	29-05-2012	29-05-2012	01-06-2012

### 4.3. PROCESSO CONSTRUTIVO DAS PREGAGENS INSTRUMENTADAS

#### 4.3.1. FASEAMENTO CONSTRUTIVO

O processo construtivo das pregagens instrumentadas envolveu fases de preparação diferentes das comuns pregagens realizadas no AHRE, envolvem várias fases de modo a garantir uma correta instalação dos equipamentos.

A instrumentação é composta por várias fases, que definem, a colocação dos diversos elementos que compõe uma pregagem deste tipo, sendo elas:

1. Corta-se o varão de Aço (GEWI) ao comprimento preconizado (Pregagem nº 2: 4m e Pregagem nº 4: 5m)
2. Coloca-se a pregagem num suporte de sustentação adequado, isto é, apoiado em cavaletes, de forma a proporcionar uma boa ergonomia para o trabalhador;
3. Procede-se à medição do comprimento de selagem (Pregagem nº 2: 2,5m e Pregagem nº4: 3m) e comprimento livre (Pregagem nº 2: 1,5m e Pregagem nº 4: 2m) pré-definidos e coloca-se o tubo de PVC que irá definir o comprimento livre - Figura 4.6;



Figura 4.6 - Definição dos comprimentos de selagem e livre

- De seguida, define-se a zona aonde se deve implementar os extensómetros de corda vibrante e proceder-se à soldagem dos apoios que fazem a ligação entre os extensómetros e o varão de aço - Figura 4.7. Posteriormente à soldadura, retifica-se os apoios de modo a terem a menor espessura possível;



Figura 4.7 - Soldagem dos Apoios dos Extensómetros

- Depois da soldagem dos apoios deve-se proceder à instalação dos extensómetros de uma forma cuidada de forma a garantir que estes fiquem fixos de uma forma permanente ao varão - Figura 4.8;



Figura 4.8 - Instalação dos Extensómetros

- Verificação com um instrumento de leitura de modo a aferir que os extensómetros estão no valor de período de referência exposto na Tabela 4.5 - Figura 4.9;



Figura 4.9 - Unidade de Leitura dos Extensómetros

7. Colocação de uma proteção em tubo PVC dos extensómetros, para evitar possíveis toques indesejáveis que possam danificar o equipamento e posterior isolamento com fita filamentada. De referir que esta proteção no comprimento de selagem só se efetuou na parte superior dos extensómetros, sendo que a parte inferior esteve sempre em contacto com a calda de selagem - Figura 4.10;



Figura 4.10 - Colocação da Proteção dos Extensómetros

8. Nova medição dos valores de período dos extensómetros;
9. Coloca-se o tubo de injeção de calda de modo a servir de centralizador para uma correta proteção do elemento de reforço (varão) contra a corrosão, com a ressalva de se colocar o tubo a passar ao lado dos extensómetros de modo a diminuir a espessura da pregagem - Figura 4.11;



Figura 4.11 - Tubo de Injeção e cabo elétrico do extensómetro

10. Por fim, é injetada espuma expansiva, que obture todos os orifícios que possam ser uma entrada para a calda na zona do comprimento livre, de modo a tornar o comprimento livre imune de calda - Figura 4.12.



Figura 4.12 - Espuma Expansiva

#### 4.3.2. ELEMENTOS DE LEITURA

##### 4.3.2.1. Extensômetros

Os extensômetros de corda vibrante - Figura 4.13 - utilizados nos ensaios pertencem à empresa Gage Technique International, Ltd. Estes extensômetros são instrumentos muito sensíveis que são utilizados para analisar as deformações em estruturas de betão ou de aço. [27] Este equipamento é composto por duas bobinas eletromagnéticas situadas em cada base dos extensômetros emitindo uma excitação ao fio de aço que está sob tensão no seu interior convertendo as vibrações desse fio de aço num sinal de frequência tendo em conta o seu comprimento. Posteriormente utilizando o Período de vibração da corda de aço como dado de extração do aparelho de leitura, podendo ser posteriormente traduzidos para microextensão ( $10^{-6}$  da extensão) dada pela fórmula 4.1) [28].

$$\mu\varepsilon = \left( \frac{10^{14}}{T_1^2} - \frac{10^{14}}{T_2^2} \right) \times GF \quad 4.1)$$

Sendo:

- $\mu\varepsilon$  – Microextensão
- $T_1$  – Período Inicial
- $T_2$  – Período de Leitura Posterior
- $GF$  – Fator corretivo apropriado do extensómetro ( $3.025 \times 10^{-3}$ )

Ou a partir da frequência que será dada por:

$$\mu\varepsilon = (F_1^2 - F_2^2) \times GF \quad 4.2)$$

Sendo:

- $\mu\varepsilon$  – Microextensão
- $F_1$  – Frequência inicial
- $F_2$  – Frequência de leitura posterior
- $GF$  – Fator corretivo medidor apropriado ( $3.025 \times 10^{-3}$ )

Estes instrumentos de leitura são ainda munidos de um sensor de temperatura de modo a avaliar a variação da extensão devido à variação térmica. A temperatura é convertida através dos valores em Ohms para Celsius através da fórmula 4.3):

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{1}{(0.0014051 + 0.0002369 \times \ln(T[\text{Ohm}]) + 0.0000001019 \times \ln(T[\text{Ohm}])^3) - 273.15} \quad 4.3)$$



Figura 4.13 - Extensómetros de Corda Vibrante - TSR/5.5/T [28]

Através destes extensómetros de corda vibrante não só se obtém o período resultante da vibração da corda de aço que está incorporada como também a temperatura sendo uma das grandezas a ser medidas através de uma resistência na bobine. Esta resistência têm a capacidade de atingir um intervalo de 100 ohms de leitura podendo levar a um intervalo de temperaturas entre os -20°C e os 80°C - Tabela 4.4. [28]

Tabela 4.4 - Especificações dos extensómetros [28]

Características	
Tipo de extensómetro	TSR/5.5/T
Comprimento	134 mm
Intervalo de leitura	Superior a 3000 µε
Resolução	Melhor que 1 µε
Coefficiente térmico da corda vibrante	11 ppm por 0°C
Sensor de temperatura	3000 ohms @ 25°C
Diâmetro do cabo intermédio	4.5 mm

A Gauge Technique Ltd recomenda através da ficha técnica do produto uma gama de valores apropriados - Tabela 4.5 - para a sua medição, de modo, a garantir que a corda vibrante esteja num grau de tensionamento intermédio, de forma a não atingir rapidamente a rotura, nem por tração nem por compressão, levando a uma correta leitura na altura dos ensaios.

Tabela 4.5 - Intervalo de Leitura dos Extensómetros [28]

	Período	Frequência	Resolução	
			GT1174	GT1192
Limite Superior	8500	1176,0	0,98	0,71
Valor de Referência	10590	944,29	0,51	0,06
limite Inferior	16000	625,00	0,15	0,04

A instalação dos extensómetros teve em conta as secções onde o estudo do desenvolvimento da extensão teria maior relevância, ou seja, na zona de comprimento livre, na transição entre o comprimento livre e o comprimento de selagem e ao longo do comprimento de selagem definindo-se o ultimo extensómetro sempre a meio metro do fim da pregagem devido ao valor da tensão de corte ser nula no final da pregagem.

A visualização dos comprimentos realizados na pregagem nº2 e pregagem nº 4 podem ser visíveis no Anexo 4.

A leitura destes dispositivos foi realizada em diversas fases do processo, podendo ter algum efeito relevante para possíveis alterações para a variação do período de referência, ou seja, no fim da instalação dos extensómetros, na posterior colocação da proteção, antes da colocação no furo devido ao transporte e assim sucessivamente como definido.

Tabela 4.6 - Leituras dos Extensómetros - Fase Preparação e Colocação no Furo - Pregagem nº2

Período	Instalação dos Extensómetros	Após Proteção dos Extensómetros	Antes da Colocação no Furo	Após Colocação no Furo	5 minutos após Colocação no Furo
Extensómetro 1	10800	10760	10604	10613	10637
Extensómetro 2	10500	10500	10103	9955	9711
Extensómetro 3	10600	10500	10071	10545	10634
Extensómetro 4	9960	9980	9810	9782	9786

Tabela 4.7 - Leituras dos Extensómetros - Fase Preparação e Colocação no Furo - Pregagem nº4

Período	Instalação dos Extensómetros	Após Proteção dos Extensómetros	Antes da Colocação no Furo	Após Colocação no Furo	5 minutos após Colocação no Furo
Extensómetro 1	10800	11030	11146	16858	16857
Extensómetro 2	10600	10960	10688	11000	11000
Extensómetro 3	10500	10555	10468	9615	9614
Extensómetro 4	10220	10275	10376	9823	9824
Extensómetro 5	10205	10286	10594	10375	10374

Os valores referentes ao extensómetro 1 da pregagem nº 4 na fase posterior à colocação da pregagem no furo, teve um significativo aumento do valor do período, sendo que este tenha ficado com um valor próximo do limite inferior recomendado pelo fabricante como está ilustrado na Tabela 4.7. Este acréscimo pode ficar-se a dever a zonas do furo onde o extensómetro tenha estado contacto com o solo devido ao tubo centralizador reduzir a folga existente na parte inferior da pregagem, fazendo com que esta fique muito justa.

#### 4.3.2.2. Defletómetros

Nestes ensaios utilizaram-se 2 tipos de defletómetros:

- Defletómetro de Estilete
- Defletómetro de Roldana

O Defletómetro de Estilete é usado para a medição dos deslocamento da chapa que se situa entre o solo e o macaco hidráulico, de forma a registar os deslocamentos do solo no momento de aplicação de carga do macaco. A deformação ou deslocamento é medido a partir da extensão ou retração do estilete levando a ser visível no amostrador , que neste caso é manual, do deslocamento medido. O certificado de calibração deste equipamento está no Anexo 3.



Figura 4.14 - Defletómetro de Estilete [1]

No caso do Defletómetro de Roldana, este é usado para medir os deslocamentos na “cabeça” do varão de aço, de forma a registar os deslocamentos à medida que é aplicado a força de arranque. Para a aplicação nestes ensaios, e tendo em conta que é um equipamento com muito sensibilidade, teve-se em atenção que este equipamento teria de ser calibrado devido ao excessivo uso em obra na realização de ensaios prévios e de receção podendo levar a um erro de medição – Anexo 3. De referir ainda que estes aparelhos de leitura conseguem ter uma resolução de 0.1 mm [1], sendo no caso do Defletómetro de Roldana os valores a registar surgem de uma forma digital, evitando assim, eventuais erros de leitura.



Figura 4.15 - Defletómetro de roldana

#### 4.3.2.3. Macaco Hidráulico BVA/HDC10003

O Macaco Hidráulico utilizado para a aplicação da carga nestes ensaios é um BVA sendo o modelo HDC10003. Este macaco hidráulico é caracterizado por macaco de duplo efeito e é acionado com o auxílio de uma bomba injetora, que injeta no macaco óleo, levando a um aumento de pressão no interior do macaco e respetivo aumento da carga axial.

O controlo da carga aplicada é feito a partir de um manómetro que é acoplado junto da entrada/saída de óleo do macaco. No manómetro é visível a aplicação de uma pressão em bars, em que é correlacionado com a carga a partir de formulas adquiridas quando o macaco for calibrado. Esta calibração é realizada em instituições de referencia como o LNEC – Anexo 3.



Figura 4.16 - Macaco BVA/HDC 10005

- Fórmula de Calibração de Força para a Pressão

$$X_i = 2,7284 + 6,99157 \times 10^{-1} \times F + 9,15033 \times 10^{-6} \times F^2 - 9,18158 \times 10^{-9} \quad 4.4)$$

Seja:

- $X_i$  = Pressão (bars)
- $F$  = Força (kN)

- Fórmula de Calibração de Pressão para Força

$$F = -3,90315 + 1,43044 \times X_i - 2,69102 \times 10^{-5} \times X_i^2 + 3,80301 \times 10^{-8} \times X_i^3 \quad 4.5)$$

Seja:

- $X_i$  = Pressão (bars)
- $F$  = Força (kN)

Tabela 4.8 - Especificações do Macaco Hidráulico

Especificações do Macaco BVA/HDC10003	
Capacidade do Macaco	100 toneladas
Capacidade máxima de Tração do cilindro	71 toneladas
Capacidade de óleo Pull	42,37 cm
Altura prolongada	13,00 cm
Pressão máxima	10.000 psi / 700 bar
Peso	51,4 kg

#### 4.4. FURAÇÃO

A furação foi realizada através do equipamento ROC LM500C, usando varas T45 acopladas a um bit de 76 mm para a pregagem de 4 m e um bit de 89 mm para a pregagem de 5 m. Inicialmente foi projetado para se colocar ambas as pregagens em furos de 76 mm o que sucedeu com a pregagem de 4 m enquanto que na pregagem de 5m realizou-se uma furação de 76 mm mas devido à existência de água no interior do furo pode ter levado à cedência do solo obturando o furo sendo que a pregagem 4 que tinha uma largura máxima de aproximadamente 70 mm, não se conseguiu introduzir no furo levando ter que se realizar um furo de 89 mm (o diâmetro imediatamente acima) para a sua colocação.

A furação foi realizada com o registo dos parâmetros abaixo fornecidos pelo equipamento de furação, que serão identificados mais à frente, fazendo-se uma análise empírica da evolução dos parâmetros correlacionando-os com possíveis problemas que poderiam surgir durante a furação.



Figura 4.17 – Furação em Ribeiradio



Figura 4.18 - Manómetros de Leitura - LMEAC LM500-C

Durante a furação não se detetou nenhuma anomalia nem perda de ar. Para uma melhor compreensão do estado do solo procedeu-se à leitura do tempo de furação a cada metro furado a fim de verificar a velocidade de furação para que pudéssemos correlacionar a profundidade com os parâmetros disponibilizados na equipamento de furação sendo eles:

- Pressão de furação do martelo,
- Rotação ou torque
- Avanço
- Pressão do ar

As medições destas características do ROC LMEAC-500C foram efetuadas em intervalos de 30 segundos sendo que na pregagem de 4 metros devido à duração de furação ser inferior a 90 segundos procedeu-se à leitura no final da furação.

A pressão do martelo como o nome indica é a pressão que o martelo (de superfície) realiza nas varas e respetivo bit de furação. A rotação ou torque é a rotação que as varas realizam para a realização da furação. O avanço é uma característica controlada pelo manobrador, que por experiência própria entende que determinado tipo de solo poderá ter um avanço mais lento ou mais rápido, podendo ser diminuído devido à heterogeneidade do solo. Por fim a Pressão do ar é o ar disponibilizado para limpeza do furo podendo ocorrer perda de ar o que significa que o furo têm fissuração que pode levar a outro furo.

4.4.1. PREGAGEM Nº2

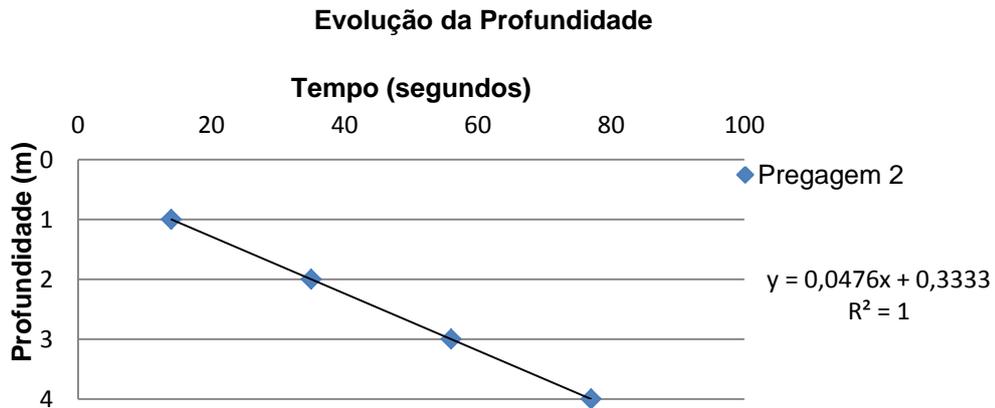
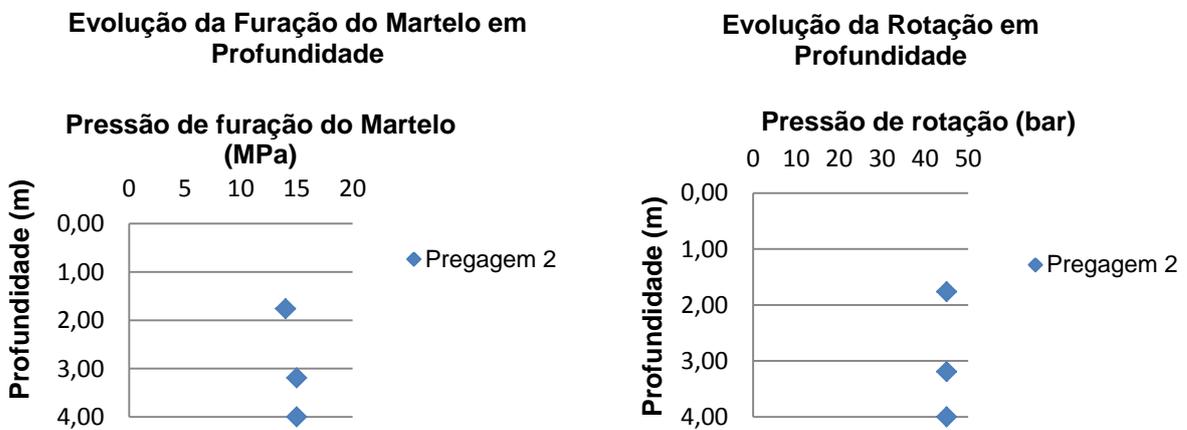


Figura 4.19 – Evolução da Profundidade de Furação- Pregagem 2



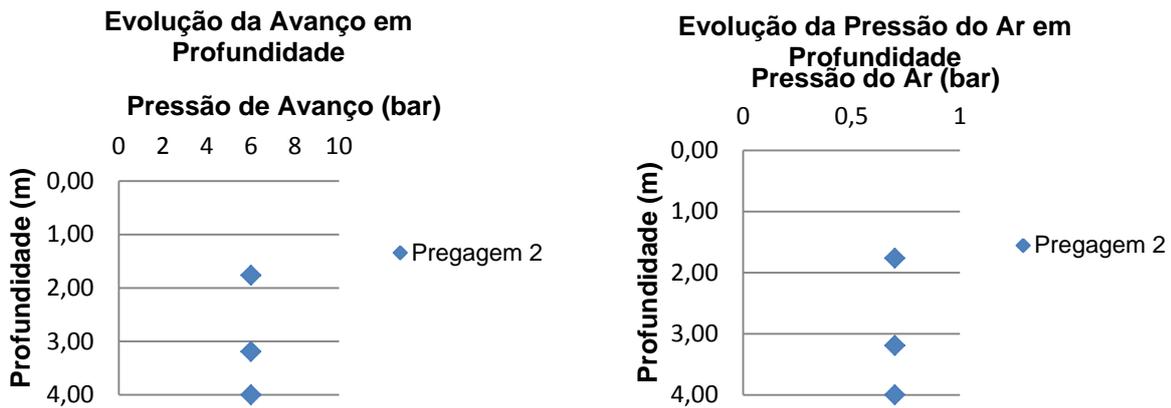


Figura 4.20 - Evolução das Características do ROC LM500C – Pregagem 2

Na evolução da profundidade da pregagem 2 não se detetou nenhuma anomalia, nem abrandamento na furação sendo visível na Figura 4.19, onde se procurou usar uma linha de tendência com o coeficiente de correlação mais ajustado chegando mesmo a atingir o valor máximo de correlação, valor 1. Em relação às características da Perfuradora, pode-se dar relevância ao aumento da pressão de furação do martelo a partir dos 2 metros dos 14 MPa para os 15 MPa podendo ter surgido uma zona mais compactada de solo residual de granito. Em relação às outras características mantiveram-se constantes sendo que a pressão de rotação no valor 45bars, o avanço nos 6bars e o ar nos 0,7bars - Figura 4.20.

#### 4.4.2. PREGAGEM Nº4

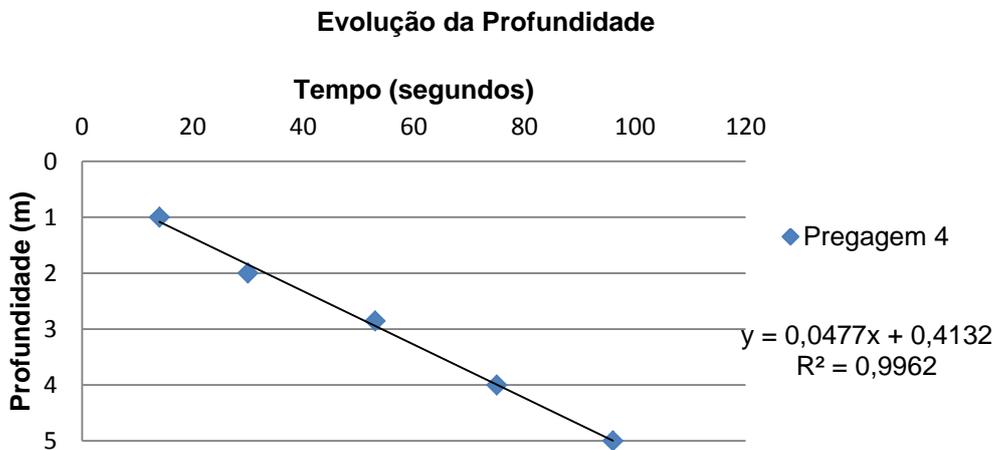


Figura 4.21 - Evolução da Profundidade de Furação - Pregagem 4

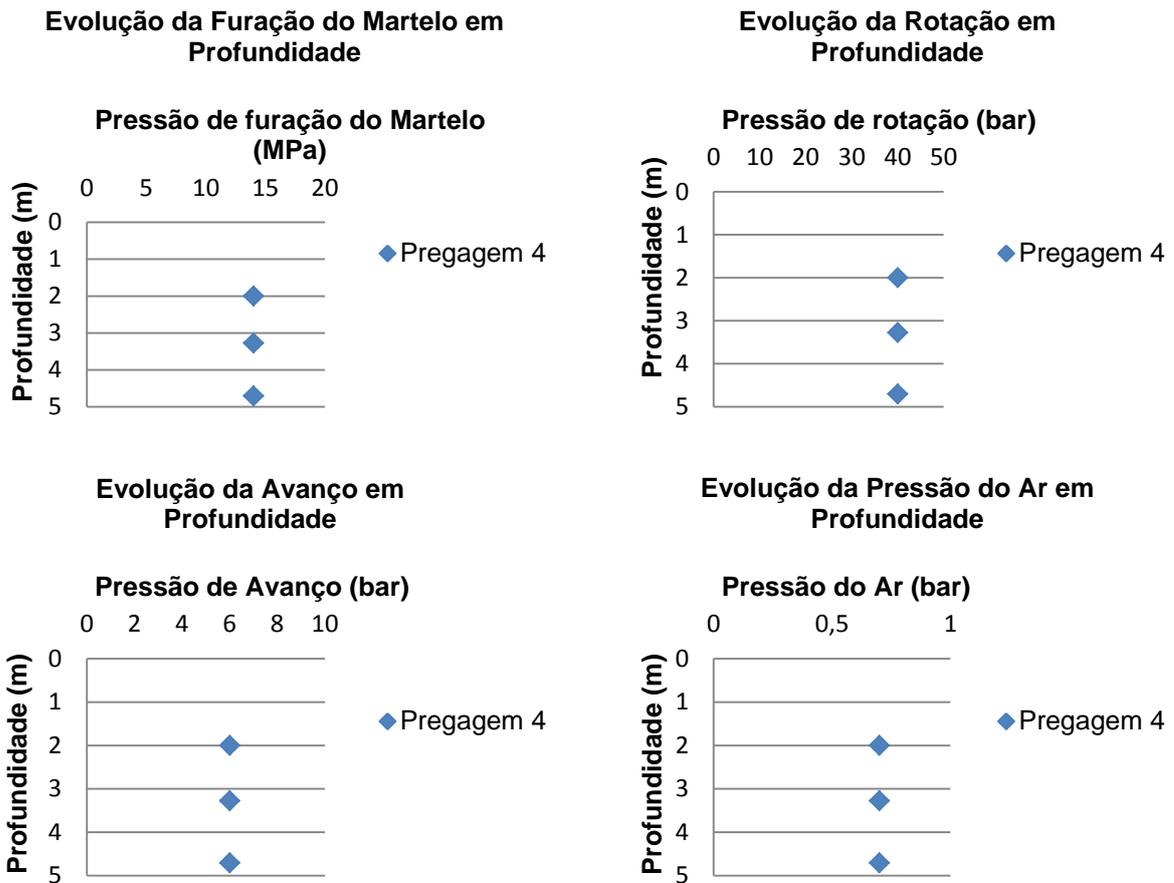


Figura 4.22 - Evolução das Características do ROC LM500C – Pregagem 4

No processo de furação da pregagem nº4, não houve nenhuma adversidade tendo sido um processo contínuo como se pode verificar pelo gráfico da Figura 4.21 e pelos gráficos da Figura 4.22. Podemos ainda verificar que os valores do processo de furação da pregagem nº 2 são idênticos aos da pregagem nº4 verificando-se assim que o tipo de solo não variou, sendo esta suposição meramente com base nas características fornecidas pelo equipamento de furação.

#### 4.5. SELAGEM

##### 4.5.1. MATERIAIS

A selagem definida foi realizada pela central de betão definida em 3.2.4.4 usando o Cimento CEM II\B-L 32.5N e o superplastificante definido em 3.2.3.4. A relação Água/Cimento usada para ambas pregagens foi de 0,3, sendo utilizados cerca de 160 kg de cimento (4 Sacos de 40 Kg) e a correspondente relação de água, ou seja, cerca de 48 litros de água sendo que foi adicionado 0,99 litro do Superplastificante.

Tabela 4.9 - Quantidades da Calda de Cimento

Cimento (Kg)	Água (litros)	Superplastificante (Rheobuild561) (litros)
160	48	0,99

Através da Tabela 4.10 em que traduz a diferença de volume de calda teórica, em que é obtido através do volume do furo teórico sem o varão de aço e o volume de calda utilizado chegando a uma percentagem por excesso de 62,7% para a pregagem nº 2 e de 40,1% para a pregagem nº 4

Tabela 4.10 – Volumes Teóricos vs Volumes Injetados

	Volumes	
	Pregagem nº 2	Pregagem nº 4
Volume do Aço	3,22 dm <sup>3</sup>	4,02 dm <sup>3</sup>
Volume Teórico s/Aço	18,15 dm <sup>3</sup>	31,11 dm <sup>3</sup>
Volume Teórico c/Aço	14,93 dm <sup>3</sup>	27,09 dm <sup>3</sup>
Volume Injetado <i>In Situ</i>	40,02 dm <sup>3</sup>	46,60 dm <sup>3</sup>
Volume em excesso	25,09 dm <sup>3</sup>	19,51 dm <sup>3</sup>

Este excesso de calda de cimento pode ser 2 hipóteses que apesar de serem suposições, são as mais prováveis de serem a causa:

1. Devido à existência de fissuras no solo que podem levar ao aumento do consumo da calda tornando o solo em redor com uma resistência mais elevada, devido à ocupação dessas fissuras com a calda - Figura 4.23.



Figura 4.23 - Existência de Fissuras no Solo

2. Devido à vibração das varas devido à rotação com a percussão em contacto com o solo quando se efetua a furação pode levar a um aumento da secção, correspondendo a um aumento do consumo de calda.

Na pregagem nº 2, admitindo que o volume de calda injetado *in situ* - Tabela 4.11 - é para preencher somente o furo não havendo fissuras, efetuou-se os cálculos para determinar o aumento de secção através das fórmulas 4.6) e 4.7) como abaixo se pode visualizar.

Tabela 4.11 – Volumes efetivos – Pregagem nº 2

Volumes	
Volume injetado	40,02 dm <sup>3</sup>
Volume do varão de aço	3,2 dm <sup>3</sup>
Volume real injetado	36,8 dm <sup>3</sup>

$$Volume\ Real\ Injetado = Comprimento\ do\ Furo \times (Área_{Furo} - Área_{Varão\ de\ Aço}) \quad 4.6)$$

$$36,8 \text{ litros} = 40 \text{ dm} \times \left( \pi \times \left( \frac{\text{Diâmetro}_{\text{Furo}}}{2} \right)^2 - \pi \times \left( \frac{0,032}{2} \right)^2 \right) \Leftrightarrow \text{Diâmetro}_{\text{Furo}} = 1,131 \text{ dm} \\ = 113,1 \text{ mm}$$

$$\text{Acréscimo de Secção} = \text{Area Após a Furação}_{\text{Furo}} - \text{Area Teórica}_{\text{Furo}} \quad 4.7)$$

$$\text{Acréscimo de Secção} = 113,1 - 76 = 37,1 \text{ mm}$$

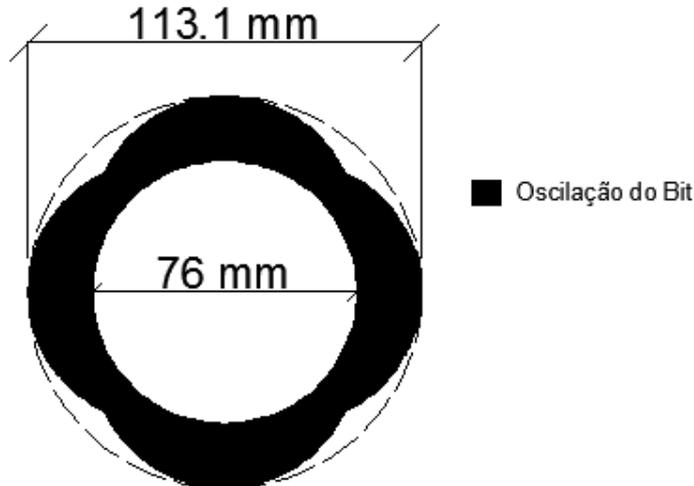


Figura 4.24 - Aumento da Secção devido à Oscilação das Varas de Furação

3. Por fim uma última hipótese poderá ficar a dever-se com a pouca capacidade resistente do solo, fazendo com que a pressão de ar usada pelo equipamento de perfuração para a limpeza do furo leve a uma deteriorização do solo levando a um aumento do diâmetro do furo.

Através do diferencial entre o diâmetro do furo – 76 mm – e o diâmetro do furo que posteriormente se verificou – 113,1 mm – levando a um acréscimo de secção como é realizado na fórmula 4.7) de cerca de 37,1mm, resultando assim em 18,55 mm de oscilação para cada lado em relação ao centro do furo teórico - Figura 4.24.

Estes valores de oscilação são de certa forma muito aceitáveis para o tipo de maquinaria que costuma realizar a furação. A determinação da temperatura é uma das características físicas que são medidas a quando da amassadura.

#### 4.5.2. ENSAIOS NORMATIVOS

A selagem das pregagens em estudo foi realizada a temperaturas medianamente a elevadas, não sendo aconselhável a utilização de caldas em que a temperatura seja superior a 35°.

Tabela 4.12 - Temperaturas durante as Selagens

Pregagem	Temperatura (°C)			
	Ambiente	Água	Cimento	Calda
2	26,9	25	33,5	32,7
4	28,4	25,4	36,6	34,5

Durante a selagem das pregagens, procedeu-se à realização dos ensaios normativos do Cone de Marsh, Balança de Baroid e Exsudação sendo apresentados os resultados na Tabela 4.3

Tabela 4.13 - Características Físicas da Calda de Selagem - Pregagem nº2 e Pregagem nº4

Pregagem	Densidade	Viscosidade	Exsudação						
			Hora Inicial	1H	2H	3H	L. Início	% exs 2h	% exs 3h
2	2,03	21,66	18:15	23,0	23,0	23,0	23,1	0,43	0,43
4	1,98	16,43	15:52	26,7	26,7	26,7	26,6	0,37	0,37

A exsudação diminui cerca de 1 mm atingindo um valor de cerca 0.4% inferior ao limite de 2% cumprindo assim todas as condições.



Figura 4.25 - Ensaio de Exsudação - Pregagem 2

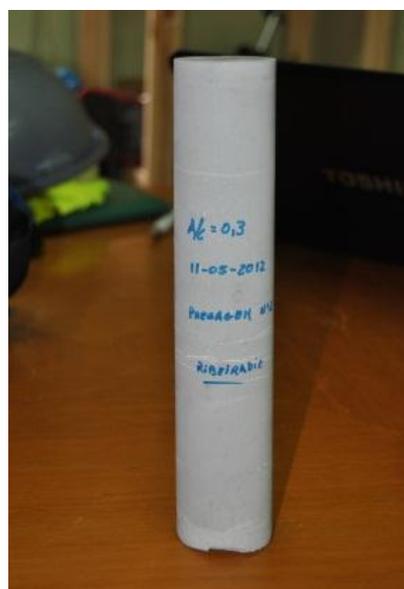


Figura 4.26 - Provette da Exsudação - Pregagem 2

A densidade foi realizada pela balança Baroid e foi atingida com um valor dentro do intervalo de conformidade proposto no AHRE que se situa de 1,97 a 2,02. A viscosidade de ambas as pregagens esteve abaixo dos 25 segundos sendo o limite de tempo proposto para validação da fluidez da calda a usar.

Já no caso da Exsudação - Figura 4.25 – os resultados foram positivos, havendo um abaixamento da calda de cerca de 1mm nas duas pregagem originando percentagens de exsudação próximas dos 0,4% muito inferior aos 2% estabelecidos. Após a exsudação retirou-se os provetes e registou-se a data de realização do ensaio e respetiva localização como se pode ver na Figura 4.26.



Figura 4.27 - Balança de Baroid – Pregagem 2



Figura 4.28 - Cone de Marsh - Pregagem 2

Os ensaios à compressão simples de provetes cúbicos com 10 cm de aresta foram realizados em moldes apropriados - Figura 4.29 – em que se teve a preocupação de untá-los com gásóleo para uma fácil remoção do cubos sem os danificar. Foram realizados 2 provetes para cada idade de ensaio (3, 7 e 28 dias) sendo que foram realizados mais 4 provetes por questões de segurança podendo ocorrer algum problema com os provetes de ensaio.

Estes provetes cúbicos atingirão as resistências apresentadas na Tabela 4.14 abaixo apresentada, sendo possível prever a resistência no prazo dos 28 dias seguintes à selagem através de uma linha de tendência logarítmica como é visível na Figura 4.31.



Figura 4.29 - Provetes cúbicos nos moldes -  
Pregagem 2



Figura 4.30 - Ensaio à Compressão Uniaxial

Tabela 4.14 - Resultados dos Ensaios à Compressão Uniaxial - Pregagem 2 e Pregagem 4

Pregagem	Provetes	Idade [Dias]	Data	Resistência à Compressão Uniaxial [MPa]	Resistência à Compressão Uniaxial Média [MPa]
2	2.1	3	14-05-2012	48,2	44,35
	2.2		14-05-2012	40,5	
	2.3	7	18-05-2012	48,9	47,55
	2.4		18-05-2012	46,2	
	2.5	28	08-06-2012	54,3	57,95
	2.6		08-06-2012	61,6	
4	4.1	3	01-06-2012	37,8	39,45
	4.2		01-06-2012	41,1	
	4.3	7	05-06-2012	43,0	48,50
	4.4		05-06-2012	54,0	
	4.5	28	26-06-2012	57,1	61,6
	4.6		26-06-2012	66,1	

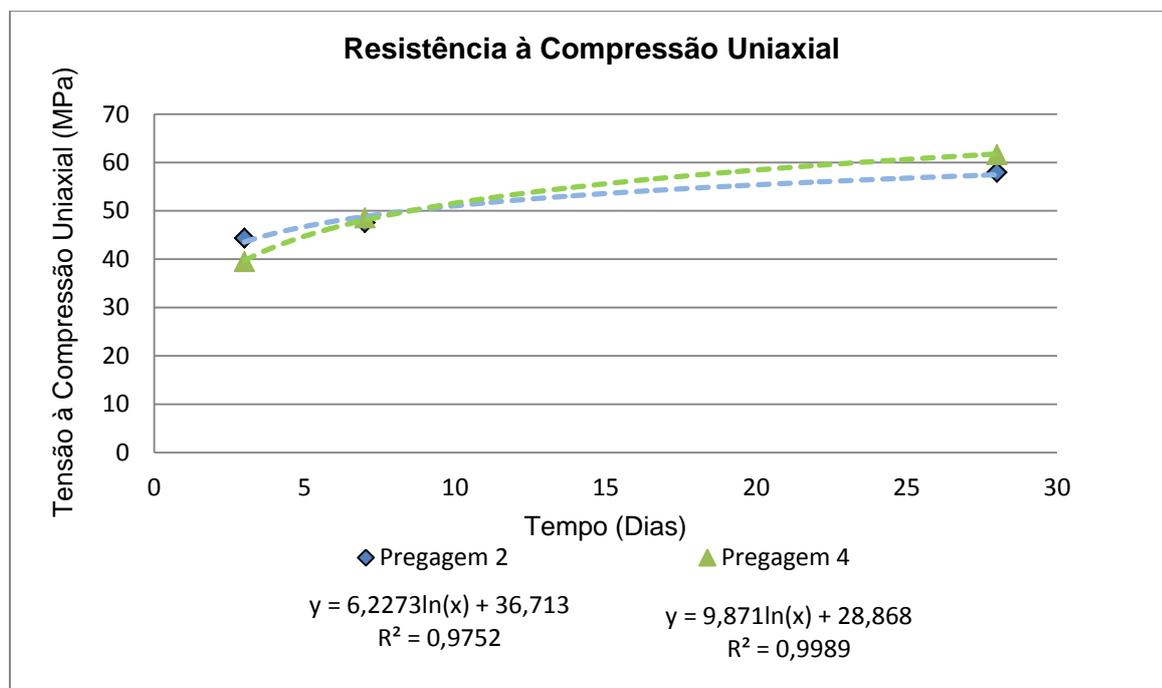


Figura 4.31 - Previsão da Resistência à Compressão Uniaxial dos Provetes Cúbicos – Pregagem 2 e 4

O processo de selagem leva a que haja uma alteração do comportamento da pregagem e do solo envolvente podendo levar a uma alteração dos valores dos extensómetros em utilização, devido a isso realizou-se a leitura dos extensómetros de modo a verificar se os valores não se afastavam em demasiado dos valores anteriormente fixados - Tabela 4.15 e Tabela 4.16.

Tabela 4.15 - Leitura dos Extensómetros - Selagem – Pregagem nº 2

Período	Antes da Selagem	Após a Selagem
Extensómetro 1	10507	10465
Extensómetro 2	9860	9887
Extensómetro 3	10145	10102
Extensómetro 4	9800	9826

Tabela 4.16 - Leitura dos Extensómetros - Selagem – Pregagem nº 4

Período	Antes da Selagem	Após a Selagem
Extensómetro 1	16300	16318
Extensómetro 2	11000	10947
Extensómetro 3	9647	9637
Extensómetro 4	9862	9811

## 4.6. ENSAIOS

### 4.6.1. PROTOCOLO DE ENSAIO

O protocolo de ensaio foi definido tendo em conta a utilização dos extensómetros de corda vibrante teve-se em atenção várias situações que poderiam ser analisadas através da utilização destes equipamentos, como por exemplo, vários patamares de fluência em várias cargas aplicadas.

Estes ensaios foram realizados para levar as pregagens atingir a rotura ou seja sacrificiais, assim sendo foram utilizadas cargas de elevado valor.

1. Foi admitido que a carga de rotura seria a correspondente à carga de rotura do varão GEWI com diâmetro 32, ou seja, 400 kN;
2. A carga inicial (P0) corresponde a 10 % da carga de rotura, sendo assim terá um valor de cerca de 40 kN;
3. Os incrementos de carga adotados são de 5kN, de forma a registar-se os deslocamentos do êmbolo e da chapa imediatamente após a estabilização da carga (T0) e a respetiva leitura de cada extensómetro e ao fim de 1 minuto (T1);
4. Foram realizados patamares de fluência aos 100 kN, 200 kN, 250 kN, 300 kN e de 25 kN em 25 kN até à suposta tensão de rotura, sendo que estes patamares de fluência caracterizam-se pelo registo das leituras dos defletómetros e extensómetros no momento de estabilização da carga, ao fim de 1, 2, 5, 10 e 15 minutos.

De referir ainda que na pregagem nº 4 foi realizado algumas alterações no protocolo de ensaio procedendo-se a um intervalo de descarga quando se atingiu a carga de 250 kN. Essa descarga foi de uma forma faseada realizando-se nos patamares de 223,6, 200, 162,5, 138,2, 120,6 e 98,7 kN a leitura dos defletómetros e extensómetros para as respetivas descargas de modo a aferir os deslocamentos do êmbolo e da chapa. O procedimento de recarga até ao valor máximo atingido até então (250 kN) foi realizada em incrementos de carga de 10 em 10 kN procedendo à leitura dos defletómetros e extensómetros somente no instante imediato de estabilização da carga (T0), após atingir os 250 kN procedeu-se ao normal desenrolar do ensaio como está descrito no ponto 3 e 4.

### 4.6.2. MONTAGEM DO ENSAIO

A montagem destes ensaios são umas das tarefas mais complicadas de todo o processo, devido às diversas contrariedades que podem surgir podendo ser, a não perpendicularidade entre a chapa de carga e o varão de aço podendo levar ao encurvamento do varão; ao elevado numero de cabos que implica um cuidado acrescido para que não sejam cortados por nenhuma chapa de aço; a centralização do macaco hidráulico para que este ao aplicar a carga não exerça um encurvamento ao varão; etc.

Estes problemas foram detetados ao aplicar a pregagem nº2, que funcionou como uma pregagem experimental não só para questões de problemas que poderia surgir mas também para um certo posicionamento dos extensómetros de modo a tirar melhor partido dos locais com maior interesse.

Sendo assim a montagem da pregagem nº4 realizou-se sem problemas de maior.

A montagem do ensaio levou à necessidade de se realizar a projeção de betão com aplicação de Malhasol AQ50 com uma área de 1.7 x 1.7 m<sup>2</sup> - Figura 4.32 - devido à fraca resistência do solo residual de granito.

Nestas pregagens houve a necessidade de se usar um acoplador para se prolongar o varão para garantir o comprimento mínimo para a instalação dos equipamentos necessários à realização do ensaio.

Embora a furação fosse o máximo possível perpendicular com o maciço, com a aplicação do betão projetado torna-se sempre uma tarefa complicada para a sua perpendicularidade. Devido a isso foi realizado um molde de forma a garantir que a chapa de carga de  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$  seria totalmente apoiada de modo a poder distribuir a carga de forma uniforme no maciço.



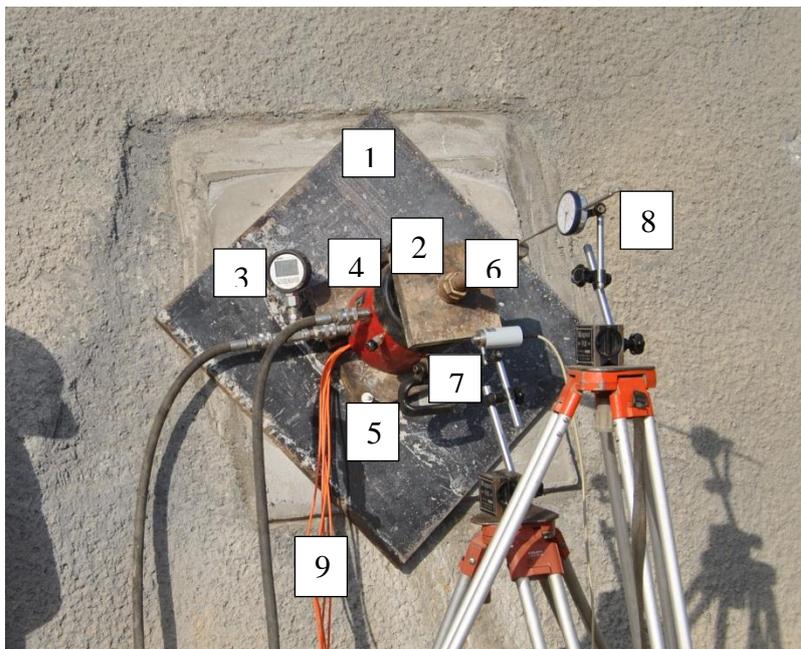
Figura 4.32 - Aplicação do Betão Projetado



Figura 4.33 - Molde para Ensaio

A aplicação da chapa deve ter que ser munida de um corte de modo a garantir que os fios de receção dos dados dos extensómetros não sejam trilhados pelas chapas de ferro como está demonstrado na Figura 4.33, sendo que posteriormente à chapa de  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , colocou-se uma outra chapa quadrada de lado com  $0,20 \text{ m}$  de modo a garantir uma distribuição mais eficaz da carga exercida pelo macaco não levando à deformação da chapa de maiores dimensões na zona de apoio do macaco.

De seguida coloca-se o macaco e uma outra chapa de ferro quadrada de aresta  $0,15 \text{ m}$ , e ajusta-se estes elementos todos com o auxílio de uma porca própria usada em varões GEWI – Figura 4.34. Depois de ajustado deve-se proceder à centralização do macaco dando um pequeno valor de carga de modo a não deixar folgas que possam levar ao encurvamento do varão.



1. Placa de Carga  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$
2. Placa de Carga  $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$
3. Manómetro de Leitura da Carga
4. Macaco Hidráulico
5. Placa de Carga  $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$
6. Porca de Aperto GEWI
7. Defletómetro de Roldana
8. Defletómetro de Estilete
9. Cabos de Leitura dos Extensómetros

Figura 4.34 - Montagem do Ensaio de Arranque

De seguida deve-se proceder, como exemplifica a Figura 4.35, à instalação dos defletómetros – Estilete e Roldana – de forma a que estes estejam alinhados, com o varão o defletómetro de estilete e com a chapa o defletómetro de Roldana para que as leituras sejam as mais corretas possíveis.

Utilizou-se um cavalete de modo a facilitar e a tornar mais rápido a obtenção dos valores de cada extensómetro de forma a que se pudesse fazer a leitura dos 5 extensómetros, no caso da pregagem nº 4, em menos de 1 minuto. De referir ainda que os fios vermelho e preto são utilizados para a obter o valor do período e os fios de cor verde e branca para a obtenção da temperatura através de um amperímetro, tendo sido instalado pontas adequadas para facilitar a leitura - Figura 4.36.



Figura 4.35 - Defletómetros - Pregagem nº 4



Figura 4.36 - Extensómetros - Pregagem nº4

# 5.

## ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. CASO DE ESTUDO DE REFERÊNCIA

A análise dos resultados das pregagens realizadas em solo residual de granito na margem direita do AHRE nesta dissertação, fez-se com base em vários elementos de referência, entre os quais, o caso de estudo realizado no mesmo empreendimento no ano transato.

#### 5.1.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PREGAGENS SELADAS DIFERENCIALMENTE ATRAVÉS DE ENSAIOS EM PROTÓTIPOS – GOMES, 2011

No caso de estudo de referência realizado por Gomes [1] foram realizadas 8 pregagens, 6 em solo residual de granito e 2 pregagens em granito alterado. Estas pregagens localizaram-se na margem esquerda da barragem de Ribeiradio - Figura 5.1 – num solo caracterizado pelo “...estado mais avançado de alteração do granito-biotítico-moscovítico. Neste solo está bem evidenciada a textura original da “rocha mãe” e também a hidrólise dos feldspatos, surgindo com grande expressão no futuro coroamento da barragem de Ribeiradio.” [1]



Figura 5.1 - Localização dos Ensaios de Referência - Sandro Gomes [1]

Apesar destas pregagens se situarem na margem oposta à testada na presente tese, utilizou-se esse valores como termo de comparação e validação dos ensaios realizados nesta dissertação.

## 5.2. RESISTÊNCIA AO CORTE DO SOLO

A análise à tensão de corte do solo é conseguida através do ensaio de corte direto que se efetuou ao solo residual de granito colhido na zona dos ensaios.

A tensão de corte do solo é calculada segundo o critério de Mohr-Coulomb,

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan \phi \quad (5.1)$$

Sendo,

$\tau$  – Tensão de Corte (kPa)

$c'$  - Coesão (kPa)

$\sigma'$  - Tensão Normal (kPa)

$\phi'$  – Ângulo de Atrito (°)

O cálculo da tensão de corte segundo o princípio de Mohr – Coulomb é feito através das características do solo, ou seja, a partir da sua coesão, ângulo de atrito e tensão normal.

A determinação destas características resistentes do solo (ângulo de atrito e coesão) foram alcançadas através da realização de ensaios de corte direto, ficando-se a saber a partir deste ensaio as características resistentes de pico e residuais. Contudo este ensaio apresenta algumas limitações, não sendo possível controlar nem medir a tensão horizontal e pelo facto de o estado de deformação no plano de rotura não ser uniforme durante o ensaio havendo uma deformação por corte superior junto ao bordo da meia caixa móvel que empurra a amostra e menor no lado oposto. [29]

O Ensaio de corte direto é constituído por duas meias-caixas metálicas, Figura 5.2, onde é colocado o solo, e provoca-se o deslocamento relativo entre as duas meias-caixas, sendo imposta uma superfície de rotura no plano horizontal. Os deslocamentos são controlados de forma a poder-se obter a resistência de pico e de rotura do solo, sendo atingida quando o solo não consegue resistir a qualquer acréscimo de carga horizontal. [30]

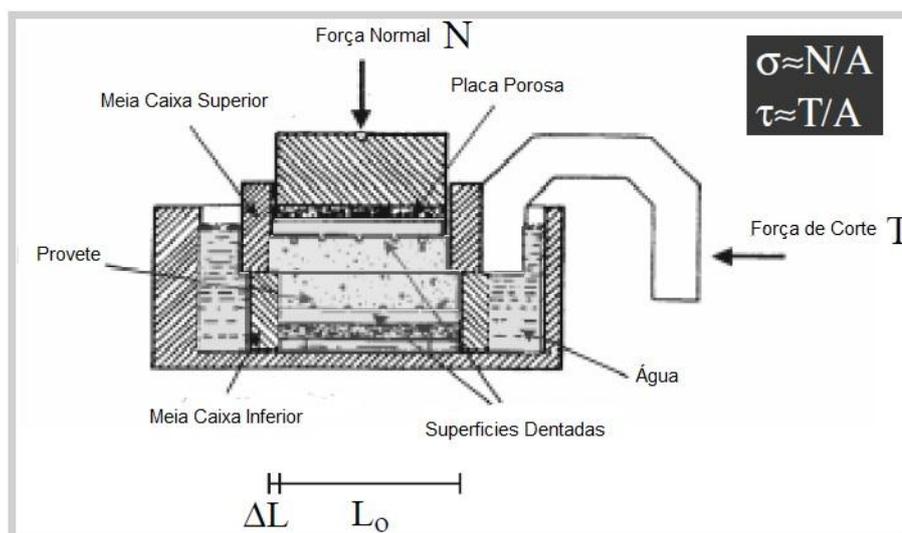


Figura 5.2 - Instrumento de Ensaio Corte Direto [30]

## 5.2.1. RESISTÊNCIA AO CORTE – VALOR DE REFERÊNCIA, GOMES (2011)

Na análise realizada por Sandro Gomes (2011), realizaram-se ensaios de corte direto no local de realização dos ensaios na margem direita do AHRE, como anteriormente referido.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados, onde se registou as características do solo na tensão de rotura máxima e na tensão residual.

Tabela 5.1 - Valores de Referência – Características Resistentes do Solo [1]

Amostra	Provete	Tensão Máxima de Rotura					Tensão Residual				
		$\sigma'_n$	$\tau_{pico}$	$\delta_{HPico}$	$\phi'_{Pico}$	$C'_{Pico}$	$\sigma'_n$	$\tau_{\mu Res.}$	$\delta_{HRes.}$	$\phi'_{Res.}$	$C'_{Res.}$
1	1	15,3	49,4	1,7			15,8	18,2	5		
	2	50,8	86,7	1,6	55	23,8	52,7	47,8	5	41,9	2,7
	3	101,7	168,8	1,6			105,4	98,2	5		

## 5.2.2. RESISTÊNCIA AO CORTE – CASO DE ESTUDO

No âmbito desta dissertação realizou-se ensaios de corte com três amostras da zona ensaiada. A extração das amostras foi realizada numa superfície plana de forma a que os moldes pudessem estar estáveis na extração da amostra - Figura 5.3- com o devido cuidado de modo a não haver perturbações do estado de tensão do solo, sendo que o molde deve deslizar por gravidade e não por qualquer carga descendente - Figura 5.4



Figura 5.3 - Estabilização do Molde



Figura 5.4 - Amostra no Molde

Por fim deve-se retirar a amostra, extraindo-a pela parte inferior, envolvendo-a posteriormente numa película aderente - Figura 5.5 – onde posteriormente se identificaram, onde é visível na Figura 5.6.



Figura 5.5 - Amostra protegida com Película Aderente



Figura 5.6 - Identificação das Amostras Retiradas

### 5.2.2.1. Resultados Obtidos

A realização dos ensaios de corte direto no laboratório da Faculdade de Engenharia foram realizados com três tensões verticais distintas sobre a amostra de solo, 20, 40 e 80 kPa – Anexo 9. Os ensaios foram compostos por 3 passagens em cada tensão vertical exercida, sendo que a primeira utilizou-se para determinar as características de ruptura máximas, ou seja, a coesão e o ângulo de atrito de pico. Após o tratamento de dados, a resistência de pico das amostras foram as apresentadas na Figura 5.7.

Na Figura 5.7 é visível um comportamento inesperado da amostra com a tensão vertical de 80 kPa sendo que a tensão de corte além de não ser superior à do ensaio de 40 kPa, não se diferencia um pico de resistência do solo, o que tem implicações nos valores de pico na resistência obtida.

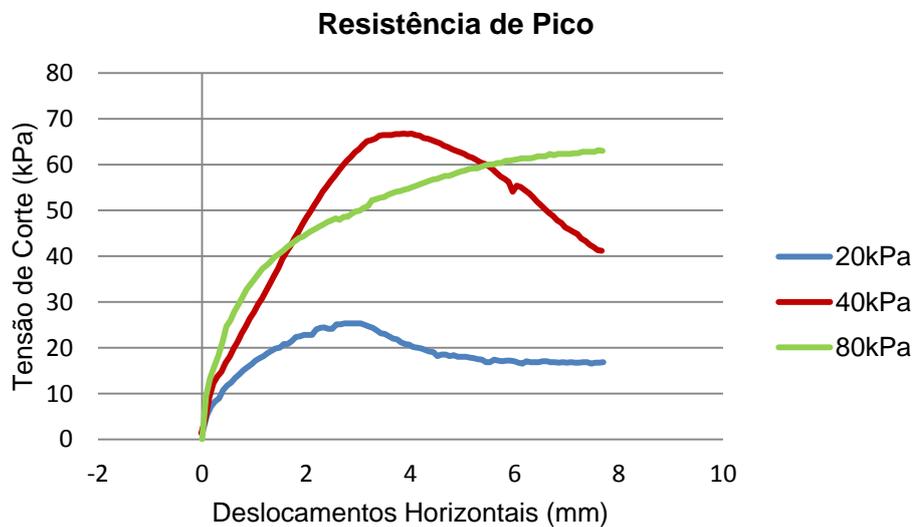


Figura 5.7 - Resistência de Pico do solo ensaiado

Esses valores ficam bem patentes na Figura 5.8, em que é um diagrama  $s'-t$  e os valores de  $t$  são os valores máximos de cada tensão vertical aplicada na Figura 5.7.

Na Figura 5.8 no patamar de tensão 80 kPa que corresponde ao valor de  $t$  de 70,7 kPa, pode-se notar num retardamento do valor da tensão de corte máxima em relação ao de 20 e 40 kPa. Este abrandamento faz com que a linha de tendência (linear) possua um declive inferior e se afaste mais dos pontos todos refletindo-se no índice de determinação ( $R^2$ ) que tem um valor de 0,6483 num

intervalo entre 0 e 1, ou seja, não refletindo-se uma aproximação muito linear dos pontos obtidos no ensaio de corte direto.

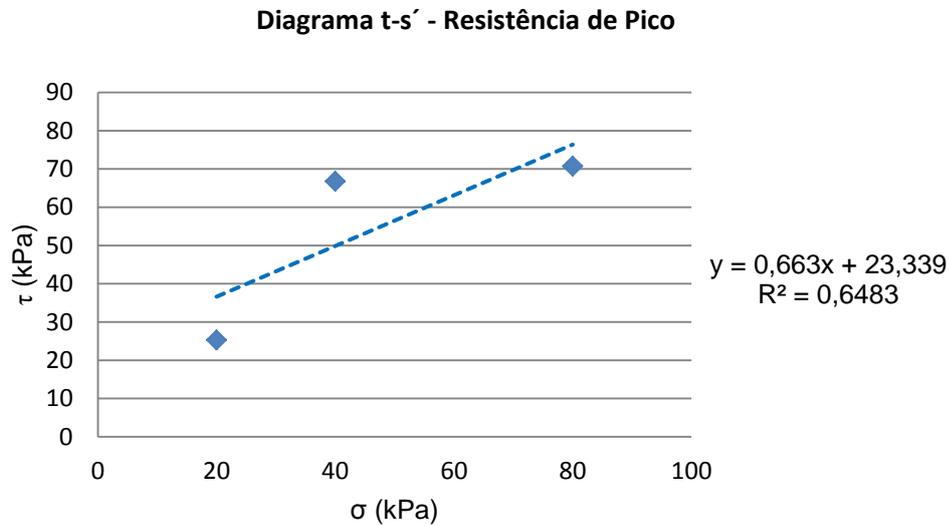


Figura 5.8 - Diagrama  $\tau$ - $\sigma$  - Características máximas de rotura

A determinação da características resistentes de pico são dadas pela ordenada na origem no caso da coesão  $P_{\text{Pico}}$  e pelo arco de tangente do declive da reta de tendência no caso do ângulo de atrito  $P_{\text{Pico}}$  - Tabela 5.2.

Apesar da resistência de pico da tensão de 80 kPa ter tido um comportamento inesperado, já na resistência residual do solo isso já não aconteceu. Na Figura 5.9 pode-se visualizar um aumento normal da tensão de corte residual à medida que se aumenta a tensão vertical exercida.

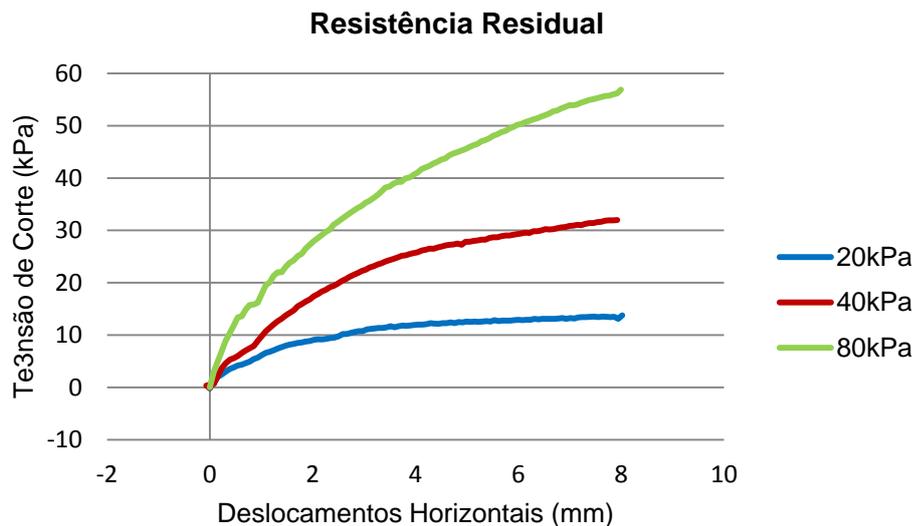


Figura 5.9 - Resistência Residual do solo ensaiado

Estes valores expectáveis são concretizados a partir do gráfico da Figura 5.10, em que o índice de determinação é muito próximo do máximo, ou seja, de 1.

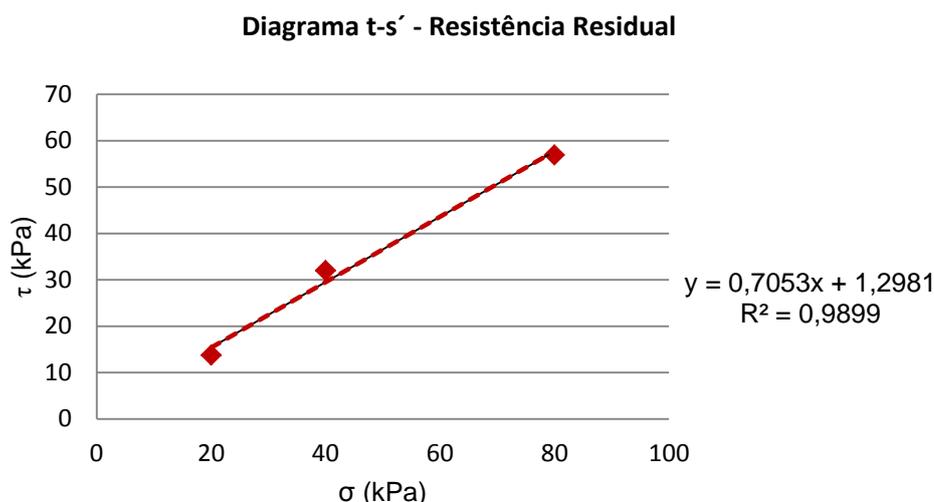


Figura 5.10 - Diagrama  $\tau$ - $\sigma$  - Características residuais do Solo

A partir da Figura 5.10, determina-se a coesão e o ângulo de atrito residuais da mesma forma que foi calculado a coesão e o ângulo de atrito de pico na Figura 5.8, colocando-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de Caso de Estudo – Características Resistentes do Solo

Amostra	Provete	Tensão Máxima de Rotura				Tensão Residual			
		$\sigma'_n$	$\tau$	$\phi'_{Pico}$	$c'_{Pico}$	$\sigma'_n$	$\tau$	$\phi'_{Res.}$	$c'_{Res.}$
1	1	20,39	25,32			20,39	13,76		
	2	40,78	66,78	41,53	23,34	40,78	31,98	44,85	1,3
	3	81,55	70,74			81,55	56,90		

### 5.2.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Numa análise comparativa entre os resultados de referência de Gomes, 2011 e o caso de estudo desta dissertação na Tabela 5.3, as características residuais –  $c'_{Residual}$  e  $\phi'_{Residual}$  – em que os valores são muito próximos levando a crer através deste parâmetro que o solo possui características residuais muito idênticas. No que se refere às características de pico –  $c'_{Pico}$  e  $\phi'_{Pico}$  - a coesão possui um valor muito idêntico podendo esta ser um pouco alterada com a retificação do ensaio com a tensão vertical de 80 kPa não sendo tão significativa essa mudança na coesão como no ângulo de atrito, que sendo o fator resistente mais disparo do valor de referência podendo este aumentar para valores próximos de  $55^\circ$  se o resultado do ensaio de 80 kPa fosse o esperado.

Tabela 5.3 - Comparação das Características Resistentes - Valores de Referência Vs Caso de Estudo

	Tensão Máxima de Ruptura		Tensão Residual	
	$\phi_{\text{Pico}}$	$c'_{\text{Pico}}$	$\phi_{\text{Residual}}$	$c'_{\text{Residual}}$
Valores de referência (Gomes,2011)	55°	23,8 kPa	41,9°	2,7 kPa
Valores de Caso de Estudo	41,53°	23,34 kPa	44,85°	1,3 kPa

### 5.3. ELEMENTOS TEÓRICOS

A análise dos resultados tem como princípio a análise da extensão do aço na zona de implantação dos extensômetros, em que através da lei de Hooke,

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad 5.2)$$

Sendo:

$\sigma$  – Tensão

$E$  – Módulo de Elasticidade do Aço

$\varepsilon$  – Extensão do Aço

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} \quad 5.3)$$

Sendo:

$N$  – Força Exercida

$\Omega$  – Área da Secção do aço

pode-se fazer uma análise da evolução da força  $N$  ao longo dos elementos de reforço e chegar a um valor da tensão tangencial,  $\tau$ , instalada nas pregagens analisadas.

A força  $N$  vai diminuindo ao longo da pregagem, desde o valor máximo e igual à carga exercida pelo macaco hidráulico na cabeça, até zero no fim da pregagem. Tal ocorre em consequência da mobilização das tensões tangenciais em sentido oposto originada pela resistência atrítica do solo.

A temperatura foi uma das condicionantes que poderia surgir nos ensaios. Através dos extensômetros houve a possibilidade de obtenção de dados da temperatura - Figura 5.11. Sendo assim optou-se por realizar as leituras durante os ensaios de modo a compensar a variação pela dilatação térmica que podia sofrer através da fórmula 5.4).

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T \quad 5.4)$$

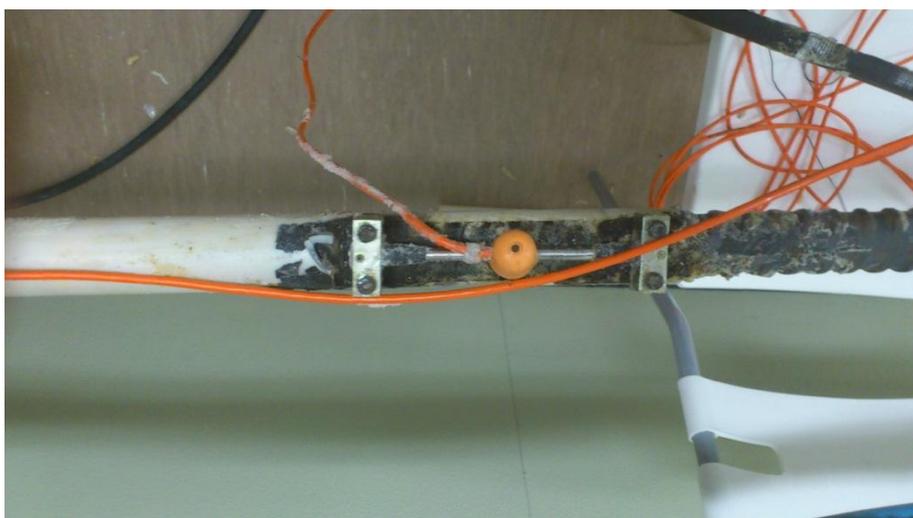


Figura 5.11 - Extensômetro munido de sensor de temperatura

## 5.4. ELEMENTOS ANALISADOS

### 5.4.1. PLACA DE CARGA – DESLOCAMENTO DA CHAPA

Na pregagem nº2 foi utilizado o defletómetro de estilete enquanto na pregagem nº4 foi usado o defletómetro de roldana para determinar os deslocamentos na placa de carga de modo a aferir os deslocamentos que esta sofre quando o macaco hidráulico inicia o processo de carga.

Este elemento é essencial para uma correta análise do deslocamento da pregagem ao longo do ensaio devido à deformação do solo à medida que é aplicada a carga onde impõe deslocamentos ao sistema no geral. No caso dos ensaios em estudo a colocação de betão projetado com malhasol foi crucial devido à fraca resistência ao corte do terreno levando a um deslocamento muito acentuado da placa de carga.

A carga do terreno produz compressões, pelo que estes deslocamentos serão apresentados com sinal negativo sendo a unidade de registo milímetros.

### 5.4.2. ÊMBOLO – DESLOCAMENTO DA “CABEÇA” DA PREGAGEM

Os deslocamentos no êmbolo são da máxima importância que sejam registados para que se tenha um registo da evolução do deslocamento da pregagens à medida que se aplica o pré-esforço. O deslocamento, foi admitido com sinal positivo em tração para se poder distinguir do deslocamento da chapa segundo o movimento esperado de ambos os elementos. A unidade de registo será em milímetros.

### 5.4.3. EXTENSÓMETROS – EXTENSÃO DO VARÃO DE AÇO

A extensão no aço é medida através dos extensómetros de corda vibrante nas secções que foram estabelecidas previamente e que estão definidas no Anexo 4. A extensão do aço é útil na medida em que é passível de ser relacionada com a deformação total já que: para se quantificar a extensão devido ao escorregamento através da fórmula abaixo.

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{Aço} + \varepsilon_{escorregamento} \quad 5.5)$$

$$\Delta L = L \times \varepsilon \quad 5.6)$$

Sendo:

$\Delta L$  - Variação do Comprimento

$L$  – comprimento Inicial (neste caso 0,14 m – comprimento do extensómetro)

$\varepsilon$  - Extensão do aço

## 5.5. VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS

A aquisição dos dados é realizada por 2 pessoas uma realizando a leitura dos defletómetros e controla a carga a aplicar no macaco através da bomba devido à proximidade dos elementos em questão - Figura 5.12, a outra pessoa realiza a leitura da temperatura e do período dos extensómetros a cada carga aplicada ao macaco de modo a verificar as alterações de período sendo que este se relaciona com a variação de extensão dos mesmos - Figura 5.13.

Este processo deve ser realizado em total parceria entre ambas as partes de modo a que os resultados sejam credíveis.



Figura 5.12 - Leitura dos Defletómetros

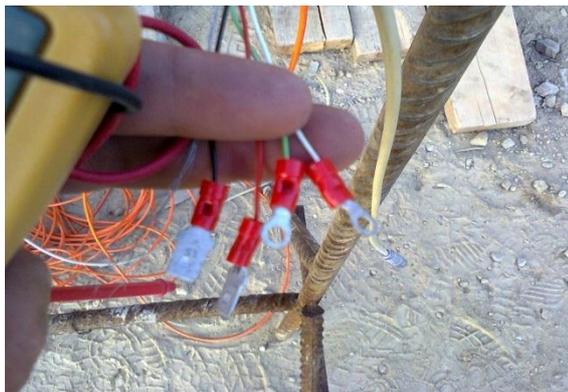


Figura 5.13 - Leitura dos Extensómetros

### 5.5.1. PREGAGEM Nº2

#### 5.5.1.1. Defletómetros

Na Figura 5.14 estão representados os deslocamento da pregagem nº 2 no instante T0, isto é, imediatamente após a estabilização da carga do macaco, quer do êmbolo quer da chapa. Na Figura 5.15 estão representados igualmente os deslocamentos do êmbolo e da chapa mas neste caso serão no instante T1, que representa os deslocamentos um minuto após a estabilização da carga.

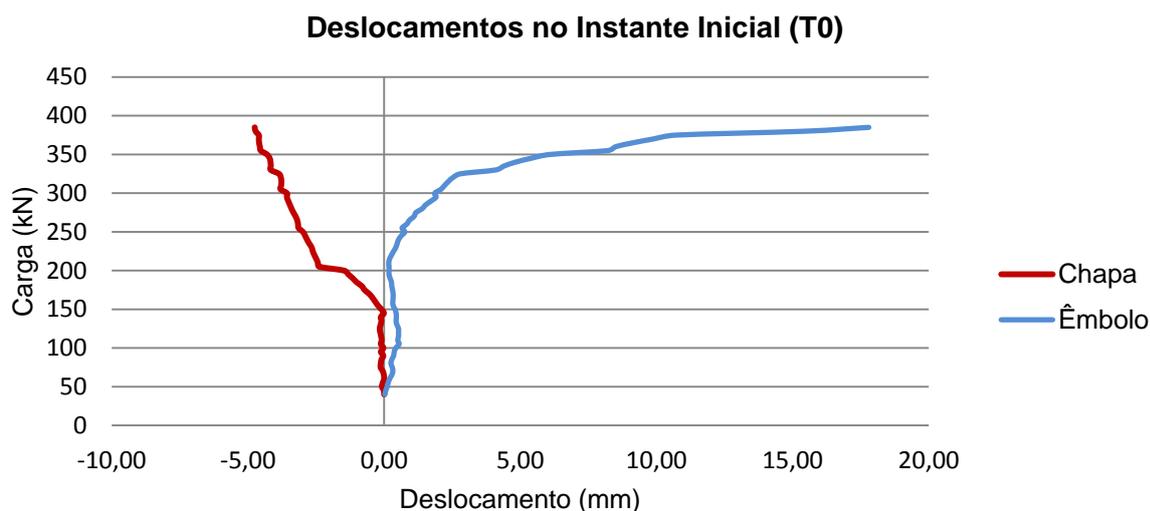


Figura 5.14 - Deslocamentos no Instante Inicial - Pregagem nº 2

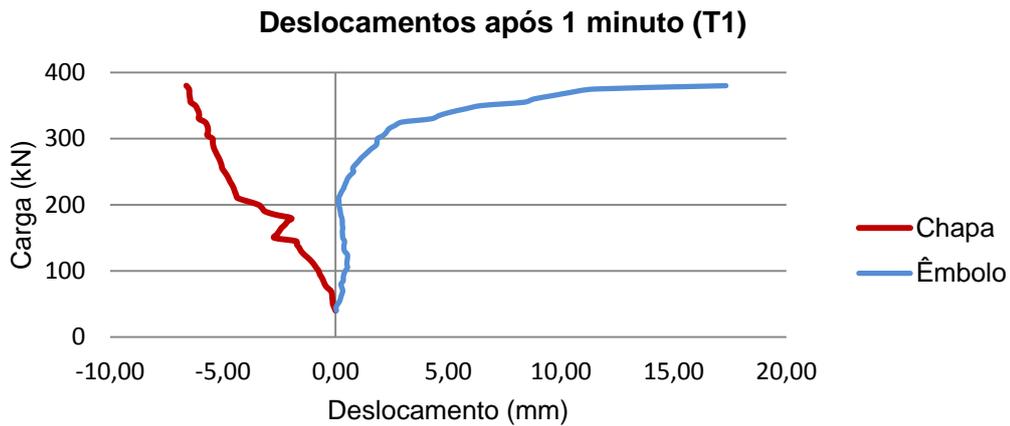


Figura 5.15 - Deslocamentos após 1 minuto - Pregagem nº 2

De referir que os dados que se obtiveram do ensaio para a realização destes gráficos estão no Anexo 5.

Em relação aos deslocamentos do êmbolo no ensaio da pregagem nº 2, pode-se analisar uma variação do deslocamento no instante inicial de estabilização da carga como após 1 minuto, havendo um deslocamento muito reduzido no início do carregamento onde a tensão tangencial mobilizada é reduzida devido à resistência atrítica do solo conseguir resistir aos esforços impostos pelo macaco. A partir da carga de 200 kN começa haver uma cedência do solo, sendo visível no instante T0 e T1 esse início de cedência, levando a uma rotura para deslocamentos da ordem de 15 mm, o que corresponde à carga de 385 kN.

No que diz respeito à chapa, verifica-se até à carga 200 kN um desfasamento entre o instante T0 e o T1, correspondendo a um alívio da chapa quando se procede à aplicação da carga por parte do macaco, não sendo um comportamento previsto já que no instante T1 verifica-se um deslocamento da chapa de forma substancialmente diferente, até à carga de 150 kN. Após a carga de 150 kN verifica-se uma deformação quase linear da chapa sendo que no instante T1 a deformação é maior em cerca de 2 mm devido ao fenómeno de fluência causado pela carga.

Um problema que surgiu no ensaio desta pregagem foi a não centralização da chapa de carga com o acoplador que se colocou na pregagem para haver um prolongamento do varão para aplicação do macaco, levando a um corte do acoplador por parte da chapa à medida que se aplicava a carga - Figura 5.16 - levando a possíveis dados incorretos de deslocamentos, o que pode ter sido a justificação da variação da chapa entre o instante T0 e T1. Por essa razão dá-se maior confiança aos resultados obtidos na pregagem nº 4 em detrimento dos resultados obtidos na pregagem nº 2.



Figura 5.16 - Estado do Acoplador após o Ensaio

5.5.1.2. Extensômetros

Os extensômetros, como foi dito anteriormente, foram numerados de 1 a 4 sendo o primeiro extensômetro, localiza-se perto da “cabeça” da pregagem sendo que o quarto extensômetro localiza-se meio metro do fim da pregagem. Sendo assim a sequência da Figura 5.17 à Figura 5.20 será feita da “cabeça” da pregagem até ao fim desta.

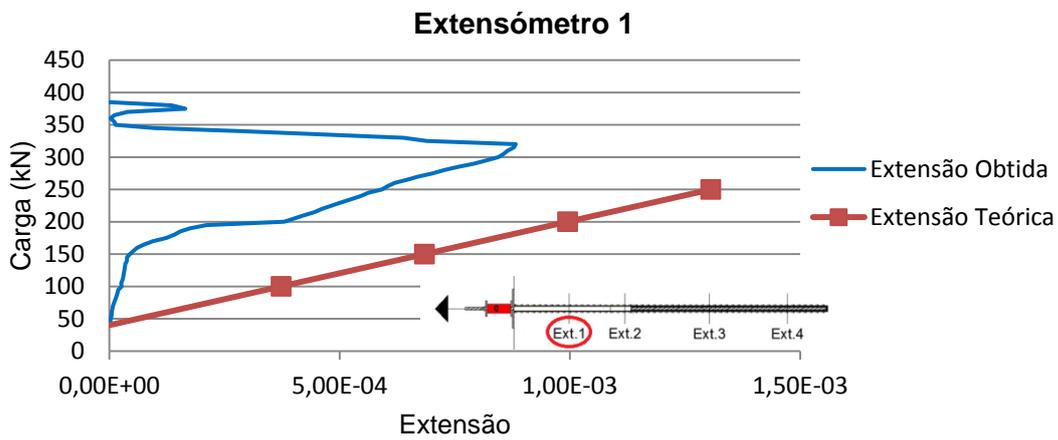


Figura 5.17 - Evolução da Extensão - Extensômetro 1 - Pregagem 2

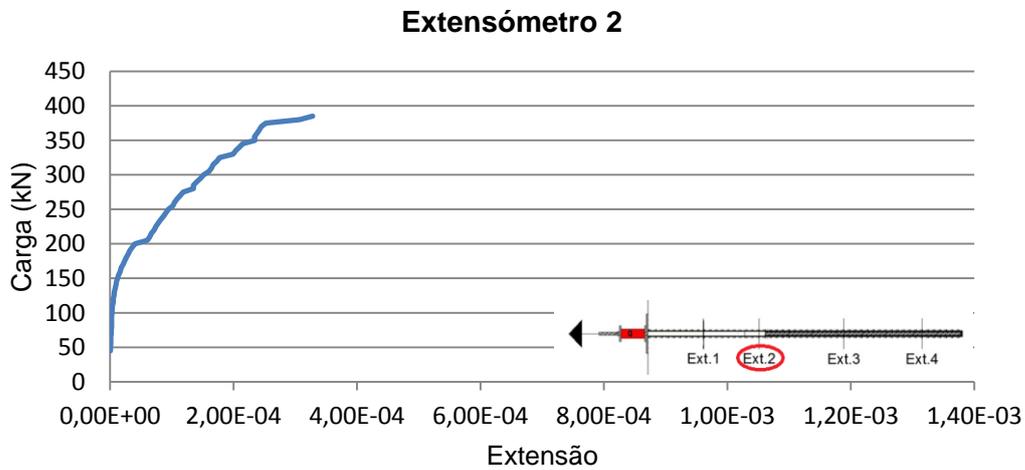


Figura 5.18 - Evolução da Extensão - Extensômetro 2 - Pregagem 2

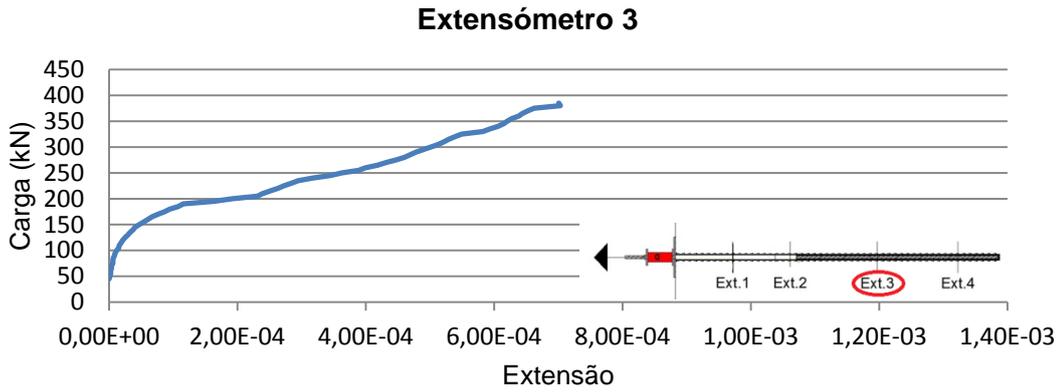


Figura 5.19 - Evolução da Extensão - Extensômetro 3 - Pregagem 2

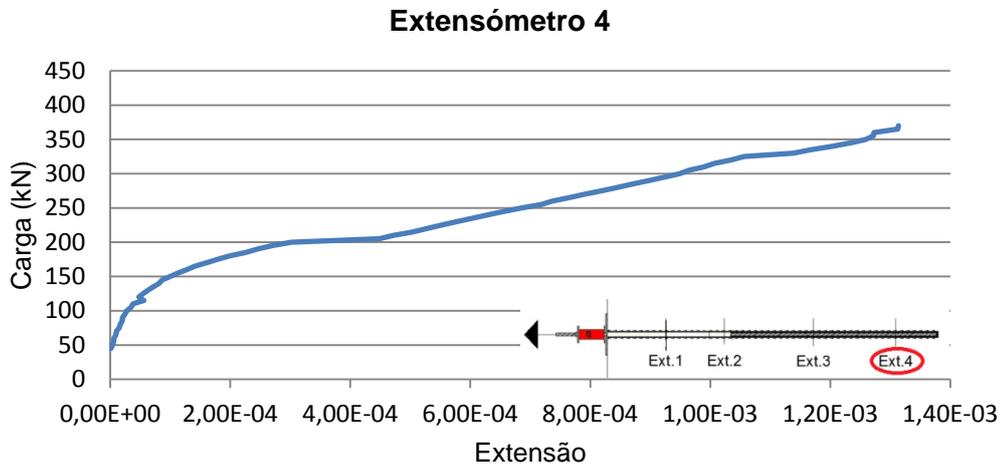


Figura 5.20 - Evolução da Extensão - Extensômetro 4 - Pregagem 2

### Evolução da Temperatura durante o Ensaio Pregagem nº 2

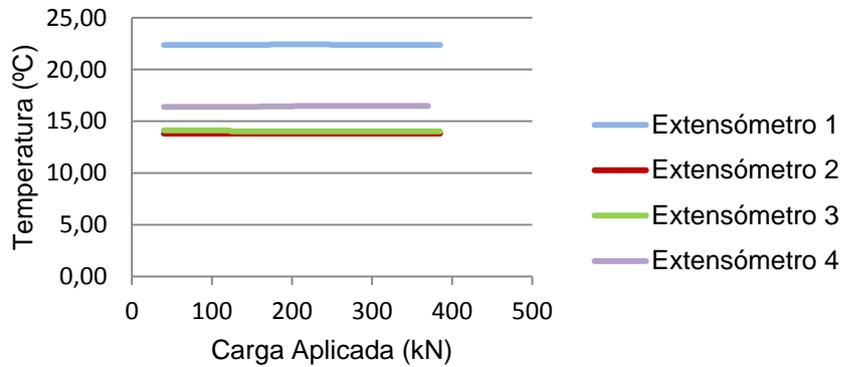


Figura 5.21 - Evolução da Temperatura durante o Ensaio - Pregagem nº 2

O extensómetro 1 verifica-se um comportamento elástico por parte do varão de aço até perto da carga de 155 kN devido a haver uma extensão de forma linear correspondendo à fase elástica. Após essa carga verifica-se a o comportamento plástico da secção a partir de uma extensão de 0,045‰ atingindo uma tensão de rotura de 325 kN devido à extensão voltar para os valores inicialmente registado. De referir que se na zona definida como comprimento livre não houvesse qualquer influência da calda, este extensómetro deveria funcionar quase como um medidor direto da carga aplicada no macaco.

No extensómetro 2 verificou-se uma extensão inferior em relação ao extensómetro 1 e 3, verificando-se que esta secção seria menos afetada pela carga aplicada levando a uma extensão muito inferior, sendo justificada por um aumento da área resistente à carga e a uma diminuição da carga aplicada, explicada da seguinte forma.

A área de influencia sendo o varão de aço somente é caracterizada pelo tubo de PVC que garante o comprimento livre da pregagem, enquanto que no comprimento de selagem a área de forma simplificada é a homogeneização do varão de aço com a calda de cimento tornando assim numa área superior. Através da fórmula 5.2) pode-se verificar que ao diminuir a tensão e sendo o módulo de elasticidade do aço constante, a extensão sofre um decréscimo que é visível na Figura 5.18. Em qualquer dos casos a grandeza da diminuição observada ultrapassa o que seria de esperar mesmo tendo presente este efeito. Tal pode resultar de algum fenómeno de carácter mais localizado, como adiante se discutirá também a propósito da pregagem nº 4.

Já o extensómetro 3, sendo o primeiro extensómetro no comprimento de selagem verifica-se uma extensão elevada devido haver grande atrito entre a calda e o varão de aço levando a uma tensão no varão superior que no comprimento livre.

No extensómetro 4 verifica-se uma extensão muito superior que nos restantes extensómetros embora teoricamente deveria ser inferior ao extensómetro 3, devido a este extensómetro estar situado a 0.5 metros do fim da pregagem levando a uma área menor resistente à força aplicada sendo aplicada uma tensão tangencial inferior. Os valores medidos indicam que este extensómetro não terá funcionado corretamente ou na montagem pode-se ter trocado os cabos do extensómetro 4 com o 2.

Por fim avaliou-se a temperatura de modo a verificar-se uma possível dilatação térmica com a variação da temperatura, o que pela Figura 5.21 não se verificou ao longo do ensaio em cada extensómetro.

### 5.5.2. PREGAGEM Nº 4

Nesta pregagem os dados de ensaio retirados foram os mesmo retirados na pregagem nº 2. Nesta pregagem, que foi executada já depois de ensaiada a pregagem nº 2 efetuaram-se retificações como a execução do molde, uma atenção redobrada ao acoplador, que se destacaram como pontos menos positivos do ensaios da pregagem nº 2.

#### 5.5.2.1. Defletómetros

A Figura 5.22 e a Figura 5.23 representam os deslocamentos na chapa e no êmbolo da pregagem quando foi realizado o ensaio ao arranque.

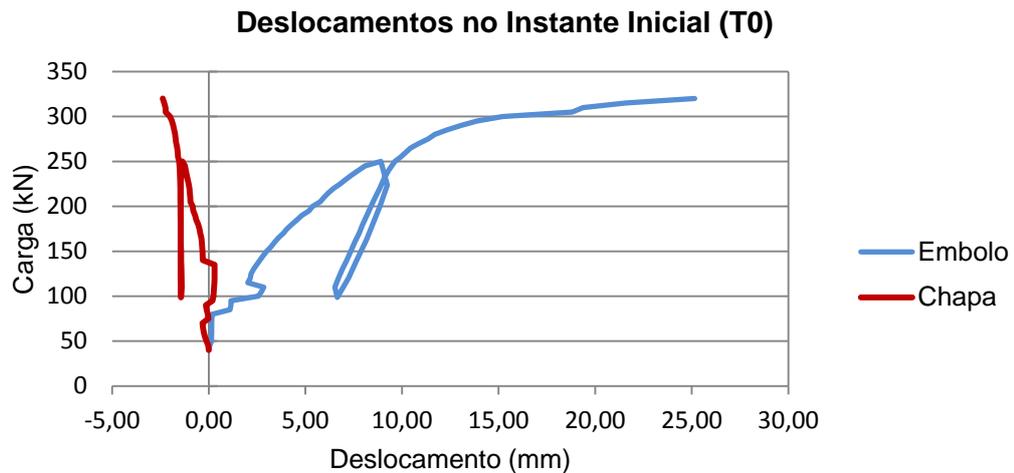


Figura 5.22 - Deslocamentos no Instante Inicial - Pregagem nº 4

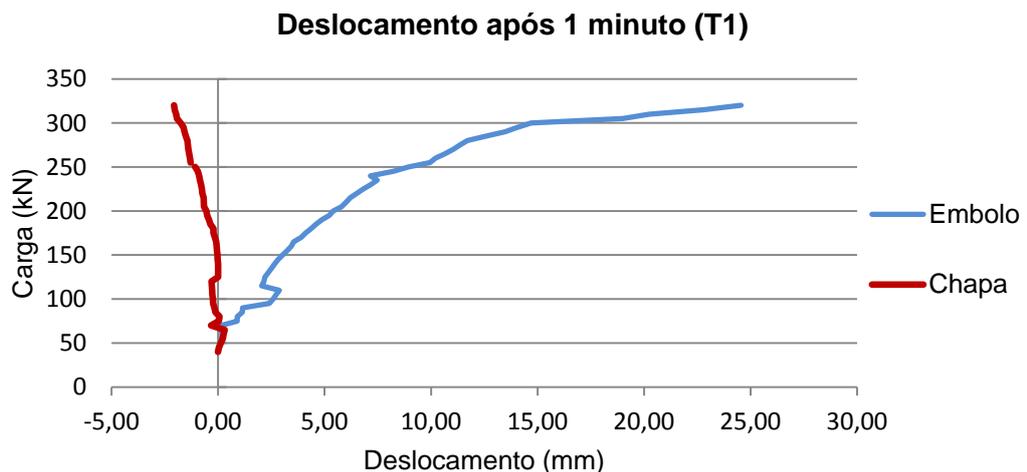


Figura 5.23 - Deslocamentos Após 1 minuto - Pregagem nº 4

O Ensaio da pregagem nº 4 decorreram com normalidade, tendo seguramente para isso contribuído as correções aos defeitos que surgiram no ensaio da pregagem nº 2, referentes à centralização do acoplador com a chapa de carga. Os deslocamentos do êmbolo no instante T0 e T1 são de uma forma geral coincidentes.

Neste ensaio optou-se por se efetuar uma descarga dos 250 kN até aos 98,7 kN e posterior recarga até ao mesmo valor havendo um paralelismo entre a descarga e a recarga. A partir dos 250 kN os deslocamentos desenvolvem-se de uma forma regular aumentando gradualmente à medida que se aplicava a mesma variação de carga atingindo a rotura com um deslocamento perto dos 25 mm.

No caso da chapa verificou-se um aumento do deslocamento à medida que se aplicava a carga. No início devido ao ajustamento da carga ao molde realizado, ao contrario da pregagem nº 2 que não se efetuou, a chapa assentou rapidamente registando-se valores expectáveis através de estudos anteriormente realizados. A chapa atingiu um valor de 2,38 mm de deslocamento na rotura.

### 5.5.2.2. Extensómetros

O número de extensómetros passou para 5 extensómetros devido ao comprimento da pregagem nº 4 ser maior em comparação com a pregagem nº 2. Os resultados dos extensómetros no decorrer dos ensaios estão demonstrados da Figura 5.24 à Figura 5.28.

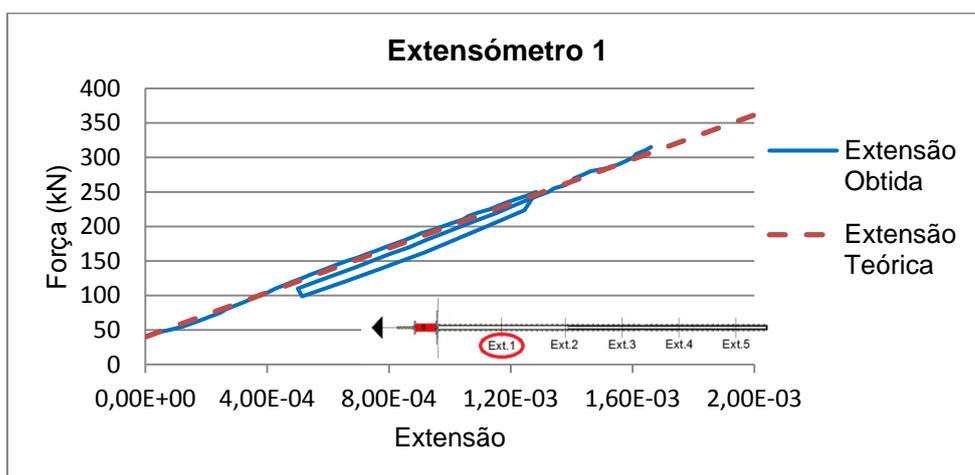


Figura 5.24 - Evolução da Extensão - Extensómetro 1 - Pregagem 4

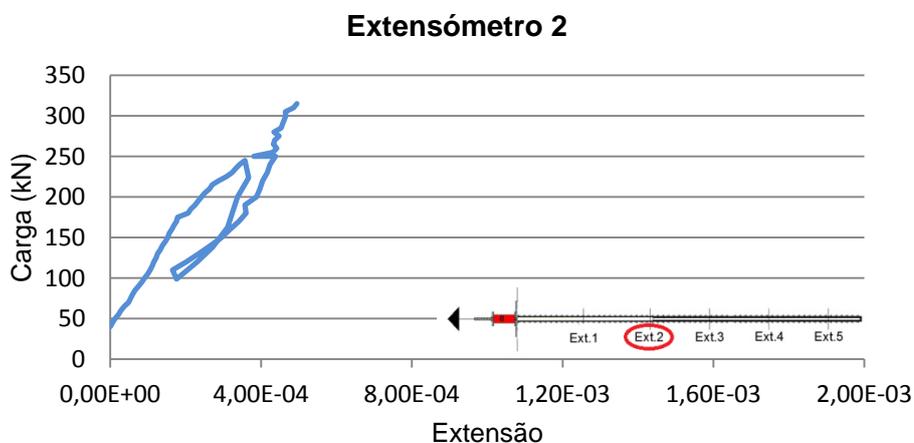


Figura 5.25 - Evolução da Extensão - Extensómetro 2 - Pregagem 4

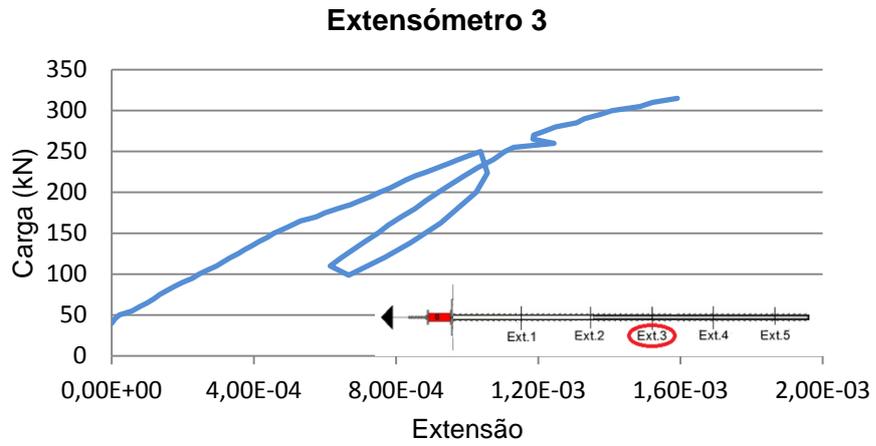


Figura 5.26 - Evolução da Extensão - Extensômetro 3 - Pregagem 4

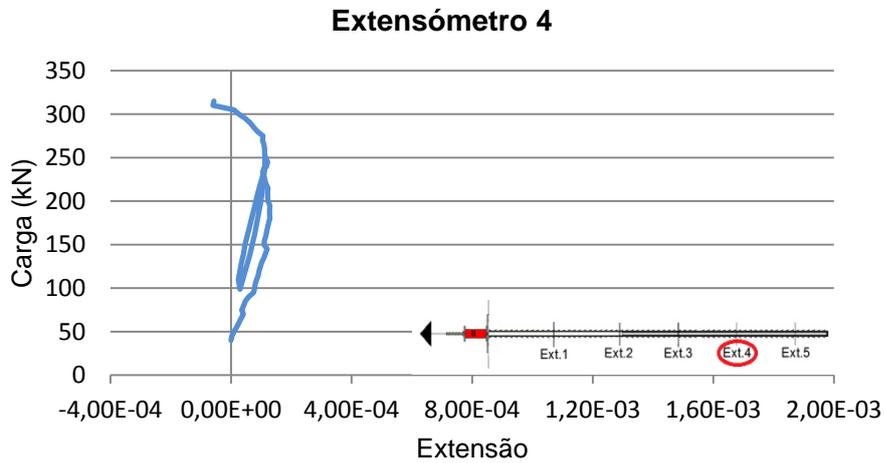


Figura 5.27 - Evolução da Extensão - Extensômetro 4 - Pregagem 4

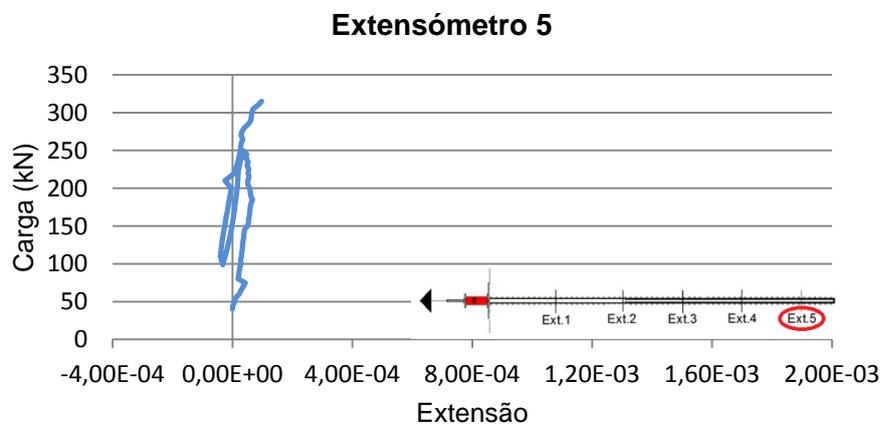


Figura 5.28 - Evolução da Extensão - Extensômetro 5 - Pregagem 4

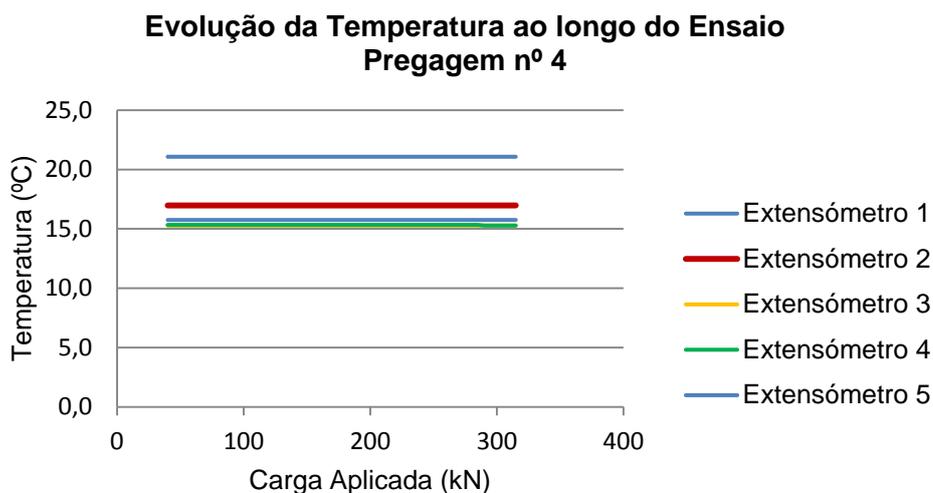


Figura 5.29 - Evolução da Temperatura durante o Ensaio - Pregagem nº 4

O extensômetro 1 apresenta uma evolução da extensão paralela à extensão teórica como se visualiza na Figura 5.24 a diferenciação das extensões fica-se a dever provavelmente à calda de selagem existente no comprimento livre tornando a extensão um pouco maior que a teórica.

A carga de rotura da pregagem fez com que este extensômetro atingisse valores de extensão de 1,66%, ainda aquém da cedência do aço, que para o caso de um varão A500 ocorre para extensões da ordem dos 2,5%.

No caso do extensômetro 2, Figura 5.25, embora esteja no comprimento livre como o extensômetro 1, a sua extensão é muito inferior na rotura devendo-se ao mesmo fenómeno que surgiu no extensômetro 2 da pregagem nº 2 sendo este estudado mais à frente com maior cuidado.

Em relação à Figura 5.26, retrata o comportamento do extensômetro 3, tendo um comportamento com uma extensão muito importante de grande valor. Este extensômetro é o primeiro do comprimento de selagem, havendo um aumento da área de influencia perto dele, levando a extensões muito importantes na ordem dos 1,6%.

Nos extensômetros 4 e 5, Figura 5.27 e Figura 5.28 respetivamente, verificou-se uma compressão perto dos 200 kN, um fenómeno que pode ficar a dever-se devido à grande resistência atrítica na zona do extensômetro 3 levando a um défice nas zonas seguintes.

Por fim, em relação à dilatação térmica não se verificou variação da temperatura durante o ensaio como está exposto na Figura 5.29, não havendo portanto uma dilatação do varão por parte da temperatura.

## 5.6. TENSÃO DE CORTE

### 5.6.1. ABORDAGEM CLÁSSICA

A resistência ao arranque de uma pregagem tem em conta diversos fatores como o solo, as condições de aplicação da pregagem, o estado do material que compõe o sistema global da pregagem, etc.

Numa análise da resistência tem-se como fator resistente a tensão tangencial que ocorre entre solo-solo muito perto da calda de selagem sendo a zona com menor resistência atrítica sendo que usualmente designa-se por tensão de cedência bolbo de selagem - maciço sendo que mais corretamente deveria ser tensão de cedência maciço – maciço.

$$\tau = \frac{F}{\Omega_{\text{Selagem}}} = \frac{F}{L_{\text{selagem}} \times P_{\text{Furação}}} \quad (5.7)$$

Sendo:

$\tau$  – Tensão de corte [kPa]

F – Força [kN]

$\Omega_{\text{Selagem}}$  – Área de selagem

$L_{\text{Selagem}}$  – Comprimento de selagem [m]

$P_{\text{Furação}}$  – Perímetro de furação [m]

#### 5.6.1.1. Valores de Referência – Gomes (2011)

Foi realizada uma dissertação de Gomes (2011), onde foram realizados 6 ensaios em solo residual de granito no AHRE, estas foram estudadas pelo autor tendo em conta a tensão de corte a partir da formula 5.7) das pregagens ensaiadas, temos como valores de referência as pregagens realizadas em solo residual de granito.

Tabela 5.4 - Valores Experimentais obtidos por Sandro Gomes, 2011 - Solo Residual de Granito [1]

	Comprimento Selagem (m)		Comprimento Livre (m)		A/C	Idade do Ensaio (dias)	Diâmetro do Furo (mm)	Força de Rotura (kN)	Tensão de Corte (kPa)	
	Teórica	Medido	Teórica	Medido					Teórica	Corrigido
Preg.1	1	0,22	4	4,78	0,3	3	76	15	62,8	285,57
Preg.2	1	1,54	4	3,46	0,3	7	76	85	356,2	231,3
Preg.3	1	0,77	4	4,23	0,4	7	76	85	440,0	571,4
Preg.4	1	1,08	4	3,92	0,4	28	76	175	733,3	679,0
Preg.5	3	2,02	3	3,92	0,3	7	76	100	139,7	207,4
Preg.6	3	2,77	3	3,23	0,4	28	76	190	265,4	287,4

A existência de pregagens com a aplicação de diversas caldas no estudo realizado por Gomes (2011) [1], o autor realizou uma comparação da tensão de corte em função da calda - Figura 5.30 – de modo a avaliar se a influência da calda de selagem influenciava a tensão de corte mobilizada no arranque de uma pregagem.

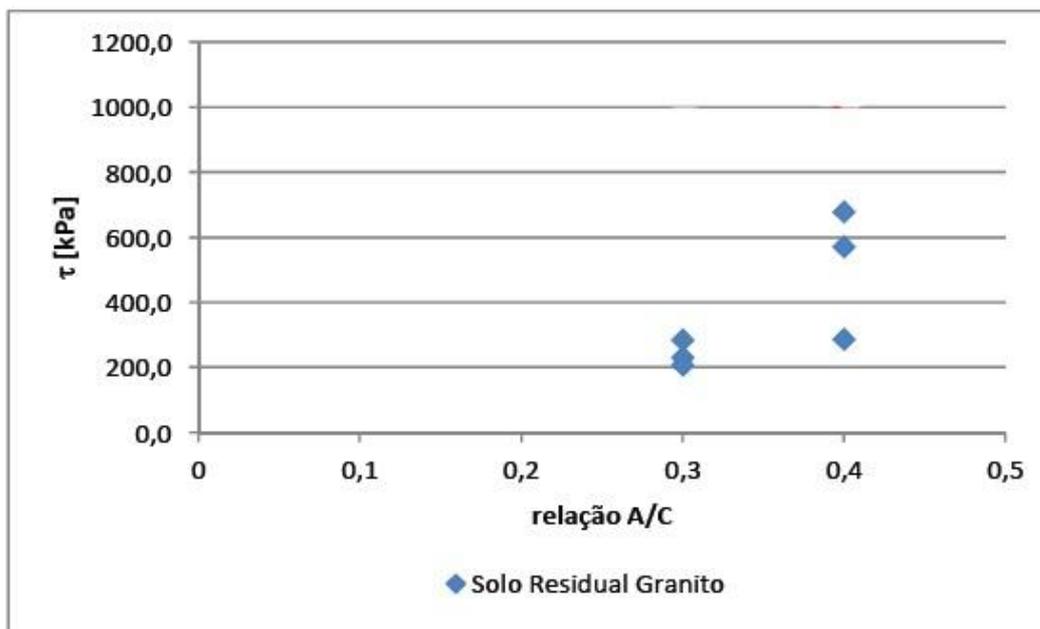


Figura 5.30 - Tensão de Corte em função da relação A/C [1]

Tendo sido concluído que não haveria uma tendência que permitira afirmar que a relação A/C teria uma relação direta com a tensão de corte podendo-se verificar na Figura 5.30 que os valores oscilam muito pouco havendo mesmo pregagens, no caso a pregagem 1 e a pregagem 6, em que o valor da tensão de corte é muito semelhante e tendo uma relação A/C de 0,3 e 0,4 respectivamente.

Devido a esta análise podemos concluir que a comparação entre as pregagens realizadas por Gomes [1] podem ser comparadas, tendo em conta a relação A/C, com as pregagens de ensaio realizadas nesta dissertação.

Tendo em conta a idade do ensaio como fator que pode levar a uma alteração da tensão de corte, essa dúvida fica desfeita através dos ensaios à compressão uniaxial dos provetes cúbicos como é exemplificado pela Figura 4.31, que o aumento da resistência do betão entre os 7 e os 28 dias é muito reduzido devido à utilização do aditivo Rheobuild 561 levando a tensões de compressão muito elevadas com pouca idade de presa da calda.

Segundo a análise da relação A/C conjugado com os ensaios à compressão uniaxial dos provetes podemos concluir que a ocorrência da rotura da pregagem realiza-se na interface entre calda – maciço.

## 5.6.1.2. Valores do Caso de Estudo

Através da abordagem clássica de cálculo da tensão de corte dada pela fórmula 5.3), efetuou-se o cálculo da tensão de corte com a finalidade de realizar-se uma análise comparativa com os valores de referência apresentados em 5.6.1.1.

Para esta abordagem comparativa realizaram-se dois cálculos de tensão de corte às pregagens realizadas, tendo em conta duas situações:

1. O comprimento selado efetivamente sendo caracterizada pelo comprimento do varão que não está isolado com o tubo de PVC, havendo um atrito direto entre a calda de selagem e o varão de aço - Tabela 5.5 e Tabela 5.7;
2. Admitindo-se a zona de selagem ser todo o comprimento em que exista calda de selagem, ou seja, resume-se a todo o comprimento da pregagem devido a ter-se selado a pregagem até à “boca” do furo - Tabela 5.6 e Tabela 5.8

- Pregagem nº 2

Tabela 5.5 – Tensão de Corte – Comprimento de Selagem 2.5 m – Pregagem nº 2

Pregagem nº 2	
Força de Rotura	385kN
Comprimento de Selagem	2,5m
Diâmetro de Furação	76mm

Área de Selagem:

$$\Omega_{selagem} = C_{selagem} \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,076}{2}\right) = 2,5 \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,076}{2}\right) = 0,597 \text{ m}^2 \quad 5.8)$$

Tensão de Corte:

$$\tau = \frac{F_{Rotura}}{\Omega_{selagem}} = \frac{385}{0,597} = 644,89 \text{ kPa} \quad 5.9)$$

Tabela 5.6 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 4 m - Pregagem nº 2

Pregagem nº 2	
Força de Rotura	385kN
Comprimento de Selagem	4m
Diâmetro de Furação	76mm

Área de Selagem:

$$\Omega_{selagem} = C_{selagem} \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,076}{2}\right) = 4 \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,076}{2}\right) = 0,955 \text{ m}^2 \quad 5.10)$$

Tensão de Corte:

$$\tau = \frac{F_{Rotura}}{\Omega_{selagem}} = \frac{385}{0,955} = 403,14 \text{ kPa} \quad 5.11)$$

- Pregagem nº 4

Tabela 5.7 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 3 m - Pregagem nº 4

Pregagem nº 4	
Força de Rotura	315kN
Comprimento de Selagem	3m
Diâmetro de Furação	89mm

Área de Selagem:

$$\Omega_{selagem} = C_{selagem} \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,089}{2}\right) = 3 \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,089}{2}\right) = 0,839 \text{ m}^2 \quad 5.12)$$

Tensão de Corte:

$$\tau = \frac{F_{Rotura}}{\Omega_{selagem}} = \frac{315}{0,839} = 375,45 \text{ kPa} \quad 5.13)$$

Tabela 5.8 - Tensão de Corte - Comprimento de Selagem 5 m - Pregagem nº 4

Pregagem nº 4	
Força de Rotura	315kN
Comprimento de Selagem	5m
Diâmetro de Furação	89mm

Área de Selagem:

$$\Omega_{selagem} = C_{selagem} \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,089}{2}\right) = 5 \times 2 \times \pi \times \left(\frac{0,089}{2}\right) = 1,398 \text{ m}^2 \quad 5.14)$$

Tensão de Corte:

$$\tau = \frac{F_{Rotura}}{\Omega_{selagem}} = \frac{315}{1,398} = 225,32 \text{ kPa} \quad 5.15)$$

Tabela 5.9 -Quadro Resumo - Tensão de Corte - Abordagem Clássica – Ensaio Realizados

	Força de Rotura (kN)	Comprimento de Selagem (m)	Diâmetro de Furação (mm)	Tensão de Corte (kPa)
Pregagem nº 2	385	2,5	76	644,89
		4		403,14
Pregagem nº 4	315	3	89	375,45
		5		225,32

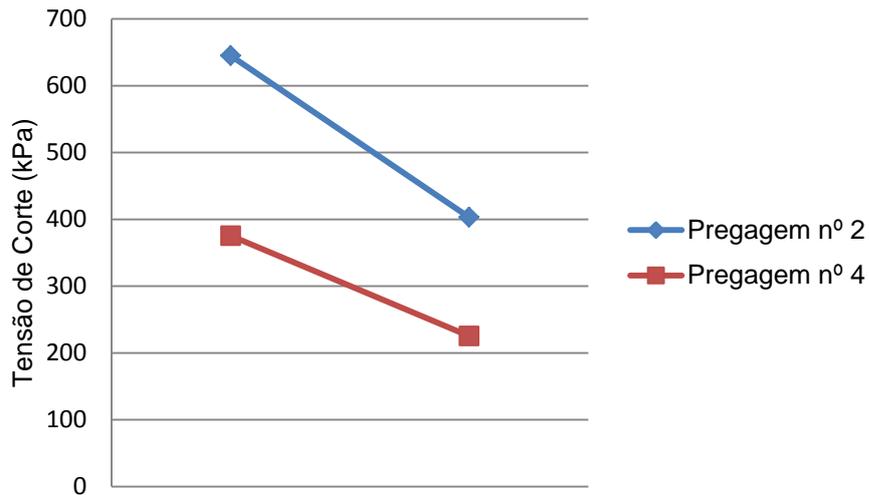


Figura 5.31 - Tensão de Corte – Abordagem Clássica - Pregagem 2 e 4

A Tabela 5.9 é um resumo das tensões de corte calculadas para cada pregagem ensaiada através da abordagem teórica, sobressaindo-se os valores da pregagem nº 2, à qual atinge valores um pouco superiores aos da pregagem nº 4 devido à sua elevada força de rotura (385 kN). Na Figura 5.31, estão representadas as tensões de corte que definem ambas as pregagens, demonstrando-se um certo paralelismo devido à relação entre o comprimento de selagem e o comprimento final possuírem valores muito próximos.

De referir que na pregagem nº 4 houve alguma dificuldade na colocação da pregagem no furo. Iniciou-se por realizar um furo de 76 mm, sendo este o diâmetro pré-definido para os ensaios, contudo e devido à existência de água no furo o que pode ter levado ao colapso de algum solo para o interior do furo, impossibilitando assim a colocação da pregagem. Sendo assim teve que se proceder à furação com o diâmetro imediatamente acima, ou seja, 89 mm levando a uma introdução da pregagem sem qualquer problema.

### 5.6.1.3. Comparação de Resultados

A tensão de corte é interpretada como um valor constante, que aumenta proporcionalmente com a força de rotura. A Tabela 5.10 resume os valores da tensão de corte dos ensaios realizados tendo em conta o comprimento de selagem.

Tabela 5.10 - Resumo da Tensão de Corte dos Ensaios (Referência e Atuais)

	Pregagem	Comprimento de Selagem (m)	Força de Rotura (kN)	Tensão de Corte (kPa)
Valores de referência	1	0,22	15	285,57
	2	1,54	85	231,30
	3	0,77	85	571,40
	4	1,08	175	679,00
	5	2,02	100	207,40
	6	2,77	190	287,40
Valores de Caso de Estudo	2	2,5	385	644,89
		4		403,14
	4	3	315	375,45
		5		225,32

Na Figura 5.32, abaixo apresentada podemos ter uma percepção visual da gama de valores da tensão de corte onde esta têm maior incidência. Essa zona de incidência situa-se na zona entre os 200 kPa e os 700 kPa.

Os valores da tensão de corte dos ensaios realizados nesta dissertação são da mesma ordem de grandeza do que nos ensaios de referência, colocando-se também no intervalo atrás na Tabela 5.10.

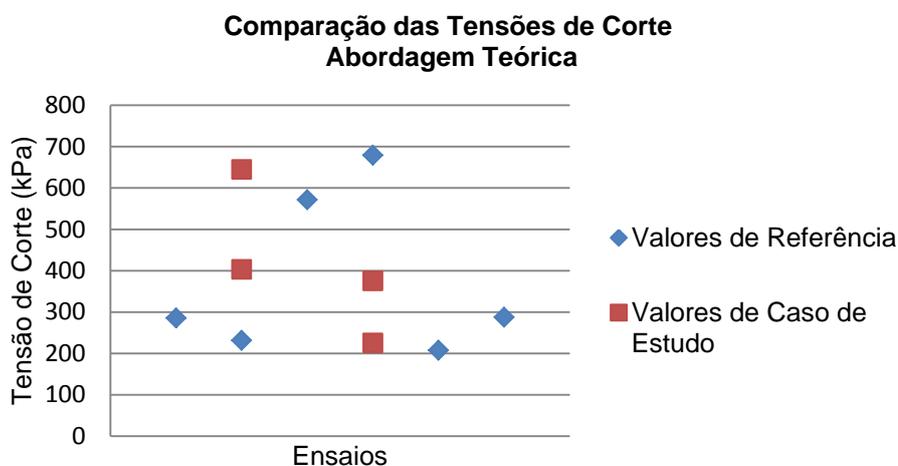


Figura 5.32 - Abordagem Clássica - Comparação de Resultados

Numa interpretação dos resultados através de uma abordagem clássica de cálculo da tensão de corte mobilizável começa-se por referenciar as características tendo em conta os materiais, a idade do ensaio e a relação água-cimento onde parecem não ter grande influência direta nos resultados.

No caso da idade do ensaio, o que implicaria no aumento da resistência da calda de selagem não se sucede devido à aplicação do superplastificante, aumentando as resistências iniciais para valores muito próximos das resistências últimas.

Sendo assim segundo a fórmula 5.7) as restantes variáveis são de alguma forma comparáveis devido a terem uma relação direta com a tensão de corte, como o comprimento de selagem, diâmetro do furo e carga última aplicada nas pregagens.

5.6.2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A aquisição de valores da tensão de corte a partir da abordagem experimental é realizada a partir dos dados obtidos dos extensômetros, seguindo os passos que estão dispostos no organograma da Figura 5.33. Este tratamento de dados foi realizado no programa Microsoft Excel em que podem ser consultados no Anexo 5 e 6.

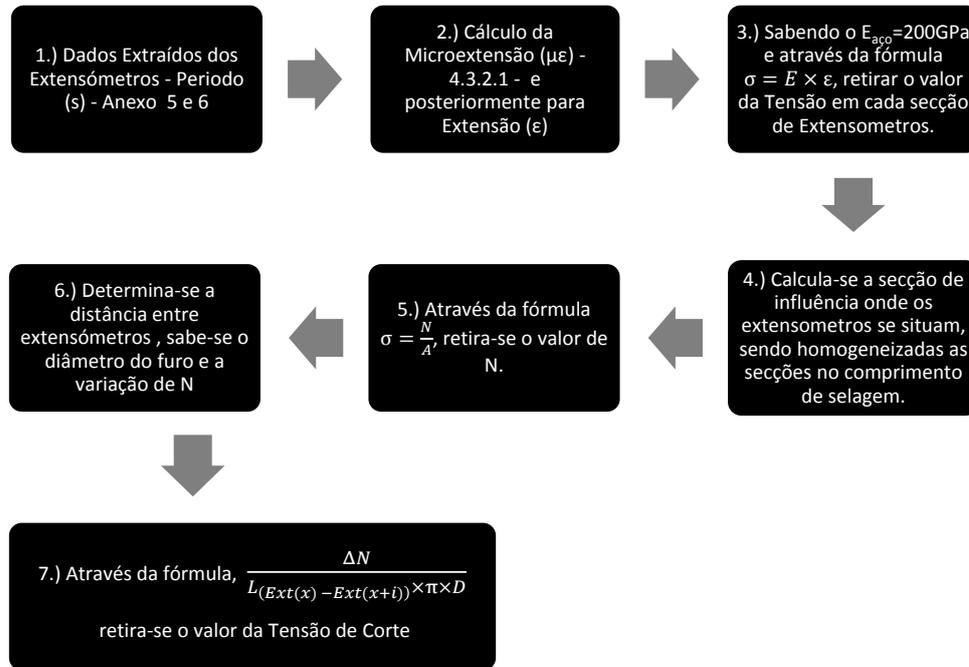


Figura 5.33 - Organograma do Processo de Tratamento de Dados

Segundo o ponto 4.) do organograma acima faz-se referência à secção de influência. Esta secção de influência têm haver com a área na zona dos extensômetros que resiste à força aplicada pelo macaco hidráulico.

5.6.2.1. Áreas de Influência

Na zona do comprimento livre devido ao isolamento do varão da calda, admite-se que o atrito entre estes é nulo, assim sendo, a área que resiste ao esforço do macaco seria somente a do varão de aço, sendo dada pela fórmula 5.16):

$$Pregagem 2 e 4 : \text{Área}_{Aço} = \pi \times \left(\frac{\text{Diâmetro}}{2}\right)^2 \tag{5.16}$$

$$Pregagem 2 e 4 : \text{Área}_{Aço} = \pi \times \left(\frac{32}{2}\right)^2 = 804,2 \text{ mm}^2 \tag{5.17}$$

Na zona do comprimento de selagem, a situação é diferente, devido haver uma forte ligação entre o varão e a calda de cimento, assume-se que estes resistem em conjunto à carga aplicada. Sendo assim opta-se por realizar a homogeneização devido à diferente composição dos materiais, apresentando cada um deles diferentes módulos de elasticidade, passando a área de influencia a ser dada pela fórmula 5.18):

$$Pregagem 2: \text{Área}_{Aço+Calda} = \text{Área}_{Aço} + \frac{E_{Aço}}{E_{Calda}} \times (\text{Área}_{Furo} - \text{Área}_{Aço}) \tag{5.18}$$

$$\text{Pregagem 2:} = 804 + \frac{30000}{200000} \times \left( \left( \pi \times \left( \frac{76}{2} \right)^2 \right) - \left( \pi \times \left( \frac{32}{2} \right)^2 \right) \right) = 1364 \text{ mm}^2 \quad 5.19)$$

$$\text{Pregagem 4:} = 804 + \frac{30000}{200000} \times \left( \left( \pi \times \left( \frac{89}{2} \right)^2 \right) - \left( \pi \times \left( \frac{32}{2} \right)^2 \right) \right) = 1617 \text{ mm}^2 \quad 5.20)$$

Esta diferença de secções têm uma influência direta na tensão de corte que será estudada mais à frente.

O estudo da pregagem nº 4 irá ser mais detalhado devido a não ter ocorrido problemas de maior durante os ensaios sendo que posteriormente ao tratamento de alguns dados foram tidos em conta alguns fatores que podem influenciar diretamente a tensão de corte.

A utilização dos extensómetros podem dar uma noção do estado de fendilhação da calda na aplicação das cargas durante o ensaio, podendo influenciar a área resistente, havendo duas hipóteses possíveis:

1. Não ocorrendo a fendilhação da calda de selagem, utilizando a área homogeneizada no comprimento de selagem, secção A-A' da Figura 5.34.

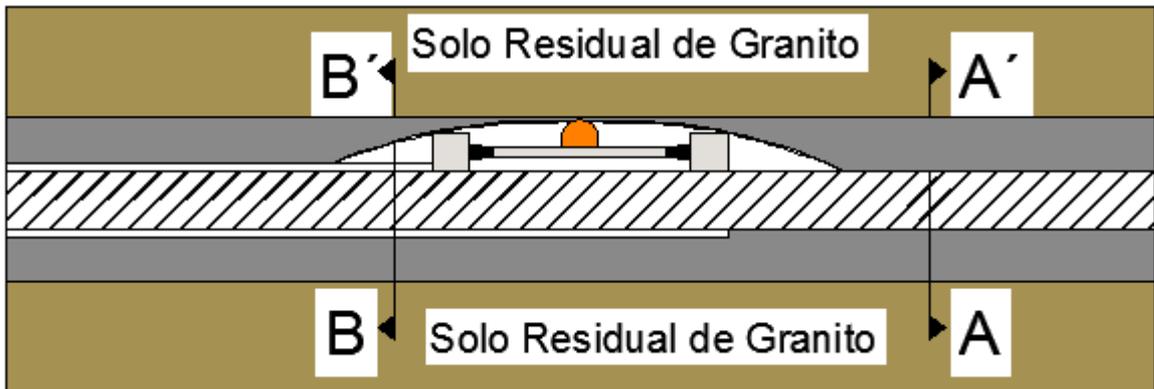


Figura 5.34 - Aumento de Secção no Comprimento de Selagem - Pregagem nº 4

- Secção B-B' - 804 mm<sup>2</sup>
- Secção A-A' - 1617 mm<sup>2</sup>

2. A fendilhação da calda de selagem - Figura 5.35 - surge à extensão de 0.1‰, sendo que se atingida essa extensão, a área resistente da pregagem ficaria somente reduzida à área do varão de aço.

Utilizando um betão C30/35, têm-se:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,k} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{Betão}} = 30 \text{ GPa}$$

Usando a fórmula 5.20):

$$\varepsilon = \frac{f_{ct,k}}{E} = \frac{2,9}{30000} \cong 0,1\text{‰} \quad 5.21)$$

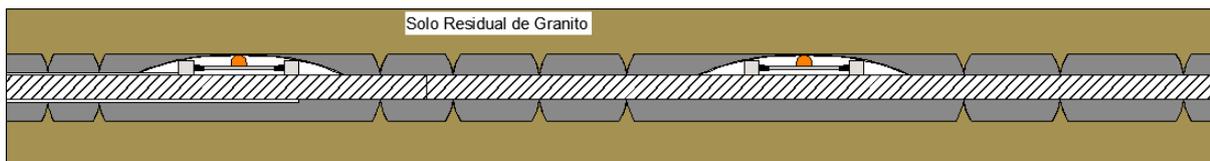


Figura 5.35 - Fissuração da Calda de Selagem

Em pregagens em que o elemento de reforço é varões de aço, em caso de rotura da calda apenas pequenas extensões e alongamentos são mobilizadas especialmente quando o varão de aço possui diâmetros como o de 32 e 40 mm. [31]

#### 5.6.2.2. Pregagem nº 2

- Força Axial

Devido a ter-se realizado incrementos de carga muito pequenos (5 kN) foi possível fazer o estudo da força axial de cada extensómetro em escalões de carga de referência, tendo esses sido os de 100, 150, 200, 250, 300, 350 e a carga de rotura de modo a visualizar a variação da força N à medida que se aplicava carga.

A Figura 5.36 é o reflexo dessa evolução onde se inicia com a carga de aplicação do macaco hidráulico, havendo um decréscimo muito acentuado em todos os patamares de carga, sendo a força muito reduzida nos extensómetros 1 e 2 que por sinal se situam ambos no comprimento livre.

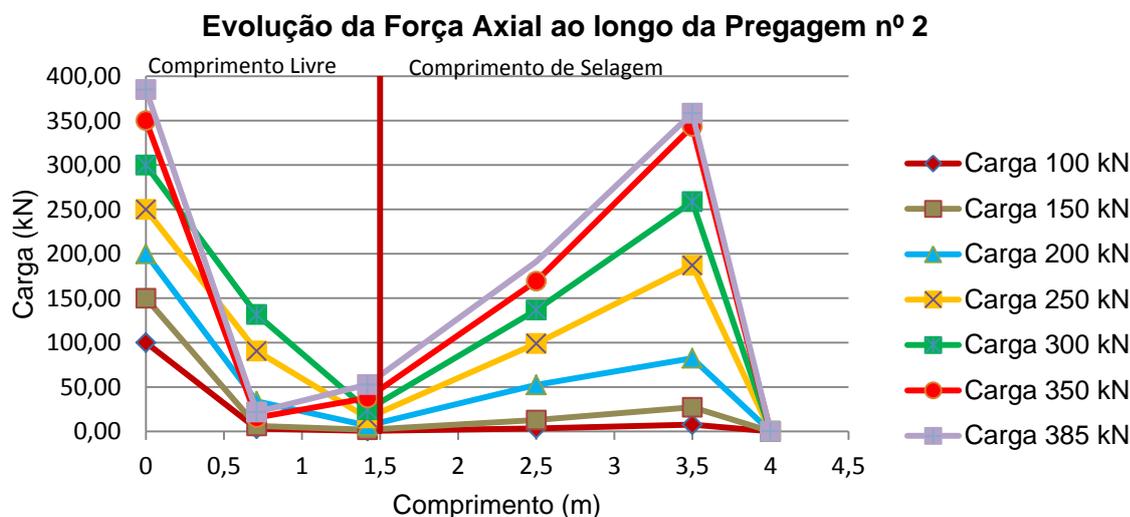


Figura 5.36 – Evolução da Força Axial em cada extensómetro - Pregagem nº 2

Após o extensómetro 2 verifica-se um aumento da força axial nos extensómetros seguintes fazendo estes parte do comprimento de selagem. O comportamento esperado no extensómetro 4 seria de decréscimo devido a aproximar-se do fim da pregagem onde seria de esperar um valor de 0 kN.

Após uma análise cuidada dos valores da força axial de cada extensómetro retirados do ensaio como demonstra a Figura 5.36, verificou-se que a força axial do extensómetro 4 aumentou em vez de decrescer, levando à ponderação de alguma troca da identificação dos extensómetros 1 e 4. Se admitíssemos essa troca, a evolução da força axial tomaria valores de maior coerência, sendo que na zona de selagem a força dissipada até ao fim da pregagem seria muito maior.

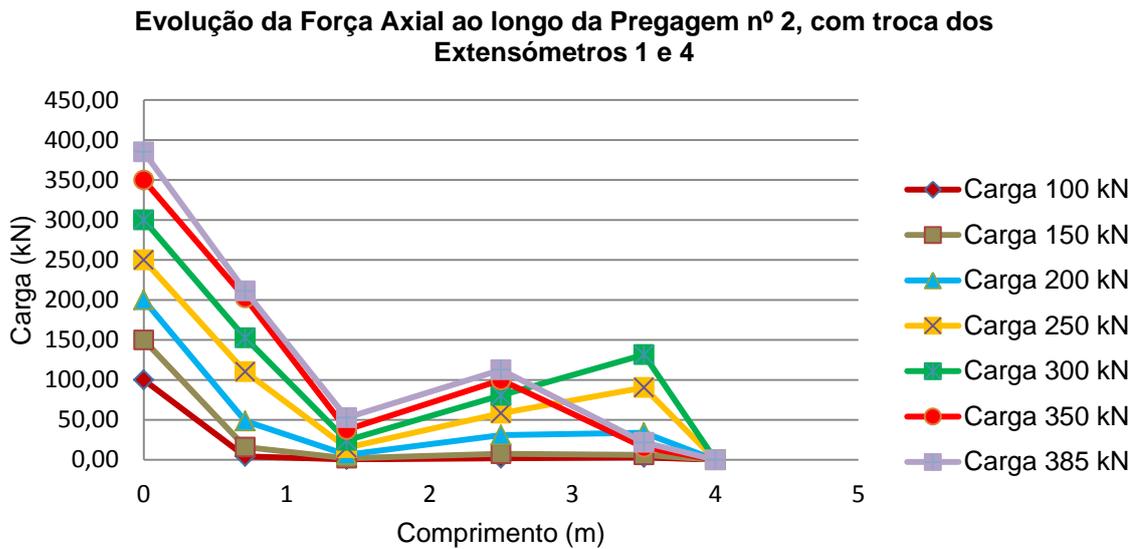


Figura 5.37 – Evolução da Força Axial em cada extensómetro, c/ troca dos extensómetros 1 e 4 - Pregagem nº 2

Na evolução da força axial um valor que se destaca é o do extensómetro 2, levando a uma aumento da força dissipada, ou seja, na Figura 5.37, é o valor mais baixo perto da zona média da pregagem.

Este fenómeno pode ter ocorrido devido a um possível impulso passivo na frente do extensómetro 2 - Figura 5.38 – causado pela chapa de carga posicionada junto ao betão projetado, fazendo com que ao ser exercida uma carga no macaco, esta impossibilite a calda de cimento de se deslocar, sendo que nesta zona devido à calda estar em contato com a zona do comprimento de selagem, crie um impulso passivo que possa levar à compressão do extensómetro nº 2.

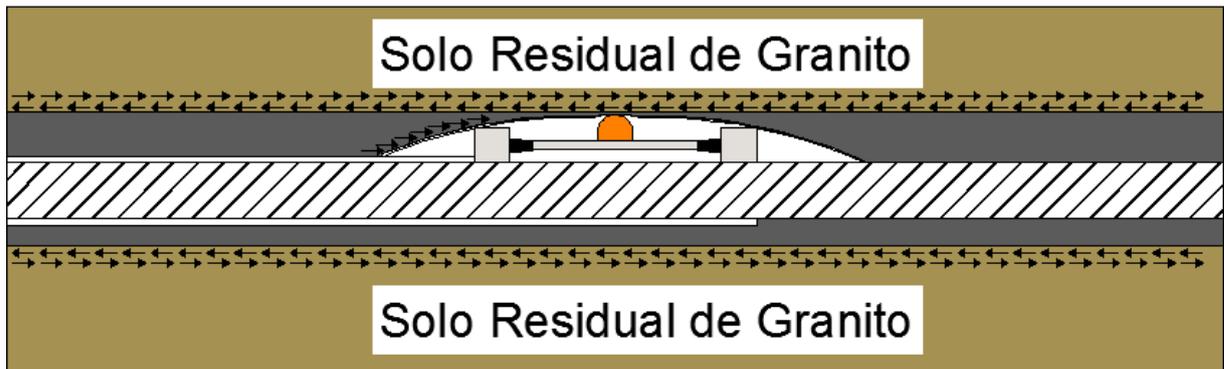


Figura 5.38 - Eventual Fenómeno de Rotura do Extensómetro 2 - Pregagem nº 2

- Tensão de Corte

A análise à tensão de corte foi realizada nos mesmo patamares de carga que se utilizou na força axial sendo visível na Figura 5.39. A representação gráfica foi realizada com a tensão de corte ao longo do comprimento das pregagens em metros. De forma a facilitar a distinção entre o comprimento livre e o comprimento de selagem na pregagem colocou-se uma linha vermelha a separá-los.

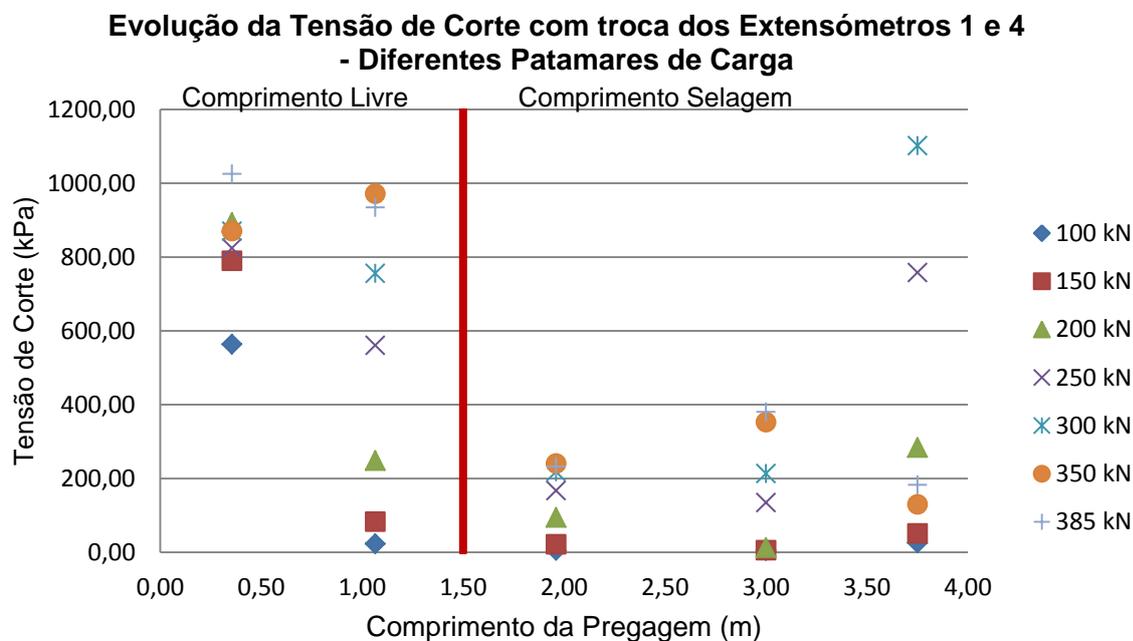


Figura 5.39 - Evolução da Tensão de Corte com troca dos Extensómetros 1 e 4 - Diferentes Patamares de Carga

Na análise da tensão de corte segundo os patamares de carga e tendo em conta a troca dos extensómetros 1 e 4, apresentada na Figura 5.39, inicia-se com a carga de 100 kN em que existe uma quebra muito acentuada levando a valor de tensão de corte muito inferiores na zona do comprimento de selagem.

Ao longo dos aumentos de carga aplicada no macaco, na zona entre a “cabeça” da pregagem e o extensómetro 1, nota-se um decréscimo gradual da carga dissipada nesta zona, levando a entender que a resistência desta secção terá chegado ao limite.

Após o comprimento livre, nota-se uma aumento da tensão de corte na zona do comprimento de selagem, demarcando-se a zona com maior resistência à carga aplicada no macaco, devido ao comprimento livre ter alcançado o seu limite de resistência.

Nas cargas perto da rotura, como demonstra a Figura 5.40, uma possível pode ter ocorrido entre a carga dos 300 kN e os 350 kN, porque perto dos 4 metros de pregagens houve um decréscimo da tensão de corte sucedendo o mesmo medido aos 385 kN, sendo esta a carga de rotura de ensaio. Esta rotura pode ter ocorrido devido ao fim da pregagem ser uma zona com pouca resistência ao corte devido ao término do elemento resistente, o varão de aço, levando secção mais suscetível de ocorrer uma rotura tal como se supõe.

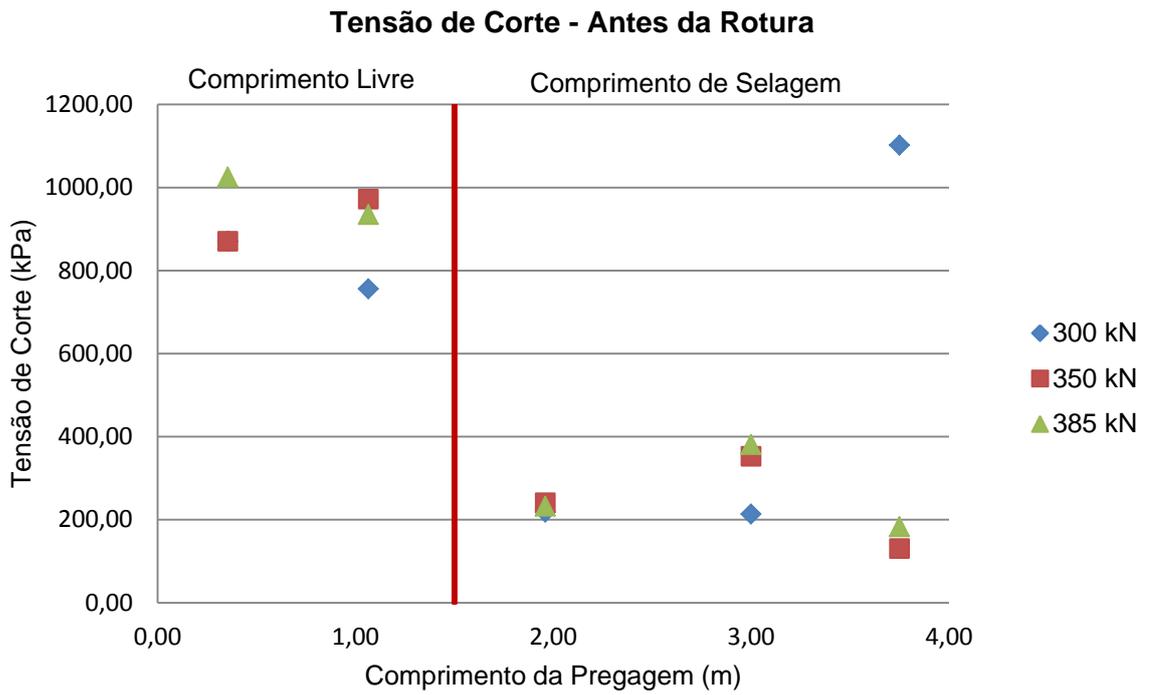


Figura 5.40 - Tensão de Corte - Antes da Rotura - Pregagem nº 2

## 5.6.2.3. Pregagem nº 4

O estudo inicial desta pregagem fez-se segundo o ponto 1 de 5.6.2.1, considerando que não haveria fendilhação da calda de selagem, proporcionando ao comprimento de selagem a área homogeneizada da fórmula 5.18). Posteriormente realizou-se uma análise considerando as secções com  $\varepsilon > 0,1\%$  e para finalizar analisou-se o comportamento da pregagem extraíndo o extensómetro 2.

Posto isto inicia-se abaixo à interpretação dos valores do Anexo 8.1, 8.2 e 8.3.

A cálculo da força axial na pregagem nº4 realizou-se da mesma forma que a realizada na pregagem nº 2. Realizam-se duas análises dessa força axial, sem fissuração e com fissuração da calda de selagem, segundo os mesmos patamares de carga utilizados na pregagem nº 2 - Figura 5.41 - com a única diferença que o ultimo patamar de carga foi de 315 kN, sendo o valor da carga que se atingiu na rotura.

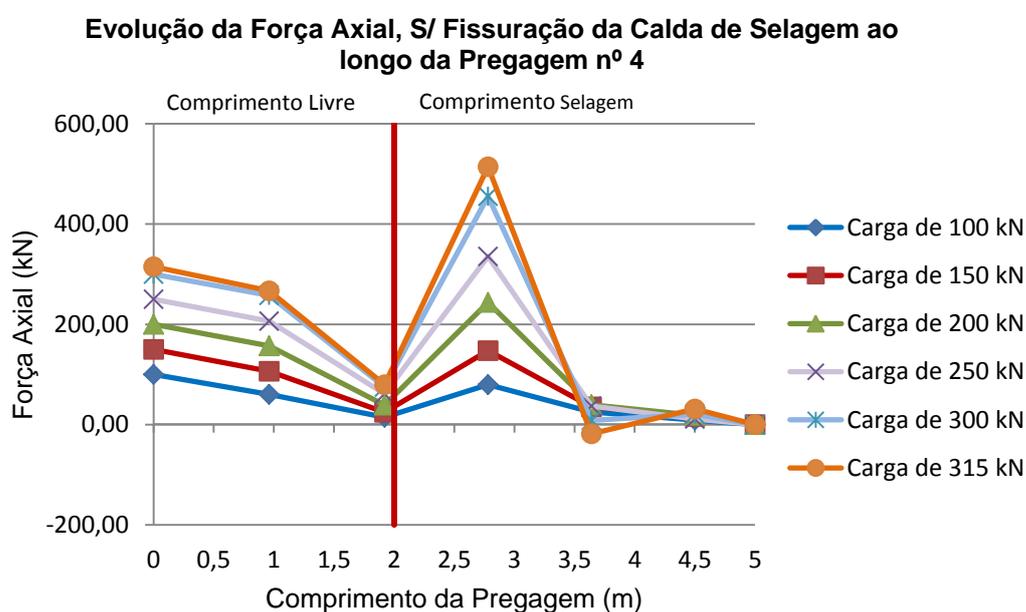


Figura 5.41 - Evolução da Força Axial em cada extensómetro – S/ Fissuração da Calda de Selagem - Pregagem nº 4

Na análise da evolução da força axial na pregagem nº4 começa-se pela “cabeça” da pregagem que possui um valor de carga aplicada igual à que surge no manómetro da pressão, havendo uma redução de forma linear nos diferentes patamares de carga até ao extensómetro 1 devido a uma perda constante da força axial nesse primeiro tramo do comprimento livre.

Logo após o extensómetro 1 surge um decréscimo muito acentuado, levando a valores da força axial muito inferiores tendendo para valores próximos de 100kN, independentemente do escalão de carga, até chegar a um mínimo no extensómetro 2 como o sucedido na pregagem nº 2, indiciando algum fenómeno que possa ter afetado o extensómetro 2 devido a este estar na transição entre o comprimento livre e de selagem

Após o extensómetro 2 ocorre um aumento brusco da força axial, contudo é aqui que surge a necessidade de se estudar a fissuração da calda, devido à força existente no extensómetro 3 na rotura ser muito superior à força exercida na cabeça da pregagem, o que não será possível sendo que à medida que se afasta da cabeça da pregagem a força axial nas secções vai diminuindo devido à existência da tensão de corte ao longo da pregagem como se exemplifica na Figura 5.42.

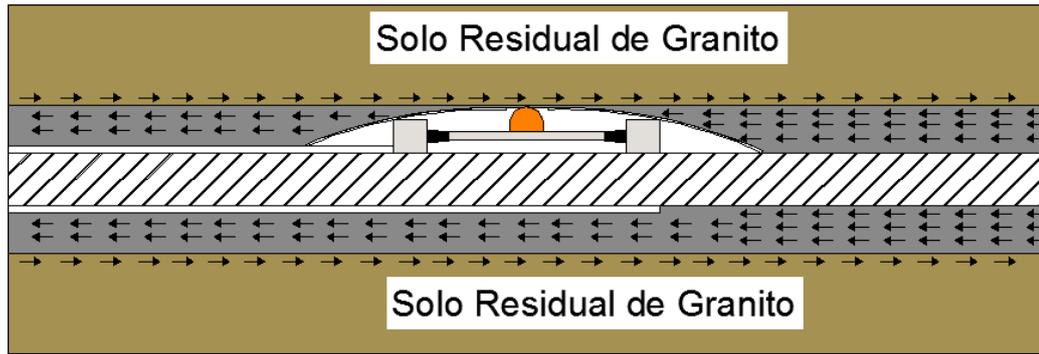


Figura 5.42 – Tensão de Corte no Comprimento Livre - Pregagem nº 4

Com a necessidade de se analisar a evolução tendo em conta a fissuração da calda, a Figura 5.43, é reflexo dessa análise. Este gráfico distingue-se do gráfico da Figura 5.41, pelas áreas de influência que possuíam uma extensão superior a 0,1%, levando à fissuração da calda de selagem adotando-se assim a área de influência a do varão de aço somente.

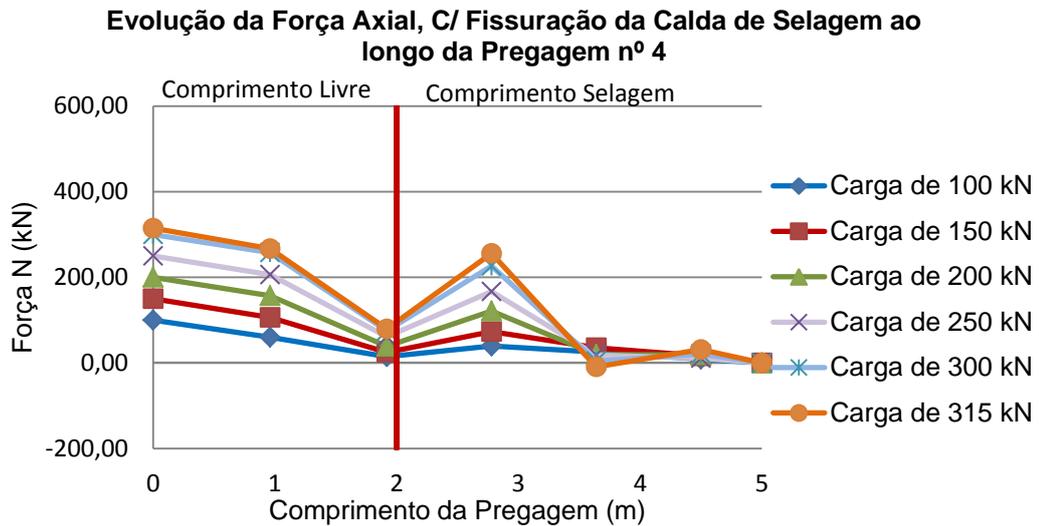


Figura 5.43 - Evolução da Força Axial em cada extensómetro – C/ Fissuração da Calda de Selagem -Pregagem nº 4

O comportamento da força axial, havendo fissuração nas secções com uma extensão mais significativa, como a secção entre o extensómetro 2 e o 3, faz com que esta diminua como é visível na Figura 5.43, em que nesta secção o problema de existir uma força axial superior à força axial da “cabeça” da pregagem não acontece devido à área que resiste à carga passar a ser só a do varão de aço.

Relativamente ao extensómetro 2 sucede-se o mesmo que na pregagem nº 2, não havendo um alívio do decréscimo da força axial, devido ao fenómeno do impulso passivo instalado à frente deste mesmo extensómetro.

Numa ultima análise da força axial, procedeu-se à remoção no cálculo do extensómetro 2, evitando assim oscilações da força, levando a um ganho posteriormente a este extensómetro. Na Figura 5.44 está bem demonstrado a influência do fenómeno que ocorre no extensómetro 2 no comportamento global da pregagem nº 4.

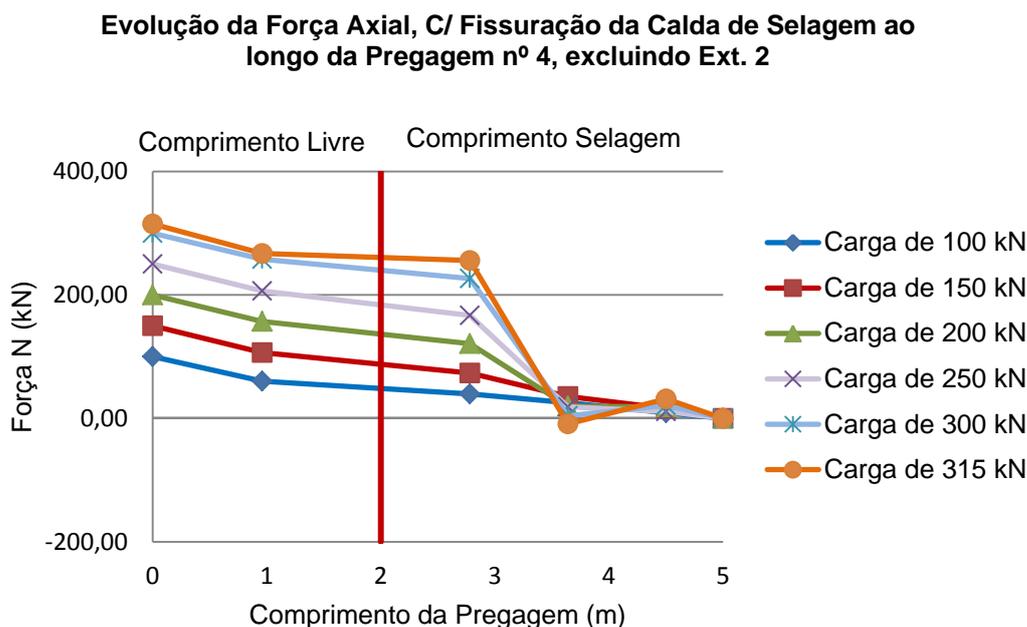


Figura 5.44 - Evolução da Força Axial em cada extensómetro – C/ Fissuração da Calda de Selagem, Excluindo Extensómetro 2 -Pregagem nº 4

Numa análise da força axial excluindo o fenómeno ocorrido no extensómetro 2, leva a uma pequena redução da força axial no comprimento livre da pregagem, onde posteriormente na zona de selagem a força axial é dissipada na sua totalidade, sendo um evolução que se aproxima mais de uma abordagem teórica.

- Tensão de Corte

A tensão de corte na pregagem nº 4 foi analisada nos mesmos patamares que a força axial, para que houvesse uma relação com os gráficos acima referidos. A tensão de corte foi avaliada nos pontos intermédios entre cada extensómetros segundo consta no Anexo 8.1, 8.2 e 8.3. Esta análise teve como base a existência de fissuração da calda de selagem com a existência ou não do extensómetro 2.

Sendo assim procede-se a uma avaliação da tensão de corte nestes dois tipos, em que na Figura 5.45, a existência do extensómetro 2, provocando um abaixamento da força axial como anteriormente foi visto na Figura 5.43, implica um aumento da tensão de corte drástico, verificando-se este comportamento em que passa de valores perto 200 kN para valores perto dos 700 kN na carga de rotura aplicada.

Após este comportamento, no início do comprimento de selagem a tensão de corte tem um pico entre o extensómetro 3 e 4 sendo que posteriormente tem tendência a diminuir até ao fim da pregagem.

A variação da tensão de corte à medida que se aumenta a carga aplicada no macaco em cada extensómetro é diferente, destacando-se a secção entre os extensómetros 3 e 4 em que a variação da tensão de corte é significativa podendo ter sido levada à rotura, devido ao diferencial da tensão de corte entre esta secção e a seguinte.

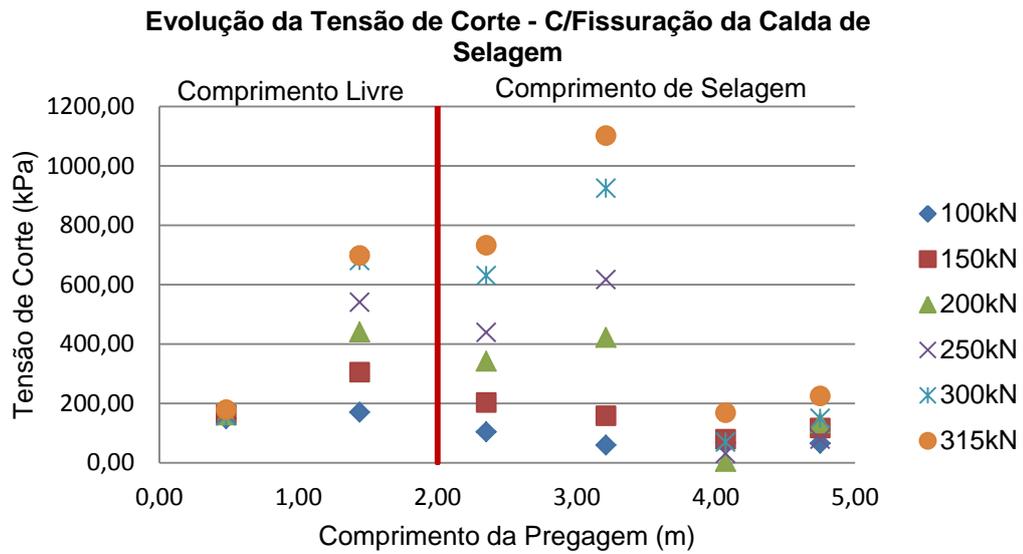


Figura 5.45 - Evolução da Tensão de Corte - C/Fissuração da Calda de Selagem - Pregagem nº4

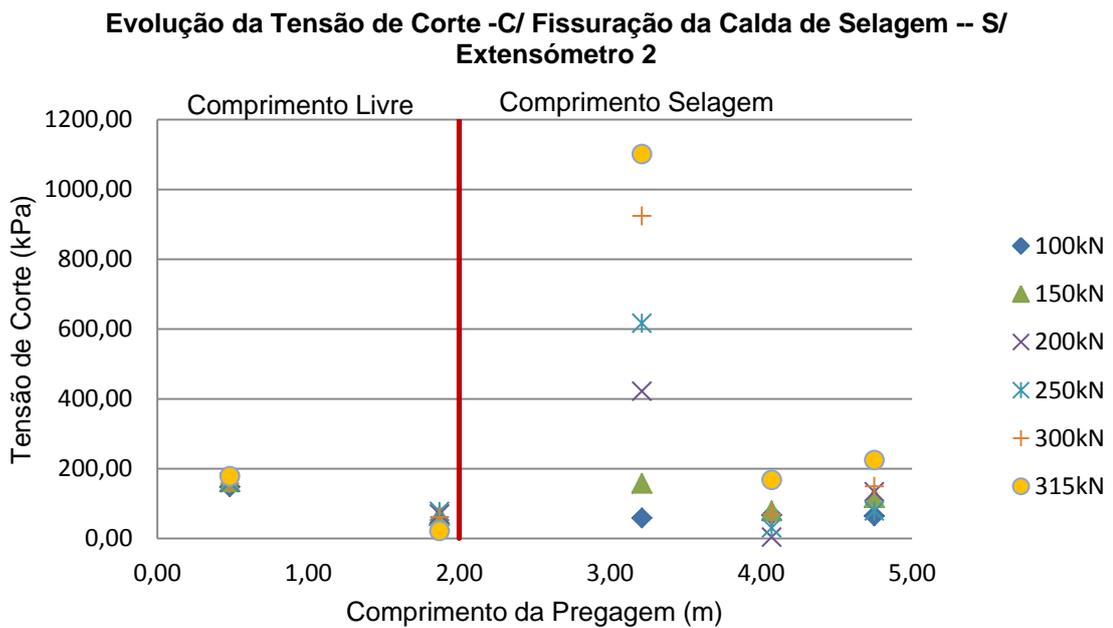


Figura 5.46 - Evolução da Tensão de Corte - C/Fissuração da Calda de Selagem e S/Extensômetro 2 - Pregagem nº 4

Na análise à tensão de corte com fissuração da calda de selagem mas excluindo o extensômetro 2, como se pode ver na Figura 5.46, o comportamento visualizado é de uma pregagem com comprimento livre. A justificação para esta afirmação é pelo fato de no comprimento livre representado na Figura 5.46, a tensão de corte representada é muito reduzida, o que de uma forma teórica, era muito credível pelo fato de haver pouco ou nenhum atrito entre a calda de selagem e o varão de aço devido ao tubo PVC colocado.

No comprimento livre a tensão de corte ficou-se por valores próximos dos 200 kPa em todos os patamares de carga, havendo uma resistência reduzida em qualquer patamar de carga devido ao reduzido atrito existente entre o varão de aço e a calda de cimento.

Na entrada do comprimento de selagem a tensão de corte aumenta para valores próximos dos 1200 kPa. Esta carga tem algum sentido se seguirmos o raciocínio mencionado atrás em que se dizia que a carga aplicada na “cabeça” do macaco ia sendo dissipada ao longo da pregagem, verificando-se a total dissipação quando esta chegava ao fim da pregagem. Sendo assim a tensão de corte logo no início da pregagem é mais do que justificada, devido haver cerca de 3 metros de comprimento de selagem, mobilizando maiores tensões de corte.

- Interpretação dos resultados

A análise da força N segundo os gráficos apresentados desde a Figura 5.41, Figura 5.43 e Figura 5.44 faz com que se perceba algo que não era expectável, quando se definiu o comprimento livre nas pregagens a ensaiar. A definição do comprimento livre levaria a que a força aplicada na “cabeça” da pregagem seria a mesma no extensómetro 1 e 2, devido ao varão de aço supostamente não ter atrito com a calda de selagem, sendo que isso não se sucede como se vê na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Valores de Força N - Extensómetro 1 e 2 - Pregagem nº 4

Carga Aplicada no Macaco (kN)	S/Fissuração e C/Fissuração da Calda	
	Extensómetro 1	Extensómetro 2
100	60,22	14,62
200	156,95	38,92
300	257,69	74,88

Os valores da força N no extensómetro 1 e 2 têm sempre tendência a diminuir, podendo-se concluir que a calda de selagem até à boca têm influência direta na resistência da pregagem, ou seja, quando realiza-se um comprimento livre e sela-se até à boca do furo faz com que o comportamento que se deveria esperar de um comportamento livre não se verifica, não sendo equivalente selar exclusivamente o comprimento de selagem ou levar a calda de selagem até à “boca” do furo.

A selagem exclusiva do comprimento de selagem pré-determinado é de difícil execução como se pode verificar a partir do estudo realizado por Gomes (2011) [1] em que após a tentativa de selagem exclusiva do comprimento de selagem procedeu-se à medição efetiva e verificou-se que os comprimentos de selagem não eram os pré-definidos. No caso dos ensaios realizados nesta dissertação não foi realizado a medição do comprimento de selagem mas efetuou-se uma análise tendo em conta o volume teórico e o volume injetado *in situ*, tendo-se verificado em 4.5.1 que houve um acréscimo de calda injetada, não podendo-se fazer o controlo da selagem através de uma forma teórica.

Como forma de solução para a injeção exclusiva do comprimento de selagem existe um equipamento designado por Paker - Figura 5.47 [32]. Este equipamento faz com que a selagem seja controlada, embora aplique no furo uma pressão devido ao confinamento do furo.

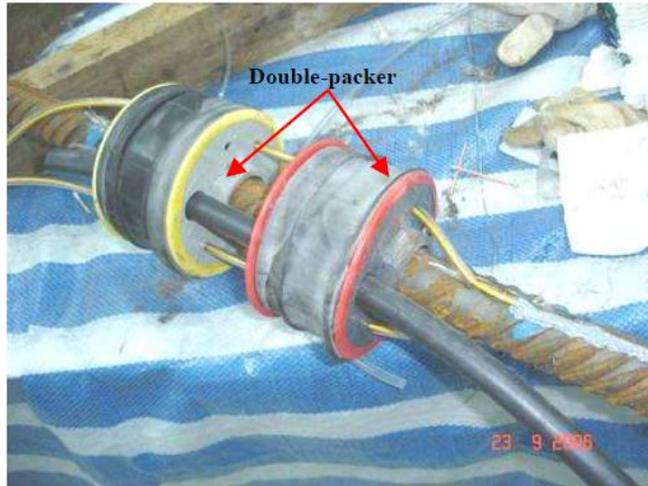


Figura 5.47 - Controlo de Selagem - Paker [32]

O valor da carga que se aplica na “cabeça” da pregagem é absorvida a partir da tensão de corte que se gera ao longo da pregagem, assim sendo sabe-se que na “cabeça” da pregagem o valor que se adota é o valor da carga aplicada pelo macaco e que na extremidade oposta a força é nula, ou seja, a força aplicada pelo macaco ao longo da pregagem é dissipada. É importante avaliar o valor da força N que é dissipada à medida que o comprimento da pregagem aumenta.

Na interpretação dos resultados utiliza-se como exemplos a carga de 100kN, sublinhando-se o fato de se ter realizado para o caso de haver fissuração na calda de selagem com e sem extensómetro 2 – Anexo 8.2 e 8.3.

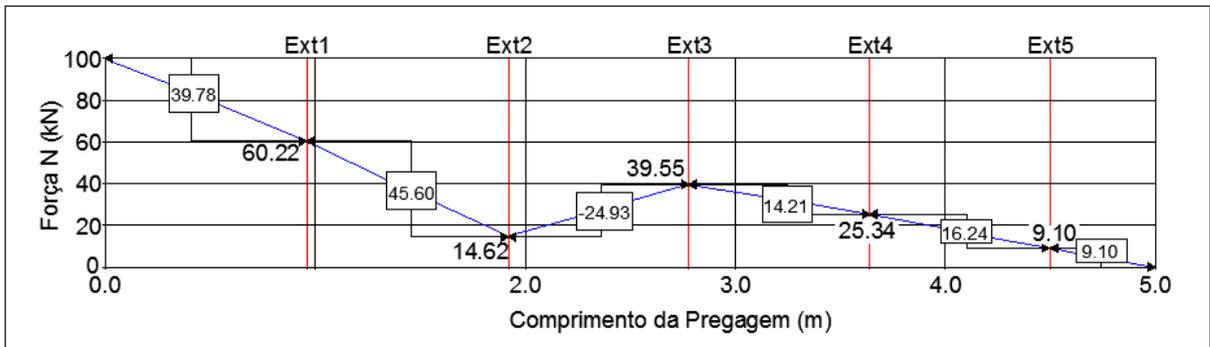


Figura 5.48 - Força Dissipada entre Extensómetros – C/Fissuração da Calda de Selagem – Carga 100 kN

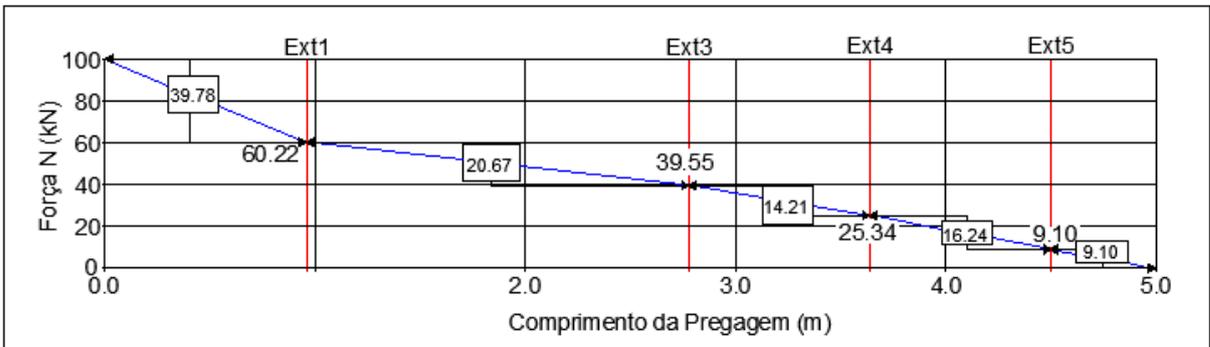


Figura 5.49 - Força Dissipada entre Extensómetros – C/Fissuração da Calda de Selagem - S/Extensómetro 2 – Carga 100 kN

$$\text{Força } N_{Dissipada} = \Delta \text{Força } N \quad 5.22)$$

- Para o caso de haver fissuração com o extensómetro 2:

$$N_{dissipada (Ext1)} = 100 - 60,22 = 39,78 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext2)} = 60,22 - 14,62 = 45,60$$

$$N_{dissipada (Ext3)} = 14,62 - 39,55 = -24,93 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext4)} = 39,55 - 25,34 = 14,21 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext5)} = 25,34 - 9,10 = 16,24 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Fim)} = 9,10 - 0,0 = 9,10 \text{ kN}$$

$$\sum N_{dissipada} = N_{Inicio} \Leftrightarrow 39,78 + 45,60 + (-24,93) + 14,21 + 16,24 + 9,1 = 100 \text{ OK!}$$

- Para o caso de haver fissuração sem o extensómetro 2:

$$N_{dissipada (Ext1)} = 100 - 60,22 = 39,78 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext3)} = 60,22 - 39,55 = 20,67 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext4)} = 39,55 - 25,34 = 14,21 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Ext5)} = 25,34 - 9,10 = 16,24 \text{ kN}$$

$$N_{dissipada (Fim)} = 9,10 - 0,0 = 9,10 \text{ kN}$$

$$\sum N_{dissipada} = N_{Inicio} \Leftrightarrow 39,78 + 20,67 + 14,21 + 16,24 + 9,1 = 100 \text{ OK!}$$

Seguindo este raciocínio para os demais escalões de carga, como estão exemplificados na Tabela 5.12 e Tabela 5.13, podemos verificar a zona com mais importância na resistência à carga aplicada à rotura.

Referindo-se à Tabela 5.12, podemos verificar que a secção entre o extensómetro 3 e o 4 é a que possui maior força N dissipada a partir do patamar de carga de 250 kN, devido a estar numa zona inteiramente selada com a calda em contacto com o varão de aço. Este valor de força dissipada, poderá ter este valor mais elevado devido ao fenómeno que ocorreu no extensómetro 2, onde houve uma redução muito acentuada tanto da força N como da tensão de corte, havendo uma “compensação” de modo a que no final da pregagem a força N dissipada fosse total.

Tabela 5.12 - Força dissipada ao longo da Pregagem C/Fissuração da Calda - Pregagem nº 4

Força Dissipada ao longo da Pregagem, Com Fissuração da Calda de Selagem					
Pregagem	Patamar de Carga				
	100	200	250	300	315
Início					
	39,78 kN	43,05 kN	43,62 kN	42,31 kN	47,96 kN
Extensómetro 1					
	45,60 kN	118,03 kN	145,13 kN	182,81 kN	187,42 kN
Extensómetro 2					
	-24,93kN	-82,20kN	-105,58kN	-151,52kN	-176,18kN
Extensómetro 3					
	14,21kN	101,42kN	148,37kN	222,25kN	264,88kN
Extensómetro 4					
	16,24kN	1,00kN	7,39kN	-16,74kN	-40,49kN
Extensómetro 5					
	9,10kN	18,69kN	11,08kN	20,89kN	31,41kN
Fim					
$\Sigma$	100 kN	200 kN	250 kN	300 kN	315 kN

Através da Tabela 5.12, verifica-se que o somatório das forças dissipadas em cada secção ao longo da pregagem perfaz o valor da carga aplicada no macaco hidráulico.

Esta análise das forças dissipadas ao longo da pregagem tendo em conta que a fissuração da calda dá-nos uma ideia de como evolui a força dissipada, destacando-se a secção entre o extensómetro 3 e 4, em que cada patamar de carga que se aplica o valor da força dissipada evidencia-se. Esta secção situa-se já no comprimento de selagem, sendo uma zona de grande atrito entre a calda e o varão de aço, levando a uma resistência da tensão de corte superior.

No caso da Tabela 5.13, a análise à força dissipada é realizada tendo em conta a fissuração de algumas secções e com a exclusão do extensómetro 2.

Através da Tabela 5.13 pode se avaliar os valores referentes ao comprimento livre (as primeiras duas linhas) em que o valor da força dissipada é muito semelhante independentemente das cargas aplicadas no macaco, atingindo valores próximos dos 45 kN. No caso do patamar de carga de 100 kN, devido à carga ser de baixo valor a força dissipada pelo comprimento livre é quase suficiente para dissipá-la na totalidade não havendo um acréscimo no comprimento de selagem.

Nos restantes patamares de carga isso já não acontece, fazendo-se supor que no patamar de carga de 200kN terá causado o limite da resistência ao corte do comprimento livre, devido a esta ter estagnado para os restantes patamares de carga. Após este limite a força passa a ser dissipada em maior escala na zona do comprimento de selagem em que os valores tal como na Tabela 5.12, tomam valores mais elevados à medida que se aplica carga no macaco.

Tabela 5.13 - Força dissipada ao longo da Pregagem C/Fissuração da Calda, S/Extensómetro 2 - Pregagem nº 4

Força Dissipada ao longo da Pregagem, Com Fissuração da Calda de Selagem, Sem Extensómetro 2					
Pregagem	Patamar de Carga				
	100 kN	200 kN	250 kN	300 kN	315 kN
Início	_____				
_____	39,78 kN	43,05kN	43,62kN	42,31kN	47,96kN
Extensómetro 1	_____				
_____	20,67 kN	35,83kN	39,55kN	31,29kN	11,23kN
Extensómetro 3	_____				
_____	14,21 kN	101,42kN	148,37kN	222,25kN	264,88kN
Extensómetro 4	_____				
_____	16,24 kN	1,00kN	7,39kN	16,74kN	40,49kN
Extensómetro 5	_____				
_____	9,10 kN	18,62kN	11,08kN	20,89kN	31,41kN
Fim	_____				
Σ	100 kN	200 kN	250 kN	300 kN	315 kN

## 5.7. FLUÊNCIA

A realização de patamares de fluência surgiu como uma oportunidade em que era viável realizar de modo a analisar a extensão que o varão sofria ao longo de um determinado tempo com a aplicação de uma determinada carga. Esta análise baseou-se na extensão obtida como se não houvesse fissuração do betão, devido a esta possuir extensões de maior valor, ou seja, o pior cenário em termos de fluência.

Assim sendo, optou-se por registar logo após a estabilização da carga ou seja no instante 0', 1', 2', 5', 10' e 15' minutos

### 5.7.1. PREGAGEM Nº 2

Os cálculos para a obtenção dos patamares de fluência da pregagem nº 2 estão inseridos no Anexo 5.

- Defletómetros

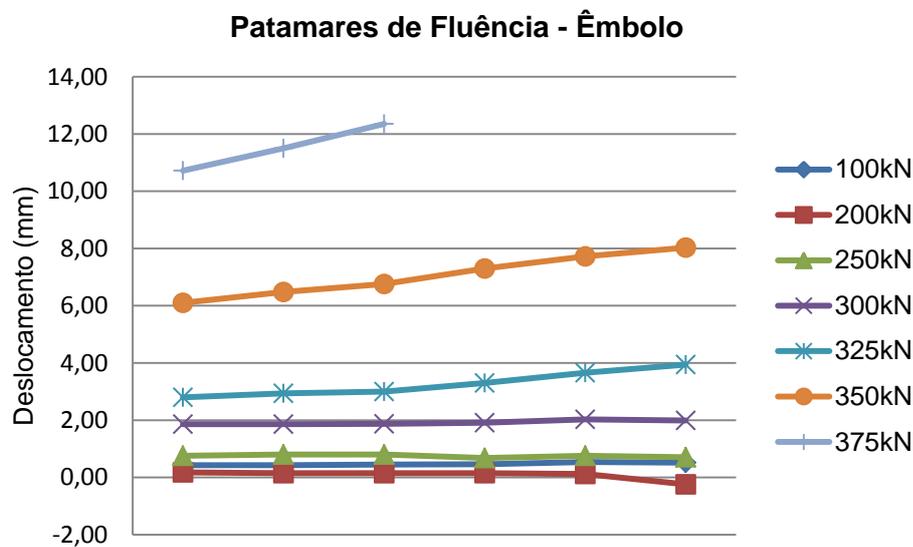


Figura 5.50 - Patamar de Fluência - Êmbolo - Pregagem nº 2

Na Figura 5.50 está representada a fluência do êmbolo da pregagem nº2 em cada patamar de carga. Pode-se notar que até à carga de 300 kN a fluência da pregagem é muito reduzida, tornando-se quase impossível de se notar uma alteração, exclusive na carga de 200 kN que aos 15 minutos houve um pequeno deslocamento. Acima dos 300 kN, devido aos elevados valores, a pregagem já se encontra num comportamento de cedência notando-se o acréscimo do deslocamento à medida que os intervalos de tempo aumentavam, sendo que na carga de 350 kN o acréscimo de deslocamento chega a ser de 2mm, ocorrendo o mesmo valor de acréscimo ao fim de 2 minutos na carga dos 375 kN, valor elucidativo da rotura da pregagem.

A fluência sentida na chapa de carga é de certo modo mais controlada, devido a esta estar apoiada numa zona de alta rigidez como é o betão projetado com malhasol. Na Figura 5.51 é possível visualizar um desfaseamento em todos os patamares entre o instante 0' e após 1' minuto, o que poderá ter sido originado pelo percalço da chapa ter ficado apoiada no acoplador originando o corte deste - Figura 5.16.

Nos tempos de registo seguintes nota-se uma uniformidade de valores, podendo-se concluir que não houve grande interferência na chapa do fenómeno da fluência.

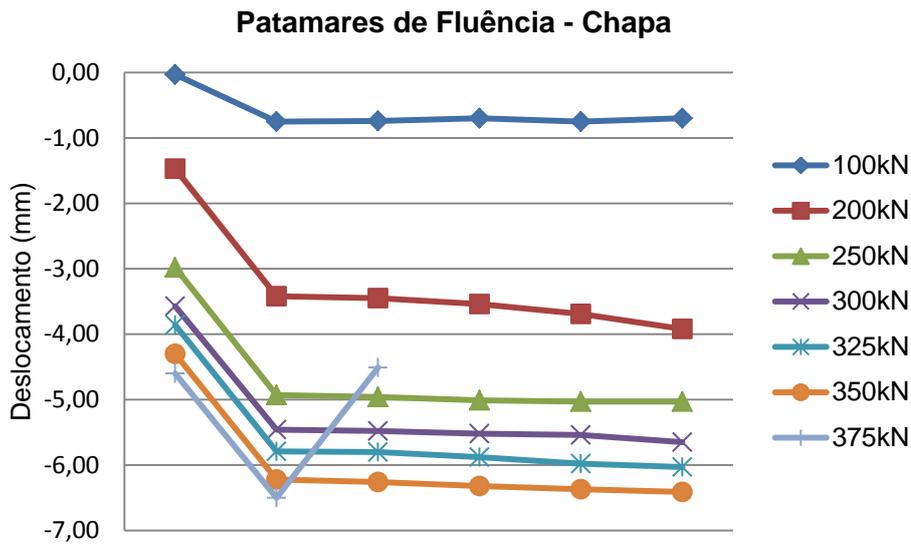


Figura 5.51 - Patamar de Fluência - Chapa - Pregagem nº 2

- Extensómetros

Na caso dos extensómetros, optou-se por realizar a análise da fluência tendo em conta a relação entre extensómetros de modo a avaliar a fluência nas diversas secções do varão de aço, ficando-se a saber de uma forma mais visual qual das secções ficam mais susceptíveis à rotura.

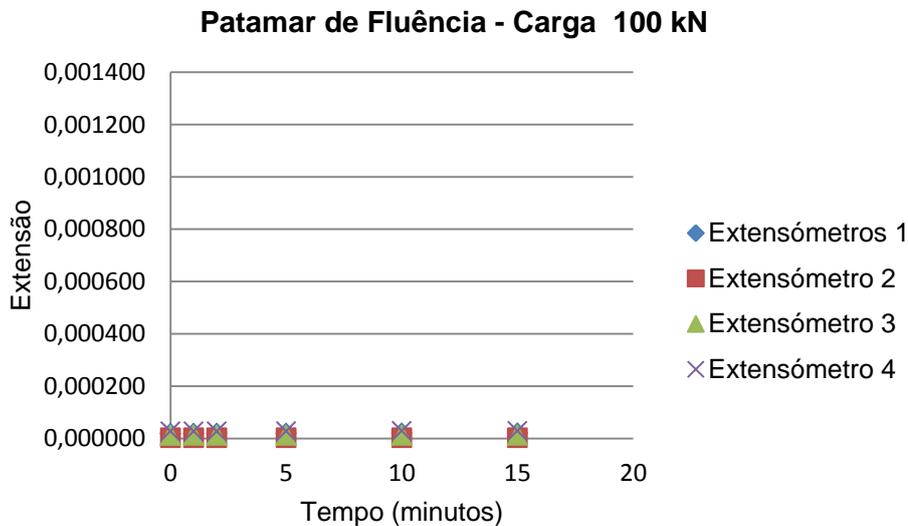


Figura 5.52 - Patamar de Fluência - Carga 100 kN – Pregagem nº 2

No patamar dos 100 kN, sendo este valor de carga muito baixo através da Figura 5.52 podemos afirmar que a fluência é quase nula.

Já na carga de 200 kN - Figura 5.53 - não se pode afirmar o mesmo, destacando-se o extensómetro 4 com a maior extensão, também este é o que sofre maior extensão com os intervalos de tempo de fluência atingindo valores perto de 0,0004 ao fim dos 15' minutos, sendo seguido do extensómetro 1 que seria provavelmente o que teria maior fluência devido a estar relativamente mais perto da carga do macaco. O extensómetro 3 e o extensómetro 2 são os que possuem menor fluência ao nível dos 200 kN.

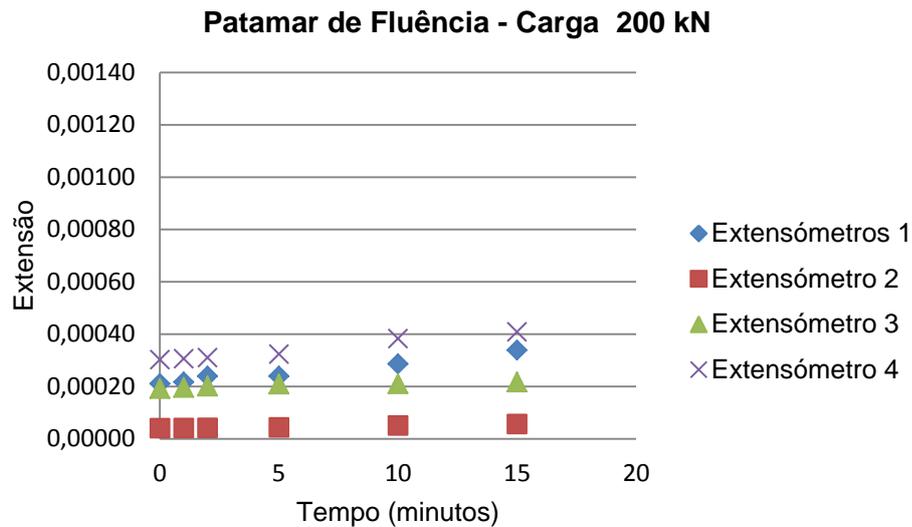


Figura 5.53 - Patamar de Fluência - Carga 200 kN – Pregagem nº 2

Referente ao patamar dos 250 kN, os valores da extensão sobem consideravelmente mas ao longo dos períodos de tempo de fluência não se nota grande alteração, sendo uma cedência uniforme em quase todos os extensômetros, podendo ver na Figura 5.54 uma uniformidade dos pontos que correlacionam a extensão com o tempo.

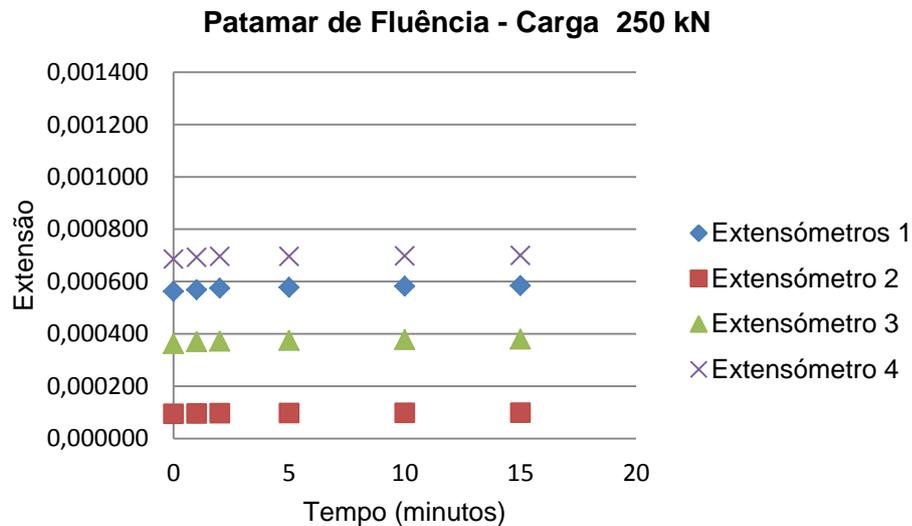


Figura 5.54 - Patamar de Fluência - Carga 250 kN – Pregagem nº 2

Na carga de aplicação dos 300 kN representativa na Figura 5.55, começa-se a destacar os extensômetros 4 e 1 em termos de valor de extensão mas a fluência continua a ser muito baixa, ou seja, a variação da extensão ao longo do tempo continua a ser muito baixa, significando que a cedência do varão ainda não teria sucedido.

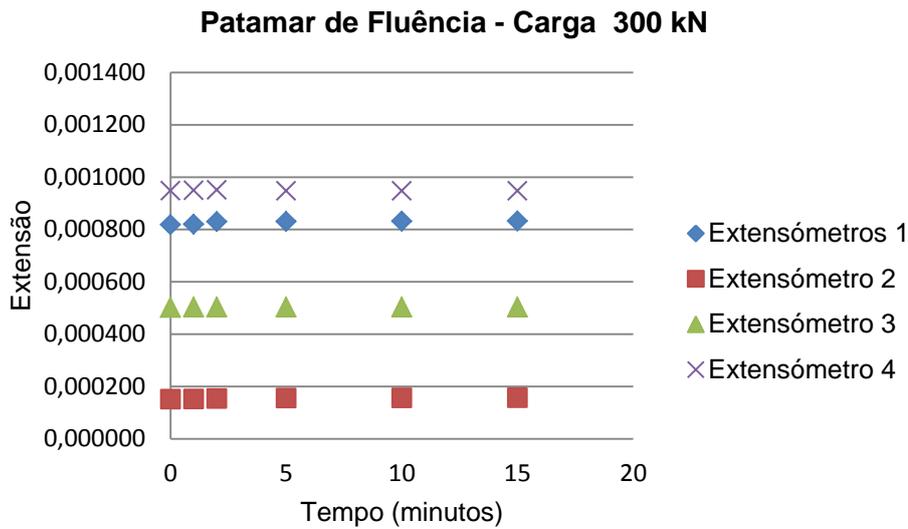


Figura 5.55 - Patamar de Fluência – Carga 300 kN – Pregagem nº 2

A cedência que se falava no ponto anterior, inicia-se nos intervalos de tempo de fluência da carga 325 kN destacando-se o comportamento do extensômetro 1 e extensômetro 4.

No extensômetro 1 existe um decréscimo da extensão que coincide com o decréscimo na zona do extensômetro 1 da tensão de corte. Sendo possível uma rotura do maciço – calda levando à diminuição da extensão como indica na Figura 5.56.

No caso do extensômetro 4 regista-se um aumento da extensão do aço nesta secção podendo-se afirmar que o varão entrou em cedência nesta zona específica.

Os extensômetros 2 e 3 mantêm a uniformidade da extensão, com um aumento de valores de extensão pouco significativos.

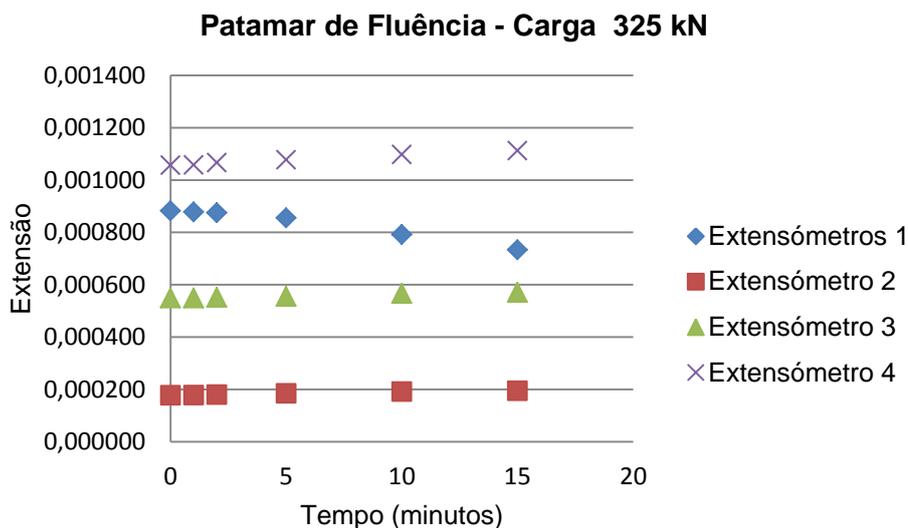


Figura 5.56 - Patamar de Fluência – Carga 325 kN – Pregagem nº 2

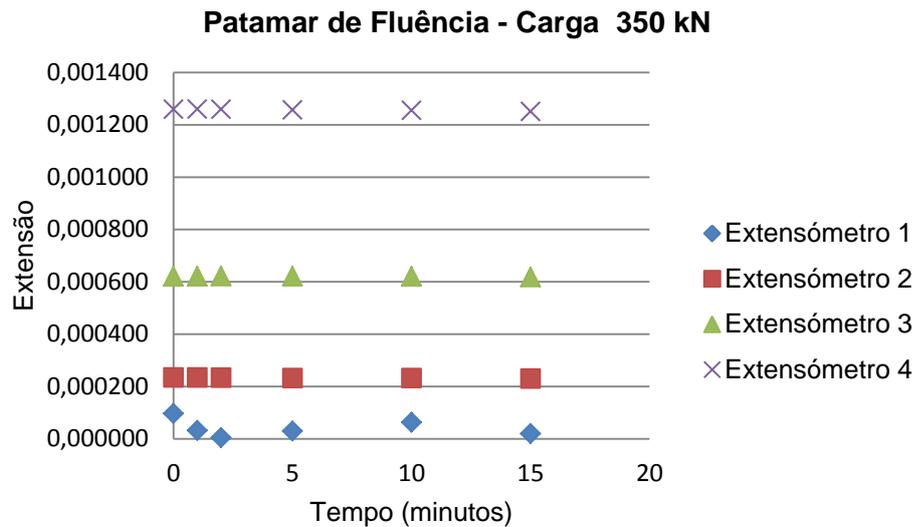


Figura 5.57 - Patamar de Fluência – Carga 350 kN – Pregagem nº 2

Por fim no patamar de carga 350 kN - Figura 5.57 – destaca-se logo o extensômetro 1 em que a extensão voltou ao ponto de partida, sendo obvio a existência de uma rotura na zona deste. Já o extensômetro 4 aumentou a sua extensão em relação ao patamar de 325 kN, mantendo os valores da extensão ao longo do intervalo de fluência.

#### 5.7.2. PREGAGEM Nº 4

Os cálculos para a obtenção dos patamares de fluência da pregagem nº 2 estão inseridos no Anexo 6.

- Defletómetros

Na Figura 5.58 está representada a fluência do êmbolo onde se têm uma visual muito bem definida que nas cargas de 100, 200 e 250 kN a fluência é quase nula estando o varão de aço fora do patamar de cedência, o que já não se sucede quando a carga de 300 kN é atingida havendo uma fluência de 3 mm no intervalo de 15 minutos destacando-se de certa maneira que já estaria a ceder de alguma forma, podendo ser a rotura do maciço-calda, o que seria mais lógico.

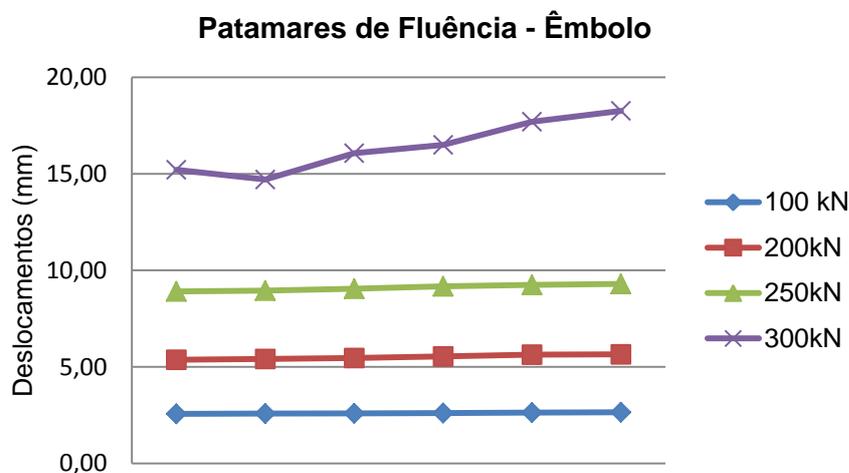


Figura 5.58 - Patamar de Fluência - Êmbolo - Pregagem nº 4

A fluência na chapa é de certa forma muito reduzida devido à existência do betão projetado com a malhasol que aumentam a rigidez fazendo com que a fluência nesta seja muito reduzida como se pode ver na Figura 5.59, sendo muito parecido com o comportamento da pregagem nº 2 excetuando o primeiro tramo.

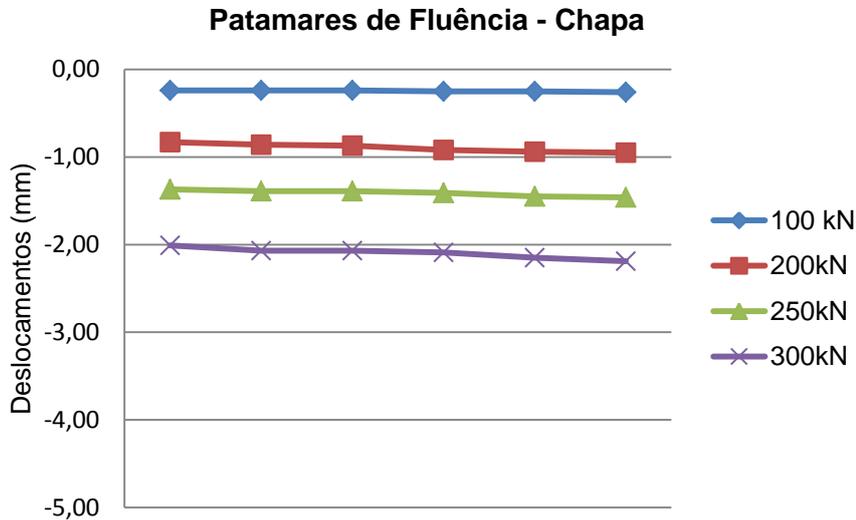


Figura 5.59 - Patamar de Fluência - Chapa - Pregagem nº 4

- Extensómetros

No patamar de 100 kN, o patamar de fluência não se verifica devido a ser uma carga de pouco impacto na pregagem, apesar disso já se pode verificar que o extensómetro 1 atinge uma extensão superior em relação aos demais extensómetros, sendo o comportamento esperado, o que não aconteceu na pregagem nº 2.

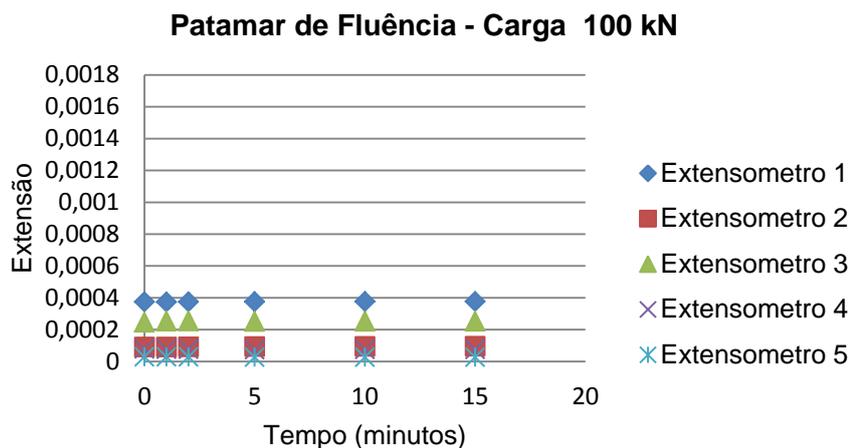


Figura 5.60 - Patamar de Fluência – Carga 350 kN - Pregagem nº 4

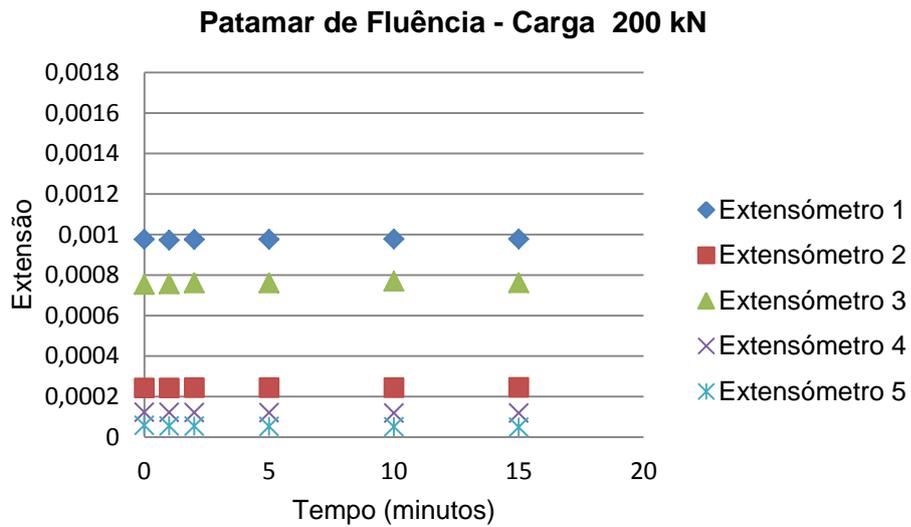


Figura 5.61 - Patamar de Fluência - Carga 200 kN – Pregagem nº 4

No patamar dos 200 kN os extensômetros 1 e 3 destacaram-se sendo que não se verificou oscilação da extensão no tempo mantendo-se os valores iniciais de extensão de quando foi iniciado a contagem do intervalo de cedência, levando a crer que mesmo os extensômetros em destaque, se situavam no comportamento elástico do varão de aço.

Já no patamar dos 250 kN verifica-se uma ligeira oscilação da extensão nos extensômetros de destaque, 1 e 3, havendo um acréscimo da extensão de 0,00174‰ no caso do extensômetro 1 e 0,00861‰ no caso do extensômetro 3.

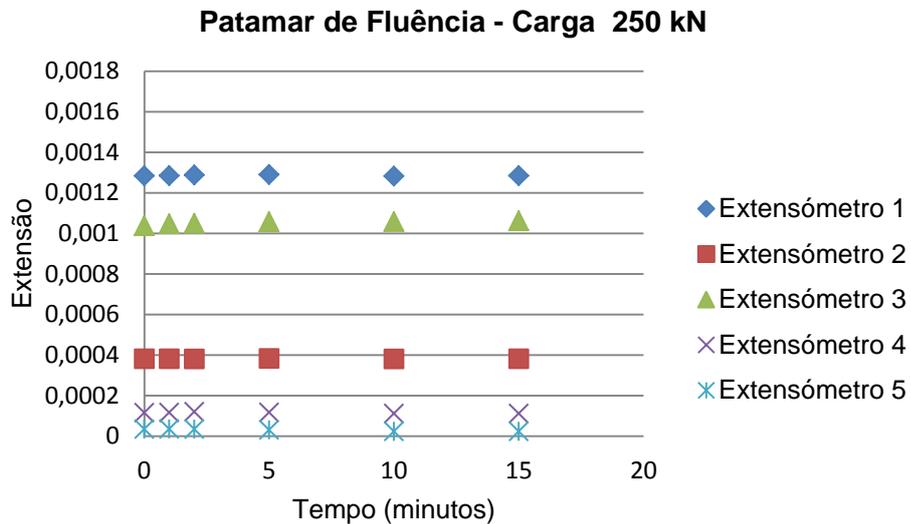


Figura 5.62 - Patamar de Fluência - Carga 250 kN – Pregagem nº 4

Por fim o ultimo patamar de fluência realizado na pregagem nº 4, foi o do patamar de carga de 300 kN em que verificou-se uma disparidade muito grande das extensões entre os extensómetros 1 e 4 dos restantes extensómetros. Embora o patamar de carga que se encontra seja muito perto da rotura, não se verificou uma cedência muito pronunciada por parte do varão de aço, havendo uma ligeira subida da extensão nos extensómetros 1 e 4 no decorrer do intervalo de fluência.

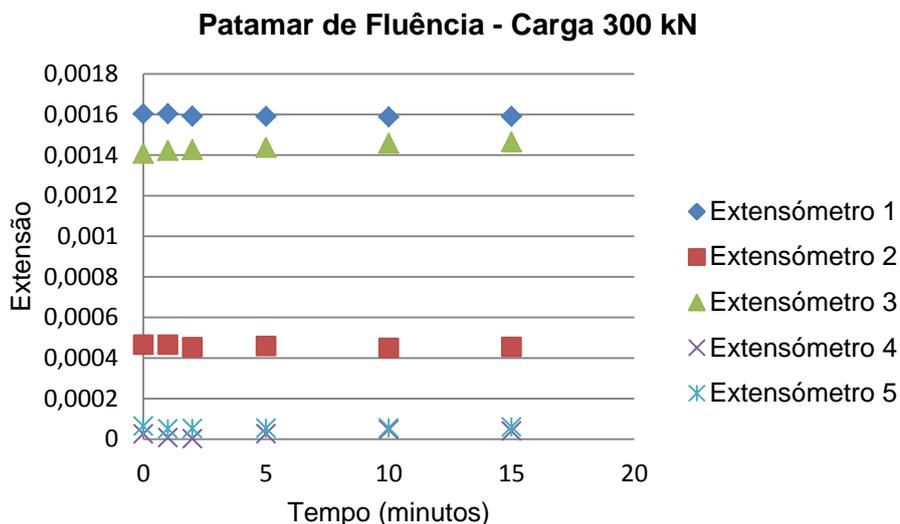


Figura 5.63 - Patamar de Fluência - Carga 300 kN – Pregagem nº 4

Sendo assim podemos concluir que devido ao aço ter uma rotura dúctil, ou seja, à medida que se aplica carga a rotura vai sendo pronunciada, levando o varão a um comportamento plástico e posteriormente a um comportamento plástico havendo a rotura no final.

Devido a esta análise da fluência do varão de aço, retira-se que a rotura da pregagem fez-se a partir da interface calda – maciço, levando à rotura da pregagem.

## 6. MODELAÇÃO NUMÉRICA – PLAXIS®

### 6.1. INTRODUÇÃO AO PLAXIS®

O PLAXIS® é um programa de elementos finitos que foi desenvolvido para a análise da deformação e estabilidade de projetos geotécnicos.

Este programa permite a geração de um modelo axissimétrico ou de deformação plana tendo em conta o tipo de estrutura em análise e condições que melhor se ajustam.

O modelo numérico realizado nesta dissertação foi em deformação plana devido a simular um estado de tensão vertical ao longo da pregagem tendo em conta o peso volúmico do solo assim como as suas características resistentes.

### 6.2. MODELO – DEFORMAÇÃO PLANA

A realização deste modelo em deformação plana teve por base a pregagem nº 4 devendo-se ao facto da realização desta nos ensaios *in situ* não ter surgido nenhum imprevisto, o que não aconteceu com a pregagem nº 2.

Na análise comparativa entre o modelo realizado neste capítulo e os ensaios realizados no AHRE, aborda-se os deslocamentos na “cabeça” da pregagem, a evolução da força axial e da tensão de corte no comprimento de selagem.

#### 6.2.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CARGAS A APLICAR

Na modelação realizada, com a finalidade de se aproximar o máximo possível do problema real, teve-se em conta as propriedades dos materiais utilizados, sendo que devido a desconhecimento de alguma propriedade de algum material foi adotado um valor coerente para este tipo de solo, sendo um solo muito estudado na zona norte do País, mais propriamente, na zona do Porto.

O módulo de deformabilidade adotado foi de uma forma geral simplificado. Essa simplificação ficou-se a dever à adoção do módulo de elasticidade elástico dos materiais exceto o solo residual de granito.

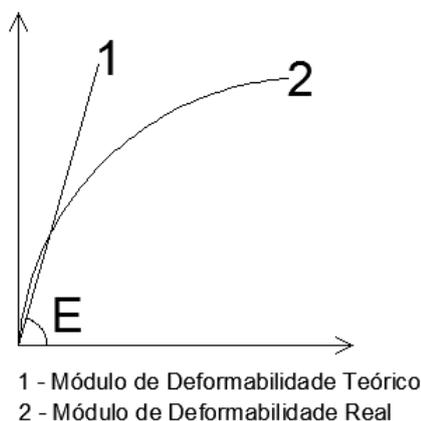


Figura 6.1 - Variação do Módulo de Deformabilidade Real vs Teórico

Um modelo de Deformação Plana é usado para geometrias que têm em conta a evolução das tensões quer na vertical quer na horizontal. Sendo assim utiliza-se propriedades resistentes do solo, sendo adotado os valores do ensaio de corte direto adquiridos por Sandro Gomes, 2011.

Neste tipo de modelo são aplicadas duas tensões principais,  $\sigma_1$ (Tensão Vertical) e  $\sigma_3$ (Tensão Horizontal). Sendo assim a tensão principal  $\sigma_2$  não é contabilizada no cálculo da deformação plana, o que para um solo em que a coesão é quase nula (2,3kPa) a resistência atrítica terá uma influência ainda maior como podemos ver na fórmula 6.1) que representa a envolvente de rotura de Mohr- Coulomb,

$$\tau = c' + \sigma \times \tan \phi' \quad (6.1)$$

Sendo este modelo de deformação plana bidimensional, leva que as 3 tensões principais não sejam contabilizadas levando a um acréscimo por parte das tensão sendo que a tensão horizontal é aproximadamente metade da tensão vertical exercida na pregagem.

Figura 6.2 - Propriedades dos Materiais - Modelo Deformação Plana

Modelo de Material		E (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$\psi$ (°)
Solo Residual	Mohr-Coulomb	1E05	17/14	2,3	41	13
Betão Projetado	Linear Elástico	3E07	25			
Aço	Linear Elástico	2E08	78,6			

Nas fases de aplicação das cargas para os modelos distinguiu-se os dois modelos acima explicados devido à diminuição do peso volúmico do solo levar a uma rotura deste a uma força de aplicação menor como será lógico se tivermos em conta sempre a fórmula 6.1) em que a tensão normal surge como um fator direto da rotura.

Assim sendo procedeu-se a distintas fases de aplicação de carga para os dois tipos de modelos - Tabela 6.1 - que se realizaram, em que essa distinção se pronunciou na carga em que o solo colapsou. De salientar que a carga de rotura de ambos os modelos possuem uma margem de erro de  $\pm 5$  kN.

Tabela 6.1 - Fases de Aplicação de Carga

Fases de Aplicação com Peso Volúmico do Solo de 17 kN/m <sup>3</sup>	Fases de Aplicação com Peso Volúmico do Solo de 14 kN/m <sup>3</sup>
➤ Fase 1 – Geração do Estado de Tensão	➤ Fase 1 – Geração do Estado de Tensão
➤ Fase 2 - Aplicação da Carga de Valor 100kN	➤ Fase 2 - Aplicação da Carga de Valor 100kN
➤ Fase 3 - Aplicação da Carga de Valor 200kN	➤ Fase 3 - Aplicação da Carga de Valor 200kN
➤ Fase 4 - Aplicação da Carga de Valor 300kN	➤ Fase 4 - Aplicação da Carga de Valor 300kN
➤ Fase 5 - Aplicação da Carga de Valor 400kN	➤ Fase 5 - Aplicação da Carga de Valor 395kN
➤ Fase 6 - Aplicação da Carga de Valor 405kN	

### 6.2.2. GEOMETRIA

A geometria dos modelos foi elaborada o mais fiel à realidade. Utilizou-se uma escala de 1:100 nas medidas adotados no modelo, sendo que a frente do talude a ensaiar fazia um ângulo com a horizontal de aproximadamente 70° devido à elevada inclinação que o talude real possui como se pode visualizar na Figura 6.4. A malha foi refinada para um maior número de pontos estudados - Figura 6.5.

A definição da pregagem no modelo efetuou-se com utilização a dois tipos de estruturas:

- Comprimento Livre (2 metros) – Ancoragem (Node-to-Node Anchor)
- Comprimento de Selagem (3 metros) – Geotêxtil (Geogrid)

A pregagem embora foi composta por dois tipos diferentes de estruturas, as propriedades a utilizar em ambos foram as do varão de aço utilizado nos ensaios *in situ*. De referir que a pregagem foi colocada na perpendicular com a superfície do talude.

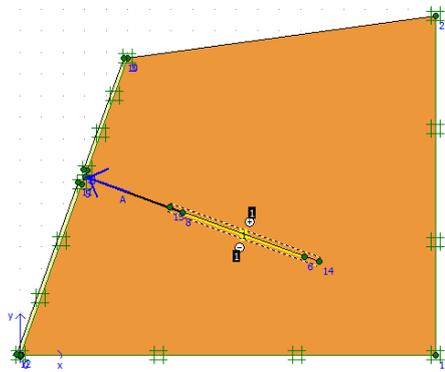


Figura 6.3 - Modelação da Deformação Plana



Figura 6.4 - Perfil da zona de Ensaio

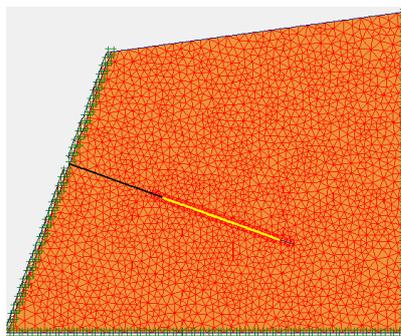


Figura 6.5 - Geração da Malha

Na definição do comprimento selagem, foi imprescindível a utilização de uma interface entre o comprimento de selagem e o solo residual de granito (S.R.Granito), sendo necessário a sua colocação 20 cm a mais do comprimento de selagem como está demonstrado na Figura 6.6.

A zona em excesso da interface coincide com a zona do comprimento livre por um lado, e por outro com uma zona isenta de varão de aço. Esta aplicação da interface deve-se ao fato de minimizar os problemas na transição dos diferentes elementos, equilibrando de algum modo as forças entre estes.

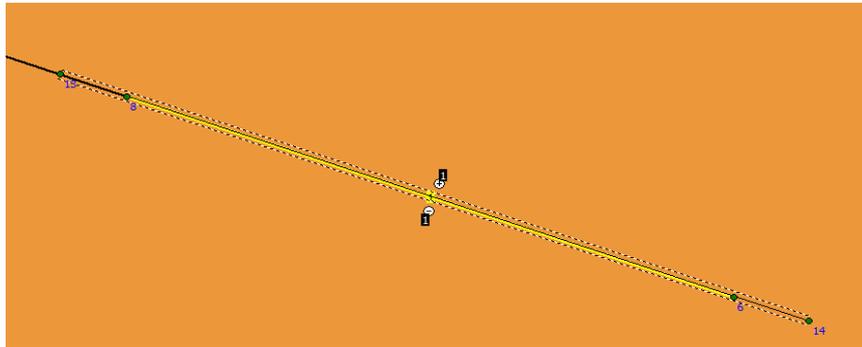


Figura 6.6 - Pormenor da Interface

### 6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 6.3.1. INTRODUÇÃO

A análise dos resultados é efetuada quando o solo constituinte do modelo entra em rotura, o que é comprovado na Figura 6.7 e Figura 6.8 pertencendo ao solo residual de granito com um peso volúmico de 17 e 14 kN/m<sup>3</sup> respetivamente.

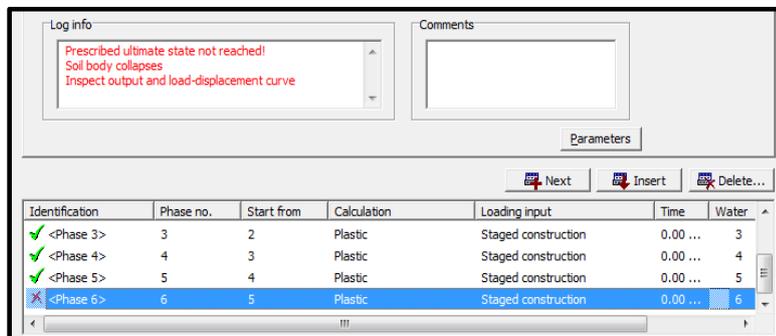


Figura 6.7 – Interface gráfica representativa da rotura – S.R.Granito 17kN/m<sup>3</sup> - Plaxis®

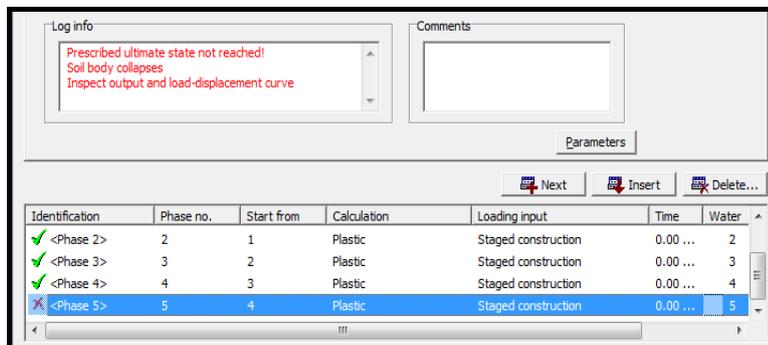


Figura 6.8 – Interface gráfica representativa da rotura – S.R.Granito 14kN/m<sup>3</sup> - Plaxis®

No que diz respeito à análise propriamente dita, iniciou-se por uma breve discussão dos deslocamento do êmbolo da pregagem comparando os valores com os resultados obtidos no AHRE, seguindo-se para a evolução da força axial e da tensão de corte ao longo do comprimento de selagem dos dois modelos apresentados no PLAXIS® bem como da abordagem experimental.

### 6.3.2. CARGA VS DESLOCAMENTO

A análise dos deslocamentos na pregagem como está exposto na Figura 6.9 é exemplificativa dos dois tipos de modelos realizados, onde existe um deslocamento imposto pela força aplicada que se transmite até à parte superior do talude podendo criar pequenos assentamentos.

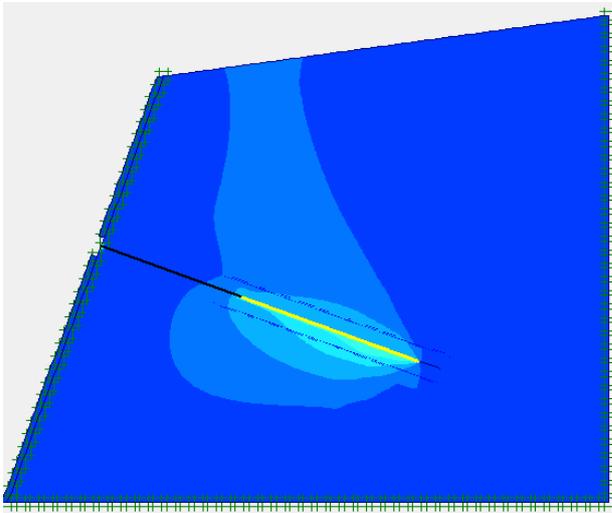


Figura 6.9 – Deslocamentos equivalentes nos Modelos em estudo - PLAXIS

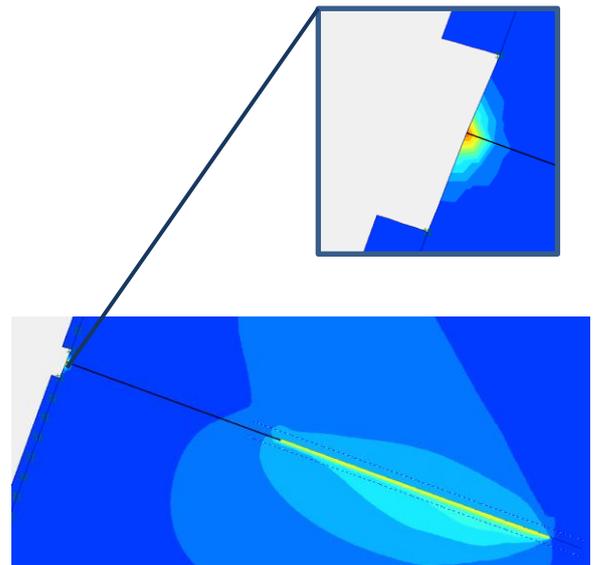


Figura 6.10 – Pormenor dos Deslocamentos na zona da Pregagem - PLAXIS

Numa perspetiva mais aproximada da zona da pregagem - Figura 6.10 - consegue-se verificar que os deslocamentos de maior grandeza se situam na “cabeça” da pregagem e na parte inferior do comprimento de selagem, devido à componente horizontal da força aplicada que faz com que a pregagem seja “empurrada” na horizontal causando maior deslocamentos na sua parte inferior. Na Tabela 6.2 pode-se verificar a evolução dos deslocamentos da cabeça da pregagem nos vários patamares de carga verificando-se na rotura um deslocamento de 11,05mm e de 20,81mm para o modelo com S.R.Granito com peso volúmico de 17 e 14 kN/m<sup>3</sup> respetivamente.

Na Figura 6.11 destaca-se a evolução dos deslocamentos à medida que se aplica carga até à rotura do solo residual de granito. Nesta evolução destaca-se o modelo com o solo com peso volúmico de 14 kN/m<sup>3</sup> que se aproxima-se dos deslocamentos obtidos nos ensaios no AHRE. Já no que refere ao deslocamento do modelo com o solo de peso volúmico de 17 kN/m<sup>3</sup>, existe uma redução dos deslocamentos e um aumento da carga de rotura passando para os 405 kN ao contrários do de 14 kN/m<sup>3</sup> que obteve um valor de carga de rotura de 395 kN.

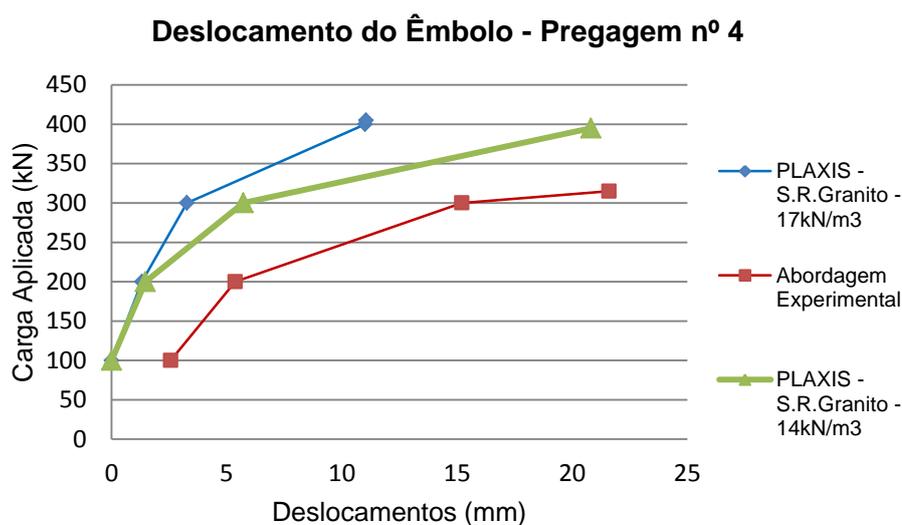


Figura 6.11 - Deslocamentos do Êmbolo

Tabela 6.2 - Deslocamento do êmbolo - Plaxis - Pregagem nº 4

Carga Aplicada (kN)	Deslocamento do Êmbolo – PLAXIS® – S.R.Granito – 17kN/m <sup>3</sup> (mm)	Carga Aplicada (kN)	Deslocamento do Êmbolo – PLAXIS® – S.R.Granito – 14kN/m <sup>3</sup> (mm)
100	0,000618	100	0,000604
200	1,32	200	1,47
300	3,27	300	5,72
400	11,01	395	20,81
405	11,05		

### 6.3.3. ANÁLISE DA FORÇA AXIAL

A análise da força axial ao longo da pregagem nos modelos no PLAXIS® resumem-se ao comprimento de selagem, já que usando uma ancoragem “node-to-node” o atrito entre esta e o solo será praticamente nulo.

Na Figura 6.12 e Figura 6.13 estão representadas a evolução da força axial em ambos os modelos, apresentando em ambos um comportamento muito idêntico apesar da força de rotura ser diferente. É de salientar ainda uma redução da força axial no início do comprimento de selagem em relação à força aplicada na “cabeça” da pregagem, denotando-se uma pequena redução da força axial no comprimento livre o que pode ser justificado pela existência de um atrito muito reduzido entre o comprimento livre e o solo residual de granito e pelo fato de parte da carga ser absorvida pelo terreno devido à pregagem não estar selada fora da zona ativa.

Por fim verifica-se em ambos um decréscimo da força axial em todos os patamares de carga refletindo-se a atuação da tensão de corte ao longo do comprimento de selagem tendendo para zero no fim da pregagem.

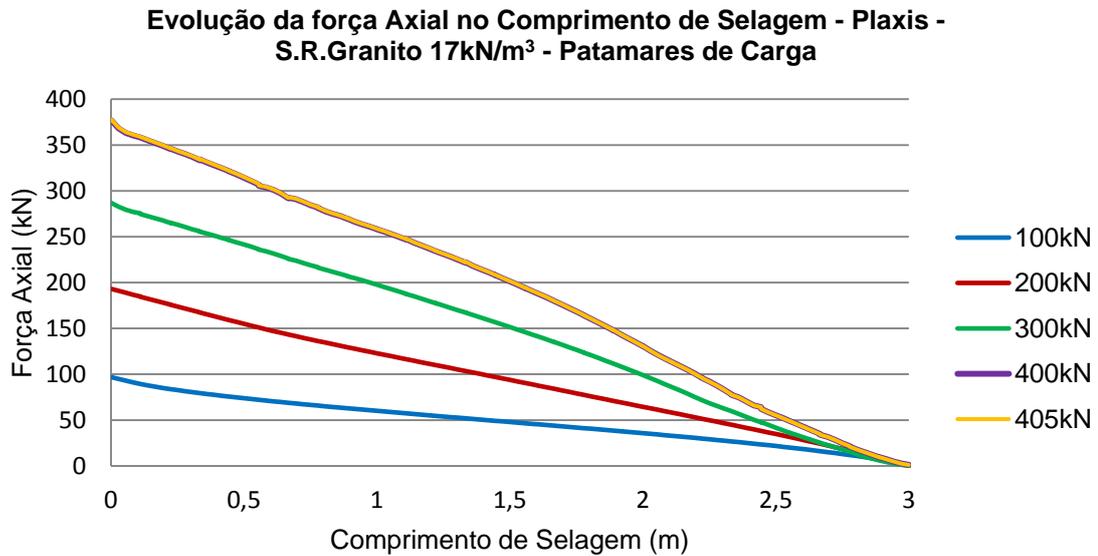


Figura 6.12 - Evolução da Força Axial no Comprimento de Selagem – S.R.Granito 17kN/m<sup>3</sup> - PLAXIS®

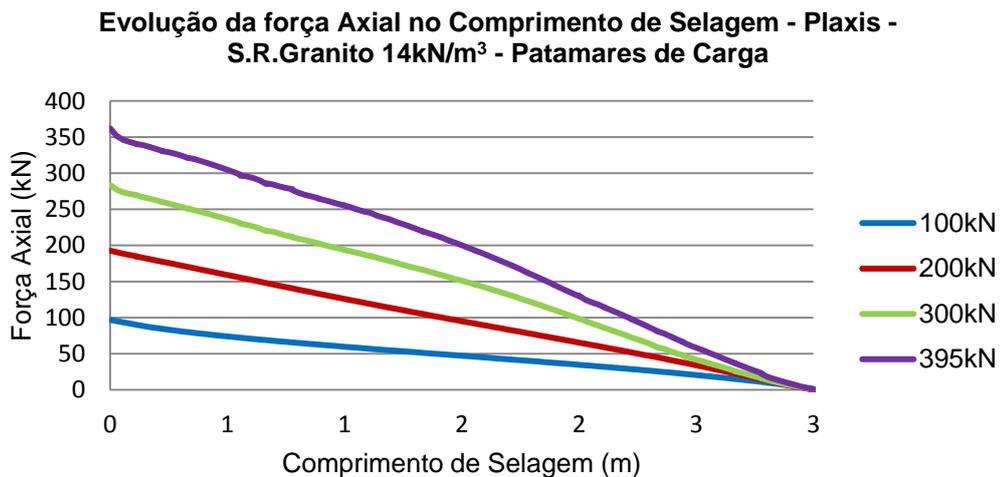


Figura 6.13 - Evolução da Força Axial no Comprimento de Selagem – S.R.Granito 14kN/m<sup>3</sup> - PLAXIS®

No que se refere à análise comparativa com os valores da força axial nos ensaios realizados *in situ* no AHRE como se demonstra na Figura 6.14, destaca-se um decréscimo mais acentuado na zona intermédia do comprimento de selagem no caso da abordagem experimental ao contrário de um decréscimo mais linear dos modelos apresentados no PLAXIS®.

Na abordagem experimental dá-se conta de uma força axial mais reduzida no início do comprimento de selagem destacando-se a calda de selagem levada até à “boca” do furo como um fator para a sua redução, como foi analisado no Capítulo 5. No caso dos modelos de deformação plana em estudo a zona do comprimento livre não possui calda de selagem apenas pode apresentar um reduzido atrito entre o solo e este comprimento.

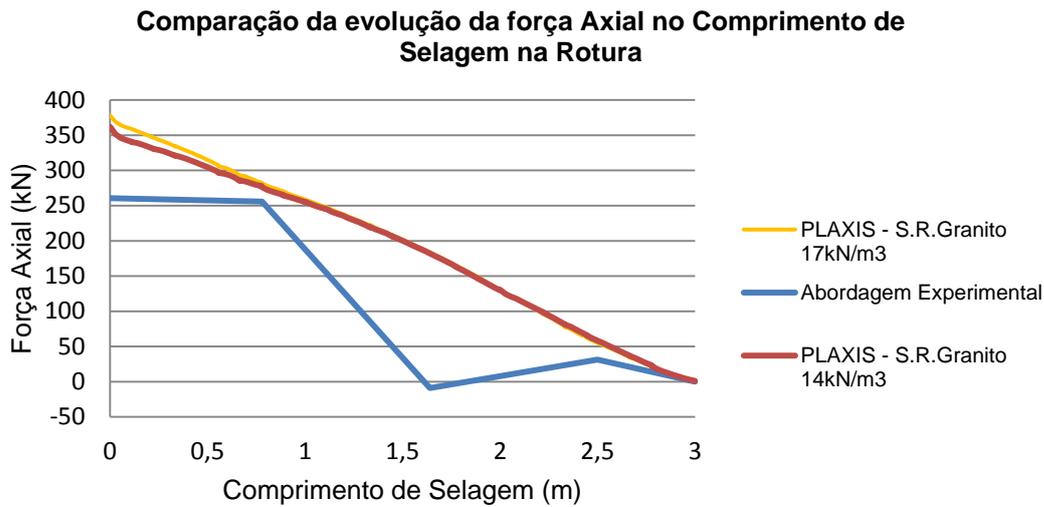


Figura 6.14 – Comparação da evolução da força Axial no Comprimento de Selagem na Rotura

#### 6.3.4. ANÁLISE DA TENSÃO DE CORTE

A tensão de corte no modelo em que o solo residual possui o peso volúmico de 17 kN/m<sup>3</sup> - Figura 6.15 - , atingiu no início do comprimento de selagem um valor perto dos 330 kPa sendo um valor um pouco abaixo do atingido pelo modelo com o peso volúmico do solo nos 14 kN/m<sup>3</sup> - Figura 6.16 - que ultrapassou em pouco os 350 kPa de tensão de corte. Apesar desta aumento, o comportamento da tensão de corte ao longo dos patamares de carga são idênticos sendo sempre próximos dos 50 kPa.

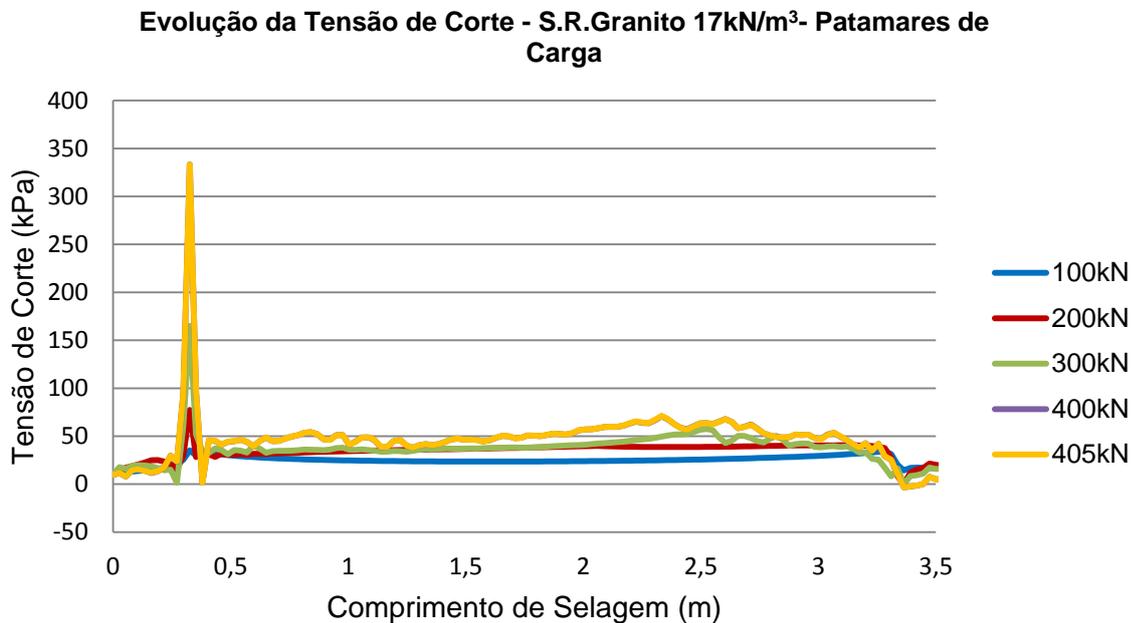


Figura 6.15 – Evolução da Tensão de Corte – S.R.Granito 17kN/m<sup>3</sup> - Comprimento de Selagem

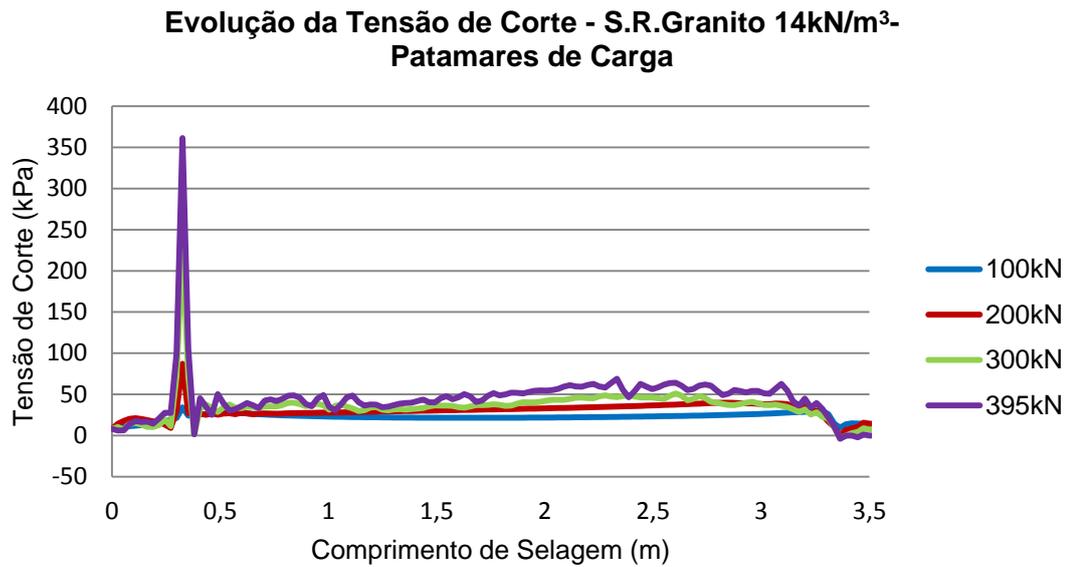


Figura 6.16 - Evolução da Tensão de Corte – S.R.Granito 14kN/m<sup>3</sup> - Comprimento de Selagem

De referir ainda que ambos os gráficos da Figura 6.15 e Figura 6.16, no início e no fim do comprimento de selagem apresentam oscilações mais bruscas do que no restante comprimento, sendo um comportamento devido ao sucedido na Figura 6.17, em que na rotura o comprimento de selagem tem grandes oscilações na ligação à ancoragem podendo-se notar na Figura 6.17 uma alternância da interface o que pode indiciar que a rotura pode ter sido neste local. No fim da pregagem quando deixa de haver mais comprimento de selagem houve também uma oscilação do comprimento de selagem havendo uma área maior que resistente devido à área transversal do varão de aço.

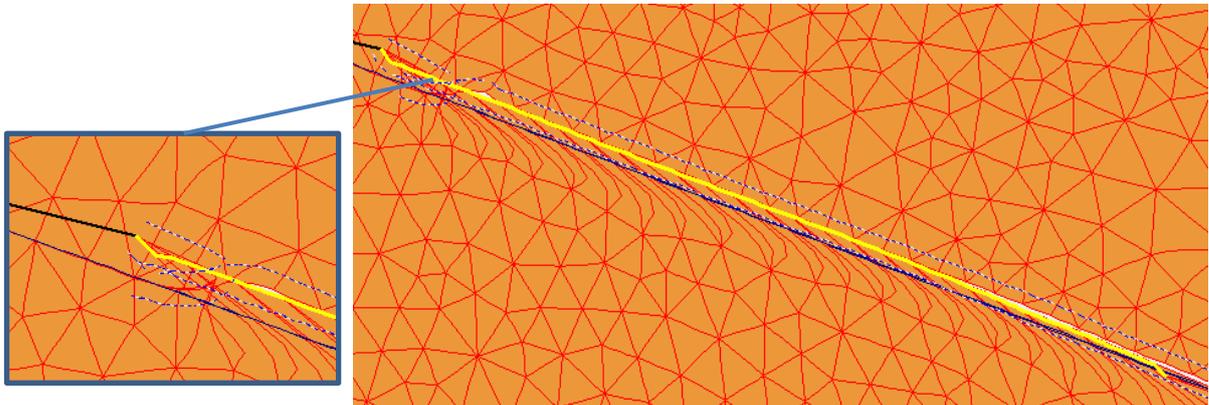


Figura 6.17 - Deformação do Comprimento de Selagem na Rotura

Este comportamento do comprimento de selagem na capacidade resistente da pregagem pode ser visualizado na Figura 6.18 e Figura 6.19.

Na Figura 6.18 é demonstrada a tensão de corte relativa em que no início e no final do comprimento de selagem existe uma quebra bem visível, devido aos elevados esforços a que foi sujeita, esforços esses visíveis na Figura 6.19.

Este aumento da tensão de corte no início do comprimento de selagem faz com que o solo atinja a sua cedência mais rapidamente nesta zona, como se pode ver mais à frente. A Figura 6.19 consta a tensão de corte quando ocorreu a rotura. Esta após o pico de resistência ao corte no início, atua de uma forma sensivelmente uniforme ao longo do comprimento de selagem.

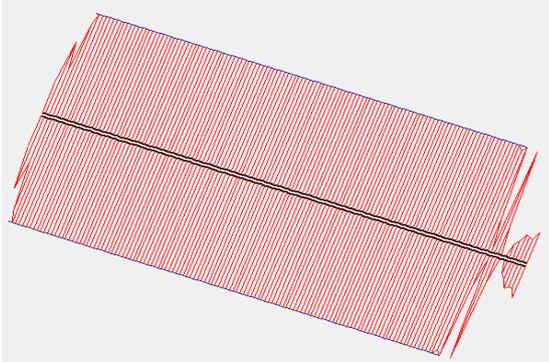


Figura 6.18 - Tensão de Corte Relativa na Rotura – Comprimento de Selagem

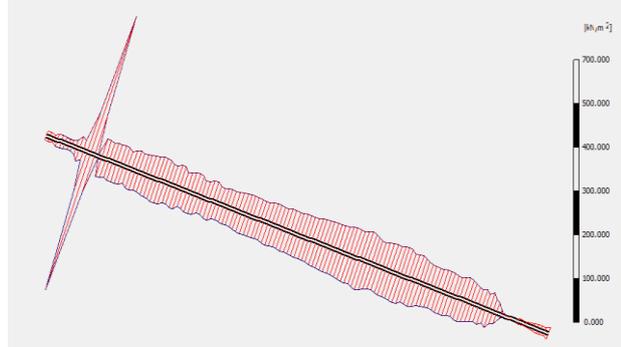


Figura 6.19 - Tensão de Corte - Rotura – Comprimento de Selagem

Como forma de avaliar a tensão de corte dos modelos propostos, realizou-se na Figura 6.20 uma comparação entre os valores da tensão de corte obtidas pelos modelos propostos e a tensão de corte originada através da abordagem experimental em que se admitiu a fissuração da calda e retirou-se o valor do extensómetro 2.

Sendo assim através da Figura 6.20, a análise da tensão de corte da abordagem experimental distancia-se com alguma grandeza dos valores da tensão de corte dos modelos realizados no PLAXIS®. Mas o pico da tensão de corte da abordagem experimental situa-se mais para a zona inicial do comprimento de selagem.

### Evolução da Tensão de Corte no Comprimento de Selagem na Rotura - Pregagem nº 4

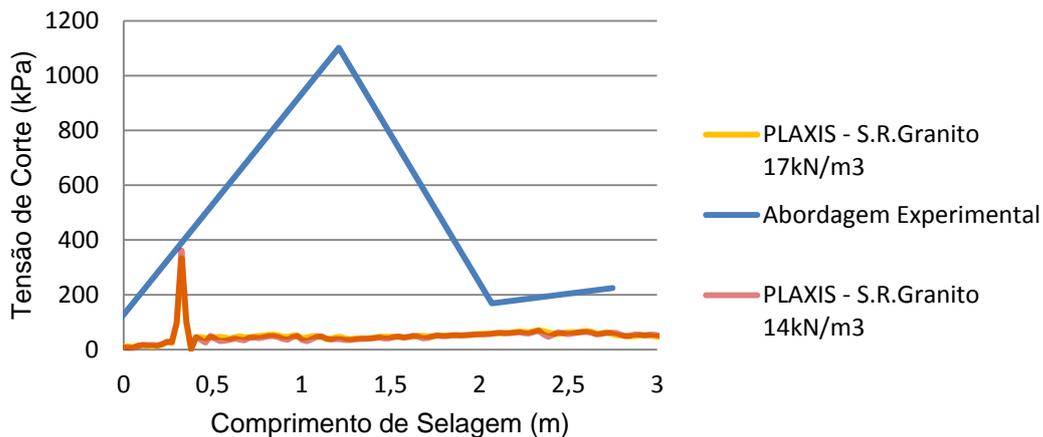


Figura 6.20 - Evolução da Tensão de Corte no Comprimento de Selagem na Rotura - Pregagem nº 4

As tensões de corte dos dois modelos quase que se sobrepõem, confirmando um comportamento muito idêntico embora com deslocamentos algo diferentes.

Essas diferenças mostram que é possível a mobilização das tensões de pico importantes, e que a própria tensão normal pode ser diferida às simples tensões geostáticas. Sobretudo é de referir que no ensaio real às tensões medidas eram menos uniformes.

Esta resistência ao corte é conseguida através das capacidades resistentes do solo – coesiva e atrítica – que para serem levadas à rotura necessitam passar por dois regimes, o elástico e o plástico.

Devido a isso os gráficos abaixo da Figura 6.21, demonstram a evolução do regime do solo no comprimento de selagem à medida que se aumenta a carga aplicada na pregagem somente para o modelo com o solo residual a ter o valor de peso volúmico de  $17\text{kN/m}^3$ .

Iniciou-se a análise através da fase 2 de cálculo (100kN) em que o regime elástico abrange uma grande parte do solo envolvente do comprimento de selagem sendo que só 3% se situa no plástico, sendo estes no início do comprimento de selagem na zona do pico da tensão de corte que foi discutido através da Figura 6.19, sendo zona de plasticidade o início do comprimento livre, como é demonstrado na Figura 6.22.

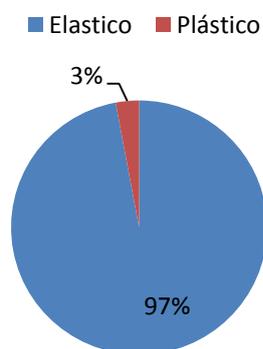
Na fase de cálculo 3 verifica-se um aumento muito substancial do regime plástico partilhando de igual valor com o regime elástico a totalidade do solo.

Na fase de cálculo 4, a percentagem de solo no regime plástico é muito significativa, ocupando cerca de 90% do solo junto do comprimento de selagem, sendo as deformações neste patamar de carga são permanentes.

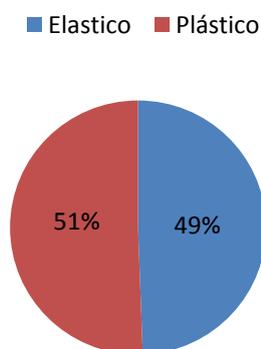
Na fase 5 começa-se a pronunciar a rotura devido a surgir zonas em tensão, sendo um sinal da rotura do solo. De referir que estes pontos tensionados surgem no início do comprimento de selagem correspondendo à zona de maior tensão de corte na Figura 6.15 e Figura 6.19.

Por fim a fase de cálculo 6 (rotura) tem valores muito próximos da fase de cálculo 5, podendo-se visualizar através da Figura 6.22 que o solo envolvente ao comprimento de selagem está completamente plastificado sendo que nas extremidades que apresentam o solo em regime elástico é devido ao comprimento a mais da interface, assunto explicado anteriormente.

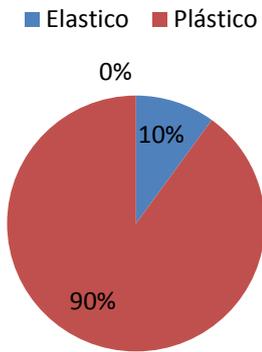
**Regime Imposto no Comprimento de Selagem - 100kN**



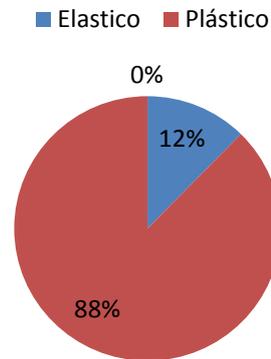
**Regime Imposto no Comprimento de Selagem - 200kN**



**Regime Imposto no Comprimento de Selagem - 300kN**



**Regime Imposto no Comprimento de Selagem - 400kN**



**Regime Imposto no Comprimento de Selagem - 405kN**

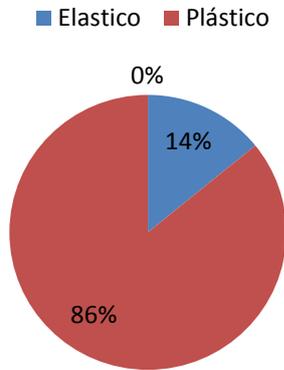


Figura 6.21 - Evolução do Regime Imposto no Solo - Elástico, Plástico e Tensão

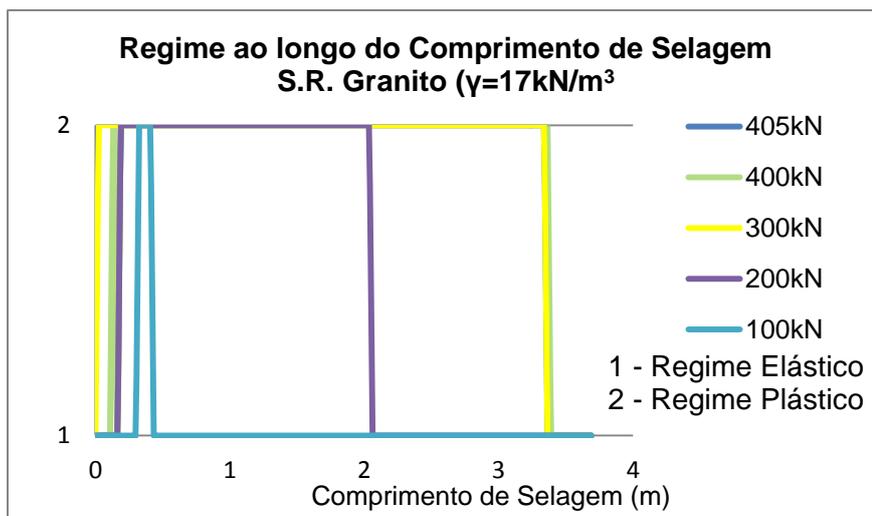


Figura 6.22 - Regime Imposto ao longo do Comprimento de Selagem - Rotura - S.R.Granito ( $\gamma=17\text{kN/m}^3$ )

A plasticidade do solo bem patente na Figura 6.22 à medida que as fases de cálculo aumentavam fez com que o solo plastificasse ao longo do comprimento de selagem sendo demonstrado pela Figura 6.23 em que as zonas de maior incidência é o início da pregagem e o fim da pregagem.

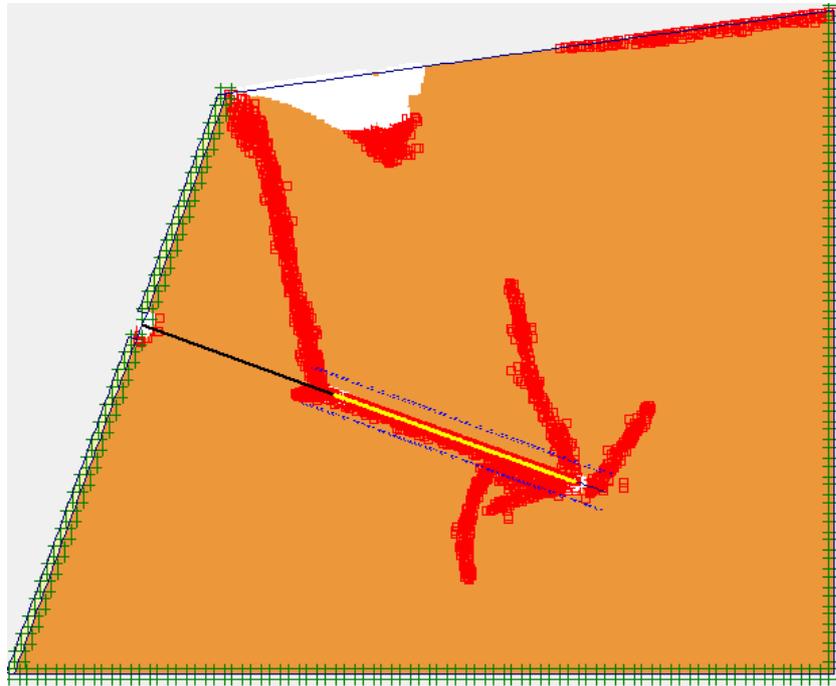


Figura 6.23 - Pontos Plastificados na Rotura - Pregagem nº 4

De notar que a ocorrência de uma cunha de rotura delineada pelos pontos plastificados que tiveram origem no início do comprimento livre até a parte superior do talude, criando pontos tensionados devido a um abaixamento da superfície,

#### 6.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Na comparação de valores da tensão de corte mobilizada - Tabela 6.3 – verifica-se que apesar de alguns fatores que não serem coincidentes, a tensão de corte entre as várias hipóteses não variam em grande escala.

Tabela 6.3 - Comparação dos Valores de Tensão de Corte

Pregagem nº 4	Tensão de Corte (kPa)
Valores de Caso de Estudo – Abordagem Teórica	300.39
Valores de Caso de Estudo – Abordagem Experimental	339.09
Deformação Plana – Plaxis® – S.R.Granito ( $\gamma=17\text{kN/m}^3$ )	333.3
Deformação Plana – Plaxis® – S.R.Granito ( $\gamma=14\text{kN/m}^3$ )	361.3

Nas quatro hipóteses aqui testada a única que se sobressai é a dos valores de referência devido a esta não ter efetivamente a selagem preenchida até à “boca” do furo aumentando assim a tensão de corte em relação às restantes hipóteses que no início do comprimento de selagem verifica-se a existência de alguma resistência na zona do comprimento livre.

# 7.

## CONCLUSÃO E POSSÍVEIS DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÃO

As pregagens são consideradas um elemento de reforço muito importante de taludes como os apresentados no AHRE. Estas são dimensionadas com base em metodologias próprias como foram apresentadas no início do capítulo 3 da presente dissertação.

A análise para o dimensionamento de pregagem tem por base a previsão de uma resistência teórica da tensão de corte do solo em que se vai utilizar as pregagens. Sendo assim é necessário uma informação concisa do tipo de solo. Esta obtenção da informação do solo é feita por base em informação já cadastrada e/ou por ensaios realizados *in situ* - sondagens, galerias, etc - para que o dimensionamento das pregagens seja o mais correto e seguro possível.

O ensaio da pregagem nº 2 correu com alguns percalços, levando a uma melhor preparação na realização da pregagem nº 4, obtendo-se resultados que de certa forma foi possível a sua interpretação para realizar uma análise do comportamento das pregagens comparando-os com as obras de referência que foram abordadas neste trabalho, no caso a de Gomes, 2011.

Como aspeto positivo, podemos referenciar a boa localização escolhida dos extensómetros de forma a poder caracterizar o comportamento da pregagem tendo em conta o número de extensómetros disponíveis, por outro lado um aspeto menos positivo foi a utilização de extensómetros num só lado da pregagem, sendo que o comportamento da força aplicada varia na mesma secção como foi explicado em 5.6.2.3.

Na selagem, concluiu-se após uma análise do volume do furo teórico e do volume de calda injetado *in situ*, um aumento significativo do volume de calda injetado. Este aumento de volume injetado pode ter sido levado a três situações abordadas na tese:

- À existência de fissuras no solo levando a uma absorção da calda de selagem de modo a ocupar as fendas existentes;
- Aumento da secção do furo tendo em conta a oscilação do bit de furação, fazendo com que o furação realizada pelo bit de diâmetro teórico pretendido não corresponderia ao diâmetro do furo realizado;
- À débil resistência do solo levando a que a pressão do ar do equipamento de furação aumentasse o diâmetro do furo.

Em relação aos ensaios propriamente dito, a realização da pregagem nº 2 como modelo para a realização da pregagem nº 4 foi a medida mais acertada, porque evitou-se alguns problemas que surgiram na pregagem nº 2, como foi o caso do acoplador que foi cortado pela chapa de carga.

Na análise aos resultados começou-se por comparar os dados obtidos através de uma abordagem teórica com os dados do caso de estudo realizado por Gomes (2011) [1] que também foram realizados no AHRE. Nesta análise verificou-se que a tensão de corte obtida nos ensaios no âmbito desta dissertação inseriram-se dentro da gama de valores obtidos por Gomes (2011) [1].

Após esta análise através da abordagem teórica, procedeu-se a uma abordagem experimental, utilizando os valores da extensão obtida através dos extensómetros instalados no varão de aço. Através dessa variável e sabendo a área de influência retirou-se a força axial e a respetiva tensão de corte ao longo das pregagens instrumentadas.

Através da evolução da força axial verificou-se em ambas as pregagens ensaiadas que no comprimento livre houve uma redução da força axial, o que seria expectável que a força axial nos extensómetros 1 e 2 fosse igual ao valor imposto na cabeça da pregagem através do macaco hidráulico devido à existência do comprimento livre definido pelo tubo de PVC. Sendo assim a redução da força axial apresentada concluiu que a existência de calda de selagem até à “boca” do furo não é equivalente à selagem somente do comprimento de selagem pré-definido, criando-se tensões tangenciais entre calda – solo na zona do comprimento livre, devido à calda do comprimento livre estar ligada à calda do comprimento de selagem fazendo com que a redução da força axial se faça logo no comprimento livre, concluindo-se assim que não compensa selar uma pregagem com comprimento livre até à boca do furo.

A utilização de um Paker era a forma ideal para garantir um comprimento de selagem efetivo, embora como tudo tem o seu inconveniente, este equipamento induz uma pressão no furo devido a confinar a calda dentro do furo.

No caso do estudo da fluência dos varões de aço da pregagem nº 2 e pregagem nº 4. Procedeu-se a um cuidado acrescido nos patamares de carga de maior valor, fazendo com que a pregagem nº 2 sofresse uma crescimento da extensão no extensómetro 1, podendo-se ficando a dever ao problema causado pelo acoplador, levando a uma quebra abrupta da extensão dando sinal de uma possível rotura da calda perto do extensómetro 1 desta pregagem.

No caso da pregagem nº 4 ao patamares de fluência demonstrados, levaram a concluir que devido à baixa ou quase inexistente fluência dos extensómetros até na carga de rotura. A rotura da pregagem nº 4 foi devida à interface entre calda-solo, levando o varão de aço somente à transição entre o regime elástico e plástico.

Por fim na modelação numérica definiu-se que a utilização de um modelo de deformação plana pode trazer vantagens, como na aplicação das tensões verticais e horizontais tendo em conta as propriedades do solo, mas possui um grande inconveniente de não considerar as três tensões principais, ou seja, o efeito tridimensional.

A análise à tensão de corte e força axial no modelo elaborado no programa PLAXIS®, definiu-se que a única zona resistente era o comprimento de selagem, o que não se sucedeu com os ensaios realizados no AHRE, onde a calda de selagem na zona do comprimento livre leva a uma redução da força axial, ou seja, a um valor da tensão de corte não desprezável. A evolução da força axial varia de forma uniforme decrescente não ocorrendo nenhuma oscilação o que na abordagem experimental se verifica.

O deslocamentos no método numérico assemelha-se aos deslocamentos no ensaio *in situ* apesar da tensão de rotura ser menor neste.

## 7.2. POSSÍVEIS DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após um desenvolvimento o mais exaustivo possível dentro do tempo que foi estipulado, deve ser dada maior relevância a pontos que podem ter sido menosprezados, devendo estes serem melhorados de modo a tornar esta matéria o mais completa possível. O desenvolvimento de uma modelação tridimensional era uma ajuda importante para ter em conta as três tensões principais, levando a valores mais fidedignos.

Esta análise podia-se estender a casos em que a existência de água, levando à existência de pressões neutras fosse uma variável em estudo, diminuindo assim a resistência do solo, alterando o comportamento da pregagem na realização de um ensaio.

A utilização de programas tipo FLAC3D, é uma poderosa ferramenta de análise tridimensional, onde se pode estudar diversas variáveis que podem ter grande influência no comportamento de uma pregagem.



## BIBLIOGRAFIA

- 1 Gomes, Sandro. *Análise do Comportamento de Pregagens Seladas Diferenciadamente através de Ensaios em Protótipos*. Porto, 2011.
- 2 Federal Highway Administration, FHWA. *Geotechnical Engineering Circular n.7*. FHWA. 2003.
- 3 Standardizations, European Committee For. *European Standard EN14490*. 2010.
- 4 <http://www.guiageo.com/>. 2012.
- 5 Googlemaps.com. 2012.
- 6 Anjos, Bruno. *Critérios para o Dimensionamento de Pregagens e Análise do seu Comportamento com base em Ensaios*. Porto, 2011.
- 7 [http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros\\_produtores/empreendimento.php?item\\_id=88](http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento.php?item_id=88). 2012.
- 8 FBO, HLC, Drena, AGRLPro. *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga*. 1999.
- 9 <http://www.portoeditora.pt/>. 18 de Março de 2012.
- 10 [www.edp.pt](http://www.edp.pt), 20 de Março de 2012.
- 11 Coelho, Silvério. *Tecnologia das Fundações*. 1996.
- 12 Project Clouterre, French National Research. *Recommendations Clouterre 1991*. 1991.
- 13 Internacional, DYWIDAG - Systems. *Sistemas GEWI*. DYWIDAG, 2010.
- 14 SECIL. *Especificação do Cimento CEM II/B-L 32.5N*.
- 15 BASF. *Ficha Técnica - Rheobuild 561*. 2010.
- 16 FAPRICELA. *Certificado de Qualidade - Rede Electrossoldada*. 2011.
- 17 Politejo. *Manual Tubos de Drenagem - AmbiDrenos*. 2012.
- 18 Rand, Ingersoll -. *Instructions and Parts List of LMEAC-500C - Manual*.
- 19 Copco, Atlas. *Secoroc Rock Drilling Tools*. 2007.
- 20 SIKA. *Putzmeister Sika-PM407 - Universal-Concrete Spraying System*. Sika, 2006.
- 21 Gomes, António Topa. *Métodos Construtivos*. Apontamentos de Obras Subterrâneas, FEUP, Porto, 2011.
- 22 <http://www.cptwd.com/eng/default.htm>. 2012.
- 23 <http://www.sinocoredrill.com/>. 2012.
- 24 <http://taesung.koreasme.com/eng/company/greetings.html>. 2012.
- 25 <http://www.boartlongyear.com>. 2012.
- 26 Coutinho, Joana de Sousa. *Materiais de Construção 2 - Ligantes e Caldas*, FEUP, Porto, 2006.

- 27 Fonseca, António Viana da. *Instrumentações Aplicadas em Fundações: Práticas Actuais e Tendências*. (São Paulo 2011).
- 28 Ltd., Gauge Technique International. *DataSheet - VW Surface Mount Strain Gauge*. 2012.
- 29 Fernandes, Manuel Matos. *Mecânica dos Solos - Conceitos e Principios Fundamentais*. FEUP Edições, Porto, 2006.
- 30 Santos, Jaime. *Ensaio de Caracterização em Solos*. IST. 2003.
- 31 Hon-Hu, Zhu, Jian-Hua, Yin, Albert T., Yeung, and Wei, Jin. *Field Pullout Testing and Performance Evaluation of GFRP Soil Nails*. 2011.
- 32 ZHU, Honghu. *Fiber Optic Monitoring and Performance Evaluation os Geotechnical Structures*. Hong Kong, 2009.
- 33 Wong, I. H., Low, B. K., Pang, P. Y., and Raju, G. V. R. *Field Performance of Nailed Soil Wall in Residual Soil*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1997.

## **ANEXOS**

**A1 – Peças Desenhadas**

**A2 – Certificados de Materiais**

**A3 – Certificado de Equipamentos**

**A4 – Desenho das Pregagens Instrumentadas**

**A5 – Boletins de Ensaio – Pregagem nº 2**

**A6 – Boletins de Ensaio – Pregagem nº 4**

**A7 – Folha de Cálculo – Pregagem nº 2**

**A8 – Folha de Cálculo – Pregagem nº 4**

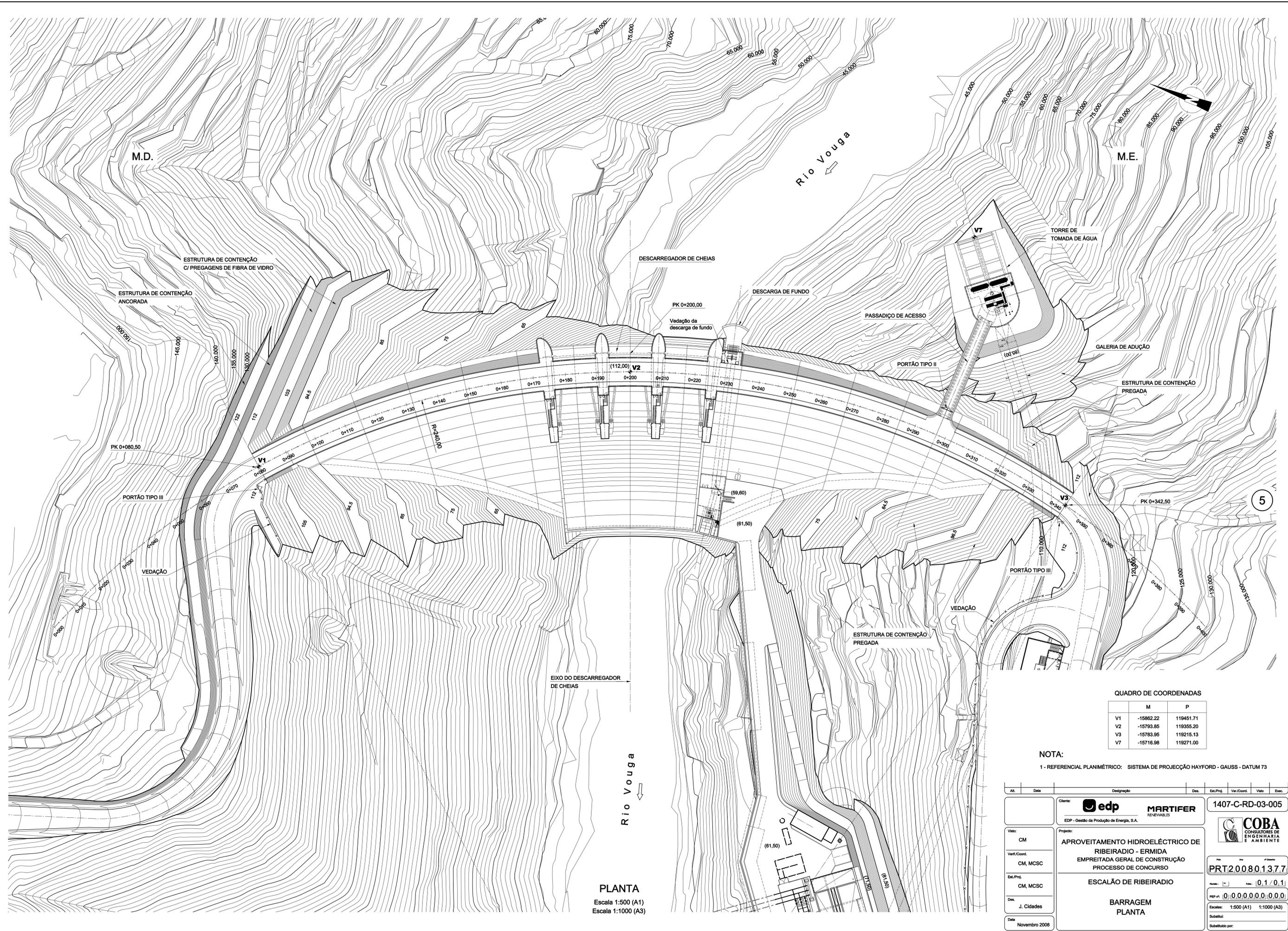
**A9 – Valores – Ensaio de Corte**

e

# **Anexo 1**

## **Peças Desenhadas**

- **Barragem de Ribeiradio**



QUADRO DE COORDENADAS

	M	P
V1	-15862.22	118451.71
V2	-15793.85	118355.20
V3	-15783.95	118215.13
V7	-15716.98	118271.00

NOTA:  
1 - REFERENCIAL PLANIMÉTRICO: SISTEMA DE PROJEÇÃO HAYFORD - GAUSS - DATUM 73

**PLANTA**  
Escala 1:500 (A1)  
Escala 1:1000 (A3)

Alt.	Data	Designação	Des.	Est.Proj.	Ver.Coord.	Visto	Exec.
Cliente:			1407-C-RD-03-005				
Projeto:	APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DE RIBEIRADIO - ERMIDA EMPREITADA GERAL DE CONSTRUÇÃO PROCESSO DE CONCURSO		PRT200801377		Escalas: 1:500 (A1) 1:1000 (A3)		
Verif.Coord.:	CM	ESCALÃO DE RIBEIRADIO		BARRAGEM PLANTA		Substituído por:	
Est.Proj.:	CM, MCSC						
Des.:	J. Cidades						
Data:	Novembro 2008						

# **Anexo 2**

## **Certificados de Materiais**

- **Certificado da Rede Electrossoldada**
- **Certificado do Cimento CEM II/B-L 32.5N**
- **Certificado do Superplastificante Rheobuild 561**
- **Certificado dos Varões GEWI-DYWIDAG**

# certif

# Certificado



0Certificado  
nº  
Certificate no.

PSG-018/2009

**Nome e morada do titular do certificado:**  
*Name and address of the certificate holder:*

FAPRICELA - Indústria de Trefilaria, S.A.  
Manga da Granja  
3060-905 Ançã  
PORTUGAL

**Nome e morada do fabricante:**  
*Manufacturer's name and address:*

FAPRICELA - Indústria de Trefilaria, S.A.  
Manga da Granja  
3060-905 Ançã  
PORTUGAL

**Produto:**  
*Product:*

Rede electrossoldada para armaduras de betão armado  
*Welded fabric for reinforced concrete*

**Referências:**  
*Type references:*

REDE ELECTROSSOLDADA FAPRICELA A500 ER

**Marca(s) comercial(is):**  
*Trademark(s):*

----

**Características técnicas:**  
*Technical characteristics:*

Ver anexo / *See annex*

**Este produto está em conformidade com:**  
*This product is in conformity with:*

Especificação / *Specification*  
LNEC: E 458 - 2008

**Relatórios de ensaios nº(s) / emitidos por:**  
*Test report(s) no. / issued by:*

Notas Técnicas nºs 30/2007 e / *and* 45/2009 - DE/NCE / LNEC

**Informação adicional (se existir):**  
*Additional information (if any):*

Documento de Classificação / *Classification Document* LNEC DC184

**Este certificado é válido até:**  
*This certificate is valid until:*

2012-08-26

**e substitui o certificado nº:**  
*and supersedes the certificate no:*

PSG-085/2008

**Data de emissão:**  
*Date of issue:*

2009-07-10

Francisco Barroca  
Director Geral / *General Manager*

Este Certificado é constituído por um Anexo com 3 (três) páginas  
*This Certificate includes one Annex with 3 (three) pages*



# Certif Certificado

Anexo ao Certificado nº **PSG-018/2009**  
 Annex to the Certificate no. **PSG-018/2009**



Referências e características técnicas / Type references and technical characteristics:

Tipo de rede Welded type	Espaçamento dos varões Spacing between bars (mm)		Diâmetro dos varões Diameter of bars (mm)		Secções dos varões por metro de largura (cm <sup>2</sup> /m) Cross-section of bars per meter of width (cm <sup>2</sup> /m)		Peso por metro quadrado Weight per square meter (kg/m <sup>2</sup> )
	L	T	L	T	L	T	
FNR 50	100	300	5,0	5,0	1,96	0,65	2,06
FNR 55/5	100	300	5,5	5,0	2,38	0,65	2,38
FNR 60/5	100	300	6,0	5,0	2,83	0,65	2,73
FNR 65/5	100	300	6,5	5,0	3,32	0,65	3,12
FNR 70/5,5	100	300	7,0	5,5	3,85	0,79	3,64
FNR 70/6	100	300	7,0	6,0	3,85	0,94	3,76
FNR 75/6	100	300	7,5	6,0	4,42	0,94	4,21
FNR 80/6,5	100	300	8,0	6,5	5,03	1,11	4,81
FNR 80/7	100	300	8,0	7,0	5,03	1,28	4,95
FNR 85/6,5	100	300	8,5	6,5	5,67	1,11	5,32
FNR 85/7	100	300	8,5	7,0	5,67	1,28	5,46
FNR 90/7	100	300	9,0	7,0	6,36	1,28	6,00
FNR 95/7,5	100	300	9,5	7,5	7,09	1,47	6,72
FNR 100/7,5	100	300	10,0	7,5	7,85	1,47	7,32
FNR 100/8	100	300	10,0	8,0	7,85	1,68	7,48
FNR 110/9	100	300	11,0	9,0	9,50	2,12	9,12
FNR 120/10	100	300	12,0	10,0	11,31	2,62	10,93
FNC 50	100	150	5,0	5,0	1,96	1,31	2,57
FNC 60/5	100	150	6,0	5,0	2,83	1,31	3,25
FNC 70/5,5	100	150	7,0	5,5	3,85	1,58	4,26
FNC 70/6	100	150	7,0	6,0	3,85	1,88	4,50
FNC 80/6,5	100	150	8,0	6,5	5,03	2,21	5,68
FNC 80/7	100	150	8,0	7,0	5,03	2,57	5,96
FNC 90/7	100	150	9,0	7,0	6,36	2,57	7,01

Data de emissão: 2009-07-10  
 Date of issue:

Francisco Barroca  
 Director Geral / General Manager





Anexo ao Certificado nº **PSG-018/2009**  
Annex to the Certificate no.

Referências e características técnicas / Type references and technical characteristics:

Tipo de rede Welded type	Espaçamento dos varões Spacing between bars (mm)		Diâmetro dos varões Diameter of bars (mm)		Secções dos varões por metro de largura (cm <sup>2</sup> /m) Cross-section of bars per meter of width (cm <sup>2</sup> /m)		Peso por metro quadrado Weight per square meter (kg/m <sup>2</sup> )
	L	T	L	T	L	T	
FNC 90/8	100	150	9,0	8,0	6,36	3,35	7,62
FNC 100/8	100	150	10,0	8,0	7,85	3,35	8,80
FNC 100/9	100	150	10,0	9,0	7,85	4,24	9,49
FNC 110/9	100	150	11,0	9,0	9,50	4,24	10,79
FNC 110/10	100	150	11,0	10,0	9,50	5,24	11,57
FNC 120/10	100	150	12,0	10,0	11,31	5,24	12,99
FNC 120/11	100	150	12,0	11,0	11,31	6,34	13,85
FNQ 50	100	100	5,0	5,0	1,96	1,96	3,08
FNQ 60/5	100	100	6,0	5,0	2,83	1,96	3,76
FNQ 60	100	100	6,0	6,0	2,83	2,83	4,44
FNQ 70/5	100	100	7,0	5,0	3,85	1,96	4,56
FNQ 70/6	100	100	7,0	6,0	3,85	2,83	5,24
FNQ 70	100	100	7,0	7,0	3,85	3,85	6,04
FNQ 80/6	100	100	8,0	6,0	5,03	2,83	6,17
FNQ 80/7	100	100	8,0	7,0	5,03	3,85	6,97
FNQ 80	100	100	8,0	8,0	5,03	5,03	7,89
FNQ 90/7	100	100	9,0	7,0	6,36	3,85	8,01
FNQ 90/8	100	100	9,0	8,0	6,36	5,03	8,94
FNQ 90	100	100	9,0	9,0	6,36	6,36	9,99
FNQ 100/8	100	100	10,0	8,0	7,85	5,03	10,11
FNQ 100/9	100	100	10,0	9,0	7,85	6,36	11,16
FNQ 100	100	100	10,0	10,0	7,85	7,85	12,33
FNQ 110/9	100	100	11,0	9,0	9,50	6,36	12,45
FNQ 110/10	100	100	11,0	10,0	9,50	7,85	13,63
FNQ 110/11	100	100	11,0	11,0	9,50	9,50	14,92
FNQ 120/10	100	100	12,0	10,0	11,31	7,85	15,04
FNQ 120/11	100	100	12,0	11,0	11,31	9,50	16,34
FNQ 120/12	100	100	12,0	12,0	11,31	11,31	17,76

Data de emissão: 2009-07-10  
Date of issue:

Francisco Barroca  
Director Geral / General Manager



Anexo ao Certificado nº **PSG-018/2009**  
 Annex to the Certificate no.



Referências e características técnicas / Type references and technical characteristics:

Tipo de rede Welded type	Espaçamento dos varões Spacing between bars (mm)		Diâmetro dos varões Diameter of bars (mm)		Secções dos varões por metro de largura (cm <sup>2</sup> /m) Cross-section of bars per meter of width (cm <sup>2</sup> /m)		Peso por metro quadrado Weight per square meter (kg/m <sup>2</sup> )
	L	T	L	T	L	T	
FND 50	150	150	5,0	5,0	1,31	1,31	2,06
FND 55	150	150	5,5	5,5	1,58	1,58	2,49
FND 60/5	150	150	6,0	5,0	1,88	1,31	2,51
FND 60	150	150	6,0	6,0	1,88	1,88	2,96
FND 65	150	150	6,5	6,5	2,21	2,21	3,47
FND 70/5	150	150	7,0	5,0	2,57	1,31	3,04
FND 70/6	150	150	7,0	6,0	2,57	1,88	3,49
FND 70	150	150	7,0	7,0	2,57	2,57	4,03
FND 80/6	150	150	8,0	6,0	3,35	1,88	4,11
FND 80/7	150	150	8,0	7,0	3,35	2,57	4,64
FND 80	150	150	8,0	8,0	3,35	3,35	5,26
FND 90/7	150	150	9,0	7,0	4,24	2,57	5,34
FND 90/8	150	150	9,0	8,0	4,24	3,35	5,96
FND 90	150	150	9,0	9,0	4,24	4,24	6,66
FND 100	150	150	10,0	10,0	5,24	5,24	8,22

Data de emissão: 2009-07-10  
 Date of issue:

Francisco Barroca  
 Director Geral / General Manager





## DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE

### Cimento Portland de calcário EN 197-1 - CEM II/B-L 32,5 N

Conforme com o Anexo ZA da Norma NP EN 197-1:2001

Em cumprimento das disposições da Directiva dos Produtos da Construção, Directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988 (CPD), a **SECIL- Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.** declara que o Cimento Portland de calcário EN 197-1 - CEM II/B-L 32,5 N, produzido na fábrica **MACEIRA-LIZ**, satisfaz as especificações da Norma NP EN 197-1:2001, cumprindo a conformidade de acordo com o estipulado na Norma NP EN 197-2:2001 e possui o Certificado de Conformidade da CE com o número

**0856 - CPD - 0131**

emitido pelo Organismo Notificado - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066 LISBOA, de acordo com a avaliação descrita no Anexo ZA da Norma NP EN 197-1:2001.

Lisboa, 21 de Dezembro de 2001

Mário Valadas  
Administrador da SECIL

# Declaração de conformidade

## MARCAÇÃO CE DE ADJUVANTES PARA BETÃO SEGUNDO A DIRECTIVA UE DE PRODUTOS DE CONSTRUÇÃO DA UNIÃO EUROPEIA

### Produto

---

# RHEOBUILD 561

### Fabricante

---

## BASF Portuguesa, S.A.

**Sede :**  
Rua 25 de Abril, n.º 1  
2689-538 PRIOR-VELHO  
Telf: 219 499 900 – Fax: 219 499 945/49

**Fábrica:**  
Rua de S. Sebastião, nº 57, Cabra Figa  
2635-047 RIO DE MOURO  
Telf: 219 158 550 – Fax: 219 158 554

BASF Portuguesa, S.A. declara que o seu produto **RHEOBUILD 561**, segundo as disposições do Anexo ZA da norma NP EN 934-2:2009, cumpre como:

**Retardador de presa / Redutor de água de alta actividade/  
superplastificante** segundo NP EN 934-2:2009 (T11.1/T11.2)

no seu uso previsto para betão e dentro do limite definido pelo fabricante para a utilização do produto e na sua dosagem de ensaio, aplicando as directrizes para o Ensaio de Tipo Inicial estabelecidas na norma vigente NP EN 934-2:2009.

**BASF Portuguesa, S.A.**  
**Admixture Systems**



Eduardo Brandão  
Head Admixture Systems Portugal

Declaração de Conformidade elaborada de acordo com os requisitos e disposições da edição vigente da norma NP EN 934-2:2009. Esta Declaração perderá a validade com o surgimento de uma nova edição ou mediante qualquer modificação da norma de referência que implique modificações nas condições de Ensaio de Tipo Inicial ou nos seus resultados. Para mais informações podem ser solicitados os Ensaios de Tipo Inicial do adjuvante específico.

Este documento consta de 1 página. É proibida a reprodução total ou parcial deste documento e a sua difusão sem a autorização prévia de BASF Portuguesa, S.A.

Edição 09/12/2010



STABILIMENTO  
 ROE VOLCIANO

Cliente: **C301270**  
 DYWIDAG SISTEMAS CONSTRUCTIVOS SA  
 AVENIDA DE LA INDUSTRIA 4  
 POLIGONO INDUSTRIAL  
 LA CANTUENA  
 28947 FUENLABRADA  
 SPAGNA

DDT NR.	DATA	LUOGO DI SPEDIZIONE
OD011TC400205	17/06/2011	Stabilimento di: Odolo

Pagina 1 di 1

## DOCUMENTO DI TRASPORTO

(e SCHEDA DI TRASPORTO ai sensi legge 286 e succ.)



Numero Documento: **OD011TC400205** 17/06/11

Agente: **F200371**

Caus. trasporto: **VENDITA**

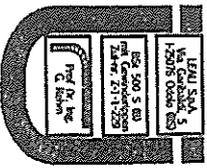
Porto: **Franco Partenza**

Aspetto Esterno del Beni FASCI  
 Trasporto a Mezzo **VEITTORE**

**Destinazione/Ind.Consegna-Scarico:**  
 DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL  
 AVENIDA DE LA INDUSTRIA 4  
 POLIGONO INDUSTRIAL  
 LA CANTUENA  
 28947 FUENLABRADA  
 SPAGNA

**Destinatario/Ind. Ordine:**  
 DYWIDAG SISTEMAS CONSTRUCTIVOS SA  
 AVENIDA DE LA INDUSTRIA 4  
 POLIGONO INDUSTRIAL  
 LA CANTUENA  
 28947 FUENLABRADA  
 SPAGNA

Tipologia - Descrizione della Merce		Diametro	Da Metri	A Metri	UM	Quantità	Colata	Colli	
Ns. Ordine OD011TC30000834 del 31/05/2011 Vs. Riferimento PCI10525 Betonstahl BST500S LE-GEW-DIN488:1984 NUMERO BARRE PER FASCIO: 20 - 34 - 22 - 32 - 31 - 33 - 34 - 29 - 31 - 33 ALLEGATO CERTIFICATO			32,00	12,00	12,20	KG	22.980	52170	10
Per qualità B450C attestato di qualificazione: 024/08 CA del 04.12.2008						<b>TOT.PESO</b> 22.980		<b>TOT.COLLI</b> 10	



**VEITTORE** CRM AV. TILIAS 25 APARTADO 104 6355-909 VIAR HORMOSO PORTUGAL P.IVA: N.ISCRIZIONE ALBO TRASPORTATORI: Tel. \_\_\_\_\_  
 TARGA 75EP16 C66768 DATA E ORA DEL RITIRO: 17/06/2011 09:33

**EVENTUALI DICHIARAZIONI/SUB-VEITTORE** INDIRIZZO: TARGA 75EP16 C66768 DATA E ORA DEL RITIRO \_\_\_\_\_  
 P.IVA: N.ISCRIZIONE ALBO TRASPORTATORI: Tel. \_\_\_\_\_  
**COMMITTENTE** DYWIDAG SISTEMAS CONSTRUCTIVOS SA - INDIRIZZO: AVENIDA DE LA INDUSTRIA 4 28947 FUENLABRADA - ES P.IVA: ES481512790 Tel. \_\_\_\_\_  
**PROPRIETARIO MERCE** DYWIDAG SISTEMAS CONSTRUCTIVOS SA - INDIRIZZO: AVENIDA DE LA INDUSTRIA 4 28947 FUENLABRADA - ES P.IVA: ES481512790 Tel. \_\_\_\_\_  
**OSSEVAZIONI VARIE** **EVENTUALI ISTRUZIONI** Il vettore è obbligato ad effettuare il trasporto nel rispetto della normativa vigente sulla sicurezza stradale e sociale, con particolare riferimento agli articoli 61, 62, 142, 164, 167 e 174 del Codice della Strada

**COMPILATORE** LEALI S.P.A LUOGO E DATA COMPILAZIONE: Odolo 17/06/2011  
**FIRMA COMPILATORE** \_\_\_\_\_  
**FIRMA DEL CONDUCENTE** \_\_\_\_\_  
**FIRMA DEL DESTINATARIO** \_\_\_\_\_

NOTE: La merce viaggia a rischio e pericolo del committente anche se venduta franco destino. Accusiamo ricevuta dei materiali sopra descritti nelle quantità e/o pesi indicati. I pesi parziali sono approssimativi. Solo il peso totale è quello valido. Il materiale deve essere CONTROLLATO in presenza del trasportatore. La ns. società non si ritiene responsabile per eventuali ammanchi riscontrati senza la presenza del trasportatore dopo aver scaricato la merce. Le legature dei materiali non sono atte all'aggancio diretto per l'alzata dei carichi, si raccomanda l'uso di idonee attrezzature. In applicazione del d.lgs. 231/2002, verranno applicati gli interessi di mora sui ritardi di \_\_\_\_\_ e il danno nella misura di: tasso BCE + 7%



Sede legale e amministrativa  
Via Garibaldi, 5 - 25076 Oledo BS - Italia  
REA: 405420 Reg. Imp. 090988  
C.F. e P.IVA: IT 02023290988 Cap. Soc. 41.000.000 euro  
telefono: +39-0365-828111 fax: +39-0365-828650

DDT N° 400204 del 16/06/11

File  
DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL  
GERMANENSTRASSE 8  
86343 KOENIGSBRUNN DE

Stabilimento di Odole  
Via Garibaldi, 5 - 25076 Odole BS - Italia  
telefono: +39-0365-828111 fax: +39-0365-828650  
Stabilimento di Ros' Volciano  
Via Garibaldi, 24 - 25077 Ros' Volciano BS - Italia  
telefono: +39-0365-529711 fax: +39-0365-529734

Certificato N.° TCAG00058/2011 del 07/06/2011  
Materiale LE.GEW ( GEM1 )

**ANALISI CHIMICA %**

Colata	C	SI	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Al	V	N	Ceq	Pr.	d	Massa	Area	Toll	fy	f <sub>t</sub>	A5	A10	Agt	f <sub>0/y</sub>	f <sub>y/500</sub>	lr
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		mm	Kg/m	mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%	%	Valore	Valore	
51543	0,190	0,210	1,260	0,015	0,015	0,360	0,080	0,130	0,030	0,018	0,004	0,073	0,011	0,469	1	32,00	6,258	797,1	-0,89	580	712	20,8	18,2	11,4	1,228	1,160	0,086
															2	32,00	6,249	796,0	-1,03	580	715	20,4	15,8	11,4	1,232	1,180	
															3	32,00	6,226	793,2	-1,40	579	715	20,8	15,8	11,9	1,234	1,158	
52170	0,200	0,240	1,280	0,014	0,022	0,410	0,100	0,150	0,030	0,023	0,002	0,071	0,011	0,491	1	32,00	6,234	794,1	-1,27	586	722	20,0	16,2	12,4	1,232	1,172	0,090
															2	32,00	6,209	790,9	-1,69	591	722	20,8	16,8	11,4	1,220	1,182	
															3	32,00	6,226	793,1	-1,40	577	715	21,4	16,8	11,9	1,240	1,154	
52171	0,200	0,270	1,290	0,013	0,021	0,380	0,120	0,150	0,030	0,022	0,003	0,077	0,012	0,496	1	32,00	6,234	794,1	-1,28	584	716	20,8	17,0	12,9	1,225	1,168	0,086
															2	32,00	6,239	794,8	-1,18	577	701	22,4	17,8	12,4	1,216	1,154	
															3	32,00	6,247	795,8	-1,06	575	709	20,8	16,2	11,4	1,234	1,150	

Lo Sperimentatore

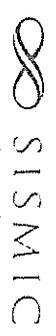
Cn. 52170 mt. 12,00 Ton. 85,38  
Cn. 52171 mt. 12,00 Ton. 16,32  
Cn. 51543 mt. 12,00 Ton. 03,61

Prova piega OK. I risultati sono conformi alla norma. Controllo radiometrico negativo.  
Metodo di prova sec. UNI EN 10002 - 2004

Certificato di collaudo EN 10204 3.1  
TCAG00058/2011 07/06/2011

(TCA03)  
C301251

Azienda certificata ISO9001:2008 (IGQ8909)  
Azienda certificata ISO14001:2004 (IGQ AZG04)



## **Anexo 3**

### **Certificado de Equipamentos**

- **Certificado do Macaco Hidráulico  
BVA/HDC10003**
- **Certificado do Defletómetro Roldana –  
HuggenBerger AG EU200**
- **Certificado do Defletómetro de Estilete  
– Mitutoyo 3062S-19**



# Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS

Laboratório de Metrologia de Forças



Boletim nº 15/12

Pág. 1/4

Pedido nº 15026

O DIRECTOR DO DEPARTAMENTO

Visto

JOÃO ALMEIDA FERNANDES

Processo: 0302/73/9047

(Process number)

Pedido: 15026

(Job number)

## Cliente / Customer

Designação (Customer name) Rodio Portugal, S.A.  
Endereço (Address) Av. dos Combatentes, 52 - Apartado 112  
2710 - 034 Sintra  
Portugal

## Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação (Name) Sistema de medição da força de macaco hidráulico com indicador digital  
(Hydraulic jack measuring system with digital indicator)

## Dados do macaco hidráulico / Hydraulic jack data

Marca e modelo (Brand and model) BVA / HDC10003  
Número de Série (Serial number) H1006000988  
Referência (Reference) -

## Dados do indicador digital / Indicator data

Marca e modelo (Brand and model) PARKER / SCJN-600-01  
Número de Série (Serial number) 8496  
Referência (Reference) -  
Alcance (Alcance) 600 bar

## Equipamento de referência / Reference standards

Designação (Name) Transdutores de força  
(Force Transducers)  
Dados de identificação (Id. data) LMF/EQ18 (5000)  
Rastreabilidade (Traceability) HBM - DKD  
Certificados de calibração dos padrões (Id. certified) HBM - DKD 28925  
Incerteza máxima das forças de calibração (%) (Max. uncertainty of calibration forces) 0,505

## Dados complementares / Complementary data

Data de calibração (Calibration date) 2012-02-23  
Local de calibração (Testing place) Instalações do LMF/LNEC  
(LMF/LNEC metrology laboratory facilities)  
Condições ambientais (Environmental conditions)  
Temperatura ambiente máxima: (Maximum Temperature) 21,8 °C  
Temperatura ambiente mínima: (Minimum Temperature) 21,5 °C  
Procedimento/Norma (Procedure / Norm) Procedimento LMF / PC01 - Vers. 02

LNEC/DE

Av. do Brasil, 101 1700-066 Lisboa Portugal

Tel +351 21 844 3432 • Fax +351 21 844 3025

Pess. Colectiva 501 389 660

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



Processo: 0302/73/9047

(Process number)

Pedido: 15026

(Job number)

## Resultados da calibração (1) em compressão com movimento de saída do êmbolo

Utilização do equipamento calibrado : Ao longo dos intervalos de medição indicados

(Annex B presents the calibration curve and interpolation table)

Intervalo de medição (Measuring range)	Classificação (segundo o LMF/PC01) (Class)	Valor máximo da incerteza expandida <sup>(2)</sup> em cada intervalo de medição (Highest expanded measuring uncertainty in each measuring range)
40 bar a 400 bar	Classe 0,5	±0,63% da força ±0,63% of reading
80 bar a 400 bar	Classe 0,5	±0,59% da força ±0,59% of reading
120 bar a 400 bar	Classe 0,5	±0,59% da força ±0,59% of reading
160 bar a 400 bar	Classe 0,5	±0,59% da força ±0,59% of reading
200 bar a 400 bar	Classe 0,5	±0,59% da força ±0,59% of reading

## Observações / Notes

Inspeção visual	Nada a observar	(No comments)
Observações gerais	Nada a observar	(No comments)

### Notas:

(1) Os resultados das operações de calibração e os erros calculados segundo o LMF/PC01 são apresentados no Anexo A, bem como, as classes de tolerância respectivas.

(2) A incerteza de medição expandida é expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k=2,00$ , o qual, para uma distribuição t de Student com  $v_{\text{eff}}=50$  graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade expandida de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi calculada de acordo com Proc. LMF/PC01, baseado do doc. EA-4/02 e guias RELACRE n.ºs 4 e 5.

(1) Calibration results and errors are evaluated according with LMF/PC01 Procedure and presented in Annex A within the tolerances applied.

(2) Expanded uncertainty is obtained from standard uncertainty multiplied by the coverage factor of  $k=2,00$ , assuming a t-Student distribution with  $v_{\text{eff}}=50$  effective degrees of freedom, corresponding to a probability interval of 95%. The evaluation, is based on EA guide 4/02 and RELACRE guides n.º 4 and n.º 5.

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS



Laboratório de Metrologia de Forças



Boletim nº 15/12

Pág. 3/4

Pedido nº 15026

O DIRECTOR DO DEPARTAMENTO

Visto   
JOÃO ALMEIDA FERNANDES

Processo: 0302/73/9047  
(Process number)

Pedido: 15026  
(Job number)

## ANEXO A - Resultados das operações de calibração

(Annex A - Results)

Macaco hidráulico: Marca: BVA Modelo: HDC10003 Nº Série: H1006000988  
(Calibrated equipment) (Brand) (Model) (Serial nº)

### Resultados obtidos e erros do sistema de medição da força

(Results and errors of the calibration)

Leitura no macaco (Values in the calibrated equipment) (bar)	Forças lidas no padrão de força (kN) (Force transducer values)					Valores médios (Average values)		Erros do sistema de medição de força (Errors of the calibration)			
	Série 1 (Series 1)	Série 2 (Series 2)	Série 3 (Series 3)	Série 4 (Series 4)	Série 4' (Series 4')	F <sub>wr</sub> (kN)	F <sub>r</sub> (kN)	Repetibilidade sem rotação (Repeatability without rotation) b' (%)	Repetibilidade com rotação (Repeatability with rotation) b (%)	Interpolação (Interpolation) f <sub>c</sub> (%)	Reversibilidade (Reversibility) u (%)
	(cres./up)	(cres./up)	(cres./up)	(cres./up)	(dec./down)	Sér. 1 e 2	(Sér. 2, 3 e 4)				
40	53,07	53,15	53,33	53,40	-	53,11	53,29	0,142	0,470	0,033	-
80	110,28	110,48	110,20	110,58	-	110,38	110,42	0,182	0,340	0,036	-
120	166,96	167,21	167,03	167,66	-	167,08	167,30	0,150	0,374	0,075	-
160	224,27	224,65	224,37	224,35	-	224,46	224,46	0,167	0,134	0,010	-
200	281,34	281,22	280,99	282,19	-	281,28	281,47	0,045	0,427	0,019	-
240	337,56	337,66	338,97	337,89	-	337,61	338,17	0,030	0,385	0,061	-
280	396,25	395,42	395,32	396,85	-	395,83	395,86	0,209	0,386	0,131	-
320	450,77	451,88	452,35	451,83	-	451,33	452,02	0,244	0,116	0,068	-
360	508,69	509,57	508,94	509,17	-	509,13	509,23	0,172	0,123	0,023	-
400	566,36	567,24	566,59	565,69	-	566,80	566,51	0,155	0,274	0,018	-

Leituras do zero no macaco (bar) (Zero readings)			
0,00	0,00	0,00	0,00

Erro relativo do zero (f<sub>0</sub>): 0,000 %  
(Relative zero error)  
Classe associada ao erro relativo do zero (f<sub>0</sub>): 0,5  
(Relative zero error class)

Resolução absoluta mínima do aparelho indicador: 0,1 bar  
(Minimal resolution of the indicator device)

Resolução relativa = Resolução absoluta / Leitura no macaco  
(Relative resolution = resolution / equipment reading)

### Classificação e incertezas associadas aos patamares de força lidos no aparelho indicador da força

(Classification and uncertainties related with the indicator device)

Leitura no macaco (Hydraulic jack readings) (bar)	Valores ajustados (Adjusted values) F <sub>a</sub> (kN)	Incerteza do padrão (Force transducer uncertainty) U <sub>mdim</sub> (%)	Erro de repetib. (Repeat. error) b'	Erro de repetib. (Repeat. error) b	Erro de interpol. (Interp. error) f <sub>c</sub>	Erro de revers. (Revers. error) u	Resolução relativa (Relative resolution) a	Classe de cada patamar (Step class) patamar	Incerteza <sup>(2)</sup> do patamar (Step uncertainty) (%)	Incerteza <sup>(2)</sup> da gama de medição (Step range measurement uncertainty) (%)
40	53,27	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,63	± 0,63
80	110,38	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,58	± 0,59
120	167,43	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,58	± 0,59
160	224,43	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,53	± 0,59
200	281,41	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,59	± 0,59
240	338,38	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,58	± 0,59
280	395,35	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,59	± 0,59
320	452,33	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,53	± 0,55
360	509,34	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,52	± 0,55
400	566,40	± 0,510	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	Classe 0,5	Classe 0,5	± 0,55	± 0,55

### Limites de tolerância estipulados pelo Procedimento de Calibração LMF/PC01

(Tolerance according with the LMF Calibration Procedure)

	b' (%)	b, f <sub>c</sub> (%)	f <sub>0</sub> (%)	u (%)	a (%)		b' (%)	b, f <sub>c</sub> (%)	f <sub>0</sub> (%)	u (%)	a (%)
Classe 0,5	0,25	0,5	0,1	1,0	0,25	Classe 2	1,0	2,0	0,4	4,0	1,0
Classe 1	0,5	1,0	0,2	2,0	0,5	Classe 3	1,5	3,0	0,6	6,0	1,43

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS

Laboratório de Metrologia de Forças



Boletim nº 15/12

Pág. 4/4

Pedido nº 15026

DO DIRECTOR DO DEPARTAMENTO

Visto

JOÃO ALMEIDA FERNANDES

Processo: 0302/73/9047

Pedido: 15026

## ANEXO B - Curvas de calibração e Tabela para interpolação

(Annex B - Calibration Curves and Interpolation Tables)

### Curvas de calibração do instrumento de medição de forças <sup>(1)</sup>

(Calibration curves of the calibrated equipment)

Valor a ler através do equipamento calibrado  $X_i$  para uma força  $F$ :  $X_i = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3$

(Functional relation between readings and force)

$a_0 = 2,72840E+00$      $a_1 = 6,99157E-01$      $a_2 = 9,15033E-06$      $a_3 = -9,18158E-09$

Força  $F$  em função do valor lido através do equipamento calibrado  $X_i$ :  $F = A_0 + A_1 X_i + A_2 X_i^2 + A_3 X_i^3$

(Force value (F) in function of the value of the calibrated equipment (Xi))

$A_0 = -3,90315E+00$      $A_1 = 1,43044E+00$      $A_2 = -2,69102E-05$      $A_3 = 3,80301E-08$

### Tabela com valores de forças (em kN) para interpolação entre os patamares calibrados

(Interpolation table)

$X_i$ (bar)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
40	53,27	56,13	58,99	61,84	64,70	67,56	70,41	73,27	76,12	78,98
60	81,83	84,69	87,54	90,40	93,25	96,11	98,96	101,82	104,67	107,53
80	110,38	113,23	116,09	118,94	121,79	124,65	127,50	130,35	133,20	136,06
100	138,91	141,76	144,61	147,47	150,32	153,17	156,02	158,87	161,73	164,58
120	167,43	170,28	173,13	175,98	178,83	181,68	184,53	187,38	190,23	193,09
140	195,94	198,79	201,64	204,49	207,34	210,19	213,04	215,89	218,74	221,58
160	224,43	227,28	230,13	232,98	235,83	238,68	241,53	244,38	247,23	250,08
180	252,93	255,78	258,62	261,47	264,32	267,17	270,02	272,87	275,72	278,56
200	281,41	284,26	287,11	289,96	292,81	295,66	298,50	301,35	304,20	307,05
220	309,90	312,74	315,59	318,44	321,29	324,14	326,99	329,83	332,68	335,53
240	338,38	341,23	344,08	346,92	349,77	352,62	355,47	358,32	361,16	364,01
260	366,86	369,71	372,56	375,41	378,25	381,10	383,95	386,80	389,65	392,50
280	395,35	398,19	401,04	403,89	406,74	409,59	412,44	415,29	418,14	420,99
300	423,83	426,68	429,53	432,38	435,23	438,08	440,93	443,78	446,63	449,48
320	452,33	455,18	458,03	460,88	463,73	466,58	469,43	472,28	475,13	477,98
340	480,83	483,68	486,53	489,38	492,23	495,09	497,94	500,79	503,64	506,49
360	509,34	512,19	515,05	517,90	520,75	523,60	526,46	529,31	532,16	535,01
380	537,87	540,72	543,57	546,43	549,28	552,13	554,99	557,84	560,69	563,55
400	566,40	569,26	572,11	574,97	577,82	580,68	583,53	586,39	589,24	592,10

<sup>(1)</sup> Parâmetros obtidos por regressão polinomial  
(Parameters obtained using polynomial regression)

Data de emissão: Lisboa, 2012 -03- 06  
(Issue date:)

### Assinaturas / Signatures

O Técnico  
(The Technician)

Rui Alvarez

O Chefe do Laboratório  
(Head of the Laboratory)

José Luís Louro

O Chefe do Núcleo  
(Head of the Division)

Manuel Pipa

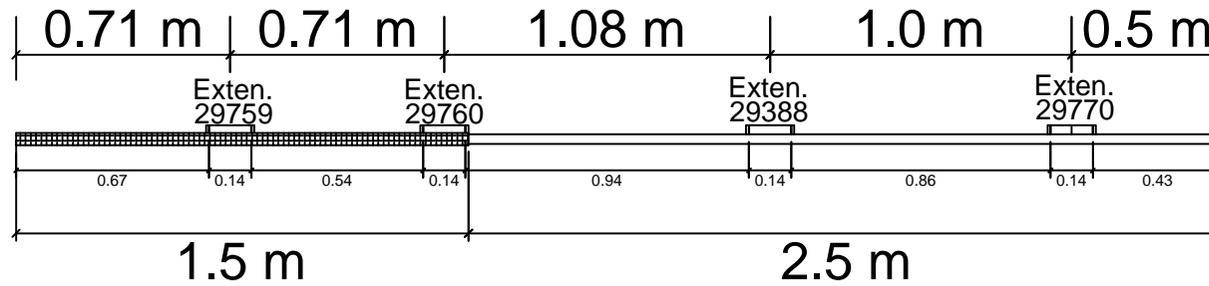
Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

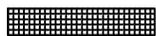
## **Anexo 4**

- **Desenho das Pregagens Instrumentadas**

# Executadas

## Pregagem 2

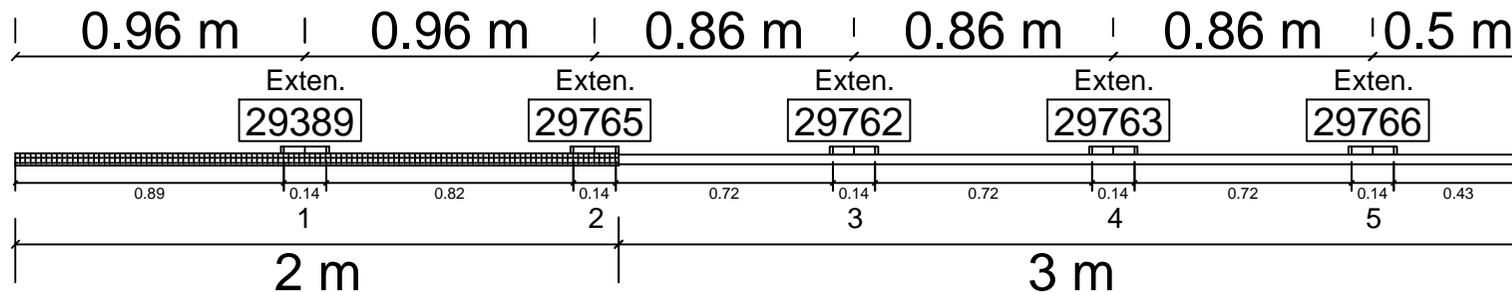


 - Comprimento Livre

Caixa - Extensometro  
 - 29773  
 29766 - 29768  
 29763 - 29759  
 29771 - 29764

# Executadas

## Pregagem 4



Caixa - Extensometro

29389 - 29765  
 29765 - 29757  
 29762 - 29389  
 29763 - 29768  
 29766 - 29758

## Pregagens de 4 m

Data de Preparacao:  
 Pregagem 3: 26/04/2012  
 Pregagem 4 : 27/04/2012

Orientacao:  
 Montagem:

# **Anexo 5**

## **Boletins de Ensaio – Pregagem nº 2**

- **Defletómetros**
- **Extensómetro 1**
- **Extensómetro 2**
- **Extensómetro 3**
- **Extensómetro 4**





















## **Anexo 6**

### **Boletins de Ensaio – Pregagem nº 4**

- **Defletómetros**
- **Extensómetro 1**
- **Extensómetro 2**
- **Extensómetro 3**
- **Extensómetro 4**
- **Extensómetro 5**

























# **Anexo 7**

## **Folha de Cálculo – Pregagem nº 2**

### **7.1 S/Fissuração da Calda**

- **Força N**
- **Tensão de Corte**

### **7.2 S/Fissuração da Calda alternando ext.1 e 4**

- **Força N**
- **Tensão de Corte**

Pregagem nº 2												
Cálculo da Tensão de Corte - Abordagem Experimental												
Carga	Designação	Distância à cabeça da Pregagem (m)	Extensão	E (Mpa)	Tensao (Mpa)	Area (mm)	N (kN)	Ponto Médio entre Extensómetros (m)	Comprimento (m)	ΔN (kN)	Diametro (mm)	Tensão de Corte (kPa)
100 kN	Início	0	-	200000	-	804	100,0					
	Ext 1	0,71	1,930E-05		3,86	804	3,1	0,36	0,71	-96,90	0,076	571,59
	Ext 2	1,42	3,166E-06		0,63	804	0,5	1,07	0,71	-2,60	0,076	15,31
	Ext 3	2,5	1,181E-05		2,36	25687	1,9	1,96	1,08	1,39	0,076	5,39
	Ext 4	3,5	2,760E-05		5,52	25687	4,4	3,00	1,00	2,54	0,076	10,64
	Fim	4	0,000E+00		0,00	25687	0,0	3,75	0,50	-4,44	0,076	37,18
	150 kN	Início	0		-	200000	-	804	150,0			
Ext 1		0,71	3,823E-05	7,65	804		6,1	0,36	0,71	-143,85	0,076	848,59
Ext 2		1,42	1,206E-05	2,41	804		1,9	1,07	0,71	-4,21	0,076	24,82
Ext 3		2,5	4,707E-05	9,41	25687		7,6	1,96	1,08	5,63	0,076	21,83
Ext 4		3,5	9,990E-05	19,98	25687		16,1	3,00	1,00	8,50	0,076	35,58
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-16,06	0,076	134,56
200 kN		Início	0	-	200000		-	804	200,0			
	Ext 1	0,71	2,109E-04	42,17		804	33,9	0,36	0,71	-166,09	0,076	979,78
	Ext 2	1,42	4,024E-05	8,05		804	6,5	1,07	0,71	-27,44	0,076	161,85
	Ext 3	2,5	1,919E-04	38,39		25687	30,9	1,96	1,08	24,39	0,076	94,59
	Ext 4	3,5	3,021E-04	60,42		25687	48,6	3,00	1,00	17,71	0,076	74,19
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-48,58	0,076	406,91
	250 kN	Início	0	-		200000	-	804	250,0			
Ext 1		0,71	5,629E-04	112,58	804		90,5	0,36	0,71	-159,49	0,076	940,83
Ext 2		1,42	9,447E-05	18,89	804		15,2	1,07	0,71	-75,32	0,076	444,31
Ext 3		2,5	3,628E-04	72,57	25687		58,3	1,96	1,08	43,15	0,076	167,36
Ext 4		3,5	6,859E-04	137,18	25687		110,3	3,00	1,00	51,94	0,076	217,56
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-110,29	0,076	923,85
300 kN		Início	0	-	200000		-	804	300,0			
	Ext 1	0,71	8,182E-04	163,64		804	131,6	0,36	0,71	-168,43	0,076	993,58
	Ext 2	1,42	1,515E-04	30,29		804	24,4	1,07	0,71	-107,21	0,076	632,46
	Ext 3	2,5	5,014E-04	100,28		25687	80,6	1,96	1,08	56,27	0,076	218,22
	Ext 4	3,5	9,484E-04	189,68		25687	152,5	3,00	1,00	71,88	0,076	301,06
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-152,51	0,076	1277,48
	350 kN	Início	0	-		200000	-	84	350,0			
Ext 1		0,71	9,671E-05	19,34	804		15,6	0,36	0,71	-334,45	0,076	1972,92
Ext 2		1,42	2,345E-04	46,91	804		37,7	1,07	0,71	22,16	0,076	130,73
Ext 3		2,5	6,204E-04	124,09	25687		99,8	1,96	1,08	62,05	0,076	240,64
Ext 4		3,5	1,259E-03	251,81	25687		202,5	3,00	1,00	102,69	0,076	430,09
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-202,45	0,076	1695,86
385 kN		Início	0	-	200000		-	804	385,0			
	Ext 1	0,71	1,357E-04	27,13		804	21,8	0,36	0,71	-363,19	0,076	2142,43
	Ext 2	1,42	3,281E-04	65,63		804	52,8	1,07	0,71	30,95	0,076	182,58
	Ext 3	2,5	7,008E-04	140,16		25687	112,7	1,96	1,08	59,92	0,076	232,37
	Ext 4	3,5	1,314E-03	262,70		25687	211,2	3,00	1,00	98,53	0,076	412,66
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-211,21	0,076	1769,25

Pregagem nº 2												
Cálculo da Tensão de Corte - Abordagem Experimental - Troca dos Extensómetros 1 e 4												
Carga	Designação	Distância à cabeça da Pregagem (m)	Extensão	E (Mpa)	Tensao (Mpa)	Area (mm <sup>2</sup> )	N (kN)	Ponto Médio entre Extensómetros (m)	Comprimento (m)	ΔN (kN)	Diametro (mm)	Tensão de Corte (kPa)
100 kN	Início	0	-	200000	-	804	100,0					
	Ext 1	0,71	2,760E-05		5,52	804	4,4	0,36	0,71	-95,56	0,076	563,72
	Ext 2	1,42	3,166E-06		0,63	804	0,5	1,07	0,71	-3,93	0,076	23,18
	Ext 3	2,5	1,181E-05		2,36	25687	1,9	1,96	1,08	1,39	0,076	5,39
	Ext 4	3,5	1,930E-05		3,86	25687	3,1	3,00	1,00	1,20	0,076	5,05
	Fim	4	0,000E+00		0,00	25687	0,0	3,75	0,50	-3,10	0,076	26,00
	150 kN	Início	0		-	200000	-	804	150,0			
Ext 1		0,71	9,990E-05	19,98	804		16,1	0,36	0,71	-133,94	0,076	790,09
Ext 2		1,42	1,206E-05	2,41	804		1,9	1,07	0,71	-14,12	0,076	83,32
Ext 3		2,5	4,707E-05	9,41	25687		7,6	1,96	1,08	5,63	0,076	21,83
Ext 4		3,5	3,823E-05	7,65	25687		6,1	3,00	1,00	-1,42	0,076	5,95
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-6,15	0,076	51,49
200 kN		Início	0	-	200000		-	804	200,0			
	Ext 1	0,71	3,021E-04	60,42		804	48,6	0,36	0,71	-151,42	0,076	893,24
	Ext 2	1,42	4,024E-05	8,05		804	6,5	1,07	0,71	-42,11	0,076	248,38
	Ext 3	2,5	1,919E-04	38,39		25687	30,9	1,96	1,08	24,39	0,076	94,59
	Ext 4	3,5	2,109E-04	42,17		25687	33,9	3,00	1,00	3,04	0,076	12,75
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-33,91	0,076	284,03
	250 kN	Início	0	-		200000	-	804	250,0			
Ext 1		0,71	6,859E-04	137,18	804		110,3	0,36	0,71	-139,71	0,076	824,15
Ext 2		1,42	9,447E-05	18,89	804		15,2	1,07	0,71	-95,10	0,076	560,99
Ext 3		2,5	3,628E-04	72,57	25687		58,3	1,96	1,08	43,15	0,076	167,36
Ext 4		3,5	5,629E-04	112,58	25687		90,5	3,00	1,00	32,17	0,076	134,72
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-90,51	0,076	758,17
300 kN		Início	0	-	200000		-	804	300,0			
	Ext 1	0,71	9,484E-04	189,68		804	152,5	0,36	0,71	-147,49	0,076	870,07
	Ext 2	1,42	1,515E-04	30,29		804	24,4	1,07	0,71	-128,15	0,076	755,97
	Ext 3	2,5	5,014E-04	100,28		25687	80,6	1,96	1,08	56,27	0,076	218,22
	Ext 4	3,5	8,182E-04	163,64		25687	131,6	3,00	1,00	50,94	0,076	213,37
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-131,57	0,076	1102,09
	350 kN	Início	0	-		200000	-	84	350,0			
Ext 1		0,71	1,259E-03	251,81	804		202,5	0,36	0,71	-147,55	0,076	870,38
Ext 2		1,42	2,345E-04	46,91	804		37,7	1,07	0,71	-164,74	0,076	971,80
Ext 3		2,5	6,204E-04	124,09	25687		99,8	1,96	1,08	62,05	0,076	240,64
Ext 4		3,5	9,671E-05	19,34	25687		15,6	3,00	1,00	-84,21	0,076	352,71
Fim		4	0,000E+00	0,00	25687		0,0	3,75	0,50	-15,55	0,076	130,26
385 kN		Início	0	-	200000		-	804	385,0			
	Ext 1	0,71	1,314E-03	262,70		804	211,2	0,36	0,71	-173,79	0,076	1025,17
	Ext 2	1,42	3,281E-04	65,63		804	52,8	1,07	0,71	-158,45	0,076	934,68
	Ext 3	2,5	7,008E-04	140,16		25687	112,7	1,96	1,08	59,92	0,076	232,37
	Ext 4	3,5	1,357E-04	27,13		25687	21,8	3,00	1,00	-90,87	0,076	380,60
	Fim	4	0,000E+00	0,00		25687	0,0	3,75	0,50	-21,81	0,076	182,73

# **Anexo 8**

## **Folha de Cálculo – Pregagem nº 4**

### **8.1 S/Fissuração da Calda**

- **Força N**
- **Tensão de Corte**

### **8.2 C/Fissuração da Calda**

- **Força N**
- **Tensão de Corte**

### **8.3 C/Fissuração da Calda e S/Extensômetro 2**

- **Força N**
- **Tensão de Corte**

Anexo 8.1												
Pregagem nº 4 - S/ Fissuração da Calda de Selagem												
Cálculo da Tensão de Corte - Abordagem Experimental												
Carga	Designação	Distância à "cabeça" da Pregagem (m)	Extensão	E (MPa)	Tensao (MPa)	Area (mm <sup>2</sup> )	N (kN)	Pontos Médio entre Extensómetros (m)	Comprimento entre extensometro (m)	ΔN (kN)	Diâmetro (m)	Tensão de Corte (kPa)
100 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	100					
	Ext1	0.96	3.75E-04		74.90	804	60.22	0.48	0.96	-39.78	0.089	148.19
	Ext2	1.92	9.09E-05		18.19	804	14.62	1.44	0.96	-45.60	0.089	169.88
	Ext3	2.78	2.46E-04		49.19	1617	79.53	2.35	0.86	64.90	0.089	269.92
	Ext4	3.64	7.84E-05		15.67	1617	25.34	3.21	0.86	-54.19	0.089	225.35
	Ext5	4.5	2.81E-05		5.63	1617	9.10	4.07	0.86	-16.24	0.089	67.55
	Fim	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-9.10	0.089	65.07
	150 kN	Inicio	0		-	200000	-	804	150.00			
Ext1		0.96	6.62E-04	132.41	804		106.46	0.48	0.96	-43.54	0.089	162.23
Ext2		1.92	1.52E-04	30.49	804		24.51	1.44	0.96	-81.94	0.089	305.27
Ext3		2.78	4.56E-04	91.23	1617		147.48	2.35	0.86	122.96	0.089	511.37
Ext4		3.64	1.09E-04	21.86	1617		35.33	3.21	0.86	-112.14	0.089	466.37
Ext5		4.5	5.05E-05	10.10	1617		16.33	4.07	0.86	-19.01	0.089	79.05
Fim		5	0.00E+00	0.00	1617		0.00	4.75	0.50	-16.33	0.089	116.78
200 kN		Inicio	0	-	200000		-	804	200.00			
	Ext1	0.96	9.76E-04	195.21		804	156.95	0.48	0.96	-43.05	0.089	160.38
	Ext2	1.92	2.42E-04	48.41		804	38.92	1.44	0.96	-118.03	0.089	439.73
	Ext3	2.78	7.53E-04	150.64		1617	243.52	2.35	0.86	204.60	0.089	850.89
	Ext4	3.64	1.22E-04	24.49		1617	39.60	3.21	0.86	-203.93	0.089	848.08
	Ext5	4.5	5.78E-05	11.56		1617	18.69	4.07	0.86	-20.90	0.089	86.93
	-	5	0.00E+00	0.00		1617	0.00	4.75	0.50	-18.69	0.089	133.72
	250 kN	Inicio	0	-		200000	-	804	250.00			
Ext1		0.96	1.28E-03	256.69	804		206.38	0.48	0.96	-43.62	0.089	162.50
Ext2		1.92	3.81E-04	76.18	804		61.25	1.44	0.96	-145.13	0.089	540.69
Ext3		2.78	1.04E-03	207.50	1617		335.44	2.35	0.86	274.19	0.089	1140.26
Ext4		3.64	1.15E-04	22.97	1617		37.12	3.21	0.86	-298.31	0.089	1240.60
Ext5		4.5	3.43E-05	6.85	1617		11.08	4.07	0.86	-26.05	0.089	108.33
-		5	0.00E+00	0.00	1617		0.00	4.75	0.50	-11.08	0.089	79.23
300 kN		Inicio	0	-	200000		-	804	300.00			
	Ext1	0.96	1.60E-03	320.51		804	257.69	0.48	0.96	-42.31	0.089	157.63
	Ext2	1.92	4.66E-04	93.13		804	74.88	1.44	0.96	-182.81	0.089	681.06
	Ext3	2.78	1.41E-03	281.59		1617	455.22	2.35	0.86	380.34	0.089	1581.72
	Ext4	3.64	2.58E-05	5.16		1617	8.34	3.21	0.86	-446.87	0.089	1858.42
	Ext5	4.5	6.46E-05	12.92		1617	20.89	4.07	0.86	12.54	0.089	52.16
	-	5	0.00E+00	0.00		1617	0.00	4.75	0.50	-20.89	0.089	149.41
	315 kN	Inicio	0	-		200000	-	804	315.00			
Ext1		0.96	1.66E-03	332.13	804		267.04	0.48	0.96	-47.96	0.089	178.69
Ext2		1.92	4.95E-04	99.03	804		79.62	1.44	0.96	-187.42	0.089	698.23
Ext3		2.78	1.59E-03	318.16	1617		514.33	2.35	0.86	434.71	0.089	1807.84
Ext4		3.64	-5.65E-05	-11.29	1617		-18.26	3.21	0.86	-532.59	0.089	2214.88
Ext5		4.5	9.72E-05	19.43	1617		31.41	4.07	0.86	49.67	0.089	206.57
-		5	0.00E+00	0	1617		0.00	4.75	0.50	-31.41	0.089	224.71

Anexo 8.2

Pregagem nº 4 - C/ Possível Fissuração da Calda de Selagem

Cálculo da Tensão de Corte - Abordagem Experimental

Carga	Designação	Distância à "cabeça" da Pregagem (m)	Extensão	E (MPa)	Tensao (MPa)	Area (mm <sup>2</sup> )	N (kN)	Pontos Médio entre Extensômetros (m)	Comprimento entre extensometro (m)	ΔN (kN)	Diâmetro (m)	Tensão de Corte (kPa)
100 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	100					
	Ext1	0.96	3.75E-04		74.90	804	60.22	0.48	0.96	-39.78	0.089	148.19
	Ext2	1.92	9.09E-05		18.19	804	14.62	1.44	0.96	-45.60	0.089	169.88
	Ext3	2.78	2.46E-04		49.19	804	39.55	2.35	0.86	24.93	0.089	103.68
	Ext4	3.64	7.84E-05		15.67	1617	25.34	3.21	0.86	-14.21	0.089	59.11
	Ext5	4.5	2.81E-05		5.63	1617	9.10	4.07	0.86	-16.24	0.089	67.55
	Fim	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-9.10	0.089	65.07
150 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	150.00					
	Ext1	0.96	6.62E-04		132.41	804	106.46	0.48	0.96	-43.54	0.089	162.23
	Ext2	1.92	1.52E-04		30.49	804	24.51	1.44	0.96	-81.94	0.089	305.27
	Ext3	2.78	4.56E-04		91.23	804	73.35	2.35	0.86	48.83	0.089	203.08
	Ext4	3.64	1.09E-04		21.86	1617	35.33	3.21	0.86	-38.01	0.089	158.09
	Ext5	4.5	5.05E-05		10.10	1617	16.33	4.07	0.86	-19.01	0.089	79.05
	Fim	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-16.33	0.089	116.78
200 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	200.00					
	Ext1	0.96	9.76E-04		195.21	804	156.95	0.48	0.96	-43.05	0.089	160.38
	Ext2	1.92	2.42E-04		48.41	804	38.92	1.44	0.96	-118.03	0.089	439.73
	Ext3	2.78	7.53E-04		150.64	804	121.12	2.35	0.86	82.20	0.089	341.83
	Ext4	3.64	1.22E-04		24.49	804	19.69	3.21	0.86	-101.42	0.089	421.79
	Ext5	4.5	5.78E-05		11.56	1617	18.69	4.07	0.86	-1.00	0.089	4.16
	-	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-18.69	0.089	133.72
250 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	250.00					
	Ext1	0.96	1.28E-03		256.69	804	206.38	0.48	0.96	-43.62	0.089	162.50
	Ext2	1.92	3.81E-04		76.18	804	61.25	1.44	0.96	-145.13	0.089	540.69
	Ext3	2.78	1.04E-03		207.50	804	166.83	2.35	0.86	105.58	0.089	439.07
	Ext4	3.64	1.15E-04		22.97	804	18.46	3.21	0.86	-148.37	0.089	617.01
	Ext5	4.5	3.43E-05		6.85	1617	11.08	4.07	0.86	-7.39	0.089	30.72
	-	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-11.08	0.089	79.23
300 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	300.00					
	Ext1	0.96	1.60E-03		320.51	804	257.69	0.48	0.96	-42.31	0.089	157.63
	Ext2	1.92	4.66E-04		93.13	804	74.88	1.44	0.96	-182.81	0.089	681.06
	Ext3	2.78	1.41E-03		281.59	804	226.40	2.35	0.86	151.52	0.089	630.14
	Ext4	3.64	2.58E-05		5.16	804	4.15	3.21	0.86	-222.25	0.089	924.28
	Ext5	4.5	6.46E-05		12.92	1617	20.89	4.07	0.86	16.74	0.089	69.61
	-	5	0.00E+00		0.00	1617	0.00	4.75	0.50	-20.89	0.089	149.41
315 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	315.00					
	Ext1	0.96	1.66E-03		332.13	804	267.04	0.48	0.96	-47.96	0.089	178.69
	Ext2	1.92	4.95E-04		99.03	804	79.62	1.44	0.96	-187.42	0.089	698.23
	Ext3	2.78	1.59E-03		318.16	804	255.80	2.35	0.86	176.18	0.089	732.69
	Ext4	3.64	-5.65E-05		-11.29	804	-9.08	3.21	0.86	-264.88	0.089	1101.57
	Ext5	4.5	9.72E-05		19.43	1617	31.41	4.07	0.86	40.49	0.089	168.41
	-	5	0.00E+00		0	1617	0.00	4.75	0.50	-31.41	0.089	224.71

- Área de Influência alterada pela elevada extensão , levando à fissuração da Calda de Selagem

Anexo 8.3

Pregagem nº 4 - C/ Possível Fissuração da Calda de Selagem e S/Extensômetro 2

Cálculo da Tensão de Corte - Abordagem Experimental

Carga	Designação	Distância à "cabeça" da Pregagem (m)	Extensão	E (MPa)	Tensao (MPa)	Area (mm <sup>2</sup> )	N (kN)	Pontos Médio entre Extensômetros (m)	Comprimento entre extensometro (m)	ΔN (kN)	Diâmetro (m)	Tensão de Corte (kPa)	
100 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	100						
	Ext1	0,96	3,75E-04		74,90	804	60,22	0,48	0,96	-39,78	0,089	148,19	
	Ext2												
	Ext3	2,78	2,46E-04		49,19	804	39,55	1,87	1,82	-20,67	0,089	40,62	
	Ext4	3,64	7,84E-05		15,67	1617	25,34	3,21	0,86	-14,21	0,089	59,11	
	Ext5	4,5	2,81E-05		5,63	1617	9,10	4,07	0,86	-16,24	0,089	67,55	
	Fim	5	0,00E+00		0,00	1617	0,00	4,75	0,50	-9,10	0,089	65,07	
150 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	150,00						
	Ext1	0,96	6,62E-04		132,41	804	106,46	0,48	0,96	-43,54	0,089	162,23	
	Ext2												
	Ext3	2,78	4,56E-04		91,23	804	73,35	1,87	1,82	-33,11	0,089	65,06	
	Ext4	3,64	1,09E-04		21,86	1617	35,33	3,21	0,86	-38,01	0,089	158,09	
	Ext5	4,5	5,05E-05		10,10	1617	16,33	4,07	0,86	-19,01	0,089	79,05	
	Fim	5	0,00E+00		0,00	1617	0,00	4,75	0,50	-16,33	0,089	116,78	
200 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	200,00						
	Ext1	0,96	9,76E-04		195,21	804	156,95	0,48	0,96	-43,05	0,089	160,38	
	Ext2												
	Ext3	2,78	7,53E-04		150,64	804	121,12	1,87	1,82	-35,83	0,089	70,42	
	Ext4	3,64	1,22E-04		24,49	804	19,69	3,21	0,86	-101,42	0,089	421,79	
	Ext5	4,5	5,78E-05		11,56	1617	18,69	4,07	0,86	-1,00	0,089	4,16	
	-	5	0,00E+00		0,00	1617	0,00	4,75	0,50	-18,69	0,089	133,72	
250 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	250,00						
	Ext1	0,96	1,28E-03		256,69	804	206,38	0,48	0,96	-43,62	0,089	162,50	
	Ext2												
	Ext3	2,78	1,04E-03		207,50	804	166,83	1,87	1,82	-39,55	0,089	77,73	
	Ext4	3,64	1,15E-04		22,97	804	18,46	3,21	0,86	-148,37	0,089	617,01	
	Ext5	4,5	3,43E-05		6,85	1617	11,08	4,07	0,86	-7,39	0,089	30,72	
	-	5	0,00E+00		0,00	1617	0,00	4,75	0,50	-11,08	0,089	79,23	
300 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	300,00						
	Ext1	0,96	1,60E-03		320,51	804	257,69	0,48	0,96	-42,31	0,089	157,63	
	Ext2												
	Ext3	2,78	1,41E-03		281,59	804	226,40	1,87	1,82	-31,29	0,089	61,49	
	Ext4	3,64	2,58E-05		5,16	804	4,15	3,21	0,86	-222,25	0,089	924,28	
	Ext5	4,5	6,46E-05		12,92	1617	20,89	4,07	0,86	16,74	0,089	69,61	
	-	5	0,00E+00		0,00	1617	0,00	4,75	0,50	-20,89	0,089	149,41	
315 kN	Inicio	0	-	200000	-	804	315,00						
	Ext1	0,96	1,66E-03		332,13	804	267,04	0,48	0,96	-47,96	0,089	178,69	
	Ext2												
	Ext3	2,78	1,59E-03		318,16	804	255,80	1,87	1,82	-11,23	0,089	22,08	
	Ext4	3,64	-5,65E-05		-11,29	804	-9,08	3,21	0,86	-264,88	0,089	1101,57	
	Ext5	4,5	9,72E-05		19,43	1617	31,41	4,07	0,86	40,49	0,089	168,41	
	-	5	0,00E+00		0	1617	0,00	4,75	0,50	-31,41	0,089	224,71	

- Área de Influência alterada pela elevada extensão , levando à fissuração da Calda de Selagem

## **Anexo 9**

- **Ensaio de Corte Direto**

Resistência de Pico								
20kPa			40kPa			80kPa		
Pico			Pico			Pico		
Horizontal	tensao	vertical	Horizontal	tensao	vertical	Horizontal	tensao	vertical
0,016	1,851	0,012	-0,016	1,322	0,617	0,000	0,000	0,000
0,093	5,289	0,000	0,062	4,496	0,010	0,078	9,587	0,018
0,171	7,140	0,004	0,140	9,256	0,029	0,155	13,421	0,034
0,248	8,264	0,001	0,217	12,231	0,041	0,233	15,868	0,048
0,326	8,926	0,004	0,295	13,752	0,049	0,311	18,182	0,055
0,404	10,777	0,000	0,373	14,744	0,051	0,388	21,157	0,085
0,481	11,769	0,000	0,450	16,727	0,055	0,466	24,661	0,090
0,559	12,430	0,004	0,528	18,050	0,059	0,544	25,983	0,095
0,637	13,421	0,008	0,606	19,835	0,060	0,621	27,967	0,100
0,714	14,215	0,012	0,683	21,355	0,059	0,699	29,421	0,111
0,792	15,074	0,016	0,761	23,140	0,058	0,777	31,074	0,115
0,870	15,736	0,021	0,839	24,661	0,055	0,854	32,727	0,123
0,947	16,397	0,025	0,916	26,446	0,053	0,932	33,917	0,127
1,025	17,190	0,033	0,994	27,769	0,047	1,009	35,041	0,135
1,103	17,719	0,037	1,072	29,421	0,043	1,087	36,231	0,140
1,180	18,182	0,041	1,149	30,744	0,041	1,165	37,355	0,141
1,258	18,843	0,049	1,227	32,397	0,034	1,242	38,017	0,145
1,336	19,372	0,058	1,305	34,050	0,029	1,320	38,876	0,152
1,413	19,835	0,063	1,382	35,702	0,023	1,398	39,868	0,156
1,491	20,033	0,068	1,460	37,355	0,016	1,475	40,529	0,160
1,569	20,826	0,074	1,537	39,339	0,008	1,553	41,190	0,162
1,646	20,826	0,082	1,615	40,860	0,000	1,631	41,983	0,169
1,724	21,488	0,094	1,693	42,182	0,006	1,708	42,645	0,170
1,801	22,347	0,102	1,770	43,835	0,016	1,786	43,306	0,177
1,879	22,479	0,111	1,848	45,289	0,025	1,864	43,967	0,181
1,957	22,810	0,119	1,926	46,942	0,033	1,941	44,298	0,184
2,034	22,810	0,133	2,003	48,463	0,048	2,019	44,959	0,187
2,112	22,810	0,143	2,081	49,785	0,057	2,097	45,488	0,193
2,190	24,000	0,156	2,159	51,240	0,067	2,174	45,950	0,197
2,267	24,331	0,164	2,236	52,562	0,079	2,252	46,479	0,201
2,345	24,463	0,177	2,314	54,083	0,090	2,330	46,942	0,203
2,423	24,132	0,189	2,392	55,207	0,103	2,407	47,471	0,210
2,500	24,132	0,206	2,469	56,397	0,115	2,485	47,802	0,212
2,578	25,124	0,223	2,547	57,521	0,131	2,562	48,264	0,214
2,656	25,124	0,238	2,625	58,711	0,147	2,640	47,934	0,220
2,733	25,322	0,256	2,702	59,835	0,164	2,718	48,595	0,222
2,811	25,322	0,275	2,780	60,826	0,180	2,795	48,595	0,224
2,889	25,322	0,293	2,858	61,686	0,197	2,873	49,256	0,225
2,966	25,322	0,312	2,935	62,678	0,217	2,951	49,785	0,227
3,044	25,322	0,333	3,013	63,339	0,238	3,028	49,917	0,234
3,122	24,992	0,358	3,090	64,331	0,255	3,106	50,579	0,234
3,199	24,661	0,378	3,168	65,124	0,277	3,184	50,909	0,236
3,277	24,331	0,395	3,246	65,322	0,299	3,261	52,231	0,236
3,354	23,802	0,415	3,323	65,653	0,323	3,339	52,430	0,242
3,432	23,140	0,433	3,401	66,314	0,347	3,417	52,760	0,242
3,510	23,008	0,448	3,479	66,446	0,370	3,494	52,893	0,246
3,587	22,479	0,468	3,556	66,446	0,395	3,572	53,421	0,248
3,665	22,017	0,480	3,634	66,446	0,418	3,650	53,752	0,251
3,743	21,818	0,493	3,712	66,645	0,444	3,727	54,083	0,252
3,820	21,157	0,506	3,789	66,645	0,469	3,805	54,215	0,256
3,898	20,826	0,514	3,867	66,777	0,492	3,883	54,545	0,258

Resistência de Pico								
20kPa			40kPa			80kPa		
Pico			Pico			Pico		
Horizontal	tensao	vertical	Horizontal	tensao	vertical	Horizontal	tensao	vertical
3,976	20,694	0,525	3,945	66,645	0,517	3,960	54,744	0,260
4,053	20,165	0,534	4,022	66,777	0,542	4,038	55,074	0,263
4,131	20,033	0,544	4,100	66,446	0,566	4,115	55,405	0,264
4,209	19,835	0,547	4,178	66,314	0,588	4,193	55,736	0,267
4,286	19,504	0,555	4,255	65,785	0,614	4,271	56,066	0,268
4,364	19,174	0,559	4,333	65,653	0,638	4,348	56,397	0,271
4,442	19,041	0,567	4,411	65,322	0,658	4,426	56,727	0,275
4,519	18,182	0,571	4,488	64,992	0,680	4,504	56,860	0,275
4,597	18,512	0,577	4,566	64,661	0,699	4,581	57,190	0,275
4,675	18,512	0,579	4,643	64,132	0,720	4,659	57,521	0,279
4,752	18,182	0,580	4,721	63,802	0,742	4,737	57,521	0,281
4,830	18,380	0,584	4,799	63,339	0,760	4,814	57,851	0,284
4,907	18,050	0,584	4,876	63,008	0,781	4,892	58,182	0,285
4,985	18,050	0,588	4,954	62,678	0,804	4,970	58,512	0,288
5,063	18,050	0,588	5,032	62,347	0,822	5,047	58,711	0,288
5,140	17,851	0,592	5,109	61,818	0,840	5,125	59,041	0,288
5,218	17,719	0,592	5,187	61,488	0,860	5,203	59,174	0,290
5,296	17,521	0,594	5,265	61,025	0,875	5,280	59,174	0,292
5,373	17,388	0,592	5,342	60,496	0,894	5,358	59,504	0,292
5,451	16,860	0,596	5,420	60,165	0,912	5,436	59,835	0,292
5,529	16,860	0,595	5,498	59,702	0,925	5,513	60,033	0,293
5,606	17,388	0,596	5,575	59,041	0,940	5,591	60,033	0,296
5,684	17,190	0,596	5,653	58,182	0,954	5,668	60,364	0,296
5,762	17,058	0,596	5,731	57,388	0,970	5,746	60,364	0,294
5,839	17,190	0,596	5,808	56,860	0,986	5,824	60,826	0,296
5,917	17,190	0,595	5,886	56,198	1,001	5,901	60,826	0,297
5,995	17,058	0,592	5,964	54,083	1,011	5,979	61,025	0,298
6,072	16,727	0,592	6,041	55,405	1,023	6,057	61,157	0,297
6,150	16,529	0,592	6,119	55,074	1,040	6,134	61,355	0,297
6,228	17,058	0,592	6,196	54,413	1,051	6,212	61,355	0,298
6,305	16,860	0,592	6,274	53,752	1,060	6,290	61,355	0,298
6,383	16,860	0,592	6,352	52,893	1,072	6,367	61,488	0,298
6,460	16,860	0,591	6,429	51,901	1,084	6,445	61,818	0,296
6,538	17,058	0,591	6,507	51,107	1,094	6,523	61,818	0,299
6,616	17,058	0,592	6,585	50,248	1,105	6,600	61,818	0,296
6,693	16,860	0,590	6,662	49,455	1,112	6,678	62,347	0,296
6,771	16,860	0,588	6,740	48,793	1,119	6,756	62,017	0,296
6,849	16,727	0,588	6,818	47,802	1,122	6,833	62,347	0,293
6,926	16,860	0,588	6,895	47,273	1,130	6,911	62,347	0,293
7,004	16,727	0,584	6,973	46,281	1,136	6,989	62,347	0,294
7,082	16,860	0,584	7,051	45,818	1,138	7,066	62,347	0,292
7,159	16,727	0,584	7,128	45,289	1,148	7,144	62,479	0,290
7,237	16,727	0,581	7,206	44,826	1,154	7,221	62,479	0,292
7,315	16,860	0,582	7,284	43,835	1,159	7,299	62,810	0,292
7,392	16,860	0,580	7,361	43,306	1,162	7,377	62,810	0,288
7,470	16,529	0,580	7,439	42,512	1,163	7,454	62,810	0,288
7,548	16,727	0,575	7,517	41,983	1,167	7,532	62,810	0,288
7,625	16,727	0,575	7,594	41,322	1,171	7,610	63,140	0,288
7,703	16,860	0,575	7,672	41,190	1,173	7,687	63,008	0,288

Resistência Residual								
20kPa			40kPa			80kPa		
média			Média			Média		
Horizontal	Tensão	Vertical	Horizontal	Tensão	Vertical	Horizontal	Tensão	Vertical
0,000	-0,200	0,003	0,000	-0,101	0,001	0,000	0,000	0,308
0,078	1,032	0,017	-0,070	0,336	0,007	0,078	3,003	0,324
0,155	1,997	0,027	0,079	0,672	0,014	0,155	5,030	0,341
0,233	2,496	0,038	0,157	2,266	0,030	0,233	6,992	0,359
0,311	3,029	0,045	0,235	3,696	0,046	0,311	9,021	0,374
0,388	3,528	0,050	0,312	4,661	0,060	0,388	10,352	0,387
0,466	3,827	0,060	0,392	5,328	0,075	0,466	11,848	0,398
0,544	4,195	0,065	0,470	5,595	0,086	0,544	13,411	0,409
0,621	4,360	0,074	0,547	6,027	0,095	0,621	13,582	0,419
0,699	4,656	0,077	0,625	6,593	0,107	0,699	14,912	0,427
0,777	4,923	0,084	0,703	7,091	0,117	0,777	15,741	0,436
0,854	5,423	0,088	0,780	7,526	0,130	0,854	15,846	0,453
0,932	5,691	0,089	0,858	7,928	0,143	0,932	16,182	0,466
1,009	6,189	0,097	0,936	8,929	0,155	1,009	17,851	0,479
1,087	6,592	0,098	1,013	9,833	0,170	1,087	19,524	0,493
1,165	6,824	0,101	1,091	10,765	0,180	1,165	20,092	0,501
1,242	7,090	0,103	1,169	11,431	0,190	1,242	21,329	0,508
1,320	7,424	0,107	1,246	12,096	0,199	1,320	21,996	0,519
1,398	7,691	0,109	1,324	12,662	0,204	1,398	21,999	0,525
1,475	7,989	0,114	1,402	13,161	0,211	1,475	23,028	0,529
1,553	8,189	0,117	1,479	13,758	0,215	1,553	23,825	0,532
1,631	8,323	0,117	1,557	14,259	0,219	1,631	24,261	0,540
1,708	8,488	0,119	1,635	14,757	0,226	1,708	25,093	0,545
1,786	8,589	0,122	1,712	15,523	0,230	1,786	25,527	0,550
1,864	8,755	0,122	1,790	15,923	0,234	1,864	26,524	0,554
1,941	8,853	0,123	1,867	16,423	0,239	1,941	27,257	0,559
2,019	9,088	0,122	1,945	16,822	0,243	2,019	27,922	0,564
2,097	9,187	0,123	2,023	17,423	0,248	2,097	28,489	0,568
2,174	9,152	0,125	2,100	17,822	0,251	2,174	29,090	0,573
2,252	9,251	0,124	2,178	18,321	0,254	2,252	29,690	0,578
2,330	9,418	0,125	2,256	18,654	0,256	2,330	30,156	0,582
2,415	9,485	0,129	2,333	19,153	0,257	2,407	31,092	0,583
2,500	9,753	0,128	2,411	19,420	0,261	2,485	31,594	0,590
2,586	10,190	0,131	2,489	19,851	0,259	2,562	32,162	0,593
2,663	10,187	0,138	2,566	20,318	0,260	2,640	32,698	0,596
2,741	10,422	0,139	2,644	20,683	0,261	2,718	33,267	0,599
2,819	10,590	0,140	2,722	21,150	0,262	2,795	33,770	0,602
2,896	10,757	0,141	2,799	21,515	0,262	2,873	34,271	0,604
2,974	10,757	0,138	2,877	21,849	0,261	2,951	34,672	0,604
3,052	11,093	0,138	2,955	22,248	0,262	3,028	35,274	0,608
3,129	11,192	0,138	3,032	22,481	0,260	3,106	35,675	0,610
3,207	11,260	0,136	3,110	22,913	0,260	3,184	36,176	0,612
3,285	11,361	0,136	3,188	23,179	0,260	3,261	36,778	0,612
3,362	11,361	0,134	3,265	23,513	0,258	3,339	37,445	0,614
3,440	11,494	0,133	3,343	23,745	0,256	3,417	38,211	0,617
3,518	11,694	0,132	3,420	24,078	0,254	3,494	38,376	0,615
3,595	11,494	0,129	3,498	24,310	0,252	3,572	38,944	0,617
3,673	11,694	0,128	3,576	24,577	0,250	3,650	39,276	0,619
3,750	11,827	0,127	3,653	24,843	0,248	3,727	39,274	0,620
3,828	11,761	0,125	3,731	25,142	0,244	3,805	39,942	0,621
3,906	11,862	0,122	3,809	25,243	0,246	3,883	40,106	0,620

Resistência Residual								
20kPa			40kPa			80kPa		
média			Média			Média		
Horizontal	Tensão	Vertical	Horizontal	Tensão	Vertical	Horizontal	Tensão	Vertical
3,983	11,928	0,121	3,886	25,475	0,241	3,960	40,605	0,622
4,061	11,995	0,119	3,964	25,675	0,240	4,038	41,038	0,620
4,139	11,995	0,117	4,042	25,809	0,239	4,115	41,702	0,621
4,216	12,094	0,114	4,119	26,142	0,234	4,193	42,000	0,622
4,294	12,261	0,111	4,197	26,307	0,234	4,271	42,333	0,624
4,372	12,195	0,110	4,275	26,507	0,230	4,348	42,766	0,625
4,449	12,161	0,107	4,352	26,475	0,227	4,426	43,098	0,624
4,527	12,261	0,107	4,430	26,740	0,225	4,504	43,531	0,623
4,605	12,261	0,104	4,508	26,908	0,223	4,581	43,765	0,623
4,682	12,428	0,104	4,585	27,142	0,218	4,659	44,331	0,625
4,760	12,261	0,103	4,663	27,240	0,218	4,737	44,696	0,623
4,838	12,494	0,099	4,741	27,307	0,221	4,814	44,930	0,623
4,915	12,428	0,099	4,818	27,507	0,224	4,892	45,262	0,622
4,993	12,595	0,097	4,896	27,244	0,227	4,970	45,528	0,622
5,071	12,529	0,093	4,973	27,841	0,231	5,047	45,928	0,621
5,148	12,595	0,089	5,051	27,841	0,232	5,125	46,262	0,617
5,226	12,529	0,088	5,129	27,974	0,234	5,203	46,494	0,619
5,303	12,595	0,086	5,206	28,075	0,240	5,280	47,027	0,617
5,381	12,662	0,085	5,284	28,241	0,241	5,358	47,259	0,615
5,459	12,595	0,082	5,362	28,241	0,244	5,436	47,592	0,613
5,536	12,862	0,081	5,439	28,575	0,248	5,513	48,090	0,611
5,614	12,662	0,080	5,517	28,676	0,251	5,591	48,358	0,609
5,692	12,763	0,080	5,595	28,676	0,252	5,668	48,755	0,609
5,769	12,763	0,075	5,672	28,908	0,254	5,746	48,987	0,610
5,847	12,761	0,076	5,750	29,009	0,258	5,824	49,421	0,608
5,925	12,862	0,074	5,828	29,009	0,260	5,901	49,753	0,606
6,002	12,928	0,075	5,905	29,174	0,264	5,979	50,152	0,604
6,080	12,862	0,073	5,983	29,308	0,265	6,057	50,352	0,601
6,158	12,928	0,069	6,061	29,408	0,269	6,134	50,685	0,599
6,235	12,928	0,068	6,138	29,575	0,271	6,212	50,918	0,596
6,313	13,095	0,068	6,216	29,508	0,274	6,290	51,184	0,595
6,391	12,995	0,068	6,294	29,841	0,277	6,367	51,417	0,592
6,468	13,095	0,066	6,371	29,841	0,281	6,445	51,750	0,590
6,546	13,095	0,066	6,449	30,009	0,283	6,523	52,016	0,587
6,624	13,093	0,065	6,526	30,243	0,285	6,600	52,315	0,587
6,701	13,095	0,060	6,604	30,177	0,290	6,678	52,747	0,583
6,779	13,161	0,058	6,682	30,243	0,291	6,756	52,914	0,580
6,856	13,260	0,058	6,759	30,410	0,294	6,833	53,312	0,580
6,934	13,095	0,057	6,837	30,577	0,296	6,911	53,578	0,580
7,012	13,260	0,055	6,915	30,644	0,300	6,989	53,912	0,575
7,089	13,161	0,053	6,992	30,844	0,301	7,066	53,910	0,575
7,167	13,361	0,053	7,070	30,911	0,305	7,144	54,077	0,573
7,245	13,428	0,052	7,148	31,078	0,306	7,221	54,410	0,568
7,322	13,428	0,053	7,225	31,012	0,309	7,299	54,643	0,569
7,400	13,494	0,052	7,303	31,244	0,312	7,377	54,909	0,567
7,478	13,526	0,049	7,381	31,412	0,314	7,454	55,075	0,564
7,555	13,427	0,049	7,458	31,412	0,317	7,532	55,242	0,561
7,633	13,526	0,050	7,536	31,579	0,319	7,610	55,475	0,559
7,711	13,494	0,046	7,614	31,647	0,321	7,687	55,675	0,557
7,788	13,427	0,048	7,691	31,847	0,323	7,765	55,741	0,552
7,866	13,494	0,046	7,769	31,914	0,324	7,843	55,973	0,551