M 2014

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

TRATAMENTO DE MACIÇOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

ANÁLISE DE UM CASO DE ESTUDO

MARCOS ALEXANDRE DA SILVA TEIXEIRA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ÁREA CIENTÍFICA: ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

TRATAMENTO DE MACIÇOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO

Análise de um Caso de Estudo

MARCOS ALEXANDRE DA SILVA TEIXEIRA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Engenheiro Celso Manuel Relva Martins de Lima

---

Coorientador: Engenheira Magda Queralt Valente

FEVEREIRO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ 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

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 - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, Irmãs e Irmão,

É tentando o impossível que se realiza o possível.

Henry Barbusse

AGRADECIMENTOS

Terminada mais uma fase da minha vida académica, cabe-me agradecer aos envolvidos neste processo.

Primeiramente, queria agradecer ao meu orientador, Professor Celso Lima, pela disponibilidade, pelas sugestões dadas, e pela atenção dada ao autor e ao respetivo trabalho.

Queria também agradecer à EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A., e especialmente à engenheira Magda Valente, pelo tempo disponibilizado e pela documentação fornecida, sem a qual este trabalho não podia ter sido realizado.

Agradeço aos meus amigos, que fui conhecendo nas várias fases da vida, pelo companheirismo, pelos momentos de diversão e descontração, pelos conselhos, mas sobretudo pela amizade.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família, pois é graças a eles que eu me tornei na pessoa que sou hoje. Aos meus pais, pelo amor, carinho e compreensão que depositaram em mim ao longo da vida. Às minhas irmãs e irmão, pela companhia e pelos conselhos dados, sobretudo nesta fase.

RESUMO

O presente trabalho incide na temática do tratamento de maciços de fundação de barragens de betão. Nestes casos, o procedimento correntemente usado consiste no tratamento da fundação com injeções de calda de cimento. Esta técnica visa melhorar significativamente as propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço rochoso que suportará a barragem.

Em projetos deste caráter o primeiro procedimento a tomar compreende a avaliação das condições físicas e mecânicas do maciço rochoso que constituirá a fundação de uma barragem de betão. Tal avaliação permite concluir sobre a real necessidade de proceder a um tratamento do maciço. Assim, são referidos de forma sucinta os principais aspetos que intervêm na caracterização de um meio rochoso.

O tratamento com calda de cimento engloba uma série de processos específicos que são também mencionados para compreender melhor o efeito provocado por esta técnica no maciço a tratar.

O principal objetivo da presente dissertação foi analisar o tratamento efetuado na fundação de um caso concreto, mais propriamente, a Nova Barragem do Alto Ceira. Com base nos registos efetuados durante os trabalhos, o autor da presente dissertação realizou um estudo respeitante à quantidade de calda usada tanto no tratamento de consolidação como no tratamento de impermeabilização, e à alteração das características hidráulicas e mecânicas do maciço. O projeto de tratamento da fundação da Nova Barragem do Alto Ceira incluiu ainda a definição de uma rede de drenagem e a colocação de um sistema de piezómetros, ambos sob a estrutura, por forma a controlar a percolação e as subpressões durante o período de vida útil da mesma, pois são estas duas componentes que definem o comportamento hidráulico do terreno de fundação.

Depois de feita a análise à evolução das condições de permeabilidade com o decorrer dos trabalhos, e juntando-a com os resultados dos ensaios sísmicos realizados antes e após o tratamento, serão tiradas ilações relativamente à eficácia do tratamento realizado.

PALAVRAS-CHAVE: fundações de barragens de betão, injeções com calda de cimento, tratamento de consolidação e de impermeabilização, permeabilidade, rede de drenagem e piezómetros.

ABSTRACT

The present work is related to the treatment of concrete dam's foundation sites. In these cases, the currently used procedure involves the treatment of the site with the injection of grout. This technic's goal is to enhance the mechanical and hydraulical properties of the rock mass under the dam.

When the treatment of a foundation site is carried out, the first part of the process is the evaluation of both physical and mechanical conditions of the rock mass that will support the foundation of a concrete dam. Such evaluation allows the conclusion about the real necessity of the treatment. Thus, in this work are referred the main aspects that influence the characterization of a rock mass.

The treatment with grout involves a group of specific processes that are also mentioned in order to better understand the effect of this technique in the soil/rock mass.

However, the main purpose of this work was to analyze the treatment done in the foundations of a specific case, namely the New Alto Ceira Dam. Using the injection records done during the treatment, the author of the present dissertation made a study related to the quantity of grout used in the consolidation and impermeabilization injections, and about the variation of the hydraulical and mechanical characteristics of the foundation site. The treatment project of the foundation site included also the design of a drainage system and a piezometer network , both set under the structure, in order to control the seepage and the uplift pressures during the life cycle of the dam, because these two components define the hydraulical behavior of the foundation site.

After the conclusion of the analysis related to the evolution of the permeability conditions along the treatment period, and adding the results of the seismic tests done previously and after the injections, conclusions will me made related to the efficiency of the treatment done.

KEYWORDS: concrete dams foundations, injection of grout, consolidation and impermeabilization injections, permeability, drainage system and piezometers.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL 1

1.2. PROPRIEDADES DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO AFETADAS PELO TRATAMENTO 1

1.2.1. DEFORMABILIDADE 1

1.2.2. PERMEABILIDADE 2

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 3

2. COMPORTAMENTO DOS MACIÇOS ROCHOSOS E SEU ESTUDO 5

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL 5

2.2. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS – DESCONTINUIDADES 5

2.2.1. TIPOS DE DESCONTINUIDADES 5

2.2.1.1. Falhas 5

2.2.1.2. Diáclases 6

2.2.1.3. Superfícies de estratificação 6

2.2.1.4. Xistosidade 6

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES 7

2.2.2.1. Abertura 7

2.2.2.2. Preenchimento 8

2.2.2.3. Orientação 9

2.2.2.4. Persistência 11

2.2.2.5. Espaçamento 11

2.2.2.6. Rugosidade 12

2.3. PROPRIEDADES DOS MACIÇOS ROCHOSOS 12

2.3.1. PERMEABILIDADE 13

2.3.2. PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SÍSMICAS 14

2.3.3. DURABILIDADE 14

2.4. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA E ENSAIOS 14
2.4.1. PROSPEÇÃO MECÂNICA – SONDAGENS 15
2.4.2. ENSAIOS REALIZADOS NOS FUROS DE SONDAGEM 17
2.4.2.1. Ensaio de permeabilidade do tipo “Lugeon” 17
2.4.2.2. Ensaios de deformabilidade 20
2.4.3. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA – MÉTODOS SÍSMICOS 21
2.4.3.1. Enquadramento Geral 21
2.4.3.2. Método sísmico direto 23
2.5. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 25
2.5.1. ENQUADRAMENTO GERAL 25
2.5.2. CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA 25
2.5.2.1. Grau de alteração 25
2.5.2.2. Grau de fraturação 26
2.5.3. CLASSIFICAÇÃO PARA FINS DE ENGENHARIA 26
2.5.4. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA 27
2.5.4.1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta 27
2.5.4.2. RQD 28
2.5.4.3. Espaçamento das descontinuidades 29
2.5.4.4. Condição das descontinuidades 29
2.5.4.5. Influência da água 30

3. ASPETOS INERENTES À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO 33
3.1. ENQUADRAMENTO GERAL 33
3.2. EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO 34
3.2.1. MISTURADORAS 34
3.2.2. AGITADORES 34
3.2.3. BOMBAS 35
3.2.4. CIRCUITOS DE INJEÇÃO 36
3.2.5. TUBOS DE SUSTENTAÇÃO 37
3.2.6. VÁLVULAS 37
3.2.7. MANÓMETROS 37
3.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DA CALDA DE CIMENTO 38

3.4. CALDA ... 38
3.4.1. TIPOS DE CALDA ... 38
3.4.2. TRAÇO ÁGUA-CIMENTO ... 39
3.4.3. VISCOSIDADE E TIXOTROPIA ... 40
3.4.4. EXSUDAÇÃO DA CALDA ... 40
3.4.5. GANHO DE PRESA ... 41
3.4.6. DURABILIDADE ... 41
3.4.7. CONTROLO DE QUALIDADE DA CALDA ... 41
3.5. FURAÇÃO ... 42
3.5.1. EXECUÇÃO ... 42
3.5.2. DIÂMETRO, COMPRIMENTO E ORIENTAÇÃO DOS FUROS ... 42
3.5.3. TESTES COM ÁGUA ... 42
3.6. INJEÇÃO ... 44
3.6.1. FASEAMENTO DA INJEÇÃO DE CALDA ... 44
3.6.2. "GROUT CAPS" ... 44
3.6.3. "CLOSURE GROUTING" ... 45
3.6.4. PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES ... 45
3.6.5. PRESSÕES DE INJEÇÃO ... 46
3.6.6. FUGAS E CONEXÕES ... 48
3.6.7. CONTROLO DO PROCESSO DE INJEÇÃO ... 49

4. TRATAMENTO DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO DA NOVA BARRAGEM DO ALTO CEIRA ... 51
4.1. ENQUADRAMENTO GERAL ... 51
4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA ... 53
4.2.1. LITOLOGIA ... 55
4.2.1.1. Xisto ... 55
4.2.1.2. Xisto negro ... 55
4.2.1.3. Metagrauvaque ... 55
4.2.1.4. Grauvaques ... 55
4.2.2. ESTRUTURAS GEOLÓGICAS ... 55
4.2.2.1. Xistosidade ... 55
4.2.2.2. Diáclases ... 56

4.2.2.3. Filões e Vénulas de Quartzo 56
4.2.2.4. Falhas 56
4.3. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA E CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA 58
4.3.1. ENQUADRAMENTO GERAL 58
4.3.2. ANÁLISE DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS 60
4.3.2.1. Grau de Fraturação 60
4.3.2.2. Grau de Alteração 60
4.3.2.3. RQD 61
4.3.2.4. Percentagem de Recuperação 62
4.3.3. ENSAIOS DE ABSORÇÃO DO TIPO "LUGEON" 62
4.3.4. ENSAIOS SÍSMICOS 65
4.4. TRATAMENTO DE CONSOLIDAÇÃO 65
4.4.1. ENQUADRAMENTO GERAL 65
4.4.2. FURAÇÃO 67
4.4.3. LAVAGEM E LIMPEZA DOS FUROS 69
4.4.4. INJEÇÃO 70
4.4.5. RESULTADOS OBTIDOS 71
4.5. TRATAMENTO DE IMPERMEABILIZAÇÃO 75
4.5.1. ENQUADRAMENTO GERAL 75
4.5.2. LOCALIZAÇÃO E GEOMETRIA DOS FUROS 75
4.5.3. FURAÇÃO E INJEÇÃO 79
4.5.4. RESULTADOS OBTIDOS 79
4.5.4.1. Furos primários 79
4.5.4.2. Furos secundários 82
4.5.4.3. Furos terciários 84
4.5.4.4. Furos quaternários 86
4.5.4.5. Análise do tratamento efetuado 87
4.6. ÓRGÃOS DE DRENAGEM E PIEZOMETRIA 89

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 95

BIBLIOGRAFIA 99

ANEXOS 103

ANEXO A1 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Remoção de fragmentos decorrentes do uso de explosivos na escavação de maciços rochosos [1] 2

Fig. 1.2 - Esquema alusivo ao comportamento de uma rede de percolação [2] 3

Fig. 2.1 - Falha num maciço rochoso [6] 6

Fig. 2.2 - Estratificação decorrente da deposição de sedimentos [7] 6

Fig. 2.3 - Xistosidade [8] 7

Fig. 2.4 - Descontinuidade fechada (esquerda); descontinuidade com abertura (direita) (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 7

Fig. 2.5 - Descontinuidade com preenchimento no seu interior (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 9

Fig. 2.6 - Representação da descontinuidade N60E, 30 SE: vista isométrica (imagem da esquerda); vista em planta (imagem da direita) [5] 9

Fig. 2.7 - Definição de uma projeção hemisférica (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 10

Fig. 2.8 - Identificação das famílias de descontinuidades: representação dos vários pólos (esquerda); representação das famílias identificadas através de curvas de isodensidade (direita). (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 10

Fig. 2.9 - Perfis de rugosidade e respetivos valores de JRC [5] 12

Fig. 2.10 - Valores do coeficiente de permeabilidade, k, consoante as características do maciço rochoso (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 13

Fig. 2.11 - Equipamento de execução de furos de sondagem [9] 15

Fig. 2.12 - Exemplos de trépanos [10] 16

Fig. 2.13 - Ferramentas de furação destrutiva [10] 16

Fig. 2.14 - Coroas (com “bits” acoplados) usadas nas sondagens rotativas com recuperação de amostra [11] 17

Fig. 2.15 - Amostrador simples (à esquerda) e duplo (à direita) (Adaptado de [12]) 17

Fig. 2.16 - Colocação de obturadores para a realização de ensaios "Lugeon": obturador simples (esquerda), obturador duplo (centro), obturador quádruplo (direita) [13] 18

Fig. 2.17 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de escoamento laminar (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 19

Fig. 2.18 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de escoamento turbulento (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 19

Fig. 2.19 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de desobstrução (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 19

Fig. 2.20 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de colmatação (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 20

Fig. 2.21 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de fraturação hidráulica (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 20

Fig. 2.22 - Instalação num furo de sondagem do dilatómetro BHD [5] 21

Fig. 2.23 - Exemplos de formações geológicas e correspondentes valores das velocidades de propagação das ondas "P" e "S" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 23

Fig. 2.24 - Esquema representativo da realização de um ensaio "cross-hole" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 24

Fig. 2.25 - Resultados de uma tomografia sísmica: leques sísmicos (esquerda); representação das isolinhas de velocidades das ondas "P" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5] 24

Fig. 3.1 - Execução do furo com um ângulo que permita uma melhor penetração da calda nas fissuras (Adaptado de Houlsby) [4] 33

Fig. 3.2 - Misturadora [14] 34

Fig. 3.3 - Agitador [15] 35

Fig. 3.4 - Formato das primeiras bombas usadas na injeção de calda [16] 35

Fig. 3.5 - Tipo de bomba atualmente em uso [17] 36

Fig. 3.6 - Injeção de um talude (Adaptado de Houlsby) [4] 36

Fig. 3.7 - Tubos de Sustentação [18] 37

Fig. 3.8 - Válvulas e Medidor de Pressão [19] 38

Fig. 3.9 - Esquema representativo da metodologia inerente ao "Jet-Grouting" (Adaptado de [21]) 39

Fig. 3.10 - Procedimentos para remoção de calda afetada por exsudação e substituição por calda nova [4] 40

Fig. 3.11 - Determinação da densidade da calda [22] 41

Fig. 3.12 - Método do cone [23] 42

Fig. 3.13 - Fluxograma que define a necessidade de tratamento de maciços de fundação com base no “valor” da água percolada [4] 43

Fig. 3.14 - Execução de um "grout cap" [26] 45

Fig. 3.15 - Execução do "closure grouting": furos “primary” correspondem aos furos primários; furos “sec” correspondem aos furos secundários e os “tert” correspondem aos terciários. [4] 45

Fig. 3.16 - Bloqueamento de fendas estreitas: aglomeração de partículas de maior dimensão (cima); junção de partículas de menor dimensão formando flocos de cimento (baixo) (Adaptado de Houlsby) [4] 46

Fig. 3.17 - Gráfico onde constam as relações pressão/profundidade em função do tipo de maciço [4] 47

Fig. 3.18 - Tratamento de fugas [27] 48

Fig. 4.1 - Enquadramento geográfico do local de construção da NBAC (Adaptado de Geonorte) [29] 51

Fig. 4.2 - Alçado da estrutura da barragem (vista de montante) (Adaptado de EDP) [30] 52

Fig. 4.3 - Construção da Nova Barragem do Alto Ceira [31] 52

Fig. 4.4 - Planta com a caracterização geológico-geotécnica do maciço de fundação da NBAC [28] . 54

Fig. 4.5 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona da margem esquerda (Adaptado de Geonorte) [28] 57

Fig. 4.6 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona da margem direita (Adaptado de Geonorte) [28] 57

Fig. 4.7 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona do fundo do vale (Adaptado de Geonorte) [28] 58

Fig. 4.8 - Localização dos furos de ensaio (Adaptado de EDP) [30] 59

Fig. 4.9 - Diagrama com a representação da variação das velocidades de propagação das ondas de compressão e com o pormenor da localização dos principais acidentes geológicos ao longo do maciço de fundação antes do início do tratamento [37] 65

Fig. 4.10 - Disposição em leque adotada para os furos de consolidação (Adaptado de EDP) [38] 66

Fig. 4.11 - Planta com o pormenor da localização dos perfis de consolidação (Adaptado de EDP) [38] 67

Fig. 4.12 - Alçado com a localização dos perfis de consolidação (Adaptado de EDP) [38] 67

Fig. 4.13 - Furação efetuada no tratamento de consolidação 68

Fig. 4.14 - Procedimentos associados à lavagem dos furos na NBAC [42] 69

Fig. 4.15 - Quantidade de cimento injetado na zona compreendida por cada bloco durante o tratamento de consolidação 72

Fig. 4.16 - Razão entre cimento injetado e furação efetuada para o tratamento de consolidação 73

Fig. 4.17 - Valores das velocidades de propagação das ondas de compressão após o fim do tratamento [44] 74

Fig. 4.18 - Gradiente comparativo da evolução dos valores das velocidades de propagação das ondas de compressão antes e após o tratamento [44] 74

Fig. 4.19 - Planta com pormenor da disposição dos furos primários da cortina de impermeabilização (Adaptado de EDP) [45] 76

Fig. 4.20 - Alçado com a localização dos furos primários de impermeabilização (Adaptado de EDP) [45] 76

Fig. 4.21 - Representação das zonas abrangidas pelos furos primários da cortina que não foram consolidadas (Adaptado de EDP) [45] 77

Fig. 4.22 - Orientação dos furos de impermeabilização por forma a orientar a cortina para montante (Adaptado de EDP) [45] 78

Fig. 4.23 - Absorção média de água nos furos primários da cortina de estanqueidade 80

Fig. 4.24 - Absorção de cimento nos furos primários da cortina de estanqueidade 81

Fig. 4.25 - Absorção média de água nos furos secundários da cortina de estanqueidade 82

Fig. 4.26 - Absorção de cimento nos furos secundários da cortina de estanqueidade 83

Fig. 4.27 - Absorção média de água nos furos terciários da cortina de estanqueidade 84

Fig. 4.28 - Absorção de cimento nos furos terciários da cortina de estanqueidade 85

Fig. 4.29 - Absorção média de água nos furos quaternários da cortina de estanqueidade..... 86

Fig. 4.30 - Absorção de cimento nos furos quaternários da cortina de estanqueidade..... 87

Fig. 4.31 - Evolução da permeabilidade do maciço ao longo do tratamento de impermeabilização 88

Fig. 4.32 - Evolução das absorções de cimento ao longo do tratamento de impermeabilização 88

Fig. 4.33 - Esquema exemplificativo das várias pressões a atuar no corpo da barragem decorrentes da ação da água, incluindo as subpressões (“uplift”) [49] 89

Fig. 4.34 - Alçado com o pormenor da localização dos drenos e dos piezómetros (Adaptado de EDP) [50] 91

Fig. 4.35 - Corte com o pormenor da localização da cortina de impermeabilização, dos furos de drenagem e dos piezómetros (Adaptado de EDP) [50]..... 91

Fig. 4.36 - Resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de drenagem 92

Fig. 4.37 - Comparação da permeabilidade do maciço a jusante da cortina de impermeabilização entre duas fases: aquando da furação primária do tratamento de impermeabilização e no âmbito da abertura dos furos de drenagem 93

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Caracterização das descontinuidades de acordo com a dimensão da respetiva abertura 8

Quadro 2.2 - Metodologia usada na caracterização da persistência de descontinuidades num maciço 11

Quadro 2.3 - Classificação das descontinuidades com base no seu espaçamento 11

Quadro 2.4 - Velocidades de propagação das ondas sísmicas "P" e "S" conforme o tipo de material 23

Quadro 2.5 - Graus de alteração considerados na avaliação de maciços rochosos 26

Quadro 2.6 - Graus de fraturação considerados na avaliação de maciços rochosos 26

Quadro 2.7 - Classificação de maciços rochosos com base na velocidade de propagação das ondas longitudinais ou através dos valores dos módulos de deformabilidade 27

Quadro 2.8 - Pesos atribuídos para a resistência à compresão uniaxial da rocha intacta 28

Quadro 2.9 – Pesos atribuídos às classes do parâmetro RQD 28

Quadro 2.10 - Pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades 29

Quadro 2.11 - Pesos atribuídos à condição das descontinuidades 30

Quadro 2.12 - Pesos atribuídos à presença da água 30

Quadro 2.13 - Classificação de um maciço rochoso com base no índice RMR 31

Quadro 4.1 - Orientação e caracterização das principais famílias de diáclases identificadas 56

Quadro 4.2 - Grau de fraturação do maciço com base nas amostras recolhidas 60

Quadro 4.3 - Grau de alteração do maciço com base nas amostras recolhidas 61

Quadro 4.4 - Valores do RQD do maciço com base nas amostras recolhidas 61

Quadro 4.5 - Percentagem de recuperação das amostras recolhidas 62

Quadro 4.6 - Patamares de pressão adotados para os ensaios "Lugeon" realizados nos furos de ensaio 63

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de ensaio 63

Quadro 4.8 - Regimes de escoamento registados nos troços dos furos de ensaio 64

Quadro 4.9 - Lista de caldas empregues no tratamento do maciço de fundação da NBAC 70

Quadro 4.10 - Total de cimento injetado no tratamento de consolidação 72

Quadro 4.11 - Furação e absorções de água e cimento nos furos primários do tratamento de impermeabilização 80

Quadro 4.12 - Furação e absorções de água e cimento nos furos secundários do tratamento de impermeabilização 82

Quadro 4.13 - Furação e absorções de água e cimento nos furos terciários do tratamento de impermeabilização 84

Quadro 4.14 - Furação e absorções de água e cimento nos furos quaternários do tratamento de impermeabilização 86

Quadro 4.15 - Aplicação do critério de Hoffman na determinação do afastamento entre drenos 90

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BGD – "Basic Geotechnical Description"

BHD – "Bore-Hole Dilatometer"

EDP – Energias de Portugal

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

EN – Norma Europeia

FE – Furo de Ensaio

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fig. – Figura

FV – Fundo do vale

GPa – Giga Pascal

GSI – "Geological Strength Index"

JRC – "Joint Roughness Coefficient"

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MD – Margem direita

ME – Margem esquerda

MPa – Mega Pascal

NBAC – Nova Barragem do Alto Ceira

NPA – Nível de Pleno Armazenamento (m)

NMC – Nível Máximo de Cheia (m)

PCD – Perfil de consolidação direito

PCE – Perfil de consolidação esquerdo

PID – Perfil de impermeabilização direito

PIE – Perfil de impermeabilização esquerdo

PLT – "Point Load Test"

psi – "Pounds per square inch"

RMR – "Rock Mass Rating"

RQD – "Rock Quality Designation"

UL – Unidades "Lugeon"

VT – Vazão Total

C_i – Calda "i"

C_j – Calda "j"

cm – Centímetro

cm^2/g – Centímetro quadrado por grama

E – Módulo de elasticidade (MPa)

E_{dil} – Módulo dilatométrico (MPa)

ft – "Feet"

hm^3 – Hectómetro cúbico

i – Gradiente hidráulico (cm/cm)

k – Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

kg – Quilograma

kg/m^3 – Quilograma por metro cúbico

km – Quilómetro

l – Litros

m – Metros

min – Minutos

m/s – Metro por segundo

mm – Milímetros

Ondas "P" – Ondas Primárias

p – Pressão (MPa)

$P_{máx}$ – Pressão máxima (MPa)

S – Furo de sondagem

V_P – Velocidade das ondas "P" (m/s)

v – Velocidade de percolação (cm/s)

v – Coeficiente de poisson

Δp – Variação entre a pressão mínima e máxima aplicada nas paredes do furo de sondagem (MPa)

φ – Diâmetro do furo de sondagem (m)

δ – Deformação das paredes do furo de sondagem (m)

δ – Massa específica (kg/m^3)

μm – Micrometro

° – Grau (ângulo)

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

As fundações são parte integrante de qualquer estrutura de engenharia civil, funcionando como um elo entre o maciço rochoso e a restante estrutura situada acima daquele. O bom desempenho das fundações tem um papel importantíssimo no funcionamento da estrutura durante a sua vida útil. Assim, quando as condições naturais do maciço que irá albergar uma fundação não satisfazem os requisitos da estrutura, é necessário definir uma estratégia que vise melhorar as condições do mesmo.

O propósito desta dissertação é apresentar um dos métodos de tratamento mais utilizados – injeções com calda de cimento – e perceber a influência da aplicação desta técnica numa barragem recentemente construída, a Nova Barragem do Alto Ceira (NBAC).

1.2. PROPRIEDADES DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO AFETADAS PELO TRATAMENTO

A injeção de calda de cimento em meios rochosos que irão suportar uma barragem tem influência em várias características, sobretudo mecânicas e hidráulicas. O melhoramento destas propriedades permite viabilizar a realização de obras deste caráter.

Assim, a aplicação do tratamento com calda de cimento visa essencialmente o melhoramento de duas características do maciço – permeabilidade e deformabilidade – que têm grande influência no comportamento do mesmo e da barragem por este suportada durante a vida útil da estrutura.

Importa referir que as injeções com calda em maciços de fundação de barragens de betão são feitas normalmente na parte final da construção da estrutura, isto é, depois de serem verificadas as condições mínimas necessárias para a implantação da estrutura, em particular no que respeita à capacidade de carga da fundação. Não é o tratamento com injeção de calda que possibilita a viabilidade estrutural da construção de uma barragem num dado local. O próprio maciço deverá ter uma capacidade de carga que seja capaz de albergar a estrutura, sendo que esta terá de adequar as suas características (tipo de solução, material) ao maciço que a irá sustentar.

1.2.1. DEFORMABILIDADE

Em todas as estruturas, um dos aspetos a considerar no dimensionamento das mesmas é a grandeza dos assentamentos que estas podem suportar, sem que isso implique danos estruturais relevantes. A conceção de uma barragem não foge à regra, sendo portanto a deformabilidade do maciço de fundação um aspeto a ter em conta.

A deformabilidade de maciços rochosos depende de vários fatores, sendo de salientar:

- Fraca qualidade do próprio material que constitui o maciço;
- Presença de descontinuidades no interior do maciço, e influência das suas características, em particular a abertura e o enchimento;
- Alteração das condições iniciais do maciço devido a efeitos de meteorização, ou por fragmentação decorrente do uso de explosivos na escavação (Fig. 1.1).

Fig. 1.1 - Remoção de fragmentos decorrentes do uso de explosivos na escavação de maciços rochosos [1]

A injeção de calda num maciço com elevada deformabilidade, sobretudo quando esta é resultado da presença de descontinuidades, permitirá o preenchimento destas e a consequente consolidação do maciço. A própria injeção de um material (cimento) com boas propriedades mecânicas, ao preencher os espaços entre os blocos da matriz rochosa, diminuirá o risco de ocorrência de assentamentos.

1.2.2. PERMEABILIDADE

As barragens serão, porventura, as estruturas que mais interagem com a presença de água. Pode-se até dizer, de um modo simbólico, que existe uma relação de amor-ódio entre as barragens e a água. Se por um lado a água pode ser armazenada nas albufeiras, e assim possibilitar o abastecimento de populações vizinhas e a produção de energia elétrica, há também que tomar em consideração a possibilidade de a água conduzir à ruína da estrutura, e a principal razão para tal catástrofe acontecer prende-se com os efeitos decorrentes da percolação. Este processo consiste no fluxo de água de montante para jusante da barragem através do maciço de fundação da mesma, e resulta da existência de diferentes cargas hidráulicas a montante e a jusante da estrutura. Encontra-se exemplificada na Fig. 1.2 uma rede de percolação, onde consta a representação das linhas de fluxo e das linhas equipotenciais. No esquema representado está também incluída uma cortina de impermeabilização e o efeito que esta provoca na rede de percolação do maciço. O estudo do efeito destas cortinas no melhoramento do comportamento hidráulico de maciços de fundação de barragens de betão será um dos objetivos da presente dissertação.

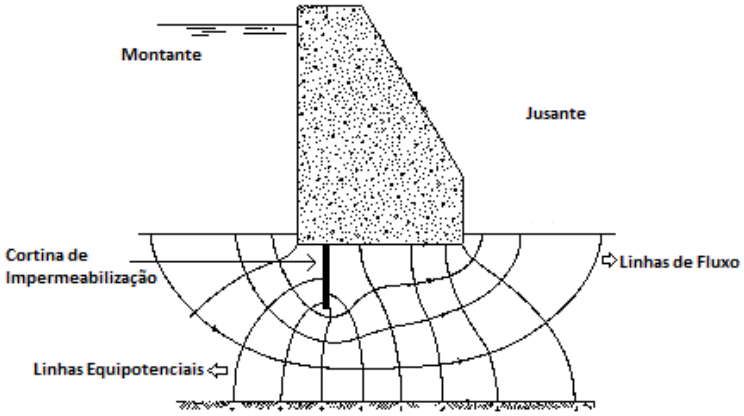

Fig. 1.2 - Esquema alusivo ao comportamento de uma rede de percolação [2]

As linhas de fluxo dizem respeito à trajetória assumida pelas partículas de água; as linhas equipotenciais, como o próprio nome indica, são linhas de igual carga hidráulica [3]. A ocorrência de percolação em maciços de fundação de barragens, para além de constituir um meio de fuga para a água presente na albufeira, promove o aparecimento de subpressões, sobretudo no contacto entre a base da barragem e o maciço, podendo provocar a instabilidade da estrutura ou das encostas a jusante desta. É neste âmbito que surge a necessidade de controlar as condições hidráulicas, pois o aparecimento da percolação e suas consequências dependem essencialmente da permeabilidade do maciço. Esta, por sua vez, está relacionada com a presença de descontinuidades (e suas características) no meio rochoso. Importa salientar que na elaboração desta tese, optou-se por recorrer ao termo "permeabilidade" em detrimento da designação "condutividade hidráulica" para facilidade de compreensão, embora esta última designação seja mais adequada no que a maciços rochosos diz respeito.

Deste modo, o tratamento com calda de cimento surge da necessidade de minorar os efeitos da percolação. Para tal, recorre-se normalmente à execução de uma cortina de impermeabilização (algo similar ao representado na Fig. 1.2) que force a redução da carga hidráulica na zona do maciço localizada junto à cortina. Tal redução conduz à diminuição do caudal percolado e das subpressões situadas na zona do maciço a jusante da cortina.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho compreende cinco capítulos, cada um com um propósito específico na realização desta dissertação. Assim sendo, o presente capítulo pretende contextualizar a temática da dissertação, apresentando os aspetos mais importantes sobre os quais a mesma irá assentar.

No segundo capítulo abordam-se as principais condicionantes geológicas que interferem no desempenho mecânico e hidráulico de um maciço rochoso, nomeadamente a presença de descontinuidades e respetivas características. Neste capítulo mencionam-se também algumas das propriedades inerentes a um maciço rochoso que interferem no comportamento deste. Serão ainda referidos alguns parâmetros de classificação de maciços rochosos, parâmetros estes determinados recorrendo a resultados provenientes da execução de campanhas de prospeção e de ensaios "in situ".

O capítulo terceiro contém a descrição dos principais aspetos e procedimentos inerentes ao tratamento com injeções de calda de cimento. Com base em Houlsby [4], foi feita uma descrição de algumas das

fases intrínsecas a esta técnica de tratamento, englobando os equipamentos necessários, o modo de execução dos furos a injetar, os vários tipos de misturas de calda, entre outros aspetos.

No quarto capítulo é apresentado o caso de estudo, onde se fez a análise do tratamento do maciço de fundação da Nova Barragem do Alto Ceira (NBAC). Este incluiu o tratamento de consolidação, a materialização de uma cortina de impermeabilização, a realização de uma rede de drenagem e de piezómetros. Foi dada especial atenção àqueles dois primeiros tipos de trabalho nos quais se verificou a injeção de calda de cimento no maciço. A drenagem e a piezometria são parte integrante do plano de observação do terreno de fundação da barragem. Foram também analisados os resultados de duas campanhas sísmicas e de ensaios de permeabilidade, com vista ao controlo da qualidade do tratamento.

Para finalizar, o capítulo quinto apresenta as considerações finais decorrentes da realização da presente dissertação. Este capítulo compreende um breve resumo sobre os assuntos que tiveram maior relevância nas análises efetuadas, e encerra com as principais conclusões que advieram do tratamento efetuado na NBAC.

2

COMPORTAMENTO DOS MACIÇOS ROCHOSOS E SEU ESTUDO

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Os maciços de fundação desempenham um papel fundamental no comportamento estrutural de qualquer obra de Engenharia Civil. Existe uma relação muito próxima entre a fundação e a estrutura por cima desta, daí que surja a necessidade de conhecer bem as condições que um maciço pode oferecer quando este é solicitado pela estrutura.

Neste capítulo serão abordados os principais aspetos que condicionam o desempenho de um maciço rochoso, bem como alguns dos meios disponíveis para estudar esses mesmos aspetos. A maioria da informação exposta neste capítulo resultou do estudo dos apontamentos da disciplina de Geologia de Engenharia do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da FEUP [5].

2.2. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS – DESCONTINUIDADES

O comportamento dos maciços rochosos é fortemente condicionado pelas descontinuidades e suas características. Uma descontinuidade, como o próprio nome indica, engloba qualquer entidade geológica que perturbe a continuidade dum maciço. Deste modo, é importante perceber de que forma as descontinuidades afetam o desempenho dos maciços.

2.2.1. TIPOS DE DESCONTINUIDADES

Estes acidentes geológicos podem assumir vários tipos, sendo os principais e mais relevantes para o estudo em causa referidos seguidamente.

2.2.1.1. Falhas

As falhas são fraturas onde ocorreu um deslocamento significativo ao longo de uma superfície que separa duas partes dum maciço, designada vulgarmente por plano de falha. O deslocamento relativo das duas porções do maciço pode provocar o esmagamento da rocha e a fraturação das paredes da falha. A parede situada na zona inferior da falha é denominada de "muro" da falha, e a parede na zona superior designa-se por "teto" da falha. O espaço delimitado pelo teto e muro da falha constitui a "caixa de falha" [5]. Estas fraturas condicionam fortemente a conceção de estruturas, nomeadamente barragens, e poderão requerer um tratamento específico que varia consoante as particularidades da falha e do maciço onde esta se insere.

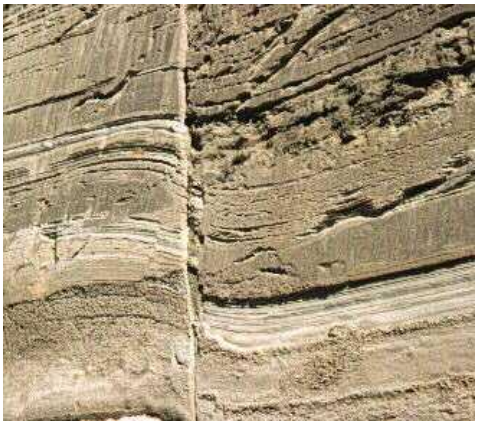

Fig. 2.1 - Falha num maciço rochoso [6]

2.2.1.2. Diáclases

As diáclases são também fraturas que separam o maciço em blocos, mas onde o movimento relativo destes é nulo ou pouco significativo. Este tipo de descontinuidades pode resultar dos esforços de tração, compressão e corte atuantes no maciço aquando da sua formação. Quando surgem conjuntos de diáclases com a mesma origem e aproximadamente paralelas entre si, está-se perante uma família de descontinuidades [5].

2.2.1.3. Superfícies de estratificação

Este tipo de descontinuidades é característico das formações sedimentares. As superfícies de estratificação adotam inicialmente uma orientação praticamente paralela à superfície, consequência da deposição de sedimentos ao longo dos anos. No entanto, esta disposição pode ser alterada em resultado do processo geológico onde a formação está inserida (exemplo dos movimentos tectónicos).

Fig. 2.2 - Estratificação decorrente da deposição de sedimentos [7]

2.2.1.4. Xistosidade

A xistosidade é uma característica que decorre da ação dos agentes de metamorfismo (temperatura e pressão) em rochas pré-existentes. Os minerais presentes nas rochas orientam-se segundo uma determinada direção, de modo a originar superfícies de fraqueza sensivelmente paralelas entre si. As

formações xistentas são aquelas onde mais se faz notar a presença de xistosidade (daí a similaridade na designação).

Fig. 2.3 - Xistosidade [8]

2.2.2. Características das Descontinuidades

A abertura e o enchimento serão, de entre as várias propriedades inerentes às descontinuidades que controlam o comportamento dos maciços, aquelas que mais fortemente condicionam os tratamentos por injeção de cimento de maciços de fundação de barragens de betão. Contudo, faz-se uma breve descrição da generalidade das características associadas às descontinuidades.

2.2.2.1. Abertura

A abertura das descontinuidades consiste no espaço delimitado pelas duas paredes da descontinuidade quando este se encontra preenchido por ar ou água. A dimensão das aberturas condiciona fortemente o comportamento do maciço rochoso. A existência de vazios ou cavidades no interior do maciço afeta as propriedades mecânicas do mesmo, diminuindo a sua capacidade resistente e aumentando a sua deformabilidade. No caso das barragens, é ainda importante mencionar que as grandes aberturas potenciam o aumento da percolação de água no maciço, aspeto que pode condicionar o uso do mesmo como terreno de fundação de uma estrutura deste tipo. A Fig. 2.4 pretende ilustrar uma representação exemplificativa da abertura de uma descontinuidade.

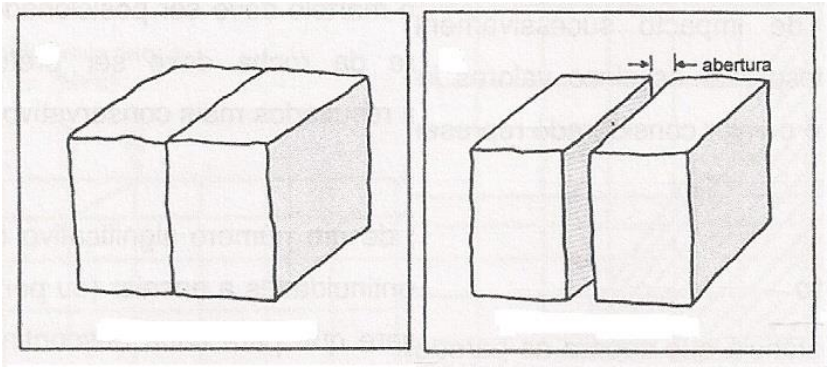

Fig. 2.4 - Descontinuidade fechada (esquerda); descontinuidade com abertura (direita) (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

A dimensão das aberturas abrange um grande intervalo de valores, desde fissuras inferiores a um milímetro, até cavernas com largura superior a um metro. O Quadro 2.1 representa as várias denominações dadas às aberturas conforme a sua dimensão [5].

Quadro 2.1 - Caracterização das descontinuidades de acordo com a dimensão da respetiva abertura

Designação	Abertura (mm)
Muito fechadas	< 0.1
Fechadas	0.1 – 0.25
Parcialmente fechadas	0.25 – 0.5
Abertas	0.5 – 2.5
Largas	2.5 – 10
Muito largas	10 – 100
Extremamente largas	100 – 1000
Cavernosas	> 1000

A abertura das descontinuidades e o material de enchimento nelas contido determina fortemente o valor da permeabilidade do maciço. Aberturas de reduzida dimensão e com preenchimento argiloso (material pouco permeável) conduzem a valores baixos de permeabilidade. Numa situação oposta, onde se verificam descontinuidades com grande abertura ou com material de enchimento permeável, é provável que estas descontinuidades constituam redes de canais por onde a água irá facilmente circular [5].

2.2.2.2. Preenchimento

Associado à abertura das descontinuidades surge por vezes o preenchimento das mesmas. Este é caracterizado pela ocupação do espaço entre as paredes da descontinuidade por material arrastado ou originário do maciço, material esse designado por "enchimento". A grande questão associada ao preenchimento das descontinuidades prende-se com as características do material de enchimento. Caso este material seja competente, a remoção do material pode ser evitada ou, por vezes, até impossível de se realizar. Verificando-se a situação oposta, em que se está perante um material de fracas características resistentes, solto e passível de ser facilmente arrastado (por exemplo, pelo efeito da percolação), será de interesse proceder à remoção do material e substituí-lo por outro mais competente, nomeadamente caldas de cimento. Na Fig. 2.5 encontra-se representado um exemplo ilustrativo de uma descontinuidade com preenchimento.

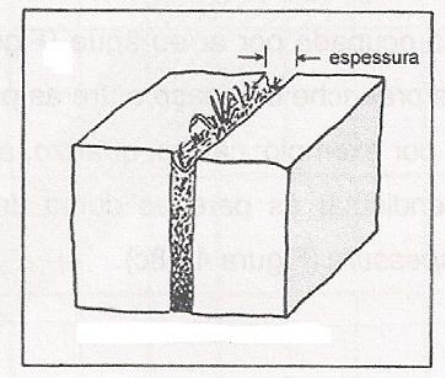

Fig. 2.5 - Descontinuidade com preenchimento no seu interior (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

2.2.2.3. Orientação

Um dos primeiros aspetos a ter em conta após a identificação das descontinuidades num maciço onde será instalada a fundação de uma estrutura é a determinação da orientação das descontinuidades e a identificação das famílias de descontinuidades presentes no maciço. Esta identificação detalhada acerca da orientação e da localização das descontinuidades permite saber quais as zonas do maciço mais afetadas por estes acidentes geológicos, e possibilita a definição de medidas que visem minimizar o efeito negativo das orientações das descontinuidades existentes num maciço. A orientação, ou atitude, duma descontinuidade é definida pelo mergulho ("dip") da linha de maior declive do plano que contém a descontinuidade e pelo azimute ("dip direction") que essa mesma linha faz com o ponto cardeal Norte, sendo este ângulo medido no sentido dos ponteiros do relógio. A figura Fig. 2.6 ilustra dois tipos de representação de uma descontinuidade com orientação N60E, 30SE [5].

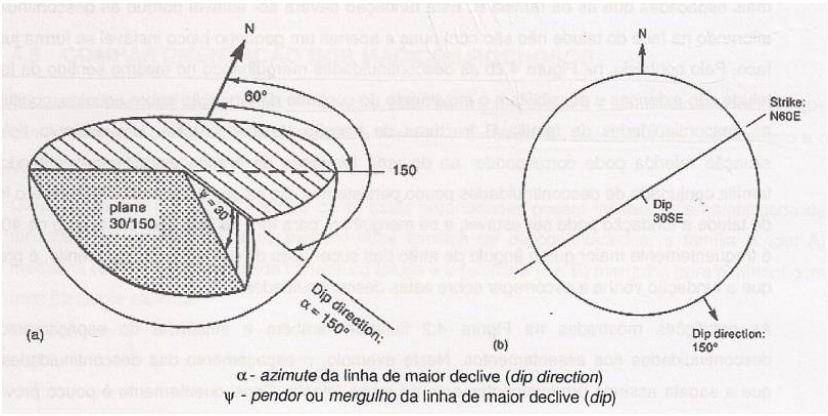

Fig. 2.6 - Representação da descontinuidade N60E, 30 SE: vista isométrica (imagem da esquerda); vista em planta (imagem da direita) [5]

A análise da orientação das descontinuidades varia consoante o tipo que estas assumem. As descontinuidades com maior relevância, como o caso das falhas, são representadas individualmente. Deste modo, o seu estudo é mais pormenorizado, sendo cada uma destas singularidades representada em cartas geológicas. Quando perante descontinuidades como sejam as diáclases, geralmente muito numerosas mas com importância relativa menor, a representação da totalidade das descontinuidades torna-se difícil e a sua análise complexa. Assim sendo, recorre-se a métodos estatísticos para proceder ao estudo das características das inúmeras descontinuidades, nomeadamente a atitude destas. É assim

possível obter informação sobre o tipo de compartimentação criado pelas descontinuidades no maciço. Nas cartas geológicas devem constar as atitudes mais representativas e, como complemento, deve ser feito um relatório que descreva as propriedades de cada família de descontinuidades [5].

Um dos métodos mais correntemente usados na representação das descontinuidades e suas famílias é o método da projeção hemisférica. Fazendo uma explicação breve do método, considere-se uma esfera intersetada por um plano a passar no seu centro. Esta interseção define um círculo maior, e a reta perpendicular ao plano que passa pelo centro da esfera define os pólos do plano. Considerando uma descontinuidade pelo seu plano representativo, através deste método é possível identificar cada descontinuidade pelo seu círculo maior e pólo associado. A Fig. 2.7 ilustra o modo de representação de uma projeção hemisférica [5].

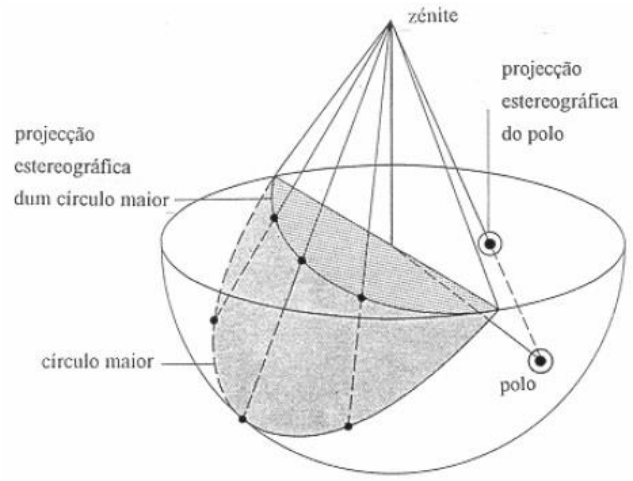

Fig. 2.7 - Definição de uma projeção hemisférica (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

Quando perante um grande número de descontinuidades, a utilidade das projeções hemisféricas prende-se com a representação do plano de cada descontinuidade e respetivo pólo. Deste modo, é possível analisar a concentração de pólos ao longo da projeção e, assim, identificar as várias famílias de descontinuidades. Na Fig. 2.8 está representado um exemplo onde constam os pólos de várias descontinuidades, e o respetivo diagrama de isodensidades.

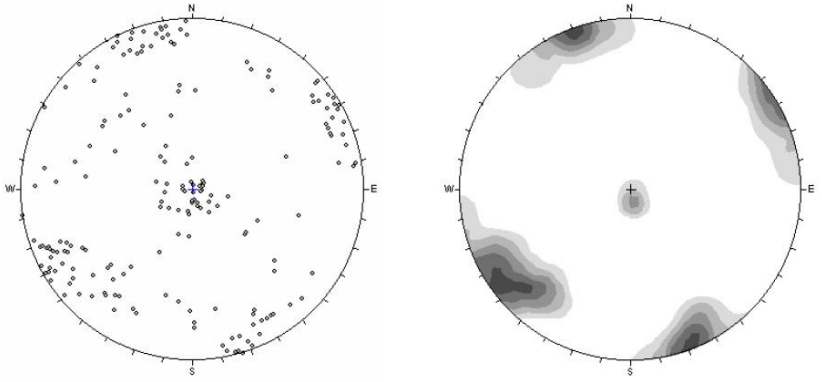

Fig. 2.8 - Identificação das famílias de descontinuidades: representação dos vários pólos (esquerda); representação das famílias identificadas através de curvas de isodensidade (direita). (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

Pela análise das projeções da Fig. 2.8 constata-se a existência de cinco zonas onde é maior a concentração de pólos, podendo então identificar-se cinco famílias de descontinuidades.

2.2.2.4. Persistência

A persistência representa a extensão em área de uma descontinuidade e é estimada pela medição do comprimento do traço de uma descontinuidade visível numa superfície exposta de um maciço. A persistência assume grande relevância na estabilidade de taludes, de fundações de barragens e de obras subterrâneas, visto ser um dos parâmetros com maior influência no comportamento dos maciços rochosos. O Quadro 2.2 ilustra o modo como se pode caracterizar a persistência de uma dada família de descontinuidades em função do comprimento do seu traço [5].

Quadro 2.2 - Metodologia usada na caracterização da persistência de descontinuidades num maciço

Persistência	Comprimento (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1 – 3
Média	3 – 10
Elevada	10 – 20
Muito elevada	> 20

2.2.2.5. Espaçamento

O espaçamento é a distância que separa descontinuidades adjacentes pertencentes à mesma família. Aquando da realização de sondagens com recuperação de amostra, caso a amostra obtida seja de boa qualidade, podem-se visualizar as descontinuidades presentes e, porventura, medir o seu espaçamento. Por conveniência, o comprimento da amostra retirada deverá ser dez vezes superior ao espaçamento previamente estimado para as descontinuidades, para que o valor medido seja representativo da condição real do maciço. É também possível introduzir no furo câmaras de filmar para se poder observar diretamente as condições do maciço em profundidade. No Quadro 2.3 está representada a nomenclatura dada às descontinuidades com base no seu espaçamento [5].

Quadro 2.3 - Classificação das descontinuidades com base no seu espaçamento

Descrição	Espaçamento (mm)
Extremamente próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente afastadas	200 – 600
Afastadas	600 – 2000
Muito afastadas	2000 – 6000
Extremamente afastadas	> 6000

2.2.2.6. Rugosidade

A rugosidade presente nas paredes das descontinuidades está relacionada com a irregularidade das superfícies das referidas paredes. De uma forma geral, a rugosidade das paredes das descontinuidades é caracterizada pela curvatura (ondulações em grande escala verificadas ao longo das paredes das descontinuidades) e pelas asperidades (pequenas irregularidades na superfície das paredes das descontinuidades que têm tendência a se danificarem com a ocorrência de movimentos relativos entre as paredes). O parâmetro JRC ("Joint Roughness Coefficient") é aquele que define a rugosidade das paredes de uma descontinuidade, e é empregue numa expressão que permite estimar a resistência de pico ao escorregamento dos blocos separados pela descontinuidade. Barton criou um quadro (Fig. 2.9) onde constam vários perfis-tipo de rugosidade, e onde correlacionou cada perfil com o correspondente valor de JRC [5].

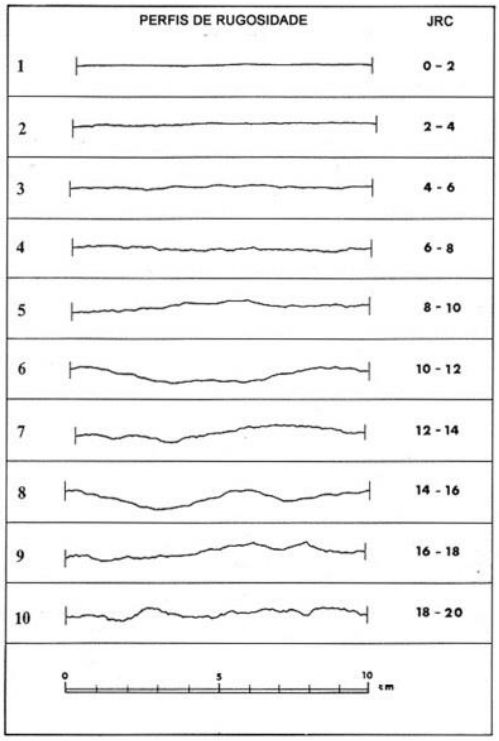

Fig. 2.9 - Perfis de rugosidade e respetivos valores de JRC [5]

A rugosidade, para além da influência na resistência ao deslizamento dos blocos separados pela descontinuidade, pode também condicionar o fluxo de fluídos ao longo das descontinuidades, sobretudo água (percolação) mas também fluídos empregues no tratamento do maciço (preenchimento das descontinuidades com calda de cimento).

2.3. PROPRIEDADES DOS MACIÇOS ROCHOSOS

O comportamento dos maciços rochosos pode ser avaliado através do estudo de propriedades físicas e mecânicas. O estudo destas propriedades permite averiguar as condições do maciço e concluir se este reúne as condições estipuladas para uma determinada obra. Falando concretamente dos maciços que constituem as fundações de uma barragem, importa referir algumas propriedades que interferem no desempenho dos referidos maciços.

2.3.1. PERMEABILIDADE

A facilidade com que a água atravessa um meio contínuo (como um maciço rochoso) é definida pela permeabilidade. A rocha intacta é praticamente impermeável, mas a um meio rochoso fraturado, com descontinuidades abertas e preenchidas com material permeável pode estar associado um elevado valor da permeabilidade. Todos os maciços possuem descontinuidades, e a maior ou menor presença destas (e suas características) influencia a permeabilidade do maciço. A Fig. 2.10 apresenta um quadro onde constam alguns valores de coeficientes de permeabilidade "k" em função das características do maciço rochoso.

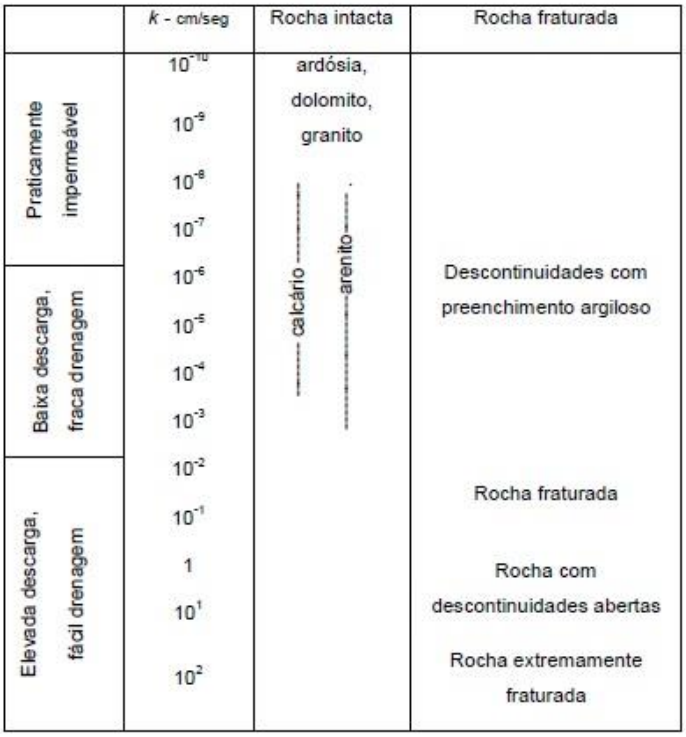

Fig. 2.10 - Valores do coeficiente de permeabilidade, k, consoante as características do maciço rochoso (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

A ocorrência de elevados caudais ao longo de um meio rochoso está associada a elevados valores de permeabilidade do mesmo. No que aos maciços rochosos diz respeito, a percolação de água ao longo destes provoca efeitos negativos, sendo de destacar:

- Presença de água nas descontinuidades ao exercer pressão nas paredes destas, promove maiores aberturas e consequentemente uma maior facilidade no fluxo de água; o congelamento da água e consequente aumento do seu volume gera pressão nas paredes, podendo conduzir à fraturação da rocha e criar novas descontinuidades;
- Erosão interna do maciço com a percolação da água, desgastando as paredes das descontinuidades e dando origem ao arrastamento do material de enchimento das mesmas;
- Em maciços rochosos que alberguem fundações de obras de retenção, como as barragens, há fluxo de água ao longo do maciço e instalam-se subpressões na base da estrutura que podem pôr em causa as condições de estabilidade da mesma.

O estado de tensão presente num maciço rochoso tem um papel relevante nos valores da permeabilidade. Compressões tendem a fechar as descontinuidades e a diminuir os percursos para a água fluir, mas no caso de as tensões serem elevadas ao ponto de provocar movimentos do maciço, novas descontinuidades poderão surgir e, por consequência, dá-se um aumento da permeabilidade. Outro aspeto que tem influência na permeabilidade dum maciço é a anisotropia deste. Esta característica prende-se com a variabilidade das propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço segundo diversas orientações. No que respeita à permeabilidade, a anisotropia está relacionada com a orientação das descontinuidades. Deste modo, o sentido da percolação num maciço tende a ser concordante com a orientação preferencial das descontinuidades mais abertas. Assim, a anisotropia influencia também o maior ou menor fluxo de água ao longo do maciço [5].

Com vista à avaliação da permeabilidade dum maciço rochoso, recorre-se habitualmente a ensaios de absorção do tipo "Lugeon". Este ensaio será explicado com maior detalhe no ponto 2.4.2.1. do presente capítulo.

2.3.2. PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SÍSMICAS

A velocidade com que se propagam as ondas sísmicas (longitudinais e transversais) numa rocha ou num maciço rochoso é um importante indicativo da sua qualidade e homogeneidade. Quanto maior o valor da velocidade de propagação, melhor serão as propriedades do maciço. A presença de descontinuidades promove quebras nas velocidades de propagação, pelo que a medição destas velocidades através de ensaios sísmicos permite obter informação sobre as características mecânicas (e, indiretamente, hidráulicas) do maciço.

2.3.3. DURABILIDADE

A resistência das rochas aos processos de alteração e fragmentação é dada pela durabilidade. Esta propriedade, também designada de alterabilidade, está associada à rocha propriamente dita e não ao maciço rochoso, e é condicionada sobretudo por agentes de meteorização, como a água e o ar, que provocam a degradação da rocha e a consequente diminuição das suas propriedades mecânicas. Esta propriedade está também implícita na questão do arrastamento de material no interior do maciço, seja material fragmentado, seja material constituinte do enchimento de descontinuidades [5].

2.4. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA E ENSAIOS

Uma prospeção geotécnica corresponde ao conjunto de operações efetuadas no local de construção da futura estrutura que têm como finalidade a avaliação das condições do terreno. Normalmente no que à vertente geotécnica da obra diz respeito, será necessário avaliar as condições em profundidade do maciço, pelo que a técnica mais utilizada baseia-se nas prospeções mecânicas e geofísicas.

Os procedimentos inerentes às prospeções efetuadas deverão ser previamente definidos, devendo ser efetuado um plano de prospeção onde deverá constar, entre outros aspetos, a localização dos trabalhos a realizar, indicações sobre colheita de amostras e também informação sobre ensaios "in situ" a executar. O plano a efetuar deve ser feito de modo a prever possíveis variações das condições com o decorrer dos trabalhos, logo deve ser um plano com alguma flexibilidade nos procedimentos.

2.4.1. PROSPEÇÃO MECÂNICA – SONDAGENS

A designação "prospeção mecânica" decorre do facto de haver utilização de meios mecânicos na aplicação desta técnica. Encontram-se diversos motivos para justificar o uso desta metodologia na observação de maciços, sendo de salientar:

- Determinação das características das descontinuidades;
- Colheita de amostras representativas do maciço;
- Determinação de propriedades físicas e mecânicas do maciço (permeabilidade, deformabilidade);
- Visualização direta do interior do maciço.

Independentemente do tipo de prospeção a efetuar, é imprescindível definir um plano de prospeção antes de qualquer trabalho a realizar, por forma a organizar as tarefas a fazer e a agilizar as mesmas. A definição de um plano de prospeção e o conteúdo nele presente varia consoante o tipo de prospeção a realizar. Para o âmbito da presente dissertação, importa apenas fazer referência ao plano de prospeção característico da realização de uma sondagem, e a alguma da informação que nele deve constar:

- Localização do trabalho de prospeção;
- Identificação da empresa e dos operários responsáveis pelo trabalho de prospeção;
- Data de início dos trabalhos;
- Diâmetros e profundidades de furação;
- Registo de amostras recolhidas;
- Tipo de equipamento usado na prospeção.

É também importante no fim da realização de uma sondagem efetuar um registo onde conste informação relativa à prospeção e aos resultados que dela advieram. Assim, entre outros aspetos, importa referir no registo:

- Data de conclusão do trabalho de prospeção;
- Identificação de estruturas geológicas (diáclases, falhas, entre outras);
- Registo de qualquer acidente associado ao trabalho de prospeção.

Abordando agora a metodologia inerente à realização de uma sondagem, este método de prospeção tem vindo a ser o mais empregue, dada a profundidade a que permite investigar o terreno e a facilidade (tanto a nível de aplicação como a nível económico) de uso da técnica. Em maciços rochosos, a abertura dos furos de sondagem é feita com recurso ao método de furação [5].

Fig. 2.11 - Equipamento de execução de furos de sondagem [9]

Os furos de sondagem abertos recorrendo à furação compreendem três tipos: furação por percussão, por rotação ou ainda por rotopercução. As sondagens realizadas por percussão são sondagens destrutivas que avançam em profundidade recorrendo a movimentos de percussão provocados normalmente por sistemas pneumáticos, e não permitem recolha de amostra. Recorre-se a um trépano (Fig. 2.12) para efetuar o desmonte da rocha. Este é colocado na extremidade de varas, acopladas umas às outras ao longo do desenvolvimento do furo de sondagem, que por sua vez estão acopladas ao equipamento pneumático. A remoção das poeiras e da rocha desagregada resultante da abertura do furo é feita recorrendo à injeção de água a partir de um orifício na ponta do trépano. A pressão de injeção da água expulsa os detritos de furação ao longo do furo até à superfície. Paralelamente, a água desempenha ainda um papel importante na refrigeração dos equipamentos de furação.

Fig. 2.12 - Exemplos de trépanos [10]

As sondagens em que se utilizam ferramentas com avanço por rotação podem ser destrutivas ou permitir a recuperação contínua de amostra. As primeiras podem ter movimento rotativo ou rotopercutivo, e recorrem a ferramentas de furação idênticas às representadas na Fig. 2.13. Estas ferramentas metálicas contêm na sua extremidade "bits" feitos de um material duro e resistente (metal, tungsténio ou até diamante) para efetuar o desmonte da rocha. No caso da abertura de furos de sondagem à rotação com recuperação contínua de amostra, utilizam-se coroas metálicas às quais estão acoplados "bits" (Fig. 2.14). Tais coroas apresentam-se com um orifício no seu centro de modo a recolher a amostra retirada e a conduzi-la para o amostrador, estando este conectado à coroa. Tanto nas sondagens destrutivas como nas que permitem recuperação de amostra acoplam-se continuamente varas para fazer chegar a ferramenta de escavação ao fundo do furo e proceder ao desmonte da rocha. No interior das varas circula água para remoção dos detritos decorrentes da abertura do furo e para refrigeração dos equipamentos.

Fig. 2.13 - Ferramentas de furação destrutiva [10]

Fig. 2.14 - Coroas (com "bits" acoplados) usadas nas sondagens rotativas com recuperação de amostra [11]

Nos casos de sondagens rotativas com recolha de amostra, é necessário o uso de amostradores, de preferência duplos ou triplos, para melhor acondicionar as amostras recolhidas. A zona interior do amostrador onde é acondicionada a amostra não acompanha o movimento rotativo das coroas, permitindo assim conservar o melhor possível a amostra. O comprimento destas peças varia frequentemente entre dois a três metros (Fig. 2.15) [5].

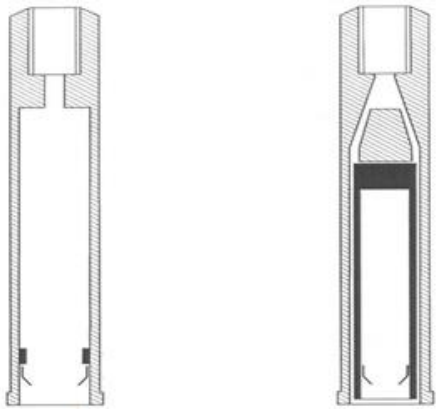

Fig. 2.15 - Amostrador simples (à esquerda) e duplo (à direita) (Adaptado de [12])

2.4.2. Ensaios Realizados nos Furos de Sondagem

É usual a execução de ensaios "in situ" aquando da realização de trabalhos de prospeção (sobretudo sondagens). Os ensaios "in situ" mais frequentes em maciços rochosos que serão fundação de barragens são os de permeabilidade e deformabilidade. Seguidamente será feita uma breve referência a alguns dos ensaios correntes [5].

2.4.2.1. Ensaio de permeabilidade do tipo "Lugeon"

Como já foi dito, os maciços rochosos podem apresentar elevados valores de permeabilidade, como consequência da presença de descontinuidades e fissuras por onde a água pode fluir. O ensaio "Lugeon" compreende a injeção radial de água com pressão num troço de um furo de sondagem, em que a quantidade de água injetada é medida e o tempo de injeção registado, depois de se atingir um

regime de escoamento permanente. O ensaio é realizado em cada troço de um furo, sendo que estes troços assumem normalmente dimensões próximas dos cinco metros. A delimitação dos troços é conseguida recorrendo a obturadores, por forma a que a água injetada não circule entre o obturador e a parede do furo. O comprimento dos obturadores varia entre 0.5 e 1.0 m, para assegurar uma boa vedação do troço a ensaiar. Caso o ensaio "Lugeon" seja feito à medida da escavação do furo, apenas será necessário recorrer a um obturador simples, colocado no topo do troço, sendo que a zona inferior do troço é delimitada pelo fundo do furo. Caso o furo seja aberto na totalidade, serão usados obturadores duplos para delimitar as duas extremidades de cada troço. Poderão existir situações em que são empregues obturadores quádruplos, com vista ao ensaio de vários troços ao mesmo tempo. Os vários exemplos da disposição dos obturadores estão representados na Fig. 2.16.

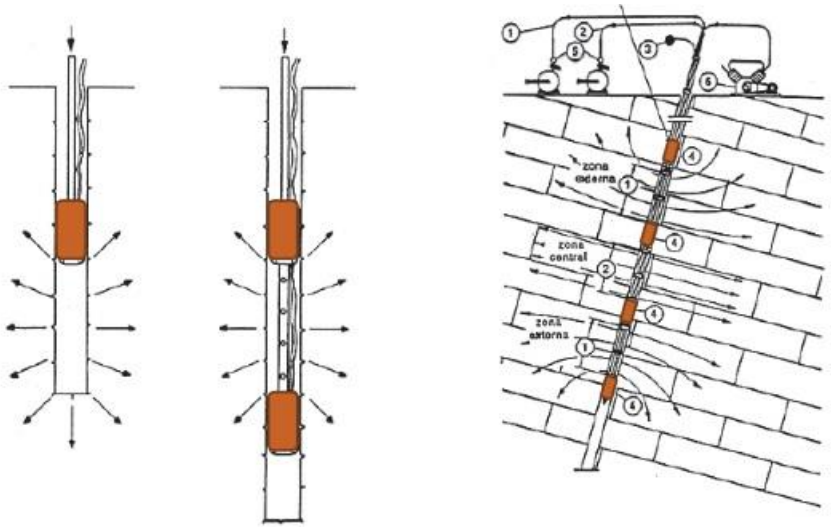

Fig. 2.16 - Colocação de obturadores para a realização de ensaios "Lugeon": obturador simples (esquerda), obturador duplo (centro), obturador quádruplo (direita) [13]

A realização do ensaio "Lugeon" num troço compreende a injeção de água em cinco patamares de pressão estabilizada: 0.25 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa, 0.5 MPa, 0.25 MPa. Em cada um destes patamares deverá ser atingido o regime permanente, e só após este momento é que se regista, durante aproximadamente 10 minutos, o caudal de injeção e o volume de água injetado. Os resultados decorrentes destes ensaios de absorção são expressos em unidades "Lugeon", sendo que esta unidade corresponde à absorção de um litro por minuto e por metro de furo, durante uma injeção de duração dez minutos e à pressão estabilizada de 1.0 MPa.

Aquando da realização do ensaio "Lugeon", a água injetada percorre o maciço com um regime de escoamento dependente da fraturação e das descontinuidades do meio rochoso. Estes regimes são dados em função do caudal injetado e da pressão de injeção [5]. Dos vários tipos de regimes de escoamento existentes, importa referir:

- Escoamento laminar – verifica-se quando há proporcionalidade entre o caudal e a pressão de injeção (Lei de Darcy – $v = k.i$), e são característicos de maciços com descontinuidades pouco abertas ou com preenchimento granular [5];

Fig. 2.17 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de escoamento laminar (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

- Escoamento turbulento – os escoamentos turbulentos surgem quando o caudal injetado não é proporcional à pressão de injeção (lei de Chézy – $v = k\sqrt{i}$) [5];

Fig. 2.18 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de escoamento turbulento (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

- Lavagem das fraturas (Desobstrução) – ocorre arrastamento de material presente nas descontinuidades;

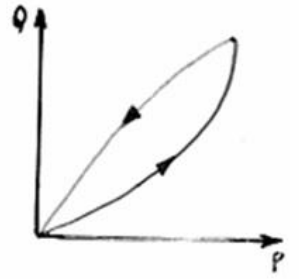

Fig. 2.19 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de desobstrução (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

- Colmatação das fraturas – preenchimento de descontinuidades com material arrastado pela água;

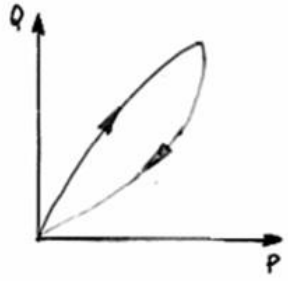

Fig. 2.20 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de colmatação (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

- Fraturação hidráulica – incremento brusco do caudal a partir de uma determinada pressão "crítica", como consequência da criação de novas fraturas criadas pelo aumento da pressão de injeção;

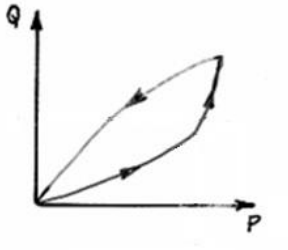

Fig. 2.21 - Curva caudal-pressão representativa de regimes de fraturação hidráulica (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

- Vazão total – este regime ocorre quando o furo onde se está a realizar o ensaio absorve continuamente o caudal máximo permitido pelo equipamento de injeção, o que indicia uma forte presença de descontinuidades no maciço;
- Absorção nula – caso de furos onde a absorção de água é nula ou bastante reduzida;
- Sem obturação – as paredes do furo de ensaio não permitem a correta colocação dos obturadores.

Aquando da execução dos ensaios de absorção do tipo "Lugeon", é possível determinar para cada troço do furo o tipo de regime de escoamento. Desta forma, a informação resultante dos ensaios "Lugeon" assume grande utilidade para o estudo do comportamento hidrogeológico do maciço, e permite determinar a necessidade de proceder a um tratamento de impermeabilização do terreno em estudo.

2.4.2.2. Ensaios de deformabilidade

Um dos métodos de avaliação da deformabilidade de maciços rochosos faz uso dos furos de sondagem. O dilatómetro BHD ("Bore-Hole Dilatometer"), desenvolvido pelo LNEC, consiste na colocação no furo de um dispositivo constituído por um invólucro cilíndrico metálico envolvido por uma camisa de borracha. Esta camisa dilata-se através da introdução de água no espaço entre a superfície exterior do cilindro metálico e a superfície interior da camisa, pressionando as paredes do furo na região a avaliar. Um sistema elétrico (oito transdutores) instalado no interior do cilindro

metálico procede à medição das deformações em quatro direções diferentes desfasadas de 45° e perpendiculares ao eixo do furo. Está representado na Fig. 2.22 um esquema alusivo ao uso do dilatómetro BHD [5].

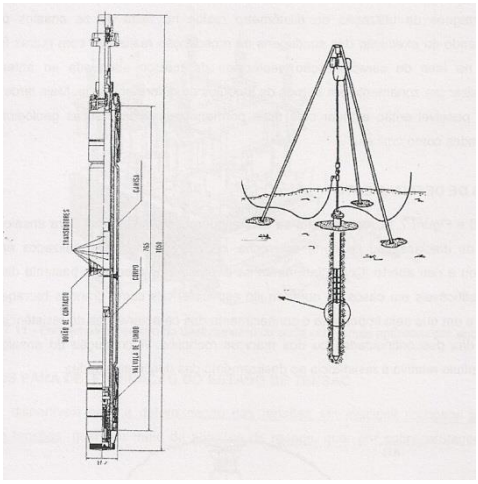

Fig. 2.22 - Instalação num furo de sondagem do dilatómetro BHD [5]

Da aplicação deste ensaio obtém-se o módulo dilatométrico através da expressão representada na Equação (2.1):

$$E_{dil} = (1 + \nu)\varphi \frac{\Delta p}{\delta} \tag{2.1}$$

Onde:

- E_{dil} – Módulo dilatométrico (MPa)
- ν – Coeficiente de poisson;
- φ – Diâmetro do furo (m);
- Δp – Variação entre a pressão mínima e máxima aplicada nas paredes do furo (MPa);
- δ – Deformação das paredes do furo (m).

O módulo dilatométrico é correlacionável com o módulo de deformabilidade. Deste modo, como o ensaio é realizado a várias profundidades e daí decorre a obtenção do módulo dilatométrico ao longo da profundidade do furo de sondagem, é possível efetuar um zonamento do maciço tendo o módulo de deformabilidade como referência [5].

2.4.3. Prospeção Geofísica – Métodos Sísmicos

2.4.3.1. Enquadramento Geral

Como o próprio nome indica, a Geofísica é a ciência que recorre aos princípios físicos para estudar a Terra. De modo análogo à prospeção mecânica, a geofísica pretende avaliar os maciços, sobretudo o seu comportamento mecânico [5].

Neste trabalho os métodos geofísicos mais relevantes serão os sísmicos, portanto apenas estes serão alvo de análise. Existem três métodos sísmicos, sendo que estes se distinguem pelo tipo de onda sísmica ou elástica cuja velocidade de propagação se pretende determinar. Assim, tem-se o método sísmico direto, o de reflexão e o de refração. A velocidade de propagação é determinada com base na distância percorrida pela onda entre vários pontos conhecidos. Os métodos sísmicos acima referidos têm por base a teoria da elasticidade, isto é, recorrem à relação tensão-deformação, em fase elástica. Assim, no caso de uma tensão deixar de atuar num meio, a deformação ou extensão por ela originada propaga-se nesse meio sob a forma de uma onda elástica [5]. Tendo em conta que no caso de estudo abordado na presente dissertação se recorreu ao método sísmico direto, apenas este método será detalhado.

As ondas elásticas podem ser volumétricas, se forem propagadas no interior do maciço, ou superficiais se se propagarem à superfície do maciço. Por sua vez, as ondas volumétricas dividem-se em longitudinais (ou ondas "P"), quando o movimento das partículas coincide com a direção de propagação da onda elástica, e transversais (ou ondas "S"), quando as partículas se movem ortogonalmente à direção de propagação da onda. As ondas volumétricas longitudinais e transversais estão relacionadas com as características mecânicas do maciço em que se propagam, nomeadamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, como se pode observar nas Equações (2.2) e (2.3) [5]:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\delta(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{2.2}$$

E:

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} \tag{2.3}$$

Onde:

- V_P e V_S – Velocidade de propagação das ondas "P" e "S", respetivamente (m/s);
- E – Módulo de elasticidade (MPa);
- ν – Coeficiente de poisson;
- δ – Massa específica (kg/m^3).

Assim sendo, a análise da velocidade de propagação destas ondas constitui um meio para avaliar as qualidades mecânicas dos maciços. No Quadro 2.4 estão representados os valores padrão de velocidades de propagação de ondas "P" e "S" em alguns materiais, incluindo tipos de rocha, e na Fig. 2.23 estão representados alguns exemplos de formações geológicas e respetivos valores das velocidades de propagação das ondas primárias (V_P) e secundárias (V_S) [5].

Quadro 2.4 - Velocidades de propagação das ondas sísmicas "P" e "S" conforme o tipo de material

Material	V_P (m/s)	V_S (m/s)
Ar	330	–
Água	1450	–
Areia	300 – 800	100 – 500
Calcários	3500 – 6500	1800 – 3800
Xistos	3500 – 5700	2000 – 3900
Granitos	4600 – 7000	2500 – 5000

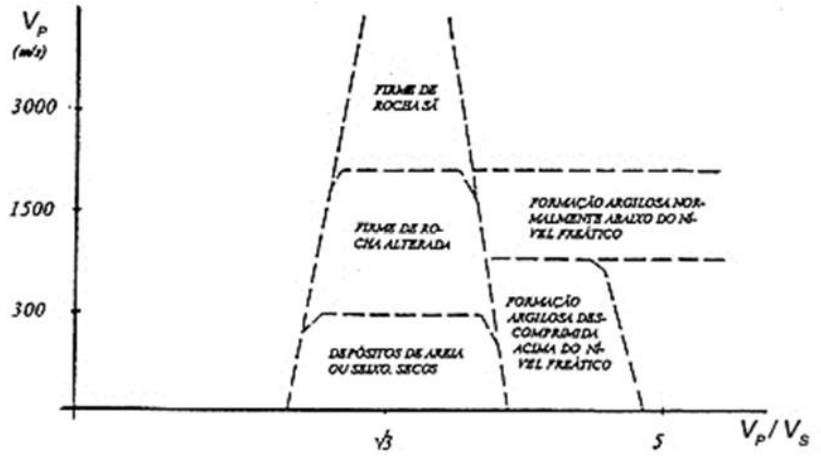

Fig. 2.23 - Exemplos de formações geológicas e correspondentes valores das velocidades de propagação das ondas "P" e "S" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

As ondas "S" apenas se propagam em meios sólidos, daí a não representação do seu valor no ar e na água. A velocidade de propagação das ondas "P" e "S" tende a amentar com a profundidade, em conformidade com a suposta melhoria em profundidade das condições mecânicas do maciço. A presença de anisotropia em maciços estratificados faz com que as ondas se propaguem ligeiramente mais rápido na direção paralela aos estratos (10 a 15%) do que na direção ortogonal [5].

2.4.3.2. Método sísmico direto

Este método sísmico é essencialmente usado no estudo de pequenos volumes de maciço, com vista ao seu zonamento. Assim, o tempo de percurso da onda será da ordem dos microssegundos, aspeto que justifica a designação deste método como microssísmico. Desta forma, não serão necessários grandes meios para provocar ondas desta amplitude (reduzida quantidade de explosivo, queda de uma pequena massa ou aplicação de fontes vibratórias de pouca intensidade) [5].

As prospeções sísmicas que adotam este método recorrem ao uso de furos de sondagem, e a representação das velocidades de propagação das ondas longitudinais é feita normalmente através de leques sísmicos que são estabelecidos entre furos contíguos. O ensaio correntemente empregue,

designado ensaio "cross-hole", consiste na colocação de uma fonte emissora de energia sísmica em várias profundidades de um mesmo furo, e a receção das ondas faz-se através de recetores colocados igualmente a várias profundidades num furo adjacente. Esta variedade de posições entre a fonte emissora e os recetores permite obter uma grande densidade de raios sísmicos (percursos retilíneos – Fig. 2.24), para aumentar a credibilidade dos resultados obtidos.

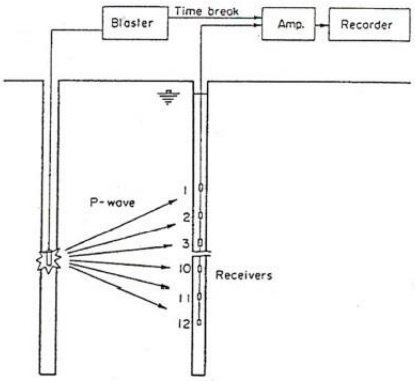

Fig. 2.24 - Esquema representativo da realização de um ensaio "cross-hole" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

A fonte emissora produz energia sísmica propagada sob a forma de ondas longitudinais que são recebidas pelos vários dispositivos colocados no furo adjacente, a várias profundidades (Fig. 2.24).

A Fig. 2.25 ilustra a representação dos resultados de uma campanha sísmica recorrendo a leques sísmicos (ensaio "cross-hole") e o resultado da interpretação dos valores medidos através de linhas de iso-velocidade.

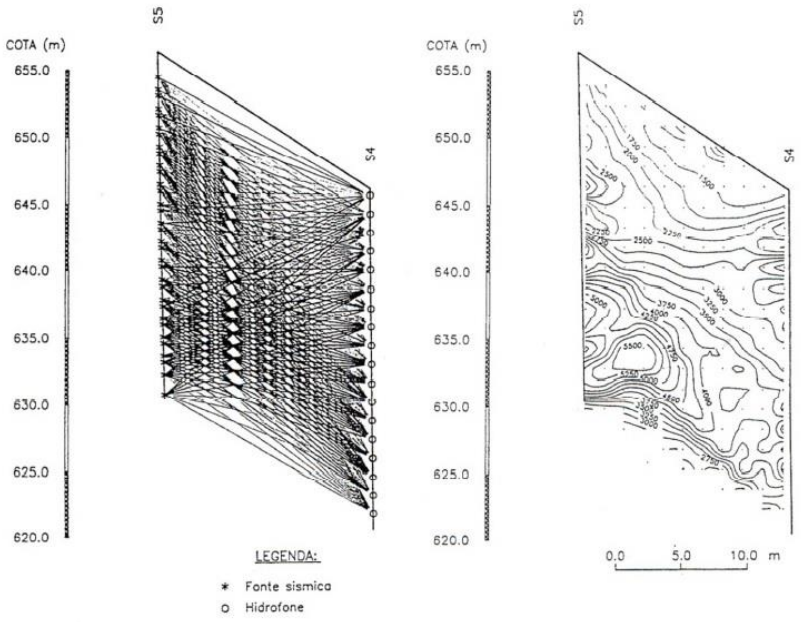

Fig. 2.25 - Resultados de uma tomografia sísmica: leques sísmicos (esquerda); representação das isolinhas de velocidades das ondas "P" (Adaptado de Martins de Lima et al.) [5]

Estes dois tipos de representação são muito úteis para proceder ao zonamento do maciço de fundação em estudo, tendo como base as suas propriedades mecânicas.

2.5. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.5.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A geologia, e mais concretamente a geotecnia, são duas ciências que lidam com materiais onde impera a subjetividade e a incerteza. Os maciços rochosos são meios bastante heterogéneos, quando comparados com outros materiais correntes da Engenharia Civil, como o aço ou o betão. As características e propriedades destes maciços variam bastante conforme as situações e condições a que estão sujeitos. Depois de feita a prospeção de um maciço rochoso, é possível proceder à sua classificação. Correntemente são empregues as seguintes metodologias de classificação de maciços rochosos [5]:

- Classificação geológica;
- Classificação para fins de engenharia;
- Classificação geomecânica.

2.5.2. CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA

A classificação geológica é normalmente o primeiro passo a tomar aquando do estudo de qualquer maciço associado a uma obra de engenharia civil. O geólogo encarregue da classificação avalia o maciço de acordo com a qualidade e tipo de rocha, através de observação direta ou recorrendo a métodos de prospeção. Na caracterização do maciço de fundação do caso de estudo (NBAC), e no que à classificação geológica diz respeito, esta foi essencialmente baseada no grau de alteração e no grau de fraturação do maciço.

2.5.2.1. Grau de alteração

O grau de alteração de um maciço pode ser avaliado pela facilidade com que este se parte (usando um martelo manual) ou através da coloração e brilho que pode variar com a alteração mineralógica. Outra forma de avaliar o grau de alteração prende-se com a análise de amostras recolhidas em sondagens. A maior ou menor percentagem de recuperação da amostra é também um indicador do estado de alteração do maciço. O Quadro 2.5 ilustra os graus de alteração empregues na classificação dos maciços [5].

Quadro 2.5 - Graus de alteração considerados na avaliação de maciços rochosos

Símbolos	Designações	Características
W_1	São	Sem quaisquer sinais de alteração
W_2	Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W_3	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W_4	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
W_5	Decomposto (saibro)	O maciço encontra-se completamente friável com comportamento de solo

2.5.2.2. Grau de fraturação

Este parâmetro avalia o espaçamento entre as descontinuidades de um maciço. É um importante indicador da homogeneidade e continuidade do meio rochoso. Estão representados no Quadro 2.6 os graus de fraturação usados na classificação dos maciços [5].

Quadro 2.6 - Graus de fraturação considerados na avaliação de maciços rochosos

Símbolos	Intervalo entre fraturas (cm)	Designação
F_1	> 200	Muito afastadas
F_2	60 – 200	Afastadas
F_3	20 – 60	Medianamente Afastadas
F_4	6 – 20	Próximas
F_5	< 6	Muito próximas

2.5.3. CLASSIFICAÇÃO PARA FINS DE ENGENHARIA

Esta classificação tem como base as propriedades mecânicas dos maciços. Deste modo, os métodos de prospeção geofísicos assumem grande importância numa fase anterior ao emprego deste tipo de classificação. Referem-se, de seguida, os parâmetros mais relevantes neste tipo de classificação [5]:

- Velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais.
- Módulo de elasticidade;
- Resistência à compressão simples.

A escolha destes critérios deriva da facilidade com que podem ser obtidos através da realização de ensaios e da fiabilidade com que estes parâmetros caracterizam o comportamento mecânico dos maciços rochosos. Recorrendo aos parâmetros acima referidos, é possível definir a qualidade de um maciço rochoso em função do quociente entre as velocidades de propagação das ondas longitudinais "in situ" ($V_{P,m}$) e em laboratótio ($V_{P,l}$) ou através da relação entre o módulo de deformabilidade dinâmico "in situ" ($E_{d,m}$) e o calculado em laboratório ($E_{d,l}$) (Quadro 2.7) [5].

Quadro 2.7 - Classificação de maciços rochosos com base na velocidade de propagação das ondas longitudinais ou através dos valores dos módulos de deformabilidade

Qualidade do Maciço Rochoso	$V_{P,m}/V_{P,I}$	$E_{d,m}/E_{d,I}$	Frequência das fraturas	RQD (%)
Excelente	0.9 – 1.0	0.8 – 1.0	< 1	90 – 100
Boa	0.8 – 0.9	0.6 – 0.8	5 – 1	75 – 90
Razoável	0.6 – 0.8	0.4 – 0.6	8 – 5	50 – 75
Fraca	0.4 – 0.6	0.2 – 0.4	15 – 8	50 – 25
Muito fraca	< 0.4	< 0.2	> 15	0 – 25

Os dois quocientes representados no Quadro 2.7 podem ainda ser correlacionados com a frequência das fraturas (número de descontinuidades identificadas por metro de maciço) e com o valor do RQD (abordado seguidamente no subcapítulo 2.5.4.2.) do maciço [5].

2.5.4. Classificação Geomecânica

As classificações geomecânicas recorrem à observação direta e aos resultados das prospeções mecânicas realizadas nos maciços (sobretudo sondagens) para proceder à avaliação destes. Atualmente, empregam-se vários tipos de classificação geomecânica, nomeadamente a classificação de Bieniawski (índice RMR – "Rock Mass Rating"), a classificação de Barton (índice Q), o índice GSI ("Geological Strength Index"), entre outros. No caso de estudo analisado (NBAC) apenas foi aplicada a classificação de Bieniawski, pelo que apenas esta será alvo de uma breve descrição.

A classificação de Bieniawski tem como base a atribuição de pesos a certas características que vários autores (incluindo Bieniawski) consideraram condicionantes do comportamento dos maciços rochosos. A soma dos vários pesos associados a cada critério constitui o índice RMR, assumindo este um valor num intervalo de 0 a 100, classificando o maciço rochoso em cinco classes, desde "Muito Bom" a "Muito Fraco", em função daquele valor. Existem duas variantes do índice RMR: o índice RMR básico, que contempla apenas cinco critérios (Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; RQD; Espaçamento das descontinuidades; Condição das descontinuidades; Influência da água) e o índice RMR corrigido, que considera ainda a soma de um sexto critério corretor – orientação das descontinuidades – ao índice RMR básico. A caracterização geológico-geotécnica do maciço de fundação da NBAC (caso de estudo) recorreu essencialmente ao valor do índice RMR básico, pelo que o sexto parâmetro corretor não será detalhado. Deste modo, apresentam-se seguidamente os cinco critérios inerentes ao cálculo do índice RMR básico.

2.5.4.1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

A medição desta resistência faz-se recorrendo ao ensaio de carga pontual (PLT – "Point Load Test"), onde se aplica uma carga centrada no topo e na base de provetes de rocha intacta até que este colapse, e ao ensaio de compressão uniaxial, onde a base e o topo dos provetes de rocha são comprimidos até à rotura. O Quadro 2.8 representa os pesos atribuídos a cada uma das classes de resistência consideradas.

Quadro 2.8 - Pesos atribuídos para a resistência à compresão uniaxial da rocha intacta

PLT (MPa)	Compressão uniaxial (MPa)	Pesos
> 10	> 250	15
4 – 10	100 – 250	12
2 – 4	50 – 100	7
1 – 2	25 – 50	4
Considerar apenas compressão uniaxial	5 – 25	2
	1 – 5	1
	< 1	0

2.5.4.2. RQD

O parâmetro RQD está normalmente associado aos estados de alteração e fraturação do maciço rochoso, e decorre da análise dos testemunhos recuperados aquando da realização de sondagens com recuperação contínua de amostra. Recomenda-se que as sondagens feitas no âmbito da determinação deste parâmetro tenham diâmetro superior a 55 mm, e que os amostradores usados sejam duplos ou triplos [5]. O valor deste parâmetro resulta da expressão presente na Equação (2.4):

$$RQD(\%) = \frac{\sum Nº\ Troços\ amostra\ (> 10\ cm)}{Comprimento\ total\ da\ amostra} \times 100 \quad (2.4)$$

No numerador consta a soma de todos os troços da amostra com dimensão superior a 10 centímetros, e o denominador consiste na dimensão total da amostra recolhida. A fraturação presente nos testemunhos provém essencialmente das condições "in situ" do maciço, mas pode ser agravada pelos processos de descompressão decorrentes da retirada da amostra do maciço. Assim, deve-se ter atenção na distinção entre as fraturas naturais e as provocadas aquando da remoção da amostra, sendo que estas últimas não devem ser consideradas no cálculo do RQD [5]. O Quadro 2.9 ilustra as classes do valor RQD bem como os respetivos pesos.

Quadro 2.9 – Pesos atribuídos às classes do parâmetro RQD

RQD (%)	Qualidade do Maciço Rochoso	Pesos
90 – 100	Excelente	20
75 – 90	Bom	17
50 – 75	Razoável	13
25 – 50	Fraco	8
0 – 25	Muito fraco	3

Outro parâmetro que por vezes surge associado à determinação do RQD de uma amostra é a percentagem de recuperação da amostra. Este indicador é calculado pelo quociente entre a soma de todos os troços recolhidos na manobra e o comprimento total teórico da amostra (Equação (2.5)).

$$\%\ Recuperação = \frac{Comprimento\ da\ amostra\ recolhida\ numa\ manobra}{Comprimento\ total\ teórico\ da\ manobra} \times 100 \qquad (2.5)$$

A representatividade deste parâmetro pode ser afetada pela qualidade do equipamento de furação, pela competência do operador e por particularidades litológicas ou formações geológicas presentes no maciço. Ainda assim, classifica-se um maciço rochoso como sendo "pouco alterado" quando se está perante valores da percentagem de recuperação superiores a 80%. Para valores inferiores a 50%, o maciço em questão encontra-se "muito alterado", sendo que entre 50% e 80%, considera-se o maciço como "medianamente alterado" [5].

2.5.4.3. Espaçamento das descontinuidades

Este aspeto, debatido no subcapítulo 2.2.2.5., diz respeito ao espaçamento entre descontinuidades pertencentes à mesma família. Assim, para a determinação do índice RMR, definiram-se intervalos de valores para o espaçamento, aos quais também se atribuíram pesos [5] (Quadro 2.10).

Quadro 2.10 - Pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades

Espaçamento (mm)	Pesos
< 60	20
60 – 200	15
200 – 600	10
600 – 2000	8
> 2000	5

2.5.4.4. Condição das descontinuidades

A condição das descontinuidades prende-se com a avaliação das suas características, sendo que estas foram já mencionadas no subcapítulo 2.2.2.. Estão representados no Quadro 2.11 os pesos atribuídos de acordo com as características das descontinuidades, definindo assim a condição das mesmas [5].

Quadro 2.11 - Pesos atribuídos à condição das descontinuidades

Condição das Descontinuidades					
Persistência	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

2.5.4.5. Influência da água

A presença de água no maciço condiciona fortemente o seu comportamento, como já foi discutido previamente neste trabalho. Assim sendo, a influência da água e da sua ação constitui também um dos parâmetros de cálculo do índice RMR. No Quadro 2.12 estão representados os vários modos como a presença da água se faz notar no maciço e os respetivos pesos, tendo em conta a sua aplicabilidade no caso de estudo [5].

Quadro 2.12 - Pesos atribuídos à presença da água

Relação pressão da água vs tensão principal máxima	Condições gerais	Pesos
0	Completamente seco	15
< 0.1	Água intersticial	10
0.1 – 0.2	Húmido	7
0.2 – 0.5	Escorrimentos	4
> 0.5	Entrada de água	0

Por fim, e depois de somados os pesos dos cinco parâmetros, atribui-se uma classe ao maciço em função do seu índice RMR básico (Quadro 2.13) [5].

Quadro 2.13 - Classificação de um maciço rochoso com base no índice RMR

Peso global	Classe	Descrição
100 – 81	I	Maciço rochoso muito bom
80 – 61	II	Maciço rochoso bom
60 – 41	III	Maciço rochoso razoável
40 – 21	IV	Maciço rochoso fraco
< 21	V	Maciço rochoso muito fraco

Esta classificação introduzida por Bieniawski permite assim fazer um zonamento do maciço a estudar, de acordo com o valor total do índice RMR básico, e depois classifica-lo em conformidade com o valor atribuído.

3

ASPETOS INERENTES À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

No presente capítulo pretende-se explicar, de uma forma sucinta, alguns dos processos implicados no tratamento de maciços de fundação com injeções de calda de cimento. O início da aplicação desta técnica remonta à primeira metade do século XX, e o seu uso tem como finalidade o melhoramento das propriedades mecânicas e hidráulicas de maciços que irão albergar as fundações de estruturas. A informação presente neste capítulo foi recolhida a partir do livro de Houlsby sobre injeções de calda de cimento [4].

"Grouting" é o processo que envolve a injeção de fluídos nos poros e vazios de meios terrosos ou em descontinuidades no caso de maciços rochosos. Normalmente, o fluido injetado é uma mistura de água com cimento, ao qual se dá o nome de calda de cimento, "grout" em inglês.

Antes da injeção propriamente dita é necessário primeiro proceder à abertura dos furos que conduzirão a calda às descontinuidades a preencher. A definição dos furos (profundidade e inclinação) depende essencialmente da presença de descontinuidades (e suas características) no maciço. Tais furos deverão ser abertos de modo a intersetar o máximo de descontinuidades possíveis (Fig. 3.1). Deste modo, a injeção de calda será melhor sucedida.

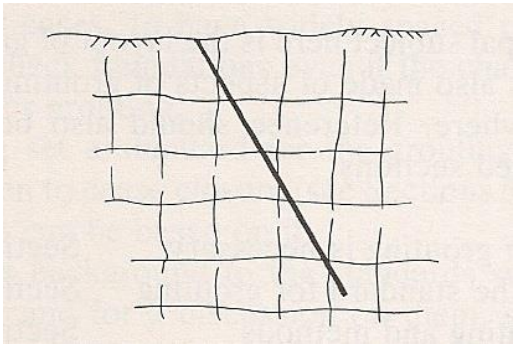

Fig. 3.1 - Execução do furo com um ângulo que permita uma melhor penetração da calda nas fissuras (Adaptado de Houlsby) [4]

Os maciços rochosos tratados com calda podem ver certas características melhoradas, nomeadamente a permeabilidade, a deformabilidade e a resistência. Referem-se seguidamente alguns dos objetivos decorrentes da aplicação de calda para melhoramento dos maciços [4]:

- Diminuição da permeabilidade de terrenos de fundação de barragens e, consequentemente, diminuição do caudal de percolação;
- Aumento da capacidade resistente do maciço;
- Impermeabilização de túneis/minas ou reforço da frente de escavação.

3.2. Equipamentos Associados à Injeção de Calda de Cimento

3.2.1. Misturadoras

Estas máquinas são utilizadas na execução da mistura da calda (Fig. 3.2). Esta, como já foi referido atrás, é essencialmente composta pela junção de água e cimento. Porventura, em certos casos poderá ser necessário acrescentar outros produtos, nomeadamente aditivos, com vista ao melhoramento da qualidade da calda. O modo como a mistura é feita influencia bastante a qualidade da calda resultante, daí a grande importância que este procedimento assume na execução de tratamentos com calda. As propriedades inerentes a uma calda de boa qualidade são [4]:

- Grãos de cimento completamente separados entre si;
- Uniformidade da calda.

Fig. 3.2 - Misturadora [14]

3.2.2. Agitadores

A calda proveniente da misturadora é armazenada nos agitadores (Fig. 3.3) até chegar o momento de ser injetada no furo. Durante o período em que permanece no agitador, a calda pode ser observada, para averiguar a sua uniformidade e o traço da mistura. Estes aparelhos vêm munidos com uma régua interior que permite medir a quantidade de calda enviada para o circuito de injeção. Conforme a dimensão da obra a realizar, é aconselhável a utilização de mais do que um agitador por forma a injetar vários furos simultaneamente.

Fig. 3.3 - Agitador [15]

3.2.3. BOMBAS

Este aparelho, como o próprio nome indica, bombeia a calda desde o agitador até ao furo. A Fig. 3.4 ilustra dois exemplos dos primeiros tipos de bombas utilizadas na injeção de fluídos, nomeadamente caldas de cimento.

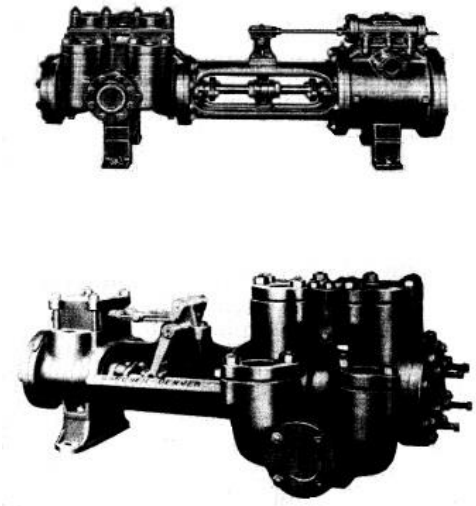

Fig. 3.4 - Formato das primeiras bombas usadas na injeção de calda [16]

Com o passar dos anos estes equipamentos sofreram modificações com vista à sua modernização, como se pode comprovar na Fig. 3.5.

Fig. 3.5 - Tipo de bomba atualmente em uso [17]

Estes novos tipos de bombas permitem controlo total sobre o caudal de calda injetada.

Porventura, poderá haver casos em que a bomba não forneça a pressão total de injeção, aliando-se a ação da bomba ao efeito da gravidade. Pode-se encontrar exemplo de tal situação na injeção de um talude de uma encosta, em que o equipamento é colocado no topo da mesma e a calda é levada pelo circuito de injeção até ao furo a injetar. A pressão de injeção desejada é inicialmente fornecida pela carga hidráulica entre a calda no agitador e a cota superficial do furo a injetar. A restante pressão de injeção é assegurada pela bomba. Para efetuar o controlo da pressão e da quantidade de calda injetada, para além de se colocar uma válvula e um manómetro junto à boca do furo, estes equipamentos são também colocados junto à saída da bomba, pois o acesso à zona do furo revela-se por vezes difícil (Fig. 3.6) [4].

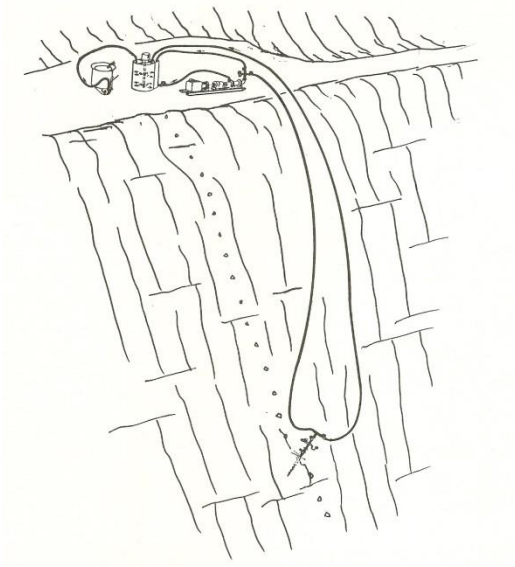

Fig. 3.6 - Injeção de um talude (Adaptado de Houlsby) [4]

3.2.4. Circuitos de Injeção

Os circuitos de injeção transportam a calda desde o agitador até ao furo. O diâmetro interior dos tubos que constituem os circuitos não deverá exceder os 25 mm por forma a promover uma certa velocidade

de circulação da calda, pois assim diminui a tendência de obstruções nos tubos e a calda chega mais fresca ao local de injeção, o que traz vantagens em termos de qualidade do tratamento [4].

Associado aos circuitos de injeção estão outros equipamentos de menor relevância, mas que importa fazer referência.

3.2.5. TUBOS DE SUSTENTAÇÃO

Os tubos de sustentação contêm entradas próprias para receber as tubagens provenientes do circuito de injeção.

Fig. 3.7 - Tubos de Sustentação [18]

Estes tubos podem, em certas situações, ser dispensados. Para tal, é necessário que a zona superficial do maciço seja minimamente competente, que a zona nas imediações do furo não se encontre fendilhada, e que a drenagem não se direcione para o furo [4]. Poderá haver casos em que os furos são emboquilhados em zonas betonadas. Nestes casos também se poderá dispensar o uso dos tubos de sustentação.

3.2.6. VÁLVULAS

As válvulas são dispositivos que controlam a entrada e saída de calda em vários locais, estando presentes perto do furo (controlo da quantidade de calda injetada) e entre o agitador e a bomba (Fig. 3.8).

3.2.7. MANÓMETROS

Estes dispositivos permitem controlar a pressão no furo, a pressão no circuito de injeção e a pressão de injeção à boca do furo (Fig. 3.8).

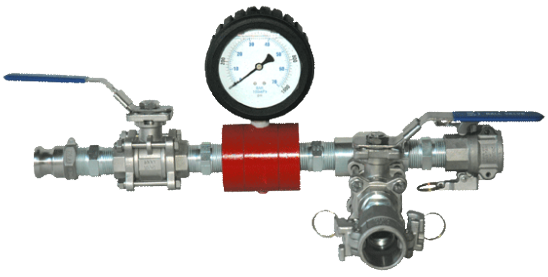

Fig. 3.8 - Válvulas e Medidor de Pressão [19]

3.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DA CALDA DE CIMENTO

Como já foi dito atrás, as duas grandes matérias-primas utilizadas na produção de calda de cimento são a água e o cimento. Relativamente a este último, o mais utilizado é o cimento Portland, sendo este um cimento hidráulico, dada a sua reatividade em presença de água [4].

A superfície específica do cimento assume normalmente valores acima dos 3000 cm^2/g, e este valor define a "finura" do material. Esta grandeza é determinada recorrendo ao método de Blaine, que consiste num ensaio onde se mede o tempo que leva uma determinada quantidade de ar a atravessar uma camada compactada de cimento com dimensões e porosidade conhecidas [20].

Existem diversos tipos de cimento, sendo de destacar [4]:

- Cimento Portland normal (referido acima);
- Cimento com rápida presa e rápido ganho de resistência;
- Cimento resistente aos sulfatos;
- Cimentos finos e microfinos (também designados de micro-cimentos).

Em certos tratamentos, é necessário dotar a calda de certas qualidades que auxiliem a sua aplicação no maciço a tratar. Assim, adicionam-se aditivos à calda por forma a colmatar as necessidades específicas de cada caso. De entre os aditivos existentes, importa salientar [4]:

- Aditivos para minimização do uso de cimento (normalmente cinzas ou filler);
- Aditivos para rápido ganho de rigidez da calda;
- Aditivos "super plastificantes" para diminuir a quantidade de água necessária na mistura;
- Aditivos para aumentar a penetrabilidade.

3.4. CALDA

3.4.1. TIPOS DE CALDA

Existem vários tipos de calda, onde cada um está vocacionado para tratar um determinado tipo de maciço terroso/rochoso. Importa salientar os seguintes [4]:

- Calda fina (maior quantidade de água relativamente ao cimento);
- Calda com elevada quantidade de cimento, com aplicação em rochas e solos de elevada granulometria (cascalhos);
- Calda argilosa, usada no tratamento de solos arenosos;
- Calda química, para aplicação em solos areno-siltosos;

- "Jet-Grouting", com aplicação em todo o tipo de solos.

De referir que tanto a calda argilosa como a calda química são raramente utilizadas dado o elevado custo de aplicação.

Relativamente ao "jet-grouting", o tratamento envolvendo esta técnica é essencialmente um tratamento de substituição e não um tratamento de injeção, pois o terreno natural é parcialmente substituído por calda. Esta técnica recorre a injeções de ar, água e calda a altas pressões a partir da extremidade de um tubo com movimento rotacional. Primeiro injeta-se água e ar para destruir a estrutura do solo circundante, depois injeta-se a calda para formar uma mistura compacta com o maciço circundante, formando assim colunas circulares de calda (resultado do movimento rotacional do tubo). Esta técnica atua no maciço da mesma forma que as injeções de calda, ajudando na impermeabilização e consolidação do terreno. A Fig. 3.9 ilustra as fases inerentes ao tratamento com "Jet-Grouting".

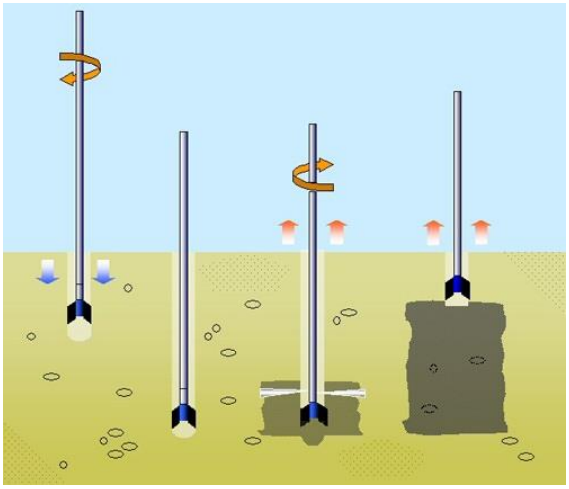

Fig. 3.9 - Esquema representativo da metodologia inerente ao "Jet-Grouting" (Adaptado de [21])

3.4.2. TRAÇO ÁGUA-CIMENTO

Um dos principais aspetos a ter em conta na execução da mistura da calda é o traço água-cimento. A dosagem da água relativamente ao cimento e vice-versa define sobretudo a espessura da mistura, que tem grande influência na penetrabilidade da calda nas descontinuidades. Adotou-se como regra definir a quantidade unitária para o cimento e a quantidade de água vem em proporção desse valor unitário do cimento. Exemplificando, uma calda de traço 3:1 consiste numa mistura com três doses unitárias de água e uma dose unitária de cimento. O traço pode vir expresso em função do volume ou do peso, sendo este último o mais usual. A conversão de um para o outro assume uma razão de valor aproximadamente 3.1, valor decorrente do quociente entre a densidade do cimento (3100 kg/m^3) e a densidade da água (1000 kg/m^3), logo o traço 1:1 em peso corresponde ao traço 3.1:1 em volume [4].

A definição do traço a utilizar deve ser feita aquando da colocação da água e do cimento na misturadora. No decorrer do processo de injeção, caso seja necessário aumentar ou diminuir a espessura da mistura, a adição de cimento ou de água, respetivamente, dever ser feita de uma forma gradual, de modo a não prejudicar a qualidade da calda resultante.

Durante a injeção de um furo, é necessário efetuar medições periódicas da quantidade de calda injetada. Tais medições podem ser feitas no agitador (com o uso de uma régua) ou recorrendo a um caudalímetro, posicionado tanto no furo como no circuito de injeção.

Também durante a injeção é necessário fazer um registo de todos os eventos ocorridos, salientando-se:

- Medições de calda antes e depois da injeção (controlo da quantidade injetada);
- Traços utilizados;
- Pressão de injeção e pressão no interior do furo;
- Detalhes sobre acidentes e acontecimentos imprevistos.

3.4.3. VISCOSIDADE E TIXOTROPIA

Uma das principais propriedades inerentes às caldas de cimento e que interferem fortemente nas injeções com calda é a viscosidade. Esta propriedade própria dos fluídos confere a estes uma resistência interna que condiciona a sua fluidez. No caso da calda, a viscosidade depende essencialmente da quantidade de cimento utilizado.

Associada à viscosidade surge também a tixotropia. Os fluídos que adotem comportamento tixotrópico, sendo a calda um dos exemplos, estão sujeitos a diminuições da viscosidade quando agitados ou sujeitos a carregamentos análogos a este. Como será de esperar, a viscosidade condiciona a penetrabilidade da calda, sobretudo perante descontinuidades de pequena dimensão [4].

3.4.4. EXSUDAÇÃO DA CALDA

Outro fenómeno que afeta o rendimento da calda é a exsudação que decorre após a injeção no furo, onde se verifica uma tendência para o cimento se separar da água. Assim, a calda mais espessa tende a migrar para a zona inferior dos furos, e a mais fina tende a ascender. Este fenómeno de exsudação é tão mais notório quanto maior a quantidade de água presente na mistura. O procedimento a efetuar para atenuar este fenómeno é retirar do furo a calda segregada, isto é, a calda mais fina e mais superficial, e substituir por calda nova de boa qualidade (Fig. 3.10).

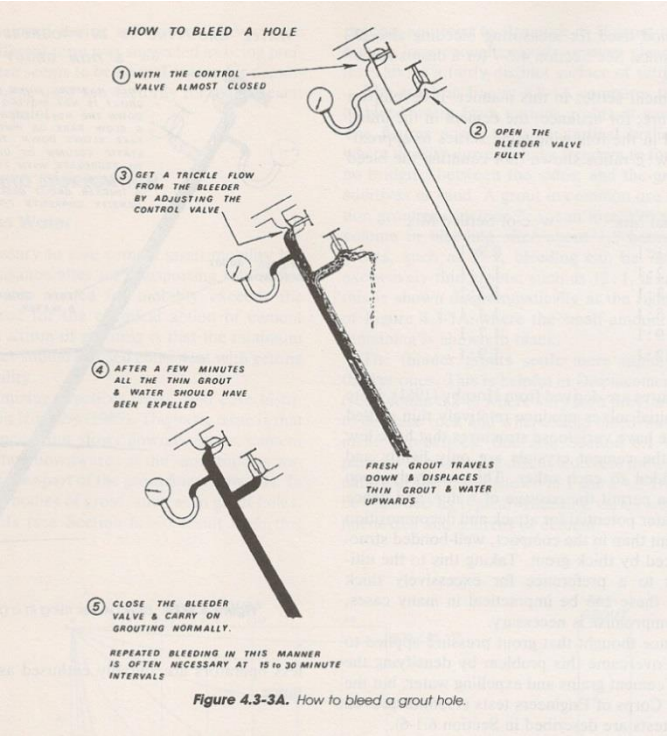

Fig. 3.10 - Procedimentos para remoção de calda afetada por exsudação e substituição por calda nova [4]

Basicamente, o procedimento passa pela ascensão ao longo do furo da calda fina resultante do fenómeno da exsudação. Essa calda será reposta por nova calda, por forma a que as descontinuidades sejam preenchidas com uma calda homogénea e de traço uniforme.

3.4.5. Ganho de Presa

O ganho de presa da calda é outro aspeto a ter em conta no tratamento. A consistência da calda, em continuidade com o que foi dito acima relativamente à exsudação, também é afetada pela quantidade de água da mistura. Deste modo, misturas finas levarão maior tempo a atingir a presa. O tempo de presa assume especial importância em maciços com elevada permeabilidade e forte percolação [4].

3.4.6. Durabilidade

O período de vida útil da calda é essencialmente condicionado por três fatores:

- Calda demasiado fina;
- Mistura mal feita;
- Técnicas de injeção inapropriadas.

Relativamente aos dois primeiros fatores, a principal consequência tem a ver com a exsudação, aspeto referido acima. Quando ocorre este fenómeno, a calda adquire piores características devido à diminuição da quantidade de cimento. Ainda relacionado com a exsudação, devido à remoção da calda segregada, formam-se vazios nas descontinuidades. Estes vazios serão preenchidos pela nova calda injetada, caso contrário, a eficácia e durabilidade da calda serão reduzidas [4].

3.4.7. Controlo de Qualidade da Calda

Existem diversas formas de controlar a qualidade da calda. Uma delas consiste na pesagem de um recipiente de volume conhecido enchido com calda (Fig. 3.11). Sabendo o volume e a massa da calda, pode-se determinar a densidade e assim comparar com os valores de referência. Este teste é o mais aplicável em condições "in situ".

Fig. 3.11 - Determinação da densidade da calda [22]

Outro método para avaliar as características da calda é a medição do tempo que demora uma porção de calda a atravessar um cone. Este teste está diretamente relacionado com a viscosidade da calda de cimento.

Fig. 3.12 - Método do cone [23]

No entanto, existe um teste bastante mais simples que permite atestar de uma maneira razoavelmente fiável a qualidade da calda efetuada. O procedimento passa pela execução de um provete de calda, de modo algo similar ao ilustrado na Fig. 3.12 que, depois de consolidado, é aberto ao meio. Caso a calda seja de boa qualidade, o interior do provete deverá ser uniforme [4].

3.5. FURAÇÃO

3.5.1. EXECUÇÃO

A abertura do furo que conduzirá a calda às descontinuidades é feita, geralmente, por percussão ou por rotação. O primeiro método é o mais usual, e consiste num conjunto de varas onde na extremidade da mais profunda está acoplada um trépano que desmonta a rocha. Os detritos decorrentes da abertura do furo são expelidos através da injeção de água e ar provenientes de um tubo contido no interior das varas. A água tem também a função de arrefecer a ferramenta de corte. O segundo método desmonta a rocha por rotação de coroas metálicas às quais estão acoplados "bits", e permite a recuperação de amostras, sendo estas acondicionadas em amostradores. O material constituinte dos "bits" é geralmente diamante ou tungsténio. Para maior detalhe sobre as metodologias de abertura dos furos, consultar o subcapítulo 2.4.1..

3.5.2. DIÂMETRO, COMPRIMENTO E ORIENTAÇÃO DOS FUROS

A geometria dos furos é um aspeto a ter em conta, nomeadamente a sua profundidade e a sua inclinação. Estes dois aspetos interferem essencialmente no número de descontinuidades intersetadas pelo furo, pelo que a sua definição tem um grande peso na eficácia das injeções.

3.5.3. TESTES COM ÁGUA

A realização destes testes compreende dois objetivos:

- Avaliação da permeabilidade do maciço;
- Estimativa da quantidade de calda que o furo (e as descontinuidades por este intersetadas) irá receber.

O teste usualmente empregue e que possibilita atingir os dois objetivos acima referidos é o ensaio de absorção do tipo "Lugeon" (já detalhado no subcapítulo 2.4.3.1.). A avaliação da permeabilidade dos maciços e o estudo do seu comportamento hidrogeológico são aspetos que assumem especial

relevância quando o terreno a tratar irá ser fundação de uma barragem. Assim, importa tomar conhecimento das condições de percolação presentes no maciço para poder projetar estruturas (cortinas de estanqueidade) que dificultem a passagem de água de montante para jusante da estrutura hidráulica. A estimativa da quantidade de calda que o furo irá receber está implícita na avaliação da permeabilidade do maciço, e permite obter uma primeira aproximação sobre o volume de calda a injetar [4]. Os resultados decorrentes da análise dos dois aspetos acima referidos recorrem à mesma unidade de medição: o "Lugeon". Este nome deriva da pessoa que formulou este método: Maurice Lugeon [24].

Aquando do dimensionamento de uma nova barragem em Portugal, é necessário ter em atenção as limitações impostas pelas Normas de Projeto de Barragens no que respeita ao valor médio da permeabilidade do maciço de fundação da estrutura. Assim, o referido regulamento indica no ponto 2.d do artigo 31º: "Na avaliação da segurança para cenários correntes, quer incluam ou não ações dinâmicas, recomenda-se que os caudais drenados na fundação, embora podendo atingir valores mais elevados em zonas muito localizadas, correspondam a valores médios da permeabilidade na zona da cortina de impermeabilização não superiores a 1 Lugeon" [25].

Numa análise menos restritiva, e tendo os resultados de ensaios de absorção do tipo "Lugeon" como referência, Houlsby propôs um fluxograma que permite ajuizar sobre a necessidade de tratamento de maciços de fundação de barragens (Fig. 3.13).

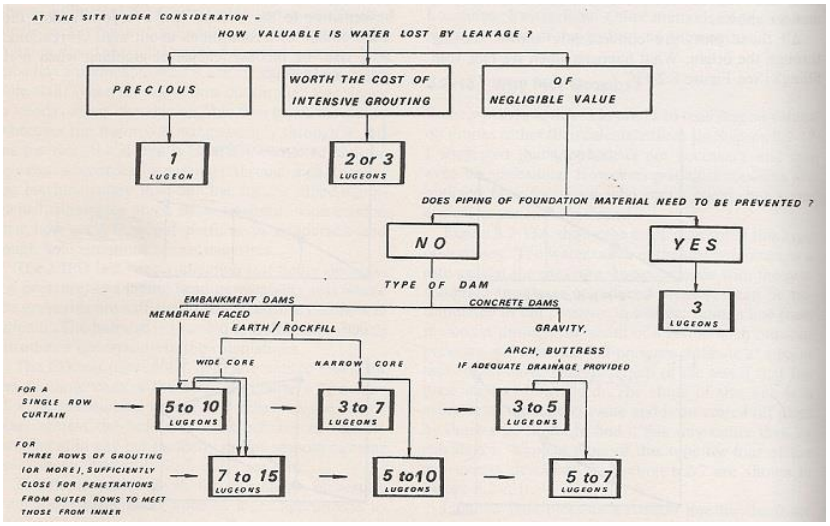

Fig. 3.13 - Fluxograma que define a necessidade de tratamento de maciços de fundação com base no "valor" da água percolada [4]

No início do fluxograma está em causa o valor económico da água que é percolada na fundação da barragem. Em zonas áridas e secas onde as albufeiras são o único método de retenção de água para consumo, o valor da mesma é demasiado elevado para que haja desperdício de água decorrente da percolação. Assim, nestes casos impõe-se que a permeabilidade do maciço não seja superior, em valores médios, a uma unidade "Lugeon". Para casos não tão extremos, considera-se valores máximos de três unidades "Lugeon".

Caso o valor da água seja desprezável, a próxima decisão tem em consideração a estabilidade hidráulica do maciço que pode ser posta em causa pelo efeito da percolação. A água percolada pode arrastar consigo o material da fundação com as características mais fracas, o que poderá condicionar as

características mecânicas e hidráulicas do maciço. Também para estes casos define-se 3 UL como valor máximo admissível.

Nas situações onde o arrastamento de material não seja condicionante, o critério passa a depender do tipo de barragem – aterro ou betão – e do número de cortinas de calda executadas. Numa primeira fase, compreende-se que se exija uma menor permeabilidade em maciços de fundação de barragens de betão do que nos de barragens de aterro, pois a estanqueidade de uma estrutura de betão é bastante superior à de uma estrutura constituída por materiais de aterro (areias, argilas, entre outros). Para estes dois tipos de estruturas, a exigência relativamente à permeabilidade será superior em barragens onde apenas é construída uma cortina de impermeabilização do que em barragens onde existam no mínimo três cortinas consecutivas situadas paralelamente entre si, pois aqui entra o peso do fator "risco". Considerando apenas uma cortina de impermeabilização, caso esta não consiga reter de um modo eficiente o fluxo de água, não há mais nenhuma barreira que impeça (ou dificulte) a percolação. Havendo mais do que uma cortina, caso a primeira não consiga impedir a percolação, as seguintes poderão sempre atenuar a circulação da água no maciço [4].

3.6. INJEÇÃO

3.6.1. FASEAMENTO DA INJEÇÃO DE CALDA

Nos casos em que os furos assumem uma profundidade relevante, é corrente adotar uma metodologia que passa pelo faseamento da injeção da calda. O faseamento da injeção do furo por troços tem várias vantagens, sendo de salientar [4]:

- Melhor qualidade da mistura entre a água e o cimento, da qual resulta uma menor exsudação da água e, consequentemente, uma calda de melhor qualidade;
- Controlo mais eficaz das pressões;
- Problemas como fugas ou conexões entre furos podem ser mais facilmente tratados.

Houlsby defende que o comprimento de cada troço deve aumentar com a profundidade, e argumenta esta opção com o efeito do estado de tensão. Este aumenta com a profundidade do maciço, e daí decorre que os troços de maior dimensão sejam executados nas zonas mais profundas do furo, pois as paredes do furo nestas zonas aguentam melhor a pressão exercida pelo maciço, o que diminui o risco de colapso do furo. Seguindo esta ideologia, os troços superficiais serão os de comprimento mais curto, dada a provável maior debilidade do maciço nestas zonas [4].

Os métodos de faseamento utilizados são, geralmente, o método ascendente ou o descendente. Ainda assim, o primeiro é mais usual e, na sua maioria, mais eficaz e barato.

3.6.2. "GROUT CAPS"

Os "grout caps" são estruturas compostas por betão, que por vezes pode ser armado, consoante as necessidades de cada caso. Estes elementos têm várias funções, sendo de salientar a estabilidade que conferem ao solo superficial de má qualidade. Estas estruturas podem também servir de suporte para a colocação dos tubos de sustentação aquando da injeção dos furos, nos casos em que o solo não apresente a consistência necessária que garanta a estabilidade do tubo e nas situações em que a construção da estrutura será feita numa fase posterior ao tratamento [4] (Fig. 3.14).

Fig. 3.14 - Execução de um "grout cap" [26]

3.6.3. "CLOSURE GROUTING"

Esta técnica é utilizada especialmente na concepção de cortinas de impermeabilização (como as referidas acima no ponto 3.5.3.). Primeiramente, procede-se à definição da localização dos furos primários da cortina. Posteriormente, executa-se um furo denominado secundário, no alinhamento dos primários e equidistante dos mesmos. Depois executam-se novamente dois furos, estes chamados terciários, equidistantes do secundário, e assim sucessivamente, até que o espaço entre os furos seja reduzido. Na Fig. 3.15 está representada a localização resultante da aplicação deste método de injeção.

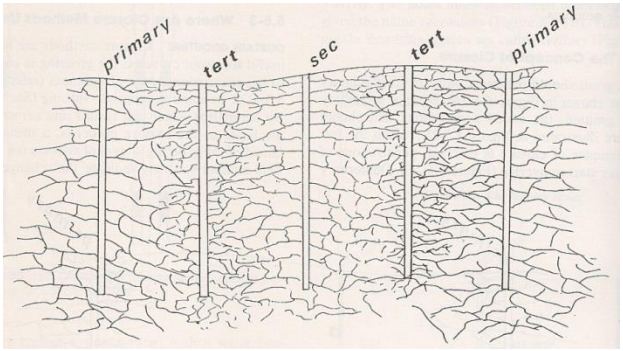

Fig. 3.15 - Execução do "closure grouting": furos "primary" correspondem aos furos primários; furos "sec" correspondem aos furos secundários e os "tert" correspondem aos terciários. [4]

3.6.4. PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES

O primeiro aspeto a salientar relativamente ao modo como a calda se desloca pelas descontinuidades tem a ver com a geometria destas. Tendo em conta o efeito da gravidade, é fácil compreender que a calda flui melhor em descontinuidades verticais em comparação com as descontinuidades horizontais. Relativamente a estas últimas, a calda penetra até ao ponto em que a pressão de injeção o permita. Obviamente que esta pressão vai diminuindo com o aumento da distância ao furo. Resultado da baixa pressão de injeção é a pouca velocidade de deslocamento da calda, o que promove o assentamento do cimento e a ascensão da água. Tal processo aumenta a probabilidade de ocorrer o fenómeno de "exsudação", que é benéfico desde que se substitua a água decorrente da exsudação por calda nova e

fresca. Tendo em conta estas dificuldades, é de esperar que a calda usada para preencher fendas horizontais seja de menor qualidade [4].

Em descontinuidades de pequena dimensão (cerca de 0.5 milímetros de abertura), as partículas de cimento de maior dimensão podem aglomerar-se e barrar, ou dificultar, a passagem da restante calda. Outra situação é a junção de várias partículas de cimento de menor dimensão, formando flocos de maior dimensão, que podem conduzir também ao bloqueamento da fenda. Ambas as situações estão representadas na Fig. 3.16.

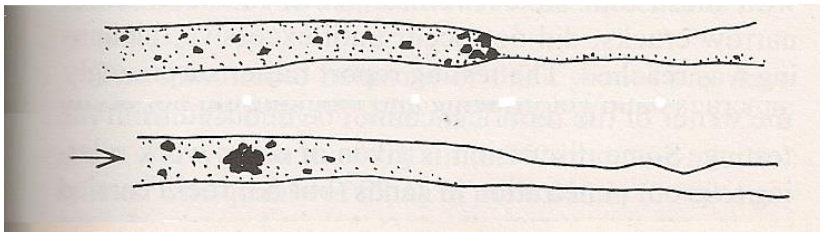

Fig. 3.16 - Bloqueamento de fendas estreitas: aglomeração de partículas de maior dimensão (cima); junção de partículas de menor dimensão formando flocos de cimento (baixo) (Adaptado de Houlsby) [4]

Outro aspeto que não tem propriamente a ver com a geometria da descontinuidade, mas sim com o ambiente geológico em que esta se insere, é a situação de terrenos áridos e secos, que têm tendência a absorver a mais ínfima porção de água, quando esta aparece. Assim, no caso de ocorrerem injeções de calda em terrenos deste tipo, é aconselhável fazer misturas com um traço água-cimento maior, pois será de prever que parte da água utilizada na mistura seja absorvida pelo terreno [4].

3.6.5. PRESSÕES DE INJEÇÃO

As pressões máximas usadas na injeção de calda deverão variar consoante a qualidade do maciço a tratar. Neste sentido, Houlsby define na Fig. 3.17 a gama de pressões a usar na injeção de calda conforme a qualidade e a competência mecânica do terreno a tratar [4].

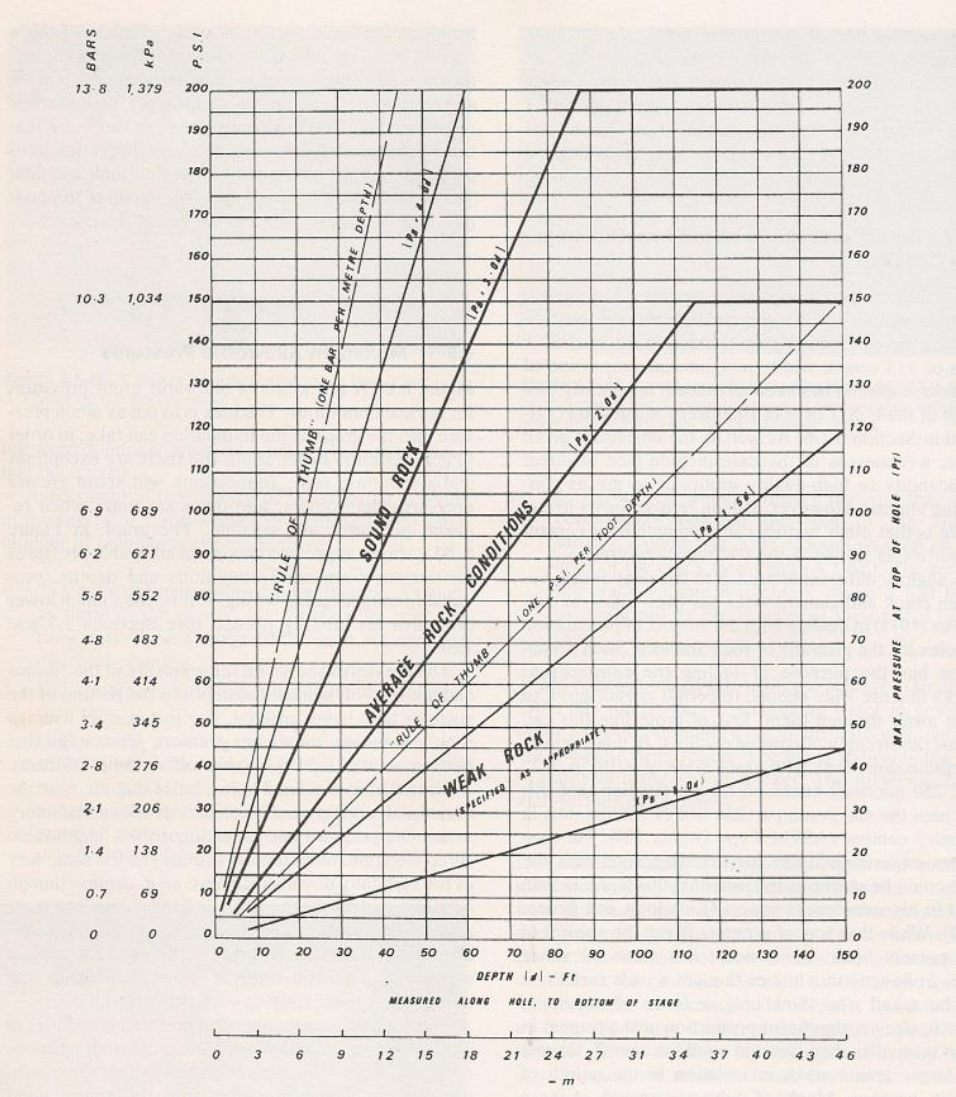

Fig. 3.17 - Gráfico onde constam as relações pressão/profundidade em função do tipo de maciço [4]

Da análise da Fig. 3.17, depreende-se que injeções em maciços constituídos por rochas de fraca qualidade deverão ser feitas a baixas pressões, por forma a evitar alterações, fragmentações ou deslocamentos do maciço. As pressões de injeção estão também dependentes da profundidade da zona do maciço a injetar. Por outro lado, e segundo Houlsby [4], tratamentos em maciços rochosos competentes, pouco fraturados e com reduzida presença de descontinuidades, permitem injeções em que a relação pressão – profundidade assume a seguinte expressão:

$$P_{máx} = 0.054 \times d \tag{3.1}$$

Onde:

- $P_{máx}$ – Pressão máxima de injeção da calda (MPa);
- d – Profundidade de injeção (m).

Na Fig. 3.17 constam também duas retas designadas "rule of thumb", uma com origem nos Estados Unidos da América, a outra originária da Europa. Estas regras foram estabelecidas com o intuito de servirem de referência para a escolha da pressão de injeção da calda. A regra americana é definida pelo valor de 1 psi/ft (uma libra por polegada quadrada (psi) por pé), enquanto que a europeia se rege pelo valor de 1 bar/m. Fazendo as devidas conversões (1 bar/m equivale a 4.57 psi/ft), chega-se à conclusão que a reta pressão – profundidade que define a "rule of thumb" europeia tem uma inclinação 4.57 vezes superior à congénere americana, pelo que esta última revela ser mais conservativa [4]. A opção europeia defende elevadas pressões de injeção pois estas podem provocar o aumento da abertura das descontinuidades, melhorando assim as condições de injeção das mesmas.

3.6.6. Fugas e Conexões

Durante a injeção de calda podem ocorrer situações em que parte (ou a totalidade) da calda injetada esteja a escapar para zonas vizinhas do local a tratar. As fugas e as conexões são as duas principais situações associadas a este problema. No que concerne ao problema das fugas, um dos métodos a empregar passa pela realização de uma calafetagem da fenda, através da colocação de materiais que detenham a fuga da calda (tecidos, pedaços de madeira, resíduos de construção, entre outros).

Fig. 3.18 - Tratamento de fugas [27]

No entanto, há situações onde esta solução não é aplicável, sendo de referir as seguintes:

- Grande número de fendas que impossibilita execução individual da calafetagem;
- Fendas de difícil acesso;
- Fendas localizadas em maciços de fraca qualidade que não suportariam a calafetagem.

Relativamente às conexões, estas consistem na ligação que por vezes se estabelece entre o furo que está a ser injetado e outros furos ainda por injetar. A magnitude da conexão pode ser avaliada pela quantidade de água (aquando da execução de ensaios de absorção do tipo "Lugeon") ou calda que sai pela abertura do furo conectado. Considerando uma situação de conexão entre dois furos, onde o furo 1 é o furo que está a ser injetado e o furo 2 é o furo conectado ao furo 1 por onde está a sair calda. Os procedimentos habituais a tomar para tratar este exemplo de conexão passam por tapar o furo 2, injetar o furo 1 até ao ponto de recusa e, passado um certo tempo, efetuar a lavagem e limpeza do furo 2 e injetar calda até ao ponto de recusa [4].

3.6.7. CONTROLO DO PROCESSO DE INJEÇÃO

O tratamento por injeções de calda não é um processo exato, pois o meio de trabalho são maciços rochosos/terrosos, que já por si introduzem incerteza, e dado que este tratamento é feito no subsolo, não há visualização direta do que está realmente a acontecer. Assim, é de enorme relevância monitorizar as injeções, pois deste modo pode-se poupar tempo e dinheiro. Mediante o controlo efetuado durante e após a injeção, tomam-se decisões relativamente ao processo executado. Este controlo pode ser feito através da análise da evolução de propriedades do maciço (permeabilidade e deformabilidade), ou através da deteção de problemas decorrentes do processo de injeção, tais como fugas, fraca qualidade da calda injetada, ou até movimentos da fundação. Quando surge algum destes problemas, e os mesmos suscitam dúvidas relativamente à qualidade do tratamento efetuado, é necessário proceder à resolução destas situações.

4

TRATAMENTO DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO DA NOVA BARRAGEM DO ALTO CEIRA

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O local de implantação da Nova Barragem do Alto Ceira (NBAC) pertence ao distrito de Coimbra, e situa-se no rio Ceira, um dos afluentes do rio Mondego, a cerca de 200 metros a jusante da antiga barragem, que será parcialmente demolida e o seu remanescente ficará submerso na albufeira da nova barragem construída. Esta tem a EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. como dono de obra, e a região onde está inserida a NBAC enquadra-se numa zona montanhosa, localizada na Serra do Açor (Fig. 4.1) [28].

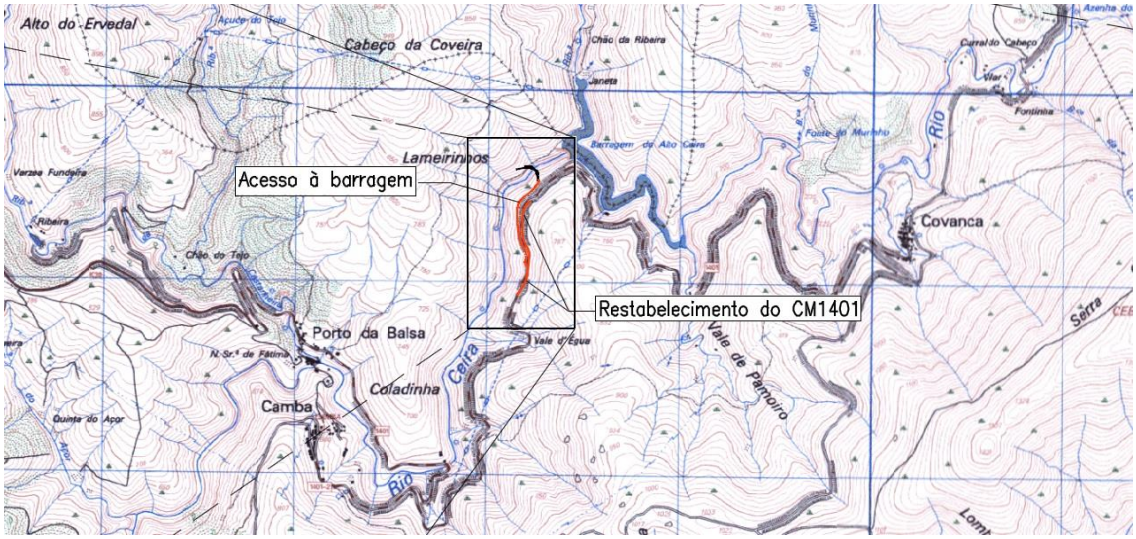

Fig. 4.1 - Enquadramento geográfico do local de construção da NBAC (Adaptado de Geonorte) [29]

A barragem tem uma altura de 41 metros e o seu coroamento um desenvolvimento de 133 metros, estando este à cota (668.50) [29]. A estrutura da barragem é uma abóbada de dupla curvatura constituída por oito blocos de betão, sendo que os dois blocos extremos constituem os encontros de perfil trapezoidal e com funcionamento por gravidade (Fig. 4.2). A albufeira da barragem tem uma capacidade de 1,3 hm^3 para nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (665.40) e 1,5 hm^3 para nível máximo de cheia (NMC) à cota (667.00).

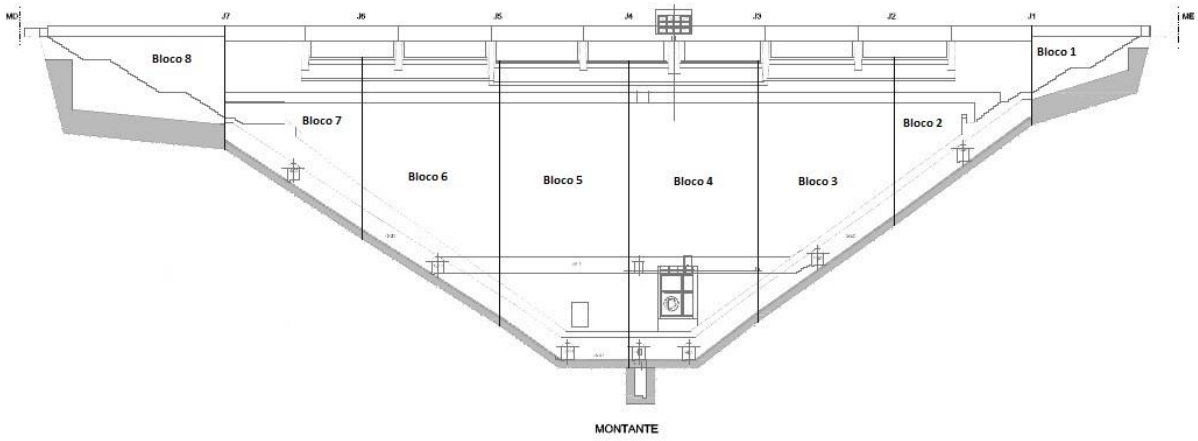

Fig. 4.2 - Alçado da estrutura da barragem (vista de montante) (Adaptado de EDP) [30]

Fig. 4.3 - Construção da Nova Barragem do Alto Ceira [31]

A NBAC tem como finalidade desviar, através de um túnel, a água retida na sua albufeira para a albufeira da barragem de Santa Luzia, localizada a cerca de 7 km do sítio onde está a ser construída a nova estrutura [32].

O tratamento da fundação da barragem iniciou-se após a construção de grande parte do corpo da mesma, e consistiu na injeção de calda de cimento no maciço de fundação, por forma a consolidar o maciço e, posteriormente, na materialização de uma cortina de impermeabilização que sirva de barreira à percolação através do maciço de fundação. Foi ainda instalada uma rede de drenagem no maciço de fundação inserida a jusante da referida cortina, sendo o seu intuito a redução das subpressões a atuar na base da estrutura (através da recolha de água através dos drenos) e também o controlo e monitorização da água percolada durante o período de vida útil da barragem. Este controlo é também realizado a partir da instalação de um sistema de piezómetros posicionado a jusante da rede

de drenagem. Coube à empresa RODIO [33] a realização de grande parte dos trabalhos inerentes a estas quatro vertentes do tratamento.

Em complemento dos trabalhos referentes ao tratamento de fundação da NBAC atrás referidos, e em antecipação a estes, há ainda a referir a execução de um conjunto de furos verticais posicionados ao longo da superfície de referência da barragem, realizados com recolha contínua de amostra, onde foram realizados ensaios de absorção de água à medida do avanço da furação. Nestes mesmos furos foram ainda realizadas duas campanhas sísmicas com medição da velocidade de propagação das ondas longitudinais, a primeira antes do início do tratamento e a segunda após a conclusão das injeções do tratamento de consolidação. A interpretação dos resultados decorrentes dos ensaios realizados nestes furos está implícita no plano de observação da barragem e do maciço sob esta, pelo que a manutenção destes furos de ensaio durante o período de vida útil da estrutura é essencial. Assim, durante o período de funcionamento da barragem, serão realizados ensaios sísmicos idênticos aos acima mencionados no sentido de avaliar a evolução das condições do maciço de fundação da NBAC.

4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

A geologia do local de implantação da barragem caracteriza-se pela ocorrência de maciços xistentos onde predominam essencialmente filádios. Na Fig. 4.4 encontra-se representada a planta geológica do maciço de fundação compreendido pela estrutura da NBAC, planta que ilustra a caracterização das superfícies escavadas imediatamente antes da betonagem dos blocos da barragem [28].

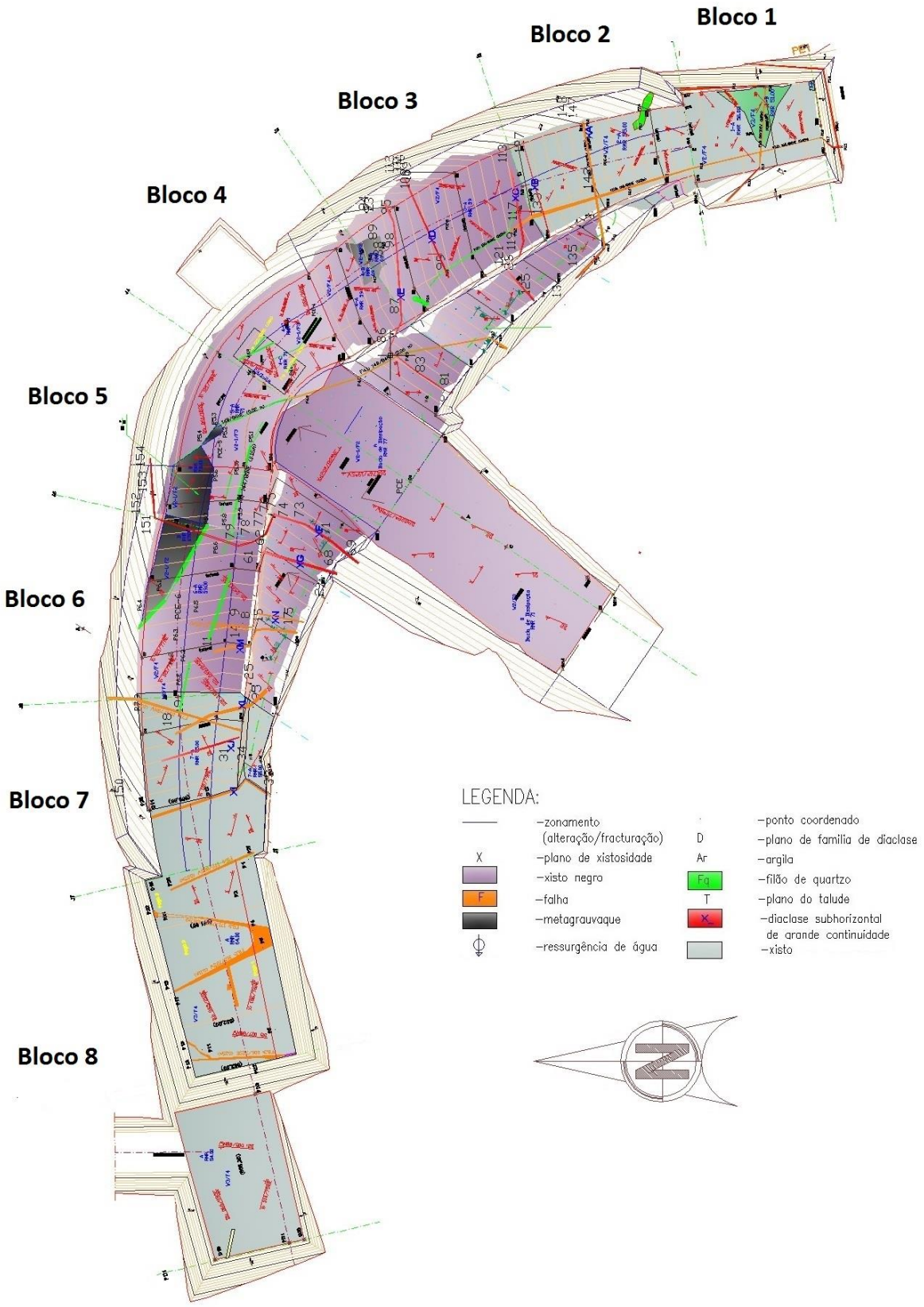

Fig. 4.4 - Planta com a caracterização geológico-geotécnica do maciço de fundação da NBAC [28]

Ao longo deste capítulo serão feitas referências a três zonas do maciço de fundação da NBAC, sendo que estas englobam a totalidade do terreno abrangido pelos oito blocos da estrutura. Assim, considera-se a zona da margem esquerda (blocos 1, 2 e 3), a zona do fundo do vale (blocos 4 e 5) e a zona da margem direita (blocos 6, 7 e 8). Como se irá constatar ao longo do presente capítulo, estas três zonas irão apresentar diferentes características que influenciarão o tratamento a efetuar.

4.2.1. LITOLOGIA

Referem-se de seguida os principais tipos de rocha identificados no maciço de fundação da NBAC.

4.2.1.1. Xisto

O xisto, também designado de filádio cinzento escuro mais ou menos grafitoso, possui um grau de alteração W3 e de fraturação F3, como resultado da elevada xistosidade (fechada) e da presença de várias diáclases [28]. Este tipo de formação é característica da zona dos blocos 1, 2, 7 e 8.

4.2.1.2. Xisto negro

A presença do xisto negro (filádio negro) é sobretudo visível a cotas mais baixas (zona do fundo do vale). Este tipo de rocha possui um maior espaçamento entre as descontinuidades, e o seu grau de alteração é reduzido [28].

4.2.1.3. Metagrauvaque

Esta formação encontra-se disseminada na zona dos blocos 3, 4, 5 e 6. Trata-se de uma rocha com tonalidade cinzenta e pouca xistosidade. As descontinuidades detetadas nesta rocha têm abertura de pequena dimensão (0.1 a 1 mm), sem preenchimento [28].

4.2.1.4. Grauvaques

Verifica-se a presença deste tipo de formação rochosa na zona dos encontros (bloco 1 e 8), logo nas zonas de cota mais elevada. O seu grau de alteração varia entre W3 e W4, sendo a fraturação classificada como F4. Contém descontinuidades com abertura entre 1 e 5 mm, sendo que algumas possuem preenchimento de vénulas de quartzo ou argila [28].

4.2.2. ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

Seguidamente são apresentadas as estruturas geológicas observadas na superfície de fundação da barragem, bem como algumas das suas características. Encontram-se também representados os estereogramas contendo a orientação dos acidentes geológicos identificados em cada uma das três zonas do maciço (margem esquerda, margem direita e fundo do vale).

4.2.2.1. Xistosidade

Os planos de xistosidade assumem, no geral, a orientação N104°-121°E; 75°-84°NE. O maciço apresenta dois tipos de xistosidade no que às características geomecânicas diz respeito. Assim, identificou-se [28]:

- Rocha muito a medianamente alterada – xistosidade com espaçamento 0.50-1.00 cm, grande continuidade, abertura 0.10-1.00 mm, com preenchimento de vénulas de quartzo;

- Rocha medianamente a pouco alterada – xistosidade com espaçamento 0.50-1.00 cm, grande continuidade, abertura 0.00-0.10 mm, sem preenchimento.

4.2.2.2. Diáclases

As diáclases observadas foram agrupadas em famílias subhorizontais e subverticais. No Quadro 4.1 estão representadas as orientações e características de cada família identificada [28].

Quadro 4.1 - Orientação e caracterização das principais famílias de diáclases identificadas

Famílias de Diáclases		
	Orientação	Características
Sub-Horizontais	N72°-81°W; 10°-30°SW	Diáclases extensas, com espaçamento 0.10-1.00 m, predominantes na margem esquerda
	N07°-70°E; 07°-19°NW	Diáclases extensas, com espaçamento 0.45-1.50 m, presentes na margem esquerda e fundo do vale
	N21°-70°E; 08°-34°SE	Diáclases extensas, com espaçamento 0.10-0.60 m, presentes na margem direita
	N21°-70°E; 15°-21°SE	Diáclases extensas, com espaçamento 0.10-0.60 m, presentes no fundo do vale
Sub-Verticais	N00°-30°E; 60°-90°NW	Diáclases extensas, com espaçamento 0.55-1.10 m
	N02°-30°E; 63°-86°SE	Diáclases extensas, com espaçamento 0.50-1.00 m, predominantes na margem direita
	N00°-10°W; 60°-86°NE	Espaçamento 0.17-1.10 m, localizadas na zona do bloco 1

4.2.2.3. Filões e Vénulas de Quartzo

Estas formações encontram-se na sua maioria na zona do fundo do vale, sendo o seu grau de alteração classificado como pouco alterado ou são. Assim, naquela zona a orientação preferencial dos filões é dada por N148°-122°E; 79°-84°NE [28].

4.2.2.4. Falhas

No âmbito do levantamento geológico realizado aquando das escavações do maciço, foram detetadas algumas falhas que foram agrupadas em famílias. Importa salientar as seguintes [28]:

- N100°-130°E; 10°-12°SW com possança média de 0.05 m;
- N64°-68°E; 06°-10°SE com possança média de 0.10 m;
- N148°-171°E; 71°-84°NE com possança média de 0.04 m.

De um modo geral, as falhas possuem enchimento composto por argilas ou vénulas de quartzo.

Seguidamente representam-se as três projeções estereográficas referentes a cada uma das zonas do maciço (margem esquerda e direita, e fundo do vale), onde constam as orientações das principais estruturas geológicas acima mencionadas.

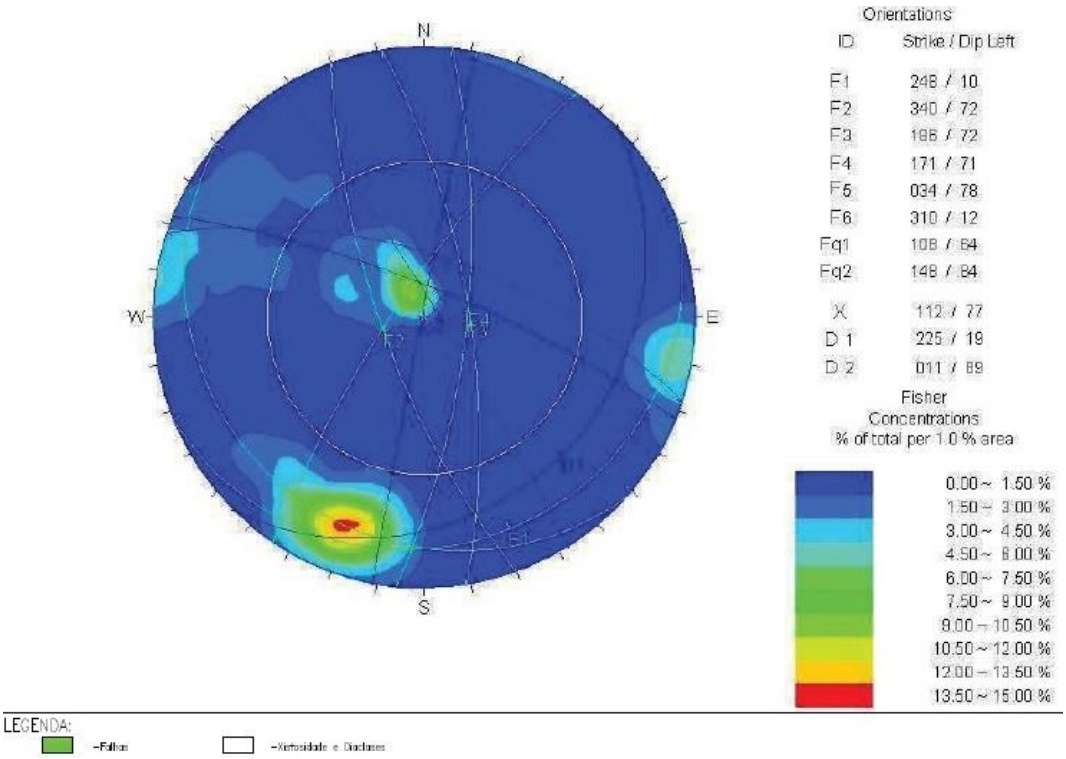

Fig. 4.5 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona da margem esquerda (Adaptado de Geonorte) [28]

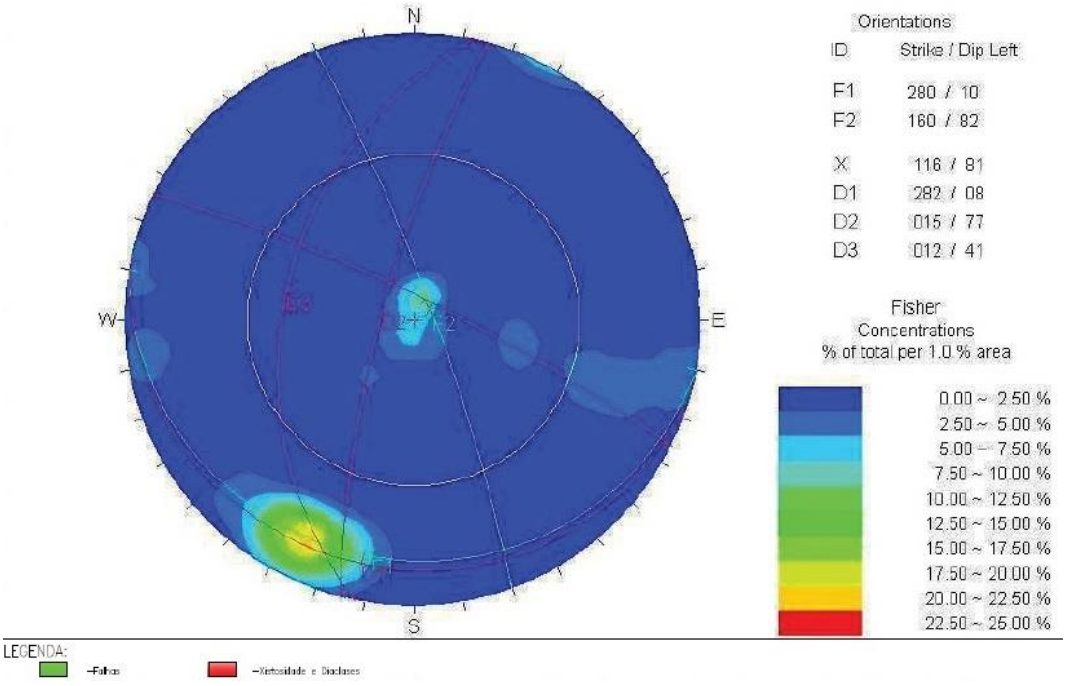

Fig. 4.6 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona da margem direita (Adaptado de Geonorte) [28]

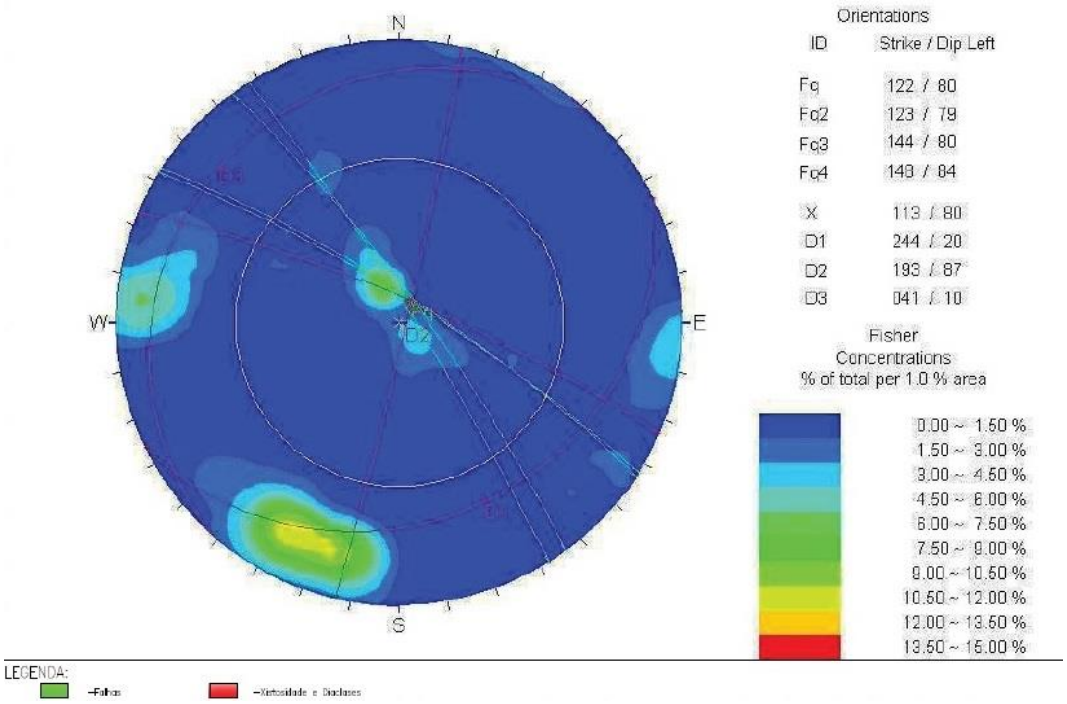

Fig. 4.7 - Estereograma onde constam as orientações das principais estruturas geológicas presentes na zona do fundo do vale (Adaptado de Geonorte) [28]

4.3. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA E CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA

4.3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

No âmbito da empreitada do tratamento do maciço de fundação da NBAC, procedeu-se a uma campanha de prospeção que compreendeu a realização de oito furos verticais, cada um situado sensivelmente no centro de cada um dos blocos da barragem. Estes furos foram abertos com o intuito de recolher amostras do maciço e permitir a realização de ensaios para caracterização do mesmo. Assim sendo, foram executados com um diâmetro de três polegadas, e feitos de forma a permitir a recuperação de amostra. Os furos FE 1, FE 2, FE 4 e FE 5 atingiram uma profundidade próxima dos trinta metros, enquanto que a profundidade atingida pelos restantes se fixou nos quinze metros. Nestes furos foram realizados ensaios de absorção do tipo "Lugeon" e ensaios sísmicos envolvendo leques sísmicos [34]. A Fig. 4.8 indica a localização dos oito furos de ensaio referidos, sendo que os furos 1, 2 e 3 pertencem à zona da margem esquerda, os furos 4 e 5 compreendem a zona do fundo do vale e os furos 6, 7 e 8 abrangem a zona da margem direita.

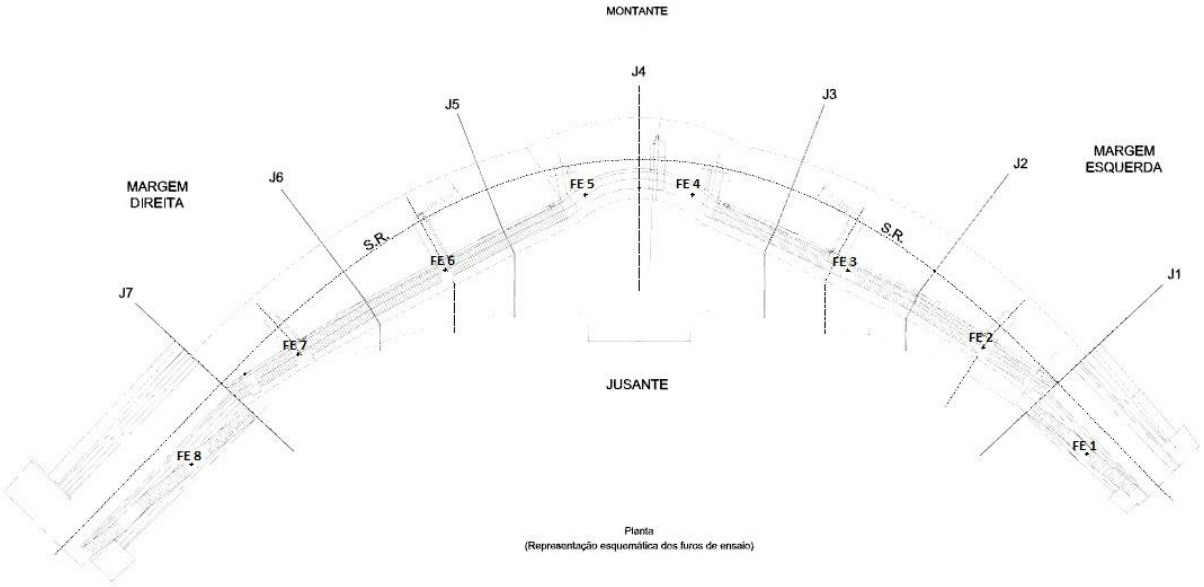

Fig. 4.8 - Localização dos furos de ensaio (Adaptado de EDP) [30]

Estes furos de ensaio foram revestidos após a sua abertura e realização dos ensaios de absorção de água, por forma a poderem ser reutilizados para execução de novos ensaios sísmicos após a finalização dos trabalhos. A sua utilização futura servirá para proceder a novas campanhas de observação/monitorização durante o período de vida útil da barragem.

Importa ainda fazer referência aos resultados decorrentes duma campanha de prospeção que incluiu, entre outros trabalhos, a execução de ensaios com dilatómetro em furos de sondagem. Esta campanha data da década de 90 e foi realizada no âmbito da fase de projeto da obra. Efetuaram-se ensaios com o dilatómetro em três furos de sondagem, um dos furos localizado na margem esquerda (S_2), outro na margem direita (S_6) e o terceiro (S_4) estava situado junto à fronteira entre a margem direita e a zona do fundo do vale. Os procedimentos associados a estes ensaios foram idênticos aos descritos no subcapítulo 2.4.2.2.. Assim sendo, analisaram-se as deformações obtidas em quatro direções desfasadas de 45° entre si a várias profundidades dos furos de sondagem, sendo que a orientação da direção 1 foi aproximadamente N130°E. Esta direção foi praticamente coincidente com a xistosidade presente na zona próxima dos furos. Como consequência, foi a direção 1 que apresentou os valores mais elevados do módulo dilatométrico, tendo atingido a deformação mínima de 3 μm, a que correspondeu o valor máximo do módulo dilatométrico de 54.3 GPa (Furo S_2 à profundidade de 22.0 m). Em oposição, as direções 3 e 4 foram aquelas que conduziram a valores mais baixos do módulo dilatométrico (valores da ordem do 1 GPa – furo S_4 à profundidade de 16.0 m – associados a deformações superiores a 100 μm), evidenciando a presença de anisotropia no terreno. Em média, verificou-se que os valores obtidos compreenderam um intervalo de 10 a 25 GPa nas zonas mais profundas dos furos S_2 e S_4, e 5 GPa nas zonas mais superficiais. Relativamente ao furo S_6, os valores obtidos foram bastante menores (entre 2 a 5 GPa até para zonas mais profundas) [34].

4.3.2. ANÁLISE DAS AMOSTRAS RECOLHIDAS

A RODIO [33] efetuou o registo das características das amostras recolhidas aquando da abertura dos furos de ensaio atrás mencionados [35]. Os testemunhos decorrentes da recuperação das amostras foram analisados tendo em conta os seguintes parâmetros: grau de fraturação, grau de alteração, valor do RQD e valor da percentagem de recuperação de amostra. O estudo destes parâmetros permitiu efetuar um primeiro zonamento do maciço, tanto em profundidade (troços analisados de cinco em cinco metros) como ao longo do desenvolvimento do mesmo. Importa referir que a descrição do conceito de cada um dos quatro parâmetros referidos encontra-se no subcapítulo 2.5 da presente dissertação.

4.3.2.1. Grau de Fraturação

No Quadro 4.2 estão representados os valores (em função da profundidade) do grau de fraturação de cada uma das zonas compreendidas pelos oito blocos da barragem.

Quadro 4.2 - Grau de fraturação do maciço com base nas amostras recolhidas

Grau de Fraturação									
	FE 1	FE 2	FE 3	FE 4	FE 5	FE 6	FE 7	FE 8	Valor Médio (intervalos de profundidade)
0 – 5 m	F3	F4	F4	F3	F4	F4	F4	F4	F4
5 – 10 m	F4	F4	F4	F3	F4	F4	F3	F4	F4
10 – 15 m	F2	F3	F4	F3	F4	F4	F4	F4	F4
15 – 20 m	F2	F4	-	F4	F4	-	-	-	F4
20 – 25 m	F4	F3	-	F4	F4	-	-	-	F4
25 – 30 m	F3	F4	-	F4	F4	-	-	-	F4
Valor Médio (Furo)	F3	F4	F4	F3-F4	F4	F4	F4	F4	F4

Da análise do Quadro 4.2 depreende-se que se está perante um maciço bastante homogéneo, que apresenta um grau de fraturação F3-F4, a que corresponde um maciço com descontinuidades medianamente afastadas/próximas entre si. A zona da margem esquerda (FE 1, FE 2 e FE 3) é a que apresenta melhores valores do grau de fraturação, havendo até zonas do maciço (FE 1) onde se encontram fraturações da classe F2.

4.3.2.2. Grau de Alteração

Apresentam-se no Quadro 4.3 os valores (em função da profundidade) do grau de alteração do maciço sob os oito blocos da NBAC.

Quadro 4.3 - Grau de alteração do maciço com base nas amostras recolhidas

Grau de Alteração									
	FE 1	FE 2	FE 3	FE 4	FE 5	FE 6	FE 7	FE 8	Valor Médio (intervalos de profundidade)
0 - 5 m	W3	W3	W3	W1	W1	W2	W2	W3	W2-W3
5 - 10 m	W3	W2	W2	W1	W1	W1	W1	W2	W1-W2
10 - 15 m	W2	W1	W1	W1	W2	W2	W2	W2	W2
15 - 20 m	W1	W1	-	W1	W2	-	-	-	W1
20 - 25 m	W2	W1	-	W1	W2	-	-	-	W1-W2
25 - 30 m	W1	W1	-	W3	W2	-	-	-	W1-W2
Valor Médio (Furo)	W2	W1-W2	W2	W1	W2	W2	W2	W2	W2

Após observar o Quadro 4.3, conclui-se que o maciço sob a barragem apresenta um grau de alteração compreendido pelas classes W1 e W2. A zona do fundo do vale (FE 4 e FE 5) é aquela que se apresenta menor alterada, sobretudo na zona mais superficial. As zonas associadas às duas margens são bastante similares no que respeita ao estado de alteração. O maciço, nestas duas zonas, apresenta uma certa heterogeneidade nas classificações atribuídas (desde W1 até W3).

4.3.2.3. RQD

Como foi dito acima, avaliou-se a evolução do parâmetro RQD no maciço. O Quadro 4.4 ilustra os valores obtidos para os oito furos de ensaio.

Quadro 4.4 - Valores do RQD do maciço com base nas amostras recolhidas

RQD (%)									
	FE 1	FE 2	FE 3	FE 4	FE 5	FE 6	FE 7	FE 8	Valor Médio (intervalos de profundidade)
0 – 5 m	84	64	29	90	55	48	54	37	58
5 – 10 m	66	59	50	87	52	51	76	30	59
10 – 15 m	80	63	78	67	71	30	56	36	60
15 – 20 m	87	72	-	42	44	-	-	-	61
20 – 25 m	51	88	-	38	64	-	-	-	60
25 – 30 m	89	80	-	37	28	-	-	-	59
Valor Médio (Furo)	76	71	52	60	52	43	62	34	56

É na margem esquerda que se encontram os valores de RQD mais elevados. Por oposição, a margem direita é aquela onde se observam os valores mais baixos de RQD. Os valores de pico verificam-se na zona superficial do fundo do vale, sobretudo no FE 4. É ainda importante referir que o valor médio do RQD mantém-se constante independentemente da profundidade, como se pode observar na última linha do Quadro 4.4. A representatividade destes valores pode carecer de alguma fiabilidade, dado que a fraturação das amostras recuperadas pode ser condicionada pela maneira como a recuperação é feita (qualidade do operador encarregue da recolha da amostra, qualidade do equipamento utilizado, entre outros aspetos).

4.3.2.4. Percentagem de Recuperação

Importa também avaliar a percentagem de recuperação das amostras recolhidas. Assim, o Quadro 4.5 apresenta os valores obtidos para o parâmetro em causa.

Quadro 4.5 - Percentagem de recuperação das amostras recolhidas

Percentagem de Recuperação (%)									
	FE 1	FE 2	FE 3	FE 4	FE 5	FE 6	FE 7	FE 8	Valor Médio (intervalos de profundidade)
0 – 5 m	100	100	69	100	100	100	100	100	96
5 – 10 m	100	100	89	100	100	100	100	100	99
10 – 15 m	100	100	100	100	100	100	100	100	100
15 – 20 m	100	100	-	100	100	-	-	-	100
20 – 25 m	100	100	-	100	100	-	-	-	100
25 – 30 m	100	100	-	100	100	-	-	-	100
Valor Médio (Furo)	100	100	86	100	100	100	100	100	98

A informação contida no Quadro 4.5 é clara: com a exceção do FE 3, todos os outros furos forneceram testemunhos com a totalidade da recuperação.

4.3.3. Ensaios de Absorção do Tipo "Lugeon"

Os ensaios de absorção foram realizados em troços de cinco metros de comprimento e com cinco escalões de pressão estabilizada, cada patamar com uma duração de dez minutos. A pressão nos patamares evoluiu em profundidade (Quadro 4.6) [34].

Quadro 4.6 - Patamares de pressão adotados para os ensaios "Lugeon" realizados nos furos de ensaio

Patamares de Pressão	
Troços	Pressão (Mpa)
0 – 5 m	0.15 - 0.3 - 0.6 - 0.3 - 0.15
5 – 10 m	0.2 - 0.4 - 0.8 - 0.4 - 0.2
> 10 m	0.25 - 0.5 - 1.0 - 0.5 - 0.25

O Quadro 4.7 apresenta os valores decorrentes dos ensaios "Lugeon" efetuados nos furos de ensaio [36], estruturados em troços de cinco metros.

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de ensaio

Resultados dos Ensaios Lugeon									
		FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FE7	FE8
0 – 5 m	Regime Escoamento	VT1	TURB	VT2	VT1	VT2	VT1	VT1	VT1
	UL	57	15	55	39	43	68	69	59
5 – 10 m	Regime Escoamento	VT2	VT2	VT2	VT2	-	VT2	VT1	VT
	UL	23	17	28	12	0	28	46	Sem Registo
10 – 15 m	Regime Escoamento	VT	COLMAT	LAM	MOB. MAT	-	LAM	VT	VT
	UL	Sem Registo	10	3	10	0	7	Sem Registo	Sem Registo
15 – 20 m	Regime Escoamento	COLMAT	-	-	COLMAT	-	-	-	-
	UL	9	0	-	2	0	-	-	-
20 – 25 m	Regime Escoamento	TURB	-	-	LAM	-	-	-	-
	UL	9	0	-	2	0	-	-	-
25 – 30 m	Regime Escoamento	-	COLMAT	-	TURB	-	-	-	-
	UL	0	1	-	1	0	-	-	-

Antes de qualquer análise, importa explicar dois aspetos sobre o Quadro 4.7. O primeiro está relacionado com a nomenclatura dada aos regimes de escoamento identificados. Foram registados casos de vazão total ("VT"), escoamentos turbulentos ("TURB"), escoamentos laminares ("LAM"),

colmatação de fraturas ("COLMAT") e mobilização de materiais ("MOB. MAT"). O segundo diz respeito aos valores registados para as absorções nos casos em que se verificaram escoamentos do tipo "vazão total". Para este regime de escoamento adotaram-se três nomenclaturas: "VT", "VT1" e "VT2". A primeira ("VT") diz respeito a troços onde não houve condições para efetuar o ensaio devido às grandes absorções de água verificadas. A designação "VT1" está associada a resultados dos ensaios "Lugeon" para o 1º patamar de pressões, tendo-se verificado em troços onde não foi possível alcançar os dois patamares de pressão seguintes. Por fim, a nomenclatura "VT2" está relacionada com resultados "Lugeon" decorrentes do 2º patamar de pressões, tendo sido impossível nestes troços atingir a pressão máxima de injeção de água.

Observando agora o Quadro 4.7, depreende-se que os furos de ensaio FE6, FE7 e FE8, pertencentes à zona da margem direita, conduziram em toda a sua profundidade a situações de escoamentos do tipo "vazão total", com absorções na ordem das 70 unidades "Lugeon" na zona mais superficial. Em zonas mais profundas, houve casos em que não houve condições para a realização do ensaio, como indicam as situações "Sem Registo". Na margem esquerda (FE1, FE2 e FE3), as situações de "vazão total" verificaram-se essencialmente nas zonas mais superficiais, sendo que os troços mais profundos registaram desde absorções nulas até absorções na ordem dos 9 "Lugeons". A zona do fundo do vale (FE4 e FE5) foi aquela onde se verificaram menores absorções, sendo este um bom indicador da melhor qualidade desta zona face às outras duas, no que às propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço diz respeito. Nota-se ainda uma tendência para a diminuição da absorção com o aumento da profundidade. É também importante analisar com maior detalhe os regimes de escoamento verificados durante a realização destes ensaios (Quadro 4.8).

Quadro 4.8 - Regimes de escoamento registados nos troços dos furos de ensaio

Regimes de Escoamento								
	Margem Esquerda		Fundo do Vale		Margem Direita		Global	
Tipo de Escoamento	Nº de casos	%	Nº de casos	%	Nº de casos	%	Nº de casos	%
Laminar	1	6,7	1	8,3	1	11,1	3	8,3
Turbulento	2	13,3	5	41,7	0	0,0	7	19,4
Dilatação	4	26,7	1	8,3	0	0,0	5	13,9
Vazão Total	6	40,0	3	25,0	8	88,9	17	47,2
Mob. Materiais	2	13,3	2	16,7	0	0,0	4	11,1
Total	15	100	12	100	9	100	36	100

Pela análise do Quadro 4.8, fica novamente patente a grande ocorrência de regimes de vazão total na margem direita (88.9%), indicando a presença de descontinuidades com grande abertura e reforçando a menor qualidade desta zona. A margem esquerda, como já foi dito atrás, apresentou situações de vazão total nas zonas mais superficiais. Em profundidade, detetaram-se sobretudo escoamentos do tipo turbulento e situações de colmatação das fraturas. Na zona do fundo do vale, observou-se essencialmente ocorrência de escoamentos do tipo turbulento (41.7%). As situações de mobilização de material (4 casos – 11.1 %) e os escoamentos laminares (3 casos – 8.3 %) foram os que menos se registaram em todo o maciço de fundação.

4.3.4. ENSAIOS SÍSMICOS

A prospeção sísmica foi feita com recurso à técnica de leques sísmicos entre furos. Através dos ensaios sísmicos foi possível fazer um novo zonamento do maciço, desta vez baseado na velocidade de propagação das ondas longitudinais. Os dois primeiros aspetos que importa salientar são a menor qualidade do maciço nas zonas mais superficiais (devido à descompressão decorrente das escavações efetuadas) e o aumento da qualidade do maciço com a profundidade. Numa análise mais local, foi possível depreender que a zona da margem direita apresenta menores velocidades de propagação das ondas "P" (2500 m/s na zona superficial), sendo que estes valores evidenciam uma menor qualidade do maciço nesta zona. Um dos aspetos que pode ter contribuído para tais valores foi a presença de algumas estruturas geológicas (falhas e descontinuidades já identificadas na Fig. 4.6 do subcapítulo 4.2.2.). A margem esquerda apresenta velocidades de propagação sensivelmente semelhantes às da margem direita, onde também se denota a presença de alguns acidentes geológicos. Daqui se conclui que esta zona apresenta também menores características mecânicas. A zona do fundo do vale e as zonas nas margens com maior profundidade apresentam elevadas velocidades de propagação das ondas de compressão (valores superiores a 4500 m/s, com exceção da margem esquerda, onde os valores máximos rondam os 3500 m/s) [37]. A Fig. 4.9 contém a representação do diagrama de iso-velocidades referente aos valores da velocidade de propagação das ondas de compressão ao longo do maciço, bem como a localização dos principais acidentes geológicos detetados no terreno de fundação.

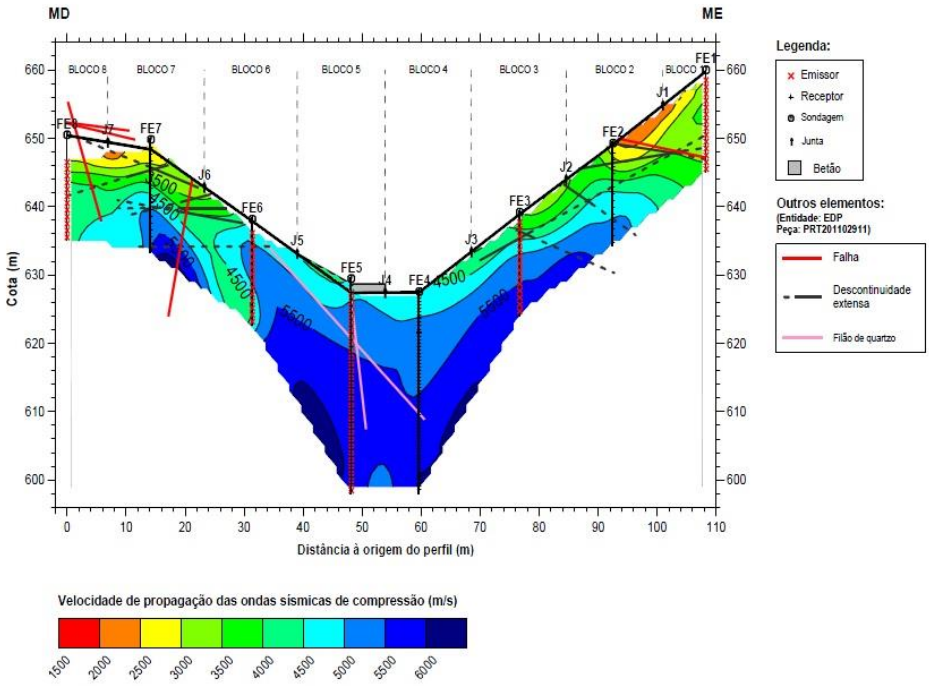

Fig. 4.9 - Diagrama com a representação da variação das velocidades de propagação das ondas de compressão e com o pormenor da localização dos principais acidentes geológicos ao longo do maciço de fundação antes do início do tratamento [37]

4.4. TRATAMENTO DE CONSOLIDAÇÃO

4.4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Pretendeu-se com a realização do tratamento de consolidação do maciço de fundação que este visse melhoradas as suas propriedades mecânicas, nomeadamente deformabilidade e resistência ao corte.

Assim, procedeu-se à injeção de calda de cimento com vista ao preenchimento das descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Tal injeção foi precedida por uma lavagem dos furos reunidos em grupos. Esta lavagem tem como objetivo a remoção do material de enchimento das descontinuidades, por forma a que a calda injetada possa preencher o espaço previamente ocupado por aquele material.

Este tratamento incidiu principalmente nas zonas onde o estado de tensão incremental é mais elevado, sendo este decorrente da construção e funcionamento da barragem. Por sinal, as zonas com maior estado de tensão incremental corresponderam na sua maioria às zonas afetadas pela descompressão decorrente das escavações [34].

A injeção foi feita a partir de furos emboquilhados na sua maioria na galeria geral de drenagem da barragem, sendo dispostos em leques com orientação transversal ao corpo da estrutura (Fig. 4.10). Tal disposição permite uma maior concentração de injeção de calda ao longo do volume do maciço abrangido pelas injeções de consolidação, e melhora substancialmente a ligação betão-rocha, sendo esta zona de contacto a que mais sofreu com as escavações (fraturação decorrente do uso de explosivos e da exposição a agentes de meteorização) [34].

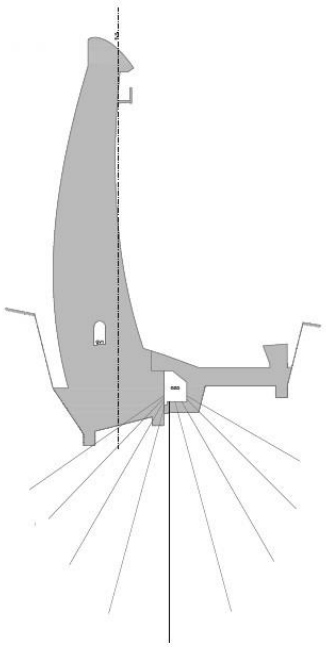

Fig. 4.10 - Disposição em leque adotada para os furos de consolidação (Adaptado de EDP) [38]

O volume do maciço a consolidar foi determinado pela envolvente mais condicionante (1.0 MPa) dos estados incrementais de tensão originados pela combinação de ações correspondentes aos cenários de dimensionamento utilizados [34].

O critério usado na disposição dos leques foi baseado num afastamento dos perfis próximo dos cinco metros. Tendo em conta que a dimensão mínima dos blocos rondava os quinze metros, daí resultou a distribuição mínima de três leques por bloco. Contudo, como resultado do critério acima descrito, houve blocos que compreenderam a execução de 4 e 5 perfis [34]. Assim sendo, nesta obra foram considerados quinze perfis de consolidação na margem direita (PCD's 1 a 15) e treze na margem

esquerda (PCE's 1 a 13), sendo que os perfis PCE 11, 12 e 13 e PCD 12, 13, 14 e 15 estão localizados na zona do fundo do vale (Fig. 4.11 e Fig. 4.12).

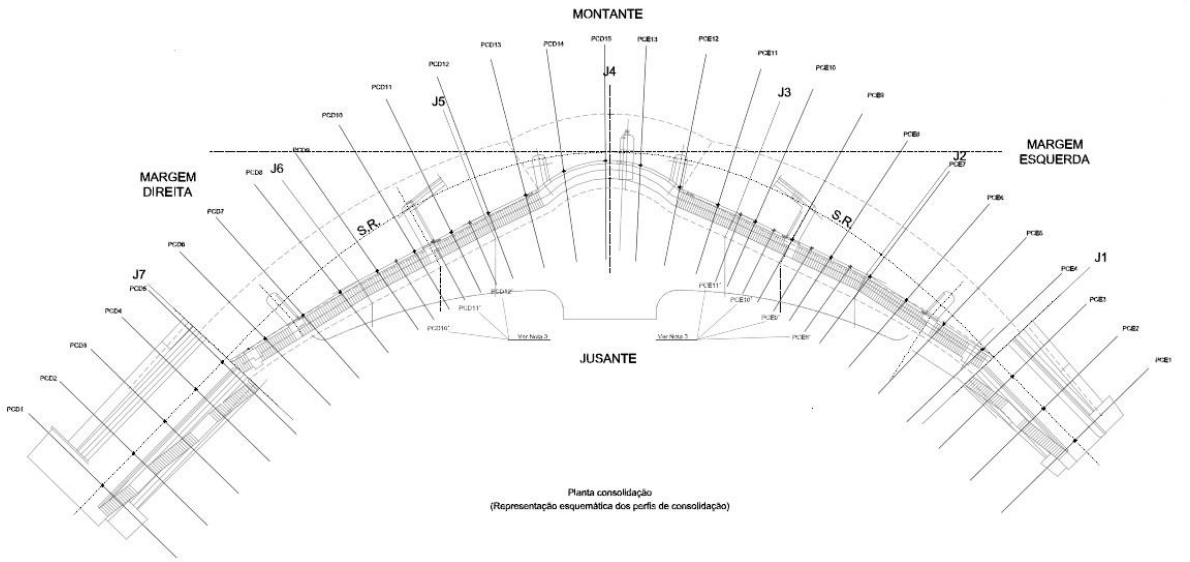

Fig. 4.11 - Planta com o pormenor da localização dos perfis de consolidação (Adaptado de EDP) [38]

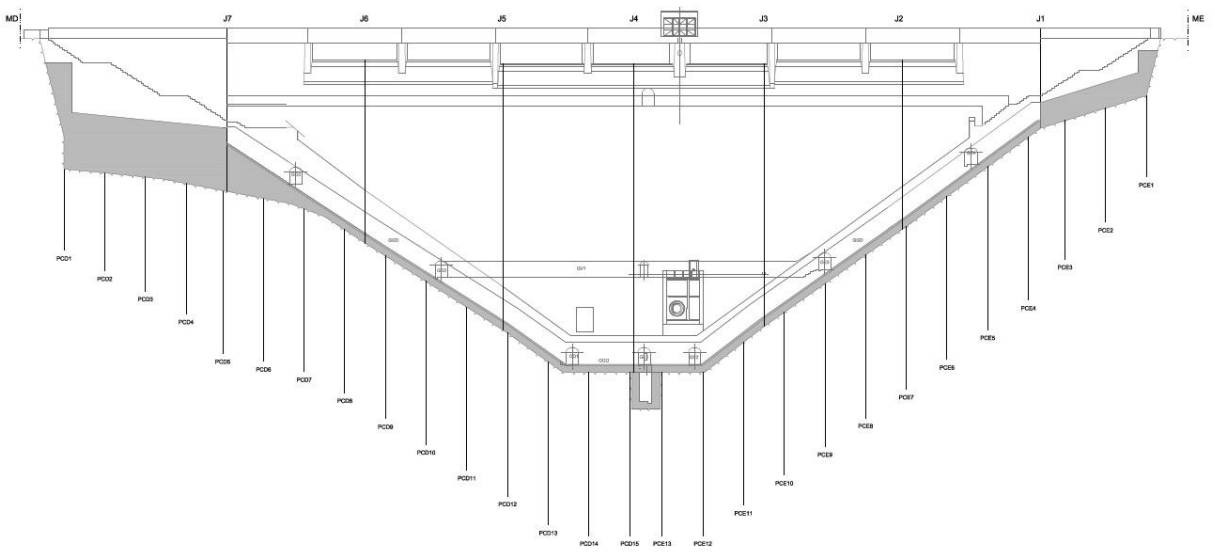

Fig. 4.12 - Alçado com a localização dos perfis de consolidação (Adaptado de EDP) [38]

4.4.2. FURAÇÃO

Antes da injeção propriamente dita, procedeu-se à execução dos furos por onde a calda foi injetada. Os furos, em regra, não excederam os vinte metros de profundidade, tendo sido abertos através de meios rotopercutivos (destrutivos) [34]. Tal opção derivou da maior rapidez de execução dos furos e do menor custo associado à sua abertura.

Fez-se a análise dos elementos com a representação da furação associada ao tratamento de consolidação ([39], [40], [41]), procedendo-se depois ao cálculo de toda a furação inerente aos

trabalhos de consolidação efetuados. A Fig. 4.13 ilustra o gráfico onde está representada a furação associada a cada bloco da barragem.

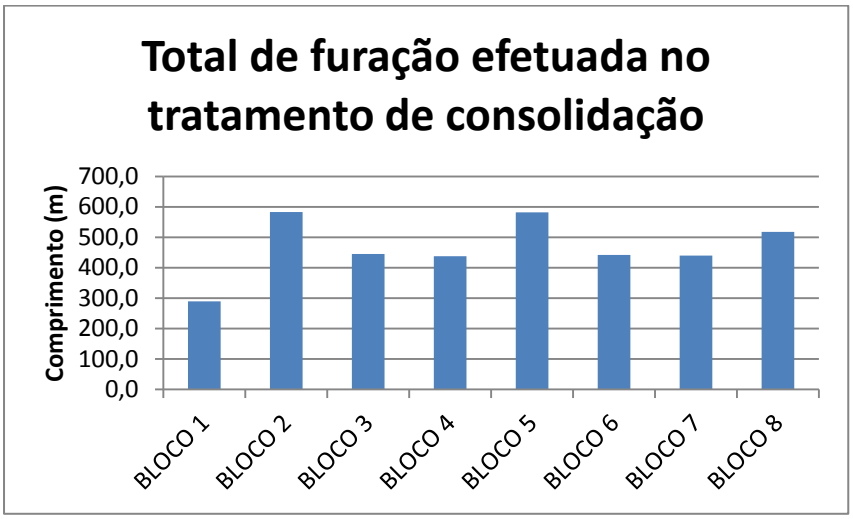

Fig. 4.13 - Furação efetuada no tratamento de consolidação

Da abertura dos 228 furos de consolidação resultou um total de 3738 metros de furação. Ao longo dos vinte e oito perfis de consolidação, houve variação do número de furos por leque bem como do comprimento destes mesmos furos. Relativamente ao primeiro aspeto, os perfis localizados nos blocos 1 e 8 (PCE 1, 2 e 3; PCD 1, 2, 3, 4 e 5) foram apenas constituídos por seis furos, enquanto que os restantes perfis compreenderam nove furos. No que respeita ao comprimento dos furos, o valor médio resultante para os 228 furos foi de 16.4 metros. Contudo, verificou-se que o comprimento de furação variou entre os 11.5 m e os 24.5 m. Analisando agora o comprimento de furação por perfil, este assumiu um valor médio de 133.5 metros. Contudo, houve um perfil onde se verificou uma furação de apenas 85.5 metros (perfil PCE 1), sendo que a furação máxima por perfil – 149 metros – foi obtida nos perfis PCE 6, 7 e 8.

Importa agora observar a Fig. 4.13, onde se constata a existência de alguma homogeneidade na distribuição da furação ao longo dos oito blocos da estrutura, com exceção do bloco 1 e dos blocos 2 e 5. Relativamente ao reduzido valor de furação verificado no bloco 1, este resulta do facto de o bloco 1 ser o bloco de menores dimensões (a estas dimensões reduzidas corresponde um menor estado de tensão incremental, pelo que a necessidade de tratamento é menor). Assim sendo, apenas se executaram neste bloco três perfis de consolidação, cada um composto por seis furos. Mais nenhum bloco adotou esta configuração, daí a razão para o reduzido valor de furação do bloco 1. No que concerne aos valores superiores apurados para os blocos 2 e 5, a sua razão prende-se com a consideração para estes blocos de quatro perfis de consolidação, cada um composto por nove furos. No caso do bloco 2, este envolveu os perfis PCE-4 (142.5 m), PCE-5 (142.5 m), PCE-6 (149 m) e PCE-7 (149 m), totalizando 583 metros. Quanto ao bloco 5, este compreendeu os perfis PCD-12 (147 m),PCD-13 (145 m),PCD-14 (145 m) e PCD-15 (145 m), do qual resulta a totalidade de 582 metros de furação. Apenas se adotou esta disposição para estes dois blocos, o que lhes conferiu maiores valores de furação relativamente aos restantes.

4.4.3. LAVAGEM E LIMPEZA DOS FUROS

No âmbito do tratamento de consolidação, procedeu-se a um conjunto de operações de lavagem dos furos associados em grupos, sendo estes constituídos em princípio por nove furos (três em cada um de três perfis consecutivos) [34], com o objetivo de remover o material de enchimento presente nas descontinuidades do maciço. Tendo em conta as características do material de enchimento das descontinuidades, e que a presença deste material nas mesmas poderia diminuir as propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço, decidiu-se proceder à lavagem das mesmas, procurando remover-se o material de enchimento. No caso da NBAC adotaram-se os procedimentos de lavagem indicados no fluxograma da Fig. 4.14 [42]. Este tipo de procedimentos tem vindo a ser empregue nas barragens que têm a EDP como dono de obra, tendo em conta os bons resultados obtidos.

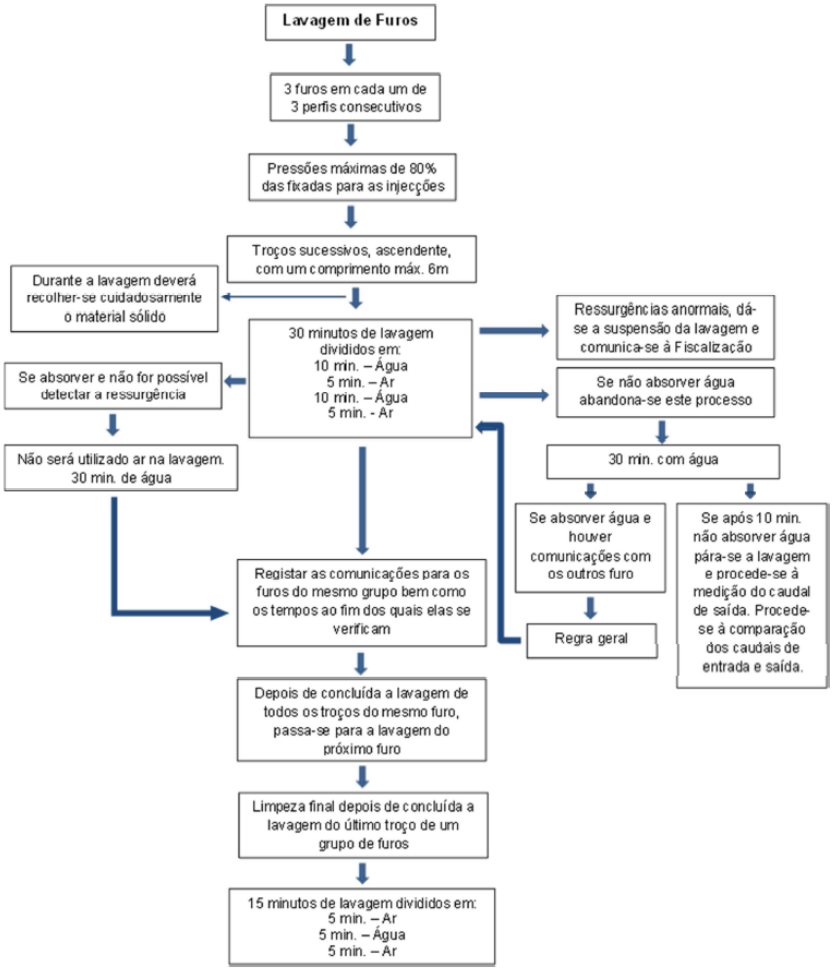

Fig. 4.14 - Procedimentos associados à lavagem dos furos na NBAC [42]

Para além das operações de lavagem realizaram-se operações de limpeza de cada um dos furos de consolidação que, no mínimo, se processaram em duas fases: logo após a abertura destes, para remoção dos detritos decorrentes da furação, e após a lavagem dos grupos de furos, com vista à preparação dos furos antecedendo a sua injeção. Este processo de limpeza consiste na injeção intercalada de água e ar até completa expulsão do material solto e da própria água usada na limpeza [34].

4.4.4. INJEÇÃO

As caldas de cimento inicialmente testadas no caso da NBAC compreenderam oito tipos, sendo que três destes incluíram a adição de adjuvantes – C4(A), C5(A) e C6(A) – como se pode comprovar no Quadro 4.9 [34].

Quadro 4.9 - Lista de caldas empregues no tratamento do maciço de fundação da NBAC

Tipos de Calda		
Designação	Traço A:C (em peso)	Razão calda (l) / cimento (kg)
C1	3:1	3.3:1
C2	2:1	2.273:1
C3	1:1	1.35:1
C4	1:1,5	1.029:1
C5	1:2	1:1.167
C4 (A)	1:1,5	-
C5 (A)	1:2	-
C6 (A)	1:2,5	-

Apesar de no início dos trabalhos se terem considerado estes oito tipos de calda, com o decorrer dos mesmos recorreu-se apenas ao uso das caldas sem adjuvante. Nestas, foram realizados ensaios para assegurar a garantia de qualidade, sendo de referir [42]:

- Densidade;
- Viscosidade de Marsh;
- Exsudação;
- Retração da parte sólida;
- Resistência à compressão;
- Medição da temperatura.

O cimento utilizado na produção dos vários tipos de calda teve de cumprir dois pressupostos: ter uma finura de Blaine superior a 3800 cm2/g (de acordo com a norma EN 196-6) e a percentagem de passados no peneiro 45 μm ser inferior a 10% (também segundo a mesma norma) [34].

O método de injeção adotado no tratamento de consolidação foi o ascendente, e o preenchimento com calda foi feito geralmente em troços com cinco metros de comprimento. No geral, a calda C1 foi sempre a primeira calda a injetar em cada novo furo, sendo que o processo de engrossamento da calda obedeceu aos seguintes critérios [42]:

1. Início da injeção com calda do tipo C_i (C1) até se obter a pressão máxima ou volume máximo pré-fixados;
2. Caso se obtivesse a pressão máxima em primeiro lugar, manter-se-ia a injeção à pressão máxima por mais dez minutos;
3. Obtendo-se em primeiro lugar o volume máximo fixado, com uma pressão superior a 80% da pressão máxima, continuar-se-ia a injeção com o mesmo tipo de calda até obter a pressão máxima, que deverá ser mantida por mais dez minutos;

4. No caso de o volume máximo ser atingido a uma pressão inferior a 80% da pressão máxima, procede-se à injeção com a calda mais grossa seguinte (C_j);
5. Os processos de engrossamento da calda C_j são idênticos aos já referidos para a calda C_i;
6. Encerra-se a injeção de um troço com a calda mais grossa até se obter a pressão máxima, mantida por mais dez minutos, ou atingindo-se o volume máximo.

Tendo em conta que foram usados cinco tipos de calda, teve de se decidir em cada furo qual o tipo de calda inicial a injetar. Como foi dito anteriormente, no geral tomou-se a decisão de injetar em primeiro lugar a calda mais fina (C1). Contudo, houve alguns furos onde se começou por injetar a calda C2, nomeadamente em alguns furos dos perfis PCE 1, 2, 3, 4 e 5, e PCD 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8 (não se injetou calda C1 em nenhum dos furos do perfil PCD 5). Como foi analisado atrás, certas zonas do maciço apresentaram grandes absorções de água nos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de ensaio. Alguns dos furos pertencentes aos perfis acima mencionados estão localizados nessas mesmas zonas. Assim, os resultados desta campanha de ensaios "Lugeon" foram um importante indicativo para a decisão do tipo de calda inicial a injetar.

No que respeita à pressão de injeção (em MPa) da calda, esta obedeceu à regra definida pela Equação (4.1) [42]:

$$P_{máx} = \frac{z + 15}{20} \tag{4.1}$$

Onde:

- "z" – profundidade medida na vertical (em metros) a partir da boca do furo.

4.4.5. Resultados Obtidos

Como já foi referido, a NBAC é constituída por oito blocos. Para efeitos do tratamento dos resultados, procedeu-se a uma subdivisão do maciço de fundação. Tal subdivisão consistiu no estudo, para cada bloco, da quantidade de cimento injetado durante o tratamento de consolidação.

Com base nos registos de injeção efetuados pela empresa RODIO [43], procedeu-se à análise da quantidade de cimento injetado nos vinte e oito perfis de consolidação dispostos ao longo do maciço de fundação. Assim, o tratamento de consolidação compreendeu a injeção de um total de 589 troços de furo. Destes, 378 (64%) foram injetados com os tipos de calda mais finos (C1 e C2). O troço dos 6 aos 16 metros do furo 1 do perfil PCD 2 foi aquele onde se verificou a maior absorção de cimento (11738 kg). Por sua vez, foi neste furo que se registou o máximo de quantidade de cimento injetado num único furo – 11764 kg. Relativamente à quantidade máxima de cimento injetado num perfil, esta verificou-se no perfil PCD 3, tendo este absorvido ao longo dos nove furos um total de 21256 kg, o que perfaz neste perfil uma média de 2362 kg de cimento injetado por furo.

Fazendo agora uma análise por bloco, no Quadro 4.10 apresentam-se os valores totais de cimento injetado e da furação efetuada no tratamento de consolidação.

Quadro 4.10 - Total de cimento injetado no tratamento de consolidação

Consolidação									
Zona	Bloco	Cimento contido na calda C1 (kg)	Cimento contido na calda C2 (kg)	Cimento contido na calda C3 (kg)	Cimento contido na calda C4 (kg)	Cimento contido na calda C5 (kg)	Total cimento (kg)	Furação (m)	Razão Cimento (kg) /Furação (m)
ME	1	765,4	1596,0	1771,5	526,7	1220,5	5801,7	289,5	20,3
	2	2963,7	2915,5	3106,8	513,1	9,3	9432,1	583,0	16,3
	3	2562,5	2135,5	4590,1	2176,9	360,6	11501,5	445,0	26,6
FV	4	1517,4	494,9	890,7	208,0	59,5	3139,5	438,0	7,2
	5	1269,7	422,3	730,4	543,6	151,7	3036,8	582,0	5,4
MD	6	1980,8	2064,5	5226,7	4099,8	3203,3	15964,6	442,5	37,5
	7	1444,0	2700,9	5577,7	4799,2	8594,6	22401,9	439,5	52,6
	8	800,7	4797,4	7465,9	6941,7	33712,6	52684,7	518,0	103,7

Analisando o Quadro 4.10, percebe-se facilmente que foi na margem direita que se verificaram as maiores absorções de cimento, sobretudo através da injeção de caldas mais espessas (C4 e C5), em comparação com a margem esquerda e a zona de fundo do vale. Estes valores vêm de encontro aos resultados dos ensaios "Lugeon" e dos ensaios sísmicos realizados nos furos de ensaio antes do início do tratamento de consolidação, onde já se tinha notado uma menor qualidade das zonas do maciço compreendidas pelas margens direita e esquerda (grandes absorções de água e baixas velocidades de propagação das ondas longitudinais – subcapítulo 4.3). Os valores presentes no Quadro 4.10 foram também representados num único gráfico, de modo a melhorar a compreensão dos mesmos. Assim, encontra-se ilustrado abaixo na Fig. 4.15 o gráfico inerente à injeção dos vários tipos de calda em cada bloco da barragem.

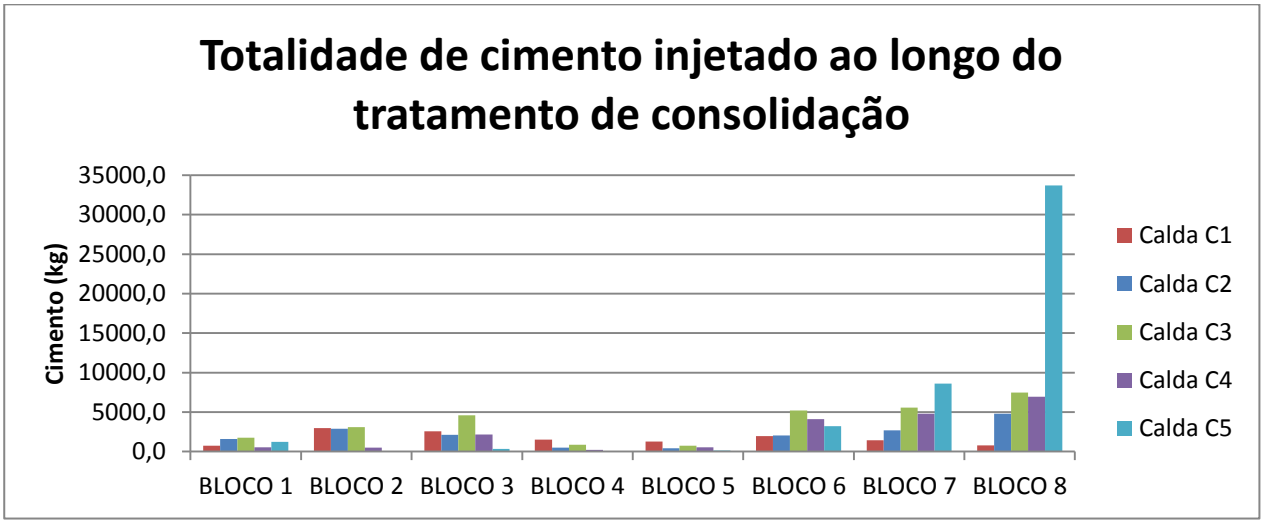

Fig. 4.15 - Quantidade de cimento injetado na zona compreendida por cada bloco durante o tratamento de consolidação

Observando o gráfico presente na Fig. 4.15, destaca-se a reduzida absorção de cimento na zona do fundo do vale, sendo até impossível notar a ínfima quantidade de cimento injetado nesta zona sob a forma de calda C5 (211,2 kg). A zona da margem esquerda absorveu uma quantidade de cimento aproximadamente três vezes superior à do fundo do vale, mas ainda assim pequena comparativamente com a enorme quantidade de cimento (sobretudo através da injeção de calda do tipo C5) injetado no bloco 8, mais precisamente nos perfis PCD 2 (16143 kg), PCD 3 (21256 kg) e PCD 4 (9711 kg). Novamente se comprova que a margem direita foi a zona onde o tratamento de consolidação mais influência teve.

Um outro parâmetro que permite também avaliar a distribuição de cimento pela fundação compreende o quociente entre o cimento injetado num furo e o comprimento desse mesmo furo. Esta razão permite ter uma noção da quantidade de cimento usado em cada metro de furação, seja num único furo, seja num conjunto de furos. No caso em estudo, foi feita esta análise por bloco, como está representado na Fig. 4.16.

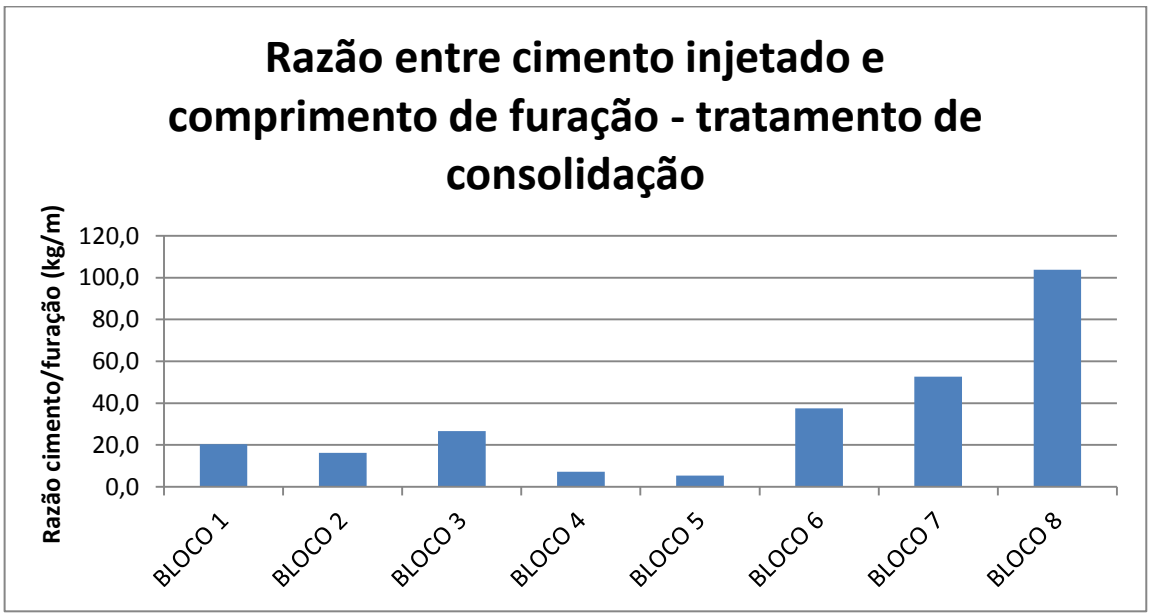

Fig. 4.16 - Razão entre cimento injetado e furação efetuada para o tratamento de consolidação

Mais uma vez, a Fig. 4.16 vem corroborar a menor qualidade do maciço na margem direita. Os blocos 6, 7 e 8, pertencentes a esta zona, foram aqueles que maior quantidade de cimento absorveram por metro de furação. Se atentarmos no gráfico presente na Fig. 4.13, onde a distribuição do comprimento de furação é relativamente homogénea por todos os blocos, conclui-se que foi de facto a margem direita a zona que mais cimento (e calda) recebeu durante o tratamento de consolidação.

Depois de analisados os valores inerentes à injeção de cimento no tratamento de consolidação, é importante analisar os resultados da campanha sísmica realizada após a conclusão deste tratamento (Fig. 4.17 e Fig. 4.18), por forma a verificar as melhorias no comportamento mecânico do maciço da NBAC [44].

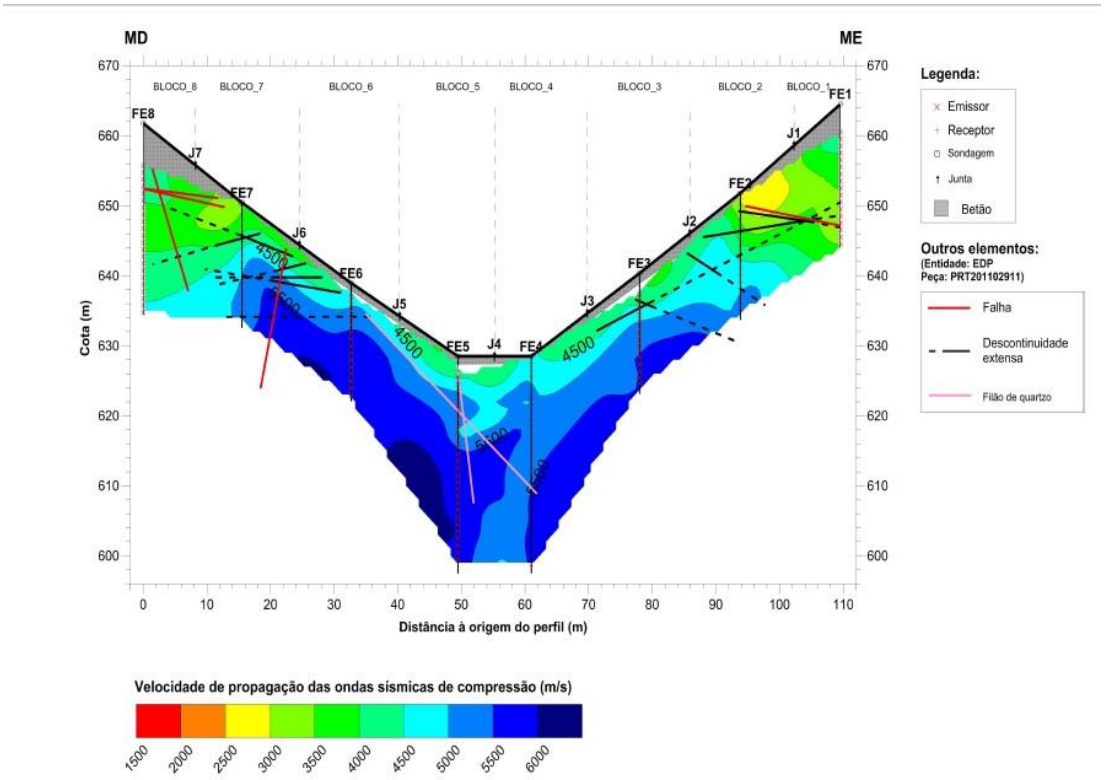

Fig. 4.17 - Valores das velocidades de propagação das ondas de compressão após o fim do tratamento [44]

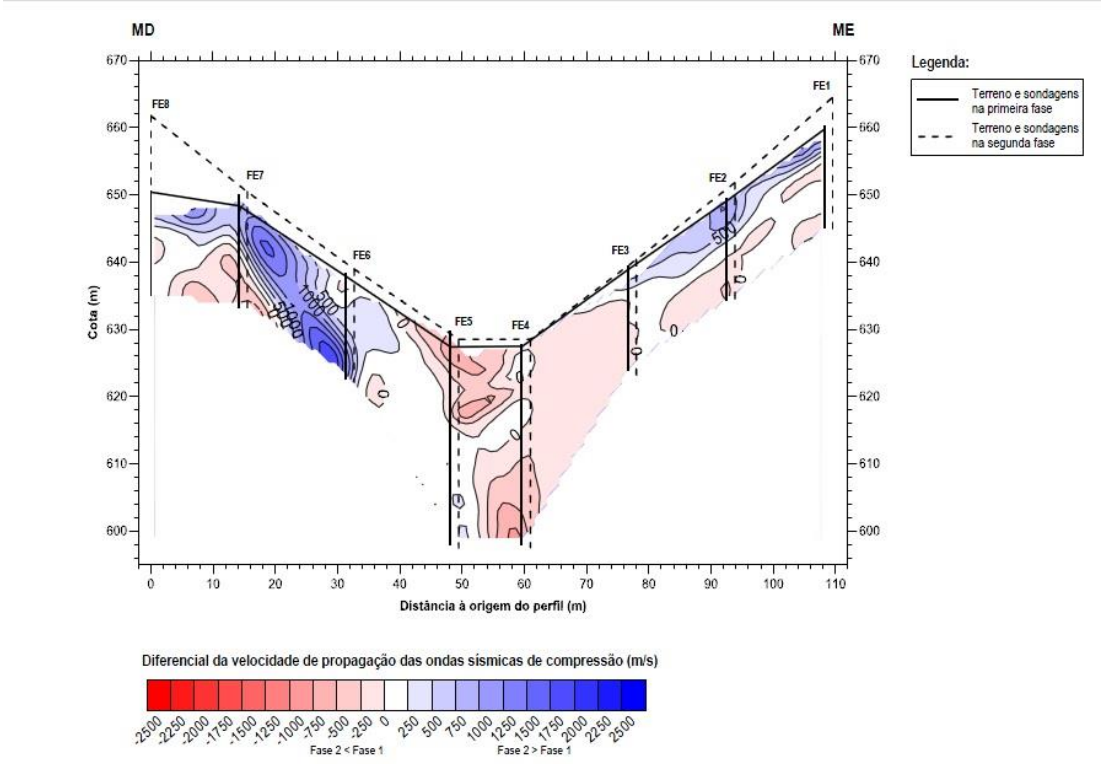

Fig. 4.18 - Gradiente comparativo da evolução dos valores das velocidades de propagação das ondas de compressão antes e após o tratamento [44]

Comparando os resultados dados pelas duas campanhas (tendo a primeira sido já analisada atrás), a principal conclusão a tirar tem a ver com o melhoramento das condições mecânicas do maciço localizado na margem direita. Observando as duas figuras, a grande diferença nota-se sobretudo na zona compreendida pelo bloco 7, onde houve um aumento significativo da velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais, sobretudo a maiores profundidades. Também a zona abrangida pelo bloco 8 sofreu melhorias, principalmente na zona mais superficial (velocidades da ordem dos 3000–3500 m/s). Quanto ao resto do maciço, não foram registados valores substancialmente diferentes dos obtidos na primeira campanha sísmica, onde o terreno de fundação apresentava, à partida, boas condições mecânicas, sobretudo na zona do fundo do vale.

4.5. TRATAMENTO DE IMPERMEABILIZAÇÃO

4.5.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O intuito da execução da cortina de impermeabilização é contribuir para a redução do fluxo de água no maciço de fundação, no sentido de montante para jusante da estrutura. Paralelamente, a diminuição da percolação provoca também um decréscimo nas subpressões instaladas sob a estrutura, melhorando consideravelmente as condições de estabilidade da mesma. Assim sendo, após o tratamento de consolidação, procedeu-se à execução de uma cortina de impermeabilização, a qual foi iniciada pela injeção de furos primários situados ao longo do desenvolvimento do corpo da barragem.

A geometria dos furos, nomeadamente o seu comprimento e a sua inclinação, tiveram em conta alguns critérios que visaram aumentar a eficácia da ação da cortina como barreira à percolação.

A abertura dos furos inerentes ao tratamento de impermeabilização incorporou a recuperação contínua de amostra e a realização de ensaios do tipo "Lugeon" efetuados à medida do avanço da execução dos furos.

Como foi referido acima, o início da execução da cortina de impermeabilização compreendeu a injeção dos furos primários. Contudo, com o desenrolar dos trabalhos revelou ser necessário proceder à abertura e injeção de novos furos, processo que teve em conta os resultados dos ensaios "Lugeon" realizados aquando da abertura dos furos primários. A execução de novos furos visou reduzir a permeabilidade na zona abrangida pela cortina e aumentar a eficácia desta como barreira à percolação no maciço.

4.5.2. LOCALIZAÇÃO E GEOMETRIA DOS FUROS

A execução da cortina de impermeabilização consistiu na abertura e injeção de furos individuais dispostos ao longo do desenvolvimento da estrutura. Assim, foram executados 20 furos primários na margem direita e 18 furos primários na margem esquerda [45]. A opção por esta disposição resultou num valor mínimo de quatro furos por bloco, com afastamento entre furos nunca superior a cinco metros. Houve situações em que o afastamento foi próximo dos três metros. Esta variação no valor do afastamento conferiu a alguns blocos (os de maior dimensão) um número de furos primários superior a quatro, como sucedeu, por exemplo, no bloco 5, onde foram abertos seis furos – PID 15 a PID 20 [34] (Fig. 4.19 e Fig. 4.20).

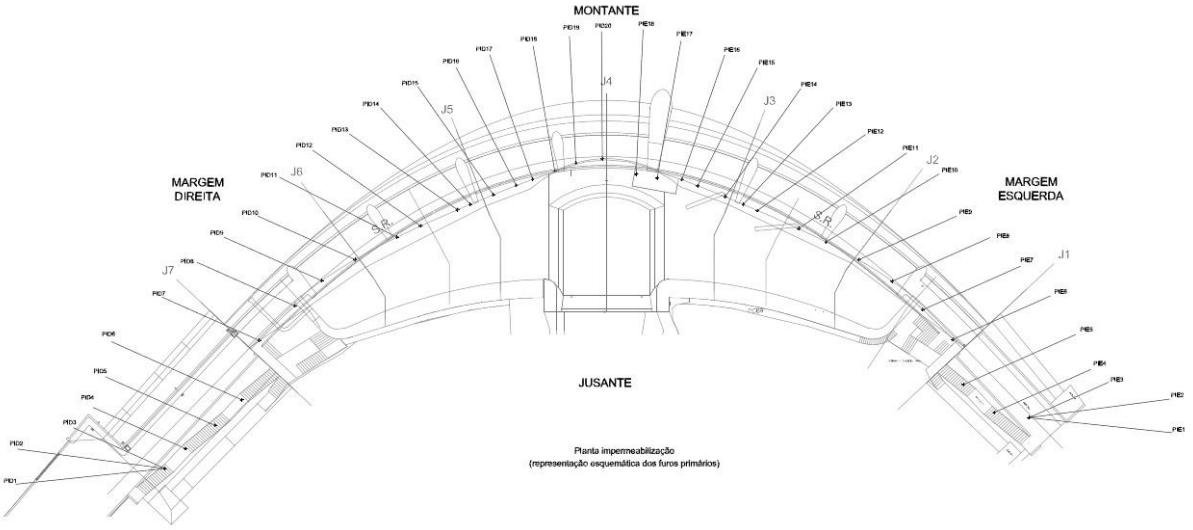

Fig. 4.19 - Planta com pormenor da disposição dos furos primários da cortina de impermeabilização (Adaptado de EDP) [45]

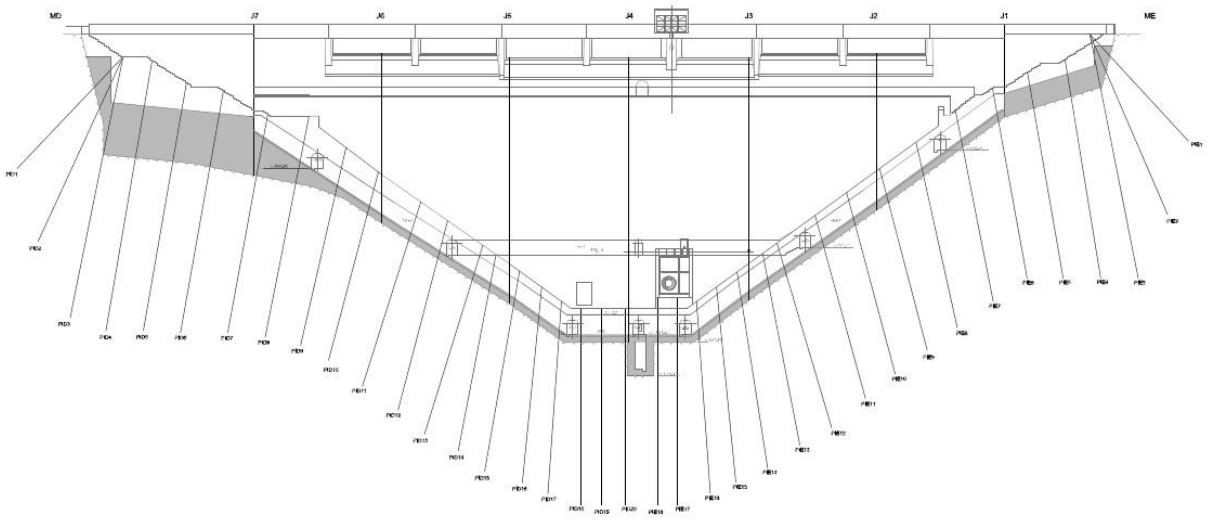

Fig. 4.20 - Alçado com a localização dos furos primários de impermeabilização (Adaptado de EDP) [45]

Se se atentar na planta com a representação furos de impermeabilização (Fig. 4.19) e a compararmos com a planta dos perfis de consolidação (Fig. 4.11), verifica-se que os três primeiros furos primários do bloco 1 (PIE 1, PIE 2, PIE 3) e os três primeiros furos primários do bloco 8 (PID 1, PID 2, PID 3) encontram-se localizados numa zona que não foi abrangida pelo tratamento de consolidação. A Fig. 4.21 contém a representação das duas zonas abrangidas pelos seis furos que não foram alvo de injeções de consolidação.

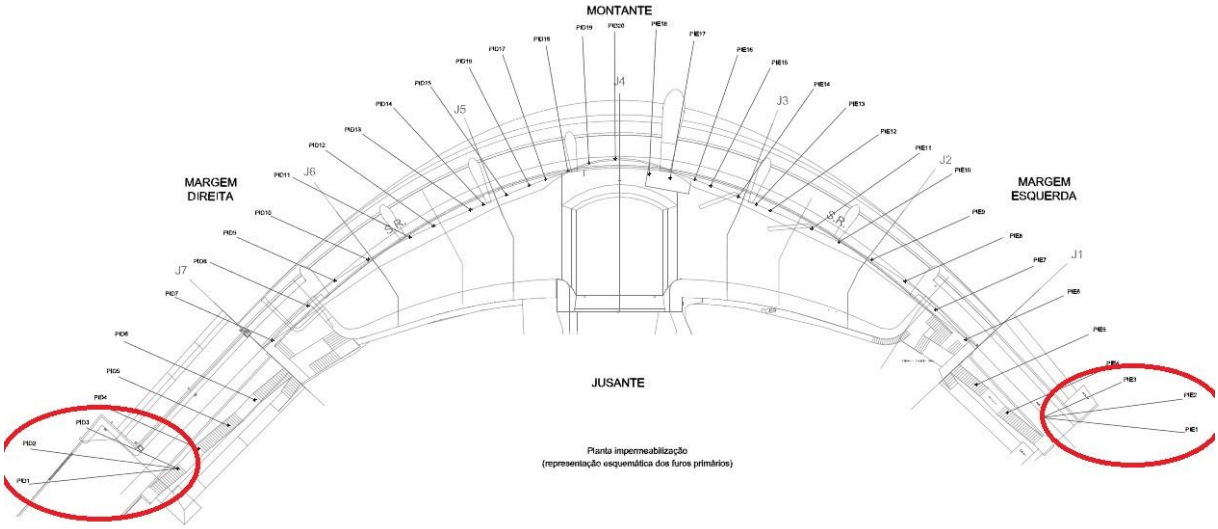

Fig. 4.21 - Representação das zonas abrangidas pelos furos primários da cortina que não foram consolidadas (Adaptado de EDP) [45]

Este facto é relevante para as absorções tanto de água como de cimento nestes seis furos, e portanto estas duas zonas serão alvo de uma atenção especial aquando da análise dos resultados obtidos com o tratamento de impermeabilização.

Relativamente à inclinação a dar aos furos da cortina de impermeabilização, esta teve como ideia base a minimização do ângulo entre os furos e as normais às atitudes das principais descontinuidades. Tal opção é fundamentada pela interseção de um maior número de descontinuidades com um menor comprimento de furação. No entanto, foram considerados outros critérios na decisão da inclinação a dar aos furos. O pendor da cortina para montante foi outro aspeto tido em conta na execução dos furos. Tal orientação permite que as pressões que atuam no lado de montante da cortina promovam a estabilidade da estrutura, pois tais pressões, com esta orientação, contrariam a ação das subpressões na base da barragem. Considerou-se então na execução da cortina uma orientação de 60° para montante, tendo-se emboquilhado os furos na zona de pé de jusante da barragem. Esta decisão decorreu da inclinação a dar à cortina, pois caso os furos tivessem sido emboquilhados na galeria geral de drenagem, a orientação da cortina teria de ser inferior a 60° para que as pressões a atuar no lado de montante da cortina conseguissem diminuir eficazmente as subpressões atuantes na zona sob a estrutura (Fig. 4.22).

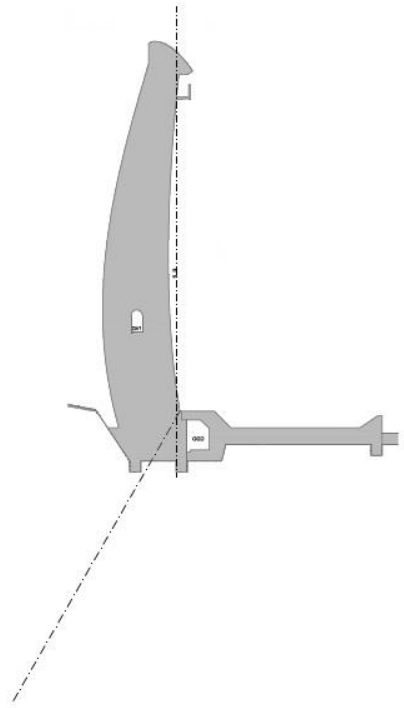

Fig. 4.22 - Orientação dos furos de impermeabilização por forma a orientar a cortina para montante (Adaptado de EDP) [45]

Na definição do comprimento mínimo dos furos de impermeabilização, o primeiro critério considerado consistiu numa profundidade mínima igual a 33% do valor da carga hidráulica máxima na zona do pé de montante. No caso da NBAC, tal carga hidráulica máxima corresponde a aproximadamente 34.4 metros na zona mais desfavorável. Assim, a profundidade mínima que resultou deste critério correspondeu a cerca de 11.50 metros. Contudo, considerou-se ainda outro critério que consistiu no comprimento dos furos da cortina ultrapassar a profundidade da zona previamente tratada no tratamento de consolidação (onde a profundidade máxima atingida foi aproximadamente 25 metros, como foi verificado nos valores da furação respeitantes ao tratamento de consolidação) [34].

Como foi já referido, foram realizados ensaios do tipo "Lugeon" ao longo do avanço da abertura dos furos. Os resultados destes ensaios também influenciaram o comprimento final de cada furo. Caso se detetassem furos primários onde no último troço tivesse ocorrido uma absorção superior a uma unidade "Lugeon", procedia-se ao prolongamento desse furo com a execução de troços de cinco metros, até a absorção ser inferior aquele valor ou até se atingir uma profundidade máxima limite previamente definida. Deste modo, a solução final consistiu na execução de furos primários com comprimento não inferior a 30 metros [45]. Ainda relativamente aos resultados dos ensaios "Lugeon", foram efetuados furos secundários a meia distância dos primários adjacentes, com uma profundidade superior em cinco metros à cota da base do troço destes cuja absorção foi superior a uma unidade "Lugeon". A localização dos furos secundários teve de evitar o atravessamento de juntas entre blocos, e estes só foram executados depois de concluída a furação e injeção dos furos primários do próprio bloco e dos dois blocos vizinhos. Também na execução dos furos secundários foram feitos ensaios de absorção de água, com procedimento idêntico aos efetuados nos furos primários [34].

Existindo absorções superiores a um "Lugeon" em troços de furos secundários, serão realizados furos terciários contíguos a estes com procedimentos idênticos aos referidos no parágrafo anterior para a

execução dos furos secundários (comprimento de furação e ensaios "Lugeon"). Na eventualidade de os resultados dos ensaios "Lugeon" efetuados nos furos terciários evidenciarem a necessidade de furos quaternários, estes serão também realizados de acordo com os mesmos moldes.

4.5.3. FURAÇÃO E INJEÇÃO

Os furos inerentes ao tratamento de impermeabilização do maciço de fundação da NBAC foram realizados através do método de furação por rotação, de modo a permitir a recuperação contínua de amostra. A abertura dos furos foi feita em troços de cinco metros, e com realização de ensaios de absorção do tipo "Lugeon" no final da abertura de cada novo troço. Tais ensaios foram feitos de forma simplificada, pois compreenderam apenas três patamares de pressão "p/2", "p" e "p/2", onde "p" correspondeu a 80% da pressão máxima de injeção de calda em cada furo, definida de modo semelhante ao indicado no tratamento de consolidação (subcapítulo 4.4.4. – Equação (4.1)) [34].

Depois de abertos os furos, procedeu-se à limpeza dos mesmos, tendo esta sido realizada em duas fases distintas: após a abertura de cada novo troço de um furo e após a realização de todos os ensaios "Lugeon" inerentes a um furo, sendo neste caso a limpeza feita em todo o comprimento do furo. O procedimento de limpeza foi idêntico ao dos furos de consolidação: injeção intercalada de ar e água, até completa expulsão da rocha desagregada e da água usada na limpeza.

Como já foi previamente mencionado, a fase primária do tratamento de impermeabilização consistiu na injeção de dezoito furos na margem esquerda e vinte furos na margem direita. O método de injeção empregue foi o ascendente, em troços de cinco metros de comprimento. Os tipos de calda considerados na execução da cortina de impermeabilização foram idênticos aos predefinidos para o tratamento de consolidação, bem como os procedimentos de engrossamento da calda e a definição da pressão de injeção (subcapítulo 4.4.4.). Na prática verificou-se que as caldas de traço mais fino foram as mais empregues no tratamento de impermeabilização, dado que as descontinuidades de maior relevância e com maior abertura haviam já sido preenchidas pelas caldas mais grossas injetadas durante o tratamento de consolidação.

4.5.4. RESULTADOS OBTIDOS

De modo análogo ao realizado para o tratamento de consolidação, foi feita a análise do comprimento de furação associado à execução da cortina de impermeabilização [46] e dos resultados dos ensaios do tipo "Lugeon" realizados nos vários troços de cada furo [47]. Foi também analisada a quantidade de cimento absorvido pelos furos [48], tendo todos estes trabalhos sido realizados pela empresa RODIO [33]. A análise compreendeu o estudo de cada fase de injeção e a apresentação dos resultados foi feita por bloco.

4.5.4.1. Furos primários

Como foi anteriormente mencionado, a fase primária do tratamento de impermeabilização consistiu na abertura e injeção de 38 furos. Apresentam-se no Quadro 4.11 os valores das absorções de água e de cimento verificadas na execução dos furos primários da cortina de estanqueidade, bem como o total de furação efetuada.

Quadro 4.11 - Furação e absorções de água e cimento nos furos primários do tratamento de impermeabilização

Impermeabilização – Primários										
Zona	Bloco	Furação (m)	Absorção média (UL)	Cimento contido na calda C1 (kg)	Cimento contido na calda C2 (kg)	Cimento contido na calda C3 (kg)	Cimento contido na calda C4 (kg)	Cimento contido na calda C5 (kg)	Total cimento (kg)	Razão Cimento (kg) / Furação (m)
ME	1	76,8	5,8	102,4	312,3	454,1	912,5	53,7	1835,0	23,3
	2	129,7	4,1	737,1	273,5	328,7	0,0	0,0	1339,3	10,6
	3	131,2	3,3	321,1	282,5	863,8	163,8	0,0	1631,1	12,3
FV	4	153,9	0,2	146,1	0,0	0,0	0,0	0,0	146,1	0,9
	5	183,7	0,6	169,7	0,0	0,0	0,0	0,0	169,7	0,9
MD	6	130,9	0,9	211,7	25,1	0,0	0,0	0,0	236,8	1,8
	7	127,0	8,0	762,7	658,2	484,7	574,3	113,2	2593,1	20,6
	8	103,4	2,9	894,2	442,3	468,9	0,0	0,0	1805,4	16,2

Por forma a melhorar a compreensão dos valores obtidos, representou-se graficamente através da Fig. 4.23 e da Fig. 4.24, respetivamente, os valores de absorção de água e de cimento em cada bloco da barragem.

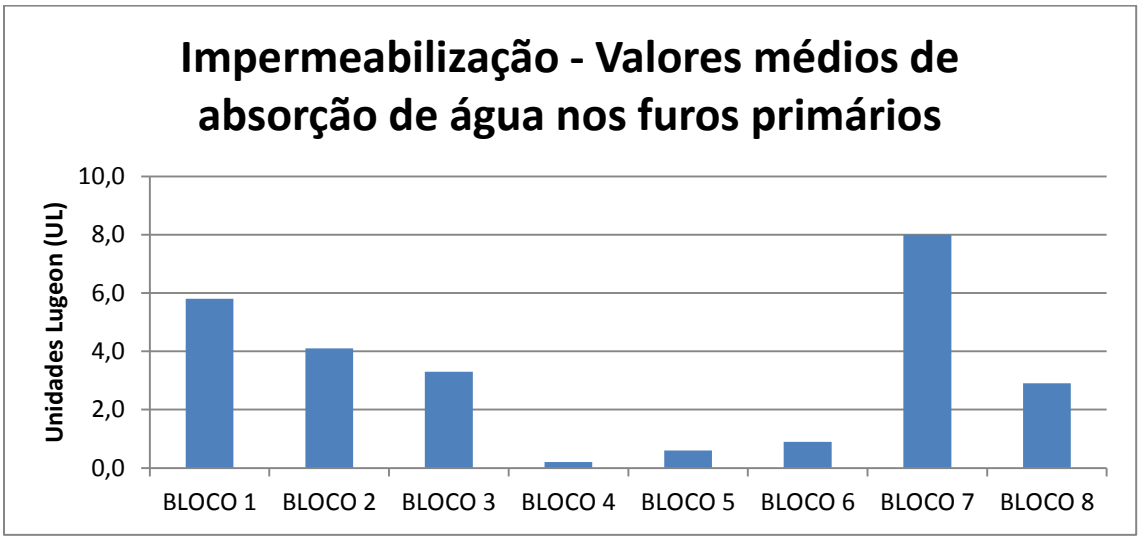

Fig. 4.23 - Absorção média de água nos furos primários da cortina de estanqueidade

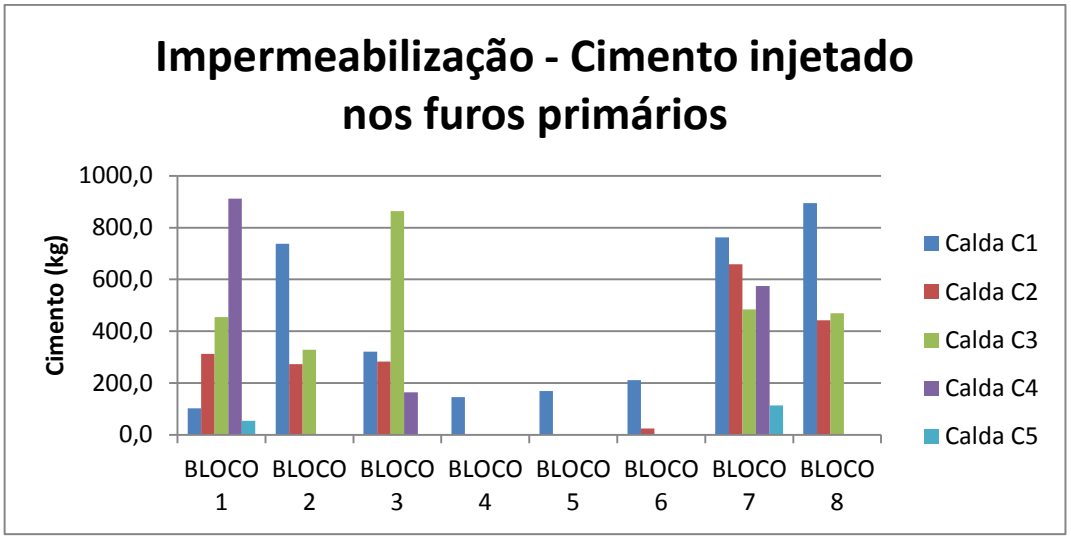

Fig. 4.24 - Absorção de cimento nos furos primários da cortina de estanqueidade

Da análise da Fig. 4.23 percebe-se o impacto que o tratamento de consolidação teve na diminuição da permeabilidade do maciço de fundação. Se compararmos os resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos oito furos de ensaio (subcapítulo 4.3.3.) antes do início das injeções de consolidação com os agora obtidos nos furos primários da cortina, encontramos uma diferença bastante significativa, passando de situações onde se verificavam regimes de escoamento do tipo "vazão total", correspondentes a grandes absorções de água, para valores médios de absorção próximos das cinco unidades "Lugeon".

Atente-se agora na Fig. 4.24, onde se encontram exibidos os valores das absorções de cimento em todos os furos primários, distribuídos ao longo dos oito blocos. Também aqui se denota a melhor qualidade da zona do fundo do vale, dado que esta absorveu uma pequena quantidade de cimento, quando comparada com as absorções nas zonas das margens (esquerda e direita). Nestas, observa-se ainda o uso de caldas de traço mais grosso, sobretudo nos blocos 1, 3 e 7.

Importa ainda fazer referência a um aspeto, que tem a ver com os resultados das absorções de água e de cimento nos blocos 1 e 8. Como foi já referido, os furos PIE 1, 2 e 3 e PID 1, 2 e 3 foram situados numa zona não abrangida pelas injeções de consolidação. Considerando este facto, os resultados obtidos com a furação primária nestas duas zonas não são tão representativos como os obtidos nas zonas compreendidas pelos restantes seis blocos, pois, na prática, as zonas compreendidas pelos seis furos acima mencionados receberam injeções de calda de cimento pela primeira vez aquando das injeções primárias do tratamento de impermeabilização.

Por último, é importante referir que também nas injeções dos furos primários da cortina de estanqueidade ficou patente a menor qualidade da zona da margem direita face às outras duas (margem esquerda e fundo do vale), como comprovam tanto os valores das absorções de água como os de cimento.

Tendo em conta os resultados "Lugeon" obtidos nos furos primários, conclui-se a necessidade de execução de furos secundários contíguos aos primários onde se verificaram troços com absorções superiores a uma unidade "Lugeon".

4.5.4.2. Furos secundários

De forma idêntica ao realizado para a furação primária, apresentam-se os dados da furação secundária, que englobou a abertura de 32 furos. O Quadro 4.12 contém os valores inerentes ao comprimento total de furação e às absorções de água e cimento.

Quadro 4.12 - Furação e absorções de água e cimento nos furos secundários do tratamento de impermeabilização

Impermeabilização – Secundários										
Zona	Bloco	Furação (m)	Absorção média (UL)	Cimento contido na calda C1 (kg)	Cimento contido na calda C2 (kg)	Cimento contido na calda C3 (kg)	Cimento contido na calda C4 (kg)	Cimento contido na calda C5 (kg)	Total cimento (kg)	Razão cimento (kg) / furação (m)
ME	1	88,6	3,5	816,6	501,8	345,3	0,0	0,0	1663,7	17,3
	2	141,5	2,1	676,0	193,1	253,9	0,0	0,0	1123,0	7,4
	3	120,3	1,0	130,9	0,0	0,0	0,0	0,0	130,9	1,3
FV	4	31,8	2,1	66,9	0,0	0,0	0,0	0,0	66,9	2,2
	5	92,3	0,2	67,9	0,0	0,0	0,0	0,0	67,9	0,8
MD	6	100,5	0,9	138,5	0,0	0,0	0,0	0,0	138,5	1,2
	7	138,1	4,3	645,2	544,1	722,3	0,0	0,0	1911,6	13,9
	8	122,1	2,6	361,5	0,0	0,0	0,0	0,0	361,5	2,8

Segue-se a representação gráfica das absorções de água e cimento na Fig. 4.25 e na Fig. 4.26, respetivamente.

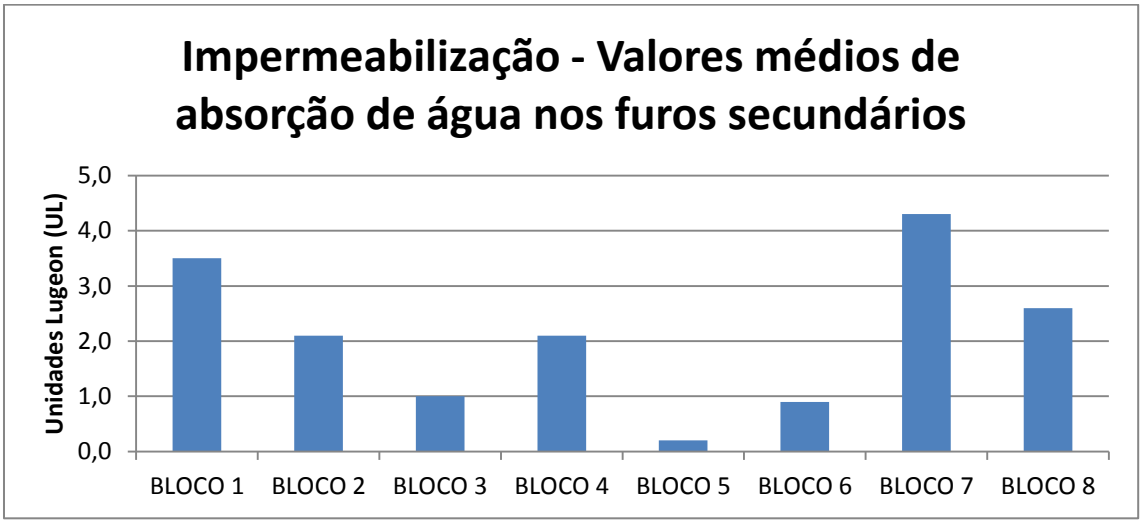

Fig. 4.25 - Absorção média de água nos furos secundários da cortina de estanqueidade

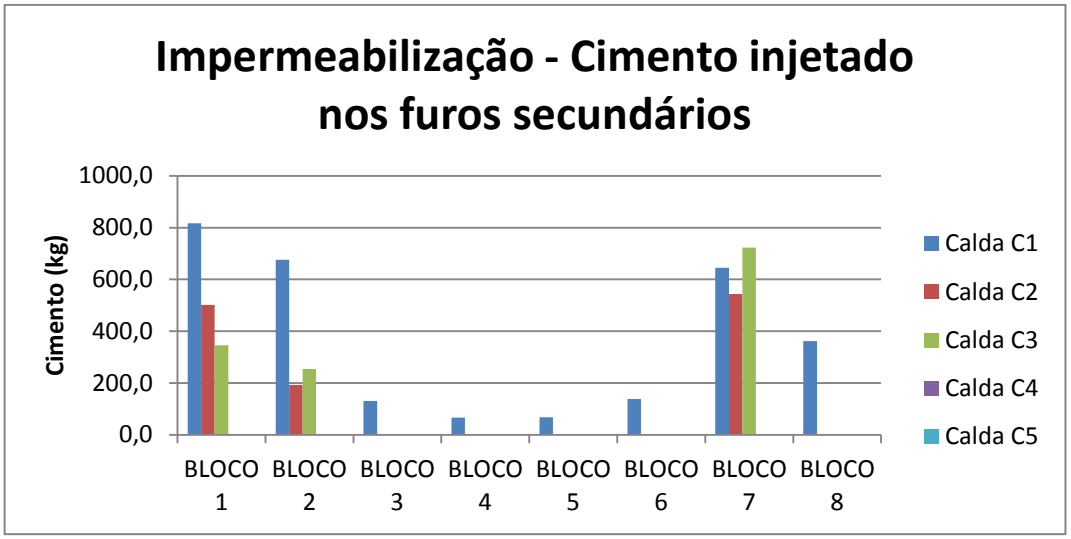

Fig. 4.26 - Absorção de cimento nos furos secundários da cortina de estanqueidade

Relativamente aos resultados dos ensaios "Lugeon" (Fig. 4.25), verifica-se uma redução generalizada dos valores de absorção de água comparativamente com os observados na furação primária, havendo apenas a exceção do bloco 4, que passou dos 0,2 UL para 2,1 UL. Tal situação vem seguidamente explicada. A zona do bloco 4 compreende cinco furos primários (PIE 14, PIE 15, PIE 16, PIE 17 e PIE 18) em que a absorção média de cada um rondou os 0.3 UL's. Foram realizados furos secundários contíguos aos furos PIE 14 e PIE 15, visto que estes dois furos primários apresentaram troços com absorções superiores a 1 UL. Um dos troços do furo secundário PIE 15S apresenta valores de absorção de água a rondar as cinco unidades "Lugeon". Esta é a principal razão para o aumento da absorção média de água no bloco 4 entre a fase primária e a secundária.

Analisando agora o gráfico respeitante à injeção de cimento nos furos secundários (Fig. 4.26), verifica-se que não foram aplicadas as caldas de traço mais grosso (C4 e C5), sendo que apenas se injetou calda do tipo C2 e C3 nas zonas compreendidas pelos blocos 1, 2 e 7. A zona do fundo do vale foi aquela que absorveu menor quantidade de cimento, como seria de prever, sendo que nesta fase de injeção foi a zona da margem esquerda que maior quantidade de cimento absorveu.

Visto que vários furos secundários apresentaram absorções médias superiores a 1 "UL", foi necessária a realização de furos terciários contíguos aos furos secundários onde se verificaram troços com absorções superiores aquele valor.

4.5.4.3. Furos terciários

Apresentam-se no Quadro 4.13 os valores referentes à furação terciária realizada na execução da cortina de impermeabilização, tendo esta fase incorporado a execução de 42 furos.

Quadro 4.13 - Furação e absorções de água e cimento nos furos terciários do tratamento de impermeabilização

Impermeabilização – Terciários										
Zona	Bloco	Furação (m)	Absorção média (UL)	Cimento contido na calda C1 (kg)	Cimento contido na calda C2 (kg)	Cimento contido na calda C3 (kg)	Cimento contido na calda C4 (kg)	Cimento contido na calda C5 (kg)	Total cimento (kg)	Razão cimento (kg) / furação (m)
ME	1	147,4	1,5	297,3	0,0	0,0	0,0	0,0	297,3	2,0
	2	218,8	1,1	256,5	0,0	0,0	0,0	0,0	256,5	1,5
	3	104,0	0,9	149,5	0,0	0,0	0,0	0,0	149,5	1,3
FV	4	60,2	0,3	40,1	0,0	0,0	0,0	0,0	40,1	0,7
	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MD	6	110,5	0,3	164,2	207,7	177,8	0,0	0,0	549,6	3,6
	7	120,3	2,6	333,7	0,0	0,0	0,0	0,0	333,7	6,9
	8	207,9	1,8	702,5	341,0	31,9	0,0	0,0	1075,3	4,4

As representações gráficas dos valores das absorções de água e cimento estão ilustradas respetivamente na Fig. 4.27 e na Fig. 4.28.

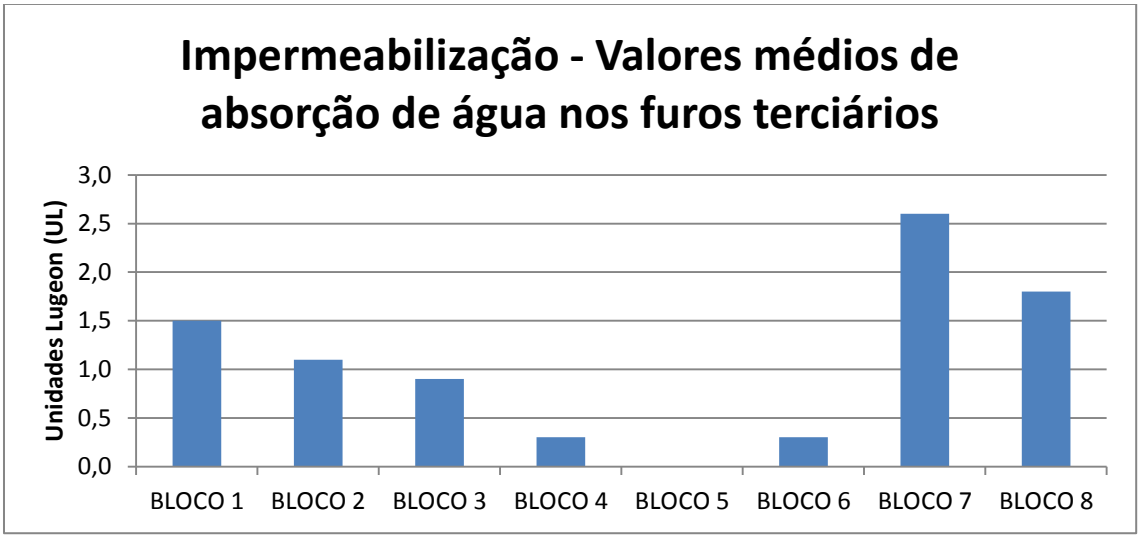

Fig. 4.27 - Absorção média de água nos furos terciários da cortina de estanqueidade

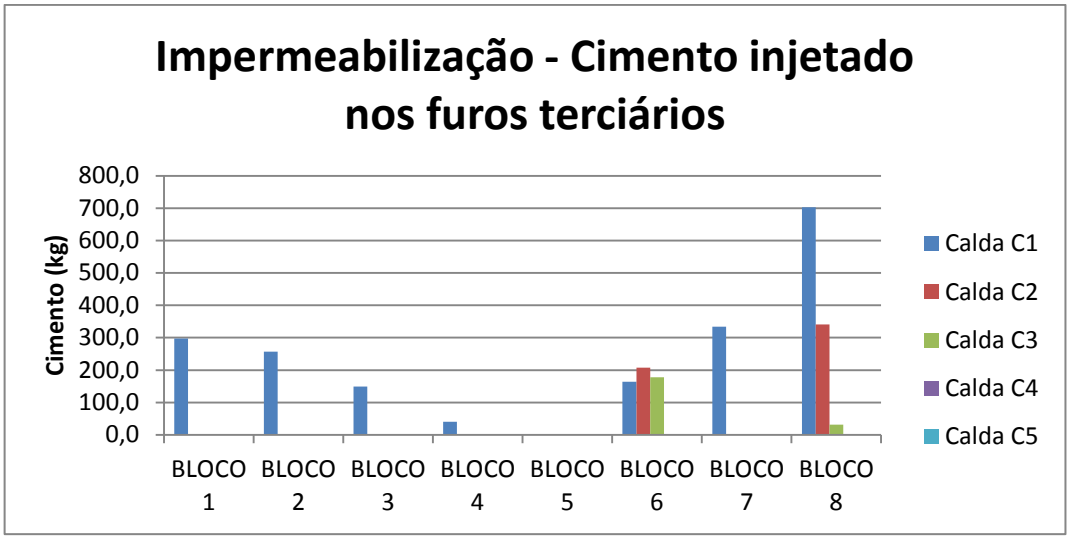

Fig. 4.28 - Absorção de cimento nos furos terciários da cortina de estanqueidade

Os valores de absorção de água continuam a tendência decrescente já observada nos ensaios realizados aquando da furação secundária, havendo apenas valores superiores a uma unidade "Lugeon" nas zonas abrangidas pelos blocos 1, 7 e 8.

No que concerne ao tipo de calda injetada, foi empregue essencialmente a calda C1, com a exceção dos blocos 6 e 8 que necessitaram de recorrer a caldas de traço mais grosso (C2 e C3). Daqui decorre que a zona da margem direita foi a que maior quantidade de cimento absorveu.

Importa ainda salientar que a zona situada sob o bloco 5 dispensou a realização de furos terciários, dada a boa resposta que este maciço deu aquando da realização dos ensaios tipo "Lugeon" nos furos secundários. Este facto é mais um indicador da melhor qualidade da zona do fundo do vale face às restantes.

4.5.4.4. Furos quaternários

No tratamento de impermeabilização realizado na NBAC foi ainda considerada a necessidade de realizar furos quaternários na margem esquerda (11 furos) e na direita (18 furos), tendo tal sido dispensada na zona do fundo do vale. O Quadro 4.14 contém toda a contabilidade associada à furação quaternária.

Quadro 4.14 - Furação e absorções de água e cimento nos furos quaternários do tratamento de impermeabilização

Impermeabilização – Quaternários										
Zona	Bloco	Furação (m)	Absorção média (UL)	Cimento contido na calda C1 (kg)	Cimento contido na calda C2 (kg)	Cimento contido na calda C3 (kg)	Cimento contido na calda C4 (kg)	Cimento contido na calda C5 (kg)	Total cimento (kg)	Razão cimento (kg) / furação (m)
ME	1	70,3	1,4	117,3	0,0	0,0	0,0	0,0	117,3	1,7
	2	178,2	1,3	272,8	0,0	0,0	0,0	0,0	272,8	1,5
	3	11,8	0,9	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	0,7
FV	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MD	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7	136,2	1,0	278,8	24,2	0,0	0,0	0,0	303,0	2,2
	8	282,5	1,0	320,0	0,0	0,0	0,0	0,0	320,0	1,1

De forma análoga ao realizado nas três fases anteriores, representou-se através da Fig. 4.29 e da Fig. 4.30 os valores obtidos para as absorções de água e cimento ao longo da furação quaternária.

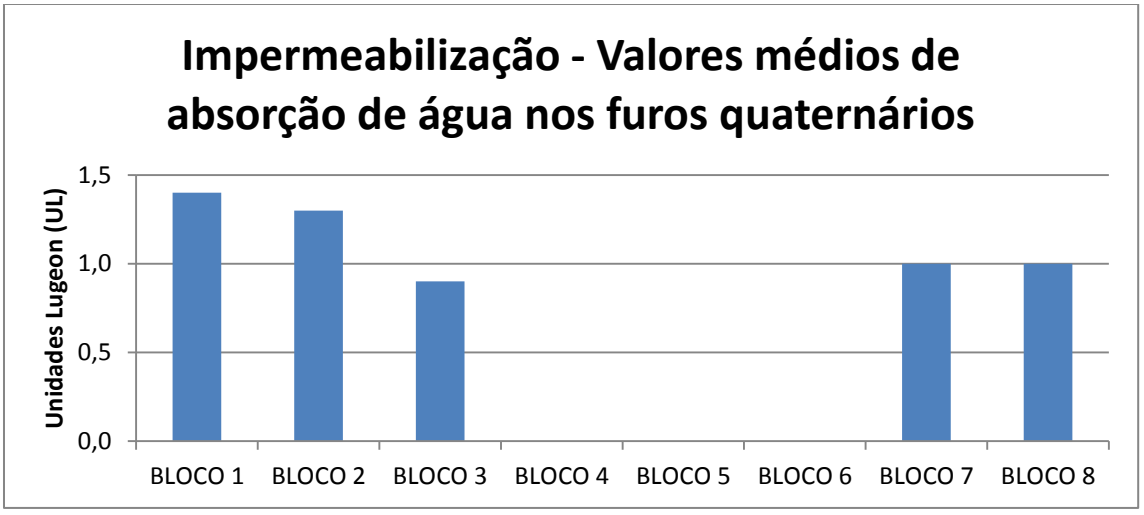

Fig. 4.29 - Absorção média de água nos furos quaternários da cortina de estanqueidade

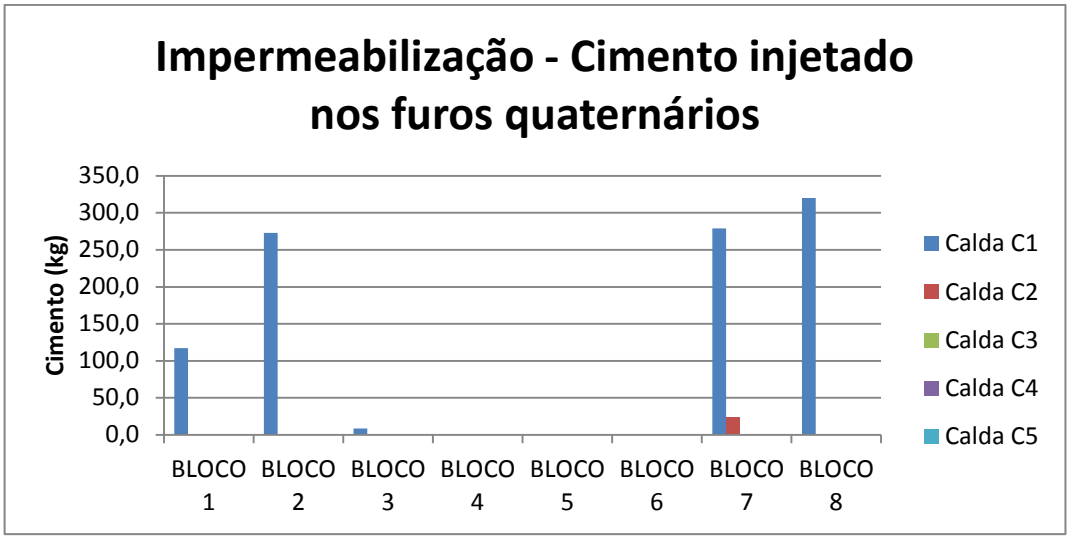

Fig. 4.30 - Absorção de cimento nos furos quaternários da cortina de estanqueidade

A permeabilidade do maciço voltou novamente a diminuir, apenas restando a zona da margem esquerda com absorções ligeiramente superiores a uma unidade "Lugeon".

O tipo de calda empregue e a sua quantidade distribuiu-se de uma forma aproximadamente homogénea pelas margens esquerda e direita, sendo que na furação quaternária praticamente apenas foi utilizada a calda com traço mais fino (C1).

Como já tinha sido referido, toda a zona do fundo do vale dispensou a realização de furos quaternários.

Analisando novamente os resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos quaternários, compreende-se a decisão tomada em obra de concluir o tratamento de impermeabilização, não dando seguimento à realização da furação quinária. Os valores obtidos para a permeabilidade do maciço são já suficientemente pequenos, cumprindo o especificado nas Normas de Projeto de Barragens de Betão.

4.5.4.5. Análise do tratamento efetuado

Importa agora fazer uma análise global dos resultados decorrentes do tratamento de impermeabilização. Deste modo, elaboraram-se dois gráficos (Fig. 4.31 e Fig. 4.32) onde constam os valores associados à evolução das absorções de água e de cimento, respetivamente. Tais valores são respeitantes à totalidade dos furos inerentes à execução da cortina de estanqueidade.

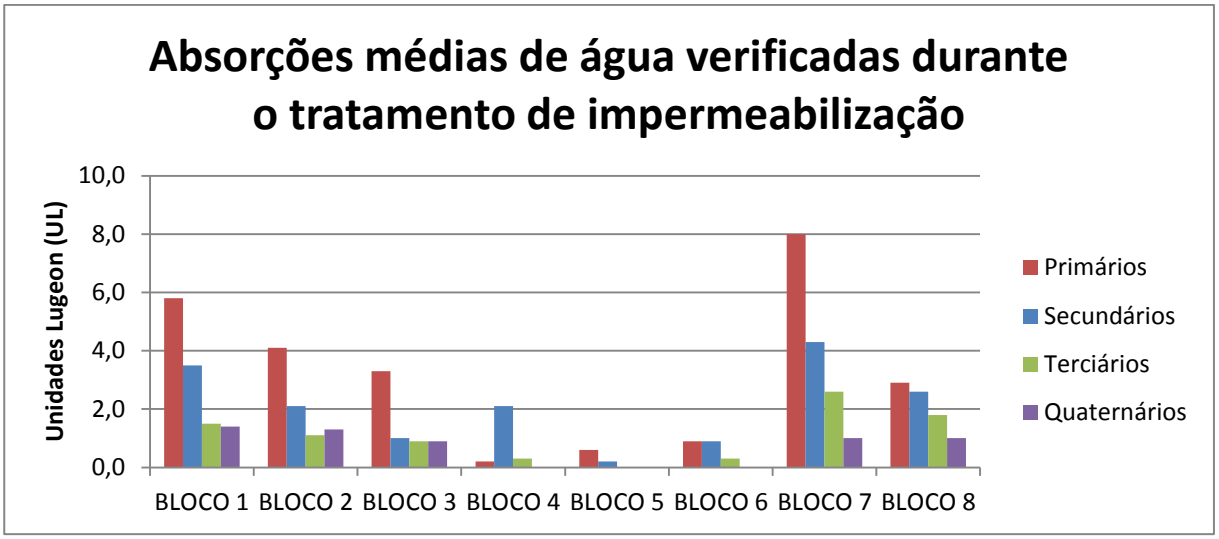

Fig. 4.31 - Evolução da permeabilidade do maciço ao longo do tratamento de impermeabilização

Analisando agora o efeito do tratamento de impermeabilização, atente-se nas barras ilustradas na Fig. 4.31, respeitantes às várias fases de injeção da cortina. Ao longo das quatro fases, a variação da permeabilidade adotou sempre uma tendência decrescente. O objetivo concreto do tratamento efetuado era reduzir a permeabilidade da zona tratada para valores "Lugeon" máximos a rondar a unidade. Observando novamente a Fig. 4.31, percebe-se que as zonas compreendidas pelos oito blocos atingiram o valor estabelecido, umas mais rapidamente (blocos 4, 5 e 6), outras com maior dificuldade (sobretudo blocos 7 e 8).

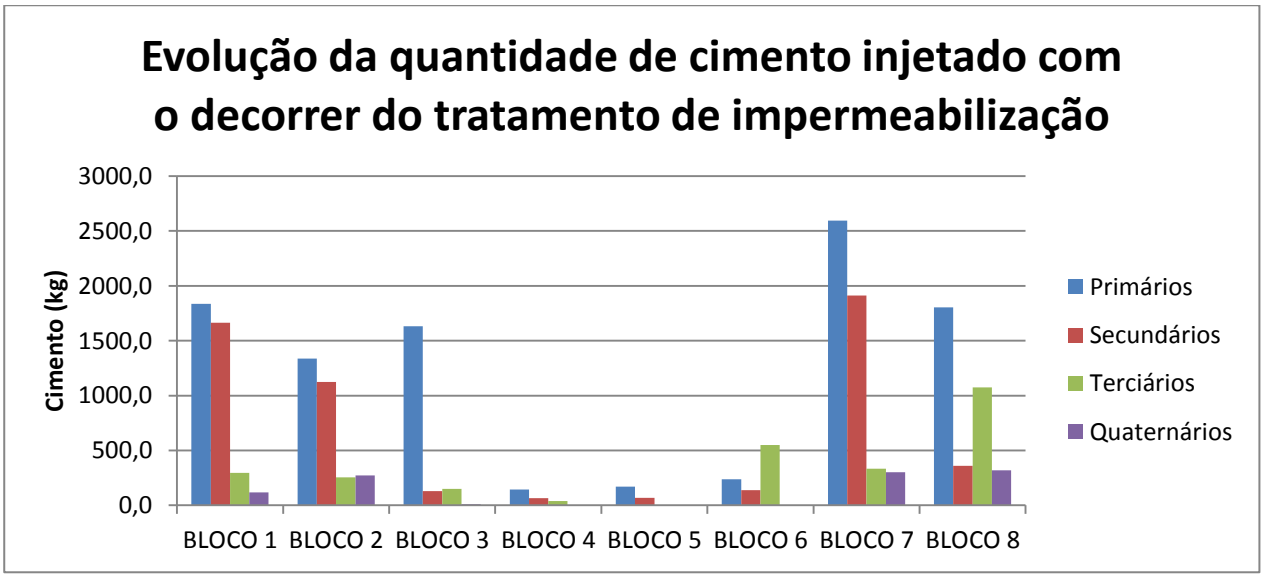

Fig. 4.32 - Evolução das absorções de cimento ao longo do tratamento de impermeabilização

No que à absorção de cimento diz respeito, a tendência é, no geral, decrescente com o decorrer das quatro fases de injeção. Em regra, os furos primários foram os que mais cimento absorveram (tendo nesta fase sido empregue os vários traços de calda considerados – subcapítulo 4.5.4.1.), havendo apenas a exceção da zona do bloco 6, onde foi na fase terciária que se registaram maiores quantidades

de cimento injetado. No tratamento de impermeabilização, e no que às absorções de cimento diz respeito, não houve uma discrepância tão grande entre a zona da margem esquerda com a da margem direita, como tinha ficado patente na análise das absorções de cimento do tratamento de consolidação. Por último, voltou a ficar claro a melhor qualidade da zona do fundo do vale face às restantes zonas, como comprovam as reduzidas absorções de cimento ao longo das sucessivas fases de injeção.

4.6. ÓRGÃOS DE DRENAGEM E PIEZOMETRIA

Como já foi referido, um dos principais aspetos a ter em consideração no dimensionamento das barragens relaciona-se com as subpressões, decorrentes da presença de percolação no maciço de fundação (Fig. 4.33).

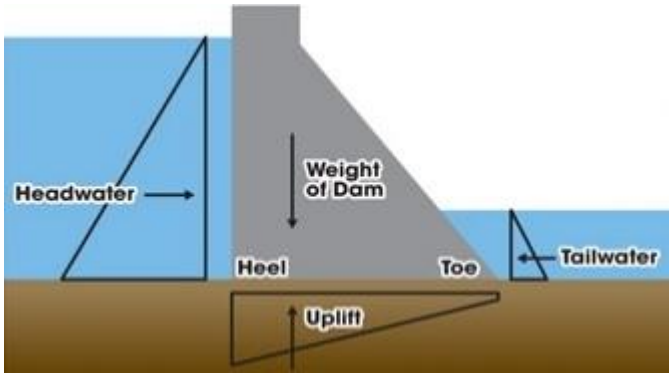

Fig. 4.33 - Esquema exemplificativo das várias pressões a atuar no corpo da barragem decorrentes da ação da água, incluindo as subpressões ("uplift") [49]

Para minorar e controlar o efeito das subpressões, procede-se correntemente à realização de uma rede de drenagem e à instalação de piezómetros que darão informação sobre as subpressões na base da estrutura.

No caso da NBAC, e no que aos drenos diz respeito, o seu dimensionamento teve em consideração os tratamentos de consolidação e impermeabilização efetuados, sobretudo em relação ao comprimento médio da furação primária da cortina de impermeabilização. No entanto, foi necessário definir previamente um conjunto de furos de drenagem com o objetivo de cumprir os requisitos associados ao diagrama de subpressões considerado no cálculo da estrutura.

Deste modo, recorreu-se ao critério de Hoffman para efetuar o pré-dimensionamento da rede de drenagem. Este método foi utilizado para determinar o afastamento dos drenos, para que fosse cumprida a regra definida nas Normas de Projeto de Barragens [25], que determina que a carga hidráulica na linha de drenagem seja igual a um terço da carga hidráulica registada a montante da estrutura. Passando a citar a regra mencionada, que consta da alínea 2.e) do Artigo 31º do regulamento acima referido: "Na avaliação da segurança para cenários correntes, quer incluam ou não ações dinâmicas, recomenda-se que as subpressões na base das barragens, designadamente no caso de barragens gravidade ou abóbada espessa, na secção correspondente à cortina de drenagem, sejam da ordem de um terço da pressão a montante". A secção considerada para o pré-dimensionamento foi a do fundo do vale, pois é nesta zona que se verifica a carga hidráulica máxima junto ao pé de montante (34.40 m). Este valor resulta da diferença entre a cota do NPA (665.40) e a cota de pé de jusante na zona do fundo do vale (631.00). A distância "b" entre o pé de montante e a linha de interseção entre os drenos e o contacto betão-rocha foi de cinco metros. Deste modo, com estes dados é então possível

aplicar o critério de Hoffman. Este critério recorre a duas expressões para calcular os parâmetros "c" e "m" representados no Quadro 4.15. Nas Equações (4.2) e (4.3) estão representadas, respetivamente, as expressões que conduzem à determinação destes dois parâmetros:

$$c = \frac{a}{\pi} \ln \frac{a}{\pi . d} \tag{4.2}$$

$$m = \frac{c}{(c + 2b)} \tag{4.3}$$

Quadro 4.15 - Aplicação do critério de Hoffman na determinação do afastamento entre drenos

Determinação do afastamento dos drenos				
a (m)	c	m	H_d=m.(H_0-H_j)	k
2,00	1,48	0,13	4,43	0,13
2,50	2,02	0,17	5,79	0,17
3,00	2,60	0,21	7,11	0,21
3,50	3,21	0,24	8,36	0,24
4,00	3,84	0,28	9,54	0,28
4,50	4,49	0,31	10,65	0,31
5,00	5,15	0,34	11,70	0,34

O valor "k" traduz a estimativa da relação (em percentagem) do valor da subpressão no alinhamento da cortina de drenagem face ao valor da carga hidráulica no pé de montante da barragem.

Assim, atendendo ao valor de "k" próximo dos 0.33 (de acordo com o que está definido nas Normas [25]), resultou um afastamento "a" entre drenos próximo dos cinco metros.

No total foram realizados 27 furos de drenagem, distribuídos ao longo dos oito blocos da barragem (Fig. 4.34).

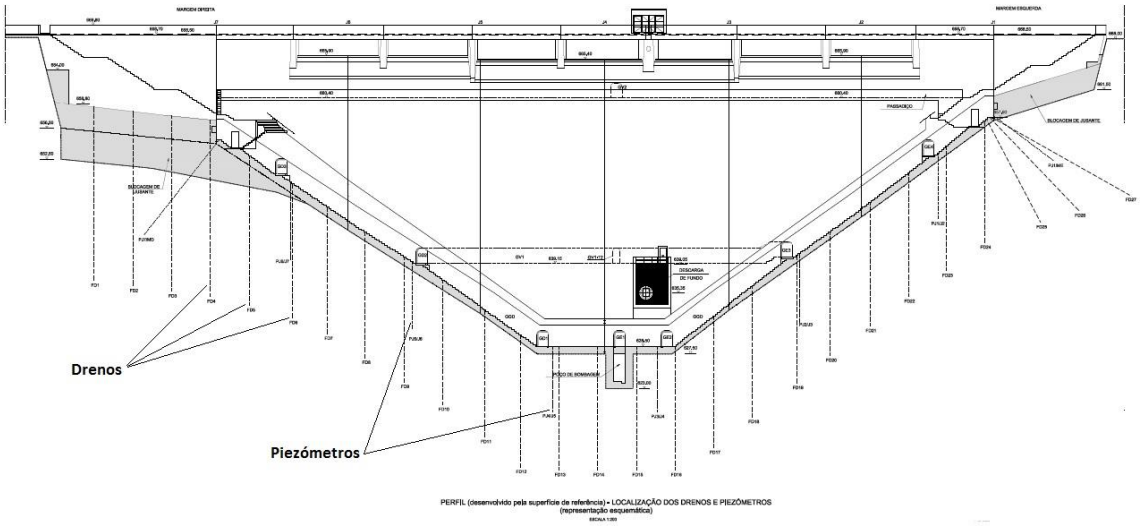

Fig. 4.34 - Alçado com o pormenor da localização dos drenos e dos piezómetros (Adaptado de EDP) [50]

Na Fig. 4.35 está representado um corte-tipo da barragem com a localização dos furos de drenagem [50].

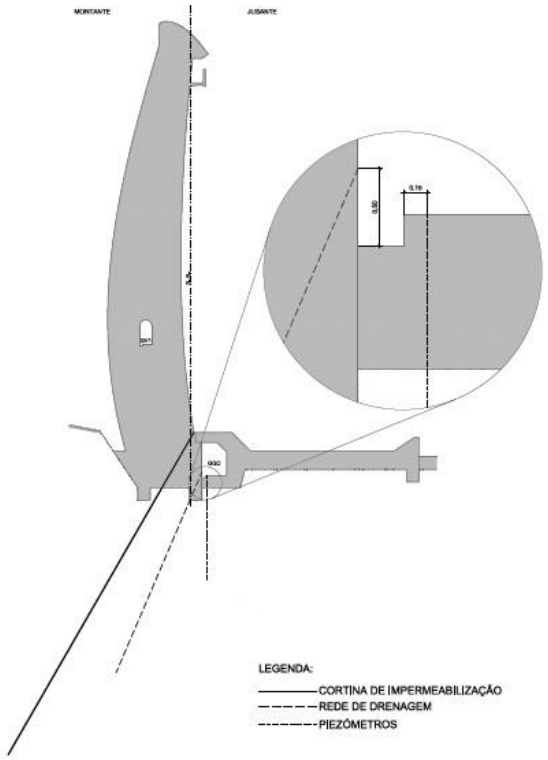

Fig. 4.35 - Corte com o pormenor da localização da cortina de impermeabilização, dos furos de drenagem e dos piezómetros (Adaptado de EDP) [50]

Os furos constituintes da rede de drenagem foram emboquilhados no hasteal de montante da galeria geral de drenagem, com um pendor próximo do da cortina de estanqueidade, com vista à drenagem da zona da fundação a jusante da cortina de impermeabilização. Os furos de drenagem foram executados

com um diâmetro "d" de aproximadamente 2.5 polegadas (6.25 cm), recorrendo a varas acopladas entre si onde na extremidade se usou coroas com "bits" acoplados, preparados para o eventual corte de armaduras. Nos furos de drenagem foram também realizados ensaios de absorção do tipo Lugeon com os cinco patamares de pressão estabilizada (0.25-0.5-1.0-0.5-0.25 MPa). Tendo em conta que estes ensaios "Lugeon" foram realizados após a conclusão do tratamento de impermeabilização, os resultados decorrentes de tais ensaios poderão servir para avaliar o efeito do tratamento efetuado. Apresentam-se na Fig. 4.36 os resultados obtidos para os referidos ensaios [51].

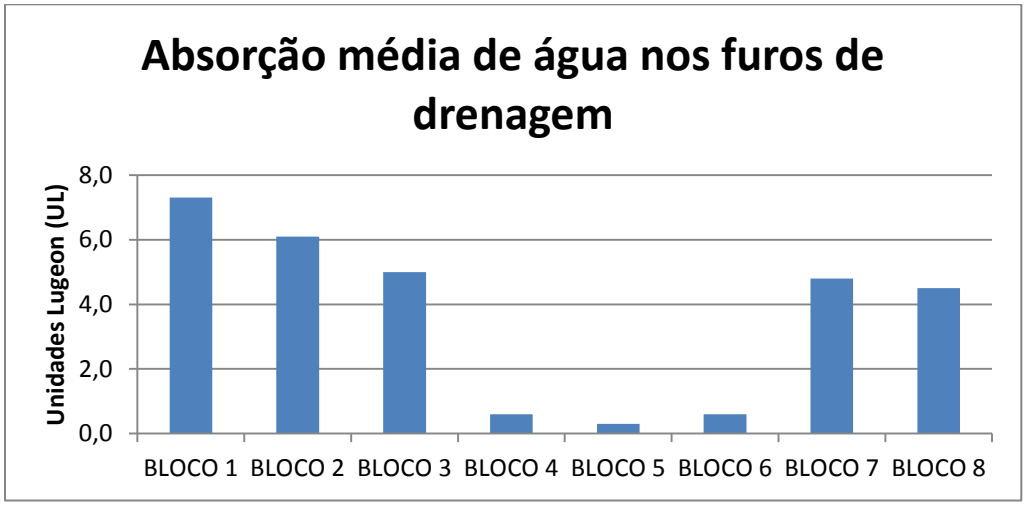

Fig. 4.36 - Resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de drenagem

Os resultados obtidos podem ser um pouco surpreendentes, sobretudo se tivermos em conta os resultados que se obteve nos ensaios "Lugeon" realizados na furação quaternária da cortina de impermeabilização. Contudo, a principal razão para os valores apresentados na Fig. 4.36 pode resultar da distância entre a cortina de impermeabilização e a cortina de drenagem. Ao contrário do tratamento de consolidação, que foi um tratamento em massa que envolveu a injeção de calda de cimento num grande volume do maciço, o tratamento de impermeabilização foi um tratamento mais local, que se estendeu ao longo de uma linha de referência sob a estrutura da NBAC. Esta disposição dos furos de impermeabilização confere à cortina uma reduzida zona de influência relativamente ao maciço que a rodeia. Assim sendo, e tendo em conta que a distância entre a cortina de impermeabilização e os furos de drenagem rondará os três metros, tal distância pode ser suficiente elevada para que a execução da cortina não tenha grande influência na permeabilidade do maciço imediatamente a jusante da referida cortina. Assim sendo, comparou-se os resultados dos ensaios "Lugeon" realizados no âmbito da furação primária do tratamento de impermeabilização com os resultados dos ensaios "Lugeon" realizados nos furos de drenagem (Fig. 4.37).

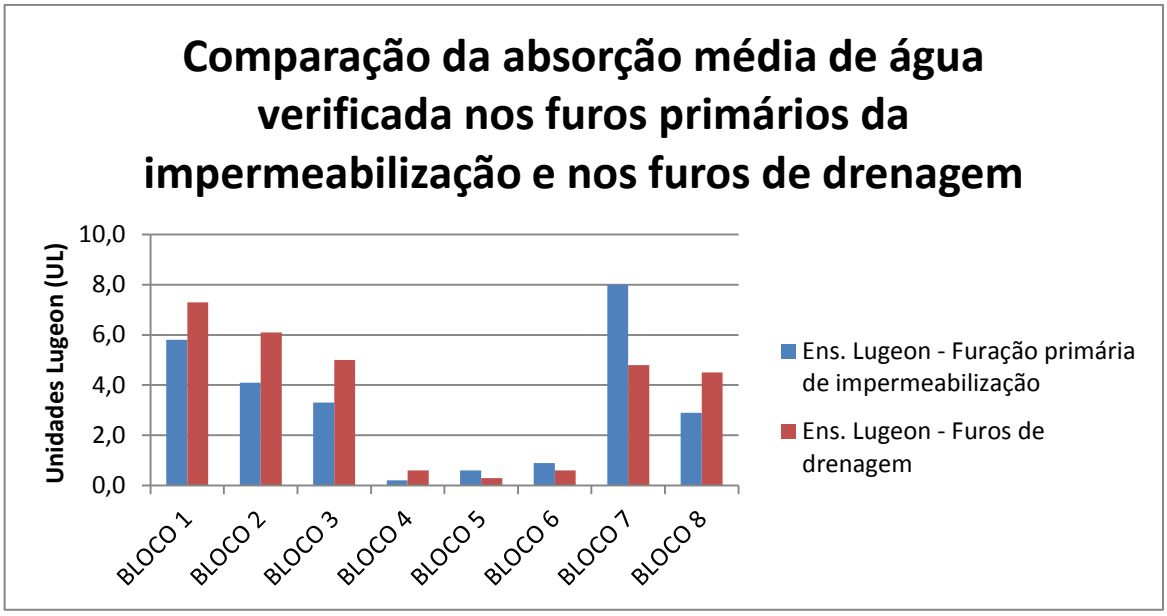

Fig. 4.37 - Comparação da permeabilidade do maciço a jusante da cortina de impermeabilização entre duas fases: aquando da furação primária do tratamento de impermeabilização e no âmbito da abertura dos furos de drenagem

Pela análise da Fig. 4.37 verifica-se que não há grande diferença entre os resultados das duas campanhas de ensaios "Lugeon" em análise, o que vem corroborar a ideia de que o tratamento de impermeabilização é realmente um tratamento localizado com uma finalidade muito específica, sendo que a zona a jusante da cortina de impermeabilização, abrangida pelos furos de drenagem, apenas melhorou a sua permeabilidade devido ao tratamento de consolidação.

A par dos drenos, a instalação de uma rede de piezómetros é importantíssima, sobretudo durante o período de vida útil da estrutura, pois permite controlar os valores das subpressões na base da barragem. No caso da NBAC, optou-se por colocar um piezómetro por bloco. Também na Fig. 4.34 e na Fig. 4.35 se encontra representada a localização dos piezómetros, tendo estes sido emboquilhados também na galeria geral de drenagem, com pendor vertical (90°) [50].

Foram também realizados ensaios "Lugeon" à medida do avanço da abertura dos oito furos da rede de piezómetros [52], mas não se consideraram os seus resultados, pois apenas se obteve acesso a três dos oito boletins de ensaio. Consequentemente, a representatividade dos resultados seria reduzida.

Como tem vindo a ser referido, o sistema de drenagem, a par da rede de piezómetros, constitui um importante meio de observação do comportamento hidráulico do maciço de fundação da barragem. Assim, durante o seu período de vida útil deverão ser verificadas as águas recolhidas nos órgãos de drenagem, para análise química. Os resultados dessa análise deverão ser comparados com a qualidade da água presente na albufeira, e caso se detetem diferenças, estas poderão resultar da mistura da água drenada com material de recheio de descontinuidades, o que será um indicador do possível arrastamento e lavagem da fundação. Os piezómetros permitem ter uma perceção real dos valores das subpressões, e a constante observação e registo dos mesmos é também um importante meio para averiguar a estabilidade hidráulica e estrutural da barragem. Anomalias verificadas num destes dois meios de observação das condições da estrutura podem desencadear a necessidade de intervenções para as corrigir.

5
CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta dissertação consistiu na análise da evolução das propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço de fundação da Nova Barragem do Alto Ceira, sendo esta evolução decorrente do tratamento com injeções de calda de cimento efetuado no maciço de fundação da referida barragem.

Com vista à compreensão dos assuntos inerentes ao tratamento efetuado no maciço de fundação da NBAC, foi necessário primeiro apreender as matérias envolvidas na avaliação e classificação de maciços rochosos, nomeadamente tipos de condicionantes geológicos, técnicas de prospeção, ensaios "in situ" e métodos de classificação de maciços. Paralelamente, foi indispensável tomar conhecimento da técnica de tratamento em si (injeções com calda de cimento), as fases e os trabalhos que ela engloba, as especificidades do material em questão, e as finalidades que se pretende atingir quando se recorre a esta técnica de tratamento. Só depois desta fase inicial de aprendizagem foi possível avançar para a análise do tratamento efetuado no caso de estudo.

Antes do início do tratamento propriamente dito, foi necessário avaliar as condições naturais do maciço de fundação da NBAC, para ajuizar e projetar o tratamento a realizar. Foram levadas a cabo campanhas de prospeção envolvendo recuperação e análise de amostras, avaliou-se a permeabilidade do maciço e as suas propriedades mecânicas através de ensaios do tipo "Lugeon" e ensaios sísmicos, respetivamente. Os resultados obtidos permitiram dividir o maciço em três zonas, cada uma com características próprias: zona da margem esquerda, zona do fundo do vale e zona da margem direita. Assim sendo, e no que à permeabilidade diz respeito, constatou-se que toda a zona superficial do maciço se apresentava bastante permeável. Em profundidade, a permeabilidade diminuiu, com exceção da zona da margem direita. Relativamente aos resultados dos ensaios com leques sísmicos, observou-se uma zona superficial de menor qualidade nas zonas compreendidas pelas duas margens, contrastando com uma boa qualidade do maciço na zona do fundo do vale.

Após esta fase de reconhecimento geológico do maciço, iniciou-se o tratamento do mesmo com as injeções de consolidação. O intuito principal do tratamento de consolidação foi melhorar as propriedades mecânicas do maciço. No entanto, espera-se que o preenchimento com calda de cimento das principais descontinuidades presentes no maciço provoque uma redução generalizada da permeabilidade no mesmo. Através da injeção dos furos dispostos em leque, foi possível injetar calda de cimento num grande volume do maciço situado sob o corpo da barragem. Depois de concluídas as injeções de consolidação, realizou-se uma nova campanha sísmica para avaliar a evolução do comportamento mecânico do maciço. Dos resultados obtidos destaca-se a melhoria das zonas superficiais das margens, sendo que as restantes zonas do maciço mantiveram os elevados valores das velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais já observados na primeira campanha de

ensaios, pelo que se considera que o tratamento de consolidação melhorou substancialmente as condições mecânicas do maciço de fundação da barragem.

Depois de melhoradas as propriedades mecânicas do maciço, a fase seguinte do tratamento consistiu na minoração dos efeitos negativos da percolação ao longo do maciço – ação das subpressões na base da barragem. Desta forma, revelou-se necessária a execução de uma cortina de impermeabilização ao longo do corpo da estrutura que servisse de barreira ao fluxo de água ao longo do maciço de fundação.

A execução da cortina de impermeabilização foi dividida em quatro fases de injeção de calda de cimento, sendo que o número de fases dependeu da evolução da permeabilidade do maciço com o decorrer do tratamento de impermeabilização, na zona compreendida pelos furos da cortina. Os furos realizados em cada uma destas fases incluíram a execução de ensaios do tipo "Lugeon". Os resultados destes ensaios aquando da abertura dos furos primários da cortina vieram confirmar a redução da permeabilidade no maciço de fundação da NBAC, sendo tal redução decorrente do tratamento de consolidação. A evolução da permeabilidade com o decorrer das várias fases de injeção da cortina de impermeabilização adotou uma tendência decrescente, até que se obtiveram nos resultados dos ensaios "Lugeon" realizados na fase de injeções quaternária valores suficientemente pequenos (próximos da unidade "Lugeon") por forma a cumprir o especificado nas Normas de Projeto de Barragens de Betão, no que à permeabilidade diz respeito. A evolução decrescente da permeabilidade é corroborada pela tendência também decrescente na absorção da quantidade de calda (cimento) pelos furos, com o avanço da execução das quatro fases de injeção da cortina.

Com vista ao controlo da percolação e das subpressões, foram também definidos um conjunto de furos de drenagem e instalado um sistema de piezómetros. Estas duas redes foram projetadas com o intuito de observar o comportamento hidráulico do maciço durante o período de vida útil da barragem. A monitorização permanente dos valores das subpressões medidos nos piezómetros permite avaliar em qualquer altura a estabilidade hidráulica e estrutural da NBAC. Assim sendo, estes dois meios de observação serão, porventura, aqueles que melhor permitirão detetar anormalidades no funcionamento da estrutura e do maciço sob esta, podendo daí resultar intervenções para retificação das anomalias encontradas.

Da análise dos resultados apresentados pode-se concluir que a aplicação da técnica de tratamento envolvendo injeções com calda de cimento foi bem sucedida no caso de estudo analisado, a Nova Barragem do Alto Ceira. O presente trabalho focou o estudo do comportamento hidráulico e mecânico do maciço, através do estudo da permeabilidade do mesmo e da velocidade de propagação das ondas sísmicas de compressão. Tornou-se claro que o tratamento efetuado permitiu preencher as principais descontinuidades presentes no maciço, melhorando de forma considerável as condições hidráulicas (diminuição da permeabilidade, da percolação e das subpressões) e mecânicas do mesmo. Este trabalho veio comprovar que o tratamento de maciços rochosos com injeções de calda de cimento continua a ser uma boa opção para aplicação em casos de obra idênticos ao estudado.

Por fim, importa também referir a importância que a presente dissertação teve para o seu autor. Na realização da mesma foram aplicados conhecimentos adquiridos ao longo do curso, sendo de destacar os estudados nas disciplinas de Geologia da Engenharia, Materiais de Construção, Mecânica dos Solos, Obras Subterrâneas e também Fundações.

BIBLIOGRAFIA

[1] http://www.flickr.com/photos/sacramentodistrict/7018153493/. Janeiro de 2014

[2] http://www.dur.ac.uk/~des0www4/cal/dams/hydr/hydrf10.htm. Janeiro de 2014

[3] Matos Fernandes, M. *Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais – Volume I*, FEUP edições, Porto, 2006.

[4] Clive Houlsby, A. *Construction and Design of Cement Grouting: A Guide to Grouting in Rock Foundations*. M.D. Morris, P.E., 1990.

[5] Martins de Lima, C., Topa Gomes, A., Quintanilha de Menezes, J. *Apontamentos de Geologia de Engenharia*. FEUP, 2009.

[6] http://whaton.uwaterloo.ca/waton/normal.html. Outubro de 2013

[7] http://www.flickr.com/photos/donnazoll/7185347831. Outubro de 2013

[8] http://ucrtoday.ucr.edu/14056/sulfide-rich-black-shale. Outubro de 2013

[9] http://geo.web.ua.pt/índex.php?option=com_content&view=article&id=150&Itemid=48.

Novembro de 2013

[10] http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=152&Itemid=49.

Novembro de 2013

[11] http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=153&Itemid=50.

Novembro de 2013

[12] http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=158:amostradores&catid

=34:amostragem&Itemid=54. Novembro de 2013

[13] MIEC, *Slides da 15ª Aula Teórica de Geologia de Engenharia – Ano Letivo 2013/2014*, FEUP.

[14] http://www.colcrete-eurodrill.com/products/colloidal-grout-mixer-pump-units. Outubro de 2013

[15] http://www.chemgrout.com/groutpumppics/CGMIX45_E.gif. Outubro de 2013

[16] Unified Facilities Criteria (UFC). *Grouting Methods and Equipment.* USA, 2004

[17] http://www.chemgrout.com/pcpump-L4.htm. Janeiro de 2014

[18] http://users.tpg.com.au/houlsby1/indexintro.htm.Outubro de 2013

[19] http://www.chemgrout.com/accessories.htm. Outubro de 2013

[20] Almeida, E., *Materiais de Construção – Laboratório: Determinação da Finura do Cimento*, Área Departamental de Engenharia Civil – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve, 2006

[21] http://www.emabrt.hu/images/PICTURES/TEVKOR/jet_grout/jet01_n.jpg. Janeiro de 2014

[22] http://www.windfarmbop.com/tag/wind-turbine-foundation-grouting. Outubro de 2013

[23] http://www.engr.psu.edu/ce/Divisions/structure/Tour/CatoA_13.htm. Outubro de 2013

[24] http://en.wikipedia.org/wiki/Lugeon. Outubro de 2013

[25] Diário da República. *Normas de Projeto de Barragens*. Portaria nº 846/93, 1993, 213/93 SÉRIE I-B.

[26] http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/All/FDFA7ACACFB3DD1CC2256FE90032282B/

$file/Picture19_500.jpg?OpenElement. Janeiro de 2014

[27] http://users.tpg.com.au/houlsby1/Doing%20It-leaks11a.htm. Outubro de 2013

[28] GEONORTE, *Cartografia Geológica e Caracterização Geotécnica – Relatório Final*, Nova Barragem do Alto Ceira, 2011

[29] Figueiras, J., Rodrigues, C., Faria, R., Castro, A., Pimentel, R., Matos, D. *Monitorização experimental da Nova Barragem do Alto Ceira usando a tecnologia da fibra ótica.* Encontro Nacional de Betão Estrutural, FEUP, 2012

[30] EDP. *PRT201102777 Tratamento da Fundação da Barragem: Furos de Ensaio – Planta e Perfil pela superfície de referência*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2011.

[31] https://www.facebook.com/photo.php?fbid=392404780815638&set=a.392404590815657.90631.

114867211902731&type=3&theater. Janeiro de 2014

[32] http://www.serrasonline.com/index.php?view=article&id=224%3Anova-barragem-no-alto

-ceira&option=com_content&Itemid=67. Janeiro de 2014

[33] RODIO Portugal SA – Geotecnia e Engenharia de Fundações

[34] EDP. *Tratamento da Fundação da Barragem: Projeto de Execução*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, 2011.

[35] RODIO, *Log's dos Furos de Ensaio*, 2011, Barragem do Alto Ceira.

[36] RODIO. *Ensaios de Permeabilidade Lugeon (Furos de Ensaio)*, 2011, Barragem do Alto Ceira.

[37] DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA – Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental. *Tomografias Sísmicas nas fundações da Nova Barragem do Alto Ceira – Fase 1 (pré-tratamento)*, LNEC, 2012.

[38] EDP. *PRT201102778 Tratamento da Fundação da Barragem: Consolidação – Planta e Perfil pela superfície de referência*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2011.

[39] EDP. *PRT201103003 Tratamento da Fundação da Barragem: Consolidação – Perfis PCD1 a PCD9*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2011.

[40] EDP. *PRT201103004 Tratamento da Fundação da Barragem: Consolidação – Perfis PCD10 a PCD15 e Perfis PCE13 a PCE11*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2011.

[41] EDP. *PRT201103005 Tratamento da Fundação da Barragem: Consolidação – Perfis PCE10 a PCE1*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2011.

[42] RODIO. *Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira – Tratamento de Fundações: Relatório – Ensaios de Injetabilidade*. 2012.

[43] RODIO. *Parte diária das Injeções de Consolidação (método ascendente)*, 2013, Barragem do Alto Ceira - 5024.

[44] DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA – Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental. *Tomografias Sísmicas nas fundações da Nova Barragem do Alto Ceira – Fase 2 (após-tratamento)*, LNEC, 2013.

[45] EDP. *PRT201102780 – Planta e Perfil pela superfície de referência*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução – Tratamento da Fundação da Barragem: Impermeabilização, 2011.

[46] RODIO. *Parte diária da Furação (Tratamento de Impermeabilização)*, 2013, Barragem do Alto Ceira.

[47] RODIO. *Ensaios de Permeabilidade Lugeon Simplificado (Tratamento de Impermeabilização)*, 2013, Barragem do Alto Ceira.

[48] RODIO. *Parte diária das Injeções de Impermeabilização (método ascendente)*, 2013, Barragem do Alto Ceira.

[49] http://www.hydroworld.com/articles/hr/print/volume-30/issue-6/articles/dam-safety-stability-and-rehabilitation-of-smaller-gravity-dams.html. Janeiro de 2014

[50] EDP. *PRT201300397 Tratamento da Fundação da Barragem: Redes de Drenagem e Piezométrica – Definição (Planta, Perfil pela superfície de referência e corte)*. Aproveitamento Hidroelétrico de Santa Luzia, Nova Barragem do Alto Ceira, Projeto de Execução, 2013.

[51] RODIO. *Ensaios de Permeabilidade Lugeon (Furos de Drenagem)*, 2013, Barragem do Alto Ceira.

[52] RODIO. *Ensaios de Permeabilidade Lugeon (Furos de Piezometria)*, 2013, Barragem do Alto Ceira.

ANEXOS

ANEXO A1 – Tratamento de consolidação: tipos e quantidade de calda injetada, pressões de injeção e comprimento de furação (em cada furo);

ANEXO A1

PERFIL PCE-1							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0	114,0					5,2
2	13,0	199,0					5,3
3	14,0	60,4					5,7
4	15,0		192,0				6,0
5	15,0		4,9				4,3
6	15,5		3,7	2,9			4,4
Comp. Médio (m)	14,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		373,4	200,6	2,9	0,0	0,0	5,2
Total Furação (m)	85,5						

PERFIL PCE-2							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,5		490,0				4,9
2	14,5		72,6				5,1
3	15,0	43,3					5,5
4	16,5	4,8					4,2
5	17,5	1,9					4,5
6	18,5	359,4	398,9	744,6	50,0		5,0
Comp. Médio (m)	15,9	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		409,4	961,5	744,6	50,0	0,0	4,9
Total Furação (m)	95,5						

PERFIL PCE-3							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	15,0		648,0	236,0			4,7
2	15,5		603,0	240,0			5,1
3	17,0	993,0	618,0	657,0	492,0	1046,0	3,0
4	19,5	750,0	587,7	511,0			6,0
5	20,5		1,4				4,3
6	21,0		7,4				4,4
Comp. Médio (m)	18,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1743,0	2465,5	1644,0	492,0	1046,0	4,6
Total Furação (m)	108,5						

PERFIL PCE-4							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	12,5	264,0	662,0	669,0			3,4
2	14,0		795,0	1295,0	163,0		4,2
3	16,0		1,3				4,0
4	18,5	319,4	452,0	507,0			5,2
5	20,5	39,0					4,3
6	18,5	340,8	486,0	19,0			5,9
7	16,0	194,0	588,0	208,0			5,3
8	14,0			24,0	48,1		4,0
9	12,5			9,2	0,9		4,3
Comp. Médio (m)	15,8	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1157,2	2984,3	2731,2	212,0	0,0	4,5
Total Furação (m)	142,5						

PERFIL PCE-5							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	12,5	183,0					4,7
2	14,0	816,7					5,0
3	16,0	35,0					4,3
4	18,5		607,7	45,0			3,7
5	20,5		232,4				6,9
6	18,5	386,0	317,0	178,0		8,0	5,3
7	16,0	452,0					5,9
8	14,0	314,3		64,0	92,0		4,6
9	12,5	106,2		96,0	30,0		4,3
Comp. Médio (m)	15,8	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2293,2	1157,1	383,0	122,0	8,0	5,0
Total Furação (m)	142,5						

PERFIL PCE-6							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	593,0	121,0				5,0
2	15,0	1,2					4,4
3	17,0	377,0					6,0
4	19,0	533,0	555,0	541,0	194,0		4,6
5	21,5		21,3				4,3
6	19,5	36,0	480,0	137,0			6,3
7	17,0	423,0					6,0
8	14,0	319,0					5,3
9	12,0	402,1	471,0	230,0			4,4

Comp. Médio (m)	16,6	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2684,3	1648,3	908,0	194,0	0,0	5,1
Total Furação (m)	149,0						

PERFIL PCE-7							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	1029,0	385,0				5,1
2	15,0	283,0					5,5
3	17,0	173,0					4,4
4	19,0	284,5					6,7
5	21,5	1190,0	452,0				6,6
6	19,5		0,3				4,1
7	17,0	382,0					6,1
8	14,0	304,0		116,0			4,1
9	12,0			56,0			4,2
Comp. Médio (m)	16,6	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		3645,5	837,3	172,0	0,0	0,0	5,2
Total Furação (m)	149,0						

PERFIL PCE-8							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	1379,0					4,8
2	15,0	333,0		74,0	14,0		5,8
3	17,0	163,0		12,0	12,0		5,6
4	19,0	719,0		623,0	559,0		5,1
5	21,5				22,0		5,0

6	19,5	140,0	569,0	710,0	192,0		7,2
7	17,0	513,0		281,0			5,0
8	14,0			46,0			4,3
9	12,0	460,0	515,0	840,0			4,4
Comp. Médio (m)	16,6	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		3707,0	1084,0	2586,0	799,0	0,0	5,2
Total Furação (m)	149,0						

PERFIL PCE-9							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5	262,0					4,8
2	15,0	228,0	177,0				3,9
3	17,0		117,0	189,0			2,8
4	19,0	159,0					6,6
5	21,0				12,0		4,3
6	19,0			10,0			4,0
7	16,5	2,4					5,3
8	14,0	1641,0	708,0	20,0	18,0		3,6
9	12,0	33,0	28,0	16,0			4,0
Comp. Médio (m)	16,4	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2325,4	1030,0	235,0	30,0	0,0	4,4
Total Furação (m)	148,0						

PERFIL PCE-10							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5	689,0	673,0	425,0			3,8

2	15,0		410,0				4,0
3	17,0	436,0	209,0	245,0	595,0		1,1
4	19,0	420,8					6,0
5	21,0	499,0	425,0	828,0	182,0		2,9
6	19,0			82,5	582,0	309,0	3,9
7	16,5		580,0	1332,0			5,2
8	14,0	238,0		405,0			6,2
9	12,0	141,0	443,0	58,2	52,0		4,4
Comp. Médio (m)	16,4	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2423,8	2740,0	3375,7	1411,0	309,0	4,2
Total Furação (m)	148,0						

PERFIL PCE-11							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5	238,0					7,5
2	15,0	164,2					8,8
3	17,0	31,0	17,0	21,0	32,0		5,3
4	19,0	477,1	12,6				9,3
5	21,0	60,0					7,6
6	19,0	2,6	56,8				10,2
7	16,5	200,0					9,8
8	14,0	312,0					8,8
9	12,0	655,0	417,0	109,0			8,1
Comp. Médio (m)	16,4	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2139,9	503,4	130,0	32,0	0,0	8,4
Total Furação (m)	148,0						

PERFIL PCE-12							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0	581,8	575,0	334,0			7,1
2	14,0	26,8			13,0		7,6
3	16,5	47,5					9,3
4	19,0	20,2					10,3
5	21,0	603,6	46,4	85,0	169,0	51,0	7,4
6	19,0						
7	16,5	86,0		86,0			10,3
8	14,0	61,0		70,0			8,5
9	12,0	228,0		130,0			7,0
Comp. Médio (m)	16,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1654,9	621,4	705,0	182,0	51,0	8,4
Total Furação (m)	145,0						

PERFIL PCE-13							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0	531,5					7,9
2	14,0	311,0					8,2
3	16,5	53,0					9,1
4	19,0	16,7					10,0
5	21,0	26,2					11,0
6	19,0	30,7					10,6
7	16,5	18,0		215,0			9,8
8	14,0	24,6		19,4			8,5

9	12,0	201,0		133,0			8,3
Comp. Médio (m)	16,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1212,7	0,0	367,4	0,0	0,0	9,3
Total Furação (m)	145,0						

PERFIL PCD-1							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	16,0	222,0	424,4	653,0	249,0		4,4
2	17,0		2,2				4,3
3	17,5		1258,0	1683,0			5,0
4	18,0		1235,0				6,4
5	18,0	568,0	678,0	334,0			6,5
6	17,5	0,8					4,0
7							
8							
9							
Comp. Médio (m)	17,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		790,8	3597,6	2670,0	249,0	0,0	5,1
Total Furação (m)	104,0						

PERFIL PCD-2							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	430,0	383,0	661,0	742,0	8788,0	2,0
2	16,5	249,0	223,0	245,0	209,0	733,0	3,3
3	17,0					48,0	4,2

4	17,5		11,0				4,5
5	18,5		17,0				4,5
6	18,0		585,0	644,0	574,0	1375,7	6,1
7							
8							
9							
Comp. Médio (m)	16,9	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		679,0	1219,0	1550,0	1525,0	10944,7	4,1
Total Furação (m)	101,5						

PERFIL PCD-3							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0		580,0	428,0			4,9
2	16,0		84,8				5,6
3	17,5	429,0	400,0	637,0	1007,0	6815,0	3,3
4	18,0	244,0	1166,0	1349,0	1566,0	438,0	3,8
5	17,5		332,2	671,0	762,0	3634,0	3,2
6	18,5	8,4	696,0	823,0	799,0		6,3
7							
8							
9							
Comp. Médio (m)	16,9	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		681,4	3259,0	3908,0	4134,0	10887,0	4,5
Total Furação (m)	101,5						

PERFIL PCD-4							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0		419,0	421,0	392,0	4731,0	5,2
2	15,0		59,0				5,2
3	15,5		660,4	473,0	374,0	1365,0	3,2
4	16,0		1,0				4,0
5	16,0		4,3				4,0
6	15,5	491,0	304,0	146,0		255,0	4,0
7							
8							
9							
Comp. Médio (m)	15,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		491,0	1447,7	1040,0	766,0	6351,0	4,3
Total Furação (m)	92,0						

PERFIL PCD-5							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	15,0		570,0	379,0	357,0	709,0	4,0
2	17,0		110,9				5,8
3	19,5		165,0				6,9
4	21,5		497,9	532,0	112,0		8,7
5	24,5		7,3				4,0
6	21,5		30,0				4,0
7							
8							
9							
Comp. Médio (m)	19,8	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)

		0,0	1381,1	911,0	469,0	709,0	5,6
Total Furação (m)	119,0						

PERFIL PCD-6							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	11,5		190,0	431,0	681,0	3164,0	2,2
2	13,0		853,0	437,0	696,0	1590,0	5,4
3	16,0		5,1				4,1
4	19,0	267,0	1016,0	1279,3			7,3
5	21,0		709,0	489,0	271,0		4,2
6	19,0		519,1	387,0	611,0		6,1
7	16,0					6,6	4,5
8	14,0	437,5	384,0	454,0	462,0	223,0	5,1
9	13,0	361,0	327,0	433,0	431,0	1111,0	4,4
Comp. Médio (m)	15,8	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1065,5	4003,2	3910,3	3152,0	6094,6	4,8
Total Furação (m)	142,5						

PERFIL PCD-7							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0			382,0			4,9
2	15,0	152,9		4,6			5,7
3	17,0	800,0	89,0	433,0	183,0		6,5
4	19,5	801,0		282,0			6,0
5	21,5	359,6	91,0				7,0
6	19,5	137,6	48,0	24,0			5,9
7	17,0	307,0	454,0	443,0	426,0	1271,0	4,0

8	13,5	18,0					5,1
9	11,5	109,0					4,0
Comp. Médio (m)	16,5	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		2685,1	682,0	1568,6	609,0	1271,0	5,5
Total Furação (m)	148,5						

PERFIL PCD-8							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	184,0		716,0			3,8
2	15,0			998,0	335,4		4,0
3	17,0				443,0		4,0
4	19,5		810,0				6,2
5	21,5				139,0		4,0
6	19,5		350,0	19,0	29,0		3,3
7	17,0	442,5	294,0	14,0	46,0		6,4
8	13,5			77,0	57,0		4,0
9	11,5	388,0		227,0	128,0		4,7
Comp. Médio (m)	16,5	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1014,5	1454,0	2051,0	1177,4	0,0	4,5
Total Furação (m)	148,5						

PERFIL PCD-9							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,0	3,8					4,7
2	15,0	12,0					5,3
3	17,0	235,7	196,0	582,0	282,0		4,3

4	19,5	1179,0	188,0	358,0			4,4
5	21,5				64,0		4,3
6	19,5	1151,0	884,0	713,0	612,0		5,1
7	17,0	318,0	464,0	284,0			5,2
8	13,5	319,0	275,0	400,0	363,0	0,2	4,8
9	11,5				109,0	81,0	4,0
Comp. Médio (m)	16,5	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		3218,5	2007,0	2337,0	1430,0	81,2	4,7
Total Furação (m)	148,5						

PERFIL PCD-10							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5		93,2				4,8
2	15,0		51,9				5,2
3	17,0		173,5				5,9
4	19,0	517,0	296,0	688,0			4,8
5	21,0			158,0			4,0
6	19,0	534,0		1260,0	139,0		5,0
7	16,5	353,0		211,0	939,0	2171,0	3,3
8	13,5	158,0	807,0	60,0	105,2		5,7
9	11,5	434,0	307,0	539,0	826,0	463,0	4,6
Comp. Médio (m)	16,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1996,0	1728,6	2916,0	2009,2	2634,0	4,8
Total Furação (m)	147,0						

PERFIL PCD-11							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5			539,0	579,0		3,3
2	15,0				20,0		4,1
3	17,0				31,0		4,0
4	19,0	39,6					6,0
5	21,0	440,0					7,3
6	19,0	338,5		119,0	3,5		5,3
7	16,5	406,0	761,0	690,0	66,0	20,0	4,1
8	13,5		196,0	127,0	80,0	10,0	5,3
9	11,5	98,0		328,0			5,2
Comp. Médio (m)	16,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		1322,1	957,0	1803,0	779,5	30,0	5,0
Total Furação (m)	147,0						

PERFIL PCD-12							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	14,5	69,0					5,8
2	15,0	396,5	399,0	402,0	156,0	77,0	4,2
3	17,0					53,0	7,5
4	19,0	182,0					9,5
5	21,0	142,1					11,1
6	19,0	173,8	67,0		29,0		9,6
7	16,5	488,0	250,0	246,0	278,0		9,0
8	13,5	523,0	244,0	185,0	89,0		9,0
9	11,5			63,0	7,4		8,0
Comp. Médio (m)	16,3	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)

		1974,4	960,0	896,0	559,4	130,0	8,2
Total Furação (m)	147,0						

PERFIL PCD-13							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0						
2	14,0						
3	16,5						
4	19,0	191,5					11,5
5	21,0	40,0					11,0
6	19,0	46,0					10,0
7	16,5	79,0					8,2
8	14,0	55,0		6,0			7,6
9	12,0	14,0		5,0			8,0
Comp. Médio (m)	16,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		425,5	0,0	11,0	0,0	0,0	9,4
Total Furação (m)	145,0						

PERFIL PCD-14							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0						
2	14,0	44,0					8,8
3	16,5						
4	19,0	245,0					10,3
5	21,0	454,0					10,3
6	19,0	19,0					9,9
7	16,5	125,0		6,0			9,6

8	14,0	49,0		7,0			8,2
9	12,0	55,0		30,0			4,5
Comp. Médio (m)	16,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		991,0	0,0	43,0	0,0	0,0	8,8
Total Furação (m)	145,0						

PERFIL PCD-15							
Furo	Comprimento (m)	Calda C1 (l)	Calda C2 (l)	Calda C3 (l)	Calda C4 (l)	Calda C5 (l)	Pressão média de injeção (bar)
1	13,0						
2	14,0						
3	16,5						
4	19,0	505,0					9,6
5	21,0	91,0					7,9
6	19,0	84,0					7,5
7	16,5	36,0		5,0			9,7
8	14,0	35,0		11,0			8,4
9	12,0	48,0		20,0			3,7
Comp. Médio (m)	16,1	Tot. C1 (l)	Tot. C2 (l)	Tot. C3 (l)	Tot. C4 (l)	Tot. C5 (l)	Pressão média do perfil (bar)
		799,0	0,0	36,0	0,0	0,0	7,8
Total Furação (m)	145,0						