

# Execução de ensecadeiras com recurso a cortinas de injeções e de colunas de Jet Grouting

João Gonçalo Pereira Calatróia

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Orientador**

Professor Alexandre da Luz Pinto

**Júri**

Presidente: Professor Doutor Jaime Alberto dos Santos

Orientador: Professor Alexandre da Luz Pinto

Vogal: Professora Doutora Laura Maria Mello Saraiva Caldeira

**Abril de 2016**





*“Invention is the most important product  
of man’s creative brain. The ultimate  
purpose is the complete mastery of mind  
over the material world, the harnessing of  
human nature to human needs.”*

Nikola Tesla



## Resumo

A necessidade de construir estruturas em zonas com nível freático elevado coloca consideráveis desafios à Engenharia Civil, tornando-se necessário conhecer bem as pressões hidrodinâmicas que se geram, por vezes consideráveis, de modo a que a sua resistência definida em projeto, não apresente valores inferiores no tempo útil da estrutura. O Eurocódigo 7 (EC 7) prevê um capítulo dedicado a fenómenos de desestabilidade de origem hidráulica, permitindo de certa forma dotar os projetistas de boas práticas e verificações de segurança necessárias ao tipo de estrutura em questão.

Os principais objetivos deste trabalho são: (i) avaliar o comportamento da solução executada, (ii) verificar segundo o EC 7 a segurança da rotura hidráulica, (iii) propor soluções alternativas, (iv) quantificar o caudal percolado pela solução executada e pelas soluções alternativas apresentadas, (v) realizar uma análise custo-benefício das diversas soluções apresentadas.

Foi inicialmente realizado um estudo bibliográfico sobre a temática das ensecadeiras identificando os principais tipos existentes. A temática da tecnologia de *Jet Grouting (JG)* também foi estudada, de modo a conhecer os seus procedimentos, os sistemas existentes, a seleção destes sistemas, os elementos capazes de serem executados com a técnica, os inúmeros campos de aplicação, o seu controlo de qualidade, as vantagens e desvantagens que a técnica de *JG* apresenta.

Da análise das diversas secções existentes, ao longo do desenvolvimento da ensecadeira, foram escolhidas inicialmente três secções para a modelação numérica e posteriormente foi acrescentada uma quarta para determinar o caudal total expectável para o seu interior, “fechando” a ensecadeira. Através da utilização de *softwares*, com base no Modelo de Elementos Finitos (MEF), definidas as geometrias e parâmetros necessários determinou-se a linha de saturação das secções através do *software* SEEP/W. Posteriormente exportaram-se os resultados obtidos e foi usado outro *software*, PLAXIS 2D, a fim de analisar o comportamento bidimensional de tensões e deformações das secções em estudo. Os resultados obtidos com a utilização dos *softwares* SEEP/W e PLAXIS 2D foi validada através dos registos cedidos da instrumentação instalada em obra, como previsto no Plano de Monitorização definido em fase de projeto.

Terminada toda a modelação numérica realizada concluiu-se que a solução executada com recurso a cortina de injeções e colunas de *JG* desempenha um bom comportamento face às ações solicitadas da água contida na albufeira da barragem, o caudal expectável de percolar para o interior de toda a ensecadeira implantada encontra-se dentro dos valores definidos em projeto. Porém na verificação de fenómenos de desestabilidade hidráulica, mais propriamente do fenómeno de erosão interna, a sua segurança não se verifica. Por isso é necessário prever filtros e material de proteção para evitar a formação de um mecanismo de rotura do solo e posteriormente da ensecadeira. Por outro lado, dos registos em obra cedidos verificou-se que o volume de caudal extraído do interior da escavação é muito superior ao esperado, excedendo os valores definidos em projeto para os critérios de alerta e de alarme, o que leva à necessidade da revisão do projeto. As características geológico-geotécnicas complexas e a permeabilidade média dos solos existentes colocam desafios consideráveis à implantação da obra.

Por último, as duas soluções mais interessantes do ponto de vista da relação custo-benefício parecem ser as soluções alternativas em *Cutter Soil Mixing* de 20% e de 30% de aumento do comprimento face definido em projeto, de 30,5 metros.

Palavras-chave: Ensecadeiras, *Jet Grouting*, *Cutter Soil Mixing*, percolação, rotura hidráulica do solo, relação custo-benefício, análise de MEF 2D.



# Abstract

The necessity to build infrastructures in areas with high groundwater level places considerable challenges to Civil Engineering. It is necessary to know well the loads and the hydrodynamic pressures generated, sometimes considerable, so that its resistance defined in the project does not present lower values during the life period of the structure. The Eurocode 7 (EC 7) provides a chapter on the hydraulic desestability phenomena somehow allowing designers to follow good practices and to verify all the safety checks required for this type of structure.

The main objectives of this study are: (i) to evaluate the behaviour of the implemented solution, (ii) to check, according to the EC 7, the safety against hydraulic rupture of the soil, (iii) to propose alternative solutions, (iv) to quantify the expected flow through the implemented solution and through the alternative solutions presented, (v) to perform a cost-benefit analysis of the various solutions.

Initially a bibliographical study was done regarding cofferdams, identifying the existing main types. The Jet Grouting (JG) technique was also studied in order to understand its procedures, the different existing systems, the criteria to choose a specific system, the different elements that can be executed with the technique, the numerous application fields for JG, its quality control, advantages and disadvantages of this technology.

From the analysis of various existing sections during the construction of the cofferdam three were chosen for the numerical modelling and subsequently a fourth one was added to determine the total flow rate expected to the interior of the excavation. Using softwares based on the Finite Element Model (FEM) the geometries and the parameters required were defined and the phreatic level for each section was determined by the software SEEP/W. Then the obtained results were exported and used by the software PLAXIS 2D in order to analyse the bi-dimensional stress-deformation behaviour of the sections in study. The obtained results using both SEEP/W and PLAXIS 2D were validated through the monitoring records provided by the instrumentation equipment previously defined for the Monitoring Plan.

Once the entire numerical modelling was completed, it was concluded that the implemented solution using injection curtains and JG columns has a good behaviour for the required actions of the water contained in the dam, the expected flow to percolate to the interior of the excavation pit is within the values defined in the project. However when checking the phenomena of hydraulic desestability, more specifically the piping process, the safety isn't assured. Therefore it's necessary to design protective filters to prevent a soil failure mechanism and subsequently a global failure of the cofferdam. On the other hand the monitoring records show that the flow going inside the excavation pit exceeds largely the values defined in the project concerning the alert and alarm criteria, what determines the need to review the project. The geological-geotechnical characteristics are complex and the average permeability of the existing soils poses considerable challenges to the implantation of the works.

Finally, in the cost-benefit point of view, the two most interesting solutions seem to be the alternative solutions using the Cutter Soil Mixing (CSM) with the increase of 20% and 30% of the depth initially proposed of 30,5 meters.

Keywords: Cofferdams, Jet Grouting, Cutter Soil Mixing, seepage control, hydraulic soil rupture, cost-benefit analysis, 2D FE analysis



## Agradecimentos

Agradeço às entidades EDP Produção, como dono de obra, e ao consórcio construtor formado pelas empresas Mota-Engil e Somague Engenharia a possibilidade que me proporcionaram de acompanhar a obra e os elementos que me disponibilizaram que foram essenciais para a elaboração deste trabalho.

À empresa JetSJ Geotecnia, Lda. agradeço toda a documentação disponibilizada, nomeadamente, as memórias descritivas e justificativas do projeto de execução relativos ao caso de estudo abordado neste trabalho.

O meu percurso no Instituto Superior Técnico e a realização do presente trabalho só foi possível devido a um grupo de pessoas que, de uma maneira ou de outra, contribuíram e incentivaram ao longo destes últimos anos.

Ao Professor Alexandre Pinto, orientador, agradeço profundamente a disponibilidade, o apoio científico, as inúmeras visitas à obra, o acreditar no meu valor como estudante ao atribuir-me o tema da dissertação e o acreditar na qualidade do meu trabalho no decorrer da mesma.

À Professora Marta Gomes agradeço a ajuda no início deste trabalho e a constante preocupação que sempre demonstrou pelo mesmo.

Ao Professor Dr. António Pinheiro agradeço ter-me recebido e as sugestões dos assuntos que seriam mais relevantes de expor no estado de arte sobre o tema dos desvios provisórios, em particular sobre ensecadeiras.

À Professora Dr.<sup>a</sup> Laura Caldeira pelo esclarecimento às dúvidas que surgiram ao longo da realização deste trabalho, pelas sugestões e indicações que me deu, o meu muito obrigado.

Ao Instituto Superior Técnico agradeço os anos de desafios pessoais e estudantis, de formação de amizades e de ensinamentos dos mais diversos professores com quem tive o prazer de conviver.

Quero agradecer também ao Eng.<sup>o</sup> David Brito pela sua disponibilidade e esclarecimentos que me prestou no uso do *software* PLAXIS 2D, com o qual foi possível adquirir um maior conhecimento das funcionalidades deste *software*.

Ao Eng.<sup>o</sup> João Pereira da Silva o meu agradecimento pelas inúmeras sugestões, que enriqueceram este trabalho.

A todos os amigos que tive o prazer de conhecer ao longo do meu percurso académico, em particular à Ana Oliveira, ao André Lúcio, ao João Silva, à Catarina Pereira, à Margarida Magos, à Farah Nidal, ao Afonso Piçarra, ao André Lopes, ao Luís Almeida, ao João Pereira e ao Diogo Serra pelo apoio que sempre demonstraram. Especial agradecimento ao meu amigo Adolfo Barata e à minha amiga Maria Clara Leitão pelo vosso incentivo e apoio.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e confiaram incondicionalmente nas minhas capacidades, quando eu próprio duvidei. Pelas oportunidades, ensinamentos e carinho que sempre demonstraram e continuam a fazer, o meu muito obrigado.





# Índice Geral

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice Geral.....	vii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas.....	xvi
Simbologia e Notações.....	i
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos e metodologia.....	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
<b>2 Fundamentos teóricos</b> .....	<b>5</b>
2.1 Ensecadeiras.....	5
2.1.1 Principais tipos de ensecadeiras.....	5
2.1.1.1 Ensecadeiras de materiais granulares.....	6
2.1.1.2 Ensecadeiras com cortina impermeável.....	6
2.1.1.3 Ensecadeiras de betão.....	7
2.1.1.4 Ensecadeiras galgáveis.....	8
2.1.1.5 Ensecadeiras incorporadas.....	9
2.1.1.6 Ensecadeiras de células de estacas prancha.....	10
2.2 Jet Grouting.....	13
2.2.1 Considerações iniciais.....	13
2.2.2 Evolução histórica.....	13
2.2.3 Equipamentos.....	15
2.2.4 Procedimentos.....	18
2.2.4.1 Parâmetros de procedimento.....	20
2.2.5 Sistemas existentes.....	21
2.2.5.1 Sistema monofluido.....	21
2.2.5.2 Sistema bi-fluido.....	21
2.2.5.3 Sistema tri-fluido.....	22
2.2.5.4 Sistema Superjet.....	23
2.2.5.5 Sistema Xjet.....	23
2.2.5.6 Síntese dos sistemas.....	24
2.2.6 Seleção do sistema de <i>Jet Grouting</i> .....	25
2.2.7 Elementos em <i>Jet Grouting</i> .....	26

2.2.7.1	Sobreposição de colunas .....	27
2.2.7.2	Reforço de colunas.....	28
2.2.8	Campos de aplicação.....	28
2.2.9	Controlo de qualidade.....	30
2.2.10	Vantagens e desvantagens do <i>Jet Grouting</i> .....	32
<b>3</b>	<b>Caso de estudo – barragem da Caniçada.....</b>	<b>35</b>
3.1	Introdução.....	35
3.2	Elementos de base.....	38
3.3	Condicionamentos.....	39
3.3.1	Cenário geológico-geotécnico.....	39
3.3.2	Vizinhança .....	43
3.3.3	Prazo de execução.....	43
3.4	Solução executada.....	43
3.4.1	Secção corrente provisória, incluindo encontro esquerdo.....	44
3.4.2	Encontro direito definitivo.....	44
3.4.3	Muro ala definitivo .....	45
3.5	Fascamento construtivo.....	45
3.6	Plano de Monitorização .....	45
3.6.1	Generalidades.....	45
3.6.2	Grandezas a medir.....	46
3.6.3	Meios para a medição .....	46
3.6.4	Características dos aparelhos.....	46
3.6.5	Frequência das leituras.....	48
3.6.6	Critérios de alerta e alarme .....	48
3.6.7	Medidas de reforço.....	49
<b>4</b>	<b>Modelação numérica com o SEEP/W.....</b>	<b>51</b>
4.1	Descrição geral.....	51
4.2	Introdução ao problema.....	51
4.3	Estudo da solução .....	52
4.3.1	Definição da geometria e secção transversal.....	52
4.3.1.1	Geometria da solução executada .....	53
4.3.1.2	Cortina de impermeabilização.....	54
4.3.1.3	Secções transversais da solução adotada para a modelação.....	54
4.3.2	Propriedades dos materiais.....	56
4.3.2.1	Caracterização do terreno.....	56
4.3.3	Condições de fronteira e da malha de elementos finitos.....	57

4.3.3.1	Secção do Corte 7.....	57
4.3.3.2	Secção do Corte 8.....	58
4.3.3.3	Secção do Corte 10.....	58
4.3.4	Validação do modelo.....	59
4.3.5	Apresentação e validação dos resultados.....	59
4.3.5.1	Secções transversais.....	60
4.3.5.2	Piezómetros.....	61
<b>5</b>	<b>Modelação numérica com o PLAXIS 2D.....</b>	<b>65</b>
5.1	Descrição geral.....	65
5.2	Introdução ao problema.....	65
5.3	Estudo da solução.....	66
5.3.1	Definição da geometria e secção transversal.....	67
5.3.1.1	Geometria da solução proposta.....	67
5.3.1.2	Cortina de injeções.....	67
5.3.1.3	Secções transversais da solução adotada para a modelação.....	67
5.3.2	Propriedades dos materiais.....	67
5.3.2.1	Caracterização do terreno.....	67
5.3.2.2	Caracterização dos elementos estruturais metálicos.....	69
5.3.3	Condições de fronteira e da malha de elementos finitos.....	70
5.3.3.1	Secção do Corte 7.....	71
5.3.3.2	Secção do Corte 8.....	72
5.3.3.3	Secção do Corte 10.....	73
5.3.4	Validação do modelo.....	74
5.3.5	Apresentação e validação dos resultados.....	75
5.3.5.1	Deslocamentos.....	76
5.3.5.2	Inclinómetros.....	80
5.3.5.3	Esforços.....	83
5.3.5.4	Fatores de segurança – phi-c reduction.....	84
5.3.5.5	Medição do caudal.....	85
5.3.5.6	Comparação entre os dados da monitorização e os resultados da modelação.....	89
5.3.6	Desestabilidade de origem hidráulica.....	90
5.3.6.1	Erosão interna.....	91
5.3.6.2	Levantamento hidráulico.....	93
5.3.7	Verificações de segurança à rotura hidráulica.....	94
5.3.7.1	Erosão interna.....	94
5.3.7.2	Levantamento hidráulico local.....	98

5.4	Estudo das soluções alternativas.....	99
5.4.1	Soluções alternativas em Jet Grouting .....	100
5.4.1.1	Modelação das soluções alternativas .....	100
5.4.1.2	Apresentação dos resultados.....	100
5.4.2	Solução alternativa em Cutter Soil Mixing.....	101
5.4.2.1	Introdução da tecnologia Cutter Soil Mixing.....	101
5.4.2.2	Definição da geometria do muro e da secção transversal.....	104
5.4.2.3	Propriedades dos materiais e caracterização do terreno.....	106
5.4.2.4	Condições de fronteira.....	106
5.4.3	Apresentação dos resultados.....	108
5.4.3.1	Deslocamentos.....	108
5.4.3.2	Esforços .....	109
5.4.3.3	Fatores de segurança – phi-c reduction.....	110
5.4.3.4	Medição do caudal.....	110
5.4.4	Verificações de segurança à rotura hidráulica.....	110
5.4.4.1	Erosão interna.....	110
5.4.4.2	Levantamento hidráulico local.....	111
5.4.5	Modelação das soluções alternativas em Cutter Soil Mixing.....	112
5.4.5.1	Apresentação dos resultados.....	112
5.5	Síntese dos resultados.....	112
5.5.1	Análise do caudal percolado .....	113
5.5.2	Estimativa orçamental.....	113
5.5.3	Relação custo-benefício das soluções.....	116
<b>6</b>	<b>Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>117</b>
6.1	Conclusões do trabalho realizado.....	117
6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros.....	118
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>121</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>125</b>
	Anexo I.....	127
	Anexo II.....	129
	Anexo III.....	131
	Anexo IV.....	133
	Anexo V .....	135
	Anexo VI.....	137
	Anexo VII.....	139
	Anexo VIII.....	141

Anexo IX.....	143
Anexo X.....	153
Anexo XI.....	161
Anexo XII.....	167

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Secção transversal tipo de ensecadeiras de enrocamento de cordão simples e de cordão duplo (adaptada de Rocha, G. S. C., (2006)).....	6
Figura 2.2: Secção transversal tipo de uma ensecadeira com cortina impermeável (adaptada de Rocha, G. S. C., (2006)).....	7
Figura 2.3: Fotografia de ensecadeira de betão em arco adotada para a realização da tomada de água do Reforço de Potência de Venda Nova III (adaptada de <a href="http://www.ruivaes.com/2012/11/venda-nova-iii-fotos-da-obra.html">http://www.ruivaes.com/2012/11/venda-nova-iii-fotos-da-obra.html</a> - 17:20h em 24/02/2015).....	8
Figura 2.4: Barragem de Cahora Bassa (Moçambique). Desvio provisório: (a) vista de montante; (b) ensecadeira de jusante; (c) galgamento das ensecadeiras (fotografias cedidas pelo Prof. António Quintela) (adaptada de Pinheiro, A. N., (2002)).....	9
Figura 2.5: Secção transversal da ensecadeira de montante e da ensecadeira de jusante incorporadas no corpo final da Barragem de Pedra de Cavalo (adaptada de Rocha, G. S. C., (2006)).....	10
Figura 2.6: Pormenor de ligações entre estacas de alma reta (adaptada de ArcelorMittal (2009)).....	10
Figura 2.7: Exemplos de estacas prancha de junção: (a) valores de $\Theta$ entre $30^\circ$ e $45^\circ$ e (b) valores de $\Theta$ igual a $120^\circ$ (adaptada de ArcelorMittal (2009)).....	10
Figura 2.8: Geometria tipo de células do tipo circular (adaptada de ArcelorMittal (2009)).....	11
Figura 2.9: Pormenor da localização da estaca de junção (adaptada de ArcelorMittal (2009)).....	11
Figura 2.10: Geometria tipo de células do tipo diafragma (adaptada de USS, (1984)).....	12
Figura 2.11: Geometria tipo de células do tipo em trevo (adaptada de USS, (1984)).....	12
Figura 2.12: Desenvolvimento dos métodos de <i>JG</i> no Japão (adaptada de Miki and Nakanishi, (1984))....	14
Figura 2.13: Equipamento necessário para a realização do <i>JG</i> : sistema tri-fluido: (1) silo de cimento, (2) doseador e betoneira, (3) compressor de ar e bomba de água de alta pressão e (4) equipamento de furação (adaptada de Croce et al., (2014)).....	15
Figura 2.14: Doseador automático para o fabrico de calda de cimento na técnica de <i>JG</i> (adaptada de <a href="http://www.brighteroil.com/eng/channel.php?channel=cementing-equipment">http://www.brighteroil.com/eng/channel.php?channel=cementing-equipment</a> - 19:37h, dia 15/12/2014). 16	16
Figura 2.15: Bombas e compressores necessários à técnica de <i>JG</i> (adaptada de <a href="http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co_id=3276">http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co_id=3276</a> - 19:41h, dia 15/12/2014).....	16
Figura 2.16: Monitor de visualização (adaptada de <a href="http://www.geomisure.com/wp/wp-content/uploads/2014/03/FOTO_Campo-prove_INTERSONDA-002.jpg">http://www.geomisure.com/wp/wp-content/uploads/2014/03/FOTO_Campo-prove_INTERSONDA-002.jpg</a> - 17:55h, dia 25/09/2015).....	17
Figura 2.17: Pormenor do dispositivo de injeção: (a) sistema monofluido, (b) sistema bi-fluido e (c) sistema tri-fluido (adaptada de <a href="http://eirit.co.il/files/uploads/ybm/ybm_jet_grouting_catalog.pdf">http://eirit.co.il/files/uploads/ybm/ybm_jet_grouting_catalog.pdf</a> - 14:48h, dia 21/10/2014).....	17
Figura 2.18: Detalhe de bicos de injeção para a realização da técnica de <i>JG</i> (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).....	17
Figura 2.19: Segmento de vara de furação, com bicos de injeção incorporados e <i>bit</i> na sua extremidade (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).....	18
Figura 2.20: Processo de <i>JG</i> : (a) 1ª fase – furação e 2ª fase - injeção e (b) pormenores da extremidade da vara (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).....	19
Figura 2.21: Métodos na ascensão da vara: (a) descontínuo (1, sobe; 2, injeção) e (b) contínuo (em espiral) (adaptada de Croce et al., (2014)).....	19
Figura 2.22: Sistemas típicos de <i>JG</i> : (a) monofluido, (b) bi-fluido e (c) tri-fluido (adaptada de Croce et al., (2014)).....	22
Figura 2.23: Desenho esquemático das varas: (a) monofluido, (b) bi-fluido e (c) tri-fluido (adaptada de Croce et al., (2014)).....	22
Figura 2.24: Desenho esquemático do sistema <i>Superjet</i> (adaptada de Wang et al., (2013)).....	23
Figura 2.25: Sistema <i>Xjet</i> (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).....	24
Figura 2.26: Desenho esquemático do sistema <i>Xjet</i> (adaptada de Wang et al., (2013)).....	24

Figura 2.27: Aplicabilidade para solos argilosos e solos granulares dos sistemas de injeção convencionais de <i>JG</i> em função dos valores de $N_{SPT}$ (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).	26
Figura 2.28: Relação para solos granulares entre o diâmetro de colunas e valores de $N_{SPT}$ para os diferentes sistemas de injeção convencionais de <i>JG</i> (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).	26
Figura 2.29: Elementos possíveis de executar: (a) coluna, (b) painel, (c) elemento em forma de V e (d) em forma de rebuçado (adaptada de Croce et al., (2014)).	26
Figura 2.30: Sobreposição de colunas: (a) processo contínuo e (b) processo sequencial (adaptada de Croce et al., (2014)).	27
Figura 2.31: Fotografia do suporte de um túnel através de colunas de <i>JG</i> , pelo processo sequencial sendo (P) as colunas primárias e (S) as colunas secundárias (adaptada de Croce et al., (2014)).	27
Figura 2.32: Exemplos de grupos de colunas de <i>JG</i> (adaptada de Croce et al., (2014)).	27
Figura 2.33: Aplicações da técnica de <i>JG</i> : (a) fundação de aterros, (b) suporte de escavação e tampão à percolação, (c) suporte provisório na execução de túneis e (d) barreiras de percolação “ <i>cut-off</i> ” (adaptada de Croce et al., (2014)).	28
Figura 2.34: Alinhamentos tipo de barreiras de controlo de percolação “ <i>cut-off</i> ” com recurso a <i>JG</i> (adaptada de Croce et al., (2014)).	29
Figura 2.35: Secções transversais de barreiras de controlo de percolação “ <i>cut-off</i> ” de barragens de aterro (adaptada de Croce et al., (2014)).	29
Figura 2.36: Exemplos de soluções de <i>JG</i> na selagem de paredes moldadas: (a) reparação de juntas e (b) reparação de segmentos defeituosos (adaptada de Croce et al., (2014)).	30
Figura 2.37: Esquemas de soluções tampão: (a) laje retangular, (b) laje em arco invertido e (c) laje ancorada (adaptada de Croce et al., (2014)).	30
Figura 2.38: Procedimentos de controlo de qualidade em <i>JG</i> (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).	31
Figura 2.39: Diferentes métodos de tratamento do solo e a sua comparação económica em função da sua granulometria (adaptada de Keller Holding GmbH, (2011)).	33
Figura 3.1: Localização geográfica da barragem da Caniçada.	35
Figura 3.2: Esquema ilustrativo do circuito hidráulico (à esquerda) e secção transversal tipo (à direita) do Aproveitamento Hidroelétrico da Caniçada (adaptada de EDP (2013)).	36
Figura 3.3: Pormenor do descarregador de cheias, constituído por quatro vãos, da barragem da Caniçada.	36
Figura 3.4: Pormenor da descarga de fundo da barragem da Caniçada.	36
Figura 3.5: Modelo reduzido do DCC (adaptada de Gomes, C. E. S. (2013)).	37
Figura 3.6: Planta do DCC da barragem da Caniçada (adaptada de Gomes, C. E. S. (2013)).	37
Figura 3.7: Modelo tridimensional do Descarregador de Cheias Complementar da barragem da Caniçada: em cima tomada de água; em baixo restituição (adaptada de EDP (2015)).	38
Figura 3.8: Fotografia aérea do local de implantação da solução adotada (adaptada de <a href="http://terrasbouro.blogspot.pt/2012/10/barragem-da-canicada.html">http://terrasbouro.blogspot.pt/2012/10/barragem-da-canicada.html</a> - 13:06 dia 05/12/2014).	38
Figura 3.9: Extrato da Carta Geológica de Portugal, Folha 5-B (Ponte de Barca) à escala 1:500 000 (adaptada de EDP (2012)).	40
Figura 3.10: Vista da zona onde decorreram os trabalhos da construção da ensecadeira.	43
Figura 4.1: Secção transversal do muro de betão simples da solução executada para as secções Corte 7 e Corte 8 (adaptada de Pinto et al., (2014)).	53
Figura 4.2: Secção transversal do muro de betão simples da solução executada para a secção do Corte 10 (adaptada de Pinto et al., (2014)).	54
Figura 4.3 Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 7 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).	55
Figura 4.4: Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 8 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).	55
Figura 4.5: Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 10 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).	56

Figura 4.6: Secção Corte 7 - definição da malha e condições de fronteira no <i>software</i> SEEP/W.....	58
Figura 4.7: Secção Corte 8 - definição da malha e condições de fronteira no <i>software</i> SEEP/W.....	58
Figura 4.8: Secção Corte 10 - definição da malha e condições de fronteira no <i>software</i> SEEP/W.....	59
Figura 4.9: Secção Corte 7 - condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao <i>software</i> SEEP/W.....	60
Figura 4.10: Secção Corte 8: Condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao <i>software</i> SEEP/W.....	60
Figura 4.11: Secção Corte 10: Condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao <i>software</i> SEEP/W.....	61
Figura 4.12: Piezómetro de tubo aberto (adaptada de Knappett, J. A. & Craig, R. F., (2012)).....	61
Figura 4.13: Registo histórico da cota do nível de água no interior da ensecadeira dos piezómetros EPZ4 e EPZ5 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).....	62
Figura 4.14: Registo histórico da cota do nível de água no interior da ensecadeira dos piezómetros EPZ6 e EPZ7 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).....	62
Figura 5.1: Processo de geração das tensões iniciais do modelo – “Gravity Loading”.....	71
Figura 5.2: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG’s para a secção Corte 7.....	72
Figura 5.3: Definição das várias fases de cálculo - Corte 7.....	72
Figura 5.4: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG’s para a secção Corte 8.....	73
Figura 5.5: Definição das várias fases de cálculo - Corte 8.....	73
Figura 5.6: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG’s para a secção Corte 10.....	74
Figura 5.7: Definição das várias fases de cálculo - Corte 10.....	74
Figura 5.8: Posição inicial do nível freático à cota 146,00 m: a) secção Corte 7, b) secção Corte 8 e c) secção Corte 10.....	75
Figura 5.9: Condições de fronteira para as fases de escavação definidas: a) patamar escavado e b) patamar por escavar.....	76
Figura 5.10: Deformada final da modelação da secção Corte 7 – ampliada 100 vezes.....	77
Figura 5.11: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 7: a) horizontais (deslocamento máximo 44,10 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 16,27 mm).....	77
Figura 5.12: Deformada final da modelação da secção Corte 8 – ampliada 200 vezes.....	78
Figura 5.13: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 8: a) horizontais (deslocamento máximo 30,87 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 10,41 mm).....	78
Figura 5.14: Deformada final da modelação da secção Corte 10 – ampliada 500 vezes.....	79
Figura 5.15: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 10: a) horizontais (deslocamento máximo 15,47 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 7,31 mm).....	79
Figura 5.16: Inclinómetro: a) secção transversal do tubo e componentes necessários, b) pormenor de topo do tubo e c) método de cálculo (adaptada de Knappett, J. A. & Craig, R. F., (2012)).....	80
Figura 5.17: Localização e registo do Inclinómetro EI4 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).....	81
Figura 5.18: Localização e registo do Inclinómetro EI6A (adaptada de Mota-Engil, (2016)).....	82
Figura 5.19: Localização e registo do Inclinómetro EI8 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).....	82
Figura 5.20: Tabela genérica dos esforços de um elemento “plate”, com a sua designação, identificação das coordenadas e dos esforços atuantes mínimo e máximo.....	83
Figura 5.21: Envolvente de esforços do perfil HEB 140 da secção Corte 7: a) momento fletor (valor máximo de -20,33 kN.m/m), b) axial (valor máximo de -280,05 kN/m) e c) transversal (valor máximo de 74,89 kN/m).....	83
Figura 5.22: Localização dos dois segmentos considerados para a determinação do caudal percolado em cada secção.....	86
Figura 5.23: Secção Corte 2 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).....	86
Figura 5.24: Secção Corte 2 - condições de fronteira e linha de saturação obtida através do <i>software</i> SEEP/W.....	87



Figura 5.25: Caudal percolado para o interior da escavação, $30,03 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para secção Corte 2.....	87
Figura 5.26: Caudal bombeado do interior da ensecadeira medido em descarregador do tipo Thompson (adaptada de Mota-Engil, (2015)).....	88
Figura 5.27: Fenómeno de erosão interna numa estrutura de contenção com recurso a estacas prancha: 1) início e primeira deterioração, 2) erosão regressiva, 3) formação de um canal de fluxo preferencial, 4) liquefação e colapso de acordo com EAU (2004) (adaptada de Wudtke, R. B. (2008)).....	91
Figura 5.28: Volume de solo em condição hidrodinâmica (adaptada de Fonte, J. B. (2010)).....	92
Figura 5.29: Ilustração esquemática do fenómeno de levantamento hidráulico no interior de uma escavação (adaptada de Wudtke, R. B. (2008)).....	93
Figura 5.30: Tabela genérica do campo de velocidades do escoamento, com identificação das coordenadas e tipo de solo definido.....	94
Figura 5.31: Vetores velocidade juntos aos drenos nas secções: a) secção Corte 7, b) secção Corte 8 e c) secção Corte 10.....	95
Figura 5.32: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 7: amarelo) extremidade das colunas de <i>JG</i> e vermelho) junto dos taludes de escavação.....	96
Figura 5.33: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 8: amarelo) extremidade das colunas de <i>JG</i> e vermelho) junto dos taludes de escavação.....	97
Figura 5.34: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 10: amarelo) extremidade das colunas de <i>JG</i> e vermelho) junto dos taludes de escavação.....	97
Figura 5.35 Disposições e dimensões frequentes das ferramentas de corte utilizadas na técnica de <i>DSM</i> (adaptada de Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)).....	101
Figura 5.36: : Equipamento utilizado na técnica <i>DSM</i> constituído por três varas de furação com ferramentas de corte e de homogeneização (adaptada de Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)).....	101
Figura 5.37: Hidrofresa e ferramenta de corte utilizados na tecnologia de <i>CSM</i> (adaptada de Malcolm Drilling Company, Inc.).....	102
Figura 5.38: Solução de parede de solo-cimento armada com perfis metálicos do tipo HEB (adaptada de KPFF Consulting Engineers)).....	103
Figura 5.39: Secção transversal do muro de coroamento de betão simples da solução alternativa em <i>CSM</i> . .....	104
Figura 5.40: Condicionamento em planta da distância horizontal a garantir entre o último patamar de escavação e o emboquilhamento do túnel do DCC (adaptada de Pinto et al., (2014)).....	105
Figura 5.41: Secção transversal da solução alternativa de painel solo-cimento em <i>CSM</i> .....	105
Figura 5.42: Fases de cálculo da solução alternativa em painel <i>CSM</i> . .....	107
Figura 5.43: Geometria e identificação das ZG's da secção da solução alternativa em <i>CSM</i> .....	107
Figura 5.44: Deformada final solução alternativa em painel solo-cimento – ampliada 100 vezes.....	108
Figura 5.45: Deslocamentos finais da modelação da solução alternativa em <i>CSM</i> : a) horizontais (deslocamento máximo 53,60 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 20,66 mm). .....	108
Figura 5.46: Envolvente de esforços do perfil HEB140 da secção alternativa em <i>CSM</i> : a) momento fletor (valor máximo de -37,21 kN.m/m), b) axial (valor máximo de -413,83 kN/m) e c) transversal (valor máximo de 97,63 kN/m).....	109
Figura 5.47: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da solução alternativa em <i>CSM</i> : amarelo) extremidade do painel solo-cimento e vermelho) junto dos taludes de escavação.....	111
Figura 5.48: Diagrama custo da solução em função do custo do sistema de bombagem de cada solução analisada.....	116

# Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Equipamentos necessários para cada sistema de <i>JG</i> .....	18
Tabela 2.2: Intervalo dos parâmetros do <i>JG</i> adotados para os diferentes sistemas (adaptada de BS EN 12716:2001).....	20
Tabela 2.3: Intervalo dos parâmetros de <i>JG</i> para diferentes sistemas de injeção (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).	21
Tabela 2.4: Análise comparativa entre os sistemas convencionais de <i>JG</i> (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).	24
Tabela 3.1: Resumo das características de cada zona geotécnica considerada (adaptada de Pinto et al., (2014)).	42
Tabela 3.2: Valores estimados para os parâmetros geomecânicos (adaptada de Pinto et al., (2014)).	42
Tabela 3.3: Critérios de alerta e de alarme estabelecidos para a solução executada (adaptada de Pinto et al., (2014)).	48
Tabela 4.1: Caracterização dos parâmetros do solo para cada formação necessários à modelação com recurso ao <i>software</i> SEEP/W.....	57
Tabela 5.1: Valores de parâmetros geomecânicos estimados para cada formação interessada (adaptada de Pinto et al., (2014)).	68
Tabela 5.2: Características dos materiais que constituem a ensecadeira (adaptada de Pinto et al., (2014)).	68
Tabela 5.3: Caracterização dos parâmetros do solo e interface do modelo.....	69
Tabela 5.4: Fatores de segurança obtidos para as fases construtivas mais significativas das secções em estudo, através do processo redução <i>phi-c</i> .....	85
Tabela 5.5: Caudais percolados em cada secção em estudo.....	85
Tabela 5.6: Caudais parciais de cada secção analisada e o caudal total expectável de percolar para o interior da ensecadeira do DCC. ....	88
Tabela 5.7: Deslocamentos horizontais obtidos da modelação e do registo de monitorização disponibilizado. ....	89
Tabela 5.8: Valores de caudal da modelação e dos registos em obra cedidos.....	89
Tabela 5.9: Valores dos coeficientes parciais para o ELU de rotura causada por gradientes hidráulicos fixados (HYD) (adaptada de Eurocódigo 7, (2010)).	94
Tabela 5.10: Gradiente hidráulico e fator de segurança ao fenómeno de erosão interna para a secção Corte 7. ....	98
Tabela 5.11: Verificação de segurança à rotura por levantamento hidráulico local, segundo o EC 7.....	99
Tabela 5.12: Análise comparativa do caudal percolado para o interior da escavação em cada secção alternativa em <i>JG</i> .....	100
Tabela 5.13: Análise comparativa entre as tecnologias <i>CSM</i> e <i>JG</i> , em termos de secção efetiva e elementos formados (adaptada de Sousa, E. D. C. (2009)).	102
Tabela 5.14: Análise comparativa entre as soluções de <i>CSM</i> e de <i>JG</i> (adaptada de Sousa, E. D. C. (2009)).	103
Tabela 5.15: Propriedades mecânicas do painel solo-cimento em <i>CSM</i> .....	106
Tabela 5.16: Fator de segurança obtido pelo processo “ <i>phi-c reduction</i> ” das fases construtivas consideradas para a solução em <i>CSM</i> .....	110
Tabela 5.17: Caudal percolado da solução alternativa em <i>CSM</i> .....	110
Tabela 5.18: Gradientes hidráulicos e fatores de segurança ao fenómeno de erosão interna para a solução em <i>CSM</i> .....	111
Tabela 5.19: Verificação de segurança à rotura por levantamento hidráulico local, segundo o EC 7.....	112
Tabela 5.20: Análise comparativa do caudal percolado para o interior da escavação para cada solução alternativa em <i>CSM</i> .....	112

Tabela 5.21: Estimativa do caudal a percolar para o interior da escavação e as diferentes percentagens de redução de cada solução. ....	113
Tabela 5.22: Quantidades e custos para a construção da solução executada em <i>JG</i> . ....	114
Tabela 5.23: Quantidades e custos para construção da solução alternativa em <i>CSM</i> . ....	114
Tabela 5.24: Custos totais estimados para as soluções alternativas em <i>JG</i> e em <i>CSM</i> . ....	115
Tabela 5.25: Custo do sistema de bombagem da solução executada e das soluções alternativas apresentadas. ....	115



# Simbologia e Notações

## Alfabeto Latino

Símbolo	Descrição
$c'$	Coesão efetiva
$C_u$	Resistência não drenada
$E_j$	Módulo de deformabilidade
$E_{50}^{ref}$	Módulo de deformabilidade secante em estado triaxial
$E_{oed}^{ref}$	Módulo de deformabilidade edométrico
$E_{ur}^{ref}$	Módulo de deformabilidade na descarga/carga
EA	Rigidez axial
EI	Rigidez de flexão
$k_x$	Condutividade hidráulica segundo x
$k_y$	Condutividade hidráulica segundo y
$K_0$	Coefficiente de impulso em repouso
w	peso do elemento estrutural por metro de desenvolvimento

## Alfabeto Grego

Símbolo	Descrição
$\gamma$	Peso volúmico
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\phi'$	Ângulo de resistência ao corte, em tensões efetivas
$\gamma_i$	Coefficiente parcial de segurança na situação $i$

## Siglas

Símbolo	Descrição
A/C	Relação água cimento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CSM	<i>Cutter Soil Mixing</i>
DCC	Descarregador de Cheias Complementar
DDM	<i>Dry Deep Mixing</i>

<i>DSM</i>	<i>Deep Soil Mixing</i>
EC 7	Eurocódigo 7
EDP	Energias de Portugal
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
<i>HS</i>	<i>Hardening Soil</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método de Elementos Finitos
mld	Metro linear de desenvolvimento
NAIE	Nível de água no interior da enseadeira
NMC <sub>act</sub>	Nível Máximo de Cheia actual
Nme	Nível mínimo de exploração
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
PM	Plano de Monitorização
RCU	Resistência à compressão uniaxial
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
<i>UCS</i>	<i>Unconfined Compressive Strength</i>
UL	Unidades <i>Lugeon</i>
<i>WDM</i>	<i>Wet Deep Mixing</i>
ZG	Zona Geotécnica
%REC	Percentagem de recuperação

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento geral

O ser humano desde sempre sentiu a necessidade de encontrar abrigo no meio que o rodeia. O Homem enquanto pensador e executante conseguiu sempre encontrar refúgio, sendo muitas vezes obrigado a construí-lo. Na pré-história a construção destes abrigos cingia-se aos materiais de que se dispunha, como pedras e paus, que permitissem mais segurança e conforto. Essa necessidade conduz a uma constante evolução da construção e da ocupação dos solos até aos dias de hoje.

Ao longo da evolução da história da construção, os principais avanços surgem da descoberta e incorporação de novos materiais na Engenharia Estrutural. As primeiras construções do Homem incorporavam materiais simples, como a madeira, a pedra e o próprio solo (o barro, por exemplo).

O Império Romano introduz argamassas como material construtivo, durante os sete séculos da sua existência, dando origem a uma constante evolução da Arquitetura e da própria Engenharia Civil. Nos séculos XVIII e XIX o ferro aparece como novo material estrutural na construção. Contudo é a partir da segunda metade do século XIX que surge o betão armado, dando início a uma grande revolução na construção. A incorporação do aço neste material permitiu aos elementos estruturais o suporte aos esforços de tração. Considerado inicialmente como um material eterno está desmitificado há muito, sabendo-se que apesar da sua considerável resistência apresenta quando sujeito a determinados ambientes, rápida deterioração mecânica e física.

A contínua evolução da Engenharia, da Arquitetura e a crescente ocupação do solo, levou naturalmente ao início da construção em altura, tendo sido edificado o primeiro arranha-céus no ano de 1885 em Chicago, nos Estados Unidos da América, com cerca de 10 pisos acima do solo. Esta revolução da construção em altura teve como consequência a necessidade de estas estruturas (mais pesadas) serem fundadas adequadamente e em profundidade, não só pela necessidade de fundar a estratos devidamente competentes, mas também pela necessidade da construção de pisos enterrados para os mais diversos fins.

Sendo do domínio da Geotecnia a fundação de estruturas, a contenção periférica de áreas de escavação, entre outras, deu início a uma crescente contribuição da comunidade científica no estudo dos solos e dos maciços rochosos, dando origem a uma nova Mecânica, a Mecânica dos Solos e das Rochas. Este contributo permitiu o crescimento das cidades existentes na época em grandes metrópoles atuais, com uma ocupação dos solos urbanos cada vez mais intensa.

No que se refere à atualidade, em particular quando se executam estruturas de suporte para a realização de escavações com nível freático elevado combinam-se técnicas de tratamento de solos e em caso de necessidade sistemas de bombagem, de modo a funcionarem em conjunto. O tratamento do solo através das técnicas designadas por *Grouting* permite a redução da permeabilidade do solo e consequentemente do caudal que irá percolar para o interior da escavação.

Nas últimas décadas têm sido aplicadas diversas técnicas de reforço e tratamento dos solos, destacando-se as seguintes tecnologias:

- *Permeation Grouting*: visa a substituição da água (ou ar) existente nos vazios do esqueleto sólido, por calda a baixa pressão evitando perturbações na estrutura do solo. Técnica geralmente utilizada na redução da permeabilidade, podendo ser empregue para conferir maior resistência e rigidez aos solos a tratar;

- *Hydrofracture Grouting*: através da injeção de calda a elevadas pressões fratura-se deliberadamente o solo (ou rocha), conferindo maior compactidade e rigidez após tratamento. Esta técnica é utilizada quando a tecnologia apresentada anteriormente não é praticável.
- *Compaction Grouting*: força o deslocamento do solo, por sucessivos bolbos de calda, que ao expandirem adensam o solo circundante, aumentando o ângulo de atrito (solos granulares) e a sua rigidez. Após o tratamento com recurso a esta tecnologia formam-se elementos coluna.
- *Jet Grouting*: utiliza energia pneumática e hidráulica para desagregar e misturar o solo, *in situ*, com um ligante hidráulico. O resultado deste processo cria um elemento solo-cimento com melhor resistência, rigidez e permeabilidade do que o solo original. Possibilidade de se formarem diversos elementos.

As técnicas anteriores podem ser utilizadas para reduzir a permeabilidade, como já mencionado, para além de conferirem maior resistência dos solos tratados, sendo que a técnica de *JG* permite ambas em simultâneo.

Enquadrando o tema da dissertação, da revisão do novo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 344/2007 de 15 de Outubro, surge a necessidade por parte da EDP Produção de elaborar estudos com o objetivo de verificar o cumprimento dos diversos critérios presentes no documento, entre eles o cumprimento dos critérios de projeto dos órgãos de segurança do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada, inserido no sistema hidroelétrico Cávado-Rabagão-Homem.

Após a realização dos estudos, concluiu-se que a atual capacidade de descarga do descarregador de cheias existente não era satisfatório para a garantia da não excedência do Nível Máximo de Cheia actual ( $NMC_{act}$ ) de cota igual a 153,00 m, e que o descarregador de fundo não cumpria a sua função corretamente. Assim, surge a necessidade por parte da EDP Produção na construção de um novo Descarregador de Cheias Complementar (DCC) da barragem da Caniçada, tendo sido adotada a tecnologia de *JG* para a execução da ensecadeira para a realização dos trabalhos necessários.

## 1.2 Objetivos e metodologia

A percolação de água em estruturas de contenção gera pressões hidrodinâmicas por vezes consideráveis nas mesmas. Alguns colapsos de barragens de betão e de aterro já foram registados devido a fenómenos de rotura hidráulica nos solos, como o fenómeno de “*uplift*” (levantamento hidráulico global) e o fenómeno de “*piping*” (erosão interna). Da consulta da bibliografia Xanthakos et al., (1994), admite-se que num passado relativamente recente insuficientes considerações no dimensionamento desta técnica, no que diz respeito aos parâmetros definidos no processo de furação e no processo de injeção, tenham contribuído para a redução da resistência definida em projeto, num período inferior à vida útil da estrutura.

Esta dissertação surge com base no estudo da solução executada da ensecadeira para a construção do novo DCC da barragem da Caniçada, localizado na freguesia de Valdozende, concelho de Terras de Bouro, distrito de Braga. A execução da ensecadeira com recurso a cortina de injeções e colunas de *JG* tem vários condicionamentos, dos quais se destacam os de cenário geológico-geotécnico, de vizinhança e de prazo de execução. Pretende-se com este trabalho estudar as secções mais condicionantes do projeto, realizar as verificações de segurança necessárias presentes no Eurocódigo 7 (EC 7) a fenómenos de desestabilidade hidráulica para este tipo de estrutura, analisar os fatores de segurança obtidos.

Adicionalmente serão estudados os caudais percolados para o interior da escavação do DCC, para as mesmas secções consideradas anteriormente, avaliando-se os custos de execução e os custos do sistema de bombagem



necessário para a realização dos trabalhos em seco. Desta análise pretende-se elaborar um gráfico da relação custo-benefício da solução executada e das soluções alternativas.

Deste modo, podem-se agrupar os objetivos desta dissertação nos seguintes pontos:

- compreender a tecnologia de *JG*, identificando procedimentos, sistemas existentes, campos de aplicação, vantagens e desvantagens;
- estudar a verificação da segurança da ensecadeira a fenómenos de desestabilidade hidráulica segundo o EC 7;
- estudar o caudal percolado total da albufeira para o interior da escavação através da ensecadeira;
- estudo de soluções alternativas e quantificação dos caudais percolados;
- estudar a relação custo-benefício da solução executada e das soluções alternativas propostas.

Com o intuito de aumentar o conhecimento sobre este tema foram analisadas diversas secções possíveis, tendo sido escolhidas três secções diferentes para proceder à sua análise, com recurso aos *softwares* SEEP/W e PLAXIS 2D. Pretende-se reproduzir as três secções escolhidas com a maior precisão possível ao executado em obra, recorrendo para tal a plantas e cortes transversais da própria solução, de modo que através dos dados da sua monitorização se possam validar os resultados obtidos para estas secções e para as soluções alternativas que se propõem no desenvolvimento deste trabalho.

Após a definição das geometrias, caracterização dos materiais e dos elementos estruturais que constituem cada secção em estudo, proceder-se-á à sua modelação, quantificando os caudais que são expectáveis de percolar para o interior da escavação, as verificações de segurança necessárias a este tipo de estrutura geotécnica, em particular à desestabilidade a fenómenos hidráulicos segundo o documento EC 7 e os coeficientes de segurança obtidos para cada secção.

Após toda a modelação realizada serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada capítulo correspondente ao *software* em uso.

Referem-se posteriormente as considerações finais e desenvolvimentos futuros da realização desta dissertação

### 1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos distintos e bibliografia, que se descrevem de seguida.

No presente capítulo é feito um enquadramento do tema no contexto da evolução da construção, a crescente ocupação dos solos menos competentes e as técnicas de reforço e de tratamento que se têm vindo a desenvolver nas últimas décadas, em particular o *JG*. Faz-se ainda uma descrição dos objetivos da dissertação bem como das questões a que a mesma pretende responder.

O segundo capítulo está dividido em dois subcapítulos. O primeiro aborda a temática dos desvios provisórios, apresentando uma breve descrição inicial, as considerações necessárias ao seu dimensionamento, as estruturas de desvio de cursos de água frequentes, bem como os principais tipos de ensecadeiras existentes. O segundo subcapítulo apresenta a tecnologia de *JG*, expondo a sua evolução histórica, os equipamentos necessários, os elementos e estruturas que a tecnologia permite, o seu campo de aplicação, o controlo de qualidade, as vantagens e as desvantagens da mesma.

No início do terceiro capítulo introduz-se o caso de estudo, contextualizando a barragem da Caniçada e a necessidade da EDP – Energias de Portugal de proceder à construção do novo DCC. Após a exposição

referem-se os elementos base da obra, os vários condicionamentos existentes, a descrição pormenorizada da solução executada, bem como o seu Plano de Monitorização (PM).

O quarto capítulo aborda a modelação numérica da linha de saturação, através do *software* SEEP/W, das secções mais condicionantes, apresentando-se em primeiro lugar uma breve descrição geral da solução executada. Descreve-se posteriormente a geometria das secções transversais escolhidas, as propriedades dos materiais que constituem a ensecadeira, identificam-se as condições de fronteira e da malha de cada secção em estudo. Referem-se também as validações do modelo e dos resultados obtidos com o *software*, de modo a que a modelação seja representativa do real comportamento que a estrutura irá ter no seu período de funcionamento. A determinação da linha de saturação das secções com recurso a este *software* permite posteriormente traçar a mesma no *software* PLAXIS 2D, onde será dada continuidade ao estudo de tensões e deformações da ensecadeira. A apresentação e discussão dos resultados encerra este capítulo.

O quinto capítulo refere-se à modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D das mesmas secções escolhidas no capítulo anterior. À semelhança do que foi descrito para o quinto capítulo descrever-se-á novamente a geometria, as condições de fronteira e malha de elementos finitos das secções transversais mais condicionantes. A validação do modelo e dos resultados obtidos será uma vez mais confirmada, sendo boa prática na engenharia balizar os valores que se esperam da realização de uma modelação. Por fim, são apresentados os resultados obtidos da modelação e as verificações de segurança a fenómenos de desestabilidade hidráulica necessárias a este tipo de estrutura, segundo o EC 7, incluindo para o efeito um subcapítulo onde se expõem as principais conclusões da modelação realizada.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões decorrentes do trabalho realizado, sugerindo-se aspetos passíveis de serem melhorados e estudados mais aprofundadamente em trabalhos futuros, que permitirão aumentar e melhorar o conhecimento sobre o comportamento de ensecadeiras executadas com recurso à tecnologia de *JG*, entre outras considerações.

Por último encontram-se organizadas as referências bibliográficas consultadas, tendo estas sido de grande importância para a aquisição de novos conhecimentos e no apoio à elaboração dos diversos capítulos que constituem a dissertação.

## 2 Fundamentos teóricos

### 2.1 Ensecadeiras

As ensecadeiras são estruturas cuja finalidade é o fecho de uma dada área num curso de água existente, permitindo a execução de trabalhos no seu interior a seco, salvaguardando pessoas, equipamentos e o normal decorrer das operações.

A escolha e o dimensionamento do tipo de ensecadeira a adotar depende de fatores físicos do local, tais como a topografia, a geologia e a hidrologia, mas também das características da obra que se pretende realizar. Aspectos relacionados com a obra podem-se enumerar o tipo de estruturas que se pretendem implantar, por exemplo o tipo de barragem, construção de novas tomadas de água (entre outras estruturas), os prazos de execução e os riscos aceitáveis à realização da obra. A escolha do tipo de ensecadeira, como em restantes estruturas da competência da Engenharia Civil, deve ser a solução mais económica, dentro dos padrões de segurança e da boa prática de engenharia (Rocha, G. S. C., (2006)).

Apesar da função principal ser a de ensecar o local onde os trabalhos se realizam na proximidade do curso de água existente, é expectável que haja percolação e conseqüentemente infiltração de água para o seu interior. A água que percolar até à frente de trabalho terá que ser bombeada para o exterior e devolvida a um curso de água próximo. Desse modo, é necessário prever e adotar um sistema de bombagem adequado para os valores de caudal expectáveis de se infiltrarem (Rocha, G. S. C., (2006)).

As ensecadeiras são estruturas temporárias, podendo, no entanto, serem incorporadas ou não na estrutura definitiva a executar. Como foi mencionado anteriormente, o objetivo da ensecadeira de criar uma área a seco terá necessariamente uma interação entre o solo e a água, gerando-se diversos tipos de cargas nestes elementos. Para este tipo de estrutura a pressão hidrostática é a carga imposta de maior relevância. Porém, no seu dimensionamento é necessário ainda considerar as forças dinâmicas devido à percolação nos solos, às ondas, aos impulsos do aterro e à ação sísmica (Nemati, K. M., (2007)).

No dimensionamento da ensecadeira é necessário ainda que a área ensecada permita a livre circulação de equipamentos e a segurança de estruturas vizinhas existentes.

#### 2.1.1 Principais tipos de ensecadeiras

A função estrutural de uma ensecadeira pode, de certa forma, assemelhar-se à de uma barragem. Porém, as maiores diferenças entre estas estruturas podem ser explicadas, pela vida útil reduzida no caso das ensecadeiras e pelas condições de construção e operação, que são muito distintas nos dois tipos de estrutura (Silva, S. A. O. C. (2013)).

A escolha do tipo de ensecadeira a adotar depende de vários fatores já enumerados, tais como a topografia, as condições hidrológicas e as condições geológicas do local da sua implantação, mas também depende das características da obra a realizar, incorporando-a ou não na estrutura definitiva. Outro aspeto importante a ser considerado é o cumprimento dos prazos de execução estipulados.

Existe uma ampla variedade de ensecadeiras, tendo em consideração as que apresentam altura relativamente baixa. Na escolha do tipo de ensecadeira a utilizar, deve, se possível, adaptar-se o projeto de modo a que seja possível a utilização de material existente no local e dos equipamentos disponíveis (ICOLD, (1986)).

As ensecadeiras, regra geral, são constituídas com os solos disponíveis no local da obra, porém quando as suas propriedades físicas não são satisfatórias é necessário recorrer, por exemplo, a tratamentos de impermeabilização no corpo ou na fundação da ensecadeira.

Os principais tipos de ensecadeiras existentes apresentam-se de seguida.

### 2.1.1.1 *Ensecadeiras de materiais granulares*

Ensecadeiras de materiais granulares englobam as ensecadeiras constituídas por terra, por enrocamento ou por uma mistura dos dois tipos de materiais. Este tipo de ensecadeiras é adotado frequentemente por ser uma solução económica e tecnicamente pouco exigente (BUREC, (1987)).

O período de construção de ensecadeiras de materiais granulares é reduzido, porém em determinadas situações não é garantido que a zona onde decorrem os trabalhos esteja a seco. Tendo presente este aspeto, esta solução torna-se vantajosa quando os materiais necessitam de pouca preparação, quando se pode ser mais permissivo em algumas especificações e ainda quando, no dimensionamento das estruturas necessárias à obra, estas possam admitir maiores taxas de infiltração no seu interior (ICOLD, (1986)).

As ensecadeiras de terra-enrocamento são as mais utilizadas, sendo regra geral as de menor custo. O enrocamento é utilizado para fechar o curso de água existente, podendo ser dispensado quando as velocidades do escoamento local são reduzidas (menores que 1 m/s) e para proteção do material de impermeabilização. A terra (material argiloso) é responsável pela estanqueidade da ensecadeira (Rocha, G. S. C., (2006)).

Na Figura 2.1 ilustram-se algumas secções transversal tipo para ensecadeiras de materiais granulares.

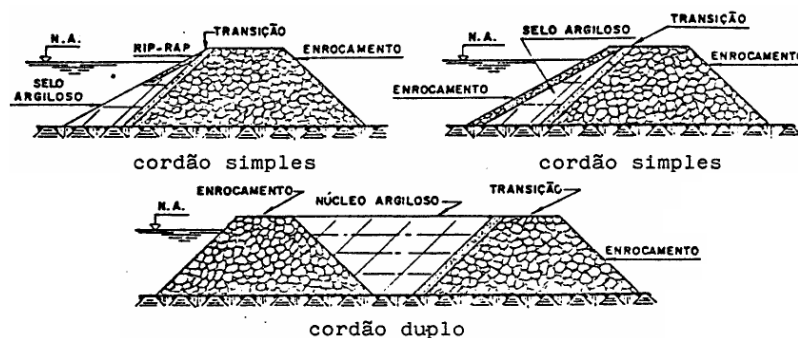


Figura 2.1: Secção transversal tipo de ensecadeiras de enrocamento de cordão simples e de cordão duplo (adaptada de Rocha, G. S. C., (2006)).

### 2.1.1.2 *Ensecadeiras com cortina impermeável*

A solução de ensecadeiras com cortina impermeável é necessária em algumas situações particulares. A execução de cortinas de impermeabilização reduz a percolação da água através dos solos disponíveis para a realização da ensecadeira, pelo seu corpo ou pela sua base. A estanqueidade da ensecadeira é importante para a realização dos trabalhos a seco, também para garantir a estabilidade da mesma.

A utilização deste tipo de ensecadeira é recomendada para os três seguintes casos, segundo (Rocha, G. S. C., (2006)):

- quando da ocorrência de problemas no processo de impermeabilização da ensecadeira que possam podendo acarretar infiltrações acima de níveis aceitáveis pelo corpo da ensecadeira;

- quando o material de impermeabilização não for fino o suficiente para impedir o fluxo de água, ou quando a sua compactação não puder ser controlada;
- quando a fundação da ensecadeira apresenta uma permeabilidade elevada, devido a bombagem excessiva e aos problemas que advêm desse processo, como o caso de erosão interna (*piping*).

Dos casos apresentados anteriormente, o primeiro tem um carácter corretivo, enquanto nos restantes casos a sua utilização deve ser prevista em fase de projeto. Em todos os casos, os maciços da ensecadeira devem apresentar características granulométricas compatíveis com a utilização de cortinas impermeáveis (Rocha, G. S. C., (2006)).

A cortina impermeável pode ser executada segundo diversos métodos e com diferentes materiais. As tecnologias possíveis são, por exemplo, injeções com calda de cimento, mantas asfálticas e mantas de material polimérico de alta densidade. Na Figura 2.2 está ilustrada uma secção transversal tipo de uma ensecadeira com cortina impermeável.

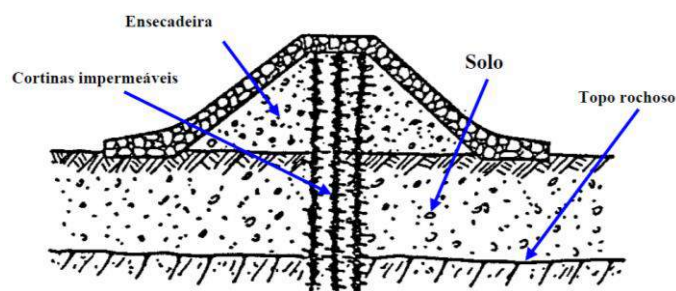


Figura 2.2: Secção transversal tipo de uma ensecadeira com cortina impermeável (adaptada de Rocha, G. S. C., (2006)).

### 2.1.1.3 *Ensecadeiras de betão*

As ensecadeiras de betão podem ser de vários tipos, à semelhança das barragens de betão. Serão apenas expostas as ensecadeiras de gravidade e as ensecadeiras em arco, as quais apresentam características muito semelhantes às barragens do mesmo tipo.

#### **Ensecadeiras de gravidade**

As ensecadeiras de gravidade podem dividir-se em dois tipos, no que respeita à sua geometria, de eixo retilíneo ou curvas em plano. A geometria curva em plano tira maior partido do efeito de arco, vantajoso a nível económico e de segurança estrutural da ensecadeira (ICOLD, (1986)).

A aplicabilidade desta solução é limitada a fundações que apresentem boas capacidades de resistência, como maciços rochosos são, garantindo a estabilidade e segurança da ensecadeira.

A implementação deste tipo de ensecadeiras de gravidade pode representar uma solução viável, quando existe a possibilidade de recorrer a ensecadeiras de pequena dimensão, tendo como grande vantagem a possibilidade de galgamento sem que haja destruição da ensecadeira. Em estruturas de médio e grande porte este tipo de ensecadeira não se apresenta muito vantajosa em termos económicos e duração de execução (ICOLD, (1986)).

### **Ensecadeiras em arco**

As ensecadeiras em arco apresentam curvatura para montante, transmitindo o efeito da pressão hidrostática à fundação e aos encontros laterais, tirando partido da resistência à compressão dos arcos. Este tipo de ensecadeira, em comparação com as ensecadeiras de gravidade, permite uma poupança muito significativa ao nível de volumes de betão necessários à sua realização (BUREC, (1987)).

Segundo BUREC, (1987), quando a relação entre encontros e a sua altura é reduzida, este tipo de ensecadeira terá grande aplicabilidade. A fundação terá que ter a resistência necessária para acomodar os esforços que se geram da pressão hidrostática no arco.

Para ensecadeiras de betão em arco é possível definir-se dois tipos, ensecadeiras de arco único, como ilustrado na Figura 2.3, e ensecadeiras de arcos múltiplos.



Figura 2.3: Fotografia de ensecadeira de betão em arco adotada para a realização da tomada de água do Reforço de Potência de Venda Nova III (adaptada de <http://www.ruivaes.com/2012/11/venda-nova-iii-fotos-da-obra.html> - 17:20h em 24/02/2015).

#### **2.1.1.4 Ensecadeiras galgáveis**

Para situações em que se verifiquem caudais bastante elevados durante largos períodos no curso de água em que se pretende intervir, poderá não ser técnica ou economicamente viável dimensionar o desvio provisório para um caudal que, mesmo para um reduzido período de retorno, obrigaria a obras de dimensão excessiva ou mesmo não exequíveis (Pinheiro, A. N., (2002)).

Uma opção que se coloca então é dimensionar o desvio provisório para um caudal determinado em função do risco de galgamento das ensecadeiras considerado admissível para o conjunto de meses habitualmente mais secos, tomando-se disposições que permitam eliminar ou reduzir prejuízos decorrentes do galgamento das obras de desvio durante o período húmido. Esta solução pode ser aplicada, por exemplo na construção de barragens de betão, cujo galgamento durante a construção é admissível; foi o caso da barragem de Cahora Bassa (ver Figura 2.4) em que o desvio foi efetuado através de túneis para caudais até 4500 m<sup>3</sup>/s, e através da própria barragem, após galgamento das ensecadeiras, para caudais superiores. Esta solução pode ser aplicada também em barragens de aterro, sendo, neste caso, necessário aterrar em segunda fase um troço da barragem que servirá de canal de desvio de caudais durante a execução do restante aterro da barragem (Pinheiro, A. N., (2002)).

Nos períodos com risco de galgamento da ensecadeira, será necessário conceber um plano de evacuação da área ensecada, protegendo os trabalhadores e equipamentos existentes nas frentes de trabalho. Quando necessário deve-se prever a realização de proteções das estruturas principais que estão a ser executadas, minimizando os seus danos e custos inerentes à sua reabilitação (Rocha, G. S. C., (2006)).

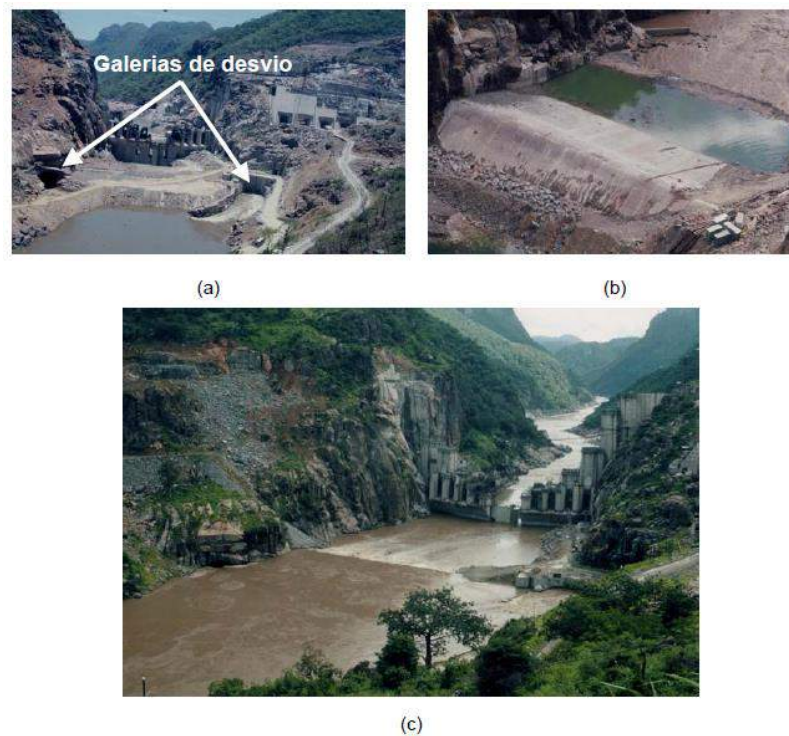


Figura 2.4: Barragem de Cahora Bassa (Moçambique). Desvio provisório: (a) vista de montante; (b) ensecadeira de jusante; (c) galgamento das ensecadeiras (fotografias cedidas pelo Prof. António Quintela) (adaptada de Pinheiro, A. N., (2002)).

#### 2.1.1.5 *Ensecadeiras incorporadas*

Em algumas obras é possível incorporar a ensecadeira ao corpo final da barragem. Esta solução apresenta dois benefícios, segundo Rocha, G. S. C., (2006): o primeiro e mais importante é a redução do volume de aterro necessário e o segundo é evitar a remoção da ensecadeira quando esta não for mais necessária.

Mas a utilização desta solução não é possível em qualquer situação. A viabilidade técnica deste tipo de solução é limitada pelo tipo maciço da barragem principal e pelo tipo de ensecadeira escolhida, incluindo os materiais usados e o processo construtivo adotado. Em barragens de terra, de enrocamento ou variações destas, como por exemplo, terra-enrocamento ou de enrocamento com cortina de betão a montante, é frequente a sua incorporação na barragem final. Nestes casos, o maciço da ensecadeira deve ser compatível com o maciço da barragem, de modo a que seja possível essa incorporação. Ensecadeiras celulares ou de enrocamento com terra de duplo cordão não devem ser incorporadas à barragem (Rocha, G. S. C., (2006)).

Na seleção desta solução o seu dimensionamento e controlo de qualidade não necessita de cuidados acrescidos, sendo que os padrões de qualidade definidos para a ensecadeira não colocam em causa o comportamento da barragem.







dimensionamento deste tipo de ensecadeira é a verificação de segurança nas ligações entre as estacas prancha. As estacas de junção mais utilizadas são as do tipo (a) representado na Figura 2.7, sendo que o ângulo  $\Theta$  pode variar entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$  (Gomes, C. E. S. (2013)).

A seleção deste tipo de ensecadeira constituída por estacas prancha permite a sua reutilização em obras futuras, assumindo que a espessura da alma é a adequada, traduzindo uma resistência e uma rigidez suficientes aquando da sua cravação e exploração.

As ensecadeiras de células são classificadas, tipicamente, de acordo com a sua configuração e disposição em planta. No que diz respeito a estacas prancha, os principais tipos de ensecadeira celulares são as do tipo circular, do tipo diafragma e do tipo em trevo. De seguida, expor-se-á os três tipos de ensecadeira celulares, mencionados anteriormente.

### Ensecadeiras de Células do Tipo Circular

As ensecadeiras de células do tipo circular têm uma configuração geométrica de círculos de grande diâmetro conectados entre si por arcos de diâmetro reduzido, como se ilustra na Figura 2.8.

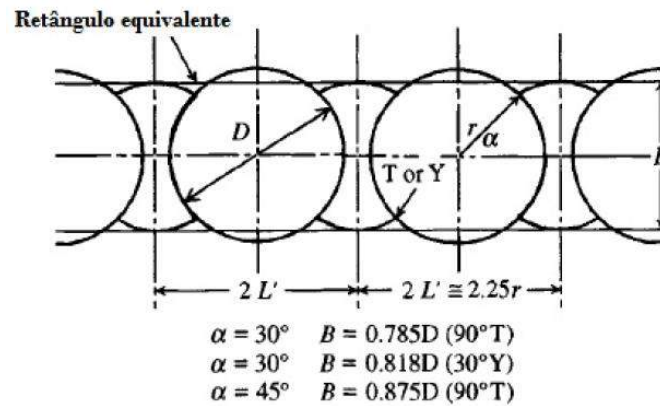


Figura 2.8: Geometria tipo de células do tipo circular (adaptada de ArcelorMittal (2009)).

Num projeto de uma ensecadeira de células do tipo circular utilizam-se dois tipos de estacas: as estacas de alma reta e as estacas de junção. Relativamente à zona de colocação de cada tipo de estaca, as estacas de alma reta constituem a maior parte da ensecadeira, exceto nos pontos de interseção das células circulares com os arcos de ligação, dando lugar às estacas de junção (Gomes, C. E. S. (2013)), como se pode observar na Figura 2.9.

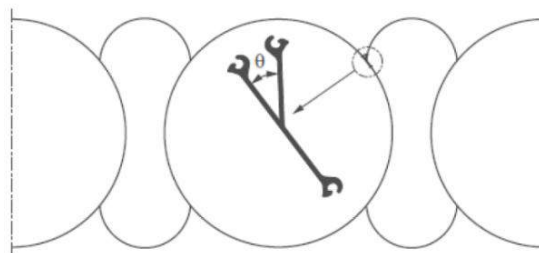


Figura 2.9: Pormenor da localização da estaca de junção (adaptada de ArcelorMittal (2009)).

### Ensecadeiras de Células do Tipo Diafragma

Geometricamente as ensecadeiras de células do tipo diafragma caracterizam-se por duas séries de arcos circulares conectados entre si por diafragmas perpendiculares ao eixo da ensecadeira (Gomes, C. E. S. (2013)).

Segundo referencia Gomes, C. E. S. (2013) no dimensionamento deste tipo de ensecadeira é prática comum adotar um raio para os arcos igual à distância entre diafragmas e no ponto de interseção entre os dois arcos e o diafragma o valor de  $\Theta$  é igual a  $120^\circ$ , como ilustrado na Figura 2.7.

Na Figura 2.10 ilustra-se a sua geometria tipo.

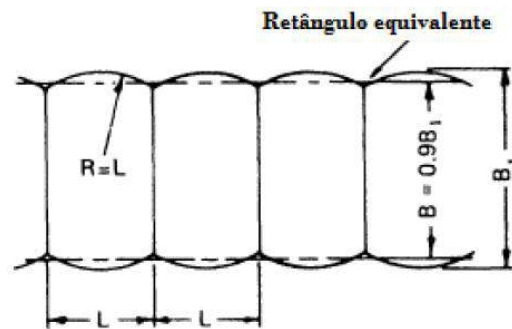


Figura 2.10: Geometria tipo de células do tipo diafragma (adaptada de USS, (1984)).

### Ensecadeiras de Células do Tipo em Trevo

Relativamente às ensecadeiras de células do tipo em trevo estas empregam-se quando as pressões que se geram na estrutura são elevadas. Através da modificação das células circulares e da utilização de grandes diâmetros garante-se a sua estabilidade. As ligações entre elementos estão sujeitas a esforços elevados, recorrendo-se frequentemente a diafragmas (Gomes, C. E. S. (2013)).

A geometria deste tipo de células pode-se observar na Figura 2.11.

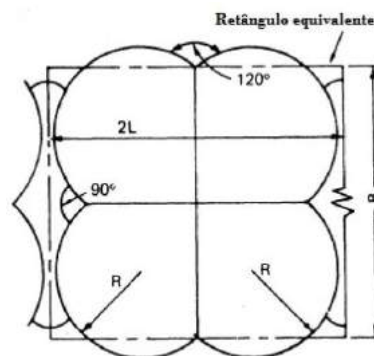


Figura 2.11: Geometria tipo de células do tipo em trevo (adaptada de USS, (1984)).

## 2.2 Jet Grouting

### 2.2.1 Considerações iniciais

O objetivo principal de qualquer método de tratamento de solos é melhorar as suas características de modo a atingirem-se os resultados definidos em projeto, como por exemplo incrementar a compacidade e a resistência ao corte para problemas de estabilização; reduzir a compressibilidade do solo; reduzir a permeabilidade e o controlo de poluentes existentes no subsolo; aumentar a velocidade de consolidação; ou homogeneizar o solo.

As técnicas de tratamento de solos estão em constante desenvolvimento, quer quantitativamente quer qualitativamente, em resultado não só do desenvolvimento tecnológico mas também da crescente consciencialização para as questões ambientais, de sustentabilidade e de economia na Engenharia Civil.

Dentro das diferentes técnicas de tratamento de solos, distinguem-se os métodos de compactação (por exemplo, *deep vibro techniques* ou *dynamic compaction*) e os métodos de reforço através da introdução de material adicional no solo, por exemplo, as técnicas designadas por *cement grouting*, *compaction grouting* ou *jet grouting*. Será abordada na dissertação apenas a técnica de *JG*, uma vez que esta foi esta a tecnologia adotada no caso de estudo.

A técnica de *Jet Grouting (JG)* foi introduzida há alguns anos, tendo sido utilizada em centenas de projetos em todo o mundo, com o objetivo de melhorar as propriedades de solos menos competentes, permitindo a resolução de problemas construtivos e de oferecer novas soluções.

O *JG* utiliza energia pneumática e hidráulica para desagregar e misturar o solo, *in situ*, com um ligante hidráulico, sendo o mais utilizado a calda de cimento. O resultado deste processo cria um elemento solo-cimento com melhor resistência, rigidez e permeabilidade do que o solo original. Esta técnica permite ainda o tratamento do solo em condições de operação e de permanência difíceis, como espaços reduzidos. Na sua execução é possível obter várias geometrias (colunas, painéis, etc.), orientações (vertical, horizontal ou inclinada) e diâmetros, dependendo da sua finalidade.

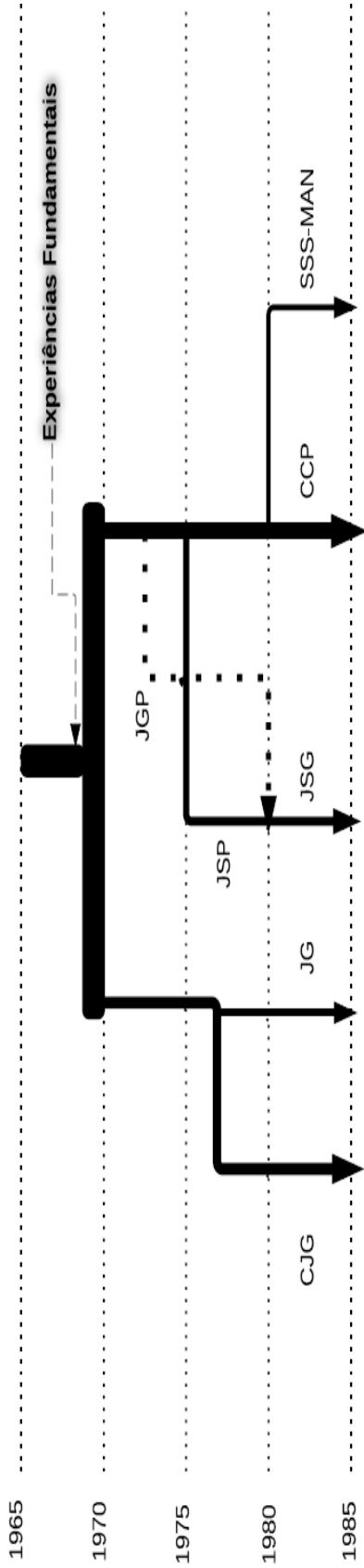
No presente subcapítulo pretende-se expor com maior detalhe as possibilidades e extensão da técnica, descrevendo, resumidamente, a evolução histórica, os equipamentos, os procedimentos, os sistemas existentes, a sua seleção, os elementos e estruturas frequentemente concebidas, os campos de aplicação, o controlo da qualidade de execução, as vantagens e desvantagens da técnica de *JG*.

### 2.2.2 Evolução histórica

Desenvolvimentos e experiências conduzidas pela indústria mineira de carvão Norte Americana no uso de água a elevadas pressões para o seu corte suscitaram o interesse de especialistas japoneses.

O conceito por detrás do *JG*, isto é, o uso de água a elevada pressão para quebrar a estrutura inicial do solo data dos meados da década de 60 no Japão (Xanthakos et al., (1994)). Em 1965, os irmãos Yamakada (Miki and Nakanishi (1984)) aplicaram o conceito, não só para quebrar a estrutura do solo mas, em complemento misturá-lo com calda de cimento. Estes dois desenvolvimentos deram origem às duas formas de *JG*, que datam do início de 1970.

Desde então, diversas técnicas de *JG* foram desenvolvidas e melhoradas, culminando nos cinco principais sistemas aplicados presentemente. As principais categorias de *JG* aplicadas no Japão em 1985 estão sumarizadas e ilustradas na Figura 2.12.



Método	Column Jet Grout (CJG)	Jumbo Jet Special Grout (JSG)	Chemical Churning Pile (CCP)	Super Soil Stabilization Management (SSS-MAN)
<b>Definição</b>	Método de substituição parcial através do uso de calda a alta velocidade envolvida por ar comprimido = JET3	Método de mistura através do uso de calda a alta velocidade envolvida por ar comprimido = JET2	Método de mistura através do uso de calda a alta velocidade = JET1	Método de substituição do tipo inverso através do uso de jato de água a alta velocidade envolvido por ar comprimido.
<b>Descrição</b>	Ascensão rotativa de injeção horizontal a elevada pressão (20 MPa) mistura o solo <i>in situ</i> com a calda, produzindo um corpo cilíndrico solidificado.	Ascensão rotativa de injeção horizontal a de calda a alta velocidade envolvida por ar comprimido, misturando o solo <i>in situ</i> com a calda, produzindo um corpo cilíndrico solidificado.	Ascensão rotativa de injeção horizontal a de calda a alta pressão (20 MPa), misturando o solo <i>in situ</i> com a calda, produzindo um corpo cilíndrico solidificado.	Uma furação prévia é realizada por circulação inversa, de seguida um jato de água a elevada pressão (60 MPa) envolvido por ar é introduzido no furo de modo a desagregar o solo e produzir um espaço para posteriormente ser preenchido por calda.
<b>Tipo de solo</b>	Solos argilosos, Solos arenosos.	Solos argilosos, Solos arenosos.	Solos argilosos (N<5), Solos arenosos (N<15).	Solos argilosos, Solos arenosos.
<b>Eficiência do tratamento</b>	Maior diâmetro de 1500-3000 mm e resistência elevada uniforme é possível de se obter.	Maior diâmetro de 800-2000mm e resistência elevada uniforme é possível de se obter.	Diâmetro entre 300-500mm e resistência elevada uniforme é possível de se obter.	Um corpo cilíndrico solidificado de diâmetro 2000-4000mm. É possível o uso de calda, betão, argila, etc. O diâmetro do corpo pode ser confirmado no local.

Figura 2.12: Desenvolvimento dos métodos de JG no Japão (adaptada de Miki and Nakanishi, (1984)).

Nos finais de 1970, a tecnologia de *JG* foi aplicada no Japão, Alemanha, Reino Unido, Itália, França, Singapura e Brasil, através de grupos de empreiteiros especializados, e sucessivamente pelo resto do mundo. Apesar dos potenciais do *JG* como técnica de tratamento de solos, a sua aceitação não foi imediata nem fácil. Preocupações associadas ao risco e questões legais, inerentes a qualquer novo método, dificultaram a sua imediata aceitação, bem como a sua reduzida procura comercial. Aplicações desapropriadas e problemas técnicos iniciais conduziram a fracos desempenhos das estruturas executadas, responsáveis, uma vez mais pela fraca aceitação, particularmente na América do Norte (Tinoco, J. A. B. (2012)).

Em Portugal, o *JG* foi introduzido a meio da década de 90, com os trabalhos de extensão das infraestruturas do metropolitano de Lisboa. Atualmente, as soluções com recurso ao *JG* tornaram-se competitivas e aplicáveis aos diversos cenários geotécnicos existentes (Pinto et al., (2012)).

Os constantes avanços tecnológicos dos equipamentos utilizados no *JG*, no início de 1990, traduziram-se no aumento de caudal e de pressão permitindo deste modo tratar um volume de solo 20 vezes superior ao possível até então (Xanthakos et al., (1994)).

### 2.2.3 Equipamentos

Os equipamentos necessários em obra para a execução de *JG* são:

- silo para armazenamento de cimento;
- doseador automático da relação água/cimento e betoneira;
- compressor de ar (apenas em alguns sistemas de *JG*);
- bomba de água;
- bomba de alta pressão para a calda de cimento;
- máquina de furação e de injeção com monitor de visualização;
- varas de furação e bits;
- mangueiras flexíveis para a ligação entre as varas e a bomba de alta pressão;

Na Figura 2.13 encontra-se representado o esquema geral dos equipamentos mencionados.

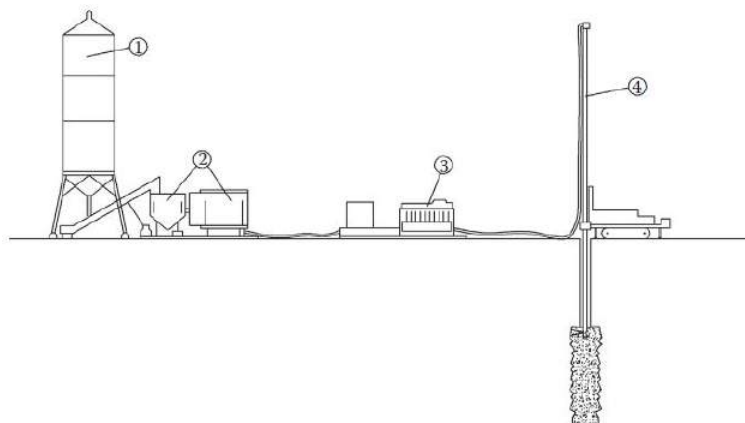


Figura 2.13: Equipamento necessário para a realização do JG: sistema tri-fluido: (1) silo de cimento, (2) doseador e betoneira, (3) compressor de ar e bomba de água de alta pressão e (4) equipamento de furação (adaptada de Croce et al., (2014)).

### Doseador automático de relação água/cimento

O doseador automático de relação água/cimento (ver Figura 2.14) assegura uma produção contínua de calda de cimento, registrando o número de misturas e as quantidades individuais de cada componente através de uma balança ou de um dispositivo que meça o seu volume. A mistura, após sofrer agitação, é armazenada num tanque, com velocidade de agitação baixa, até ser bombeada.

Este equipamento assegura constantemente uma dosagem correta de todos os elementos constituintes da mistura, podendo ser incorporada a adição de adjuvantes sempre que necessário.

### Compressores e bombas

Os compressores e as bombas (ver Figura 2.15) são de grande importância em todo o processo de execução do *JG*. Esta tecnologia necessita de bombas de elevada pressão (com pressões até cerca de 50 MPa) para bombear a calda de cimento, em particular, para os sistemas monofluido e bi-fluido.

As características técnicas do compressor de ar devem garantir que este é capaz de funcionar num intervalo de pressão entre 1,2 e 2,5 MPa e com um caudal na ordem de 200 a 300 l/s (Croce et al., (2014)). Estes equipamentos estão disponíveis comercialmente em motores diesel e elétricos. Estes possuem engrenagens para o ajuste do caudal injetado. O número de mangueiras é igual ao número de fluidos que constituem o sistema de injeção adotado.

No subcapítulo 2.2.5. serão descritos com maior detalhe os diferentes sistemas existentes, porém é de salientar que o uso de compressor de ar e bomba de água dependerá do sistema de *JG* a adotar.



Figura 2.14: Doseador automático para o fabrico de calda de cimento na técnica de *JG* (adaptada de <http://www.brighteroil.com/eng/channel.php?channel=cementing-equipment> – 19:37h, dia 15/12/2014).



Figura 2.15: Bombas e compressores necessários à técnica de *JG* (adaptada de [http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co\\_id=3276](http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co_id=3276) – 19:41h, dia 15/12/2014).

### Monitor de visualização

Este equipamento (ver Figura 2.16) possibilita a visualização e ajuste, em tempo real, dos parâmetros de controlo e o seu armazenamento. Estas informações devem ser posteriormente analisadas e interpretadas de modo a aferir a qualidade dos trabalhos executados e se necessário proceder a reinjeções.



Figura 2.16: Monitor de visualização (adaptada de [http://www.geomisure.com/wp-content/uploads/2014/03/FOTO\\_Campo-prove\\_INTERSONDA-002.jpg](http://www.geomisure.com/wp-content/uploads/2014/03/FOTO_Campo-prove_INTERSONDA-002.jpg) - 17:55h, dia 25/09/2015).

### Varas de furação e tubos injetores

Estes dois dispositivos dependem do sistema de injeção que se define em projeto. A vara de furação é o componente que permite ao operador atingir a profundidade do início da injeção e os tubos injetores são responsáveis por fechar o circuito de alimentação da calda entre os compressores e bombas até à vara de furação. Na Figura 2.17 encontra-se ilustrado o dispositivo dos três sistemas de injeção.

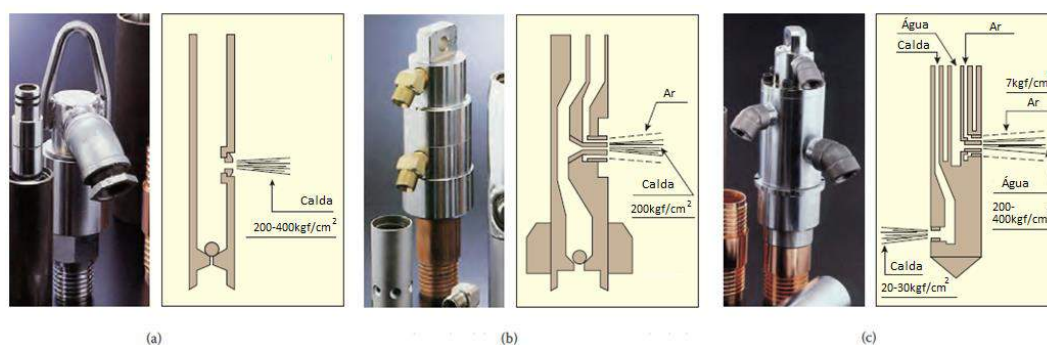


Figura 2.17: Pormenor do dispositivo de injeção: (a) sistema monofluido, (b) sistema bi-fluido e (c) sistema tri-fluido (adaptada de [http://eirit.co.il/files/uploads/ybm/ybm\\_jet\\_grouting\\_catalog.pdf](http://eirit.co.il/files/uploads/ybm/ybm_jet_grouting_catalog.pdf) - 14:48h, dia 21/10/2014).

### Bicos de injeção ou obturadores

Estes dispositivos são enroscados à vara de furação (Figura 2.18) e têm como função transformar a elevada pressão dos fluidos que constituem o sistema de *JG*, num jato de alta velocidade contra o solo. Estes são normalmente colocados perpendicularmente à vara. Contudo, a sua orientação é parte importante do elemento que se pretende criar, bem como a sua dimensão (diâmetro) e quantidade ao longo da vara. Os bicos de injeção devem ser o mais compacto possível, isto é, com uma reduzida secção transversal, de modo a reduzir a dispersão do fluido à saída destes. A influência destes dispositivos nos elementos a formar é notável no seu diâmetro final, porém nas propriedades mecânicas não são significativas (Tinoco, J. A. B. (2012)).



Figura 2.18: Detalhe de bicos de injeção para a realização da técnica de *JG* (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).



## Bits

Os *bits* ou cabeças de furação são dispositivos colocados na extremidade da vara de furação para a realização do furo. Estes dispositivos podem ser classificados como fixos (não permitem a rotação) ou móveis (permitem a rotação de um ou vários bits em simultâneo).

O diâmetro escolhido para o *bit* dita o diâmetro do furo a realizar, sendo importante que a sua escolha assegure durante o processo de furação uma adequada folga entre o furo e a própria vara de injeção. Este assunto será descrito com maior detalhe no seguinte subcapítulo 2.2.4.

Na Figura 2.19 ilustra-se um segmento de vara de furação, incorporando os obturadores e o bit de furação fixo na sua extremidade.



Figura 2.19: Segmento de vara de furação, com bicos de injeção incorporados e *bit* na sua extremidade (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).

Em suma, na Tabela 2.1 indicam-se os equipamentos utilizados para cada sistema:

Tabela 2.1: Equipamentos necessários para cada sistema de *JG*.

Equipamento	Sistema monofluido	Sistema bi-fluido		Sistema tri-fluido	Sistema <i>Superjet</i>	Sistema <i>Xjet</i>
		ar + calda de cimento	água + calda de cimento			
Silo de cimento	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Doseador automático	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Compressor de ar	-	✓	-	✓	✓	✓
Bomba de água	-	-	✓	✓	-	✓
Bomba de alta pressão para a calda	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Máquina de perfuração e de injeção	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Varas e bits	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mangueiras flexíveis	✓	✓	✓	✓	✓	✓

## 2.2.4 Procedimentos

Diferentes procedimentos podem ser seleccionados com a escolha da furação e do tipo de injeção. Os procedimentos são executados com o equipamento de furação, onde é controlada a rotação e a translação da vara e do sistema de injeção incorporado, como ilustrado na Figura 2.20.

A furação é feita até à profundidade máxima que se pretende tratar com recurso a equipamento de rotação ou de roto-percussão. O *bit* é montado na extremidade da vara e é ligeiramente mais largo, de modo a criar um espaço entre a vara e o furo. Usualmente o diâmetro da furação é de 120 a 150 mm, mas em alguns casos pode atingir os 300 mm de diâmetro (Croce et al., (2014)).



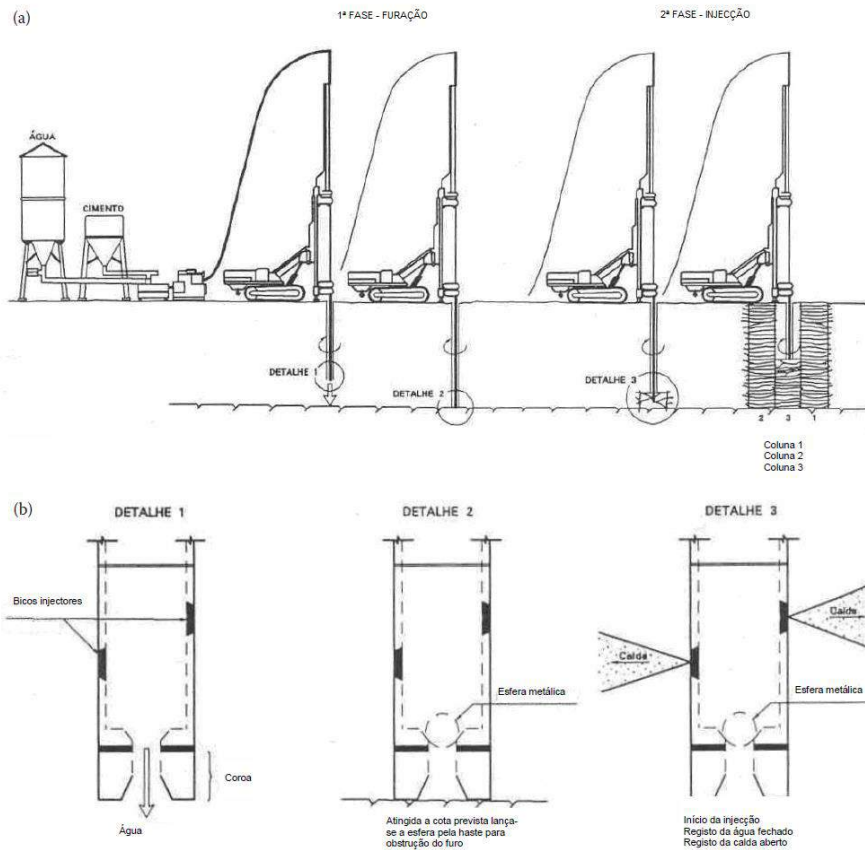


Figura 2.20: Processo de *JG*: (a) 1ª fase – furação e 2ª fase - injeção e (b) pormenores da extremidade da vara (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).

A injeção é realizada através de um ou mais bicos de injeção incorporados na vara. A ascensão da vara pode ser feita por um método descontínuo, com incrementos de 40 a 100 mm a cada patamar, registando o número de rotações. Em outras ocasiões, a ascensão da vara é um processo contínuo e a velocidade constante, originando uma injeção em forma de espiral. Este processo é preferido, por originar elementos mais uniformes (Croce et al., (2014)).

Quando se procede à ascensão e rotação da vara, os detritos resultantes da furação ascendem à superfície através do espaçamento existente entre a vara e o furo, sendo o produto resultante desta ascensão conhecido como refluxo. O controle do refluxo permite aferir se o processo está a ser realizado de acordo com o definido em projeto. Se o consumo de calda de cimento for excessivo ou se a pressão de injeção permanecer baixa é necessário parar os trabalhos e rever a situação existente.

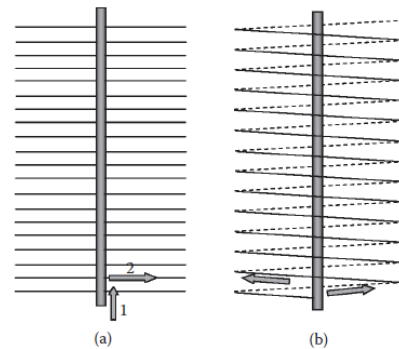


Figura 2.21: Métodos na ascensão da vara: (a) descontínuo (1, sobe; 2, injeção) e (b) contínuo (em espiral) (adaptada de Croce et al., (2014)).

### 2.2.4.1 *Parâmetros de procedimento*

Os parâmetros comuns aos três sistemas convencionais são:

- pressão da calda de cimento;
- caudal da calda de cimento;
- número de bicos de injeção da calda;
- diâmetros dos bicos de injeção da calda;
- relação água/cimento da calda;
- velocidade de rotação da vara;
- velocidade de subida da vara.

Os parâmetros de procedimento da técnica de *JG* são regidos consoante o sistema de injeção adotado para o tratamento. A escolha correta dos parâmetros depende da geometria, da resistência e da permeabilidade final do elemento a formar (Carreto, J. M. R. (1999)).

No caso de o sistema ser bi-fluido existem dois parâmetros de procedimento adicionais, relativos ao fluido desagregador adotado (ar e/ou água), a ter em consideração:

- pressão do fluido desagregador;
- caudal do fluido desagregador.

O sistema tri-fluido, além dos parâmetros anteriormente mencionados, necessita do controlo do:

- número de bicos de injeção dos fluidos desagregadores;
- diâmetro dos bicos de injeção dos fluidos desagregadores.

Em obra, os parâmetros da técnica de *JG* que são controlados são a pressão de injeção da calda, a pressão dos fluidos desagregadores (ar, água ou ambos), a velocidade de rotação e de ascensão da vara e os respetivos caudais de cada fluido (desagregador e ligante). Estes parâmetros são visualizados e armazenados, em tempo real, pelo monitor de visualização, permitindo em contínuo o controlo e ajuste, se necessário, do processo de tratamento.

Na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3 apresentam-se os valores limite dos diversos parâmetros usualmente adotados para os sistemas de injeção convencionais.

Tabela 2.2: Intervalo dos parâmetros do *JG* adotados para os diferentes sistemas (adaptada de BS EN 12716:2001).

Parâmetros do <i>JG</i>	Sistema monofluido	Sistema bi-fluido (ar)	Sistema bi-fluido (água)	Sistema tri-fluido
Pressão da calda (MPa)	30 a 50	30 a 50	> 2	> 2
Caudal de calda (l/min)	50 a 450	50 a 450	50 a 200	50 a 200
Pressão da água (MPa)	N/A	N/A	30 a 60	30 a 60
Caudal de água (l/min)	N/A	N/A	50 a 150	50 a 150
Pressão do ar (MPa)	N/A	0,2 a 1,7	N/A	0,2 a 1,7
Caudal de ar (m <sup>3</sup> /min)	N/A	3 a 12	N/A	3 a 12
N/A	Não aplicado			

Tabela 2.3: Intervalo dos parâmetros de *JG* para diferentes sistemas de injeção (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).

Parâmetros de <i>JG</i>		Sistema monofluido	Sistema bi-fluido	Sistema tri-fluido
Pressão	Calda de cimento (MPa)	20 a 60	20 a 55	0,5 a 27,6
	Ar (MPa)	-	0,7 a 1,7	0,5 a 1,7
	Água (MPa)	PF	PF	20 a 60
Caudal	Calda de cimento (l/min)	30 a 180	60 a 150	60 a 250
	Ar (m <sup>3</sup> /min)	-	1 a 9,8	0,33 a 6
	Água (l/min)	PF	PF	30 a 150
Diâmetro dos bicos de injeção	Calda de cimento (mm)	1,2 a 5	2,4 a 3,4	2 a 8
	Água (mm)	PF	PF	1 a 3
Número de bicos de injeção	Calda de cimento	1 a 6	1 a 2	1
	Água	PF	PF	1 a 2
Relação água-cimento		1:0,5 a 1:1,25	1:0,5 a 1:1,25	1:0,5 a 1:1,25
Velocidade de rotação da vara (rpm)		0,1 a 0,8	0,07 a 0,3	0,04 a 0,5
Velocidade de ascensão da vara (m/min)		6 a 30	6 a 30	3 a 20
PF – Pré-furação				

O intervalo de valores dos parâmetros de *JG* a serem adotados varia em cada bibliografia consultada, demonstrando que a técnica depende fortemente da experiência do projetista e das características iniciais do terreno a tratar. A validação dos parâmetros escolhidos só é possível através da execução de colunas de teste e da realização de ensaios laboratoriais aos provetes recolhidos em campo.

## 2.2.5 Sistemas existentes

Desde as suas primeiras aplicações, a tecnologia de *JG*, tem sofrido constantes desenvolvimentos e aperfeiçoamentos. Um dos principais desenvolvimentos relaciona-se com o número de fluidos de injeção empregues, definindo os três principais sistemas atualmente em uso: os sistemas monofluido (JET1), bi-fluido (JET2) e tri-fluido (JET3). Recentemente foram propostos outros dois sistemas designados por *Superjet* e *Xjet*, tendo ambos por base os sistemas anteriores.

As principais características dos diferentes sistemas existentes serão expostas de seguida, bem como a respetiva influência nas propriedades mecânicas do solo *in situ* e o diâmetro possível de se realizar.

### 2.2.5.1 Sistema monofluido

O sistema monofluido é o sistema mais simples de *JG*. Este injeta a calda de cimento a elevada velocidade através de orifícios circulares localizados na extremidade da vara de rotação. A calda destrói a estrutura inicial do solo e mistura-o para formar um elemento solo-cimento. Este sistema é preferencialmente utilizado para solos granulares, produzindo colunas até 1000 mm de diâmetro (Croce et al., (2014)).

### 2.2.5.2 Sistema bi-fluido

O sistema bi-fluido também usa calda de cimento para desagregar e substituir o solo *in situ*. Neste sistema um ou mais bicos de injeção são usados para expulsar separadamente dois fluidos, sendo estes água mais calda de cimento ou ar comprimido mais calda de cimento. A maior energia do sistema bi-fluido, provocada

pela incorporação de ar comprimido ou de água a elevada pressão, confere uma erosão do solo superior à resultante do sistema monofluido, tornando-o mais eficiente que o primeiro quando se tem em conta a aplicação desta técnica em solos argilosos. A utilização de sistemas bi-fluidos permite produzir colunas com diâmetros até cerca de 1800 mm (Croce et al., (2014)).

### 2.2.5.3 Sistema tri-fluido

O sistema tri-fluido utiliza uma “metodologia” ligeiramente diferente dos anteriores sistemas descritos. Através de bicos de injeção existentes na vara, água e ar comprimido a elevadas pressões são expulsos de modo a desagregar o solo em seu redor. Localizado imediatamente abaixo, existe outro bico de injeção onde a calda de cimento é expelida a pressões menores para formar o elemento pretendido. A separação do fluido de erosão e do fluido de ligação do *JG* traduz-se numa maior qualidade do elemento a executar. Este método é utilizado em solos argilosos e é capaz de produzir colunas até 1200 mm de diâmetro (Croce et al., (2014)).

Na Figura 2.22 e na Figura 2.23 ilustram-se os sistemas anteriormente descritos:

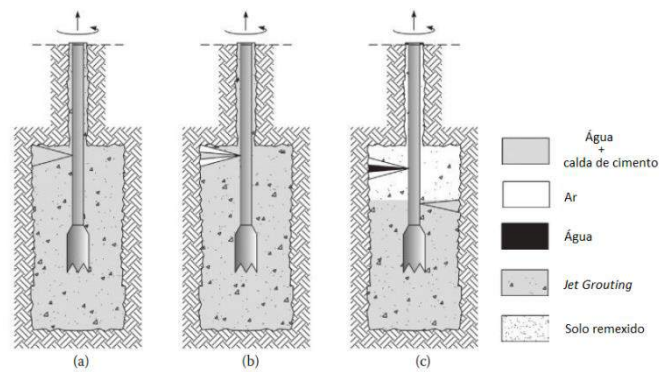


Figura 2.22: Sistemas típicos de *JG*: (a) monofluido, (b) bi-fluido e (c) tri-fluido (adaptada de Croce et al., (2014)).

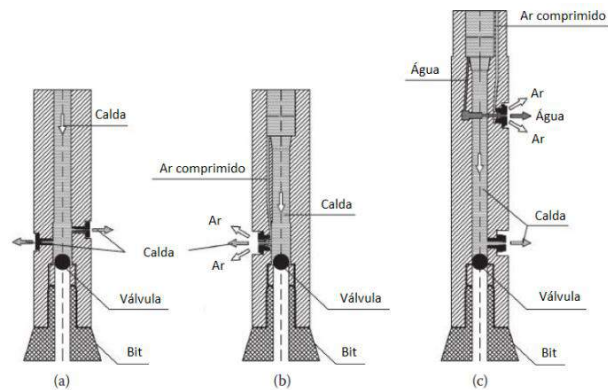


Figura 2.23: Desenho esquemático das varas: (a) monofluido, (b) bi-fluido e (c) tri-fluido (adaptada de Croce et al., (2014)).

#### 2.2.5.4 Sistema Superjet

Nos últimos anos, com o desenvolvimento tecnológico do *JG*, surgiram bombas mais potentes e circuitos de ligação mais eficientes, minimizando a turbulência e perdas de energia do jato de *JG*.

Introduziu-se, então, nos finais de 1980, o sistema *Superjet* resultando este de uma modificação do sistema bi-fluido. Tal modificação permite reduzir a dispersão da calda de cimento (30 MPa) e do ar comprimido (0,7 a 1,05 MPa), através de dois obturadores diferentes. A partir da leitura de um monitor de visualização a pressão de cada fluido é ajustada de modo a aumentar significativamente o poder de erosão, produzindo-se colunas de diâmetros até 2500 mm em qualquer tipo de solo (Shibazaki et al., (1996)). Este sistema é apropriado para o tratamento de grandes massas de solo (Croce et al., (2014)).

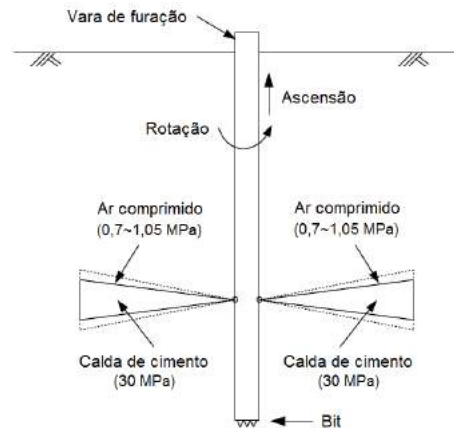


Figura 2.24: Desenho esquemático do sistema *Superjet* (adaptada de Wang et al., (2013)).

#### 2.2.5.5 Sistema Xjet

Adicionalmente aos sistemas descritos anteriormente existe um outro conceito, proposto no final de 1980, como um sistema inovador nos sistemas de *JG*. Este novo sistema de injeção designa-se por *Xjet*, também descrito na literatura da especialidade por *Cross-jet*, e consiste num par de jatos com água (40 MPa) e ar (0,6 a 1,05 MPa), que se interseçam a uma determinada distância da vara, como se ilustra na Figura 2.26, de modo a produzir diâmetros de 2000 mm a 2500 mm em qualquer tipo de solo (Shibazaki et al., 1996).

A calda de cimento é injetada abaixo dos obturadores que desagregam o solo e o misturam para criar um elemento solo-cimento de melhor qualidade. Quando comparado com outros sistemas convencionais, este conceito de injeção permite o controlo e ajuste do poder de erosão do jato, abrangendo um maior intervalo de tipos de solo a ser tratado bem como o seu diâmetro (Welsh and Burke, 1997). Segundo Essler and Yoshida (2004), este sistema permite tratar até 4 vezes mais volume de solo comparado com outros sistemas que utilizem o mesmo equipamento. O *Xjet* é aplicado com alguma frequência no tratamento de solos moles, por exemplo em argilas moles (Tinoco, J. A. B. (2012)).

O sistema *Xjet* tem ganho popularidade no Japão e na Europa devido às suas vantagens técnicas e económicas. De entre estas vantagens é de salientar que o *Xjet* permite produzir teoricamente elementos de melhor qualidade que os restantes sistemas, uma vez que o seu processo de injeção incide essencialmente na substituição do material *in situ*, ao invés da mistura deste com a calda de cimento. Além disso, este sistema apresenta ainda, vantagem relativamente ao refluxo. Segundo Tinoco, J. A. B. (2012) é estimado que o refluxo produzido pelo *Xjet* seja 25% inferior e 50% mais produtivo que os sistemas convencionais. No entanto, este sistema necessita de equipamentos mais sofisticados e de mão-de-obra mais especializada, recursos que nem sempre estão disponíveis.

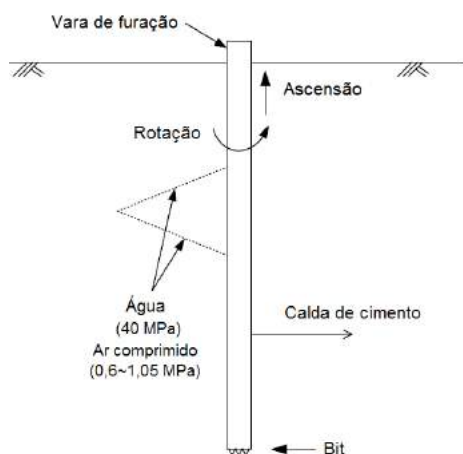


Figura 2.26: Desenho esquemático do sistema *Xjet* (adaptada de Wang et al., (2013)).



Figura 2.25: Sistema *Xjet* (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).

### 2.2.5.6 Síntese dos sistemas

Após a apresentação dos sistemas da técnica de *JG* existentes atualmente, sumariza-se neste subcapítulo as principais características de cada sistema, comparando-os quer quantitativamente, quer qualitativamente entre si.

Com o sistema de jato simples, ou sistema monofluido, obtêm-se colunas com diâmetros inferiores às resultantes dos outros sistemas de injeção. As colunas são caracterizadas por uma boa uniformidade e o seu diâmetro varia entre 300 e 1000 mm. Os sistemas bi-fluido e tri-fluido permitem obter colunas com um diâmetro maior, devido à utilização de ar comprimido no fluido desagregador, variando os diâmetros entre 600 e 1800 mm para o sistema bi-fluido e 800 a 1200 mm para as colunas realizadas com o sistema tri-fluido (Carreto, J. M. R. (1999)).

Relativamente à resistência do material, para a mesma quantidade de cimento adicionada por volume de solo tratado, o sistema monofluido permite obter resistências mais elevadas em solos arenosos. O sistema tri-fluido permite obter resistências mais elevadas em solos argilosos. As colunas executadas com o sistema bi-fluido apresentam normalmente as resistências mais baixas, em consequência da presença de ar no elemento solo-cimento formado (Carreto, J. M. R. (1999)).

Tabela 2.4: Análise comparativa entre os sistemas convencionais de *JG* (adaptada de Carreto, J. M. R. (1999)).

	Sistema monofluido	Sistema bi-fluido	Sistema tri-fluido
	Sistema mais simples de aplicar.	Complexidade de aplicação intermédia.	Aplicação mais complexa. Maior quantidade de equipamento. Equipamento mais sofisticado.
Aplicação	Desgaste do equipamento superior. As pressões a aplicar para obter uma coluna com o mesmo diâmetro são superiores às do JET2.	Menor desgaste do equipamento para o mesmo diâmetro de coluna.	—
	Tempo de execução do tratamento inferior ao do JET3.	Tempo de execução do tratamento inferior ao do JET3.	Tempo de execução do tratamento superior ao dos restantes sistemas.

	Sistema mais adequado para realização de colunas sub-horizontais.	A eficiência da envolvente de ar decresce significativamente à medida que o jato é levado da horizontal para a vertical.	A eficiência da envolvente de ar decresce significativamente à medida que o jato é levado da horizontal para a vertical.
	Consumo de cimento por volume de solo tratado superior ao do JET2 e do JET3.	Consumo de cimento por volume de solo tratado superior ao do JET3.	Menor consumo de cimento por volume de solo tratado relativamente aos restantes sistemas.
	Menor nível de ruído e vibração relativamente aos outros sistemas.	Maior nível de ruído relativamente ao JET1.	Maior nível de ruído quando comparado com o JET1.
	Sistema mais propenso à ocorrência de obstruções à saída do refluxo.	Situação intermédia.	Sistema menos propenso à ocorrência de obstruções à saída do refluxo.
	Diâmetros das colunas inferiores aos do JET2 e JET3 (0,30 a 1,20 m).	Diâmetros das colunas superiores aos do JET1 e inferiores aos do JET3 (0,60 a 2,0 m).	Diâmetro das colunas superior aos restantes sistemas (0,80 a 3,0 m).
Características do material tratado	A resistência de solos arenosos tratados com o JET1 é superior à resultante da aplicação dos sistemas JET2 e JET3, para a mesma quantidade de cimento injetada por unidade de volume de solo tratado.	Material pelo sistema de JET2 caracterizado por resistências inferiores às obtidas com os restantes sistemas, seja qual for o tipo de solo.	Material geralmente mais uniforme e com resistência superior à dos restantes sistemas, com exceção dos solos arenosos tratados pelo sistema JET1.
			Sistema mais efetivo no tratamento de solos argilosos.

JET1 – sistema monofluido; JET2 – sistema bi-fluido; JET3 – sistema tri-fluido

## 2.2.6 Seleção do sistema de *Jet Grouting*

Em métodos de tratamento de solos, como é o caso da técnica de *JG*, as propriedades mecânicas do solo natural são condicionantes nas características finais do solo tratado, quer em termos de comportamento mecânico, quer em relação aos possíveis diâmetros das colunas a serem executadas.

A seleção do sistema de injeção é um dos primeiros passos necessários para o dimensionamento da solução em *JG*. Como mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas do solo natural e a energia de corte associada a cada sistema de injeção são fatores decisivos na escolha do sistema a adotar para a solução em projeto. Outros aspetos como a economia e os requisitos de projeto também necessitam de ser equacionados (Tinoco, J. A. B. (2012)).

Na consulta da bibliografia da especialidade é indicado que o diâmetro do elemento coluna a executar é um dos parâmetros principais no controlo de qualidade dos trabalhos executados. Deste modo, a quantificação do diâmetro que se pode realizar é relevante para propósitos de economia da solução de tratamento (Tinoco, J. A. B. (2012)).

Expõem-se, seguidamente, diferentes ábacos empíricos que relacionam o diâmetro das colunas em função dos valores  $N_{SPT}$  para diferentes tipos de solo e de sistemas de *JG*, como se pode observar na Figura 2.28 e na Figura 2.27. Da sua observação conclui-se que o diâmetro das colunas é superior em solos granulares a solos argilosos para o mesmo valor de  $N_{SPT}$ .

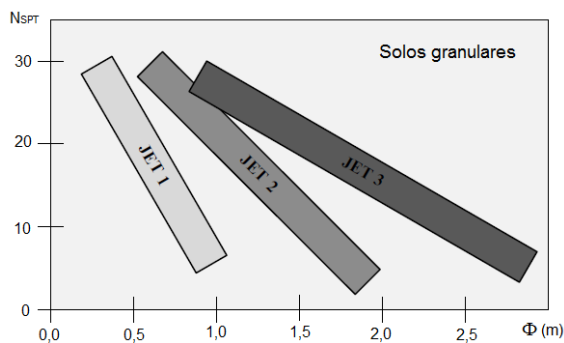


Figura 2.28: Relação para solos granulares entre o diâmetro de colunas e valores de  $N_{SPT}$  para os diferentes sistemas de injeção convencionais de *JG* (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).

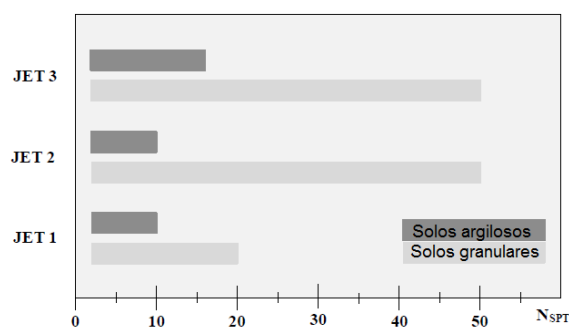


Figura 2.27: Aplicabilidade para solos argilosos e solos granulares dos sistemas de injeção convencionais de *JG* em função dos valores de  $N_{SPT}$  (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).

Existem outros fatores que devem ser tidos em conta na seleção do sistema de injeção a adotar. Preocupações com a possível obstrução do furo e, conseqüentemente, deslocamentos à superfície podem limitar a escolha ao sistema tri-fluido, em detrimento do sistema bi-fluido (mais propenso a obstruções).

Para as técnicas *Superjet* e *Xjet*, limitações relacionadas com a sofisticação do equipamento, com a experiência do projetista e a competência necessária da mão-de-obra podem não estar facilmente acessíveis e podem excluir a seleção destes dois sistemas.

### 2.2.7 Elementos em *Jet Grouting*

O sucesso do *JG* é em grande parte devido à sua vantagem de criar, a partir da superfície, elementos solocimento de várias geometrias e dimensões com melhores características mecânicas e de menor permeabilidade.

Por definição, um elemento de *JG* é um volume de solo tratado através da execução de furação e de um sistema de injeção adotado previamente. Os elementos mais comuns são: coluna – elemento cilíndrico; e em painel - elemento plano.

Formas mais complexas podem ser criadas limitando o ângulo, o sentido e a velocidade de rotação da vara e a disposição dos tubos de injeção. Contudo, como já mencionado, são os elementos cilíndricos os mais frequentemente adotados (Croce et al., (2014)). Exemplos destes elementos podem ser observados na Figura 2.29.

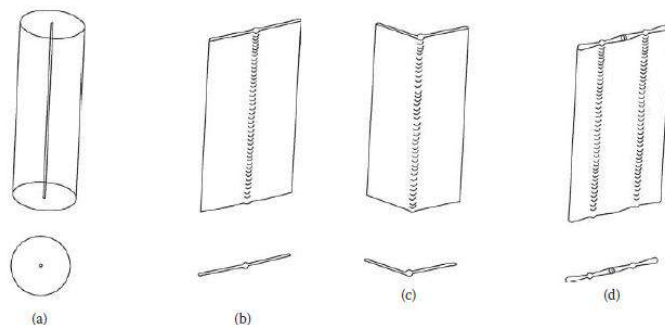


Figura 2.29: Elementos possíveis de executar: (a) coluna, (b) painel, (c) elemento em forma de V e (d) em forma de rebuçado (adaptada de Croce et al., (2014)).



## Estruturas em *Jet Grouting*

As estruturas em *JG* podem ser criadas através de diferentes alinhamentos dos elementos anteriormente apresentados. As estruturas mais comuns são:

- diafragmas – obtidos pela sobreposição dos elementos entre si;
- lajes – formadas horizontalmente com espessura pré-definida através da sobreposição dos elementos;
- blocos – estruturas tridimensionais formadas pela sobreposição de elementos.

### 2.2.7.1 *Sobreposição de colunas*

Várias aplicações em *JG* são obtidas através da sobreposição parcial de elementos. Existem duas seqüências que podem ser adotadas, designadas por “*fresh in fresh*” e “*fresh in hard*”, como se ilustra na Figura 2.30.

Na seqüência “*fresh in fresh*” as colunas adjacentes são criadas por tratamento contínuo em intervalos de tempo reduzidos, sem esperar pela presa da calda. Deste modo, as secções das colunas criadas são erodidas e injetadas novamente, repetindo-se todo o processo até que se obtenha um volume contínuo do elemento a formar. Especial cuidado é necessário para que na fase de furação e de injeção não se destruam os elementos (colunas por exemplo) já criados (Croce et al., (2014)).

Na seqüência “*fresh in hard*”, também conhecida por seqüência primária-secundária, uma nova coluna só é criada quando a coluna adjacente atingiu a resistência necessária para não ser erodida. Nesta seqüência é necessário elaborar um plano de execução mais detalhado, onde é definido, a localização das colunas primárias, secundárias e até por vezes terciárias e o seu intervalo de tempo. Esta seqüência é a mais popular, contudo coloca-se um problema, vulgarmente designado por “*shadow effect*”, em que as colunas previamente executadas não permitem que as novas colunas a serem formadas consigam erodir as anteriores. O resultado é a diminuição das secções das colunas secundárias e terciárias (Croce et al., (2014)).

Na Figura 2.31 e na Figura 2.32 ilustram-se exemplos de grupos de colunas formados com a seqüência “*fresh in hard*”.

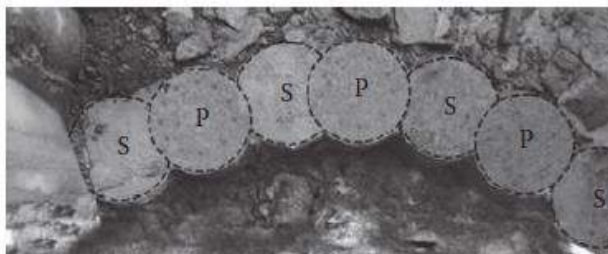


Figura 2.31: Fotografia do suporte de um túnel através de colunas de *JG*, pelo processo sequencial sendo (P) as colunas primárias e (S) as colunas secundárias (adaptada de Croce et al., (2014)).

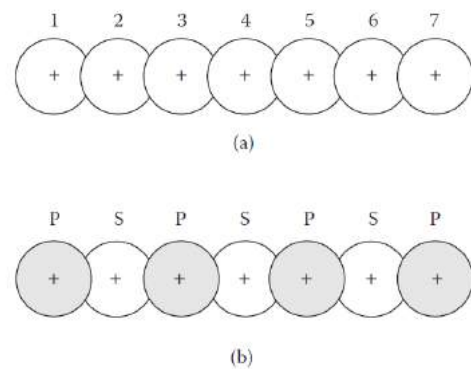


Figura 2.30: Sobreposição de colunas: (a) processo contínuo e (b) processo sequencial (adaptada de Croce et al., (2014)).

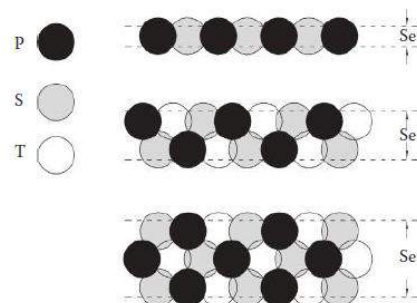


Figura 2.32: Exemplos de grupos de colunas de *JG* (adaptada de Croce et al., (2014)).

### 2.2.7.2 Reforço de colunas

Colunas isoladas e estruturas criadas pela sobreposição de elementos podem ser reforçadas através da introdução de perfis metálicos, varões em aço ou outro tipo de elementos que confirmam maior resistência à flexão e ao corte.

Na utilização de perfis metálicos para o reforço das colunas é frequente que a sua introdução se faça de dois modos. No primeiro modo, a calda de cimento ainda não ganhou presa, introduzindo simplesmente o perfil até à profundidade desejada. Contudo, este método só pode ser posto em prática para profundidades não muito elevadas, devido à impulsão que se gera da calda de cimento, que preenche a furo. No segundo modo, a calda de cimento já ganhou presa e é necessário realizar uma nova furação na coluna existente, para a introdução do perfil metálico. De seguida, para a selagem do furo é comum adotar-se um sistema de injeção de baixa pressão. Este modo de colocação não apresenta limitação de profundidade, contudo é mais complexo que o anterior (Croce et al., (2014)).

Outros tipos de elementos, como por exemplo, a fibra de vidro ou outro de matriz polimérica, são frequentemente adotados no reforço de colunas de *JG*. É no reforço de túneis que este tipo de fibras se emprega, muito devido ao seu baixo peso, tornando a sua deslocação em obra mais fácil, por ter uma resistência de tração elevada, na ordem dos 600 MPa para tubos e 1000 MPa para varões.

### 2.2.8 Campos de aplicação

A técnica de *JG* é muito diversa, podendo ser aplicada a um intervalo bastante amplo de tipos de solo e de condições existentes. Estas práticas construtivas podem ser utilizadas em novas soluções e no reforço de estruturas pré-existentes. Algumas das possíveis aplicações da técnica em estruturas, são ilustradas na Figura 2.33 e apresentam-se de seguida:

- fundações;
- estruturas de suporte;
- cortinas impermeabilizantes;
- túneis.

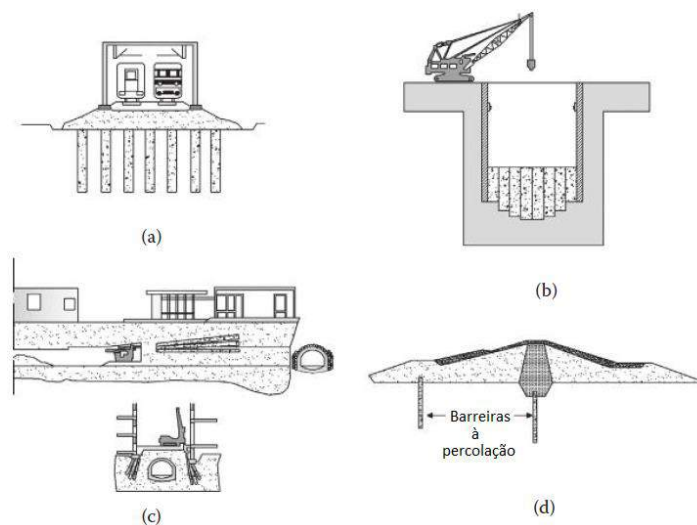


Figura 2.33: Aplicações da técnica de *JG*: (a) fundação de aterros, (b) suporte de escavação e tampão à percolação, (c) suporte provisório na execução de túneis e (d) barreiras de percolação “*cut-off*” (adaptada de Croce et al., (2014)).

Sendo o presente trabalho o estudo do comportamento da ensecadeira executada para a construção do DCC da barragem da Caniçada, expõe-se resumidamente as potencialidades da técnica de *JG* na criação de barreiras de percolação, quer sejam provisórias ou permanentes.

As barreiras de percolação com carácter permanente são adotadas na redução do caudal percolado sobre estruturas hidráulicas, como por exemplo: em barragens, no confinamento de lixiviantes ou de poluentes existentes no subsolo. Barreiras com carácter temporário, temos como exemplo a realização de escavações com nível freático elevado. A execução da barreira de percolação permite o decurso dos trabalhos em condições de segurança e com reduzida necessidade de sistemas de bombagem.

A escolha do tipo de alinhamento (ver Figura 2.34), mais apropriado para cada caso, passa pelo conhecimento e o “à-vontade” do projetista no processo de execução do tratamento e pelas necessidades particulares da obra. Na bibliografia da especialidade, é indicado que o uso de painéis não é o mais comum, salvo casos particulares. Os elementos cilíndricos (colunas) são a solução mais popular e o seu espaçamento é o mais reduzido possível desde que se garanta a sua continuidade. Especial cuidado é necessário na escolha do tipo de sequência, “*fresh in fresh*” ou “*fresh in hard*” e o correto controlo da sua execução (Croce et al., (2014)).

As barreiras de percolação em *JG* têm sido usadas em barragens de aterro, barragens de gravidade e na criação de ensecadeiras. Em alguns casos, a criação destas barreiras é feita no início dos trabalhos, antes da construção da barragem e dos seus órgãos hidráulicos. Noutros casos, os tratamentos são feitos em barragens já existentes, com o objetivo de melhorar a eficiência dos sistemas de retenção já existentes.

Algumas secções transversais de barragens de aterro são apresentadas na Figura 2.35.

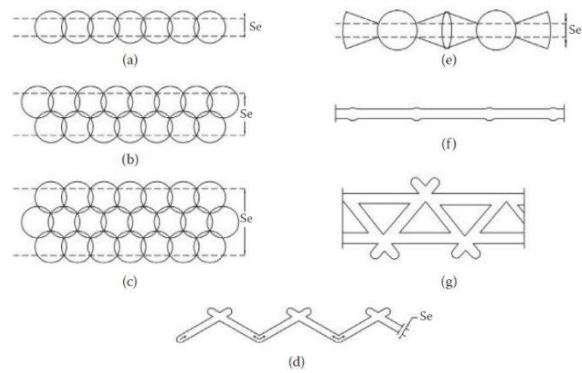


Figura 2.34: Alinhamentos tipo de barreiras de controlo de percolação “cut-off” com recurso a *JG* (adaptada de Croce et al., (2014)).

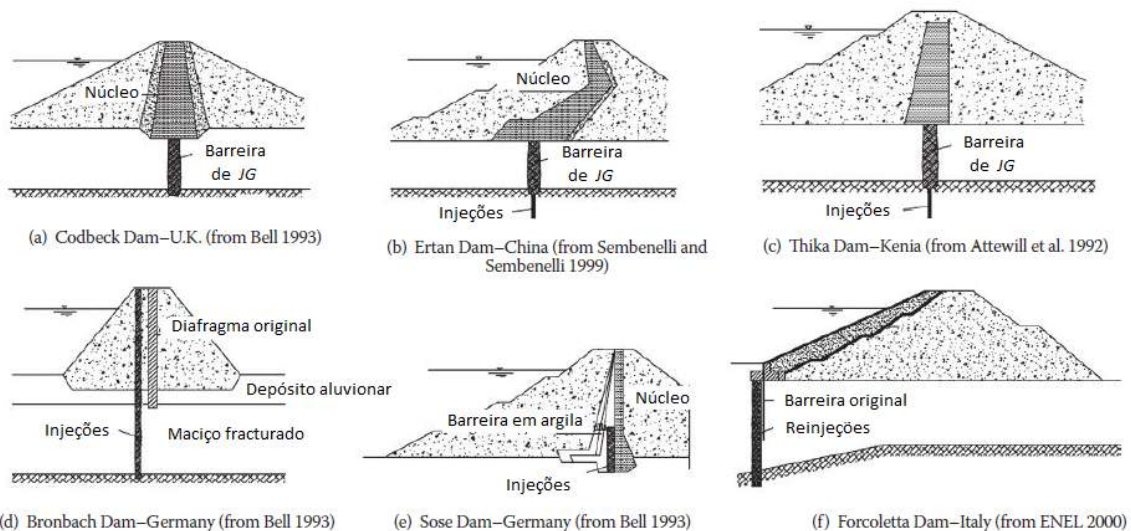


Figura 2.35: Secções transversais de barreiras de controlo de percolação “cut-off” de barragens de aterro (adaptada de Croce et al., (2014)).

O *JG* pode ser usado também na reparação de juntas ou segmentos defeituosos. Exemplos são ilustrados na Figura 2.36.

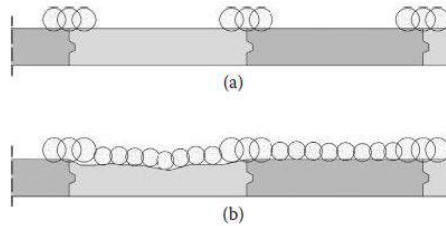


Figura 2.36: Exemplos de soluções de *JG* na selagem de paredes moldadas: (a) reparação de juntas e (b) reparação de segmentos defeituosos (adaptada de Croce et al., (2014)).

Lajes executadas com recurso a *JG* são usadas para reduzir a percolação de água no interior da escavação, quando o nível freático se encontra elevado. Neste tipo de aplicação, a furação é feita a partir da superfície até à profundidade desejada e a injeção é realizada do fim do furo até que se forme a espessura estabelecida em projeto da laje de fundo.

O dimensionamento da laje de fundo, também designada por laje tampão, tem de resistir ao impulso hidrostático que se gera pelas diferentes cargas hidráulicas existentes, do lado de fora e do lado de dentro da escavação.

A secção retangular é a mais simples de executar, tendo esta uma massa suficientemente elevada para resistir ao impulso hidrostático. Em alternativa, a laje pode ter a forma de um arco invertido para suportar o impulso que se gera, descarregando as cargas para as paredes de contenção. Se o impulso gerado for muito elevado, poderá haver a necessidade de reforçar a laje de fundo com recurso a microestacas (Croce et al., (2014)), como se pode observar na Figura 2.37.

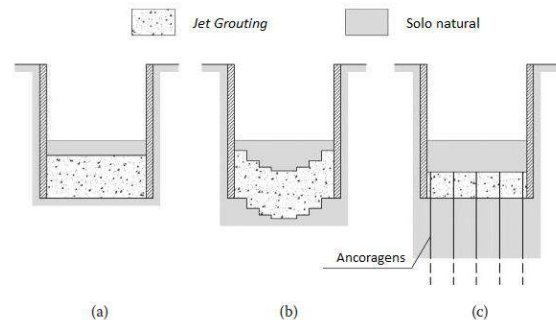


Figura 2.37: Esquemas de soluções tampão: (a) laje retangular, (b) laje em arco invertido e (c) laje ancorada (adaptada de Croce et al., (2014)).

Em qualquer dos casos é fundamental que no plano de tratamento da laje de fundo a continuidade da mesma seja assegurada. Os defeitos que podem ocorrer são em geral resultado de:

- insuficiente sobreposição dos elementos individuais;
- condições geológicas muito heterogêneas;
- execução deficiente devido à existência de obstáculos naturais ou de estruturas enterradas desconhecidas.

## 2.2.9 Controlo de qualidade

Várias etapas são necessárias para o dimensionamento de soluções de *JG*. O sistema de injeção é um dos primeiros parâmetros a ser escolhido, seguido pela definição de todos os parâmetros relacionados com o processo de *JG* (pressões, velocidades, caudais, entre outros), bem como a definição das propriedades da calda

de cimento (relação água/cimento, tipo de cimento, entre outros). Adicionalmente, é muito importante fazer um levantamento geológico-geotécnico do solo existente, de modo a caracterizar corretamente o mesmo. Estes aspetos evidenciam a complexidade por detrás do dimensionamento de soluções em *JG*, envolvendo vários parâmetros.

É de salientar que o solo é um material muito heterogéneo, aumentando a complexidade da correta escolha dos parâmetros para a solução em *JG*. Outro aspeto relevante é o facto de que as atuais formas de dimensionamento têm limitações de aplicabilidade, sendo por isso fundamental proceder a um rigoroso controlo de qualidade durante todo o processo. As várias etapas necessárias à técnica de *JG* para o cumprimento dos requisitos em projeto, segundo Tinoco, J. A. B. (2012), são sintetizados na Figura 2.38.

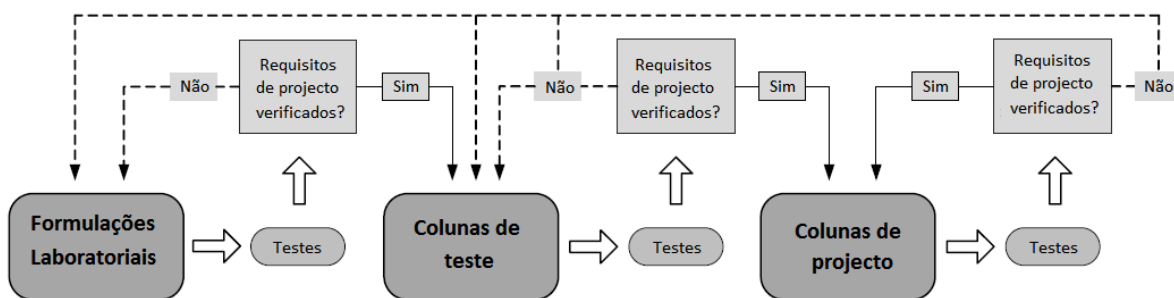


Figura 2.38: Procedimentos de controlo de qualidade em *JG* (adaptada de Tinoco, J. A. B. (2012)).

O processo começa com a formulação laboratorial dos mesmos materiais que serão empregados no tratamento (o mesmo solo, água e cimento). Estas formulações permitem ao projetista definir alguns parâmetros relacionados, como a relação água/cimento da calda ou o tipo de betão mais apropriado. Adicionalmente, é determinado se a água existente nas imediações do local de tratamento pode ou não ser usada na formulação da calda. Estas formulações servem para dar uma ideia das propriedades mecânicas do elemento solo-cimento que irá ser produzido.

O próximo passo é a execução de colunas teste em local representativo, normalmente próximo do local onde a solução será implementada. As colunas teste são produzidas com os “mesmos” parâmetros das colunas da solução (i.e tipo de cimento, água, pressão de injeção, velocidade de rotação e de ascensão da vara, entre outros). Baseado nos resultados obtidos das amostras recolhidas das colunas teste, normalmente medidas em termos de resistência e de deformabilidade, é decidido se ajustes são ou não necessários aos parâmetros definidos inicialmente. O diâmetro obtido na realização das colunas teste suporta a decisão dos parâmetros formulados inicialmente se ajustam ou não às necessidades específicas do projeto. Deste modo o diâmetro da coluna de teste é um fator chave no controlo de qualidade do *JG*, onde é dada a indicação se o processo de definição dos parâmetros é o adequado ou não. É expectável que as colunas teste tenham as propriedades mecânicas e diâmetro que as colunas da solução a executar, cumprindo os requisitos de projeto (Tinoco, J. A. B. (2012)).

Durante estes trabalhos são extraídas periodicamente amostras para aferir se em termos de resistência e de deformabilidade cumprem os requisitos e eventualmente proceder a ajustes dos parâmetros de *JG*. Adicionalmente à recolha de carotes com diferentes idades, procede-se à recolha de amostras “frescas” imediatamente após a execução das colunas, que são armazenadas em ambiente controlado e ensaiadas a diferentes dias de cura. Nesta situação de análise, o diâmetro das colunas de projeto não é aferido, uma vez que se espera que este seja o mesmo obtido na execução das colunas teste.



Estes pressupostos são suportados pela ideia de que para as mesmas condições (i.e solo e parâmetros de *JG*), os resultados serão sempre alcançados e estão contemplados no Eurocódigo 7 (EC 7) (CEN, 2004b).

Adicionalmente às etapas anteriores, durante o processo de *JG* alguns procedimentos são seguidos de modo a garantir que os trabalhos estão a decorrer conforme as especificações de projeto. Por exemplo, o diâmetro dos bicos de injeção é inspecionado antes da realização e durante o tratamento, uma vez que este elemento é preponderante na influência da energia do jato do sistema, e conseqüentemente no diâmetro da coluna a formar. O peso volúmico e a viscosidade da calda de cimento são periodicamente verificados e ajustados, se necessário. Acrescenta-se a contínua observação do refluxo proveniente do processo, analisando-se o seu aspeto e o caudal injetado, para detetar a formação de obstruções e de pressões excessivas no solo que possam provocar deslocamentos indesejados à superfície (Tinoco, J. A. B. (2012)),

Outro aspeto também importante é a tolerância da furação, particularmente quando a sobreposição de colunas é crucial, como em soluções em que de controlo da permeabilidade é fulcral (ensacadeiras, lajes de fundo tampão, túneis, entre outras). Nestas situações, a omissão ou deficiente sobreposição das colunas pode comprometer seriamente a eficácia do tratamento ou a segurança dos trabalhos que irão decorrer. Por estas razões a posição e o diâmetro definidos em projeto devem ser controlados rigorosamente (Tinoco, J. A. B. (2012)),

Todos os procedimentos e aspetos anteriormente descritos são muito importantes para garantir que os resultados expectáveis (o diâmetro, as propriedades físicas e mecânicas das colunas) em projeto sejam alcançados. Contudo, é fundamental também definir corretamente todos os parâmetros de *JG*, de acordo com o sistema de injeção escolhido e as propriedades do solo *in situ*, de modo a que mais uma vez sejam alcançados os requisitos definidos em projeto. Outro aspeto crucial na técnica de *JG* é a compreensão e domínio que a possível alteração de um parâmetro pode ter na correção de resultados indesejados, contudo pouca informação sobre o assunto está disponível (Tinoco, J. A. B. (2012)),

O atual estado de conhecimento da técnica de *JG* define que a eficiência e eficácia da mesma está dependente de todos os parâmetros inumerados anteriormente. Da consulta da bibliografia da especialidade observa-se que os parâmetros apresentam relações complexas entre si, contribuindo para o desenvolvimento e adoção de modelos analíticos para o dimensionamento de soluções em *JG*. Até ao presente, poucas são as expressões matemáticas suportadas por análises estatísticas tradicionais e por trabalhos de *JG* realizados nas últimas décadas de existência da técnica. Deste modo, as mesmas são muito limitadas às condições em que foram desenvolvidas (Tinoco, J. A. B. (2012)).

O dimensionamento de *JG* é essencialmente suportado pelo “*know-how*” de cada empresa, desenvolvendo as mesmas as suas próprias tabelas de parâmetros a adotar em projeto. Estas tabelas correlacionam de uma forma direta, os resultados que são expectáveis de serem atingidos (frequentemente pelo diâmetro do elemento) e os parâmetros de *JG* definidos inicialmente em fase de projeto. A consulta destas tabelas é prática e simples, contudo, são muito conservativas, comprometendo em determinadas situações a economia do tratamento a realizar. Outro aspeto a referir da consulta da bibliografia da especialidade é a inexistente explicação da influência de cada parâmetro na mistura final.

### 2.2.10 Vantagens e desvantagens do *Jet Grouting*

A técnica de *JG* apresenta diversas vantagens quando comparada com outras técnicas de tratamento de solos. As suas principais vantagens são (Carreto, J. M. R. (2000); Croce et al., (2014) e Xanthakos et al., (1994)):

- a possibilidade de executar elementos de diversas geometrias e dimensões;

- a extensa gama de solos a que a técnica pode ser aplicada, desde as argilas até aos cascalhos, permite ainda também o tratamento de blocos (ver Figura 2.39);
- a técnica permite o tratamento de um estrato em particular, em oposição a outras técnicas;
- o tratamento do solo pode ser realizado abaixo do nível freático;
- a permeabilidade do solo *in situ* não condiciona a execução do tratamento;
- a possibilidade de tratar solos muito heterogêneos, através da adoção de diferentes parâmetros de execução a cada estrato correspondente;
- a incorporação de elementos de *JG* (maior rigidez) aumenta o confinamento lateral do solo circundante;
- o equipamento utilizado é de dimensões reduzidas e permite a execução dos trabalhos em sítios de acesso e de permanência condicionados;
- a aplicação da técnica não produz vibrações nem ruídos.

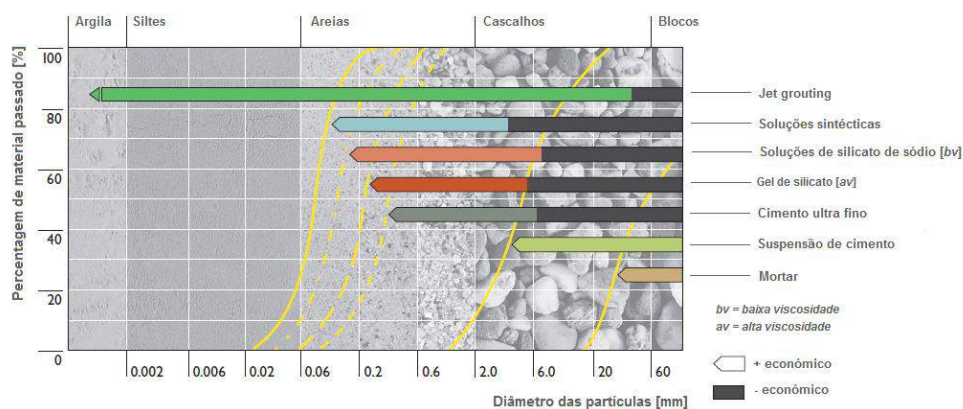


Figura 2.39: Diferentes métodos de tratamento do solo e a sua comparação económica em função da sua granulometria (adaptada de Keller Holding GmbH, (2011)).

Entre as desvantagens que a técnica de *JG* tem, destacam-se as seguintes (Carreto, J. M. R. (2000), Croce et al., (2014) e Xanthakos et al., (1994)):

- resistência máxima dos elementos produzidos que só é obtida após vários dias de execução, podendo ser uma condicionante para alguns campos de aplicação;
- dispersão elevada das características mecânicas finais dos elementos, em particular da resistência à compressão, quando comparado por exemplo com o betão;
- dificuldade de remoção e manejo do material rejeitado (refluxo);
- necessidade de controlo do refluxo de calda que sai da furação;
- espaçamento insuficiente entre o furo e a vara, que pode originar a obstrução do refluxo de calda e induzir movimentos indesejados à superfície do terreno;
- mão-de-obra sofisticada, equipamentos e equipas de projeto especializadas, exigências que podem não estar disponíveis localmente;
- dependência da qualidade dos elementos produzidos da competência e supervisão da mão-de-obra ao longo de todo o processo e do método construtivo adotado;
- custos significativos com a colocação do equipamento e a sua desmobilização que tornam esta técnica dispendiosa; contudo estes custos podem ser compensados com o aumento da frente de trabalho e com a dimensão do projeto;
- velocidades de percolação elevadas, que podem resultar na remoção local da calda de cimento, antes de esta ganhar presa, resultando elementos de fraca qualidade.





### 3 Caso de estudo – barragem da Caniçada

#### 3.1 Introdução

O aproveitamento hidroelétrico da barragem da Caniçada situa-se na bacia hidrográfica do rio Cávado no troço da confluência com os rios Caldo e Gerês, no Norte de Portugal Continental, estando parcialmente inserido na área do Parque Nacional da Peneda-Gerês (ver Figura 3.1). O rio Cávado tem nascente na Serra do Larouco e foz em Esposende, com um percurso total de 129 km (Instituto Nacional de Estatística, I.P. (2014)).

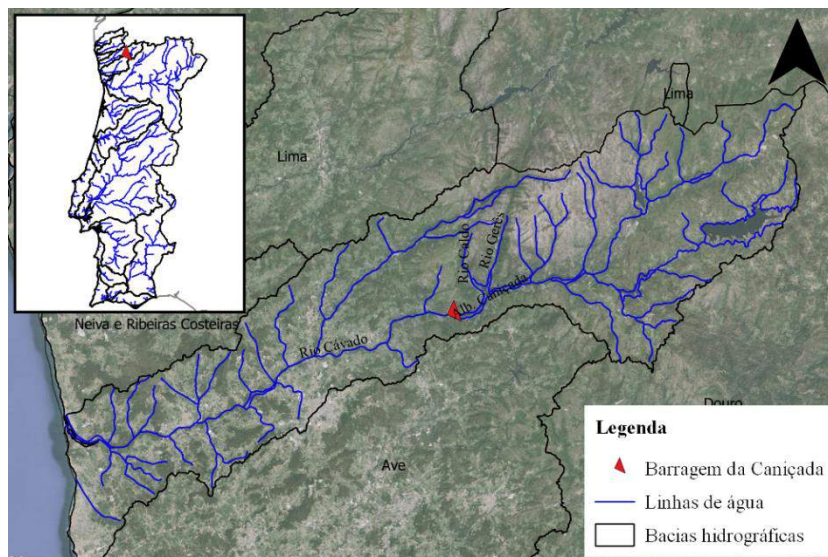


Figura 3.1: Localização geográfica da barragem da Caniçada.

A barragem localiza-se na freguesia de Valdozende, concelho de Terras de Bouro, distrito de Braga, no ponto de coordenadas geográficas  $41^{\circ} 39' 8''$  (N) e  $8^{\circ} 14' 5''$  (W). Terras de Bouro é uma vila portuguesa no distrito de Braga, região Norte e sub-região do Cávado. É sede de município com 277,46 km<sup>2</sup> de área e 6857 habitantes (2013), subdividido em 14 freguesias. O município é limitado a Norte pelo município de Ponte de Barca e por Espanha, a Este por Montalegre, a Sul por Vieira do Minho, a Sudoeste por Amares e a Oeste por Vila Verde (Instituto Nacional de Estatística, I.P. (2014)).

A exploração iniciou-se em 1955 e a função principal da sua construção é a produção de energia elétrica, tendo hoje outras utilizações secundárias, nomeadamente, abastecimento público e rega. Este aproveitamento, composto por duas turbinas Francis com 62 MW de potência total instalada, com queda bruta máxima de 121 m, é constituído por uma barragem de betão, do tipo abóbada delgada, por um circuito hidráulico, por uma central subterrânea em caverna, com dois grupos geradores, um edifício de comando e de descarga, que comunica com a central por um poço vertical, e por uma subestação contígua ao edifício de comando. Os caudais turbinados e os caudais descarregados são restituídos ao rio Cávado, a jusante da barragem, os primeiros a cerca de 7 km da barragem, e os segundos junto desta (EDP (2013)).

A barragem da Caniçada é classificada como Classe I (residentes em número igual ou superior a 25 habitantes) em função dos danos potenciais associados à onda de inundação no vale a jusante (Regulamento de Segurança de Barragens - Diário da República, 1.ª série – N.º 198 – 15 de Outubro de 2007 - Anexo). Esta tem 76 m de altura, 246 m de desenvolvimento de coroamento que liga as duas margens, e está dotada de um descarregador de cheias de superfície, com quatro vãos. A albufeira criada pela barragem inunda uma área de 578 ha, ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA) e tem uma capacidade útil de 153 hm<sup>3</sup> e 176 hm<sup>3</sup> de

capacidade total de armazenamento. A albufeira abrange os concelhos de Amares, Póvoa de Lanhoso, Terras de Bouro e Vieira do Minho (EDP (2013)).

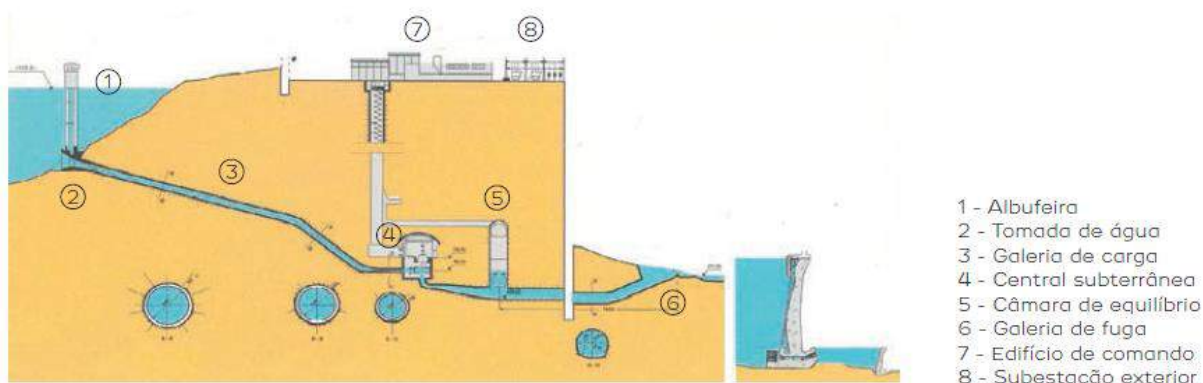


Figura 3.2: Esquema ilustrativo do circuito hidráulico (à esquerda) e secção transversal tipo (à direita) do Aproveitamento Hidroelétrico da Caniçada (adaptada de EDP (2013)).

Os órgãos de segurança da barragem da Caniçada incluem um descarregador de cheias em superfície com quatro vãos, dotado de uma capacidade máxima de vazão de  $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$  ao Nível Máximo de Cheia atual ( $\text{NMC}_{\text{act}}$ ) de cota igual a  $153,00 \text{ m}$  e por um descarregador de fundo, capaz de descarregar um caudal máximo de cerca de  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  (EDP (2012)).



Figura 3.3: Pormenor do descarregador de cheias, constituído por quatro vãos, da barragem da Caniçada.



Figura 3.4: Pormenor da descarga de fundo da barragem da Caniçada.

A central subterrânea da barragem situa-se junto ao seu paredão, na margem direita do rio Cávado, também na freguesia de Valdozende. Para além do poço vertical existe também uma rampa de acesso, utilizada essencialmente durante a construção e como recurso em eventuais situações de emergência (EDP (2013)).

A produtividade média anual do aproveitamento da Caniçada é de  $345 \text{ GWh/ano}$ .

A avaliação da segurança estrutural da barragem da Caniçada é efetuada com base em 2600 grandezas físicas (nomeadamente deslocamentos, extensões, temperaturas, caudais e subpressões), obtidas anualmente. Dispõe também de um sistema de recolha automática de dados, que permite o acesso a um conjunto restrito de aparelhos de observação, relevantes para o conhecimento imediato do seu comportamento.

A formulação do novo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 344/2007 de 15 de Outubro e aplica-se a:

- todas as barragens de altura igual ou superior a 15 m;
- barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm<sup>3</sup>;
- barragens de altura inferior a 15 m que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 100.000 m<sup>3</sup>;
- outras barragens que, em resultado da aprovação de projetos ou de estudos de avaliação de segurança, sejam incluídas.

Da revisão do RSB, surgiu a necessidade por parte da EDP Produção de elaborar estudos com o objetivo de verificar o cumprimento dos diversos critérios presentes no documento, entre eles o cumprimento dos critérios de projeto dos órgãos de segurança da barragem. Após o término dos estudos, concluiu-se que a capacidade de descarga do descarregador de cheias existente não era satisfatório para a garantia da não excedência do  $NMC_{act}$ , e que o descarregador de fundo não cumpria a sua função corretamente (EDP (2012)). Deste modo, surgiu a necessidade da construção de um novo Descarregador de Cheias Complementar (DCC).

A empreitada com esse fim situou-se maioritariamente na margem esquerda do Rio Cávado. O DCC (ver Figura 3.6) é constituído por uma solução em túnel escavado na encosta da margem esquerda, com capacidade máxima de vazão de 2062 m<sup>3</sup>/s, sob o  $NMC_{act}$  à cota 152,83 m (EDP (2012)).



Figura 3.6: Planta do DCC da barragem da Caniçada (adaptada de Gomes, C. E. S. (2013)).



Figura 3.5: Modelo reduzido do DCC (adaptada de Gomes, C. E. S. (2013)).

Os trabalhos necessários à implantação do descarregador complementar corresponderam a (EDP (2012)):

- uma soleira WES equipada com duas comportas de superfície, implantada na margem esquerda, a montante da zona do encontro da barragem;
- um túnel de geometria variável, localizado sob o encontro esquerdo da barragem, com cerca de 200 m de extensão;
- uma estrutura terminal em trampolim.

Na Figura 3.5 ilustra-se o modelo reduzido do DCC realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e na Figura 3.7 ilustra-se o seu aspeto final.





Figura 3.7: Modelo tridimensional do Descarregador de Cheias Complementar da barragem da Caniçada: em cima tomada de água; em baixo restituição (adaptada de EDP (2015)).

Na Figura 3.8 é possível visualizar o local e a extensão da solução adotada para a implantação da ensecadeira. Esta estrutura provisória tinha como função principal garantir a execução dos trabalhos de escavação futuros, para a construção de uma tomada de água, em túnel, em segurança e em economia, de modo a aumentar a capacidade de descarga de cheias da barragem da Caniçada.



Figura 3.8: Fotografia aérea do local de implantação da solução adotada (adaptada de <http://terrasbouro.blogspot.pt/2012/10/barragem-da-canicada.html> - 13:06 dia 05/12/2014).

### 3.2 Elementos de base

Os elementos de base principais que suportaram a elaboração deste trabalho indicam-se a seguir:

- Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa - Revisão “A” elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., em Agosto de 2014;

- Projecto de Execução. Cálculos Justificativos - Revisão “B” elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., em Setembro de 2014;
- Projecto de Execução. Memória Descritiva- Revisão “C” elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., em Março de 2015;
- Nota Técnica Justificativa N<sup>o</sup>6 - Revisão “E” elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., em Março de 2016;
- Peças escritas do Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto. Memória Descritiva elaborado pela empresa EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A., em Abril de 2012;
- Conjunto de peças desenhadas do Projecto de Execução cedidos pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., em Setembro de 2014;
- Registos do Plano de Monitorização cedidos pela empresa Mota-Engil, em Agosto de 2015;
- Registos do Plano de Monitorização cedidos pela empresa Mota-Engil, em Janeiro de 2016.

### 3.3 Condicionamentos

#### 3.3.1 Cenário geológico-geotécnico

Da consulta da notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, da Folha 5-B (Ponte de Barca), ilustrada o seu extrato na Figura 3.9, a área de implantação da ensecadeira para a construção do DDC da barragem da Caniçada localiza-se na zona Centro Ibérica Portuguesa, caracterizando-se pela predominância de rochas graníticas de idade Hercínica. No Anexo I (Desenho N<sup>o</sup>1) ilustra-se o zonamento geológico-geotécnico da zona envolvente à barragem da Caniçada.

Trata-se de um granito porfiroide, calco-alcálico, monzonítico, de duas micas mas predominantemente biotítico. Este apresenta feldspatos de cor branca ou cinzenta com secções que podem atingir 7x5cm<sup>2</sup>. Podem também apresentar na sua constituição encraves microgranulares de composição diorítica ou tonalítica.

Da análise dos elementos disponibilizados, relativos à prospeção e ensaios realizados contidos no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto. Memória Descritiva (EDP, (2012)), verifica-se que os terrenos existentes na fundação da ensecadeira do DCC da barragem da Caniçada possuem características geológico-geotécnicas complexas. O maciço apresenta, em geral, características geomecânicas heterogéneas e permeabilidade média (1x10<sup>-5</sup> a 1x10<sup>-6</sup> m/s).

Na campanha de prospeção para a construção do DCC, foram executadas sete sondagens, designadas de S1 a S7, sendo que apenas as sondagens S4, S5 e S6 estão localizadas na zona da ensecadeira. Na campanha adicional de prospeção realizada pela empresa Tecnasol para a empreitada de construção da ensecadeira, foram realizadas mais onze sondagens, designadas de S8 a S18, como se pode consultar no Anexo IV (Desenho N<sup>o</sup>4), porém, não se dispõe da sua informação como elemento de base à realização deste trabalho.

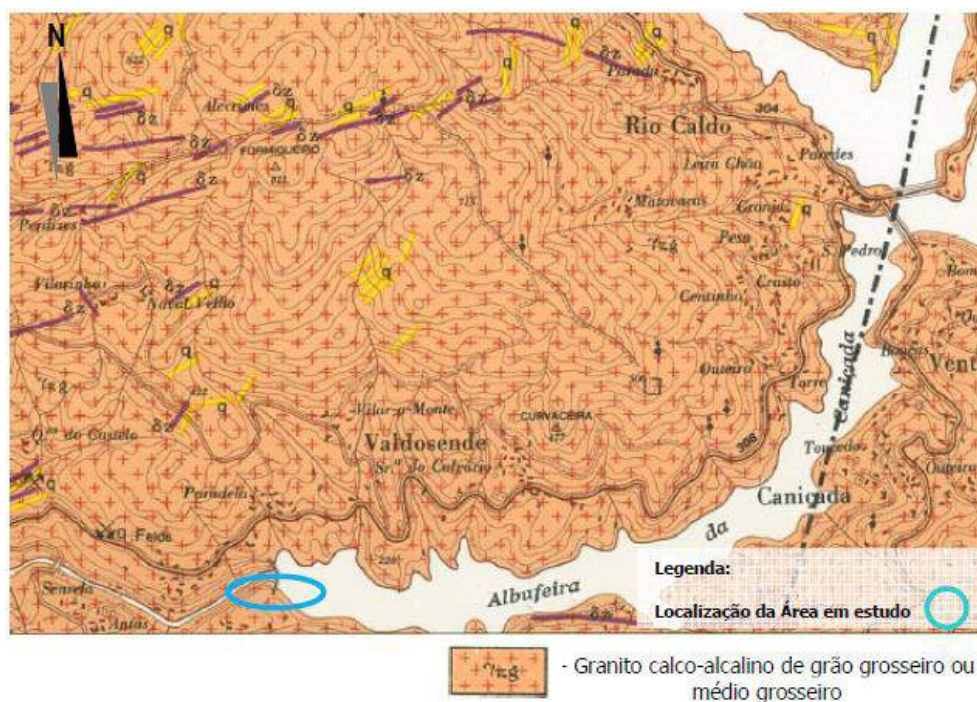
De acordo com a informação contida no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto. Memória Descritiva (EDP (2012)) consta que os terrenos à superfície são constituídos por areias de praia fluvial, com espessuras na ordem dos 3 a 5 m, e depósitos de material lançado, com espessuras de cerca de 6,5 m, constituídos por elementos de natureza granítica de dimensão seixo, calhau e bloco ( $D_{máx.} = 70$  cm), envoltos por matriz areno-argilosa. Subjacentemente, ocorrem os solos residuais/macício granítico decomposto, recuperados como areias de grão grosseiro a médio, por vezes com fragmentos de granito, menos alterado e disperso.

O maciço rochoso de melhores características foi identificado apenas na zona do encontro direito da ensecadeira, subjacentemente aos solos residuais/macício decomposto, podendo-se consultar o Anexo V

(Desenho N<sup>o</sup>5), onde se ilustra em pormenor a planta da ensecadeira executada e o seu zonamento geológico-geotécnico circundante.

Os ensaios de prospeção inicial realizados pela empresa Geoplano permitiram a determinação do peso volúmico, absorção de água e porosidade do material da amostra e ensaios de resistência à compressão uniaxial (RCU), com medição de tensão de rotura e módulo de deformabilidade e de resistência à tração indireta.

Com base na análise dos resultados obtidos na campanha de prospeção geológica-geotécnica, assim como nos ensaios realizados, contidos no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto. Memória Descritiva (EDP, (2012)) e da consulta do documento Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa - Revisão “A” (Pinto et al., (2014)), foram definidas quatro zonas geotécnicas, designadas de ZG4 a ZG1, que se descrevem de seguida.



#### Zona Geotécnica 4 (ZG4)

Esta zona geotécnica superficial é a que apresenta piores características. Os terrenos à superfície são constituídos por zonas de areias de praia fluvial e por zonas de depósitos de material lançado, materializados por uma mistura de solos residuais graníticos e blocos rochosos. Trata-se de materiais com origens distintas, mas cujas características geotécnicas são semelhantes, motivo pelo qual foram integradas na mesma zona geotécnica – ZG4 (A e B, respetivamente). A zona ZG4 é caracterizada por valores de  $N_{SPT}$ , em geral, inferiores a 5 pancadas, estimando-se permeabilidades médias a elevadas.

### **Zona Geotécnica 3 (ZG3)**

A zona geotécnica ZG3, ocorre subjacentemente à ZG4, e é constituída por solos residuais/maciço granítico decomposto, com intercalações de blocos rochosos de dimensões e características geomecânicas variáveis e com localização e continuidade de difícil previsão.

É caracterizada por valores de  $N_{SPT}$  médios, entre 10 e 60 pancadas e valores de percentagem de recuperação (%REC) entre 15 e 50%. Os blocos rochosos, identificados nesta zona geotécnica, apresentam-se medianamente a muito alterados (W3 a W4) e fraturados a muito fraturados (F3 a F4-5), com %REC entre 25 e 50% e *Rock Quality Designation* (RQD) entre 50 e 75%.

Nesta zona foram efetuados ensaios de permeabilidade *in situ* do tipo *Lefranc*, para determinação do coeficiente de permeabilidade destes materiais, sendo que de 50 ensaios efetuados, apenas 21 tiveram expressividade para a caracterização do maciço.

As dificuldades de execução dos ensaios nestes materiais estão associadas à sua natureza arenosa, de grão médio a grosseiro e elevada permeabilidade. Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade *in situ* permitem concluir que a zona ZG3 se caracteriza por permeabilidades médias, na ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  m/s.

Nos ensaios triaxiais realizados sobre as amostras indeformadas, recolhidas destes materiais, foram efetuadas as medições dos coeficientes de permeabilidade, tendo sido obtidos valores na ordem de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  m/s.

### **Zona Geotécnica 2 (ZG2)**

O maciço rochoso de melhores características foi identificado na zona do encontro direito da ensecadeira, subjacente à zona geotécnica ZG3.

O maciço rochoso apresenta-se, em geral, moderadamente a muito alterado (W3 a W4) e moderadamente a muito fraturado (F2-3 e F3-4), com %REC entre 50 e 100%, valores de RQD entre 50 e 75%, valores de RCU atribuíveis à classe R3 (valores máximos na ordem de 50 MPa) e *Rock Mass Rating* (RMR) atribuíveis à classe III (41-60).

Os ensaios de absorção de água realizados revelam um maciço muito permeável, com valores de perda total.

### **Zona Geotécnica 1 (ZG1)**

Abaixo dos 28 m a qualidade geomecânica do maciço melhora consideravelmente. O maciço apresenta-se pouco a medianamente alterado (W1-2 a W2-3) e pouco a medianamente fraturado (F2-3) com %REC entre 90 a 100%, RCU atribuíveis às classes R2 e R3 e RMR às classes II e III. Trata-se de um maciço permeável, dados os valores de perda total, obtidos nos ensaios de absorção do tipo *Lugeon*.

No Anexo VI (Desenho N°6) apresentam-se o zonamento geológico-geotécnico pelo eixo da ensecadeira e a cortina de impermeabilização com recurso a colunas de *JG* e a injeções prevista em projeto, identificando-se as zonas geotécnicas intercetadas. Como se pode verificar da sua consulta (Desenho N°6), em geral, ao nível da fundação da ensecadeira ocorre a zona geotécnica ZG3, constituída por solos residuais/maciço decomposto com blocos dispersos de dimensão variável. Apenas na zona do encontro direito foi detetada a presença das zonas geotécnicas de melhor qualidade (ZG2 e ZG1), localizadas a menor profundidade.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as características geomecânicas e hidráulicas dos terrenos localizados na área de implantação da ensecadeira referidas anteriormente.

Tabela 3.1: Resumo das características de cada zona geotécnica considerada (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Zona Geotécnica	Litologia	N <sub>SPT</sub> caract.	Alteração (W)	Fraturação (F)	REC (%)	RQD (%)	RCU (estimado)	RMR (Classe)	Permeabilidade (m/s)
ZG4A	Areias de praia fluvial e aterro de solos (acessos)	≤10	-	-	-	-	-	-	1x10 <sup>-5</sup>
ZG4B	Depósito de material lançado (solos/blocos)								
ZG3	Solo residual granítico a maciço decomposto com intercalações de blocos rochosos	10-60	5 blocos rochosos 3-4	- blocos rochosos 3-4 a 4-5	15-50 blocos rochosos 50-75	- blocos rochosos 0-50	-	-	1x10 <sup>-5</sup>
ZG2	Maciço rochoso granítico	-	3-4	2-3 a 3-4	50-100	50-75	R3	III	1x10 <sup>-5</sup>
ZG1	Maciço rochoso granítico	-	2-3	2-3	90-100	75-100	R3-R4	II-III	1x10 <sup>-5</sup>

No que diz respeito aos parâmetros geomecânicos adotados para os terrenos intercetados pela cortina de impermeabilização e pela escavação, estimaram-se os parâmetros que se apresentam na Tabela 3.2, para cada zona geotécnica, tendo por base toda a informação referida anteriormente.

Tabela 3.2: Valores estimados para os parâmetros geomecânicos (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Zona geotécnica	Formação	N <sub>SPT</sub> Caract.	γ (kN/m <sup>3</sup> )	φ' (°)	c' (kPa)	E (MPa)	k <sub>x</sub> =k <sub>y</sub> (m/s)
ZG4	Areias de praia fluvial e depósito de material lançado	1 ≤ N <sub>SPT</sub> ≤ 10	18	30	-	10	1x10 <sup>-5</sup>
ZG3	Solo residual granítico a maciço decomposto	10 ≤ N <sub>SPT</sub> ≤ 60	19	38	5-30	50	1x10 <sup>-5</sup>
ZG2	Maciço rochoso granítico	50 ≤ RQD (%) ≤ 75	20	40	100	100	1x10 <sup>-5</sup>
ZG1	Maciço rochoso granítico	75 ≤ RQD (%) ≤ 100	21	40	300	400	1x10 <sup>-5</sup>

**Nota:** Refere-se que da consulta dos elementos de base que suportam a realização deste trabalho é inacessível a estimativa adequada da permeabilidade do maciço rochoso granítico, definido como ZG2 e ZG1. A Tabela 3.2 apresenta as quatro zonas geotécnicas (ZG4 a ZG1) como sendo isotrópicas e homogêneas, no que concerne a permeabilidade nas direções x e y (k<sub>x</sub>=k<sub>y</sub>). Esta premissa pode não estar do lado da segurança, uma vez que não reproduz possíveis fenómenos juntos das fronteiras das zonas geotécnicas definidas.



### 3.3.2 Vizinhança

A construção da ensecadeira realizou-se em plena albufeira da barragem da Caniçada, pelo que o faseamento construtivo dos trabalhos foi significativamente condicionado pelas cotas de água armazenada em cada período da obra, assim como pela necessidade de evitar a ocorrência de eventuais derrames de calda de cimento para o interior da albufeira. O nível da albufeira esteve condicionado à cota de 144,50 m de 01/05/2014 a 31/05/2014, após esta data condicionado à cota igual a 146,00 m até 15/09/2014 e de 16/09/2014 até 31/09/2014 para a cota 144,50 m.

### 3.3.3 Prazo de execução

Os rendimentos associados às tecnologias construtivas da solução executada permitiram assegurar a realização dos trabalhos dentro dos prazos previstos, em condições de segurança e de economia para a própria obra e das demais estruturas e infraestruturas vizinhas existentes. Destacava-se, em particular e atendendo ao risco de subida do nível de água na albufeira, a necessidade de conclusão dos trabalhos relativos à execução da ensecadeira até ao final do mês de Setembro de 2014 (Pinto et al., (2014)).

## 3.4 Solução executada

A solução executada mostrou-se como alternativa à patenteada a Concurso de cortinas de estacas prancha de três células circulares e de duas células de ligação, prevendo ainda uma cortina de impermeabilização, materializada através de uma cortina de estacas de betão armado, moldadas e secantes.

Na solução executada previa-se a realização de uma cortina de impermeabilização através da execução de colunas de *Jet Grouting (JG)* e de injeções, com recurso a furação de reduzido diâmetro, para substituição da cortina de estacas, e ainda a execução de um muro de gravidade em betão simples para a substituição das células confinadas por estacas prancha.

Na Figura 3.10 apresenta-se uma vista da zona onde decorreram os trabalhos para a construção da ensecadeira.



Figura 3.10: Vista da zona onde decorreram os trabalhos da construção da ensecadeira.

### 3.4.1 Secção corrente provisória, incluindo encontro esquerdo

A solução executada para a ensecadeira provisória, na zona da secção corrente e encontro esquerdo, consiste, no essencial, na execução de um muro de gravidade de coroamento, em betão simples, ao longo de toda a sua extensão. De forma a dotar o muro de gravidade de condições de fundação compatíveis com as solicitações determinadas pelo impulso de água, a tardoz e sob o mesmo, e de reduzir a permeabilidade do terreno subjacente, previu-se a execução de uma cortina dupla de colunas de *JG* com diâmetro  $\varnothing 1000$  mm, complementada, por tubos metálicos ocos de microestaca no alinhamento localizado entre as colunas de *JG*, munidos de válvulas manchete nas profundidades, onde são intersetados blocos rochosos que possam condicionar a formação das colunas de *JG*. As colunas de *JG* são dispostas em quincôncio, sendo que o afastamento longitudinal entre colunas de 0,80 m e o afastamento entre as duas fiadas de colunas de 0,70 m (Pinto et al., (2014)).

No tardoz do muro foram previstos perfis metálicos de fundação e estabilização, verticais, do tipo HEB 140, afastados de 1,60 m, instalados em furos de 10" (250 mm) de diâmetro. Foram ainda instalados perfis metálicos de fundação e estabilização, inclinados a 30° com a vertical do tipo HEB 160, afastados de 1,60 m, como se pode observar da consulta do Anexo V (Desenho N°5), com a mesma furação de 10" (250 mm).

Apesar de todo o muro de gravidade ser em betão simples, foi adotada alguma armadura junto às zonas de amarração dos perfis metálicos inclinados, de forma a permitir a acomodação de eventuais esforços de tração localizados. O coroamento da ensecadeira encontra-se à cota igual a 153,50 m, 1,0 m acima do NPA e 0,50 m de folga do  $NMC_{act}$ .

Esta solução atende às restrições de exploração da albufeira transmitidas pela EDP e, sobretudo, às características geológico-geotécnicas reconhecidas nos elementos base fornecidos. Importa também referir que a solução executada surge em linha com a solução patenteada a concurso para as zonas laterais da ensecadeira, sendo que se realizaram ajustes de geometria, de forma a assegurar o adequado funcionamento da mesma em toda a sua extensão.

### 3.4.2 Encontro direito definitivo

Concetualmente, a solução executada para o encontro direito é semelhante à prevista para a secção corrente da ensecadeira. Porém, neste caso trata-se de uma solução definitiva e por se encontrar sujeita a esforços de tração nos níveis inferiores, na fase de obra relativa aos trabalhos de escavação a jusante da ensecadeira, tendo sido prevista a incorporação de armadura em módulos inferiores. Ainda pelas mesmas razões foi proposto o tratamento da fundação com recurso a colunas de *JG*, do terreno localizado acima do maciço rochoso (ZG3), assim como o recurso a microestacas de fundação do mesmo muro (Pinto et al., (2014)).

Atendendo ao afloramento do maciço rochoso de menor profundidade (ZG2) (ver Anexo IV), sob o encontro direito e comparativamente com a zona da secção corrente, as injeções seriam realizadas em furos afastados de 1,60 m, recorrendo ao procedimento clássico, com obturador simples.

Salienta-se ainda que, o lado do encontro direito se manteve o alinhamento de montante do muro, definido na solução patenteada a Concurso, dado que nesta zona o muro está integrado na solução definitiva do DDC, como apresentado na Figura 3.7.

### 3.4.3 Muro ala definitivo

Em alternativa à solução do projeto patente a Concurso, em que se previa a execução de uma escavação até à cota 140,00 m para fundar o muro ala do descarregador, foi definida a cota de fundação do muro, em betão armado e secção em “L”, à cota de 146,50 m, de forma compatibilizada com a solução executada para o muro do encontro direito, ficando a 0,5 m acima da cota do nível de água, facilitando assim a betonagem do referido muro. A sapata deste muro é fundada numa parede de betão armado, inferior e frontal, e em colunas de *JG* no seu tardo, ao nível do terreno correspondente à zona ZG3, devidamente armadas com tubos metálicos (Pinto et al., (2014)).

Entre a sapata do muro, à cota de 146,50 m, e a base do talude de escavação definitivo, previsto entre as cotas 145,00 m e 131,50 m, previu-se a execução de uma parede de betão armado, cofrado, com 0,60 m de espessura, realizada de cima para baixo ao abrigo da tecnologia tipo “Berlim definitivo”, devidamente apoiada na fase de escavação em tubos metálicos ocos, do tipo microestaca. Como referido, o terreno correspondente à zona ZG3, a tardo desta parede, fora tratado com colunas de *JG*, de forma a assegurar o funcionamento conjunto da parte superior e inferior do muro. A contenção da escavação para a execução da parede inferior, no alçado paralelo e oposto ao do muro ala, seria constituída por uma cortina de perfis do tipo HEB 140 ou HEB 160 com 0,60 m de afastamento. O travamento provisório da contenção seria assegurado através de escoras metálicas do tipo HEB, apoiadas na parede de betão armado, lado do muro ala, ou em vigas longitudinais constituídas por perfis metálicos do tipo HEB 360, lado oposto ao muro ala (Pinto et al., (2014)).

No alinhamento da ensecadeira, na transição entre o encontro direito e a secção corrente, seria executado um muro de fecho, em betão armado e de menor espessura que os muros da ensecadeira, de forma a permitir a execução do muro de betão armado inferior, localizado na interseção entre o muro ala e o encontro direito. Este muro ficaria apoiado nos muros laterais: encontro direito e secção corrente (Pinto et al., (2014)).

## 3.5 Faseamento construtivo

No âmbito da solução descrita anteriormente, o faseamento construtivo proposto para a secção corrente e os materiais necessários à execução da ensecadeira encontram-se descritos no Anexo VIII (Desenho N<sup>o</sup>8), face à limitação de páginas para a elaboração deste trabalho.

## 3.6 Plano de Monitorização

### 3.6.1 Generalidades

O Plano de Monitorização (PM) constitui uma ferramenta vocacionada para a prevenção e para a gestão de riscos, tendo como objetivo garantir a realização, em condições de segurança e de economia, de trabalhos relativos a um determinado projeto.

Atendendo ao caso de estudo o PM foi elaborado tendo em conta as intervenções previstas e os seus principais condicionamentos, nomeadamente no que diz respeito à construção e entrada em funcionamento da ensecadeira, constituída pelos muros de coroamento e cortina de colunas de *JG* e de injeções.

### 3.6.2 Grandezas a medir

O PM proposto no documento Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa - Revisão “A” (Pinto et al., (2014)), deveria permitir a medição, durante e após os trabalhos das seguintes grandezas:

- a) deslocamentos verticais dos muros;
- b) deslocamentos horizontais e verticais dos muros;
- c) deslocamentos horizontais e verticais do talude à frente do muro;
- d) níveis de água nos terrenos subjacentes aos muros;
- e) deslocamentos horizontais dos muros e do terreno envolvente.

### 3.6.3 Meios para a medição

No mesmo documento propôs-se que as grandezas descritas fossem medidas através dos seguintes meios:

- i. marcas de nivelamento para medição das grandezas referidas em a) (8 unidades);
- ii. alvos topográficos para medição das grandezas referidas em b) (16 unidades);
- iii. alvos topográficos para medição das grandezas referidas em c) (12 unidades);
- iv. piezómetros de tubo aberto para medição da grandeza referida em d) (10 unidades);
- v. inclinómetros para medição da grandeza referida em e) (8 unidades).

O número e localização proposta para os aparelhos e dispositivos de medição referidos encontram-se representados no Anexo IV (Desenho N<sup>o</sup>4) e no Anexo V (Desenho N<sup>o</sup>5), este último com maior pormenor. Conforme prática corrente o número total e a localização dos dispositivos poderia vir a ser reformulada no decorrer da obra, em função da análise dos pressupostos base definidos em projeto e da evolução do comportamento das estruturas instrumentadas.

Foi considerado ainda a instalação de sistemas que permitissem a quantificação dos caudais infiltrados, através da enscadeira.

### 3.6.4 Características dos aparelhos

Os aparelhos cuja utilização foi prevista descrevem-se de seguida:

#### Marcas de nivelamento:

As marcas de nivelamento deveriam permitir as medições de assentamentos dos muros. As marcas de nivelamento para medições à superfície seriam fundadas a uma profundidade máxima de 1 m, possuindo na sua extremidade superior um suporte de mira protegido com uma tampa de proteção. Os nivelamentos superficiais das marcas seriam realizados utilizando um nível de precisão com lâminas de faces paralelas e mira de invar.

As cotas encontram-se referenciadas a outros dispositivos de leitura, nomeadamente, marcas de superfície e de referência considerados como elementos fixos. Para condições normais de leitura, o erro máximo associado a estes dispositivos deveria ser de  $\pm 0,5$  mm.

### **Alvos topográficos:**

A instalação de alvos topográficos seria realizada através da fixação às estruturas, por colagem e/ou selagem, de placas metálicas planas onde seriam colocadas previamente os alvos. A orientação dos alvos poderia ser corrigida de modo a facilitar as pontarias do equipamento topográfico e, conseqüentemente, reduzir os erros (da ordem de 1,0 mm na direção horizontal e de 1,0 mm na direção vertical). As medições trigonométricas absolutas sem contacto de convergências e deformações previstas seriam realizadas utilizando uma estação total com *hardware* e *software* indicados para o efeito. As campanhas consistem na leitura de ângulos e de distâncias para alvos instalados nos elementos cujos deslocamentos se pretendem determinar.

Os pontos de referência, de apoio à execução das leituras, deveriam ser localizados em zonas fora da área de influência da obra e os alvos a utilizar deveriam ser do tipo prisma de reflexão total, de modo a compensar a distância a que os mesmos se localizam dos pontos de referência, devendo estes ser instalados também em suportes adequados, permitindo o seu ajuste se necessário.

As observações topográficas dos prismas que definem e materializam os pontos objeto a instrumentar deveriam ser efetuadas com maior redundância possível, em ângulos e distâncias medidas. As previsões finais do sistema de observação estão estimadas em aproximadamente  $\pm 1,0$  mm, quer planimetricamente, quer em altimetria.

### **Piezómetros:**

Os piezómetros de tubo aberto seriam instalados em furos previamente executados e compreendem um elemento poroso de adução da água colocado na zona requerida, o qual se encontra ligado à superfície por um tubo, onde a água entra e estabiliza no seu nível piezométrico. A leitura é efetuada introduzindo no tubo uma sonda elétrica que é ligada à superfície por uma fita graduada.

Antes da primeira leitura deveria efetuar-se o esgotamento da água existente no furo. A leitura do nível de água dentro do piezómetro faz-se com recurso a uma sonda elétrica que consiste, fundamentalmente, numa fita com um sensor na extremidade inferior que vai sendo introduzida no furo. Quando se atinge o nível de água, o sensor acende uma luz e/ou emite um som, facto que permite ao operador detetar o início da ocorrência do nível de água, medindo a profundidade respetiva na fita graduada em centímetros (cm).

### **Inclinómetros:**

A medição de deslocamentos horizontais seria efetuada através da instalação de calhas inclinométricas. O preenchimento entre as paredes dos furos e as calhas inclinométricas deveria ser realizado com material de características deformacionais semelhantes às do terreno envolvente. A selagem do ponto fixo na base do instrumento deveria ser feita a uma profundidade que não fosse influenciada por trabalhos futuros a decorrer ou por movimentos deformacionais das estruturas adjacentes ao objeto de observação.

A profundidade mínima considerada no documento para a instalação do ponto fixo é de 5,0 m abaixo das cotas de influência dos trabalhos necessários à construção da ensecadeira.

As calhas inclinométricas previstas no PM são em PVC-ABS  $\varnothing$  75 mm, permitindo a passagem de um sensor deslizante (torpedo) dotado de pontos de referência (roletes) espaçados de 0,5 ou 1,0 m. O torpedo contém dois sensores do tipo servo-acelerómetros montados com desfasamento de 90° (graus). Uma vez dentro do tubo-calha, a profundidade a que se encontra o torpedo é controlada por uma escala graduada e impressa no próprio cabo elétrico que liga o torpedo à caixa de leituras à superfície. O resultado obtido em cada leitura é a distância horizontal entre os roletes de referência. Com o conhecimento deste valor para a profundidade registadas, seria possível elaborar um gráfico profundidade/deslocamento horizontal das calhas nas duas direções ortogonais.

O erro de cálculo da deflexão estimado no topo de um tubo calha inclinométrica é de aproximadamente de 1 mm por cada 5 m de tubo de calha instalado.

### 3.6.5 Frequência das leituras

Atendendo às características da obra o conjunto de aparelhos previstos, a frequência definida no documento mencionado, indicava que a mesma não fosse inferior a uma vez por semana, durante o decorrer dos trabalhos de aterro à frente do muro e da execução das colunas de *JG* da cortina. Durante a fase de subida do nível de água na albufera as leituras dos dispositivos de observação deveriam ser lidos diariamente. Após a conclusão dos taludes de escavação e durante a realização dos restantes trabalhos necessários à construção do DCC as leituras passariam a ser realizadas quinzenalmente.

Os resultados das leituras deveriam apresentados sobre a forma gráfica e ser atempadamente interpretados e analisados pelos técnicos projetistas das estruturas instrumentadas, em colaboração com os técnicos da obra e com a Fiscalização, como indicado no documento Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa - Revisão “A” (Pinto et al., (2014)). Referia-se ainda que o intervalo de tempo entre cada campanha de leituras e entrega dos respetivos resultados, devidamente processados de forma gráfica, aos técnicos responsáveis pela respetiva análise e interpretação não fosse superior a 3 dias afim de serem devidamente analisados e interpretados.

### 3.6.6 Critérios de alerta e alarme

Os critérios de alerta e de alarme foram estabelecidos para a solução da enseadeira tendo em conta as intervenções necessárias a realizar, assim como a geologia do local da intervenção e os resultados obtidos dos modelos de cálculo desenvolvidos no documento Projecto de Execução. Cálculos Justificativos - Revisão “B” (Pinto et al., (2014)).

Apresentam-se, na Tabela 3.3, os critérios de alerta e de alarme relativos aos deslocamentos e ao caudal afluyente ao interior da escavação, para as várias fases de escavação do talude.

Tabela 3.3: Critérios de alerta e de alarme estabelecidos para a solução executada (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Fase	Critérios de alerta			Critérios de alarme		
	Desloc. vertical (mm)	Desloc. horizontal (mm)	Caudal (m <sup>3</sup> /dia)	Desloc. vertical (mm)	Desloc. horizontal (mm)	Caudal (m <sup>3</sup> /dia)
Subida do nível de água	3	5	50	6	10	100
1 <sup>a</sup> escavação	4	10	100	8	15	200
2 <sup>a</sup> escavação	5	15	150	10	20	300
3 <sup>a</sup> escavação	5	20	300	10	30	600
4 <sup>a</sup> escavação	7	30	500	14	40	1000
5 <sup>a</sup> escavação	8	40	700	16	60	1400
6 <sup>a</sup> escavação	10	50	900	20	70	1800

Referia-se também a necessidade da interpretação contínua e comparativa dos valores observados nas leituras anteriores, pois, além da informação dada pelos valores absolutos era importante a análise das tendências da sua evolução.

### 3.6.7 Medidas de reforço

No caso dos critérios de alerta e de alarme serem atingidos as medidas de reforço passíveis de serem implementadas deviam ser analisadas individualmente, mas poderiam compreender, entre outras e a título indicativo as seguintes:

- o reforço das condições de fundação, através da realização de microestacas ou colunas de *JG* adicionais;
- o incremento da segurança ao derrubamento e/ou ao deslizamento, através da execução de microestacas inclinadas adicionais;
- a redução da permeabilidade da enseadeira através da execução de colunas de *JG* e de injeções adicionais ou a execução de cortina de estacas nas zonas geotécnicas ZG4 e ZG3.





## 4 Modelação numérica com o SEEP/W

### 4.1 Descrição geral

Um dos programas escolhidos para a modelação das secções mais condicionantes da solução executada para a construção do novo Descarregador de Cheias Complementar (DCC) da barragem da Caniçada é o *software* SEEP/W, versão 2007, que recorre ao Método dos Elementos Finitos (MEF) para a modelação numérica bidimensional que simula matematicamente o processo físico da percolação da água através de um meio particular.

Neste capítulo pretende-se em primeiro lugar expor uma breve introdução ao estudo da percolação das secções escolhidas. De seguida será exposto o estudo da solução executada onde se definirá as geometrias, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e a malha de elementos finitos.

Definidas as secções mais condicionantes e as suas propriedades proceder-se-á ao cálculo das redes de escoamento. Pretende-se com o uso deste *software* a determinação da linha de saturação de cada secção escolhida, para posterior modelação com o *software* PLAXIS 2D. Concluída a sua definição é necessário proceder ao cálculo e à validação quer do modelo, quer dos resultados obtidos. A validação dos resultados terá por base os registos dos parâmetros definidos no Plano de Monitorização (PM), onde se dedica um subcapítulo específico para a sua exposição.

### 4.2 Introdução ao problema

A percolação da água através do solo pode ser descrita pela equação de Laplace. A Equação [4.1] traduz a percolação bidimensional, 2D, da água pelo solo.

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad [4.1]$$

sendo  $H$  a carga hidráulica total,  $k_x$  e  $k_z$  as condutividades hidráulicas segundo a direcção  $x$  e segundo a direcção  $z$ .

A equação de Laplace expressa as alterações dos gradientes hidráulicos numa direcção com a compensação das alterações na outra direcção. A equação de Laplace tem os seguintes pressupostos:

- validade da Lei de Darcy;
- escoamento irrotacional desprezado.

Este último pressuposto conduz à seguinte relação bidimensional entre os gradientes de velocidades segundo a direcção  $x$  e a direcção  $z$ :

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad [4.2]$$

Sendo  $v_x$  e  $v_z$  as velocidades na direcção  $x$  e direcção  $z$ , respetivamente. A equação só pode ser satisfeita se o escoamento for apenas uniforme, de modo que é necessário assumir que  $v_x = v_z = \text{constante}$  e o seguinte:

- o escoamento é não viscoso;

- o solo é homogéneo e saturado;
- o solo e a água são incompressíveis (não há alteração de volume).

A equação de Laplace é também conhecida por Equação [4.3], desprezando-se o contributo das velocidades no interior dos solos, por serem reduzidas. No caso de se considerar o solo um material isotrópico, ou seja  $k_x = k_z$ , a equação transforma-se em:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad [4.3]$$

A solução para a Equação [4.3], assumindo os pressupostos anteriores, requer o conhecimento prévio das condições de fronteira. Contudo, em muitas estruturas as condições de fronteira são complexas, não sendo fácil a obtenção de uma solução analítica para a mesma. É necessário recorrer a soluções aproximadas através de modelos numéricos, como o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos ou o uso de modelos físicos que reproduzam o escoamento através da estrutura para a qual se pretende obter uma solução (Budhu, Muni (2011)).

Para a realização deste trabalho a rede de escoamento e a posição da linha de saturação das secções em estudo será determinada com recurso ao programa SEEP/W.

### 4.3 Estudo da solução

Como já mencionado, será utilizado o *software* SEEP/W no estudo da percolação. Este *software* permite a análise da influência da linha de saturação e o comportamento dos solos ao longo da secção escolhida. É possível através do seu uso visualizar a rede de escoamento, os gradientes hidráulicos, os caudais percolados, as forças que se geram da percolação, as tensões efetivas dos materiais, entre outros parâmetros (GEO-SLOPE Internacional, Ltd. (2009)). Apesar do *software* permitir a análise de regimes estacionários e de regimes transitórios, será adotada a análise da percolação apenas em regime estacionário, uma vez que este regime corresponde ao cenário mais adequado às características do comportamento da solução base e do tipo de solos presentes.

Através do *software* SEEP/W será possível analisar as redes de percolação e determinar a linha de saturação das secções escolhidas.

Nos subcapítulos seguintes serão definidas as geometrias, as secções transversais, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e a discretização da malha de elementos finitos do modelo.

#### 4.3.1 Definição da geometria e secção transversal

A definição da geometria do modelo numérico necessário para o estudo da percolação teve por base as características geométricas definidas para a solução da ensecadeira do DCC. De posse das várias peças desenhadas da empreitada do DCC da barragem da Caniçada, contemplando plantas, alçados frontais e alçados transversais, foram escolhidas as secções transversais correspondentes ao Corte 7, ao Corte 8 e ao Corte 10, expostas no Anexo VII (Desenho N<sup>o</sup>7). Os argumentos para a sua escolha, em detrimento de outras, serão devidamente justificados de seguida.

#### 4.3.1.1 Geometria da solução executada

A geometria tipo da solução executada das secções correspondentes ao Corte 7 e Corte 8, para o coroamento da ensecadeira e a sua fundação está ilustrada de seguida, na Figura 4.1.

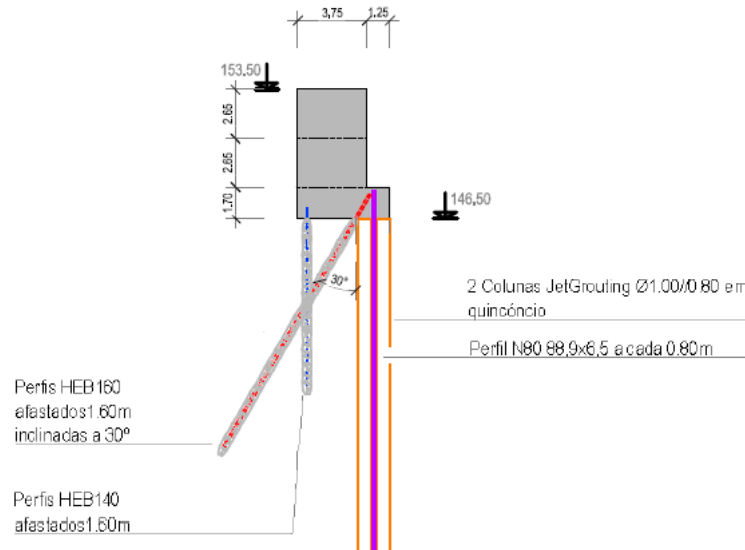


Figura 4.1: Secção transversal do muro de betão simples da solução executada para as secções Corte 7 e Corte 8 (adaptada de Pinto et al., (2014)).

O muro de coroamento é constituído por três níveis de betonagem, possuindo o primeiro nível uma base mais larga e englobando três conjuntos de microestacas. A altura total do muro é de 7 m, no máximo, de modo a prever o desnível de águas entre montante e jusante da ensecadeira (Pinto et al., (2014)).

O muro está fundado através de uma dupla fiada de colunas de *JG* de 1000 mm de diâmetro, afastadas de 0,8 m em quincôncio, incorporando um perfil metálico tubular, em aço de alta resistência. Foi previsto também uma microestaca inclinada do tipo HEB 160, para a contribuição do incremento da segurança ao deslizamento do muro, e de um perfil do tipo HEB 140 vertical a tardoz, de modo a garantir a estabilidade do muro. O coroamento do muro situa-se à cota 153,50 m, com uma folga de encaixe de 0,5 m face ao Nível Máximo de Cheia actual ( $NMC_{act}$ ) de cota igual a 153,00 m, e com uma largura máxima de 3,75 m. O paramento é vertical a montante e jusante e a largura máxima da fundação é de 5,0 m. Na sua extensão o muro tem altura variável, sendo no máximo de 7 m, havendo troços com 4 m e outros com 5,5 m. O betão escolhido para a execução do muro é de classe C20/25 (Pinto et al., (2014)).

Para a secção do Corte 10 o coroamento da ensecadeira e a sua fundação está ilustrada na Figura 4.2. O muro de coroamento da secção do Corte 10 é constituído igualmente por três níveis de betonagem, possuindo o primeiro nível uma base mais larga e englobando neste caso dois conjuntos de microestacas. A altura total do muro é igual ao descrito anteriormente para as secções do Corte 7 e do Corte 8.

A fundação do muro é garantida através de microestacas verticais N80Ø88,9x6,5 mm+1Ø25 mm de frente e de tardoz, afastadas de 1,60 m. As microestacas verticais de tardoz são constituídas com uniões exteriores mais uma cortina de injeções. Para a cortina prevê-se um furo a cada 1,60 m, sendo que a localização desta secção se encontra no encontro direito definitivo. O coroamento do muro situa-se novamente à cota 153,50

m, com uma folga de encaixe de 0,5 m face ao  $NMC_{act}$  de cota igual 153,00 m, e com uma largura máxima de 3,75 m. O betão adotado para a execução do muro é da mesma classe que o descrito anteriormente (Pinto et al., (2014)).

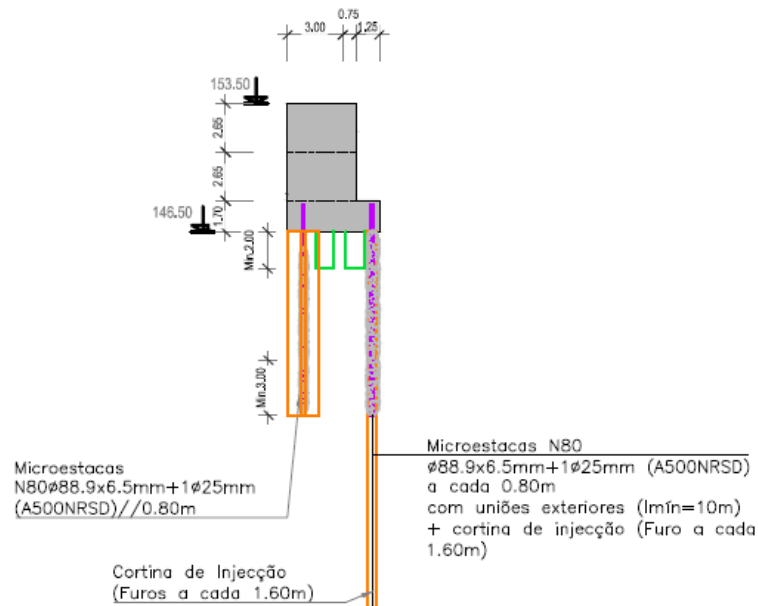


Figura 4.2: Secção transversal do muro de betão simples da solução executada para a secção do Corte 10 (adaptada de Pinto et al., (2014)).

#### 4.3.1.2 Cortina de impermeabilização

Tendo em consideração as características dos terrenos existentes, expostos no subcapítulo 3.3.1, a cortina de impermeabilização proposta é constituída por uma dupla fiada de colunas de *JG*, localizada na zona frontal da fundação do muro, reforçada com tubos metálicos. Quando necessário, a cortina de colunas de *JG* poderá ser complementada por uma cortina de injeções.

A altura total das colunas de *JG* é variável, de acordo com a informação presente no alçado esquemático (por montante da ensecadeira) no Anexo VI (Desenho N°6), sendo que a altura máxima é de cerca de 30,5 m, ficando a respetiva base à cota de 116,0 m.

#### 4.3.1.3 Secções transversais da solução adotada para a modelação

##### Secção do Corte 7

A escolha da secção Corte 7 (ver Figura 4.3) teve por base a existência de um piezómetro no tardo do muro de betão, à cota 146,50 m, possibilitando a localização da linha de saturação no tardo das colunas de *JG*. Esta secção apresenta a maior diferença de potencial hidráulico no interior da ensecadeira, cerca de 27 metros após a conclusão dos trabalhos de escavação dos taludes para a implantação da tomada de água, considerando que o nível da albufeira se encontra à cota do  $NMC_{act}$  de 153,00 m.

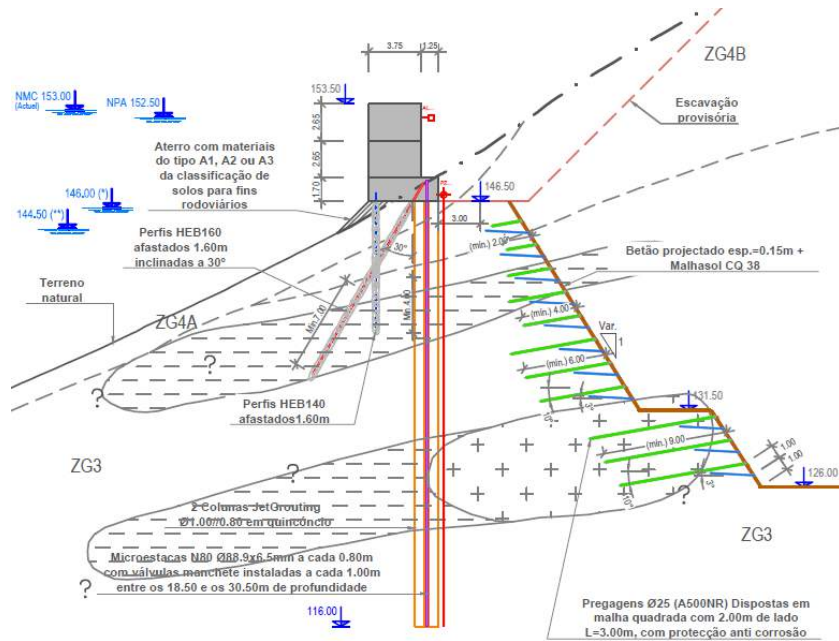


Figura 4.3 Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 7 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).

### Secção do Corte 8

A secção Corte 8 (ver Figura 4.4) é relevante para a análise numérica, uma vez que prevê a instalação de dois inclinómetros, um no corpo do muro de betão simples e o segundo no tardoz do mesmo. Esta secção dispõe também de um piezómetro que permitirá observar a linha de saturação a tardoz das colunas de *JG*. Apesar desta secção ter uma diferença de potencial hidráulico menor, cerca de 25,7 metros, tem uma menor distância horizontal da albufeira até ao interior da escavação. É de referir também que as zonas geotécnicas (ZG's) que interseta são de melhores características geomecânicas.

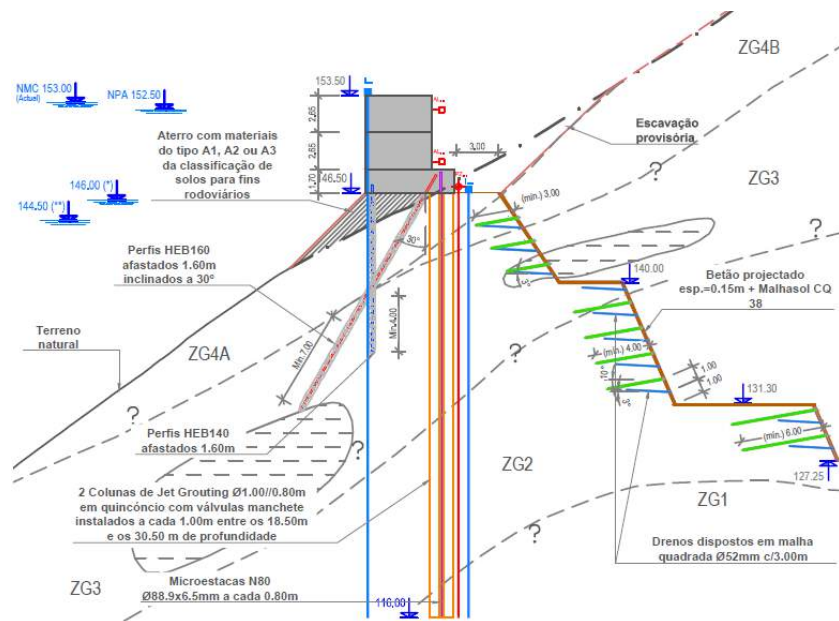


Figura 4.4: Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 8 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).

## Secção do Corte 10

A escolha da última secção para a análise é a correspondente ao Corte 10 (ver Figura 4.5). Esta secção tem uma diferença de potencial hidráulico de 25,75 m, considerando, do mesmo modo, o nível da albufeira à cota do  $NMC_{act}$  de 153,00 m, como nas anteriores secções escolhidas. Porém, o fator diferenciativo para a sua escolha, em detrimento de outras possíveis secções existentes ao longo do desenvolvimento da ensecadeira, foi esta apresentar uma fundação diferente e um comprimento menor da cortina de *JG*.

Em posse da informação contida nos elementos base, referidos no subcapítulo 3.2, será interessante proceder à sua modelação e analisar os dados disponibilizados do desempenho da cortina.

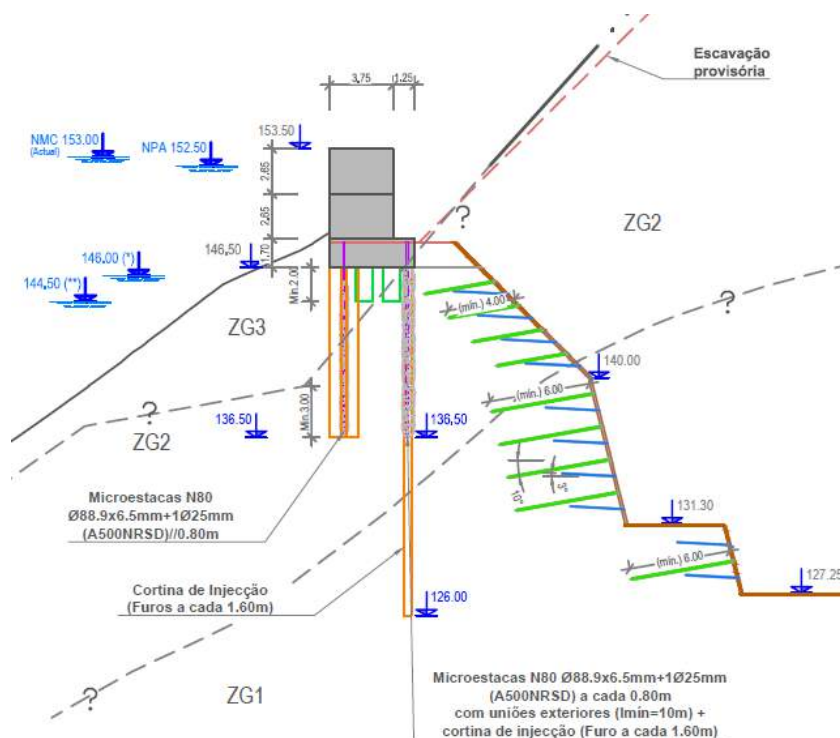


Figura 4.5: Secção adotada para o estudo da percolação: Corte 10 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).

## 4.3.2 Propriedades dos materiais

Definida a geometria e as três secções em estudo, caracterizam-se as propriedades dos materiais necessários à modelação numérica com recurso ao *software* SEEP/W.

Para este *software* não se caracterizam os elementos estruturais de cada secção em estudo, de modo que o utilizador só necessita de caracterizar o terreno, que se expõe de seguida.

### 4.3.2.1 Caracterização do terreno

Os parâmetros geomecânicos de cada zona geotécnica necessários para a modelação com o *software* SEEP/W foram consultados no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto (Peças Escritas).

Memória Descritiva (EDP, (2012)) e no documento Projecto de Execução. Cálculos Justificativos – Revisão “B” (Pinto et al., (2014)).

Definido no subcapítulo 3.3.1 o cenário geológico-geotécnico e identificadas as ZG’s, apresenta-se de seguida, na Tabela 4.1, os valores da condutividade hidráulica de cada material, admitindo o modelo “*Saturated only*” para a modelação com recurso ao programa SEEP/W.

Tabela 4.1: Caracterização dos parâmetros do solo para cada formação necessários à modelação com recurso ao *software* SEEP/W.

	Aterro	ZG4A	ZG4B	ZG3	ZG2	ZG1	JG
$k_x=k_y$ (m/s)	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-8}$

### 4.3.3 Condições de fronteira e da malha de elementos finitos

Após a caracterização do terreno é necessário definir as condições de fronteira e a malha de elementos finitos do modelo. A geração da malha de elementos finitos foi definida automaticamente pelo *software* SEEP/W, podendo o utilizador refinar e discretizar a mesma, à medida que o modelo evolui. Foi escolhida uma malha de elementos finitos quadrangulares e triangulares, como sugerida no manual do respetivo *software*, com dimensão aproximada de 1 m.

Procedeu-se de seguida à definição das condições de fronteira do modelo, designadas no *software* por “*boundary conditions*”. Inicialmente definiu-se a carga hidráulica correspondente ao  $NMC_{act}$  de cota igual a 153,00 m, representado a cor azul, a carga hidráulica do último patamar de escavação de cada secção igual à sua cota altimétrica respetiva, representada a cor amarelo e, como última condição de fronteira, foi considerado que no limite inferior de cada secção o caudal percolado seria igual a zero, representado a cor cinzento.

Este *software* não permite ao utilizador definir o faseamento construtivo no cálculo. Deste modo considera-se a geometria final definida em projeto para cada secção em estudo.

Apresentam-se de seguida para as três secções a sua geometria no *software* SEEP/W, Corte 7 (ver Figura 4.6), Corte 8 (ver Figura 4.7) e Corte 10 (ver Figura 4.8).

#### 4.3.3.1 Secção do Corte 7

Na Figura 4.6 ilustra-se o descrito anteriormente, no que diz respeito à malha de elementos finitos e condições de fronteira.

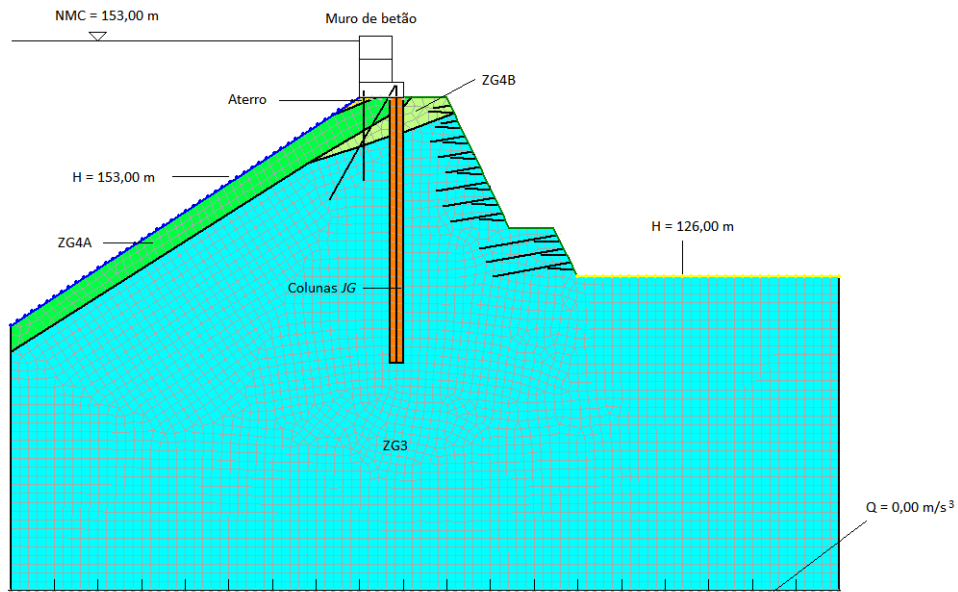


Figura 4.6: Seção Corte 7 - definição da malha e condições de fronteira no *software* SEEP/W.

#### 4.3.3.2 Seção do Corte 8

Na Figura 4.7 ilustra-se as condições de fronteira e a malha de elementos finitos da secção Corte 8.

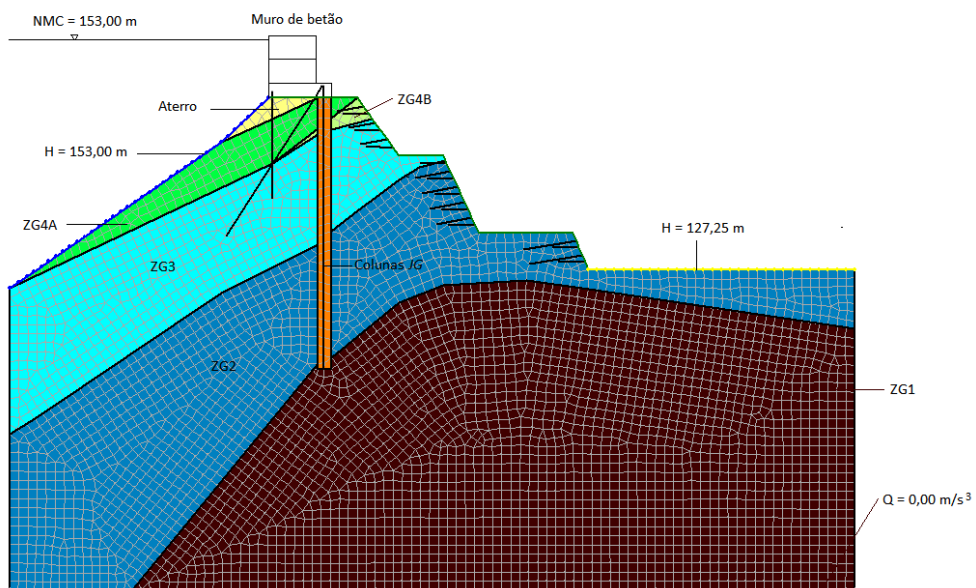


Figura 4.7: Seção Corte 8 - definição da malha e condições de fronteira no *software* SEEP/W.

#### 4.3.3.3 Seção do Corte 10

Na Figura 4.8 ilustra-se o descrito anteriormente no que diz respeito às condições de fronteira desta secção.



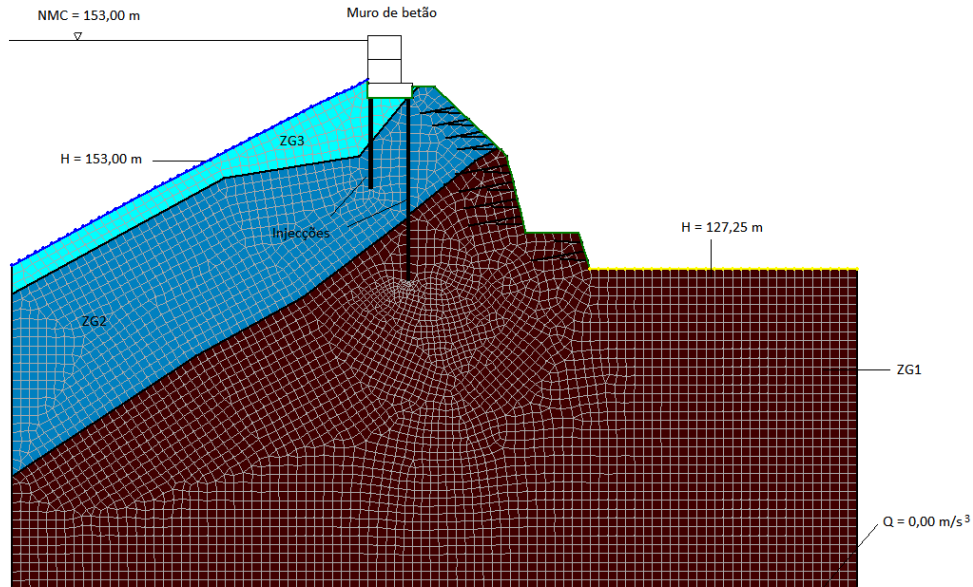


Figura 4.8: Seção Corte 10 - definição da malha e condições de fronteira no *software* SEEP/W.

#### 4.3.4 Validação do modelo

O SEEP/W é um *software* comercial disponível no mercado para a análise da percolação nos solos, sendo usado por milhares de engenheiros por todo o mundo, estando presente em mais de 100 países nos seis continentes, segundo a própria GEO-SLOPE Internacional. A sua validação numérica está comprovada cientificamente junto da comunidade académica, agências governamentais e empresas multinacionais de engenharia (GEO-SLOPE Internacional, Ltd. (2009)).

O próprio manual do *software* menciona a maior rapidez e simplicidade para o utilizador em criar redes de percolação, face à construção manual destas. Para além do referido anteriormente, o programa permite ainda a elaboração de gráficos e a visualização de informação em cada nó após a modelação.

Do exposto assegura-se a validação do modelo sendo agora necessário validar os resultados obtidos da modelação numérica das três secções. A mesma será abordada de seguida, no subcapítulo 4.3.5.

#### 4.3.5 Apresentação e validação dos resultados

Outro aspeto fundamental no processo de modelar é a própria validação do modelo numérico. Segundo a consulta do manual do *software*, é boa prática fazer uma estimativa prévia dos valores expectáveis daquilo que se pretende modelar (GEO-SLOPE Internacional, Ltd. (2009)).

Foi considerada a geometria final de cada secção e reproduziram-se as condições de fronteira, descritas no subcapítulo 4.3.1.3 para cada secção em estudo, considerando regime uniforme e com o modelo “*Saturated only*”. Pretende-se agora expor a linha de saturação obtida através deste programa para cada secção.

#### 4.3.5.1 Secções transversais

As condições de fronteira e linha de saturação obtida através da modelação com recurso ao *software* SEEP/W da secção Corte 7 (ver Figura 4.9), secção Corte 8 (ver Figura 4.10) e secção Corte 10 (ver Figura 4.11) apresentam-se de seguida.

Os resultados obtidos através da simulação numérica com recurso ao *software* SEEP/W da linha de saturação de cada secção necessitam validação. Dos registos disponibilizados pela empresa Mota-Engil das grandezas a medir, definidas no PM exposto no subcapítulo 3.6.2., serão de seguida expostas e devidamente analisadas.

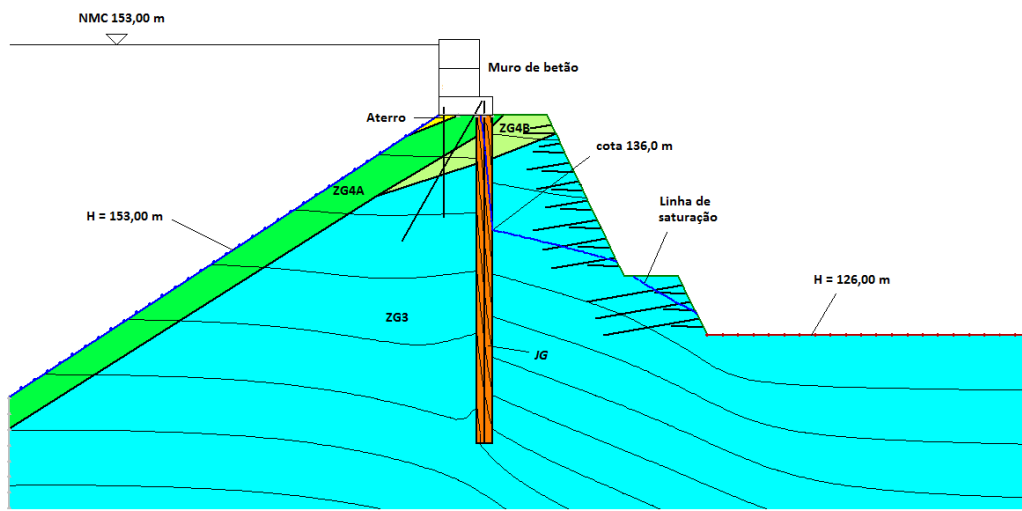


Figura 4.9: Secção Corte 7 - condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao *software* SEEP/W.

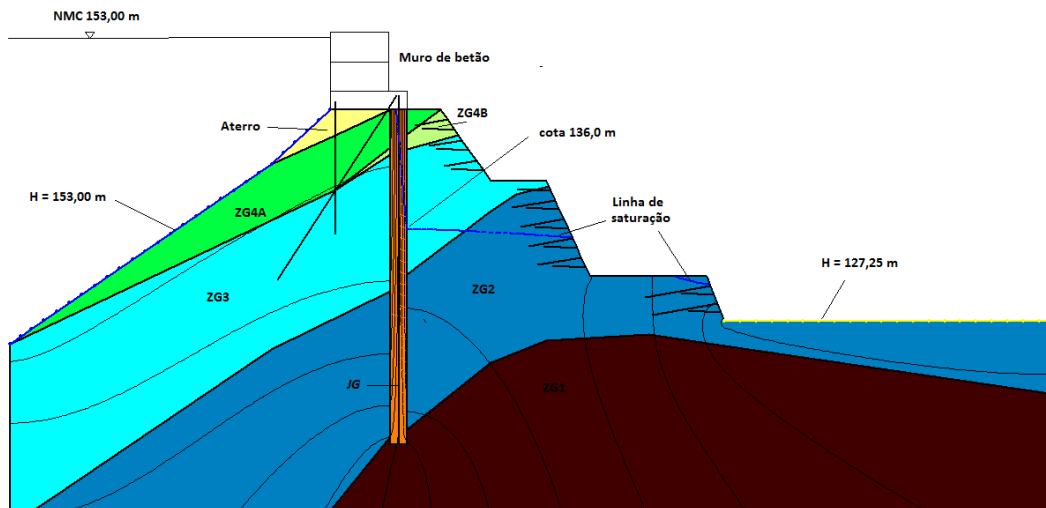


Figura 4.10: Secção Corte 8: Condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao *software* SEEP/W.

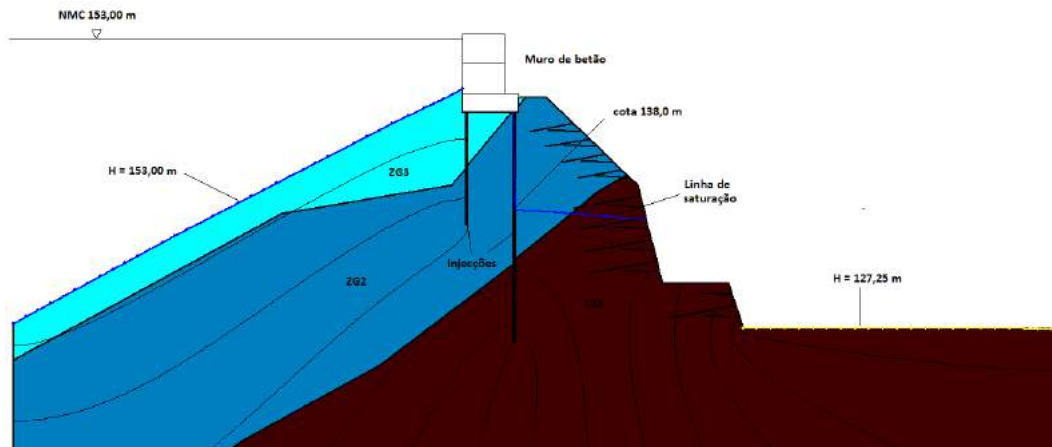


Figura 4.11: Secção Corte 10: Condições de fronteira e linha de saturação obtida da modelação com recurso ao *software* SEEP/W.

#### 4.3.5.2 Piezómetros

Os piezómetros são dispositivos que permitem o registo da variação da localização do nível freático e medem também a pressão da água no interior do furo. Estes dispositivos podem ser pneumáticos, hidráulicos, elétricos de corda vibrante e abertos (tipo Casagrande). Na Figura 4.12 ilustra-se esquematicamente a composição de um piezómetro aberto.

No caso particular da ensecadeira foram instalados 10 piezómetros de tubo aberto, como indicado no subcapítulo 3.6.3, possibilitando localizar o nível freático no interior da escavação, junto ao muro de betão que constitui a ensecadeira. Refere-se que a posição final de alguns piezómetros foi alterada, sendo um deles o previsto para a secção Corte 7 (ver Figura 4.3).

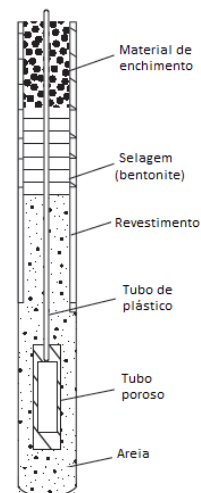


Figura 4.12: Piezómetro de tubo aberto (adaptada de Knappett, J. A. & Craig, R. F., (2012)).

Os registos da cota do nível de água no interior da ensecadeira relevantes para as secções em estudo apresentam-se na Figura 4.13 e na Figura 4.14.

Da observação da Figura 4.13 é possível verificar que a linha a verde seco, correspondente ao piezómetro EPZ5, que diz respeito à secção Corte 8, não regista nenhuma alteração da cota do nível de água no seu interior (cota igual a 148,00 m) ao longo de 6 meses aproximadamente, sendo que o nível de água na albufeira se manteve constante à cota de 146,00 m, situação impossível de se verificar num espaço tão longo como o mencionado. Situação idêntica ocorre a partir do dia 05/06/2015 em que o nível no interior do piezómetro sobe para a cota 150,00 m e o nível de água na albufeira se situa à cota 146,00 m. Durante este período de tempo o piezómetro EPZ5 encontrava-se obstruído e os registos não se consideram válidos.

Após a desobstrução do piezómetro EPZ5 os registos iniciam-se novamente no dia 18/10/2015 e prolongam-se até ao dia 16/01/2016, correspondendo à última atualização cedida. Para o último dia a cota da albufeira, a cor azul, situa-se a 151,00 m (NMC<sub>act</sub> de cota 153,00 m), a cota de escavação, a cor laranja, correspondente ao último patamar de escavação de 127,25 m e a cota do nível de água no interior do piezómetro em questão, a cor verde seco, à cota 137 m aproximadamente.

ELEMENTO DE OBRA: Ensecadeira  
LOCAL:

ID	Localização dos Piezômetros		
	M	P	Z
EPZ4	-8053,435	220239,439	148,158
EPZ5	-8058,082	220250,736	148,333

Notas: NAIE - nível de água no interior da ensecadeira.

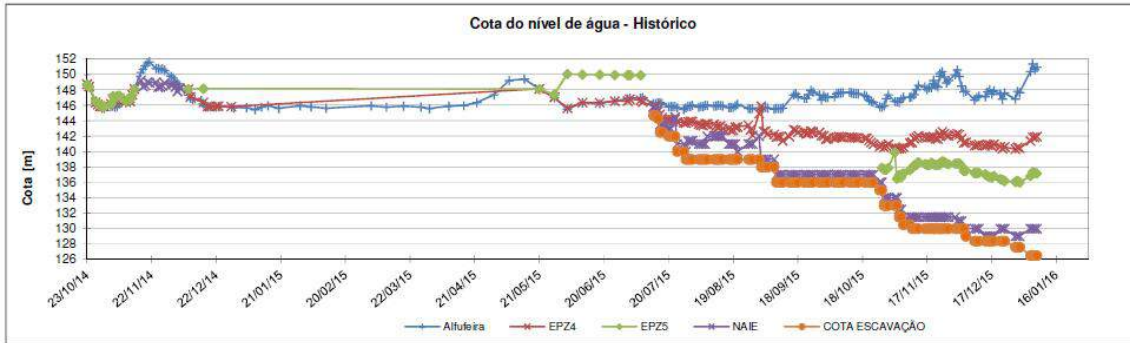
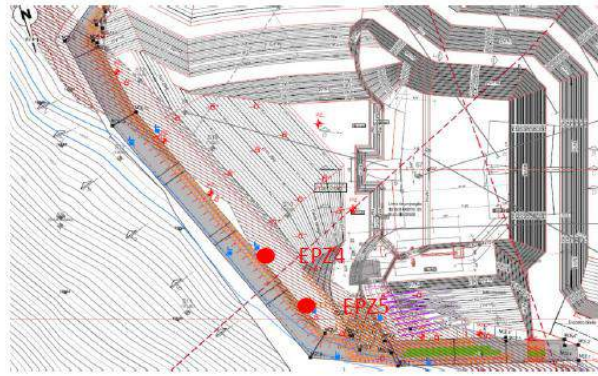


Figura 4.13: Registo histórico da cota do nível de água no interior da ensecadeira dos piezómetros EPZ4 e EPZ5 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).

ELEMENTO DE OBRA: Ensecadeira  
LOCAL:

ID	Localização dos Piezômetros		
	M	P	Z
EPZ6	-8074,971	220261,167	149,757
EPZ7	-8086,847	220263,004	149,543

Notas: NAIE - nível de água no interior da ensecadeira.

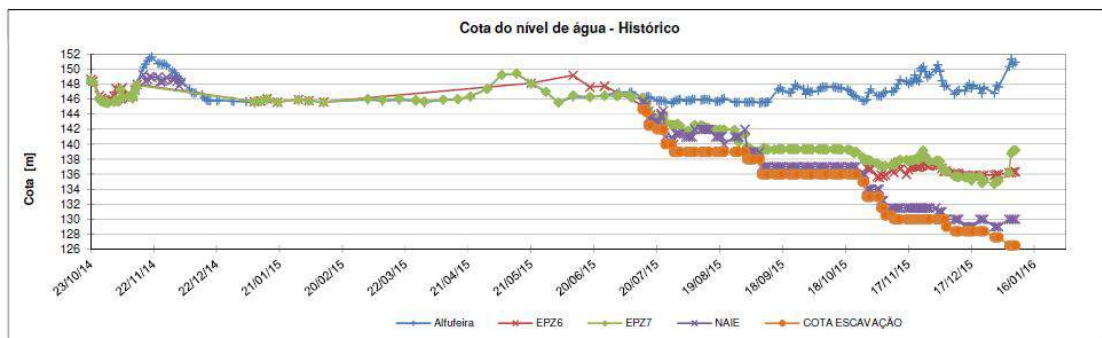
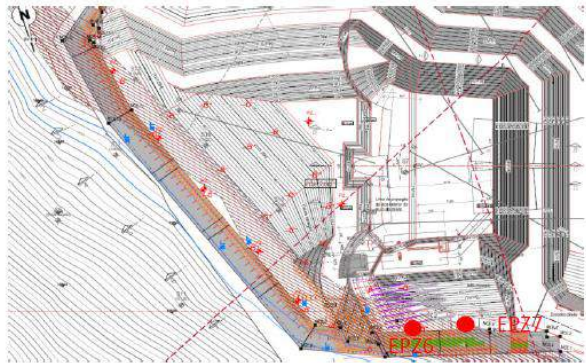


Figura 4.14: Registo histórico da cota do nível de água no interior da ensecadeira dos piezómetros EPZ6 e EPZ7 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).

Da observação entre o resultado obtido com recurso ao *software* SEEP/W da secção Corte 8 e os registos cedidos da monitorização, a cota da albufeira encontra-se a apenas 2 metros de atingir a cota do  $NMC_{act}$  e a diferença do nível de água no interior do piezómetro é de 1 metro (ver Figura 4.10).

Relativamente à Figura 4.14 é possível observar que no registo a partir do dia 20/07/2015 é indicado o nível de água na albufeira, a cor azul, a cota de escavação, a cor laranja, e o nível de água no interior do piezómetro EPZ7, correspondente ao instalado na secção Corte 10 (ver Figura 4.5) a cor verde seco. Para o dia 16/01/16 refere-se que a diferença entre o resultado obtido para a secção Corte 10 da modelação efetuada através do *software* SEEP/W (ver Figura 4.11) e o registo do piezómetro EPZ5 é novamente de 1 metro.

Pelo descrito anteriormente considera-se que os resultados obtidos com recurso ao *software* SEEP/W para as secções em estudo são válidos e que este comprova a sua robustez na simulação do processo físico da percolação da água através de um meio particular, como anunciado no seu manual de utilização.



## 5 Modelação numérica com o PLAXIS 2D

### 5.1 Descrição geral

O PLAXIS 2D, versão 8.2, é outro *software* que também recorre ao Método dos Elementos Finitos (MEF) para proceder à análise bidimensional de deformações e de estabilidade de estruturas, no contexto da Geotecnia.

Na Geotecnia os modelos constitutivos são mais sofisticados, face aos modelos constitutivos usados na Resistência de Materiais, permitindo deste modo a simulação não linear, temporalmente dependente e de comportamento anisotrópico que caracteriza os solos e as rochas. Em simultâneo é necessário considerar também a presença de água nos poros do solo, para as situações em que esta seja hidrostática ou hidrodinâmica.

À semelhança do capítulo 4 será descrita uma breve introdução ao estudo da solução executada em termos de tensões e de deformações das secções escolhidas. Posteriormente serão definidas as geometrias, as propriedades dos materiais, os elementos estruturais, as condições de fronteira, a malha de elementos finitos e os carregamentos atuantes. Após concluída a sua definição é necessário proceder ao cálculo numérico de cada secção escolhida. A validação do modelo, a apresentação e a validação dos resultados obtidos da modelação serão devidamente expostos em subcapítulo próprio.

Com a presente modelação pretende-se avaliar o desempenho e verificar a segurança a fenómenos de desestabilidade de origem hidráulica da ensecadeira executada para a construção do Descarregador de Cheias Complementar (DCC) da barragem da Caniçada. Para o efeito foi consultada a regulamentação existente no Eurocódigo 7 (EC 7), identificando quais os fenómenos relevantes para o caso de estudo e uma breve explicação de cada fenómeno considerado. Considerados os estados limites de rotura hidráulica e após as verificações de segurança necessárias para cada abordagem de cálculo, os resultados obtidos serão apresentados e discutidos num subcapítulo dedicado a esse efeito.

Posteriormente será realizado um estudo de possíveis soluções alternativas face à solução executada da ensecadeira do DCC. Pretende-se com a modelação avaliar o seu desempenho e quantificar o caudal expectável de percolar para o interior da escavação.

Após a modelação das diversas soluções alternativas será exposta a síntese de toda a modelação realizada para as diferentes soluções modeladas. Para finalizar, será avaliada a relação custo-benefício da solução executada e das soluções alternativas.

### 5.2 Introdução ao problema

A modelação efetuada neste capítulo 5 é realizada com recurso a um *software* que utiliza também o MEF para o estudo bidimensional de secções de estruturas geotécnicas.

O MEF é uma ferramenta de análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo genérico em elementos de menor dimensão, conservando as propriedades originais do meio. A interação entre os

elementos é regida por um conjunto de equações diferenciais cuja resolução corresponderá à obtenção de uma solução desejada.

O desenvolvimento do MEF deve a sua origem ao desenvolvimento de Gauss na utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos, no final do século XVIII. Diversos matemáticos continuaram o seu trabalho, desenvolvendo teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, durante mais um século. Contudo, o maior desenvolvimento deste método surgiu em simultâneo com os avanços tecnológicos nas áreas de computação, por volta de 1950, permitindo a elaboração e resolução de sistemas de equações complexos. A partir da década de 70, com o desenvolvimento da capacidade de cálculo e com a introdução dos primeiros computadores pessoais, dá-se um aumento exponencial no desenvolvimento de programas que permitiram cálculos mais complexos (Cook et al., (2002)).

Na área da análise estrutural, as incógnitas do problema podem ser os deslocamentos; em análises tensão-deformação, a carga hidráulica total; em análises de escoamentos, forças, ou outras grandezas físicas. Estas grandezas são vulgarmente designadas de variáveis primárias e são as que constam das equações de resolução dos problemas a determinar. O seu cálculo é efetuado nos pontos nodais. Outras grandezas, como tensões, deformações, velocidades de escoamento ou caudais, derivadas a partir das primeiras grandezas, designam-se por variáveis secundárias (Caldeira, L. M. M. S. (2013)).

O objetivo de dividir um corpo em elementos de menores dimensões é o de tratar cada um separadamente, facilitando a formulação matricial de conjuntos de expressões para determinar a distribuição, de por exemplo, deslocamentos nos pontos nodais de um elemento quando se aplicam forças noutros nós existentes. Definido o comportamento de cada elemento, a resolução do problema passa depois pela união dos diversos elementos que constituem o domínio na definição das condições exteriores, as quais podem traduzir aplicação de forças, de pressões, pela imposição de deslocamentos pressões intersticiais ou caudais (Caldeira, L. M. M. S. (2013)).

### 5.3 Estudo da solução

A modelação numérica o *software* PLAXIS 2D permite a análise bidimensional em termos de tensões e de deformações das secções escolhidas. Da modelação destas secções em estudo será possível avaliar os esforços atuantes nos elementos estruturais (microestacas e pregagens), os deslocamentos no topo e base do muro de betão que constitui a ensecadeira, as tensões e deformações do terreno e poder-se-á também verificar a segurança a fenómenos de desestabilidade hidráulica, de acordo com o EC 7. Outro aspeto relevante no estudo da solução é a determinação dos fatores de segurança que cada secção apresenta.

Nos subcapítulos que se seguem serão novamente expostas as geometrias e as secções transversais escolhidas inicialmente para a realização deste trabalho, mas para o uso *software* PLAXIS 2D é necessário definir novas propriedades dos materiais, novas condições de fronteira e a uma discretização da malha de elementos finitos do modelo diferente do exposto no capítulo 4.



### 5.3.1 Definição da geometria e secção transversal

A definição da geometria e das secções transversais no *software* PLAXIS 2D foi realizada com base nas mesmas características geométricas definidas no uso *software* SEEP/W, apresentadas no subcapítulo 4.3.1, tendo por base, uma vez mais, a solução da ensecadeira presente no documento Projecto de Execução. Cálculos Justificativos – Revisão “B” (Pinto et al., (2014)) e da consulta do conjunto de peças desenhadas do Projecto de Execução (Pinto et al., (2014)).

As secções escolhidas são as mesmas expostas no capítulo anterior, a secção Corte 7, a secção Corte 8 e a secção Corte 10, de modo a dar seguimento do estudo proposto para a solução da ensecadeira do novo DCC da barragem da Caniçada definido nos Objectivos e Metodologia, no subcapítulo 1.2.

#### 5.3.1.1 Geometria da solução proposta

A geometria tipo da solução proposta das secções Corte 7, Corte 8 e Corte 10 é idêntica à definida no subcapítulo 4.3.1.1 para a modelação numérica com recurso ao *software* SEEP/W.

O muro de coroamento e a sua fundação para as secções Corte 7 e Corte 8 podem ser novamente visualizadas na Figura 4.1 e para a secção Corte 10 na Figura 4.2, respetivamente.

#### 5.3.1.2 Cortina de injeções

Refere-se que sobre a cortina de impermeabilização prevista a complementar a cortina de colunas de *JG* executadas, em caso de necessidade, já foi exposta e poderá ser consultada no subcapítulo 4.3.1.2.

#### 5.3.1.3 Secções transversais da solução adotada para a modelação

A justificação para a escolha das três secções transversais em estudo, Corte 7 (ver Figura 4.3), Corte 8 (ver Figura 4.4) e Corte 10 (ver Figura 4.5), já foi também apresentada no subcapítulo 4.3.1.3.

### 5.3.2 Propriedades dos materiais

Uma vez definida a geometria e as três secções em análise, é necessário caracterizar as propriedades dos materiais intervenientes para a modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D.

#### 5.3.2.1 Caracterização do terreno

Os parâmetros geomecânicos de cada zona geotécnica considerada para a modelação foram consultados, novamente, no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto (Peças Escritas). Memória Descritiva (EDP, (2012)) e no documento Projecto de Execução. Cálculos Justificativos – Revisão “B” (Pinto et al., (2014)).

A interpretação do modelo geológico-geotécnico que consta nestes documentos, apresentados no subcapítulo 3.3.1, permitiu caracterizar as várias zonas geotécnicas (*ZG*'s) necessárias à caracterização do terreno para a modelação no PLAXIS 2D, apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores de parâmetros geomecânicos estimados para cada formação interessada (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Material	Formação	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (MPa)	$k_x=k_y$ (m/s)
ZG4A	Areias de praia fluvial	18	30	2	10	$1 \times 10^{-5}$
ZG4B	Depósito de material lançado	18	30	2	10	$1 \times 10^{-5}$
ZG3	Solo residual granítico a maciço decomposto	19	38	5-30	50	$1 \times 10^{-5}$
ZG2	Maciço rochoso granítico	20	40	100	100	$1 \times 10^{-5}$
ZG1	Maciço rochoso granítico	21	40	300	400	$1 \times 10^{-5}$

A definição dos materiais que materializam a ensecadeira, neste caso betão simples e as colunas de *JG*, apresenta-se de seguida, na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Características dos materiais que constituem a ensecadeira (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (GPa)	$k_x=k_y$ (m/s)
Betão simples	24	Elástico linear		31	-
Colunas de <i>JG</i>	21	38	180	1	$1 \times 10^{-8}$

O *software* PLAXIS 2D dispõe de vários modelos que simulam o comportamento de vários tipos de solo. Para o estudo das secções Corte 7, Corte 8 e Corte 10 o modelo constitutivo escolhido foi o *Hardening Soil (HS)*.

Da consulta do manual do *software* e da dissertação de Carvalho, F. M. (2013) o modelo constitutivo *HS* é um modelo avançado de simulação do comportamento de vários tipos de solo (areias, argilas e siltes). O modelo *HS* considera o endurecimento do solo, ao contrário do modelo de *Mohr Coulomb* que é um modelo elástico perfeitamente plástico. Este modelo utiliza três módulos de deformabilidade para a definição do solo.

O *HS* permite uma adequada representação do comportamento do solo muito mais próxima da realidade, no que respeita à simulação dos ciclos de descarga e recarga impostos pelas sucessivas fases de escavação e aplicação do pré-esforço nas pregagens definidas para a estabilidade dos taludes do interior da ensecadeira (Raposo, N. P. (2007)).

Quando um solo é sujeito a um carregamento deviatório mostra um decréscimo na rigidez e desenvolve simultaneamente deformações plásticas. O modelo *HS* simula o aumento de rigidez dos estratos com o aumento da pressão de confinamento, uma vez que na sua definição apresenta uma relação tensão-deformação não linear do tipo hiperbólica. Este modelo considera a dilatância do solo e uma superfície de cedência que não é fixa no espaço de tensões principais, podendo expandir, e ocorrendo durante essa expansão deformações plásticas irreversíveis (Raposo, N. P. (2007)).

No manual do programa PLAXIS 2D, versão 8.2, são sugeridas algumas aproximações, ainda que com algum erro associado, uma vez que nem sempre se conseguem determinar todos os parâmetros nos ensaios laboratoriais ou através de correlações existentes. É então aceitável considerar as seguintes aproximações:

$$E \approx E_{50}^{ref}$$

$$E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$$

$$E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref}$$

Na Tabela 5.3 definem-se os parâmetros geotécnicos do modelo constitutivo *HS* necessários à caracterização do terreno que funda a ensecadeira.

Tabela 5.3: Caracterização dos parâmetros do solo e interface do modelo

Parâmetros	Aterro	ZG4A	ZG4B	ZG3	ZG2	ZG1
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	18	18	19	20	21
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19	19	19	20	21	22
$k_x=k_y$ (m/s)	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
$E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	10000	10000	10000	50000	100000	400000
$E_{oed}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	10000	10000	10000	50000	100000	400000
$E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	30000	30000	30000	150000	300000	1200000
$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	2	2	2	20	100	300
$\phi'$ (°)	30	30	30	38	40	40
$m$ (-)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$\Psi$ (°)	0	0	0	0	0	0
Tipo de material	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
Fator de redução da Interface	Rígida					

### 5.3.2.2 Caracterização dos elementos estruturais metálicos

A caracterização dos vários elementos estruturais metálicos que fundam a ensecadeira foi realizada tendo presente a informação em cada secção considerada e o afastamento dos elementos entre si, para a secção Corte 7 (ver Figura 4.3), secção Corte 8 (ver Figura 4.4) e secção Corte 10 (ver Figura 4.5) expostas previamente no subcapítulo 4.3.1.1.

Estes elementos são definidos no *software* PLAXIS 2D como “*plates*”, caracterizados por metro de desenvolvimento. Considera-se a sua análise em regime elástico, sendo que este pressuposto inicial terá que ser confirmado após o cálculo. Para tal, será necessário verificar os esforços que cada elemento estrutural apresenta e analisar se o seu estado de tensão se encontra em regime elástico.

Os elementos estruturais metálicos e a sua definição para cada secção em estudo, apresentam-se de seguida:

#### Secção Corte 7 e Secção Corte 8:

HEB 140

Rigidez axial: EA/m = 563062,50 kN/m

Rigidez de flexão: EI/m = 1981,88 kN.m<sup>2</sup>/m

Peso: w = 0,2066 kN/m/m

HEB 160

Rigidez axial: EA/m = 712687,50 kN/m

Rigidez de flexão: EI/m = 3270,75 kN.m<sup>2</sup>/m

Peso: w = 0,2612 kN/m/m

Microestaca N80 $\phi 88,9 \times 6 \times 5 \text{mm}$	Pregagens $\phi 25 \text{mm}$ (A500NR)
Rigidez axial: $EA/m = 441000,00 \text{ kN/m}$	Rigidez axial: $EA/m = 49087,39 \text{ kN/m}$
Rigidez de flexão: $EI/m = 377,21 \text{ kN.m}^2/\text{m}$	Rigidez de flexão: $EI/m = 1,92 \text{ kN.m}^2/\text{m}$
Peso: $w = 0,1570 \text{ kN/m/m}$	Peso: $w = 0,0189 \text{ kN/m/m}$

#### Secção Corte 10:

Microestaca N80 $\phi 88,9 \times 6 \times 5 \text{mm} + 1 \phi 25 \text{mm}$ (A500NR)	Pregagens $\phi 25 \text{mm}$ (A500NR)
Rigidez axial: $EA/m = 281859,23 \text{ kN/m}$	Rigidez axial: $EA/m = 49087,39 \text{ kN/m}$
Rigidez de flexão: $EI/m = 191,00 \text{ kN.m}^2/\text{m}$	Rigidez de flexão: $EI/m = 1,92 \text{ kN.m}^2/\text{m}$
Peso: $w = 0,1021 \text{ kN/m/m}$	Peso: $w = 0,0189 \text{ kN/m/m}$

Nesta caracterização não se considerou o betão projetado e malhasol para a contribuição da resistência, tendo este elemento a finalidade de prevenir a erosão dos taludes escavados.

### 5.3.3 Condições de fronteira e da malha de elementos finitos

Após a caracterização das propriedades dos materiais é necessário proceder à definição das condições de fronteira e da malha de elementos finitos.

A definição das condições de fronteira é gerada automaticamente pelo *software* pelo comando “*Standard Fixities*”. Este comando define o limite inferior da secção como simplesmente apoiada e nos limites laterais da secção como apoio móvel, restringindo apenas os deslocamentos horizontais. A malha de elementos finitos é gerada automaticamente com um refinamento global e elementos triangulares de 15 nós.

Gerada a malha de elementos finitos, é necessário definir as tensões iniciais do solo que representem as configurações de geometria, da posição do nível freático e do estado inicial de tensões. As tensões iniciais foram geradas através da fase de cálculo “*Gravity Loading*” e não pelo procedimento de  $K_0$ , sendo que as secções transversais não são horizontais (PLAXIS, (2004)), como sugerido da consulta do manual.

Definidas as condições de fronteira e a malha de elementos finitos, é necessário proceder ao faseamento construtivo de cada secção em estudo. O *software* permite ao utilizador ativar ou desativar elementos definidos previamente em cada fase e, após o seu cálculo, a ferramenta “*Output*” permite visualizar as deformações da estrutura, as tensões que geram no terreno, os esforços atuantes nos elementos estruturais, bem como os caudais percolados.

A fase 0, designada por “*Initial Phase*”, é automaticamente definida pelo programa. Nesta fase o programa calcula os deslocamentos devido ao peso próprio do solo e as condições iniciais. A fase seguinte, fase 25, corresponde ao cálculo das tensões iniciais do solo pelo procedimento “*Gravity Loading*”, como se pode observar na Figura 5.1.

Na fase 1, designada por Início, não há nenhuma alteração da geometria definida previamente. Pretende-se com esta fase verificar, após o cálculo, se as condições de fronteira são válidas e os deslocamentos iniciais da estrutura.

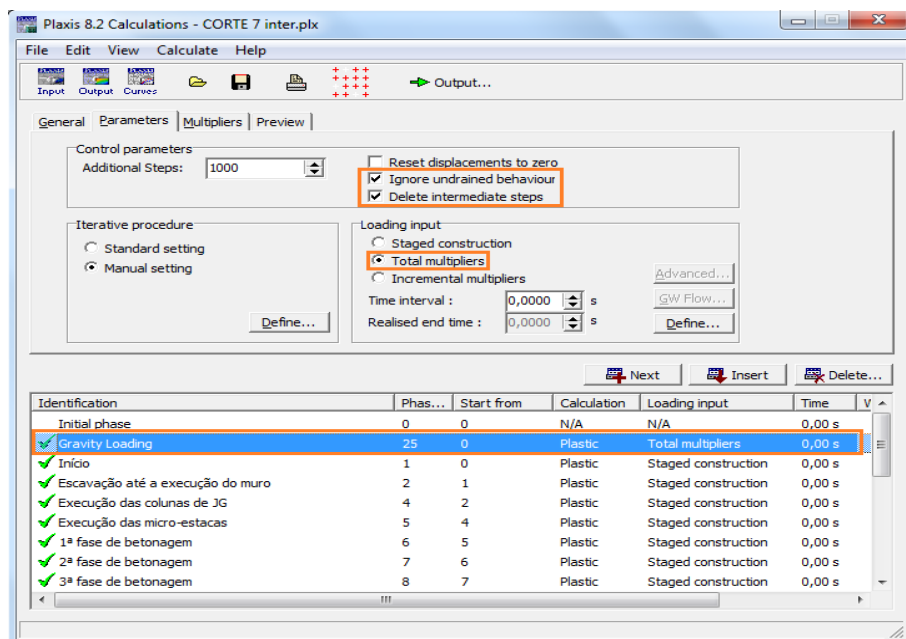


Figura 5.1: Processo de geração das tensões iniciais do modelo – “Gravity Loading”.

A descrição das fases seguintes teve em consideração o processo e faseamento construtivo, como se pode observar para a secção Corte 7 (ver Figura 5.3), para a secção Corte 8 (ver Figura 5.5) e para a secção Corte 10 (ver Figura 5.7), definido anteriormente no subcapítulo 3.5. Das figuras anteriores consegue-se identificar a que fase corresponde o faseamento construtivo, não sendo necessário expor-se individualmente para cada secção. É de referir que foi definido, após algumas fases, o uso do procedimento “*phi-c reduction*”, sendo que este permite a determinação do fator de segurança da fase de cálculo definida anteriormente. No subcapítulo 5.3.5.4 encontra-se toda explicação necessária ao mesmo.

Apresentam-se de seguida para as três secções a geometria inicial e o seu faseamento construtivo considerado.

### 5.3.3.1 Secção do Corte 7

Ilustra-se na Figura 5.2 o descrito anteriormente, no que diz respeito às condições de fronteira da secção Corte 7.

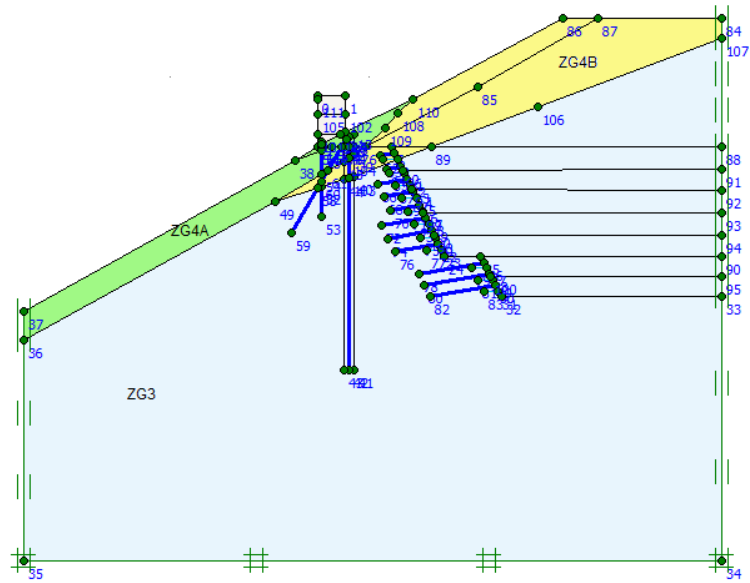


Figura 5.2: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG's para a secção Corte 7.

As fases mais significativas para esta secção, Corte 7, ilustram-se na Figura 5.3.

Identification	Phas...	Start from	Calculation	Loading input	Time	V
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	
→ Gravity Loading	25	0	Plastic	Total multipliers	0,00 s	
→ Início	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Escavação até a execução do muro	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Execução das colunas de JG	4	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Execução das micro-estacas	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1ª fase de betonagem	6	5	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 2ª fase de betonagem	7	6	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 3ª fase de betonagem	8	7	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	27	8	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ Escavação até à cota do muro	26	8	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	30	26	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ 1º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	11	26	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	13	11	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1º Talude - 3º patamar - drenos e pregagens	15	13	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1º Talude - 4º patamar - drenos e pregagens	17	15	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1º Talude - 5º patamar - drenos e pregagens	19	17	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	28	19	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ 2º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	21	19	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 2º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	23	21	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	29	23	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ Término	24	23	Plastic	Staged construction	0,00 s	

Figura 5.3: Definição das várias fases de cálculo - Corte 7.

### 5.3.3.2 Secção do Corte 8

Na Figura 5.4 ilustra-se o descrito no subcapítulo 5.3.3, no que diz respeito às condições de fronteira desta secção.

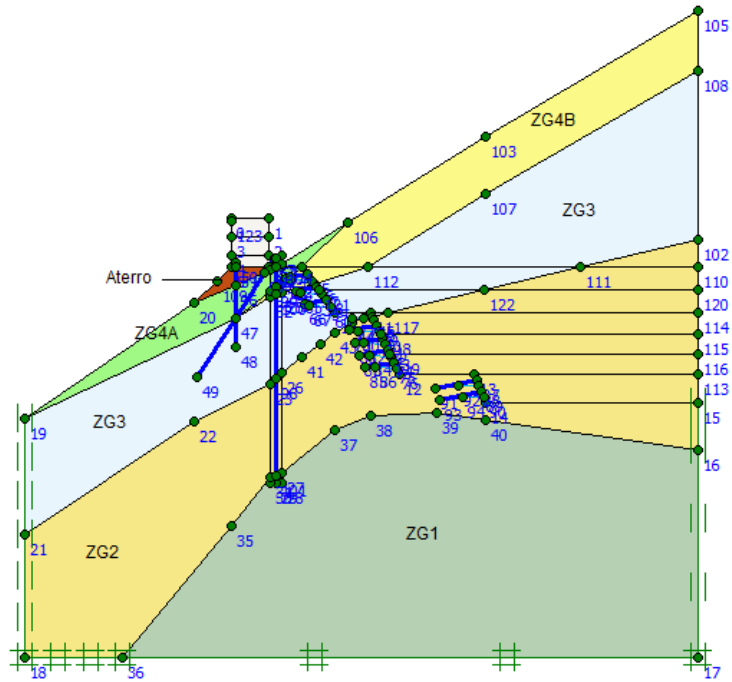


Figura 5.4: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG's para a secção Corte 8.

O faseamento construtivo adotado para esta secção Corte 8 ilustra-se na Figura 5.5.

Identification	Phas...	Start from	Calculation	Loading input	Time	V
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	
→ Gravity Loading	25	0	Plastic	Total multipliers	0,00 s	
→ Início	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Escavação até a execução do muro	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Aterro	27	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Execução das colunas de JG	4	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ Execução das micro-estacas	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1ª fase de betonagem	6	5	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 2ª fase de betonagem	7	6	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 3ª fase de betonagem	8	7	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	28	8	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ Escavação até à cota do muro	26	8	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	29	26	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ 1º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	11	26	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 1º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	13	11	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	30	13	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ 2º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	15	13	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 2º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	17	15	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ 2º Talude - 3º patamar - drenos e pregagens	19	17	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	31	19	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ 3º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	21	19	Plastic	Staged construction	0,00 s	
→ phi-c reduction	32	21	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	
→ Término	24	21	Plastic	Staged construction	0,00 s	

Figura 5.5: Definição das várias fases de cálculo - Corte 8.

### 5.3.3.3 Secção do Corte 10

Na Figura 5.7 ilustra-se a geometria e as condições de fronteira da secção Corte 10.

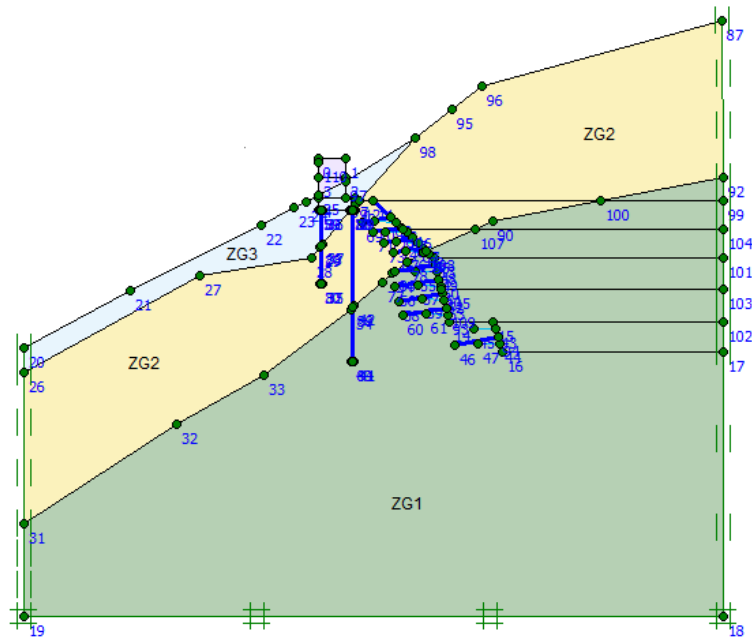


Figura 5.6: Geometria introduzida no modelo e identificação das ZG's para a secção Corte 10.

O fascamento construtivo adotado para esta secção Corte 10 ilustra-se na Figura 5.7.

Identification	Phas...	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	Firs
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	0	0
→ Gravity Loading	25	0	Plastic	Total multipliers	0,00 s	0	1
→ Início	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	1	3
→ Escavação até a execução do muro	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	2	7
→ Execução das colunas de JG	4	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	4	9
→ Execução das micro-estacas	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 s	5	16
→ 1ª fase de betonagem	6	5	Plastic	Staged construction	0,00 s	6	20
→ 2ª fase de betonagem	7	6	Plastic	Staged construction	0,00 s	7	25
→ 3ª fase de betonagem	8	7	Plastic	Staged construction	0,00 s	8	27
→ phi-c reduction	28	8	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	8	29
→ Escavação até à cota do muro	26	8	Plastic	Staged construction	0,00 s	26	479
→ phi-c reduction	29	26	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	26	481
→ 1º Talude - 1º patamar - drenos e preg...	11	26	Plastic	Staged construction	0,00 s	11	931
→ 1º Talude - 2º patamar - drenos e preg...	13	11	Plastic	Staged construction	0,00 s	13	933
→ 1º Talude - 3º patamar - drenos e preg...	15	13	Plastic	Staged construction	0,00 s	15	935
→ 1º Talude - 4º patamar - drenos e preg...	17	15	Plastic	Staged construction	0,00 s	17	939
→ phi-c reduction	30	17	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	17	184
→ 2º Talude - 1º patamar - drenos e preg...	19	17	Plastic	Staged construction	0,00 s	19	139
→ phi-c reduction	31	19	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s	19	139
→ Término	27	19	Plastic	Staged construction	0,00 s	27	184

Figura 5.7: Definição das várias fases de cálculo - Corte 10.

### 5.3.4 Validação do modelo

O objetivo do desenvolvimento do PLAXIS 2D foi dotar, sobretudo os engenheiros na área da Geotecnia, de uma ferramenta prática para a análise de soluções geotécnicas.



O PLAXIS 2D é um *software* robusto, suportado teoricamente por procedimentos matemáticos e de fácil interação com o utilizador. O seu desenvolvimento só foi possível através da contribuição de inúmeras pesquisas realizadas pelas Universidades, Institutos de pesquisa e da contribuição de vários gabinetes de projeto por todo o mundo (Fonte, J. B. (2010)), estando pelo descrito assegurada a validação do modelo.

De seguida, tratou-se de validar os resultados obtidos com os registos cedidos do Plano de Monitorização (PM), exposto no subcapítulo 3.6.

### 5.3.5 Apresentação e validação dos resultados

Descritas as geometrias das secções em estudo é agora necessário definir as condições iniciais em cada uma. Um aspeto muito importante a ter em consideração no início desta modelação numérica é a posição do nível freático. A sua posição inicial situa-se à cota de 146,00 m, permanecendo inalterada até à 3ª fase de betonagem, como se pode observar na Figura 5.8.

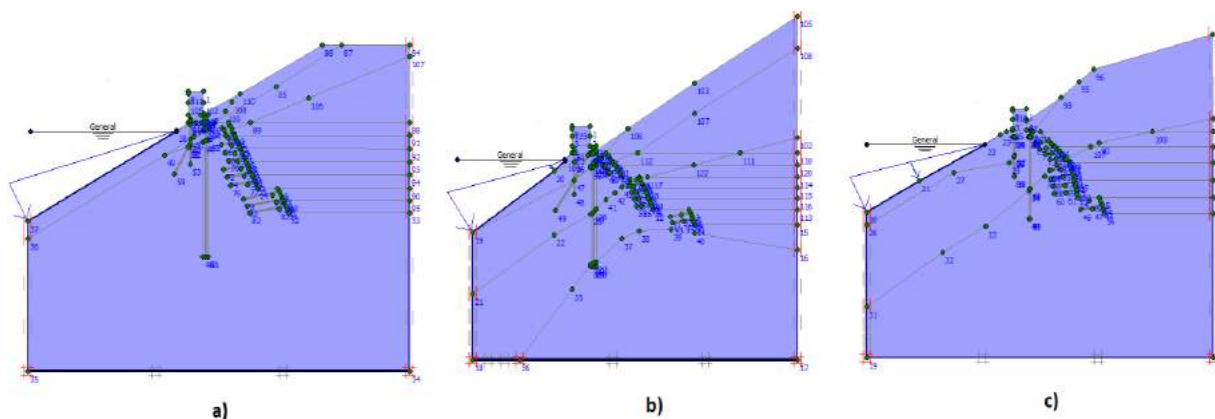


Figura 5.8: Posição inicial do nível freático à cota 146,00 m: a) secção Corte 7, b) secção Corte 8 e c) secção Corte 10.

Como referido no capítulo anterior a utilização do *software* SEEP/W permitiu a determinação da linha de saturação para a secção Corte 7 (ver Figura 4.9), para a secção Corte 8 (ver Figura 4.10) e para a secção Corte 10 (ver Figura 4.11). Nas fases seguintes do faseamento construtivo o nível de água na albufeira sobe para a cota 153,00 m, situação corresponde ao Nível Máximo de Cheia actual ( $NMC_{act}$ ). A posição do nível freático no interior da escavação vai acompanhando a cota de escavação, à medida que os trabalhos decorrem até se atingir a cota final definida em projeto para cada secção em estudo, apresentadas no capítulo 4. Na sua definição é necessário ao utilizador, em cada fase de cálculo, traçar a mesma no *software* PLAXIS 2D, sendo que a versão em uso não possibilita a sua determinação automática.

Outro aspeto importante no decorrer da modelação numérica, de cada secção, foi a definição de cada patamar escavado como “*Cluster dry*”, de modo a que o *software* o considere como estando a seco. Os outros patamares por escavar, até que se atingisse a cota final de escavação, foram definidos como “*Interpolate from adjacent clusters or lines*”, permitindo ao *software* estabelecer as condições finais automaticamente, como se pode observar na Figura 5.9.

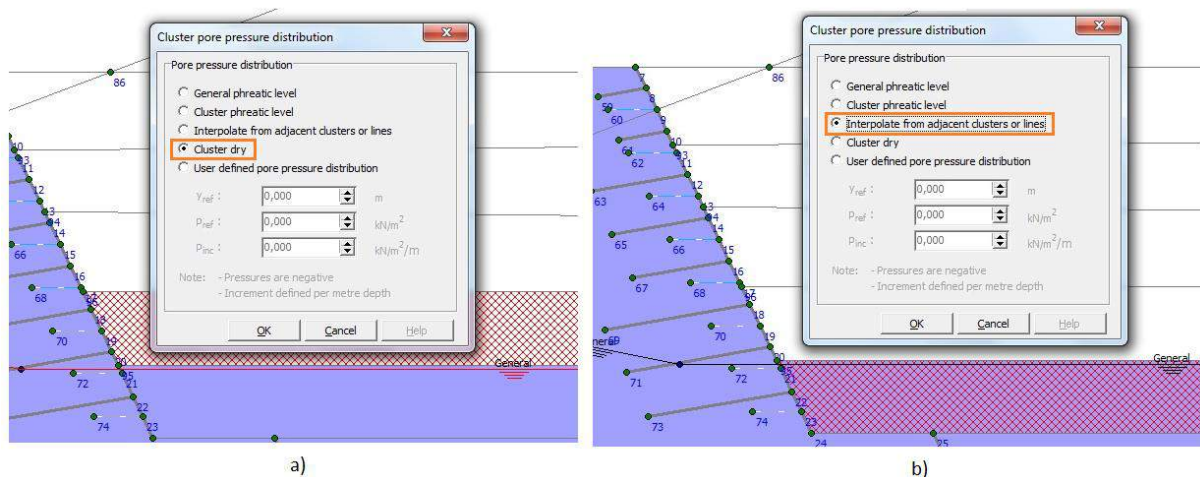


Figura 5.9: Condições de fronteira para as fases de escavação definidas: a) patamar escavado e b) patamar por escavar.

Não foram consideradas sobrecargas nos patamares de escavação por estas serem variáveis e favoráveis à estabilidade global do talude. Da face do talude mais próximo até ao emboquilhamento do túnel para a construção do DCC distam cerca de 24 metros, considerando-se ser suficiente para não serem consideradas quaisquer outras sobrecargas.

O *software* PLAXFLOW, outro programa disponível comercialmente pela empresa PLAXIS, permite a análise em regime uniforme e em regime transitório da percolação da água nos solos, definindo automaticamente através de um algoritmo a posição do nível freático em função das propriedades dos solos. Contudo para a realização deste trabalho só foi possível a obtenção de uma licença de estudante que se encontra limitada à definição de apenas dois tipos de solos para a mesma secção. Devido a esta limitação não foi possível a sua utilização na modelação numérica da solução executada.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos da modelação e posterior validação dos mesmos, através dos registos disponibilizados da monitorização da ensecadeira, como mencionado no subcapítulo 4.3.5, aquando da utilização do *software* SEEP/W.

### 5.3.5.1 Deslocamentos

Os primeiros resultados que se expõem desta modelação são as deformadas da malha, os deslocamentos horizontais e os deslocamentos verticais no final da escavação.

Apresenta-se de seguida a deformada final (ver Figura 5.10) e os deslocamentos obtidos para a secção Corte 7 (ver Figura 5.11). Da análise da Figura 5.11, observar-se que os deslocamentos horizontais máximos, 44 mm, ocorrem nos primeiros metros de profundidade no interior do talude de escavação, com direcção para o seu interior.

No topo do muro de betão o deslocamento horizontal máximo é de 40 mm com a mesma direcção para o interior da escavação, sendo que esta estrutura apresenta um comportamento semelhante a uma consola ao longo do seu desenvolvimento longitudinal em planta. Refere-se porém que a fundação do muro não se pode

considerar como um encastramento puro, mas sim como um conjunto de três molas que simulam a rigidez do solo, na direção horizontal, direção vertical e uma de rotação.

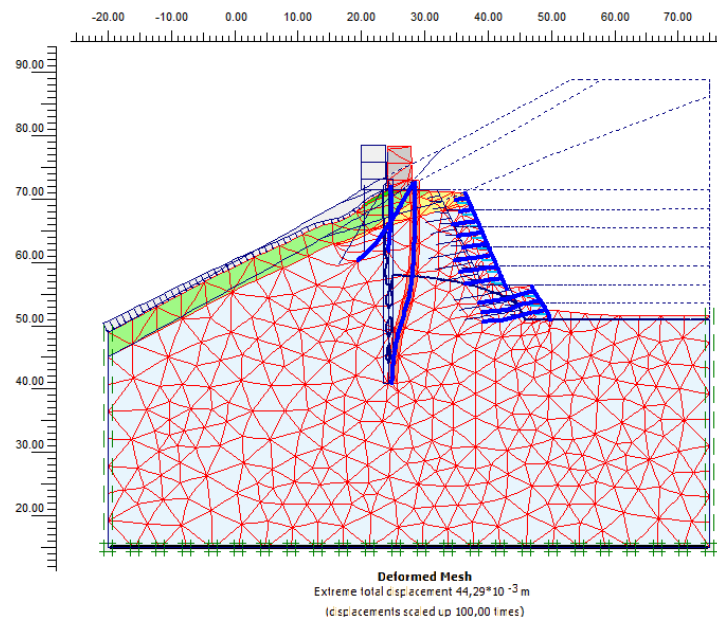


Figura 5.10: Deformada final da modelação da secção Corte 7 – ampliada 100 vezes.

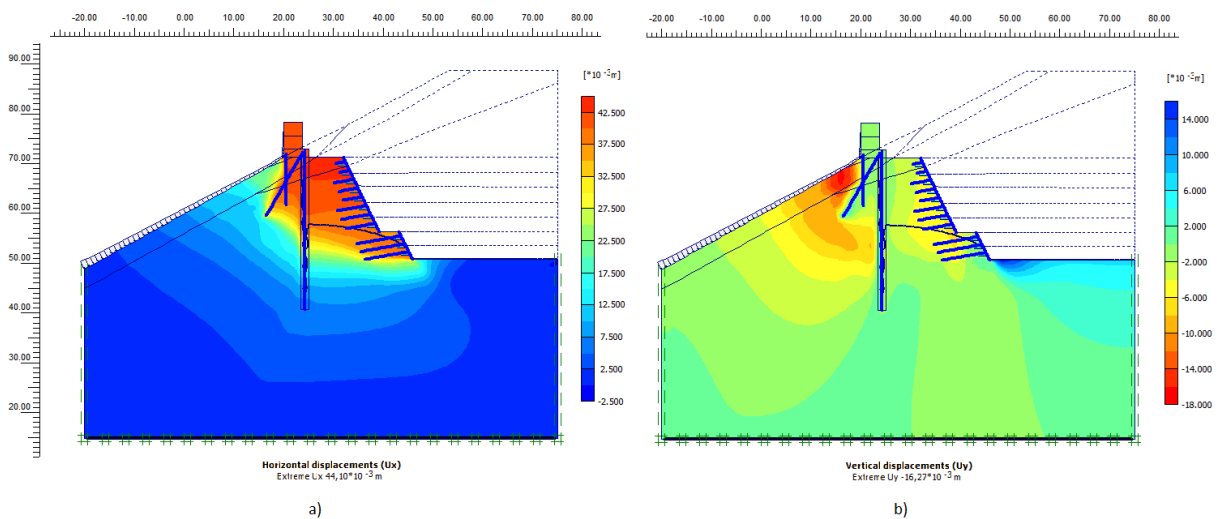


Figura 5.11: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 7: a) horizontais (deslocamento máximo 44,10 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 16,27 mm).

Relativamente aos deslocamentos verticais desta secção Corte 7, o valor máximo ocorre na ZG4A, junto do perfil HEB 140. Este deslocamento é devido ao movimento que o muro de betão após betonado apresenta para o interior da albufera, quando o nível de água se encontra ainda à cota 146,00 m. O valor de assentamento máximo é de 16 mm. Refere-se ainda que o valor de empolamento máximo é de 13 mm situado no último patamar de escavação à cota de 126,00 m.

No que diz respeito à secção Corte 8, a sua deformada final apresenta-se na Figura 5.12. De acordo com a Figura 5.13 o deslocamento horizontal máximo ocorre imediatamente abaixo da base do muro de betão entre as colunas de *JG* e o 1º talude escavado, de valor igual a 31 mm para o interior da escavação.

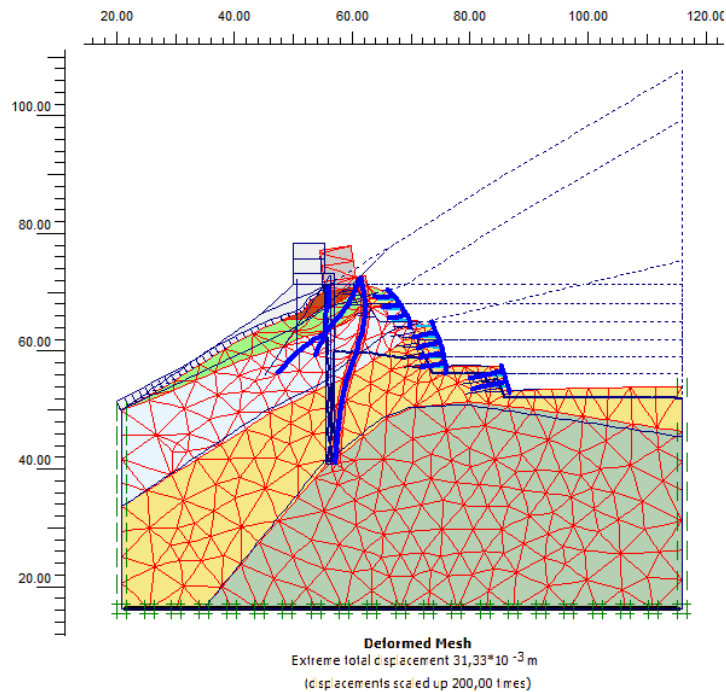


Figura 5.12: Deformada final da modelação da secção Corte 8 – ampliada 200 vezes.

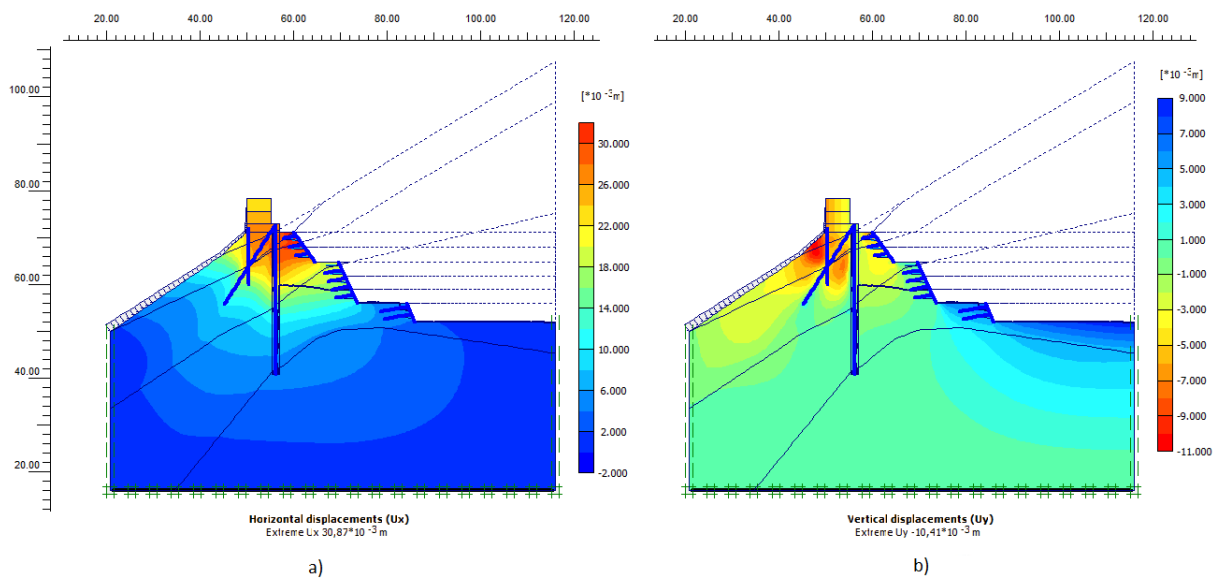


Figura 5.13: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 8: a) horizontais (deslocamento máximo 30,87 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 10,41 mm).

Relativamente aos deslocamentos verticais desta secção o assentamento máximo verifica-se junto do perfil HEB 140, no interior do Aterro e da ZG4A, de 11 mm. O valor máximo de empolamento ocorre no último

patamar de escavação à cota 127,25 m, de valor igual a 8 mm, devido à remoção de material afeto à escavação do talude.

A malha da secção Corte 10 na configuração deformada ilustra-se na Figura 5.14. Para esta secção os deslocamentos horizontais ocorrem no topo do muro de betão que constitui a enscadeira, como se observa da Figura 5.15, de valor máximo de 15 mm com sentido para o interior da escavação.

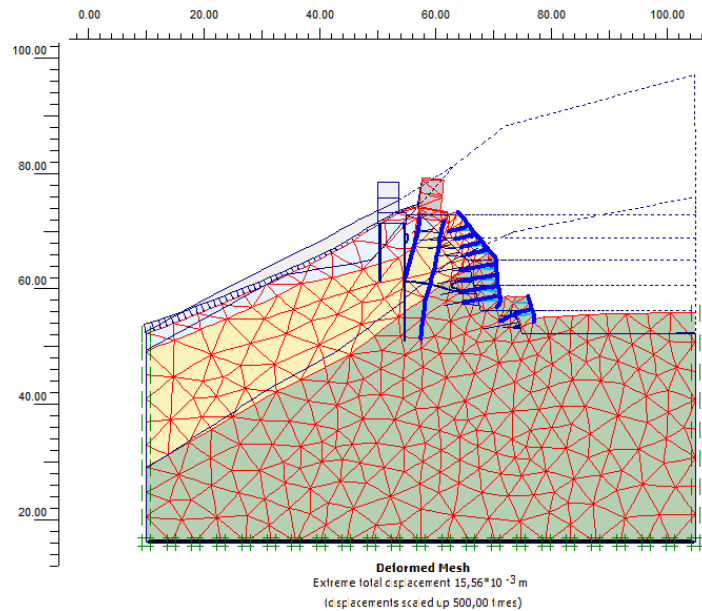


Figura 5.14: Deformada final da modelação da secção Corte 10 – ampliada 500 vezes.

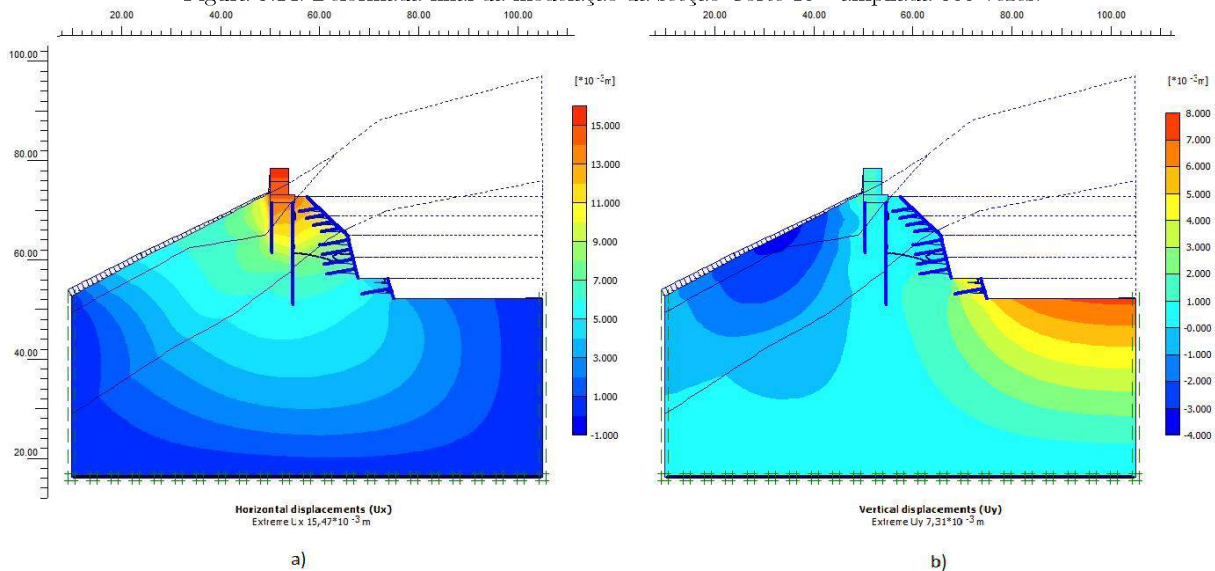


Figura 5.15: Deslocamentos finais da modelação da secção Corte 10: a) horizontais (deslocamento máximo 15,47 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 7,31 mm).

No que diz respeito à fundação do muro de betão nesta secção este está fundado através de um par de microestacas constituídas por um perfil N80 mais um varão  $\varnothing 25$  mm (A500NRSD). Os deslocamentos verticais junto das mesmas são nulos, como se pode observar da figura mencionada anteriormente. O valor do

empolamento máximo é de aproximadamente 7 mm, ocorrendo junto do talude para último patamar de escavação à cota de 127,25 m.

### 5.3.5.2 Inclinómetros

Os inclinómetros são instrumentos que permitem quantificar deslocamentos que se verifiquem na direção perpendicular ao eixo do aparelho. Estes dispositivos podem ser instalados numa posição vertical, sub-vertical ou horizontal, dependendo do tipo de movimento esperado, permitindo a monitorização de deformações do terreno e da estrutura em que se inserem. Na Figura 5.16 ilustra-se a constituição de um inclinómetro e o seu princípio de funcionamento.

A sua constituição está dividida em quatro partes:

- tubo de secção transversal circular e ranhurada geralmente em PVC (porém também existem em alumínio), de modo a acompanhar as deformações do terreno ou da estrutura que está solidarizado;
- sonda constituída por um ou mais sensores;
- unidade de leitura e apresentação de dados;
- cabo elétrico graduado ao longo do seu comprimento com função de ligação e de transporte da sonda ao longo do tubo.

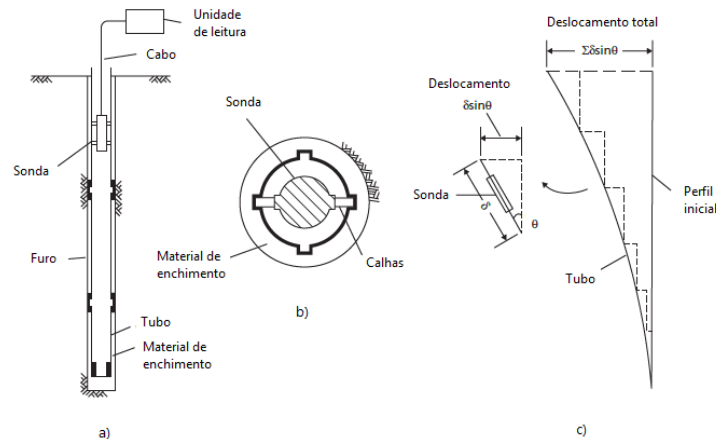


Figura 5.16: Inclinómetro: a) seção transversal do tubo e componentes necessários, b) pormenor de topo do tubo e c) método de cálculo (adaptada de Knappett, J. A. & Craig, R. F., (2012)).

A secção Corte 7 (ver Figura 4.3) não tem nenhum inclinómetro instalado, contudo a uma distância de cerca de 13 metros encontram-se dois inclinómetros instalados, um no topo e outro na base do muro de betão, designada esta secção por Corte 6 (ver Anexo V, Desenho N<sup>o</sup>5). Da consulta das peças desenhadas disponibilizadas é possível observar que o zonamento geotécnico da secção Corte 6 (ver Anexo VI, Desenho N<sup>o</sup>6) é muito semelhante ao definido para a secção Corte 7. O muro de betão e os elementos metálicos resistentes responsáveis pela sua fundação são idênticos, porém a inclinação dos taludes de escavação é mais suave e não dispõe de pregagens para o seu confinamento.



Da observação da Figura 5.17 é identificada a localização, a cota da água na albufeira, a cota de escavação atingida e o registo dos deslocamentos do inclinómetro EI4, instalado na base do muro da secção Corte 6. Da modelação bidimensional realizada apenas o registo “A” será analisado para a validação dos resultados obtidos para as três secções em estudo. Refere-se que entre a profundidade de 4 m (cota 142,5 m) até à profundidade de 10 m (cota 136,5 m) o registo é cerca de 40 mm para o interior da escavação.

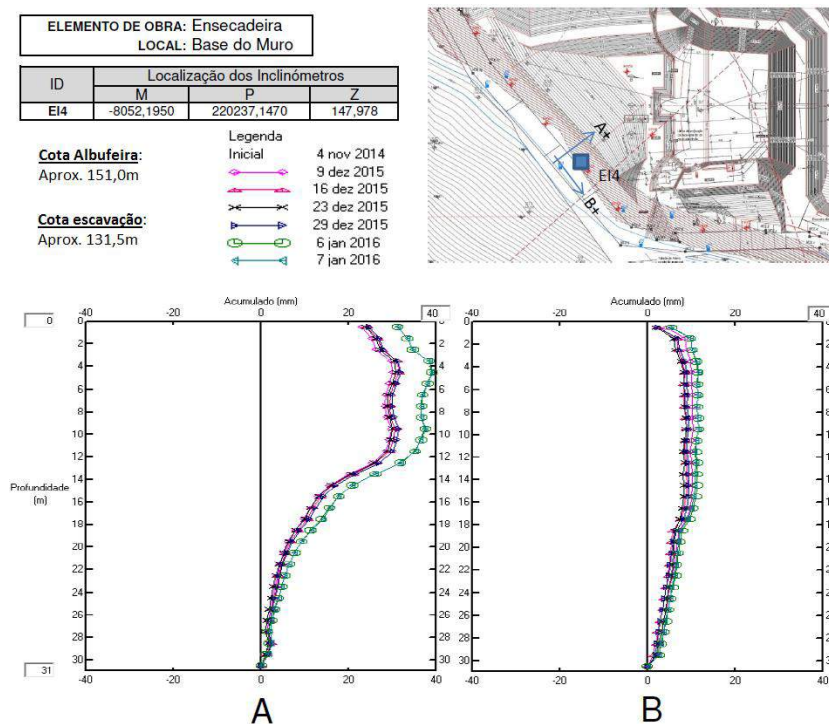


Figura 5.17: Localização e registo do Inclinómetro EI4 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).

No que se refere à secção Corte 8 (ver Figura 4.4) esta dispõe também de dois inclinómetros, um no topo e outro na base do muro de betão, à semelhança do que foi descrito anteriormente. Na Figura 5.18 é possível observar o aumento do deslocamento para o interior da escavação, do dia 29/12/2015, até então constante, para o dia 06/01/2016 com a subida da água da albufeira para a cota de 151,0 m, apenas a 2 m de se atingir o  $NMC_{act}$ . O registo máximo é de aproximadamente de 10 mm.

Salienta-se que este inclinómetro EI6A foi instalado posteriormente, tendo o seu registo início em 7 de Setembro de 2015 e não a 4 de Novembro de 2014, quando se deu início ao registo dos inclinómetros instalados na ensecadeira. Este inclinómetro EI6A substituiu o inclinómetro EI6 instalado inicialmente, uma vez que este se encontrava inoperacional. O registo máximo de 10 mm não contempla os deslocamentos anteriores à sua instalação, que certamente seriam superiores ao registado.

A secção Corte 10 (ver Figura 4.5) não dispõe também de nenhum inclinómetro instalado, à semelhança do que sucede com a secção Corte 7. Da consulta dos registos disponibilizados consta a secção Corte 9 (ver Anexo V, Desenho N<sup>o</sup>5), afastada em 14,5 m da secção Corte 10, sendo esta secção muito semelhante à secção Corte 10 modelada, desde a fundação do muro de betão, à inclinação e suporte dos taludes de escavação das duas secções e do seu zonamento geotécnico. O inclinómetro EI8 regista um valor máximo de 22 mm, à profundidade de 2 m, como se pode observar da consulta da Figura 5.19.

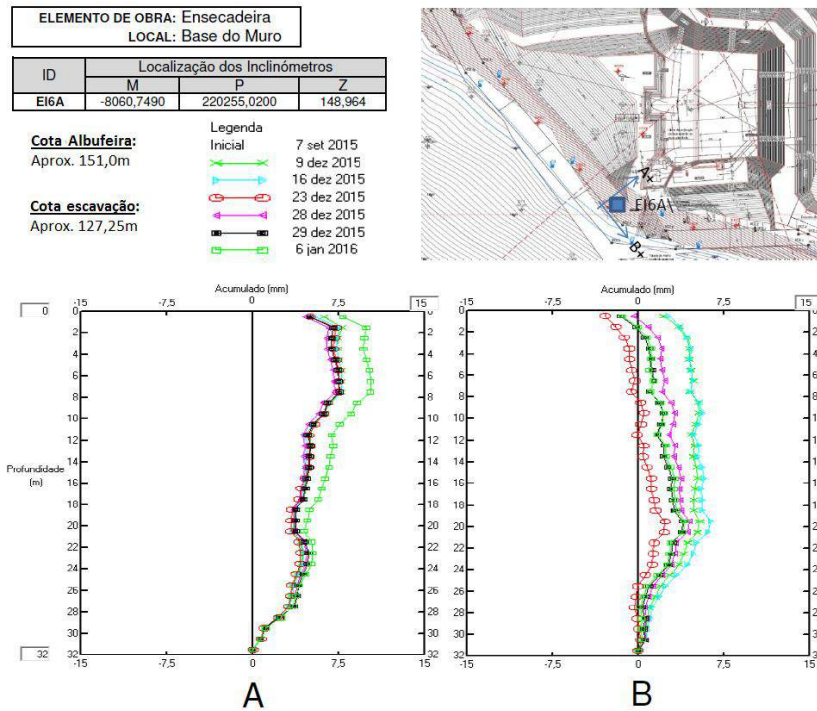


Figura 5.18: Localização e registo do Inclínómetro EI6A (adaptada de Mota-Engil, (2016)).

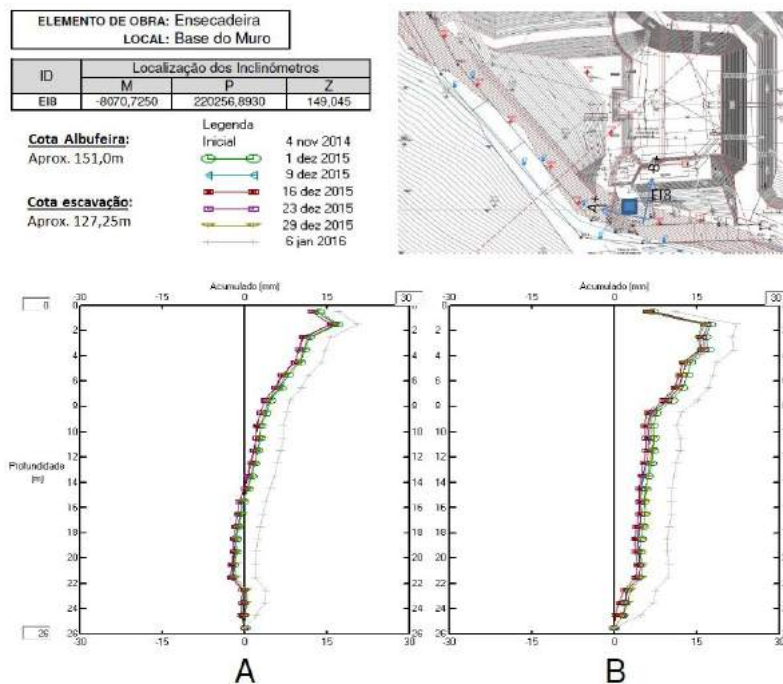


Figura 5.19: Localização e registo do Inclínómetro EI8 (adaptada de Mota-Engil, (2016)).

**Nota:** É de referir que não foi possível a consulta da marca e modelo dos piezómetros utilizados, não sendo possível indicar a precisão e exatidão do equipamento.



### 5.3.5.3 Esforços

Concluída a modelação numérica das secções em estudo foi necessário validar o pressuposto definido inicialmente de que os elementos definidos como “plate” estariam em regime elástico. Para tal, inspecionaram-se para a última fase de cálculo, correspondente ao último patamar de escavação, o “Output” respetivo e foi consultada a tabela relativa aos “Force envelopes” de cada elemento metálico estrutural definido para cada secção Corte. A tabela genérica da envolvente de esforços que o *software* PLAXIS 2D apresenta ao utilizador ilustra-se na Figura 5.20.

Para a verificação da segurança, considerando apenas em regime elástico, foi empregada a Teoria da Energia de Distorção Máxima, também designado por critério de cedência de von Mises, para o caso bidimensional a cada elemento metálico resistente, e determinado o fator de segurança para cada nó que o *software* discriminou para o elemento “plate” em análise.

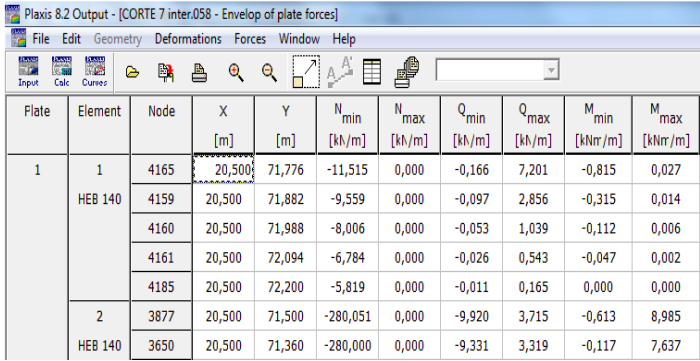


Plate	Element	Node	X [m]	Y [m]	N <sub>min</sub> [kN/m]	N <sub>max</sub> [kN/m]	Q <sub>min</sub> [kN/m]	Q <sub>max</sub> [kN/m]	M <sub>min</sub> [kNm/m]	M <sub>max</sub> [kNm/m]
1	1 HEB 140	4165	20,500	71,776	-11,515	0,000	-0,166	7,201	-0,815	0,027
		4159	20,500	71,882	-9,559	0,000	-0,097	2,856	-0,315	0,014
		4160	20,500	71,988	-8,006	0,000	-0,053	1,039	-0,112	0,006
		4161	20,500	72,094	-6,784	0,000	-0,026	0,543	-0,047	0,002
		4185	20,500	72,200	-5,819	0,000	-0,011	0,165	0,000	0,000
	2 HEB 140	3877	20,500	71,500	-280,051	0,000	-9,920	3,715	-0,613	8,985
		3650	20,500	71,360	-280,000	0,000	-9,331	3,319	-0,117	7,637

Figura 5.20: Tabela genérica dos esforços de um elemento “plate”, com a sua designação, identificação das coordenadas e dos esforços atuantes mínimo e máximo.

Encontram-se em Anexo as tabelas

correspondentes às secções Corte em estudo, para os elementos metálicos resistentes que as constituem. Será interpretada apenas a envolvente de esforços do perfil HEB 140 da secção Corte 7, ilustrado na Figura 5.21, sendo que a mesma metodologia é análoga aos restantes elementos resistentes metálicos que constituem esta secção e as restantes secções Corte estudadas.

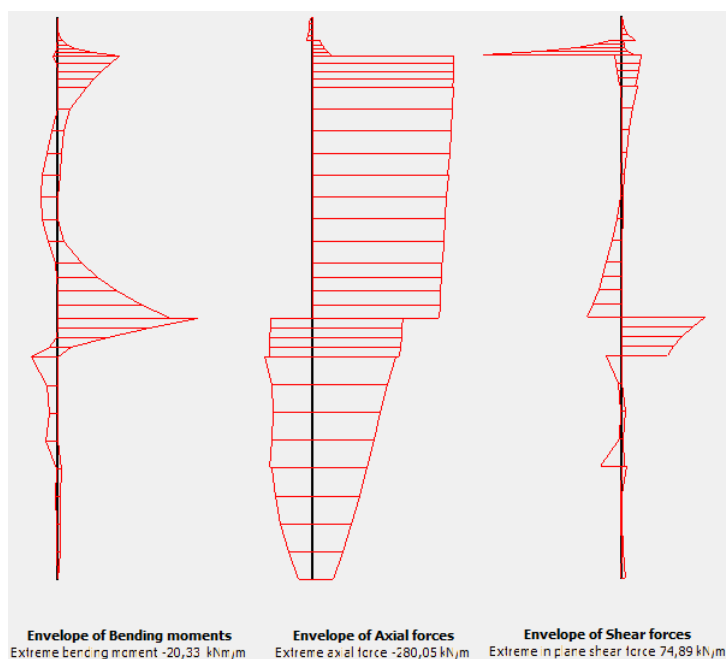


Figura 5.21: Envolvente de esforços do perfil HEB 140 da secção Corte 7: a) momento fletor (valor máximo de -20,33 kN.m/m), b) axial (valor máximo de -280,05 kN/m) e c) transversa (valor máximo de 74,89 kN/m).

Da observação da Figura 5.21 é notório o pico de esforços que ocorre na extremidade superior do perfil, representando a mudança brusca de rigidez entre o muro de betão simples e o solo abaixo deste, caracterizado como ZG4A. Sensivelmente a meio deste elemento temos a influência da transição entre as camadas geotécnicas ZG4B e ZG3 (ver Figura 4.3), que pode ser interpretado como se de um apoio simples se tratasse, tendo o diagrama de esforços transversos e de momento fletor o desenvolvimento espectável, como se pode observar.

**Nota:** Para as restantes secções Corte em estudo é possível, da consulta em Anexo, observar que a transição entre as diferentes zonas geotécnicas, descritas no subcapítulo 3.3.1, correspondem a apoios fixos por serem pontos locais de transição abrupta de rigidez do solo, como fora descrito.

#### 5.3.5.4 Fatores de segurança – phi-c reduction

No *software* PLAXIS 2D, o procedimento de redução da resistência ao corte dos solos designa-se por *phi-c reduction* e permite a determinação de valores do fator de segurança de várias fases construtivas que se pretendam conhecer. Esta opção pode ser selecionada como uma “*Calculation type*” em separado no painel geral de PLAXIS 2D 8.2 Calculations.

Este procedimento reduz sucessivamente os parâmetros resistentes do solo, o ângulo de atrito ( $\tan \phi$ ) e a coesão ( $c$ ) até que a rutura do solo ocorra. As resistências de elementos estruturais definidos no modelo, como por exemplo “*plates*” e “*anchors*” não são afetadas quando se usa o procedimento *phi-c reduction* (Fonte, J. B. (2010)).

A opção “*total multiplier*”  $\sum Msf$  permite definir os valores resistentes do solo numa fase construtiva que se está a analisar através da Equação [5.1]:

$$\sum Msf = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad [5.1]$$

sendo que os parâmetros com o subscrito “*input*” se referem às propriedades dos materiais introduzidos inicialmente no modelo e os parâmetros com o subscrito “*reduced*” às propriedades reduzidas do decorrer da análise do procedimento *phi-c reduction*. O  $\sum Msf$  é definido igual a 1,0 no início do cálculo de modo a que os valores introduzidos inicialmente não sejam reduzidos (Fonte, J. B. (2010)).

Na janela de “*Multipliers*” o valor de  $Msf$  em “*Incremental multipliers*” é usado na definição do incremento que o utilizador quer para redução das resistências se inicie, sendo este valor por defeito igual a 0,1, considerado como um bom valor inicial para o cálculo. Posteriormente os parâmetros resistentes são automaticamente reduzidos até que se atinga o valor de “*Additional steps*” que o utilizador definiu inicialmente, sendo por defeito igual a 100, podendo atingir um valor de até 1000. Nas diferentes secções em estudo a escolha do valor de “*Additional steps*” nas diferentes fases construtivas definidas foi de 750.

É necessário após o fim do cálculo verificar a ocorrência do mecanismo de rutura da última iteração. O valor do fator de segurança é dado pela Equação [5.2]:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \sum Msf \text{ at failure} \quad [5.2]$$

Se durante o cálculo não se formar um mecanismo de rotura este deve ser repetido, aumentando os valores de “*Additional steps*” até que este consiga convergir.

Para as secções em estudo os valores de fator de segurança obtidos para as fases construtivas mais importantes apresentam-se de seguida na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Fatores de segurança obtidos para as fases construtivas mais significativas das secções em estudo, através do processo redução *phi-c*.

Secção	Após betonagem do muro	Subida do nível da albufeira para a cota 153,00 m	Escavação até à 1 <sup>a</sup> banqueta	Escavação até à 2 <sup>a</sup> banqueta	Escavação até à 3 <sup>a</sup> banqueta
Corte 7	1,86	1,63	1,43	1,33	-
Corte 8	2,17	1,91	1,52	1,34	1,28
Corte 10	3,19	3,05	2,67	2,03	-

### 5.3.5.5 Medição do caudal

Procedeu-se à análise dos caudais percolados para o interior da escavação de cada secção em estudo. Para a sua quantificação foi adotado o princípio da conservação da massa, ou lei de Lavoisier, que enuncia que a massa é conservada, quaisquer que sejam as modificações químicas e/ou físicas que a matéria sofra. Dividiu-se cada secção em dois segmentos de reta verticais, o primeiro imediatamente a jusante das colunas de *JG* e o segundo segmento de reta no extremo de cada secção, correspondente ao interior da escavação, como se ilustra na Figura 5.22 a título exemplificativo para a secção Corte 7. No caso da secção Corte 10, o primeiro segmento vertical corresponde à localização do segundo perfil N80+1 $\phi$ 25mm, a tardoz do muro.

A determinação do caudal percolado para o interior da escavação é obtido através da diferença entre os valores dos dois segmentos de reta considerados em cada secção, correspondentes ao último patamar de escavação, sendo que este corresponde à maior diferença de potencial hidráulico possível.

Apresenta-se de seguida, na Tabela 5.5, os caudais obtidos da modelação numérica.

Tabela 5.5: Caudais percolados em cada secção em estudo.

Secção	Imediatamente a jusante das colunas de <i>JG</i> (l/dia/m)	Final da secção (l/dia/m)	Caudal a bombear (l/dia/m)
Corte 7	12912	4718	8193
Corte 8	11234	3907	7327
Corte 10	12721	4272	8449

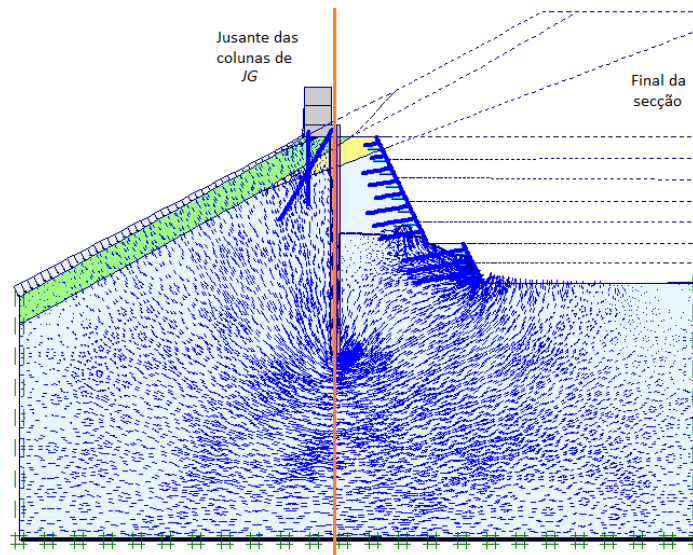


Figura 5.22: Localização dos dois segmentos considerados para a determinação do caudal percolado em cada secção.

### Secção Corte 2

De modo a estimar o caudal percolado total para o interior da escavação foi necessário estudar uma secção adicional, a secção Corte 2, ilustrada na Figura 5.23 (ou no Anexo VII, Desenho N<sup>o</sup>7). A escolha desta secção teve como critério o reduzido comprimento das colunas realizadas em JG na camada ZG3, como se pode observar da consulta do Anexo VI (Desenho N<sup>o</sup>6), e da confirmação em obra de um maior caudal percolado na zona circundante a esta secção.

O objetivo do estudo desta secção passa apenas pela determinação do caudal expectável de percolar para o interior da escavação e delimitar as áreas de influência de cada secção Corte, de modo a determinar o caudal afluyente total ao interior da escavação.

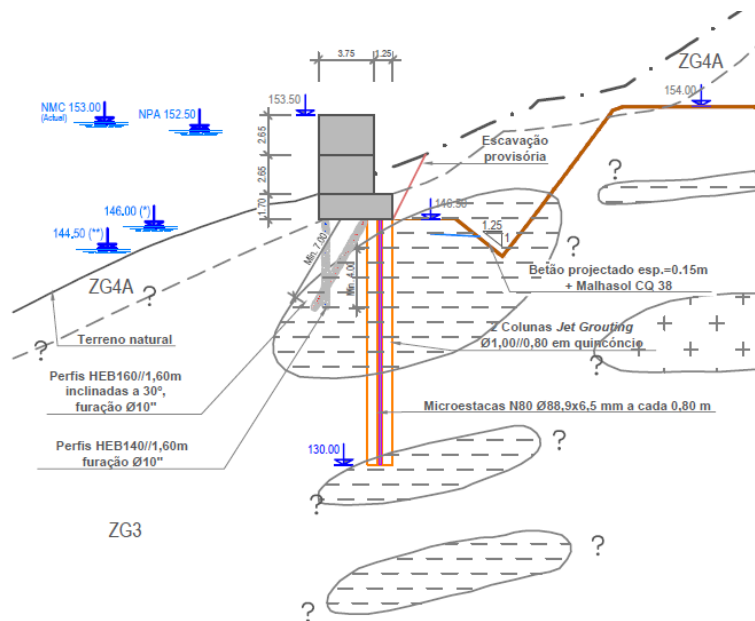


Figura 5.23: Secção Corte 2 - Peças Desenhadas (adaptada de Pinto et al., (2014)).

Todo o processo relativo à modelação numérica anteriormente realizada para as secções Corte 7, Corte 8 e Corte 10 foi repetido para esta secção, com recurso ao *software* SEEP/W e PLAXIS 2D, não sendo expostas novamente.

Apresentam-se agora os resultados obtidos da modelação numérica do SEEP/W na Figura 5.24 e do PLAXIS 2D na Figura 5.25.

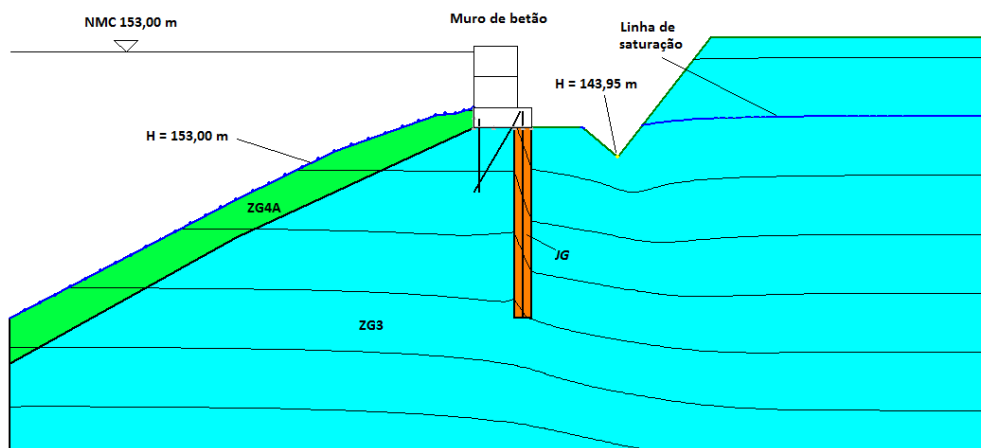


Figura 5.24: Secção Corte 2 - condições de fronteira e linha de saturação obtida através do *software* SEEP/W.

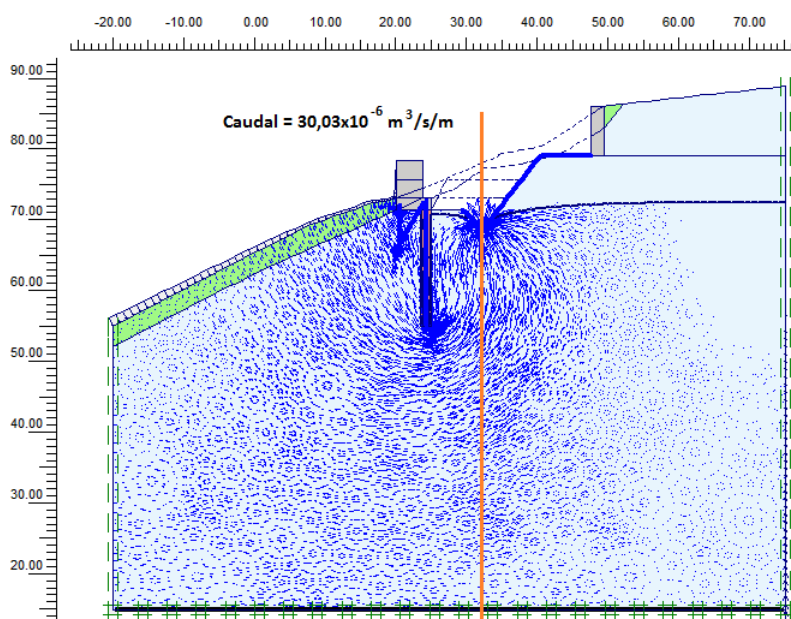


Figura 5.25: Caudal percolado para o interior da escavação,  $30,03 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para secção Corte 2.

É necessário referir o pressuposto definido para a determinação do caudal desta secção, uma vez que da sua observação transversal não é óbvia a sua escolha. Considerou-se através do resultado obtido do *software* SEEP/W e da consulta em planta de todo o desenvolvimento da ensecadeira (ver Anexo VI, Desenho N°6), que o caudal percolado através da linha a cor laranja, Figura 5.25, irá percolar para o interior da escavação, sendo este o caminho com menor resistência à percolação, como se pode observar da consulta do Anexo V (Desenho N°5) para a zona envolvente à secção Corte 2.

Este trabalho apoiado pelos *softwares* (bidimensionais), pretende a análise de um fenómeno tridimensional (percolação da água), limitando à partida a precisão do caudal determinado para o interior da escavação. O estudo do encontro esquerdo da ensecadeira, onde se localiza a secção adicional Corte 2, apoiado com *softwares* tridimensionais seria relevante, acrescentando rigor ao caudal percolado e maior compreensão dos fenómenos de desestabilidade, que atendendo às características geológico-geotécnicas possam ser formados neste encontro.

A definição da área de influência de cada secção e conseqüentemente o caudal expectável de percolar em cada uma foi determinado através da informação contida no “Alçados esquemáticos” no Anexo VI (Desenho N°6), tendo-se respeitado o comprimento da cortina executada para cada secção. Os resultados obtidos expõem-se de seguida na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Caudais parciais de cada secção analisada e o caudal total expectável de percolar para o interior da ensecadeira do DCC.

Secção	Caudal a bombear (l/dia/m)	Área de influência (m)	Caudal parcial (l/dia)
Corte 7	7162	39,3	281097
Corte 8	7327	31,3	228960
Corte 10	8276	12,5	103453
Corte 2	2595	25,0	64865
Caudal total:			678375 l/dia

Como previsto no PM, subcapítulo 3.6.2, foram instalados sistemas que permitem a quantificação dos caudais infiltrados, através da ensecadeira. O registo do caudal bombeado no interior da ensecadeira disponibilizado aquando a realização deste trabalho apresenta-se na Figura 5.26.

MEDIÇÃO DE CAUDAL							
Data	Hora	Tipo de Medição (m)	Volume da unidade de capacidade	Tempo	Caudal (l/s)	Utilização de água de furação	Precipitação
28-07-2015	16:00	0,2			24,69		
29-07-2015	11:50	0,2			24,69		
30-07-2015	10:30	0,2			24,69		
31-07-2015	11:10	0,2			24,69		
03-08-2015	15:30	0,2			24,69		
04-08-2015	10:30	0,19			21,72		
05-08-2015	11:00	0,22			31,33		
06-08-2015	09:45	0,19			21,72		
07-08-2015	10:00	0,19			21,72		
10-08-2015	11:15	0,19			21,72		
11-08-2015	10:45	0,17			16,44		
12-08-2015	11:45	0,22			31,33		
13-08-2015	15:45	0,16			14,13		
14-08-2015	11:30	0,22			31,33		
17-08-2015	16:30	0,23			35,01		
18-08-2015	11:00	0,23			35,01		
19-08-2015	11:00	0,23			35,01		
20-08-2015	10:15	0,23			35,01		
21-08-2015	10:30	0,23			35,01		

Figura 5.26: Caudal bombeado do interior da ensecadeira medido em descarregador do tipo Thompson (adaptada de Mota-Engil, (2015)).

Do único registo disponibilizado, o maior valor do caudal de que se dispõe é de 35,01 l/s, registado no dia 21 de Agosto de 2015, para toda a extensão da ensecadeira. A informação contida na Figura 5.26 não indicada a que cota da escavação se encontravam os trabalhos para a construção do DCC, não sendo possível a simulação direta desta fase no *software* PLAXIS 2D nem a comparação do caudal obtido da modelação numérica.

Dados mais recentes disponibilizados pelo Orientador sugerem valores de medição de caudal da ordem de 75 a 80 l/s, ou seja, um caudal de 6480 m<sup>3</sup>/dia a 6912 m<sup>3</sup>/dia.

### 5.3.5.6 Comparação entre os dados da monitorização e os resultados da modelação

De modo a validar os resultados obtidos, é agora necessário comparar os registos disponibilizados da monitorização e os resultados da modelação numérica realizada.

Relativamente aos deslocamentos obtidos e aos registados em obra estes encontram-se sumarizados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Deslocamentos horizontais obtidos da modelação e do registo de monitorização disponibilizado.

Secção	Modelação	Inclinómetros
Corte 7	44,1 mm	40,0 mm
Corte 8	30,9 mm	10,0 mm
Corte 10	15,5 mm	22,0 mm

Da sua consulta verifica-se que, para a secção Corte 7, os resultados do *software* PLAXIS 2D são próximos aos registados em obra. No que se refere à secção Corte 8, a comparação entre os resultados obtidos do modelo e do registado em obra não é possível, como foi explicado no subcapítulo 5.3.5.2, pois inclinómetro EI6A foi instalado posteriormente ao início dos trabalhos de escavação, mais concretamente passados 10 meses.

Para a secção Corte 10, a modelação dá um valor de deslocamento horizontal ligeiramente inferior ao medido em obra. Esta situação pode ser explicada em parte pelo movimento localizado de algum bloco desagregado pelo desmonte a fogo das zonas geotécnicas classificadas de ZG2 e ZG1 (maciço rochoso granítico).

Pelo exposto anteriormente a validação dos deslocamentos obtidos da modelação está verificada, sendo necessário agora avaliar os valores dos caudais. Neste ponto existe uma grande discrepância entre os caudais, como se pode observar da consulta da Tabela 5.8, tendo-se verificado em obra um volume excessivo de água no interior da ensecadeira, necessitando-se a revisão do projeto.

Tabela 5.8: Valores de caudal da modelação e dos registos em obra cedidos.

	Modelação	Registado em obra
Caudal percolado para o interior da ensecadeira	678 m <sup>3</sup> /dia	6480 m <sup>3</sup> /dia

Como apresentado no capítulo 2.2 a tecnologia de *JG* é exigente e requer uma interpretação constante dos parâmetros de procedimento definidos em projeto pelo operador. Outro aspeto prende-se com a heterogeneidade do solo e a sua difícil delimitação no que diz respeito à existência de blocos de granito desagregados do maciço rochoso existente em profundidade. Existe a possibilidade de durante a furação e posterior injeção se terem formado “sombras” devido à proximidade destes blocos, impossibilitando a criação de uma barreira contínua à percolação da água para o interior da escavação.

A explicação para a disparidade dos valores deve-se, em parte, ao reduzido comprimento junto ao encontro esquerdo (*ZG3*) das colunas de *JG* e à necessidade de se prolongar longitudinalmente a ensecadeira até que se consiga “fechar” a mesma numa zona geotécnica competente, nomeadamente em *ZG2*, como se pode observar no Anexo II, Desenho N<sup>o</sup>2, e no Anexo III, Desenho N<sup>o</sup>3. A modelação realizada das secções Corte 7, Corte 8 e Corte 10 considera-se adequada à solução executada junto do encontro direito apenas, sendo que da observação em obra, o caudal percolado nesta zona é reduzido. O estudo adicional da secção Corte 2 não é suficiente para a quantificação do caudal total percolado para o interior da escavação, uma vez que a água contorna a ensecadeira lateralmente e por baixo da reduzida cortina existente, como se pode observar da consulta do Anexo VI, Desenho N<sup>o</sup>6.

Em termos de resultados obtidos, a modelação do caudal expectável de percolar para o interior da ensecadeira é de aproximadamente 678 m<sup>3</sup>/dia. Da consulta dos critérios de alerta e alarme presentes no documento Projecto de Execução. Cálculos Justificativos - Revisão “B” elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda., expostos no subcapítulo 3.6.6, considerando que o último patamar de escavação foi alcançado, em toda a extensão da ensecadeira, os valores obtidos são inferiores aos definidos no PM, sendo o critério de alerta de 900 m<sup>3</sup>/dia.

### 5.3.6 Desestabilidade de origem hidráulica

O EC 7 dedica um capítulo, com o nome “10 Rotura hidráulica” para a verificação da segurança das estruturas a fenómenos de rotura do terreno provocada pela pressão ou percolação da água dos poros. Segundo este documento deve ser verificada a segurança, sempre que tal seja pertinente, para os seguintes modos de rotura do terreno:

- rotura por levantamento global (flutuação);
- rotura por levantamento hidráulico;
- rotura por erosão interna;
- rotura por erosão tubular.

As roturas mencionadas diferem entre si no tipo de perda de estabilidade, do local de início, das diferentes seqüências até se atingir a rotura e na sua própria cinemática (Wudtke, R. B. (2008)).

O documento EC 7 indica também a necessidade de ter em conta, na determinação de gradientes hidráulicos, de pressões na água dos poros ou de forças de percolação, o seguinte:

- a variação da permeabilidade do solo no tempo e no espaço;
- as variações dos níveis da água e da pressão na água dos poros ao longo do tempo;
- qualquer modificação das condições de fronteira (como por exemplo, uma escavação a jusante).



Deverá ser ainda considerado para os diferentes tipos de mecanismos de rotura, qual o modelo de estratificação do solo a adotar. As medidas mais correntemente adotadas para reduzir a erosão ou para evitar uma rotura de origem hidráulica, descritas no EC 7 são:

- o alongamento do percurso de drenagem por meio de cortinas ou de bermas;
- a modificação do projeto de forma a proporcionar resistência às pressões ou gradientes;
- o controlo da percolação;
- o recurso a filtros de proteção;
- a não utilização de argilas dispersivas sem recurso a filtros adequados;
- o revestimento dos taludes;
- o recurso a filtros invertidos;
- o recurso a poços de alívio;
- a redução do gradiente hidráulico.

De seguida será exposta uma breve explicação dos fenómenos de erosão interna e de levantamento hidráulico local, por serem estes os fenómenos necessários a verificar a segurança para a estrutura da solução existente e das diferentes soluções alternativas propostas.

### 5.3.6.1 Erosão interna

De acordo com o EC 7, a erosão interna é “(...) produzida pelo transporte de partículas de solo no interior de um estrato, na superfície de contacto entre dois estratos de solo ou na superfície de contacto entre um estrato de solo e uma estrutura. Este processo poderá evoluir para uma erosão regressiva e conduzir ao colapso da estrutura do solo.” A Figura 5.27 ilustra o fenómeno numa estrutura de contenção com recurso a estacas prancha.

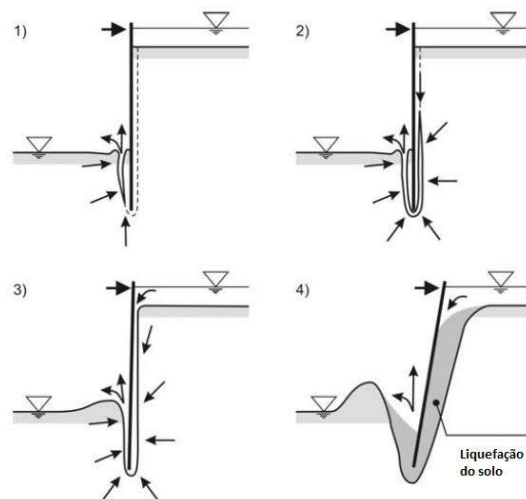


Figura 5.27: Fenómeno de erosão interna numa estrutura de contenção com recurso a estacas prancha: 1) início e primeira deterioração, 2) erosão regressiva, 3) formação de um canal de fluxo preferencial, 4) liquefação e colapso de acordo com EAU (2004) (adaptada de Wudtke, R. B. (2008)).

O EC 7 faz referência à determinação do gradiente hidráulico crítico para o fenómeno de erosão interna, devendo este ser determinado tendo em consideração, pelo menos o seguinte:

- a direção do escoamento;
- a distribuição granulométrica e a forma das partículas;

- a estratificação do solos.

O gradiente hidráulico,  $i$ , é definido pelo quociente entre a diferença de potencial hidráulico entre dois pontos sobre a extremidade da mesma linha de fluxo e a distância entre si. Quando o gradiente hidráulico é igual a zero, a percolação deixa de ocorrer e a pressão hidrostática passa a estar presente, variando esta linearmente em profundidade. O cálculo do gradiente hidráulico é dado pela Equação [5.3]:

$$i = \frac{\Delta h_{total}}{N_e \cdot a} \quad [5.3]$$

sendo  $\Delta h_{total}$  a diferença total de potencial hidrodinâmico, entre um ponto a montante e outro ponto a jusante,  $N_e$  o número de linhas equipotenciais entre os dois pontos considerados e  $a$  a distância entre duas linhas equipotenciais medidas nas linhas de fluxo.

Na Figura 5.28 ilustra-se um volume de solo genérico sob o efeito de condições hidrodinâmicas. O fluxo da água é vertical e ascendente e, como pode ser observado, o peso do solo ( $\gamma$ ) é a única componente a contrariar as forças de percolação.

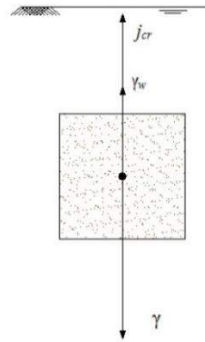


Figura 5.28: Volume de solo em condição hidrodinâmica (adaptada de Fonte, J. B. (2010)).

A situação em que o peso do solo e as forças de percolação se igualam, designa-se por situação crítica e o respetivo gradiente hidráulico por gradiente hidráulico crítico,  $i_{crit}$ . A Equação [5.4] traduz o mencionado anteriormente por:

$$i_{crit} \cdot \gamma_w + \gamma_w = \gamma \quad [5.4]$$

resultando na Equação [5.5]:

$$i_{crit} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad [5.5]$$

A situação crítica representa o estado em que as forças de percolação igualam as forças gravíticas, anulando as tensões efetivas e dado origem ao colapso local do solo, assumindo que não existe coesão. No caso de o solo apresentar coesão, ainda que reduzida, a anulação das tensões efetivas não implica a rotura, como já foi mencionado anteriormente.

Da consulta de Fonte, J. B., (2010), a maioria dos autores considera que o cálculo do fator de segurança para o levantamento hidráulico deve ser obtido através do quociente entre o peso de solo submerso,  $W'$ , e o somatório das forças de percolação na secção em análise,  $J$ , dada pela Equação [5.6]:

$$FS = \frac{W'}{J} = \frac{\gamma' \cdot V}{i_{mean} \cdot \gamma_w \cdot V} = \frac{i_{crit}}{i_{mean}} \quad [5.6]$$

sendo  $i_{mean}$ , a média do gradiente hidráulico do volume de solo genérico em estudo.

### 5.3.6.2 Levantamento hidráulico

O fenómeno de levantamento hidráulico ocorre quando o impulso da água percolada anula a resistência disponível do solo, conferida pelo peso das partículas que se encontram acima da secção considerada, como ilustrado na Figura 5.29.

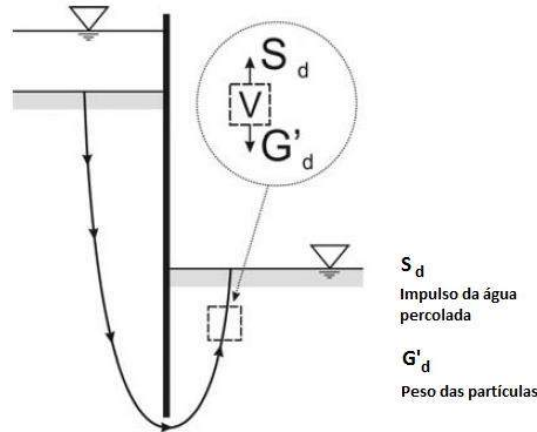


Figura 5.29: Ilustração esquemática do fenómeno de levantamento hidráulico no interior de uma escavação (adaptada de Wudtke, R. B. (2008)).

No caso de solos não coesivos o estado limite é atingido quando as tensões efetivas se anulam ( $\sigma' = 0$ ). A identificação da rotura ocorre com uma súbita subida de material à superfície, vulgarmente designada por *sand boil*. A pressão hidrodinâmica é determinada com recurso à rede de percolação que se gera para a estrutura existente e em condições em que a lei de Darcy é válida.

Este Estado Limite Último (ELU) é influenciado pelas condições de geometria, geológicas e hidrogeológicas existentes. Segundo Wudtke, R. B. (2008) estes fatores podem ser sumarizados em:

- estratigrafia e permeabilidade das camadas de solo;
- rede de percolação que a estrutura induz no solo, máximo valor de gradiente hidráulico,  $i_{max}$ ;
- propriedades do solo, peso próprio e resistência ao corte;
- sensibilidade do solo aos mecanismos de transporte de partículas, alteração de permeabilidade.

De acordo com o especificado no EC 7, Equação [5.7] e Equação [5.8], o ELU é definido por:

$$u_{dst;k} \cdot \gamma_{G;dst} = u_{dst;d} \leq \sigma_{stb;d} = \sigma_{stb;k} \cdot \gamma_{G;stb} \quad [5.7]$$

$$S_{dst;k} \cdot \gamma_{G;dst} = S_{dst;d} \leq G'_{stb;d} = G'_{stb;k} \cdot \gamma_{G;stb} \quad [5.8]$$

As equações anteriores são empregadas tendo em consideração tensões totais ou tensões efetivas. Da consulta do EC 7 para este estado limite de rotura, “a sua verificação deve ser feita, para qualquer coluna de solo relevante, a verificação de que o valor de cálculo da pressão na água dos poros desestabilizante ( $u_{dst;d}$ ) na base da coluna, ou o valor de cálculo da força vertical de percolação ( $S_{dst;d}$ ) na coluna, é menor ou igual do

que a tensão total vertical estabilizante ( $\sigma_{dst;d}$ ) na base da coluna, ou o peso submerso ( $G'_{stb;d}$ ) da mesma coluna”.

Os valores dos coeficientes parciais para situações persistentes ou transitórios recomendados encontram-se fixados no Anexo Nacional em A.5(1)P. e apresentam-se de seguida na Tabela 5.9.

A definição da zona de rotura depende do tipo de estrutura e varia ao longo do seu desenvolvimento. Resistências adicionais específicas do solo não são consideradas (Wudtke, R. B. (2008)).

Tabela 5.9: Valores dos coeficientes parciais para o ELU de rotura causada por gradientes hidráulicos fixados (HYD) (adaptada de Eurocódigo 7, (2010)).

$\gamma_F$ ( $\gamma_E$ )	$\gamma_{G;sup}$	1,35
	$\gamma_{G;inf}$	0,90
	$\gamma_Q$	1,50
$\gamma_M$	$\gamma_{\phi'}$	-
	$\gamma_{c'}$	-
	$\gamma_{cu}$	-
	$\gamma_{qu}$	-
	$\gamma_\gamma$	-

### 5.3.7 Verificações de segurança à rotura hidráulica

No caso particular desta dissertação, atendendo ao cenário geológico-geotécnico existente da solução proposta e das soluções alternativas, as verificações de segurança à desestabilidade de origem hidráulica a verificar são apenas os fenómenos de levantamento hidráulico (*hydraulic heave*) e erosão interna (*piping*). O fenómeno de levantamento hidráulico global (*hydrostatic uplift*) não é considerado para a verificação de segurança, uma vez que não foi executada nenhuma laje de fundo tampão, frequente em outros tipos de estruturas de contenção com nível freático elevado.

#### 5.3.7.1 Erosão interna

Da modelação numérica foi visualizado o “Output” do último patamar de escavação para cada secção Corte e consultada a tabela correspondente ao “Flow Field” para se proceder à verificação de segurança ao fenómeno de erosão interna através do *software* PLAXIS 2D. A tabela “tipo” que o *software* apresenta após o cálculo ilustra-se na Figura 5.30.

A informação presente na Figura 5.30 corresponde ao vetor de velocidades segundo o eixo x,  $q_x$ , e segundo o eixo y,  $q_y$ , em cada ponto da malha de elementos finitos, onde são identificadas as coordenadas e a região do tipo de solo pertencente.

Para a verificação de segurança ao fenómeno de erosão interna de cada secção Corte em estudo recorreu-se às equações já apresentadas no subcapítulo 5.3.6.1. Para o

Cluster	Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	$q_x$ [ $10^{-6}$ nr/s]	$q_y$ [ $10^{-6}$ nr/s]	
1	ZG3	1	36,172	59,172	0,000	-0,001	
		2	37,793	59,172	0,000	-0,001	
		3	37,658	59,456	0,000	-0,002	
		4	36,886	59,237	0,000	-0,002	
		5	37,390	59,237	0,000	-0,002	
		6	37,348	59,325	0,000	-0,002	
		7	36,648	59,169	0,000	-0,002	
		8	37,300	59,169	0,000	-0,001	
		9	37,772	59,259	0,000	-0,002	
		10	37,717	59,373	0,000	-0,002	
		11	37,203	59,373	0,000	-0,002	
		12	36,605	59,259	0,000	-0,001	
		2	ZG3	13	31,932	67,991	0,000
	14	33,554		67,983	0,000	0,000	

Figura 5.30: Tabela genérica do campo de velocidades do escoamento, com identificação das coordenadas e tipo de solo definido.

efeito foi consultado novamente o documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto (Peças Escritas). Memória Descritiva (EDP, (2012)) de modo a obter a informação necessária para a determinação do índice de vazios de cada zona geotécnica interessada de cada secção Corte em questão. A maioria das sondagens que se encontram no documento localizam-se maioritariamente ao longo do desenvolvimento longitudinal do túnel executado para a construção do DCC, existindo apenas 2 sondagens S4 e S5, como se pode observar no Anexo II (Desenho N°2) e no Anexo III (Desenho N°3) com maior pormenor. As restantes 11 sondagens que foram realizadas, posteriormente à data de elaboração do documento referido, não foram disponibilizadas como elemento de base para a realização deste trabalho.

A informação contida para a determinação do índice de vazios do solo para o ponto condicionante em cada secção Corte revelou-se insuficiente. Assim sendo, foi necessário consultar bibliografia da especialidade que sugerisse valores de gradientes hidráulicos críticos para o tipo de solo que caracteriza as zonas geotécnicas consideradas, expostas no subcapítulo 3.3.1, porém esta informação não se encontra disponível, sendo necessária a realização de ensaios para a sua determinação.

Segundo (Ziems, J. (1969)) a equação proposta por Terzaghi para a determinação do gradiente hidráulico crítico sofre uma redução entre 70% a 80% do inicialmente proposto. Para a determinação do gradiente hidráulico crítico foi empregada a Equação [5.9]:

$$i_c = \{0,7 \text{ a } 0,8\} \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \quad [5.9]$$

Após a modelação numérica detetou-se, que junto aos drenos situados abaixo do nível freático, os vetores velocidade da água percolada não apresentavam um comportamento esperado, como se pode visualizar na Figura 5.31. O *software* PLAXIS 2D não permite a definição dos drenos em termos de diâmetro, de área coletora, entre outros parâmetros que possibilitam a sua caracterização. Este *software* simplesmente possibilita ao utilizador definir um elemento como dreno, não especificando mais nada a seu respeito.

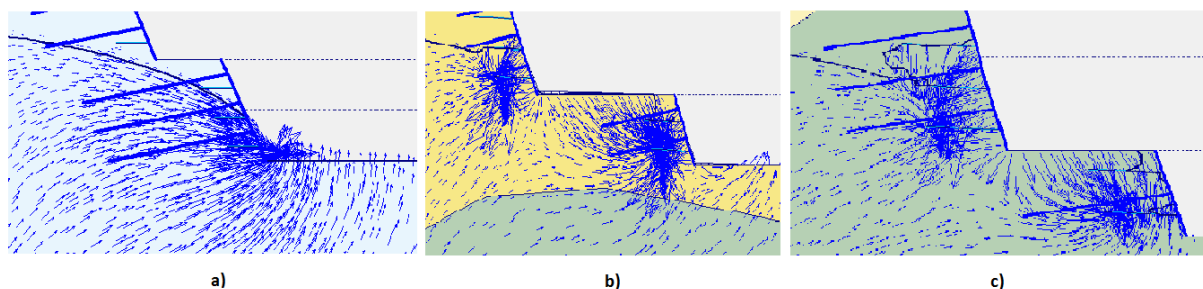


Figura 5.31: Vetores velocidade juntos aos drenos nas secções: a) secção Corte 7, b) secção Corte 8 e c) secção Corte 10.

Foi então decidido simular a inexistência de drenos nas secções Corte em estudo e observar os resultados finais da modelação. Os deslocamentos das secções Corte 7, Corte 8 e Corte 10 não foram afetados, nem os esforços dos elementos metálicos, assumindo-se que a retirada dos drenos contribui apenas localmente a vetores velocidade que satisfaçam as condições de fronteira definidas no modelo, não interferindo no comportamento global da ensecadeira.

A condutividade hidráulica ( $k$ ) de cada solo é conhecida e é um de vários “*inputs*” necessários definir previamente para a modelação, tendo sido adotado por simplificação que o mesmo seria igual nas direcções x

e y do escoamento. Exportados os resultados de cada secção, determinou-se posteriormente a norma do vetor velocidade, uma vez que o *software* PLAXIS 2D apresenta a velocidade segundo a direção x e a direção y, como descrito no início deste subcapítulo (ver Figura 5.30). O gradiente hidráulico de cada ponto foi determinado através da Equação [5.10]:

$$v = k \cdot i \Leftrightarrow i = \frac{v}{k} \quad [5.10]$$

Definiram-se os valores dos gradientes hidráulicos por ordem decrescente e foi identificado a que zona geotécnica pertencem. Refere-se que em todas as secções o valor de gradiente hidráulico máximo situa-se na extremidade das colunas de *JG* executadas, não colocando a rotura do solo em causa. É necessário então identificar o valor mais elevado do gradiente hidráulico junto à face dos taludes de escavação e verificar se esse gradiente é menor que o gradiente crítico para o tipo de solo presente.

Os resultados obtidos para cada secção expõem-se de seguida, na Figura 5.32 para a secção Corte 7, na Figura 5.33 para a secção Corte 8 e para a terceira secção Corte 10 na Figura 5.34, identificando com um círculo vermelho a posição do ponto de gradiente hidráulico ascendente máximo respetivo.

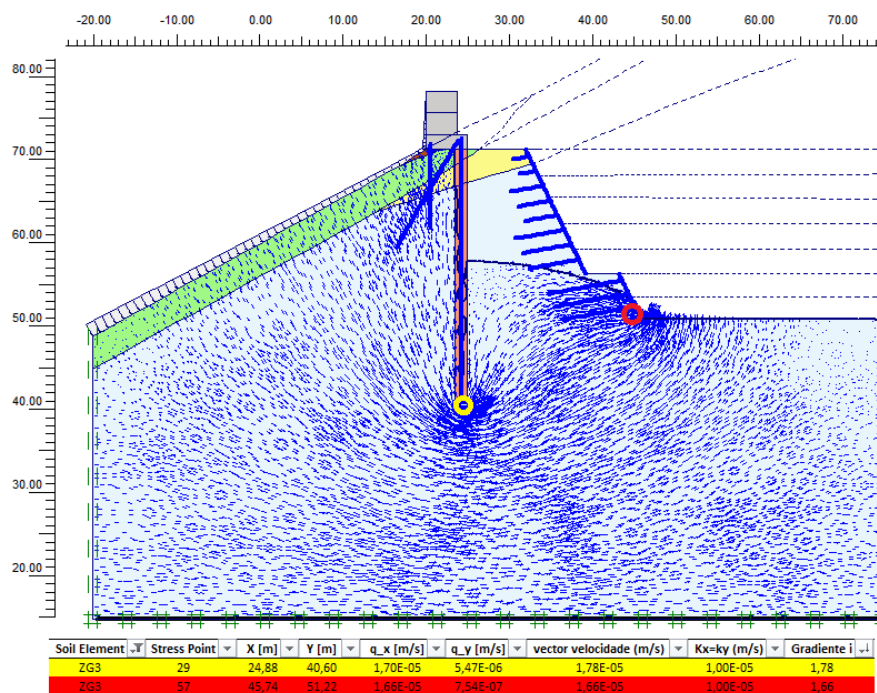


Figura 5.32: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 7: amarelo) extremidade das colunas de *JG* e vermelho) junto dos taludes de escavação.



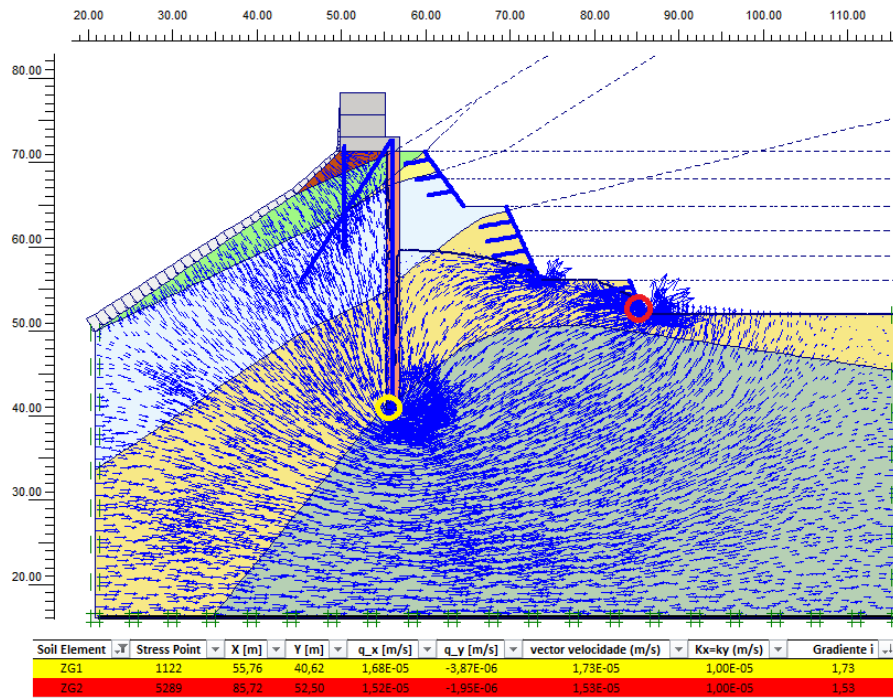


Figura 5.33: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 8: amarelo) extremidade das colunas de *JG* e vermelho) junto dos taludes de escavação.

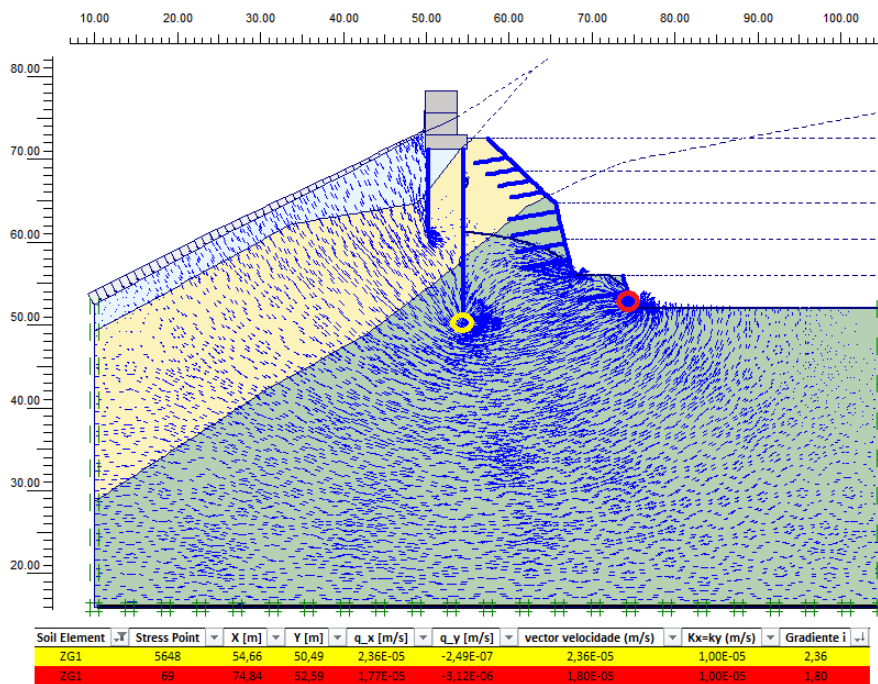


Figura 5.34: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da secção Corte 10: amarelo) extremidade das colunas de *JG* e vermelho) junto dos taludes de escavação.

Refere-se que da observação da Figura 5.33 e da Figura 5.34, o fenómeno de erosão interna não se verifica para as secções Corte 8 e Corte 10, respetivamente, uma vez que as zonas geotécnicas ZG2 e ZG1 dizem respeito ao maciço rochoso, definido no subcapítulo 3.3.1.

Em suma, apresenta-se na Tabela 5.10 o único valor do gradiente hidráulico e o fator de segurança da secção Corte 7 apenas.

Tabela 5.10: Gradiente hidráulico e fator de segurança ao fenómeno de erosão interna para a secção Corte 7.

Secção	x (m)	y (m)	Zona geotécnica	$i_{crit}$	$v_{máximo}^y$ ( $\times 10^{-5}$ m/s)	$i_{máx}$	Fator de segurança
Corte 7	45,74	51,22	ZG3	0,80	1,66	1,66	0,48

Como a secção Corte 7 não verifica a segurança ao fenómeno de erosão interna, é necessário dimensionar e implementar em obra filtros de proteção, de modo que não se atinja uma erosão capaz de conduzir ao colapso da estrutura do solo e da ensecadeira executada para o DCC.

O dimensionamento destes filtros não cabe no âmbito da dissertação, porém, seria muito interessante proceder à sua simulação numérica e avaliar a redução do gradiente hidráulico para a secção Corte 7.

Outra medida possível de se adotar é a redução da permeabilidade da ensecadeira com o aumento do comprimento da cortina, até se atingir um valor de gradiente hidráulico máximo inferior ao gradiente hidráulico crítico do solo da ZG3, igual a 0,80.

**Nota:** Refere-se que a determinação do gradiente hidráulico crítico pela expressão [5.9] é discutível, não se dispondo de mais elementos para a determinação, sendo este um parâmetro intrínseco a cada solo.

### 5.3.7.2 Levantamento hidráulico local

A verificação de segurança ao fenómeno de levantamento hidráulico local para cada secção em estudo foi efetuada para o faseamento construtivo mais desfavorável, correspondendo este à última fase de cálculo da modelação de cada secção, uma vez que a diferença de potencial hidráulico entre a albufera à cota  $NMC_{act}$  (153,00 m) e a cota interior da escavação de cada secção é máximo.

Em cada secção foram escolhidos vários pontos entre as colunas de  $JG$  executadas e a face dos taludes de escavação, de modo a cobrir uma área que se considere adequada para avaliar o fenómeno de levantamento hidráulico em cada secção. Não é possível avaliar todos os pontos existentes para cada secção e realizar a verificação de segurança a este fenómeno, sendo que o “*Output*” da modelação com *software* PLAXIS 2D é exposto ao utilizador em formato de tabela dos vários pontos que constituem a malha de elementos finitos. Considera-se para o efeito que a análise realizada é representativa em área transversal de cada secção Corte.

Para o cálculo da ação desestabilizante foi necessário integrar os gradientes hidráulicos dos pontos iniciais considerados e dos restantes pontos acima destes, até se atingir a linha de saturação da secção em causa. Para determinar o valor característico da ação desestabilizante multiplicou-se o peso volúmico da água, pelo integral do gradiente hidráulico e pela altura da coluna de solo considerada, dada pela Equação [5.11]. Considerou-se que a coluna de solo tem espessura de 1 metro. Em posse do valor característico da ação desestabilizante foi aplicado o fator de segurança de  $\gamma_{Q,sup}$  igual a 1,50 para a determinação da ação desestabilizante de cálculo.



$$S_{dst;k} = \gamma_w \cdot i_{integral} \cdot A \quad [5.11]$$

O cálculo da ação estabilizante foi realizado considerando a posição do nível freático acima de cada ponto escolhido para a verificação e determinaram-se em tensões efetivas o peso de solo acima deste, tendo em atenção quais as zonas geotécnicas intersecadas e os pesos volúmicos definidos no início da modelação. À semelhança do referido anteriormente, foi aplicado o coeficiente de segurança  $\gamma_{G:inf}$  igual a 0,90, para a obtenção do valor resistente de cálculo.

Na posse dos valores das ações, devidamente minoradas e majoradas, nos vários pontos considerados foi empregada a Equação [5.8], sendo esta a equação em vigor em Portugal para a verificação de segurança do fenómeno de levantamento hidráulico local, segundo o EC 7. Apresenta-se de seguida na Tabela 5.11 os resultados obtidos para a verificação de segurança referida.

Tabela 5.11: Verificação de segurança à rotura por levantamento hidráulico local, segundo o EC 7.

Secção	Ponto	Coordenadas no PLAXIS 2D		Integral dos gradientes hidráulicos	Ação desestabilizadora		Ação estabilizadora		Condição
		x (m)	y (m)		$S_{dst;k}$ (kN/m)	$S_{dst;d}$ (kN/m)	$G'_{stb;k}$ (kN/m)	$G'_{stb;d}$ (kN/m)	
Corte 7	2174	25,38	41,20	0,28	45,08	67,61	420,59	378,53	Verifica
	185	25,87	44,12	0,24	28,55	42,82	391,39	352,25	Verifica
	2216	27,94	41,83	0,24	36,76	55,13	415,94	374,34	Verifica
	279	28,06	45,00	0,19	22,36	33,54	384,24	345,81	Verifica
	6698	30,31	41,07	0,19	31,06	46,59	427,81	385,03	Verifica
	6640	30,42	44,69	0,16	19,60	29,40	391,61	352,45	Verifica
Corte 8	1131	57,16	41,41	0,28	52,39	78,58	420,46	378,41	Verifica
	1382	57,40	42,49	0,23	39,69	59,54	404,04	363,64	Verifica
	1562	59,45	41,17	0,23	43,20	64,80	426,94	384,25	Verifica
	1384	59,55	43,67	0,20	31,45	47,18	396,94	357,25	Verifica
	1631	61,12	41,75	0,19	34,22	51,34	395,23	355,70	Verifica
	1559	62,15	44,43	0,16	24,58	36,88	363,07	326,76	Verifica
Corte 10	5715	54,90	51,27	0,36	37,08	55,61	359,66	323,69	Verifica
	5721	54,88	53,42	0,19	15,86	23,78	333,86	300,47	Verifica
	5708	55,50	51,08	0,32	33,72	50,58	348,45	313,61	Verifica
	5717	55,36	53,02	0,21	17,77	26,65	325,13	292,61	Verifica
	5691	57,08	51,21	0,21	21,14	31,71	350,34	315,31	Verifica
	1277	57,09	53,05	0,17	14,42	21,64	328,26	295,43	Verifica

## 5.4 Estudo das soluções alternativas

Neste subcapítulo apresentam-se as soluções alternativas à solução executada com recurso a cortinas de injeções e colunas de *JG* para a construção do novo DCC da barragem da Caniçada.

Da modelação das três secções da solução executada e do zonamento geológico-geotécnico existente (ver Anexo IV, Desenho N<sup>o</sup>4) conclui-se que a secção Corte 7 é a mais condicionante, sendo a escolhida para a modelação das soluções alternativas que serão expostas no desenvolvimento deste subcapítulo.

Pretende-se com o estudo das soluções alternativas quantificar o caudal afluyente ao interior da escavação e determinar a redução percentual do caudal em cada solução face à solução executada, de modo a elaborar graficamente a relação custo-benefício da solução executada face às soluções alternativas que serão apresentadas.

### 5.4.1 Soluções alternativas em Jet Grouting

As secções alternativas em *JG* são idênticas à secção Corte 7 (ver Figura 4.3), exposta no subcapítulo 4.3.1 à exceção do comprimento das colunas, que foram prolongadas em 10%, em 20% e em 30%. A geometria dos taludes mantém-se inalterada por condicionamentos de espaço afeto à realização dos trabalhos da escavação do túnel do DCC, como se pode observar da consulta do Anexo III (Desenho N<sup>o</sup>3).

A avaliação económica de cada solução aqui apresentada estará relacionada com apenas dois parâmetros, o custo dos trabalhos necessários a prolongar as colunas de *JG* e o custo de operação do sistema de bombagem a dimensionar, de acordo com o caudal afluyente ao interior da escavação.

Tendo em consideração o trabalho até aqui desenvolvido e uma vez que a secção Corte 7 cumprirá o exigido pelo EC 7 a fenómenos de desestabilidade de origem hidráulica, assumindo que se procede ao dimensionamento e implantação local de filtros de proteção, o aumento percentual do comprimento das colunas assegura teoricamente a sua verificação aos fenómenos desestabilizantes estudados.

#### 5.4.1.1 Modelação das soluções alternativas

Devido à limitação de páginas para a realização desta dissertação e de modo a expor, os conteúdos mais relevantes, não serão descritas novamente as geometrias, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e da malha de elementos finitos por serem iguais ao exposto no subcapítulo 4.3, para a determinação da linha de saturação das secções alternativas com recurso ao *software* SEEP/W, e no subcapítulo 5.3 para o estudo das tensões, das deformações e da quantificação do caudal percolado com recurso ao *software* PLAXIS 2D, como efetuado no estudo das secções Corte apresentadas.

Em primeiro lugar foi necessário recorrer novamente ao *software* SEEP/W para conhecer a linha de saturação de cada solução alternativa com recurso à tecnologia de *JG*. Após o cálculo numérico de cada solução alternativa observa-se que a linha de saturação não se altera significativamente com o aumento considerado para o comprimento da cortina. Finalizada a etapa anterior, alterou-se o comprimento das colunas de *JG* da secção Corte 7 (ver Figura 5.2) definida para a modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D, prolongando-as nas percentagens (%) escolhidas.

Concluída a sua modelação foi possível quantificar o caudal afluyente a cada solução alternativa, da mesma forma como apresentado no subcapítulo 5.3.5.5.

#### 5.4.1.2 Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos da modelação efetuada para as secções alternativas em *JG*, expõem-se na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Análise comparativa do caudal percolado para o interior da escavação em cada secção alternativa em *JG*.

Solução alternativa	Imediatamente a jusante das colunas de <i>JG</i> (l/dia/m)	Final da secção (l/dia/m)	Caudal a bombear (l/dia/m)	Diminuição de caudal a bombear face à solução existente (l/dia/m)	Diminuição em percentagem do caudal a bombear (%)
10% de aumento	14000	7459	6541	620	8,7
20% de aumento	12957	6875	6083	1079	15,1
30% de aumento	12125	6477	5649	1513	21,1

Será exposto um breve resumo da metodologia de *Deep Soil Mixing (DSM)*, sendo posteriormente definidas as geometrias, as secções transversais, as propriedades dos materiais e a caracterização do terreno para as restantes soluções alternativas desenvolvidas com esta tecnologia.

#### 5.4.2 Solução alternativa em Cutter Soil Mixing

Após consulta das tecnologias existentes com foco na redução da permeabilidade do solo *in situ* ou que permitam a criação de barreiras à percolação, será abordada a metodologia de *DSM* com a escolha da tecnologia de *Cutter Soil Mixing (CSM)*. Esta escolha teve por base os condicionamentos existentes, apresentados no subcapítulo 3.3, e à viabilidade económica que a escolha da tecnologia de *CSM* apresenta em comparação com o *JG*, sendo estas tecnologias “semelhantes” entre si em alguns aspetos.

##### 5.4.2.1 Introdução da tecnologia Cutter Soil Mixing

A tecnologia *DSM*, à semelhança da técnica de *JG* abordada no início do subcapítulo 2.2, tem como objetivo o tratamento de solos em profundidade, dotando de novas e melhoradas propriedades mecânicas o solo natural, a partir da superfície.

O *DSM* recorre a um equipamento constituído por uma ferramenta de corte na sua extremidade, acionada através de uma vara de eixo vertical que transmite a energia necessária à desagregação do solo e adiciona simultaneamente um ligante, cal ou cimento, a baixas pressões criando uma mistura de solo-cimento (Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)). Na Figura 5.35 está ilustrado o equipamento com o pormenor da ferramenta de corte (ou pás). Apresenta-se também o pormenor da disposição das ferramentas de corte que a tecnologia permite alcançar.



Figura 5.36: : Equipamento utilizado na técnica *DSM* constituído por três varas de furação com ferramentas de corte e de homogeneização (adaptada de Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)).

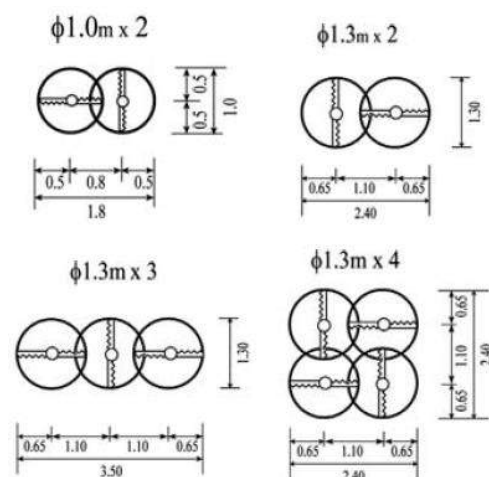


Figura 5.35 Disposições e dimensões frequentes das ferramentas de corte utilizadas na técnica de *DSM* (adaptada de Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)).

As colunas de solo-cimento são os únicos elementos capazes de ser executados com esta tecnologia, permitindo através da sua sobreposição criar estruturas em diafragma e em bloco, semelhantes ao apresentado no subcapítulo 2.2.7, dedicado ao *JG*.


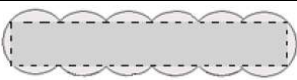


Esta tecnologia apresenta duas vertentes designadas por *Wet Deep Mixing (WDM)*, onde o ligante é injetado no solo por via húmida, sendo a calda de cimento o ligante mais frequente, e o *Dry Deep Mixing (DDM)* que é realizado com o ligante em pó, por exemplo cal, gesso ou cimento, injetado através de ar comprimido na zona a tratar. O *WDM* é mais adequado para solos arenosos e o *DDM* para solos argilosos (Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)).



Figura 5.37: Hidrofresa e ferramenta de corte utilizados na tecnologia de *CSM* (adaptada de Malcolm Drilling Company, Inc.).

Seguindo os princípios da tecnologia de paredes moldadas e dotando a extremidade com uma ferramenta capaz de desagregar e misturar o solo, como ilustrado na Figura 5.37, surge a tecnologia de *Cutter Soil Mixing (CSM)* da vertente do *WDM*. Esta tecnologia *CSM* recorre à ação mecânica de rodas de corte para desagregar e misturar os ligantes injetados por via húmida a baixas pressões, produzindo paredes contínuas através de painéis de solo-cimento subjacentes entre si. A repetição deste processo permite que duas sequências construtivas possam ser escolhidas, a sequência “*fresh in fresh*” onde os painéis secundários podem ser executados logo a seguir aos painéis primários, e a sequência “*fresh in hard*” em que os painéis secundários só podem ser realizados após os painéis primários ganharem presa, à semelhança da tecnologia de *JG*. Esta característica, em comparação com o *JG*, permite que a secção efetiva corresponda à secção de solo tratado e menor número de juntas de sobreposição, aspeto importante quando se pretende executar soluções que desempenhem funções de impermeabilização (Kitazume, M. & Terashi, M. (2013)). Na Tabela 5.13 apresenta-se uma análise comparativa entre as tecnologias de *CSM* e de *JG*.

Tabela 5.13: Análise comparativa entre as tecnologias *CSM* e *JG*, em termos de secção efetiva e elementos formados (adaptada de Sousa, E. D. C. (2009)).

Propriedades	<i>CSM</i>	<i>JG</i>
	Elementos em painel.	Elementos em coluna.
Secção efetiva	Secção efetiva corresponde à secção tratada.	Secção efetiva é menor que a secção tratada.
		
Juntas de sobreposição	Reduzido número de juntas.	Elevado número de juntas.
		

Os elementos painel executados com esta tecnologia atingem espessuras desde 500 mm até cerca de 1200 mm. A profundidade máxima com recurso à vara *Kelly* situa-se por volta dos 35 metros, sendo possível atingirem-se profundidades superiores, até 80 metros, através de um sistema de cabos metálicos que asseguram a sua movimentação. No entanto, a profundidade máxima definida está dependente das condições específicas de cada projeto e da sua viabilidade económica.

Os painéis de *CSM* podem ser armados com perfis metálicos (ver Figura 5.38), bastando para tal que estes sejam introduzidos antes que a mistura solo-cimento ganhe presa, processo idêntico ao *JG*. Estes painéis armados desempenham frequentemente funções estruturais definitivas em projetos de contenção periférica urbana, face às soluções mais tradicionais de betão armado, como o exemplo das paredes moldadas e de cortinas de estacas moldadas.



Figura 5.38: Solução de parede de solo-cimento armada com perfis metálicos do tipo HEB (adaptada de KPFF Consulting Engineers)).

Refere-se que no presente subcapítulo pretendeu-se expor, resumidamente, a tecnologia de *CSM* e dar a conhecer as suas características no contexto de solução alternativa ao caso de estudo exposto. Uma vez que, esta tecnologia partilha algumas semelhanças com tecnologia de *JG* e dos conteúdos que se recolheram da consulta de bibliografia da especialidade, assume-se que nesta tecnologia *CSM* será interessante conhecer a sua modelação numérica e avaliar o seu desempenho quer estrutural, quer económico, face à solução executada para o DCC da barragem da Caniçada.

Em suma, apresenta-se na Tabela 5.14 a análise comparativa entre as soluções de *CSM* e de *JG*.

Tabela 5.14: Análise comparativa entre as soluções de *CSM* e de *JG* (adaptada de Sousa, E. D. C. (2009)).

Propriedades	<i>CSM</i>	<i>JG</i>
Geometria	Painéis retangulares com comprimento máximo de 2800 mm e espessura até 1200 mm. A secção efetiva corresponde à secção tratada.	Colunas com diâmetros até 2000 mm. O diâmetro das colunas de solo tratado depende do tipo de solo e do tipo de sistema utilizado.
	Conhecimento da geometria do solo tratado em profundidade.	Dificuldade em conhecer o diâmetro das colunas em profundidade, sobretudo em solos muito heterogêneos.
Características do processo de execução e custos associados	A desagregação do terreno é feita por ação mecânica das rodas dentadas.	A desagregação do terreno é conseguida por sistemas de jatos de elevada pressão.
	Reduzida quantidade de refluxo.	Elevada quantidade de refluxo.
	Ausência de vibrações.	
	Equipamento de maiores dimensões.	Equipamento de menores dimensões.
	Custos elevados do equipamento.	Custos reduzidos do equipamento.
Tipo de solo	Aplicável a praticamente todos os tipos de solos. Não é tão eficaz em solos densos, compactos ou com presença de blocos de grandes dimensões.	Aplicável a praticamente todos os tipos de solos. Não é eficaz em solos com rochas de grandes dimensões que dificultam a projeção da calda e em solos arenosos onde pode causar assentamentos do terreno.
Profundidade máxima	80 metros	45 metros
Tempo de execução	Em condições semelhantes, são equivalentes em termos de tempo de execução.	

Apresenta-se de seguida a solução alternativa base, com recurso à tecnologia *CSM*, para a ensecadeira do DCC da barragem da Caniçada.

### 5.4.2.2 Definição da geometria do muro e da secção transversal

A definição da geometria do muro e da secção transversal da solução alternativa de painel solo-cimento em *CSM* introduz-se de seguida.

#### Geometria do muro

Para a definição da geometria do muro de coroamento da ensecadeira efetuou-se inicialmente um estudo para a redução das suas dimensões, reduzindo o volume de betão necessário a betonar e a conseqüente redução de custos da solução alternativa a modelar face à solução executada. Porém, após concluídas as verificações de segurança que constam no EC 7 para este tipo de estrutura não foi possível a sua “otimização”. A geometria do muro necessita de peso para resistir ao derrube e deslizamento provocados pelo impulso da água contida na albufeira sobre o mesmo, assumindo para o efeito que a geometria e os elementos metálicos responsáveis pela sua fundação são os adequados.

Relativamente ao muro da solução alternativa em *CSM*, a sua descrição é a mesma contida no subcapítulo 4.3.1, no que diz respeito à altura total do muro, a classe do betão, a largura máxima de fundação, a microestaca inclinada do tipo HEB 160 e o perfil do tipo HEB 140 vertical, estas duas últimas com um afastamento ligeiramente menor de 1,5 m. Com esta tecnologia os perfis metálicos tubulares de alta resistência da solução executada deixam de ser necessários face ao processo construtivo do *CSM*, sendo agora definido um painel solo-cimento de espessura de 0,60 m.

Refere-se que a rigidez axial da dupla fiada de colunas de *JG* de 1000 mm de diâmetro (considerado 1,5 m de secção transversal efetiva) é precisamente 5 vezes superior à rigidez axial do painel solo-cimento com uma espessura de 0,60 m. O pressuposto de que a secção transversal desta solução alternativa apresentada é a adequada, terá de ser posteriormente analisado após conclusão da modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D, verificando se os deslocamentos horizontais e verticais são aceitáveis no desempenho da estrutura. No caso de não se verificar o pressuposto mencionado será necessário incorporar perfis metálicos de modo a garantir que a rigidez axial da secção não seja inferior à solução executada em *JG*.

Ilustra-se na Figura 5.39 a geometria do muro de coroamento e os elementos estruturais metálicos da secção da solução mencionada anteriormente.

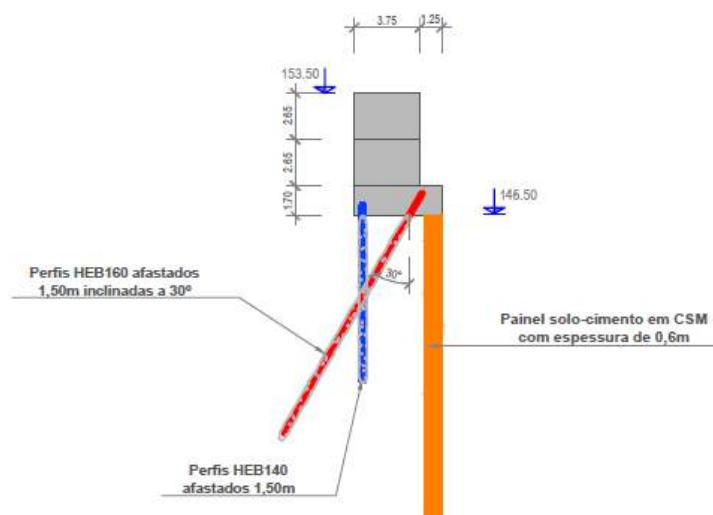


Figura 5.39: Secção transversal do muro de coroamento de betão simples da solução alternativa em *CSM*.





### 5.4.2.3 Propriedades dos materiais e caracterização do terreno

À semelhança do exposto inicialmente para a modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D no subcapítulo 5.3.2, as propriedades dos materiais e as propriedades do terreno para a modelação numérica das soluções alternativas em *CSM* referem-se de seguida.

#### Materiais

Os elementos estruturais metálicos responsáveis pela fundação e suporte dos taludes de escavação da solução alternativa em *CSM*, (ver Figura 5.41), caracterizam-se de seguida:

HEB 140		HEB 160	
Rigidez axial:	$EA/m = 600600,00 \text{ kN/m}$	Rigidez axial:	$EA/m = 760200,00 \text{ kN/m}$
Rigidez de flexão:	$EI/m = 2114,00 \text{ kN.m}^2/\text{m}$	Rigidez de flexão:	$EI/m = 3488,80 \text{ kN.m}^2/\text{m}$
Peso:	$w = 0,2204 \text{ kN/m/m}$	Peso:	$w = 0,2786 \text{ kN/m/m}$

Pregagens  $\phi 25\text{mm}$  (A500NR)

Rigidez axial:	$EA/m = 49087,39 \text{ kN/m}$
Rigidez de flexão:	$EI/m = 1,92 \text{ kN.m}^2/\text{m}$
Peso:	$w = 0,0189 \text{ kN/m/m}$

#### Terreno

No subcapítulo 5.3.2.1 consta toda a definição dos parâmetros geomecânicos das zonas geotécnicas consideradas (ver Tabela 5.1) e a definição dos materiais que materializam a ensecadeira (ver Tabela 5.2), sendo porém necessário substituir as colunas de *JG* pelos painéis de solo-cimento realizados em *CSM*. Não se crê ser necessário apresentar os mesmos novamente, à exceção do painel solo-cimento que consta na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Propriedades mecânicas do painel solo-cimento em *CSM*.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (GPa)	$k_x=k_y$ (m/s)
Painel <i>CSM</i>	20	45	400	0,50	$1 \times 10^{-8}$

O modelo constitutivo *HS* escolhido para a modelação da solução existente da ensecadeira do DCC, introduzido no subcapítulo 5.3.2.1, não foi alterado para a modelação da solução alternativa de painel em *CSM*. Os parâmetros geotécnicos do modelo constitutivo *HS* do terreno podem ser consultados novamente na Tabela 5.3.

### 5.4.2.4 Condições de fronteira

No que diz respeito à definição das condições de fronteira e da malha de elementos finitos para a solução alternativa em *CSM* estas são idênticas ao que se referiu no subcapítulo 5.3.3 para o estudo das secções Corte da solução executada.

Relativamente às fases de cálculo necessárias à modelação a única alteração a mencionar é a alteração da identificação da fase número 4 designada por “Execução das colunas de *JG*” por “Execução do painel em *CSM*”, como se pode observar na Figura 5.42, em comparação com o ilustrado na Figura 5.3 para a secção Corte 7 já analisada.



Identification	Phas...	Start from	Calculation	Loading input	Time
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s
→ Gravity Loading	25	0	Plastic	Total multipliers	0,00 s
→ Início	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ Escavação até a execução do muro	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ Execução do painel em CSM	4	2	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ Execução das micro-estacas	5	4	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 1ª fase de betonagem	6	5	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 2ª fase de betonagem	7	6	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 3ª fase de betonagem	8	7	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ phi-c reduction	27	8	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s
→ Escavação até à cota do muro	26	8	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ phi-c reduction	30	26	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s
→ 1º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	11	26	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 1º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	13	11	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 1º Talude - 3º patamar - drenos e pregagens	15	13	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 1º Talude - 4º patamar - drenos e pregagens	17	15	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 1º Talude - 5º patamar - drenos e pregagens	19	17	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ phi-c reduction	28	19	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s
→ 2º Talude - 1º patamar - drenos e pregagens	21	19	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ 2º Talude - 2º patamar - drenos e pregagens	23	21	Plastic	Staged construction	0,00 s
→ phi-c reduction	29	23	Phi/c red...	Incremental multipliers	0,00 s
→ Término	24	23	Plastic	Staged construction	0,00 s

Figura 5.42: Fases de cálculo da solução alternativa em painel *CSM*.

O procedimento “*phi-c reduction*” foi mantido no estudo da solução alternativa em *CSM* de modo a avaliar os fatores de segurança obtidos nas diferentes fases de cálculo. Refere-se novamente que no subcapítulo 5.3.5.4 se encontra toda a explicação necessária ao mesmo.

Na Figura 5.43 ilustram-se as condições de fronteira da secção transversal escolhida para a modelação da solução alternativa em *CSM*.

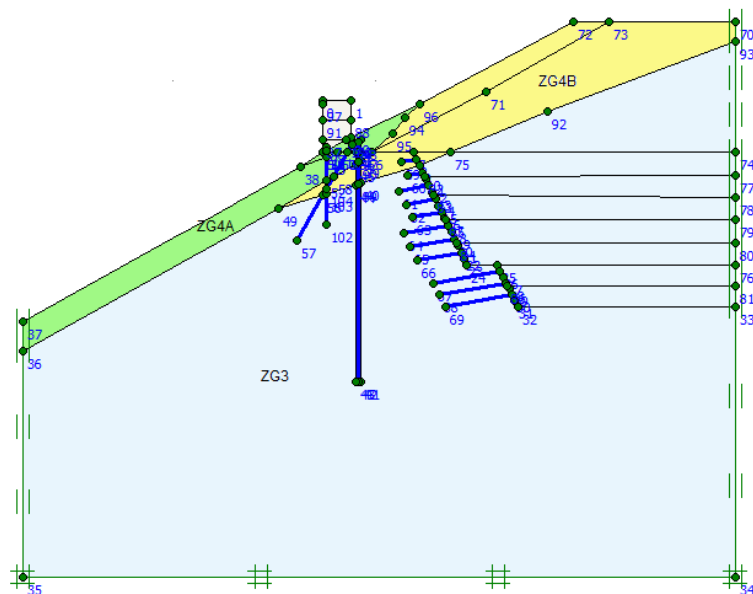


Figura 5.43: Geometria e identificação das ZG's da secção da solução alternativa em *CSM*.

### 5.4.3 Apresentação dos resultados

Após proceder-se à modelação numérica das várias fases de cálculo (ver Figura 5.42) integrantes da solução alternativa, foram analisados os resultados obtidos. Apresentam-se de seguida os resultados obtidos.

#### 5.4.3.1 Deslocamentos

É possível verificar da Figura 5.45 que os maiores deslocamentos horizontais ocorrem nos primeiros metros do talude de escavação, com valor de 53 mm aproximadamente, à semelhança do descrito aquando da solução Corte 7. Verifica-se também que o deslocamento máximo no topo do muro é de 50 mm, um aumento de 10 mm face à solução executada para a secção Corte 7.

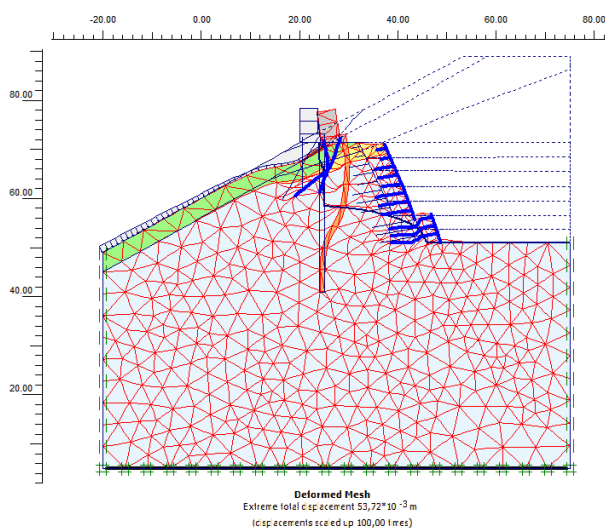


Figura 5.44: Deformada final solução alternativa em painel solo-cimento – ampliada 100 vezes.

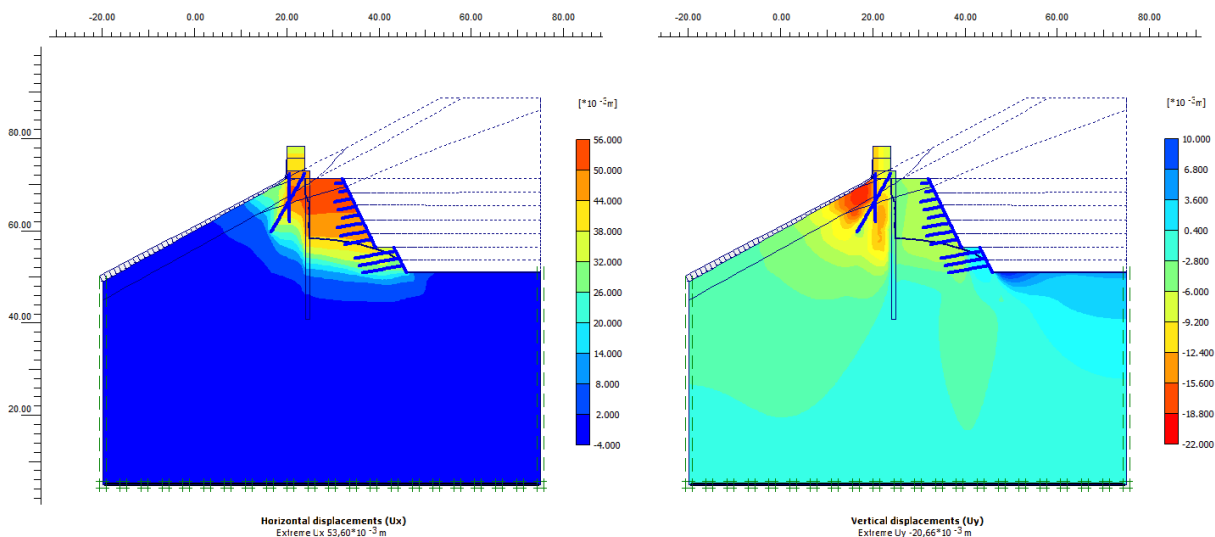


Figura 5.45: Deslocamentos finais da modelação da solução alternativa em CSM: a) horizontais (deslocamento máximo 53,60 mm) e b) verticais (deslocamento máximo 20,66 mm).

Uma vez que esta solução alternativa em estudo assume um faseamento construtivo semelhante ao definido para a solução executada, à exceção da tecnologia e da inexistência de perfis N80 necessários para a construção das colunas de *JG*, face à observação dos deslocamentos finais (ver Figura 5.45) verifica-se também que o deslocamento vertical máximo se situa perto do perfil metálico inclinado HEB 140, com valor igual a 20 mm. Relativamente ao valor de empolamento máximo para a solução apresentada é de 7 mm.

### 5.4.3.2 Esforços

Quanto aos esforços obtidos para os perfis metálicos resistentes da solução alternativa em *CSM* foram consultadas as envolventes de esforços e adotado o mesmo processo descrito em 5.3.5.3, para a verificação da segurança e o fator de segurança nos diversos nós que constituem cada elemento resistente. Toda a informação está contida no Anexo X.

É de referir que nesta solução alternativa foi removido o perfil metálico tubular N80 por não ser necessário à construção do painel solo-cimento com a tecnologia de *CSM*.

Como se pode observar da Figura 5.46 o diagrama de envolvente de esforços do HEB 140 apresenta valores superiores em comparação com o mesmo perfil da secção Corte 7, apresentado no subcapítulo 5.3.5.3. A remoção do perfil N80 nesta solução explica este acréscimo de esforços atuantes.

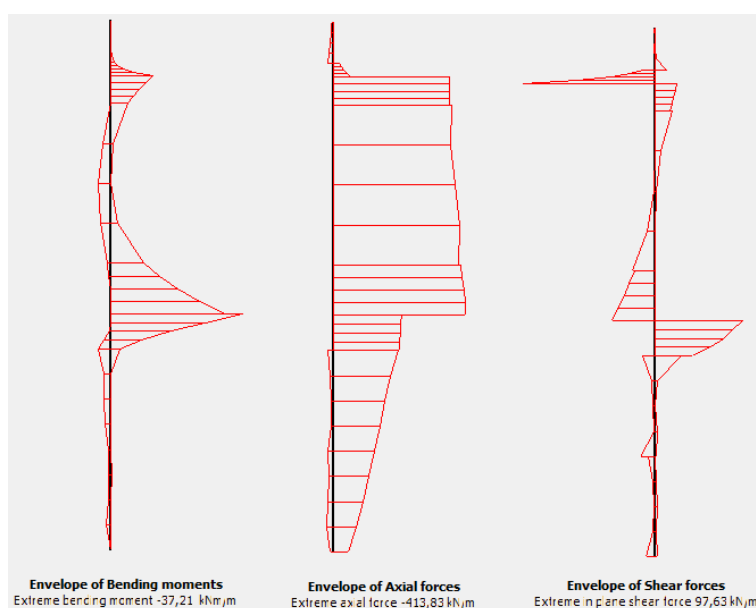


Figura 5.46: Envolvente de esforços do perfil HEB140 da secção alternativa em *CSM*: a) momento fletor (valor máximo de -37,21 kN.m/m), b) axial (valor máximo de -413,83 kN/m) e c) transverso (valor máximo de 97,63 kN/m).

A envolvente de esforços dos restantes perfis metálicos resistentes, HEB 160 e as pregagens  $\phi 25$  mm não apresentam andamentos diferentes dos obtidos da modelação da secção Corte 7, podendo estes serem consultados no Anexo X.

### 5.4.3.3 Fatores de segurança – phi-c reduction

Os fatores de segurança determinados com o procedimento “*phi-c reduction*” de que o *software* dispõe, apresentados no subcapítulo 5.3.5.4 para a solução alternativa em *CSM*, apresentam-se de seguida, na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Fator de segurança obtido pelo processo “*phi-c reduction*” das fases construtivas consideradas para a solução em *CSM*.

	Após betonagem do muro	Subida do nível da albufeira para a cota 153,00 m	Escavação até à 1ª banqueteta	Escavação até à 2ª banqueteta
Solução em <i>CSM</i>	1,84	1,57	1,32	1,20

### 5.4.3.4 Medição do caudal

A determinação do caudal percolado para o interior da escavação para a solução alternativa em *CSM* segue o mesmo princípio da conservação da massa e o mesmo raciocínio para a sua determinação, aquando da solução executada em *JG*, presente no subcapítulo 5.3.5.5. Após a modelação numérica com recurso ao *software* PLAXIS 2D, o valor do caudal percolado para o interior da escavação apresenta-se na Tabela 5.17.

Tabela 5.17: Caudal percolado da solução alternativa em *CSM*.

	Imediatamente a jusante do painel solo-cimento em <i>CSM</i> (l/dia/m)	Final da secção (l/dia/m)	Caudal a bombear (l/dia/m)
Solução em <i>CSM</i>	15206	7842	7364

## 5.4.4 Verificações de segurança à rotura hidráulica

As verificações de segurança à rotura hidráulica a serem verificadas para a solução alternativa proposta em *CSM* são novamente os fenómenos de levantamento hidráulico e de erosão interna, idêntico ao apresentado no subcapítulo 5.3.7 para as secções Corte estudadas em *JG* da solução executada da ensecadeira do DCC.

### 5.4.4.1 Erosão interna

Em posse do campo de velocidades do escoamento e empregues as equações expostas no subcapítulo 5.3.7.1, determinaram-se os valores dos gradientes hidráulicos e o fator de segurança para a secção em *CSM* ao fenómeno de erosão interna, à semelhança do efetuado para as secções Corte analisadas da solução existente. Na Figura 5.47 encontra-se a localização e os valores dos gradientes hidráulicos máximos.

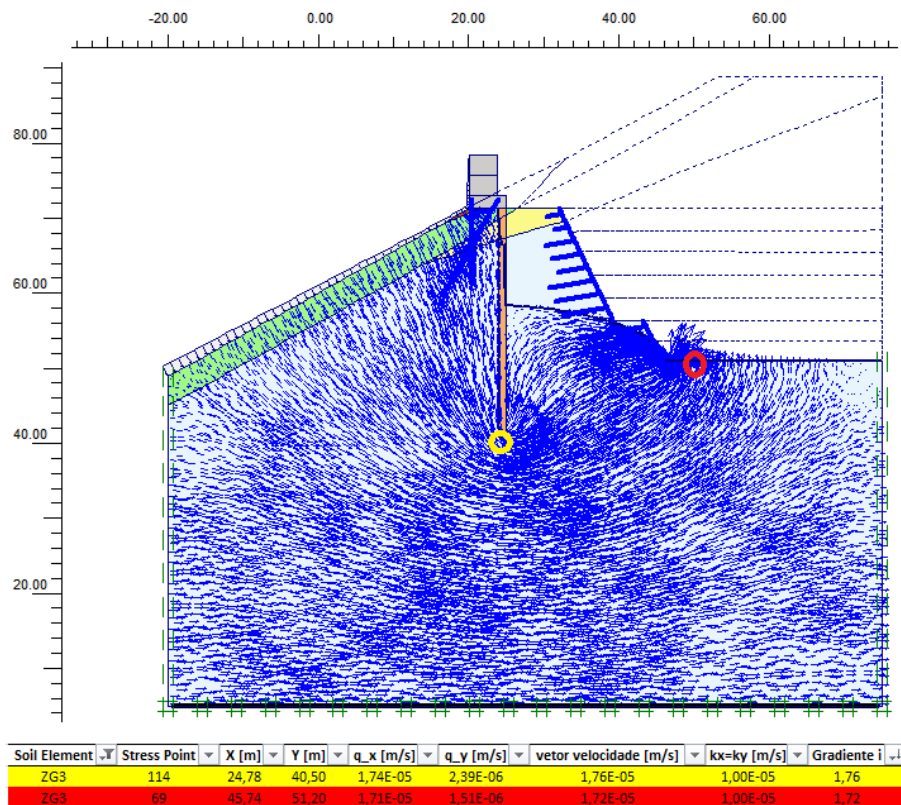


Figura 5.47: Localização e valores de gradiente hidráulico máximos da solução alternativa em *CSM*: amarelo) extremidade do painel solo-cimento e vermelho) junto dos taludes de escavação.

O valor obtido para o fator de segurança ao fenómeno de erosão interna para a solução alternativa apresentada, pode ser consultado na Tabela 5.18.

Tabela 5.18: Gradientes hidráulicos e fatores de segurança ao fenómeno de erosão interna para a solução em *CSM*.

	x (m)	y (m)	Zona geotécnica	$i_{crit}$	$v_{máximo}^y$ ( $\times 10^{-5}$ m/s)	$i_{máx}$	Fator de segurança
Solução em <i>CSM</i>	45,74	51,20	ZG3	0,80	1,72	1,72	0,47

#### 5.4.4.2 Levantamento hidráulico local

No subcapítulo 5.3.7.2 referem-se os pressupostos considerados e o procedimento de cálculo necessário à verificação da segurança ao levantamento hidráulico local, segundo o EC 7.

À semelhança da verificação da segurança à erosão interna, não se crê ser necessário expor novamente o conteúdo para o estudo da solução alternativa em *CSM*, apresentando-se apenas os resultados obtidos dos cálculos efetuados, que se expõem na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Verificação de segurança à rotura por levantamento hidráulico local, segundo o EC 7.

Ponto	Coordenadas no PLAXIS 2D		Integral dos gradientes hidráulicos	Ação desestabilizadora		Ação estabilizadora		Condição	
	x (m)	y (m)		$S_{dst,k}$	$S_{dst,d}$	$G'_{stb,k}$	$G'_{stb,d}$		
				(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)		
	1298	25,19	41,31	0,32	54,68	82,02	415,70	374,13	Verifica
	1300	25,74	43,33	0,23	33,21	49,81	395,50	355,95	Verifica
Solução	1550	27,93	41,09	0,24	41,49	62,24	420,50	378,45	Verifica
em <i>CSM</i>	8381	27,48	43,18	0,21	31,78	47,66	399,60	359,64	Verifica
	2122	30,17	41,12	0,19	31,28	46,92	420,80	378,72	Verifica
	2119	30,06	43,29	0,17	24,57	36,85	399,10	359,19	Verifica

#### 5.4.5 Modelação das soluções alternativas em Cutter Soil Mixing

Foram usados processos análogos na modelação das soluções alternativas em *JG*, no subcapítulo 5.4.1.1, e nas soluções alternativas da solução em *CSM*. Prolongou-se o painel solo-cimento que a tecnologia permite executar, nas mesmas percentagens de 10%, de 20% e de 30% do seu comprimento inicial, mantendo a espessura de 0,60 m constante.

Definidos todos os elementos necessários a cada *software*, SEEP/W e PLAXIS 2D, e concluída a modelação numérica correspondente, será quantificado o caudal afluyente ao interior da escavação e atingidos os objetivos iniciais para o desenvolvimento desta dissertação, tendo estes sido definidos no subcapítulo 1.2.

##### 5.4.5.1 Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos da modelação realizada para as restantes secções alternativas de espessura de 0,60 m com recurso à tecnologia de *CSM*, apresentam-se na Tabela 5.20.

Tabela 5.20: Análise comparativa do caudal percolado para o interior da escavação para cada solução alternativa em *CSM*.

Soluções alternativas em <i>CSM</i>	Imediatamente a jusante da parede solo-cimento em <i>CSM</i> (l/dia/m)	Final da secção (l/dia/m)	Caudal a bombear (l/dia/m)	Diminuição de caudal a bombear face à solução em <i>CSM</i> (l/dia/m)	Diminuição em percentagem do caudal a bombear face à solução em <i>CSM</i> (%)
10% de aumento	14437	7741	6697	667	9,1
20% de aumento	13433	7196	6237	1127	15,3
30% de aumento	12581	6637	5943	1421	19,3

No subcapítulo que se segue será exposta a síntese dos resultados obtidos de todas as soluções modeladas, em *JG* e em *CSM*, na realização desta dissertação.

## 5.5 Síntese dos resultados

Neste ponto do trabalho apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos da modelação das diversas soluções analisadas, de modo a proceder-se à elaboração do diagrama custo-benefício das mesmas.

### 5.5.1 Análise do caudal percolado

Uma vez estudadas todas soluções alternativas é possível proceder-se a uma análise do caudal percolado entre estas com a solução executada para a ensecadeira do DCC. Constata-se pela observação da Tabela 5.21 que, a solução alternativa com aumento de 30% do comprimento das colunas de *JG* é a que apresenta menor caudal a percolar para o interior da escavação de todas as soluções.

Tabela 5.21: Estimativa do caudal a percolar para o interior da escavação e as diferentes percentagens de redução de cada solução.

Solução		Caudal a bombear (l/dia/m)	Diminuição de caudal a bombear face à solução executada (l/dia/m)	Diminuição percentual do caudal a bombear face à solução executada (%)
<i>JG</i>	executada	7162	-	-
	10% de aumento	6541	621	8,7
	20% de aumento	6083	1079	15,1
	30% de aumento	5649	1513	21,1
<i>CSM</i>	alternativa proposta	7364	-203	-2,8
	10% de aumento	6697	465	6,5
	20% de aumento	6237	924	12,9
	30% de aumento	5943	1218	17,0

Na solução de 10% de aumento do comprimento em *JG* evidencia-se um decréscimo de caudal de 8,7 %, face aos 6,5% da solução em *CSM* para o mesmo aumento percentual do comprimento, do painel solo-cimento. Observa-se também para a solução de 20% de aumento a redução de 15,1% para o *JG* e de 12,9% para o *CSM* e para a solução de 30% de aumento o decréscimo é de 21,1% face aos 17,0%, do *JG* para o *CSM*.

Face ao descrito anteriormente, verifica-se que o aumento de 10% do comprimento é o que apresenta maior redução percentual, decrescendo posteriormente. No limite, para a solução de 30% de aumento a redução do caudal percolado é de 21,1%, quase 10% menos face ao aumento considerado, para a solução de *JG*, sendo que para a solução em *CSM* é ainda inferior.

Comparativamente entre as soluções de *JG* e de *CSM* com o aumento inicial de 10% a sua diferença é de 2,2%, para 20% de aumento é de 2,2% e para 30% de aumento é de 4,1%. É possível verificar também que existe uma correlação aproximadamente linear para as duas soluções de 10% e de 20% com a espessura adotada para cada tecnologia, sendo que o quociente entre 1,5 m e 0,60 m é igual a 2,5. Para as duas soluções de 30% a sua correlação não é proporcional, destacando-se a maior influência do comprimento, das colunas ou do painel solo-cimento na redução da percolação da água para o interior da escavação, face à espessura adotada para a solução.

### 5.5.2 Estimativa orçamental

Adicionalmente, foram estimados os custos associados a cada solução em *JG* e em *CSM* analisada. Refere-se que a secção transversal de cada solução é referente à secção Corte 7, como mencionado no início do subcapítulo 5.4.

As quantidades e o custo parcial de cada solução foram calculadas por metro linear de desenvolvimento (mld), sendo que, para a determinação da estimativa do custo total da ensecadeira, seria necessário estudar as restantes secções Corte, adaptando à sua geometria e ao seu zonamento geotécnico a solução em si, definindo posteriormente uma área de influência para cada. A soma destas estimativas por secção Corte daria o custo total da solução escolhida para todo o desenvolvimento da ensecadeira.

Refere-se que os custos apresentados para a execução das colunas de *JG* e do painel solo-cimento em *CSM* já contemplam no custo unitário as operações de furação, equipamentos e mão-de-obra associados. Estes encontram-se sintetizados na Tabela 5.22 para a solução executada em *JG* e na Tabela 5.23 para a solução alternativa de 0,60 m de espessura em *CSM*.

Tabela 5.22: Quantidades e custos para a construção da solução executada em *JG*.

Descrição	Unidades	Quantidades	Custo unitário	Custo parcial
Perfis HEB 140	€/kg	214,8 kg/mld	1,00 €	214,8 €/mld
Perfis HEB 160	€/kg	393,3 kg/mld	1,00 €	393,3 €/mld
Perfis N80	€/m	39,8 m/mld	60,00 €	2387,3 €/mld
Pregagens $\phi 25$ mm (A500NR)	€/m	61,0 m/mld	30,00 €	1830,0 €/mld
Betão do muro (C20/25)	€/m <sup>3</sup>	28,4 m <sup>3</sup> /mld	65,00 €	1844,4 €/mld
Betão projetado + malhasol	€/m <sup>2</sup>	26,8 m <sup>2</sup> /mld	80,00 €	2143,2 €/mld
Colunas de <i>JG</i> 2 $\phi 1000$ mm	€/m	61,0 m/mld	100,00 €	6100 €/mld
Custo total:				14912,9 €/mld

Tabela 5.23: Quantidades e custos para construção da solução alternativa em *CSM*.

Descrição	Unidades	Quantidades	Custo unitário	Custo parcial
Perfis HEB 140	€/kg	214,8 kg/mld	1,00 €	214,8 €/mld
Perfis HEB 160	€/kg	393,3 kg/mld	1,00 €	393,3 €/mld
Pregagens $\phi 25$ mm (A500NR)	€/m	61,0 m/mld	30,00 €	1830,0 €/mld
Betão do muro (C20/25)	€/m <sup>3</sup>	28,4 m <sup>3</sup> /mld	65,00 €	1844,4 €/mld
Betão projetado + malhasol	€/m <sup>2</sup>	26,8 m <sup>2</sup> /mld	80,00 €	2143,2 €/mld
Painel em <i>CSM</i> espessura 0,60 m	€/m <sup>2</sup>	30,5 m <sup>2</sup> /mld	60,00 €	3050,0 €/mld
Custo total:				9475,7 €/mld

Por observação da Tabela 5.22 e da Tabela 5.23 verifica-se que a solução alternativa em *CSM* é a mais barata, com um custo de cerca de 63,5%, inferior à solução executada com recurso à tecnologia de *JG*.

Analogamente às duas soluções anteriores determinaram-se os custos totais para os aumentos de 10%, de 20% e de 30% do comprimento, das colunas de *JG* ou do painel em *CSM*, face a cada solução alternativa respetiva. Os custos totais de cada solução encontram-se abreviados na Tabela 5.24.



Tabela 5.24: Custos totais estimados para as soluções alternativas em *JG* e em *CSM*.

Soluções alternativas em <i>JG</i>	Custo total
10% de aumento	15761,6 €/mld
20% de aumento	16610,4 €/mld
30% de aumento	17459,1 €/mld

Soluções alternativas em <i>CSM</i>	Custo total
10% de aumento	9780,7 €/mld
20% de aumento	10085,7 €/mld
30% de aumento	10390,7 €/mld

Constata-se pela Tabela 5.24 que o aumento percentual do comprimento das colunas para as soluções alternativas em *JG* tem um acréscimo mais acentuado em comparação com as soluções alternativas em *CSM*. Este custo mais acentuado destaca-se pelo facto da tecnologia de *CSM* ser mais barata, 60€ face aos 100€ da tecnologia de *JG*, e pela indicação das quantidades de materiais necessários à realização do painel solocimento serem metade das necessárias para a solução executada em *JG*.

O custo de operação do sistema de bombagem em cada solução foi determinado multiplicando o caudal a bombear contido na Tabela 5.21, pelo custo unitário de 0,036 €/m<sup>3</sup>, cedido pelo Orientador. Para a determinação do período de exploração do sistema de bombagem foi consultado o programa geral de trabalhos contido no documento Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto. Memória Descritiva (EDP, (2012)), assumindo para o efeito que a duração seria desde a conclusão dos trabalhos do último patamar de escavação até à conclusão das estruturas de entrada do túnel do DCC, sendo este período de aproximadamente 22 meses (ou 660 dias). Refere-se que a consulta do programa geral de trabalhos foi definido para a solução patente a Concurso para a ensecadeira constituída por células circulares de estacas prancha.

O custo total do sistema de bombagem, em €/mld, de cada solução para o tempo de exploração definido apresenta-se de seguida, na Tabela 5.25.

Tabela 5.25: Custo do sistema de bombagem da solução executada e das soluções alternativas apresentadas.

Solução	Caudal a bombear (m <sup>3</sup> /dia/mld)	Custo unitário do sistema de bombagem (€/m <sup>3</sup> )	Período de exploração (dias)	Custo total do sistema de bombagem (€/mld)
<i>JG</i>	executada	7,162	660	170,2
	10% de aumento	6,541		155,4
	20% de aumento	6,083		144,5
	30% de aumento	5,649		134,2
alternativa proposta	7,364	0,036		175,0
<i>CSM</i>	10% de aumento	6,697		159,1
	20% de aumento	6,237		148,2
	30% de aumento	5,943		141,2

### 5.5.3 Relação custo-benefício das soluções

Face ao custo total de construção, em €/mld, e ao custo do sistema de bombagem, em €/mld, de cada solução apresentada é agora possível avaliar a relação custo-benefício de cada solução, e realçar as suas vantagens e desvantagens.

Na Figura 5.48 expõe-se o diagrama do custo total da construção, no eixo das ordenadas, face ao custo de exploração do sistema de bombagem do caudal espectável de percolar para o interior da escavação, no eixo das abcissas, para um tempo de exploração definido em 22 meses (ou 660 dias).

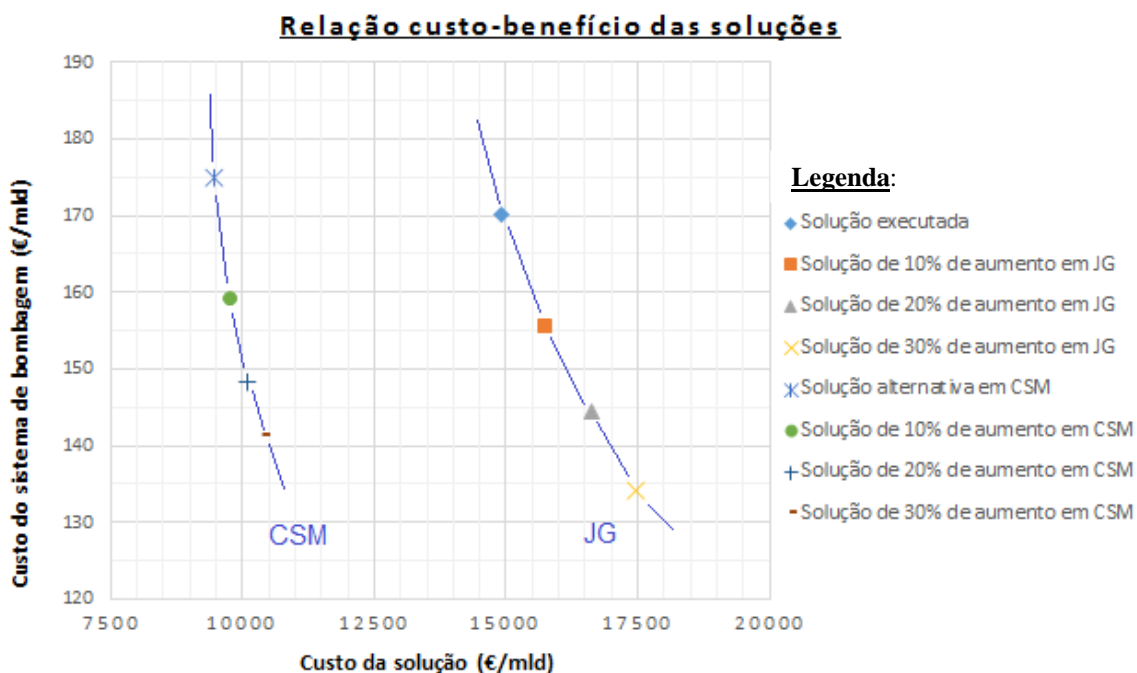


Figura 5.48: Diagrama custo da solução em função do custo do sistema de bombagem de cada solução analisada.

Como se pode observar na figura anterior, a tecnologia de *CSM*, em comparação com a tecnologia de *JG*, é mais atrativa na relação custo-benefício. O custo de cada solução em *CSM* não varia significativamente entre si, sendo a diferença entre a solução alternativa em *CSM* e a solução de 30% de aumento em *CSM* de 915 €/mld. A diferença do custo do sistema de bombagem é de 34€/mld entre as duas soluções.

Para a tecnologia de *JG* a diferença do custo entre a solução executada e a solução com 30% de aumento é mais significativa, com o valor de 2546 €/mld, cerca de 2,8 vezes mais cara, e uma diferença do custo do sistema de bombagem de 36 €/mld.

Outro aspeto que se considera interessante da análise do diagrama apresentado é o decréscimo mais acentuado que a tecnologia de *JG* permite com o aumento do comprimento da cortina estudados. Em comparação com a tecnologia *CSM* a redução do caudal em função do aumento do comprimento da cortina é inferior.

Por último refere-se que de todas as soluções apresentadas, as soluções com aumento de 20% e de 30% do comprimento em painel solo-cimento parecem ser as mais interessantes do ponto de vista da sua relação custo-benefício, porém estas não verificam a segurança do fenómeno de erosão interna. Deste modo, prevê-se a necessidade de adotar filtros e colocação de enrocamento para a sua proteção, assegurando a redução do gradiente hidráulico máximo para valores inferiores ao gradiente hidráulico crítico do solo correspondente ao último patamar de escavação.

## 6 Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

### 6.1 Conclusões do trabalho realizado

Os principais objetivos do presente trabalho consistiram no estudo do comportamento da solução executada em *Jet Grouting* (*JG*) da enseadeira para a construção do Descarregador de Cheias Complementar (DCC) da barragem da Caniçada; na verificação de segurança aos fenómenos de desestabilidade de origem hidráulica segundo o Eurocódigo 7 (EC 7); na apresentação de soluções alternativas e na análise da relação custo-benefício da solução executada e das demais soluções alternativas estudadas.

Inicialmente foi consultada bibliografia da especialidade relativa à temática dos desvios provisórios e à tecnologia de *JG*, possibilitando assim a aquisição de conhecimento nos principais fatores de dimensionamento de uma enseadeira e das capacidades que a tecnologia de *JG* permite alcançar para a execução de barreiras à percolação da água.

Posteriormente foram escolhidas inicialmente três secções Corte contidas nas peças desenhadas dos elementos base à realização deste trabalho. A sua escolha em detrimento das restantes teve como critério o zonamento geotécnico, a maior diferença de potencial hidráulico e a menor distância horizontal para o interior da enseadeira do novo DCC. Para apoiar esta análise recorreu-se a dois *softwares* disponíveis comercialmente, que têm por base o Método dos Elementos Finitos (MEF), o SEEP/W para a modelação bidimensional da percolação da água através de um meio particular, e o PLAXIS 2D para o estudo bidimensional de tensões-deformações do solo e dos elementos resistentes que caracterizam as secções em estudo.

O *software* SEEP/W provou ser uma ferramenta poderosa e robusta para a análise da percolação de água nos solos, registando-se uma diferença de 1 m, entre os valores obtidos da modelação e os valores registados em obra.

A modelação realizada com o *software* PLAXIS 2D colocou mais desafios à análise das secções Corte escolhidas, necessitando de mais “*inputs*” e da necessidade de escolher quais os modelos constitutivos mais adequados à modelação do solo e dos elementos estruturais. Após a modelação realizada foram validados os resultados obtidos da modelação, no que diz respeito aos deslocamentos das secções Corte, tendo-se verificado valores satisfatórios para o comportamento da enseadeira provisória.

Relativamente ao caudal expectável de percolar, foi necessário modelar uma nova secção, a secção Corte 2, localizada perto do encontro esquerdo da enseadeira. Esta secção adicional permitiu delimitar as áreas de influência de cada secção Corte analisada anteriormente, sendo que, a cada uma correspondem zonas geotécnicas (ZG's) e comprimentos da cortina de *JG* diferentes entre si. Porém não foi possível definir conclusões da sua modelação, por comparação direta, com registos cedidos em obra do caudal bombeado para o exterior da escavação. Refere-se que, da modelação efetuada para a solução executada da enseadeira do DCC, os valores de caudal modelados não atingem os valores definidos em projeto, no que diz respeito aos valores definidos para os critérios de alerta. Porém do registo disponibilizado da obra o caudal percolado para o interior da escavação revela-se muito superior ao esperado, ultrapassando consideravelmente os critérios de alarme.

Como possíveis causas para a disparidade observada destaca-se primeiramente o reduzido comprimento das colunas de *JG* a partir da secção Corte 2 até ao encontro esquerdo, como se pode observar da consulta do Anexo IV (Desenho N<sup>o</sup>4), e em segundo lugar, a necessidade de prolongar longitudinalmente a ensecadeira de modo a que fosse possível fechar a mesma numa zona geotécnica competente, mais precisamente na ZG2. Refere-se ainda a complexidade geológico-geotécnica existente no local de implantação da ensecadeira para a construção do DCC, a presença de solo muito heterogéneo e a existência de inúmeros blocos de granitos decompostos em profundidade, em todo o desenvolvimento longitudinal da ensecadeira, dificultando a execução de uma barreira contínua através da cortina de colunas em *JG* definida em projeto.

Como mencionado no início do capítulo, um dos objetivos definidos para realização deste trabalho foi a verificação da segurança a fenómenos de desestabilidade hidráulica, de acordo com o EC 7 da solução executada. Relativamente ao fenómeno de erosão interna, não foi verificada a segurança para a secção Corte 7, nem a secção da solução alternativa em painel solo-cimento. Condicionamentos de geometria para a implantação do DCC não permitiram uma nova configuração dos taludes de escavação e da modelação realizada foi possível concluir que o aumento da cortina de estacas nas percentagens consideradas não é suficiente para que os gradientes hidráulicos gerados sejam inferiores ao gradiente crítico do solo correspondente ao último patamar de escavação de cada secção.

Conclui-se a necessidade de dotar as secções transversais da ensecadeira, que definem desde secção Corte 7 até ao encontro esquerdo da ensecadeira (ver Anexo V (Desenho N<sup>o</sup>5) e Anexo VI (Desenho N<sup>o</sup>6)), de dispositivos que permitam a redução significativa dos gradientes hidráulicos junto dos taludes de escavação próximos do último patamar. Possíveis dispositivos a serem implementados passam pela execução de filtros de proteção e da colocação de material de maior permeabilidade, como enrocamento, justo dos taludes de escavação do último patamar, de modo que a maior permeabilidade deste material faça baixar o gradiente hidráulico nestes pontos de fronteira.

Da análise do caudal percolado e da estimativa orçamental realizada entre a solução executada e as soluções alternativas em *JG* e em *CSM* conclui-se que a tecnologia mais competitiva é a de *CSM*, sendo a de 20% e a de 30% de aumento de comprimento da cortina, as mais competitivas de entre as restantes. Estas duas soluções de acréscimo de 20% e de 30% de aumento do comprimento da cortina traduzem um decréscimo de caudal necessário a retirar do interior da escavação de 12,9% e de 17,0%, face à solução executada em obra. Refere-se ainda que a solução de 30% de aumento em *JG* é a que apresenta uma maior redução de caudal percolado, comparativamente à solução executada e às restantes soluções alternativas apresentadas, mais concretamente cerca de 21% face à solução executada.

## 6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Ao longo da realização deste trabalho foram-se encontrando alguns problemas e dificuldades que, após serem superados, levantaram novas questões. Neste ponto sugerem-se alguns aspetos passíveis de serem aprofundados, sugerindo também materiais que podem ser consideradas para desenvolvimentos futuros sobre o caso de estudo:

- estudo da percolação da água para o interior da escavação junto ao encontro esquerdo, onde se prevê brevemente uma intervenção, a fim de se fechar a ensecadeira, o que ainda não foi possível dado o exposto anteriormente.
- estudo da percolação da água através da ensecadeira através da utilização de *softwares* 3D de elementos finitos disponíveis comercialmente, de modo a quantificar com maior rigor o campo de velocidade da água percolada para o estudo dos fenómenos de desestabilidade hidráulica e aumentando a precisão do caudal espectável de percolar.
- estudo do comportamento de estruturas semelhantes ao fenómeno de erosão interna, avaliando o mecanismo de rotura passível de ser formado.
- estudo de soluções de reforço para estruturas com fator de segurança inferior a 1,0, para o fenómeno de erosão interna, possibilitando em obra a sua adoção caso se verifique necessário.
- estudo da influência do comprimento da barreira de percolação adotada para o desenvolvimento de soluções alternativas, com a determinação do fator de segurança da estrutura aos diversos mecanismos de colapso passíveis de se formarem.
- análise de sensibilidade da solução executada com colunas de *JG* face à existência de um caminho preferencial da água percolar, devido, por exemplo, a uma deficiência construtiva, avaliando o seu efeito na segurança global da estrutura.

Com o desenvolvimento dos temas referidos, será possível aumentar o conhecimento sobre o comportamento de estruturas geotécnicas perante os fenómenos de desestabilidade hidráulica e fazer uma análise mais adequada da percolação da água para o interior de escavações.



## Bibliografia

- ArcelorMittal (2009). *Design & Execution Manual – AS 500 Straight Web Steel Sheet Piles.*, ArcelorMittal Comercial RPS S.à.I., Luxembourg.
- Budhu, Muni (2011). *Soil Mechanics and Foundations*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Bureau of Reclamation BUREC. (1987). *Design of Small Dams*, 3<sup>rd</sup> Edition, Bureau of Reclamation, Water Resources Technical Publication, Denver.
- British Standard EN 12716:2001. (2001). *Execution of special geotechnical works – Jet grouting*, British Standards Institution.
- Caldeira, L. M. M. S. (2013). *Apontamentos teóricos sobre Método dos Elementos Finitos*. Instituto Superior Técnico.
- Carreto, J. M. R. (1999). *Jet Grouting. A Problemática do Dimensionamento e do Controlo de Qualidade*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
- Carreto, J. M. R. (2000). *Jet grouting. Uma Técnica em desenvolvimento*. VII Congresso Nacional de Geotecnia: A Geotecnia Portuguesa no início do novo século, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Porto.
- Carvalho, F. M. (2013). *Soluções de Escavação e Contenção Periférica Parque de Estacionamento Alves Redol*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Croce, P., Flora, A., Modoni, G. (2014). *Jet Grouting – Technology, Design and Control*, Taylor & Francis Group, New York.
- EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. (2012). *Processo de Concurso. Volume V – Elementos de Projecto (Peças Escritas)*. Memória Descritiva.
- EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. (2013). *Declaração Ambiental 2012 – Aproveitamentos Hidroeléctricos da Direcção de Produção Hidráulica*, Porto.
- EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. (2015). *Powerpoint - Antevisão do Descarregador de Cheias Complementar*.
- Eurocódigo 7 – Projecto Geotécnico (2010). *Parte 1: Regras gerais*. LNEC.
- Fonte, J. B. (2010). *Numerical modeling of excavations below the water table*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- GEO-SLOPE Internacional, Ltd. (2009). *Seepage Modeling with SEEP/W 2007 – An Engineering Methodology*, Fourth Edition, Canada.
- Gomes, C. E. S. (2013). *Conceção e Dimensionamento de Ensecadeiras de Células de Estacas Prancha*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- ICOLD. (1986). *River Control During Dam Construction*. Bulletin 48a, Paris.
- Instituto Nacional de Estatística, I.P. (2014). *Anuário Estatístico da Região Norte 2013*, INE, I.P., Lisboa.

- Kitazume, M. & Terashi, M. (2013). *The Deep Mixing Method*, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Knappett, J. A. & Craig, R. F., (2012). *Craig's Soil Mechanics*, Eighth edition, Spon Press, New York.
- KPFF Consulting Engineers (s.d). Obtido em 9 de Dezembro de 2015, de <http://www.kpff.com/>
- Malcolm Drilling Company, Inc. (s.d). Obtido em 9 de Dezembro de 2015, de <http://www.malcolmdrilling.com/>
- Mota-Engil, (2015). *Alvos\_Topográficos Ensecadeira.pdf*
- Mota-Engil, (2015). *Inclinómetros Ensecadeira.pdf*
- Mota-Engil, (2015). *Piezómetros Ensecadeira.pdf*
- Mota-Engil, (2015). *Registo de medição de caudais.pdf*
- Nemati, K. M. (2007). *Temporary Structures, Cofferdams*. Department of Construction Management. University of Washington.
- Pinheiro, A. N. (2002). *Estruturas Hidráulicas – Obras de Desvio Provisório*. Instituto Superior Técnico.
- Pinto, A., Tomásio, R., Pita, X., Pereira, A. (2012). *Ground treatment solutions using jet grouting*. ASCE Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing: pp. 2112-2121.
- Pinto, A., Pereira, A., Brito, D., Tomásio, R. (2014). *Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa – Revisão “A”*. JetSJ Geotecnia, Lda., Lisboa.
- Pinto, A., Pereira, A., Brito, D., Tomásio, R. (2014). *Projecto de Execução. Cálculos Justificativos – Revisão “B”*. JetSJ Geotecnia, Lda., Lisboa.
- Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça, (2012). *Relatório de Base – Parte 2 – Caracterização e Diagnóstico da Região Hidrográfica*.
- PLAXIS, DOC Den Haag (2004). *PLAXIS Version 8 Tutorial Manual*.
- Raposo, N. P. (2007). *Pré-dimensionamento de Estruturas de Contenção Ancoradas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rocha, G. S. C. (2006). *Desvio de rios para construção de barragens*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Sousa, E. D. C. (2009). *A Técnica de Cutter Soil Mixing Aplicada a Escavações Urbanas. Aspectos Gerais e Caso de Estudo*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Tinoco, J. A. B. (2012). *Application of Data Mining Techniques to Jet Grouting Columns Design*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- Wang, Z. F., Shen, S. L., Ho, C. E., Kim, Y. H. (2013). *Jet Grouting Practice: an Overview*, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 44, No. 4.



Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., Bruce, D. A. (1994). Ground Control and Improvement, John Wiley & Sons, Inc., New York.

<http://geomuseu.ist.utl.pt/SEMINAR2011/10%20Ensaio%20Lugeon/Lugeon.pdf> - dia 02/01/2015 17:42h

[http://www.geocaching.com/geocache/GC1D413\\_\\_st52-barragem-da-canicada?guid=9f3314db-38e0-4785-a8c1-19c898c725c2](http://www.geocaching.com/geocache/GC1D413__st52-barragem-da-canicada?guid=9f3314db-38e0-4785-a8c1-19c898c725c2) - dia 02/01/2015 18:02h

<http://digestoconvidados.dre.pt/digesto//pdf/LEX/181/313047.PDF> - dia 02/01/2015 18:06h

<http://dre.tretas.org/dre/310646/> - dia 02/01/2015 18:10h

[http://www.geomisure.com/wp/wp-content/uploads/2014/03/FOTO\\_Campo-prove\\_INTERSONDA-002.jpg](http://www.geomisure.com/wp/wp-content/uploads/2014/03/FOTO_Campo-prove_INTERSONDA-002.jpg) - dia 25/09/2015 17:55h



## **Anexos**

### **Anexo I**

Zonamento geológico-geotécnico da barragem da Caniçada - Desenho N°01

### **Anexo II**

Zonamento geológico-geotécnico. Perfil longitudinal Corte A-A - Desenho N°02

### **Anexo III**

Zonamento geológico-geotécnico. Cortes transversais - Desenho N°03

### **Anexo IV**

Zonamento geológico-geotécnico da ensecadeira executada - Desenho N°04

### **Anexo V**

Planta pormenor da ensecadeira executada - Desenho N°05

### **Anexo VI**

Alçados esquemáticos (por montante da ensecadeira) - Desenho N°06

### **Anexo VII**

Secção transversal Corte 7, 8, 10, 2 e em CSM - Desenho N°07

### **Anexo VIII**

Notas, materiais e faseamento - Desenho N°08

### **Anexo IX**

Esforços obtidos da análise da Secção Corte 7

### **Anexo X**

Esforços obtidos da análise da Secção Corte 8

### **Anexo XI**

Esforços obtidos da análise da Secção Corte 10

### **Anexo XII**

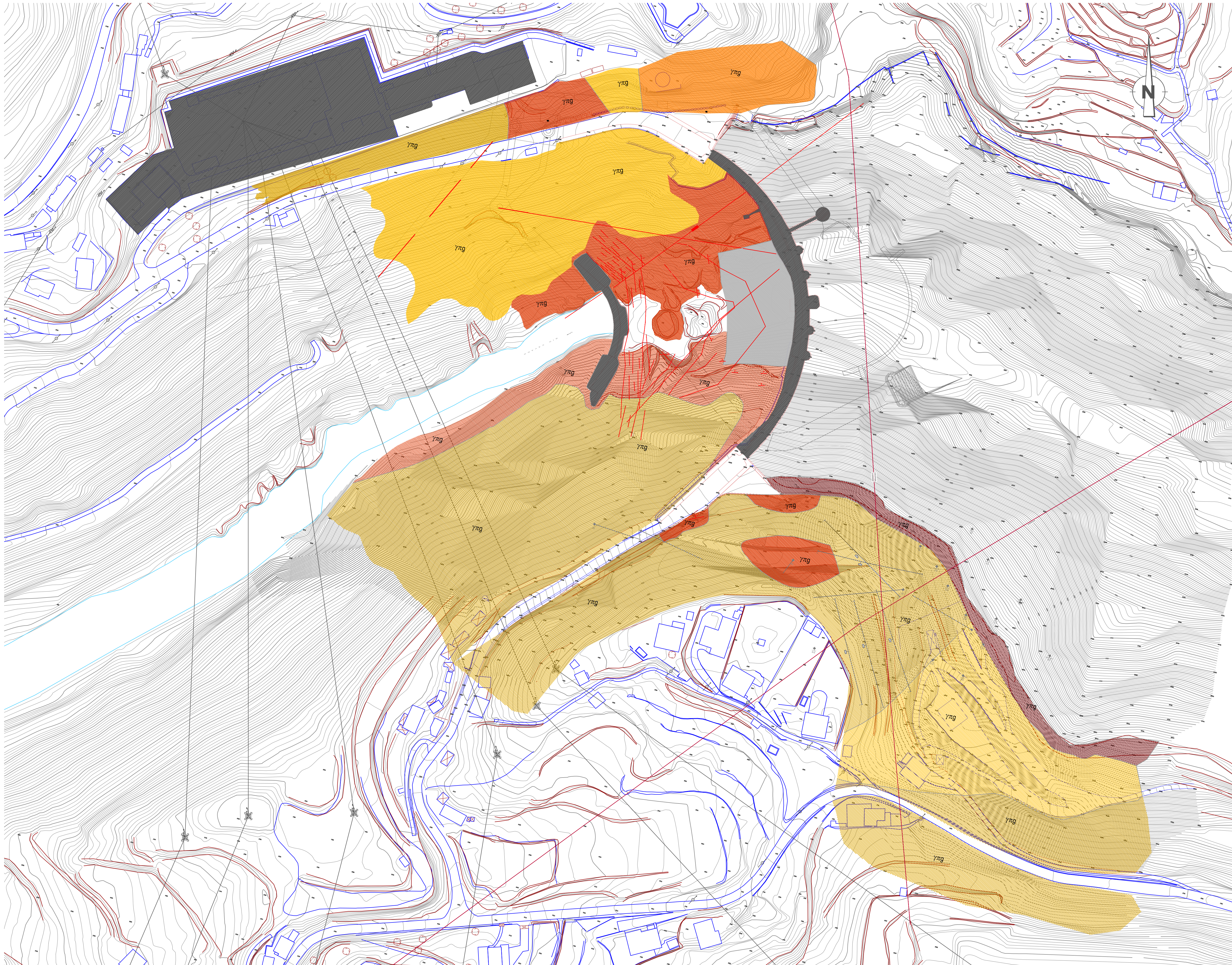
Esforços obtidos da análise da Secção painel solo-cimento em CSM



## **Anexo I**

Zonamento geológico-geotécnico da barragem da Caniçada - Desenho N°01





CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE

- $\gamma\pi g$  - Granito calcio-alcálico de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha 5B da Carta Geológica de Portugal)
- Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de socacos, com habitações e terrenos agrícolas)
- Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
- Maciço rochoso descomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
- Afloramento rochoso competente (disjunção estereoidal e/ou fracturação organizada)
- Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
- Fractura com inclinação
- Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)

TRABALHOS DE PROSPECÇÃO

- Sondagem
  - S0 (00,00)
  - S00
  - R00
  - Unidades Lagoon
  - Grau de fracturação
  - Grau de alteração
  - Litologias
  - Nível de água
- Perfil sísmico
  - PS0
  - T1
  - TD
  - Tiro direto
  - Tiro inverso

OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS

- TV - Terra vegetal
- G - Granito calcio-alcálico de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
- AR - Areia argilosa
- PT - Perda total (ensaio lagoon)
- Limite da zona geotécnica
- TD - Tiro direto
- TI - Tiro inverso

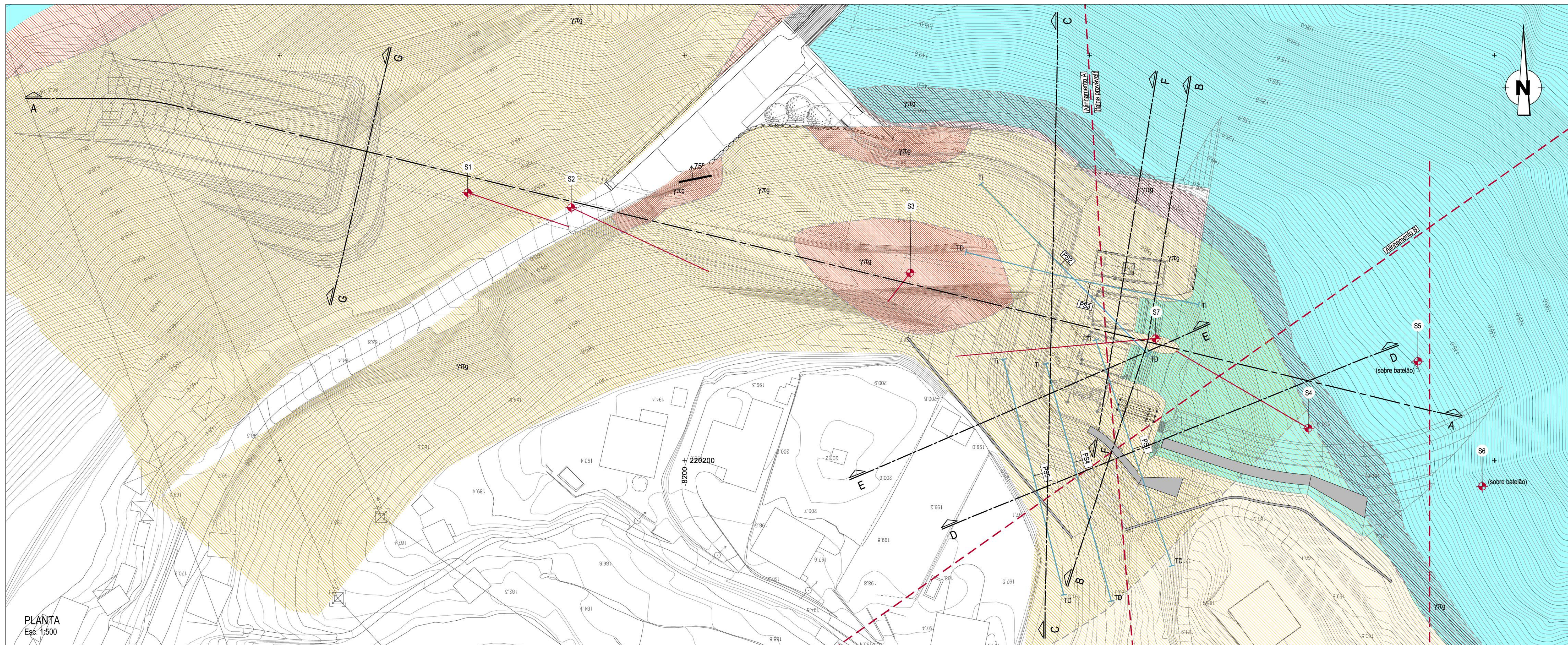
		<b>PEÇAS DESENHADAS PARA A DISSERTAÇÃO DE Mestrado</b>		<b>01</b>	
ALUNO:	JOÃO CALATROVA - N.º 59092	<b>ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DA CANIÇADA</b>			
DATA:	ABRIL 2016	FICHEIRO:	TESE_FINAL.DWG	ESCALA:	1:1000



## **Anexo II**

Zonamento geológico-geotécnico. Perfil longitudinal Corte A-A - Desenho Nº02





PLANTA  
Esc: 1/500

### CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE

- $\gamma\pi g$  - Granito calco-alcalino de duas micas, porfíroide, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha 5B da Carta Geológica de Portugal)
- Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de socacos, com habitações e terrenos agrícolas)
- Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
- Maciço rochoso descomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
- Aflorento rochoso competente (disjunção esferoidal e/ou fracturação organizada)
- Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
- Fractura com inclinação  $65^\circ$
- Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)

### TRABALHOS DE PROSPECÇÃO

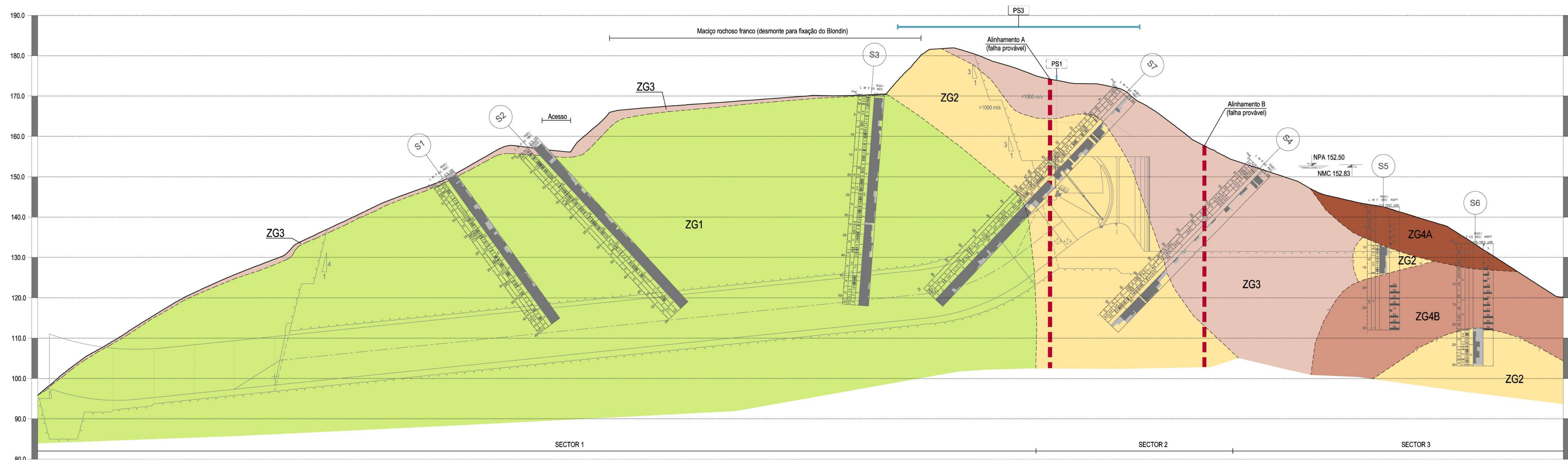


### OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS

- TV - Terra vegetal
- G - Granito calco-alcalino de duas micas, porfíroide, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
- AR - Areia argilosa
- PT - Perda total (ensaio lugeon)
- Limite da zona geotécnica
- TD - Tiro direto
- TI - Tiro inverso

### ZONAMENTO GEOTÉCNICO

ZONAS GEOTÉCNICAS	LITOLOGIA	N <sub>60</sub> <sup>1</sup> Caract.	Alteração (W)	Fracturação (F)	REC (%)	RQD (%)
ZG4	Areias de praia fluvial e aterro de solos (acessos)	<10	---	---	---	---
ZG4B	Depósito de material lançado (solos/blocos)					
ZG3	Solo residual granítico a maciço decomposto com intercalações de blocos rochosos	10 - 60	5	---	15 - 50	---
ZG2	Maciço rochoso granítico	---	3-4	2-3 a 3-4	50 - 100	50 - 75
ZG1	Maciço rochoso granítico	---	2-3	2-3	90 - 100	75 - 100



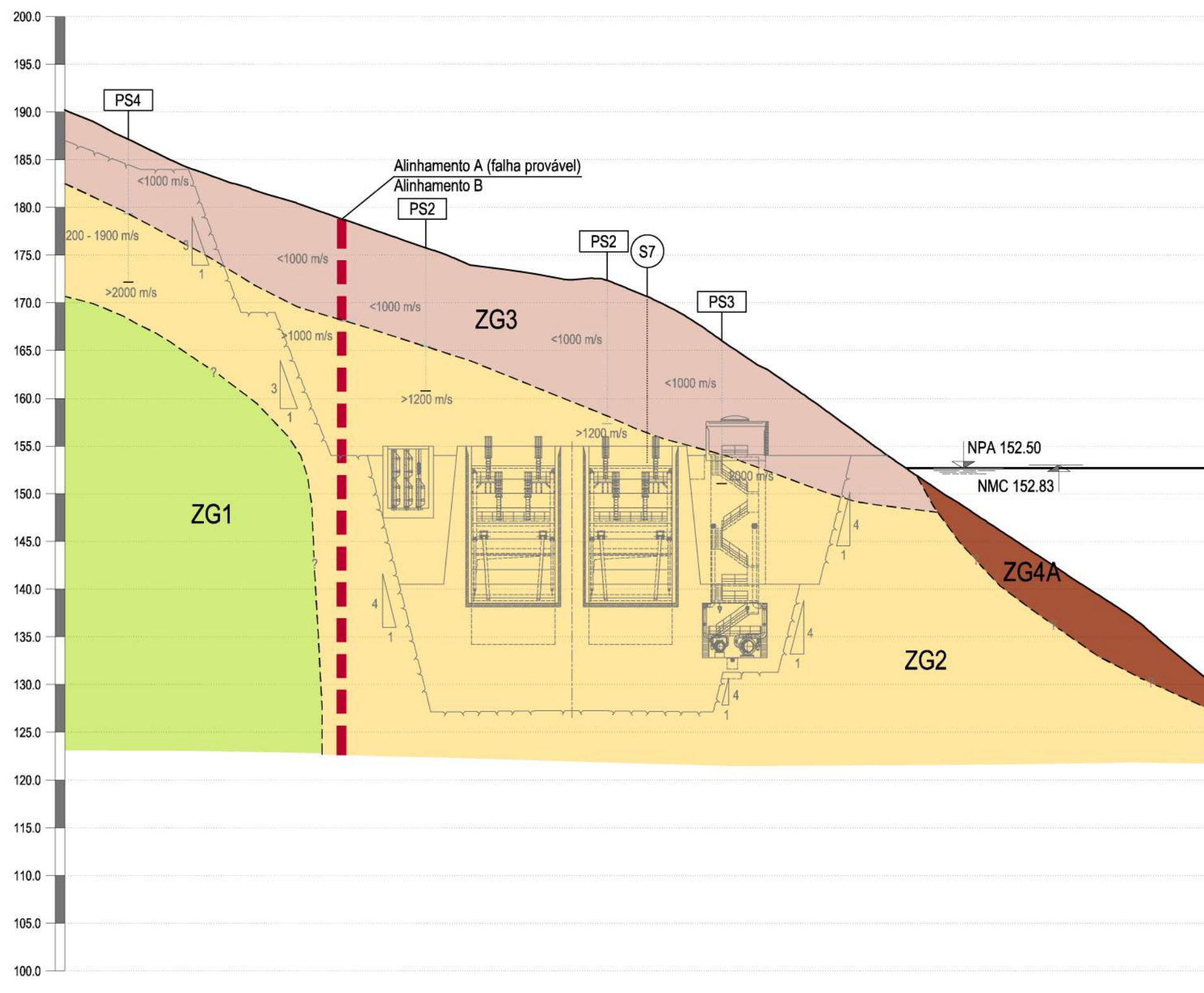
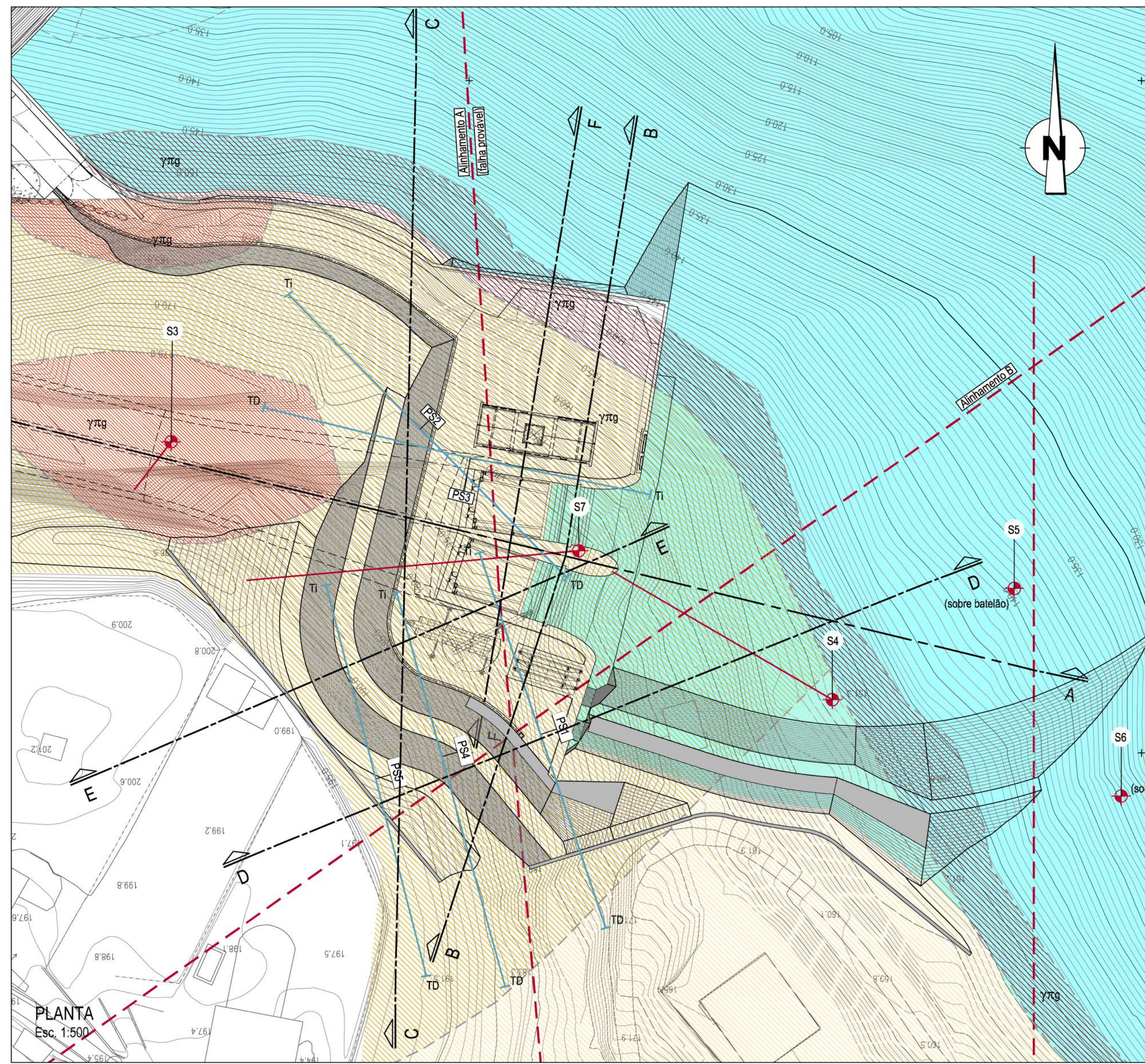
PERFIL LONGITUDINAL PELO EIXO DO DESCARREGADOR. CORTE A-A  
Esc: 1/500



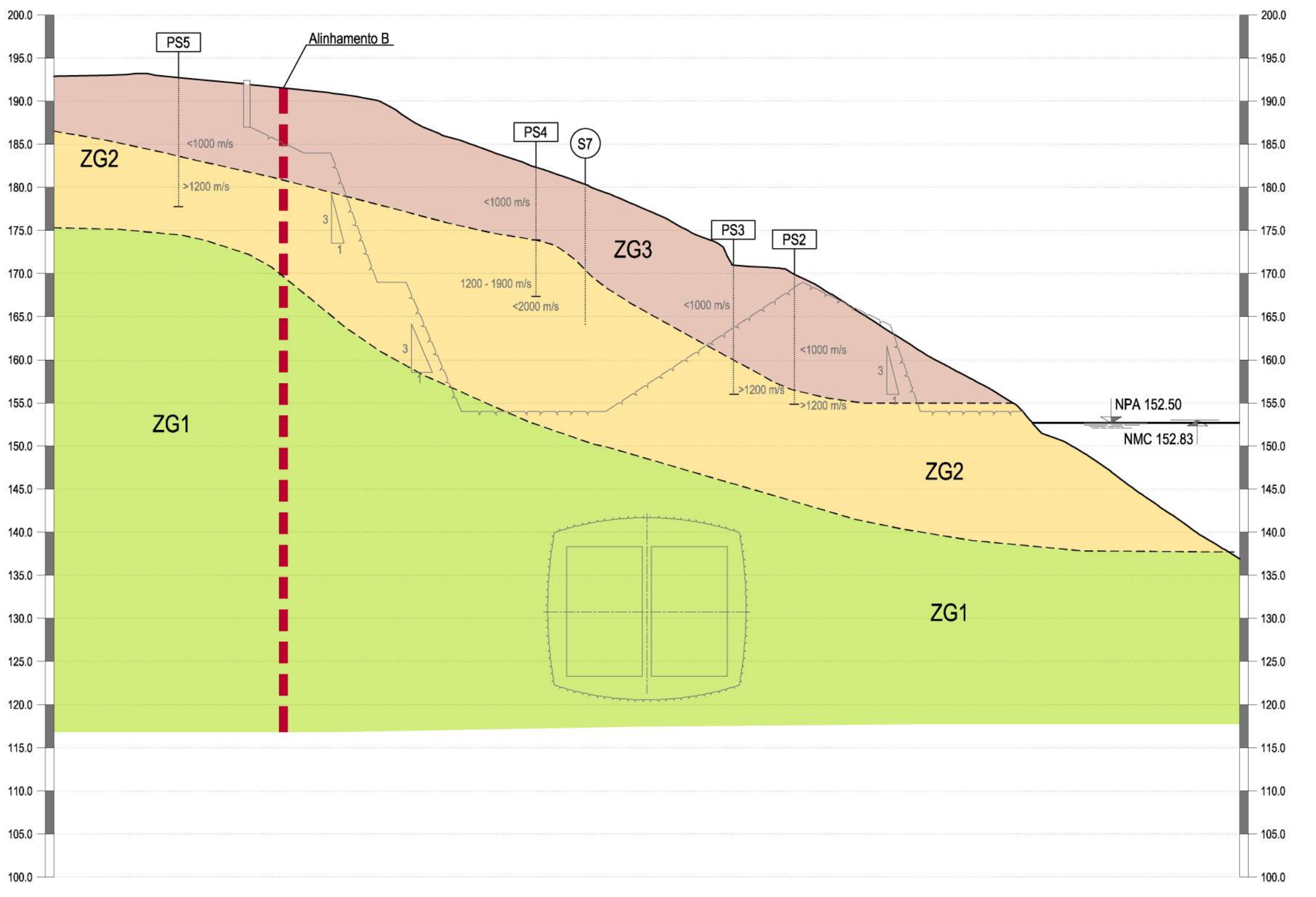
### **Anexo III**

Zonamento geológico-geotécnico. Cortes transversais - Desenho Nº03

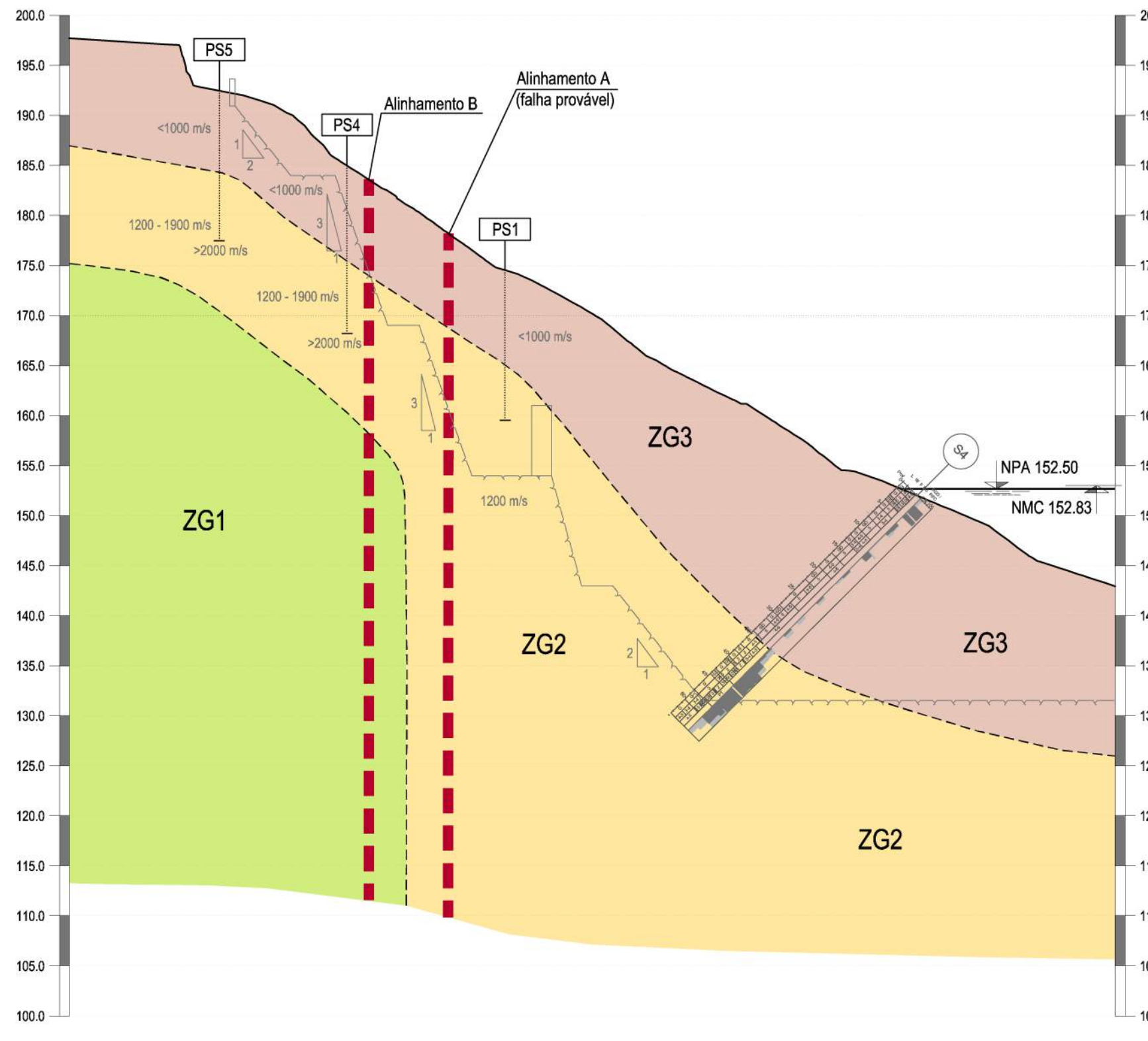




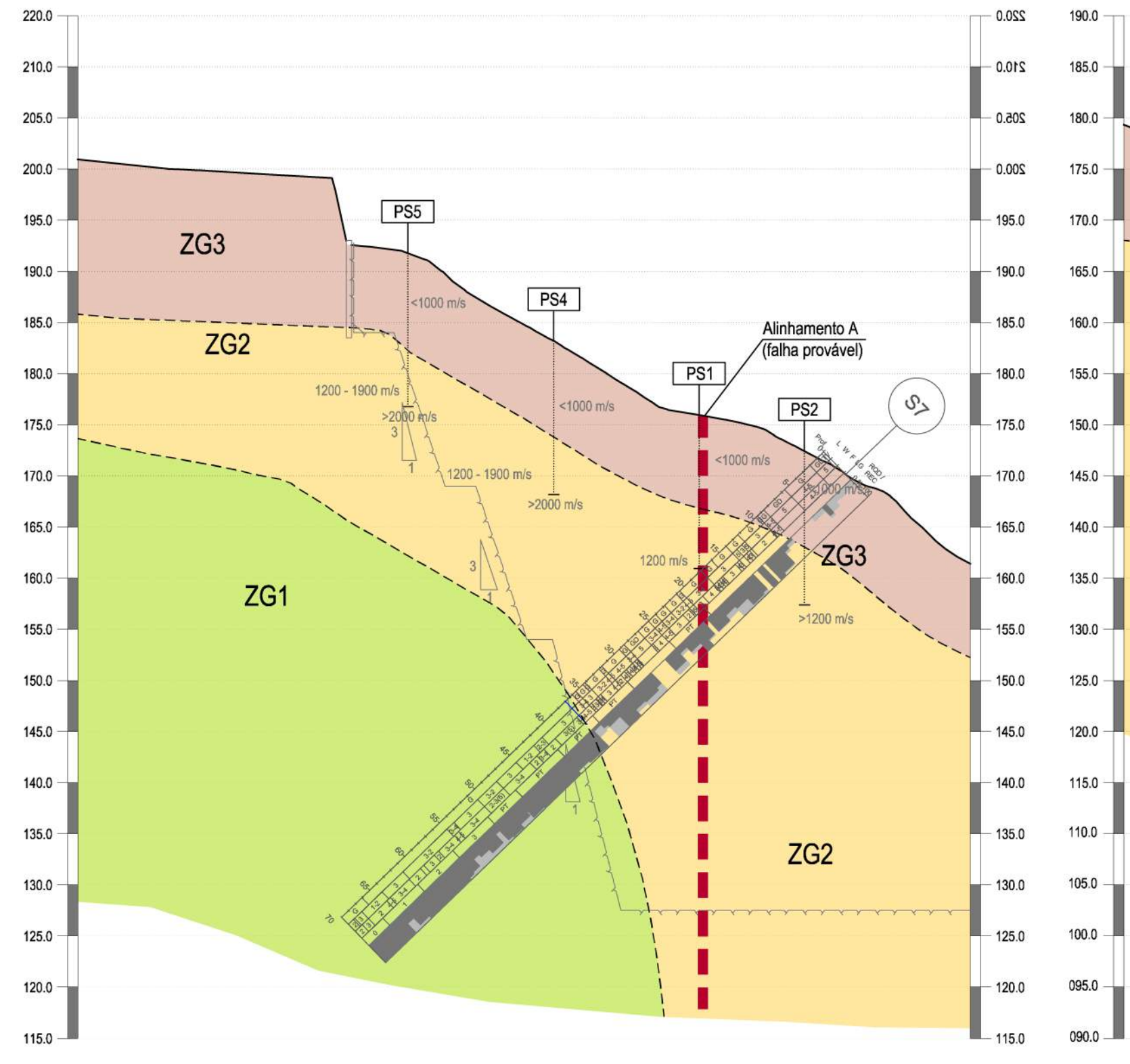
CORTE B-B  
Esc. 1:500



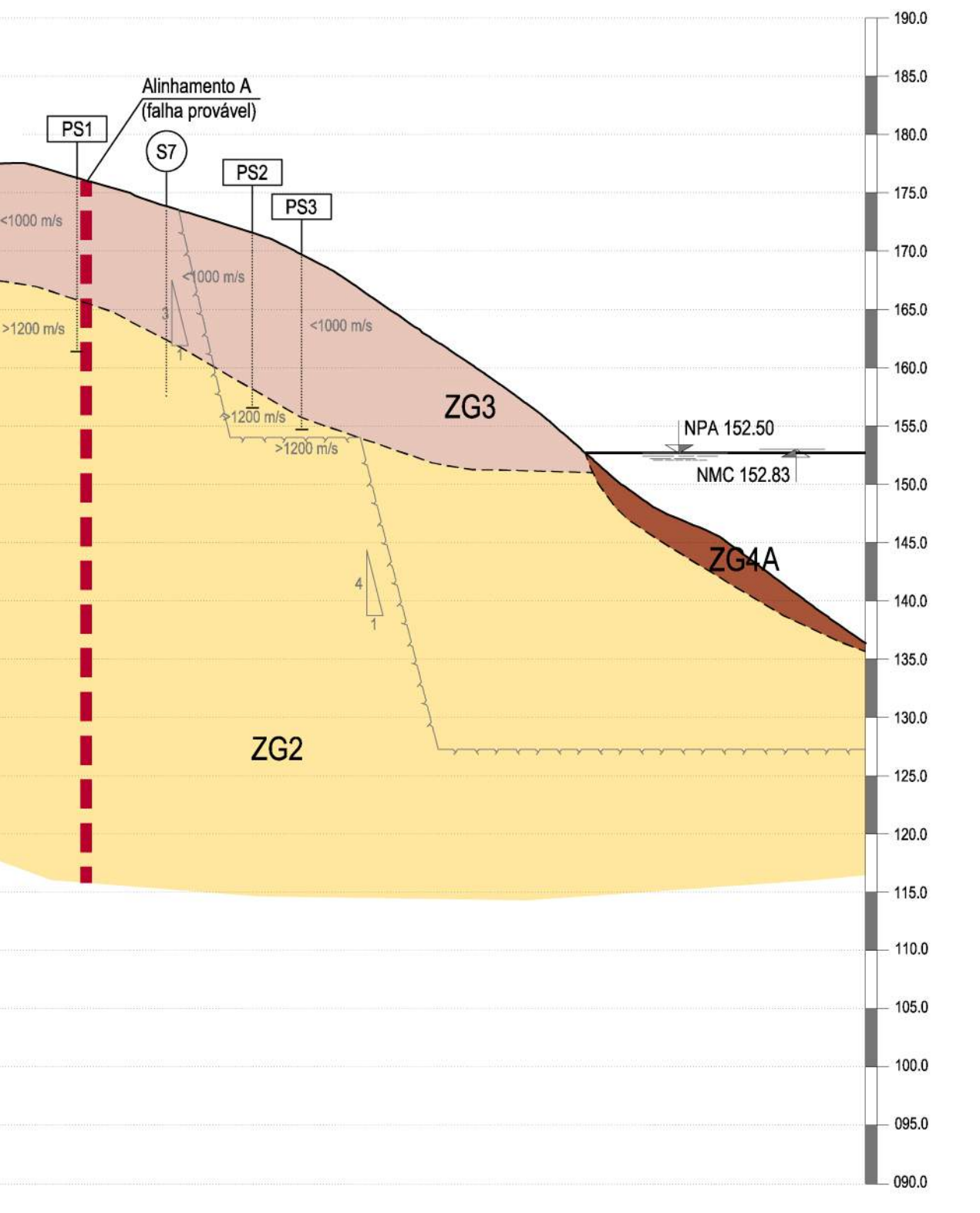
CORTE C-C  
Esc. 1:500



CORTE D-D  
Esc. 1:500



CORTE E-E  
Esc. 1:500

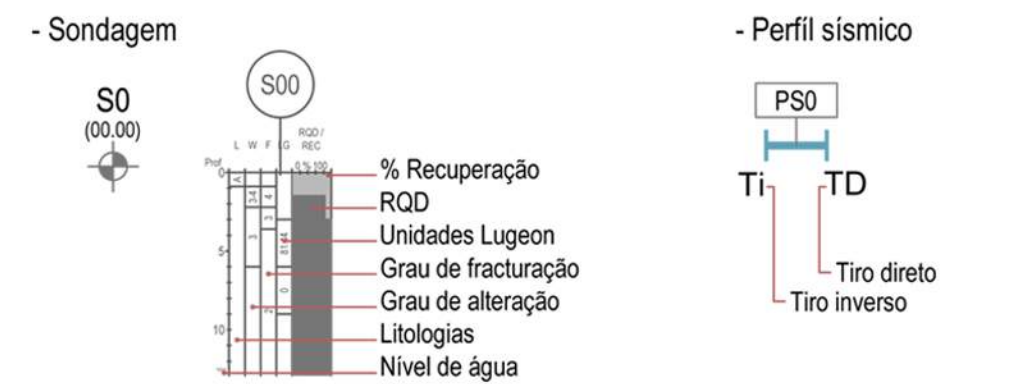


CORTE F-F  
Esc. 1:500

CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE

- $\gamma\pi g$  - Granito calco-alcalino de duas micas, porfíroide, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha 5B da Carta Geológica de Portugal)
- Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de socacos, com habitações e terrenos agrícolas)
- Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
- Maciço rochoso descomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
- Afloramento rochoso competente (disjunção estereoidal e/ou fraturação organizada)
- Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
- Fractura com inclinação  $85^\circ$
- Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)

TRABALHOS DE PROSPECÇÃO



ZONAMENTO GEOTÉCNICO

ZONAS GEOTÉCNICAS	LITOLOGIA	N <sub>60</sub> Caract.	Alteração (W)	Fracturação (F)	REC (%)	ROD (%)
ZG4 [ZG4A] [ZG4B]	Areias de praia fluvial e aterro de solos (acessos) Depósito de material lançado (solos/blocos)	<10	---	---	---	---
ZG3 [ZG3]	Solo residual granítico a maciço decomposto com intercalações de blocos rochosos	10 - 60	5 blocos rochosos 3-4	---	15 - 50 blocos rochosos 3-4 a 4-5	---
ZG2 [ZG2]	Maciço rochoso granítico	---	3-4	2-3 a 3-4	50 - 100	50 - 75
ZG1 [ZG1]	Maciço rochoso granítico	---	2-3	2-3	90 - 100	75 - 100

OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS

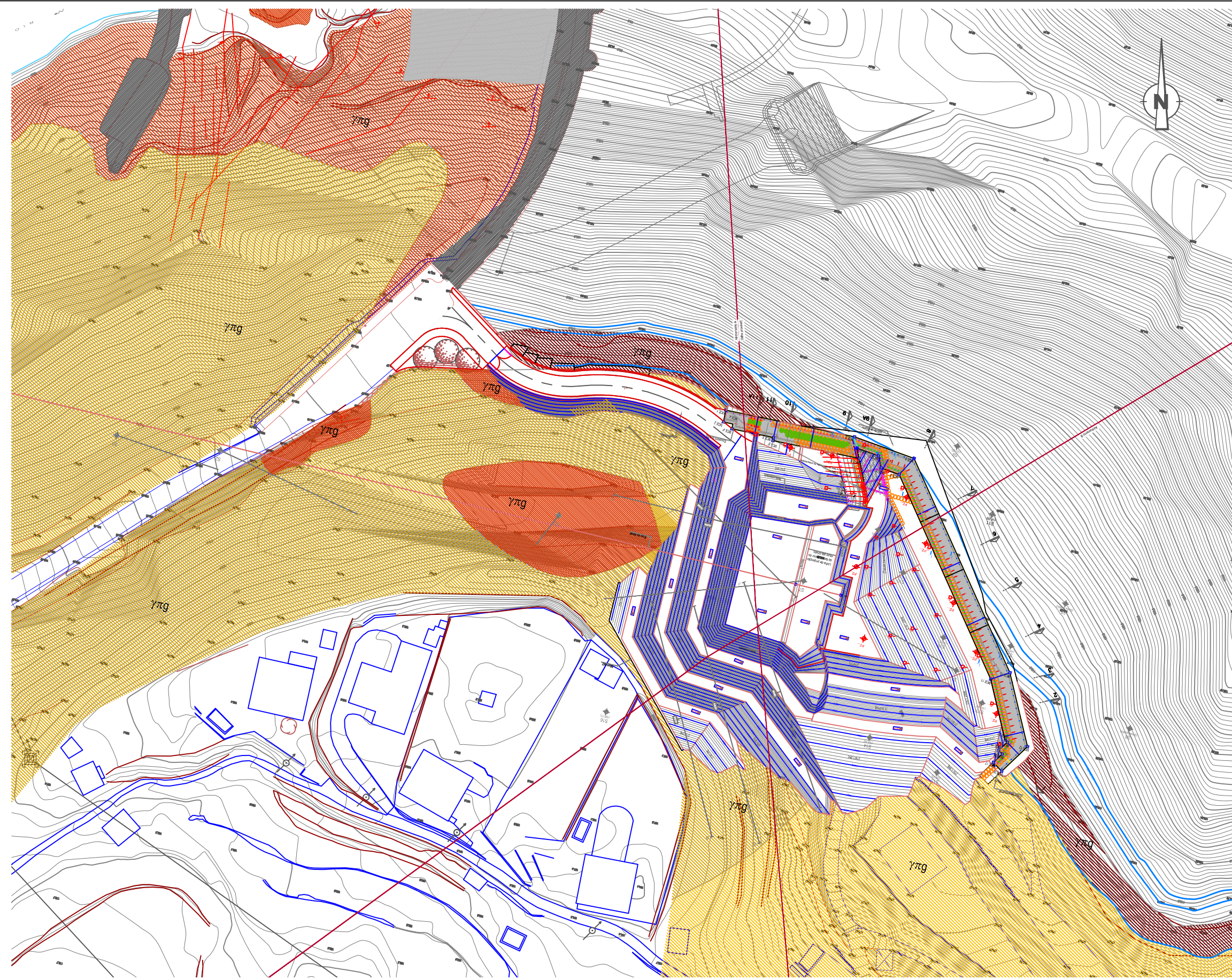
- TV - Terra vegetal
- G - Granito calco-alcalino de duas micas, porfíroide, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
- AR - Areia argilosa
- PT - Perda total (ensaio lugeon)
- - Limite da zona geotécnica
- TD - Tiro direto
- Ti - Tiro inverso



## **Anexo IV**

Zonamento geológico-geotécnico da ensecadeira executada - Desenho N<sup>o</sup>04





ENSCADEIRA  
MURO DE COROAMENTO DA ENSCADEIRA

PONTO	M	P	PONTO	M	P
ENS.1	-8034.841	220182.189	MCE.1	-8102.925	220272.351
ENS.2	-8027.773	220188.941	MCE.2	-8103.537	220269.414
ENS.3	-8031.562	220204.993	MCE.3	-8071.111	220265.725
ENS.4	-8033.266	220214.120	MCE.4	-8101.178	220268.923
ENS.5	-8034.812	220227.431	MCE.4'	-8101.433	220267.699
ENS.6	-8042.828	220223.508	MCE.5	-8091.121	220265.552
ENS.7	-8044.374	220236.818	MCE.5'	-8091.274	220264.817
ENS.8	-8045.921	220250.128	MCE.6	-8070.510	220262.957
ENS.9	-8053.936	220246.205	MCE.6'	-8069.949	220260.380
ENS.10	-8055.483	220259.516	MCE.7	-8065.164	220261.030
ENS.11	-8063.778	220263.687	MCE.7'	-8064.512	220258.031
ENS.12	-8103.027	220271.862	MCE.8	-8056.355	220260.405
			MCE.9	-8060.051	220256.422
			MCE.10	-8032.649	220207.420
			MCE.11	-8037.406	220205.810
			MCE.12	-8028.325	220189.105
			MCE.13	-8033.849	220190.743
			MCE.14	-8033.331	220190.200
			MCE.15	-8035.455	220188.171
			MCE.16	-8034.592	220187.267
			MCE.17	-8036.761	220185.195
			MCE.18	-8034.689	220183.026

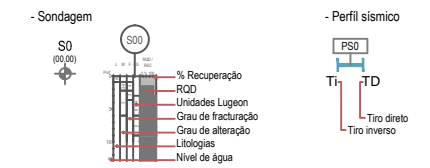
EIXO DESCARREGADOR

PONTO	M	P
DC.1	-8074.543	220226.585

CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE

- γπg** - Granito calco-alcalino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha 5B da Carta Geológica de Portugal)
- Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de soalcos, com habitações e terrenos agrícolas)
- Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
- Maciço rochoso descomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
- Afloramento rochoso competente (disjunção esférica e/ou fracturação organizada)
- Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
- Fractura com inclinação
- Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)

TRABALHOS DE PROSPECÇÃO



OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS

- TV - Terra vegetal
- G - Granito calco-alcalino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
- AR - Areia argilosa
- PT - Perda total (ensaio lugeon)
- Limite da zona geotécnica
- TD - Tiro direto
- Ti - Tiro inverso

GERAL

- Jet Grouting Ø1000mm afast. 0.80m
- Microestacas N80 88.9X6.5mm verticais
- Microestacas N80 139.7X9+1Ø35mm verticais
- Negativos para furos de injeção em 2ª Fase
- Furos de injeção a executar em 1ª Fase
- Perfis HEB160 inclinados
- Perfis HEB140 verticais
- Zona de aterro
- Piezómetros
- Inclínómetros
- Alvos topográficos
- Marcas topográficas

TALUDES DE ESCAVAÇÃO

- Pregagens Ø25mm(A500NR) inclinadas a 10%
- Drenos Ø52mm inclinados a 3%

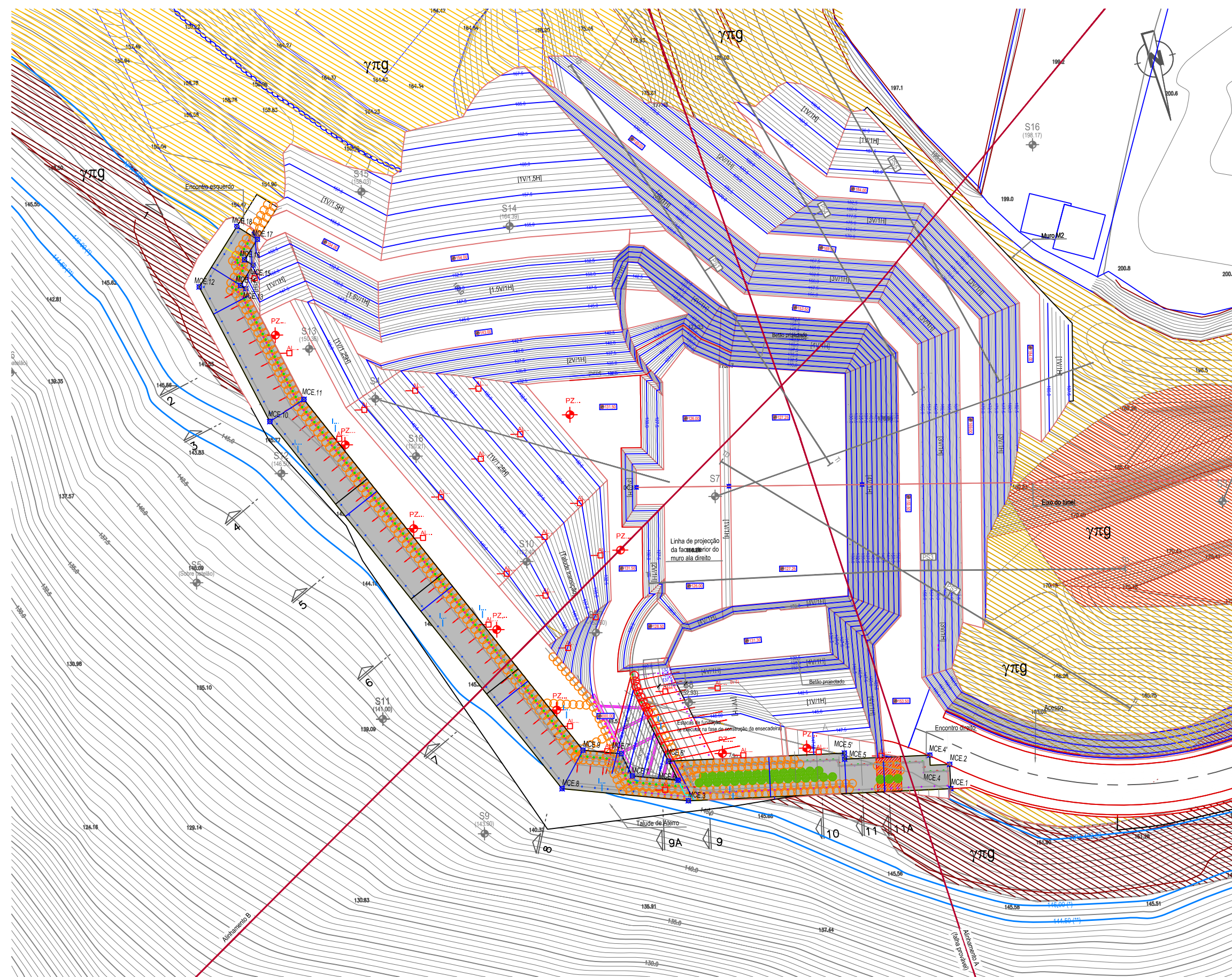
	<p>PEÇAS DESENHADAS DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO</p>		<p>DESENHO Nº: <b>04</b></p>
	<p>ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA ENSCADEIRA EXECUTADA</p>		
ALUNO:	JOÃO CALATROIA - Nº 59092		
DATA:	FICHEIRO:	ESCALA:	
ABRIL 2016	TESE FINAL.DWG	1:1000	



## **Anexo V**

Planta pormenor da ensecadeira executada - Desenho N°05





**ENSCADEIRA**

PONTO	M	P
ENS.1	-8034.841	220182.189
ENS.2	-8027.773	220188.941
ENS.3	-8031.562	220204.993
ENS.4	-8033.266	220214.120
ENS.5	-8034.812	220227.431
ENS.6	-8042.828	220223.508
ENS.7	-8044.374	220236.818
ENS.8	-8045.921	220250.128
ENS.9	-8053.936	220246.205
ENS.10	-8055.483	220259.516
ENS.11	-8063.778	220263.687
ENS.12	-8103.027	220271.862

**MURO DE COROAMENTO DA ENSCADEIRA**

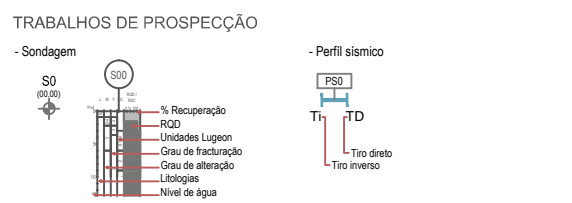
PONTO	M	P
MCE.1	-8102.925	220272.351
MCE.2	-8103.537	220269.414
MCE.3	-8071.111	220265.725
MCE.4	-8101.178	220268.923
MCE.4'	-8101.433	220267.699
MCE.5	-8091.121	220265.552
MCE.5'	-8091.274	220264.817
MCE.6	-8070.510	220262.957
MCE.6'	-8069.949	220260.380
MCE.7	-8065.164	220261.030
MCE.7'	-8064.512	220258.031
MCE.8	-8056.355	220260.405
MCE.9	-8060.051	220256.422
MCE.10	-8032.649	220207.420
MCE.11	-8037.406	220205.810
MCE.12	-8028.325	220189.105
MCE.13	-8033.849	220190.743
MCE.14	-8033.331	220190.200
MCE.15	-8035.455	220188.171
MCE.16	-8034.592	220187.267
MCE.17	-8036.761	220185.195
MCE.18	-8034.689	220183.026

**EIXO DESCARREGADOR**

PONTO	M	P
DC.1	-8074.543	220226.585

- CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE**
- γTg** - Granito calco-alcalino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha 5B da Carta Geológica de Portugal)
  - █** - Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de socacos, com habitações e terrenos agrícolas)
  - █** - Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
  - █** - Maciço rochoso descomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
  - █** - Afloramento rochoso competente (disjunção esférica e/ou fraturação organizada)
  - █** - Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
  - ↗** - Fractura com inclinação
  - - Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)



- OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS**
- TV - Terra vegetal
  - G - Granito calco-alcalino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
  - AR - Areia argilosa
  - PT - Perda total (ensaio lugeon)
  - - Limite da zona geotécnica
  - TD - Tiro direto
  - Ti - Tiro inverso

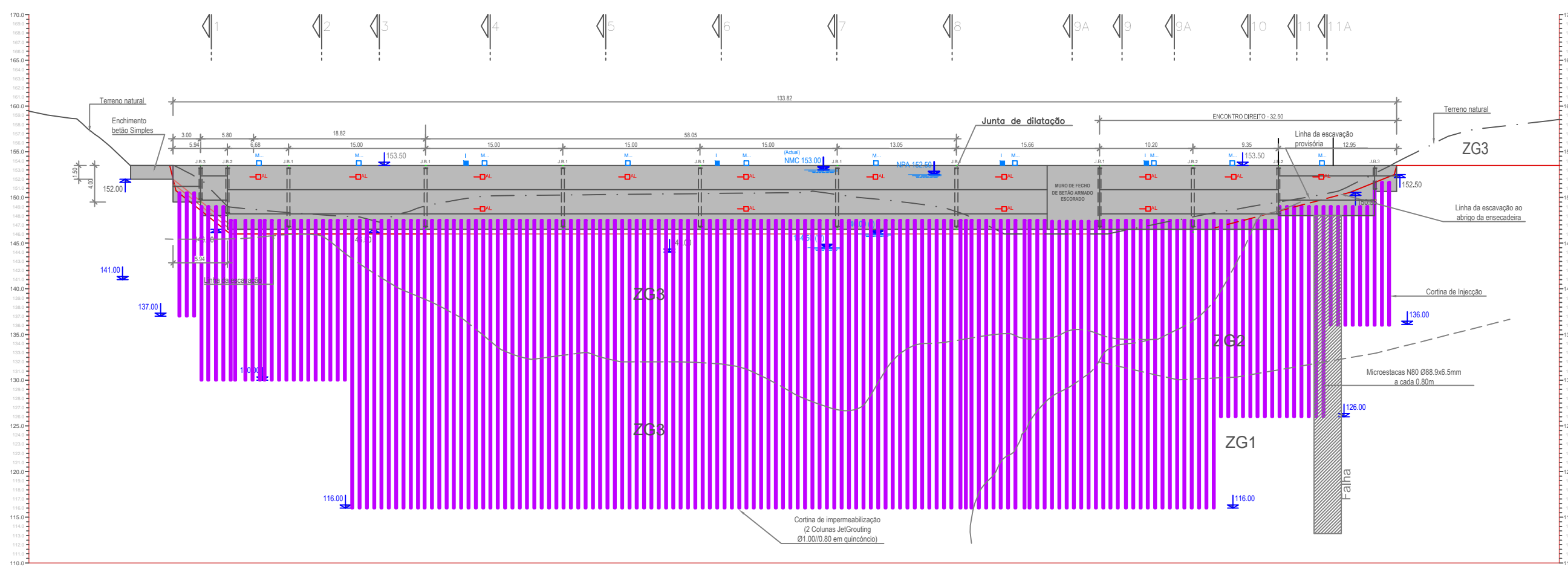
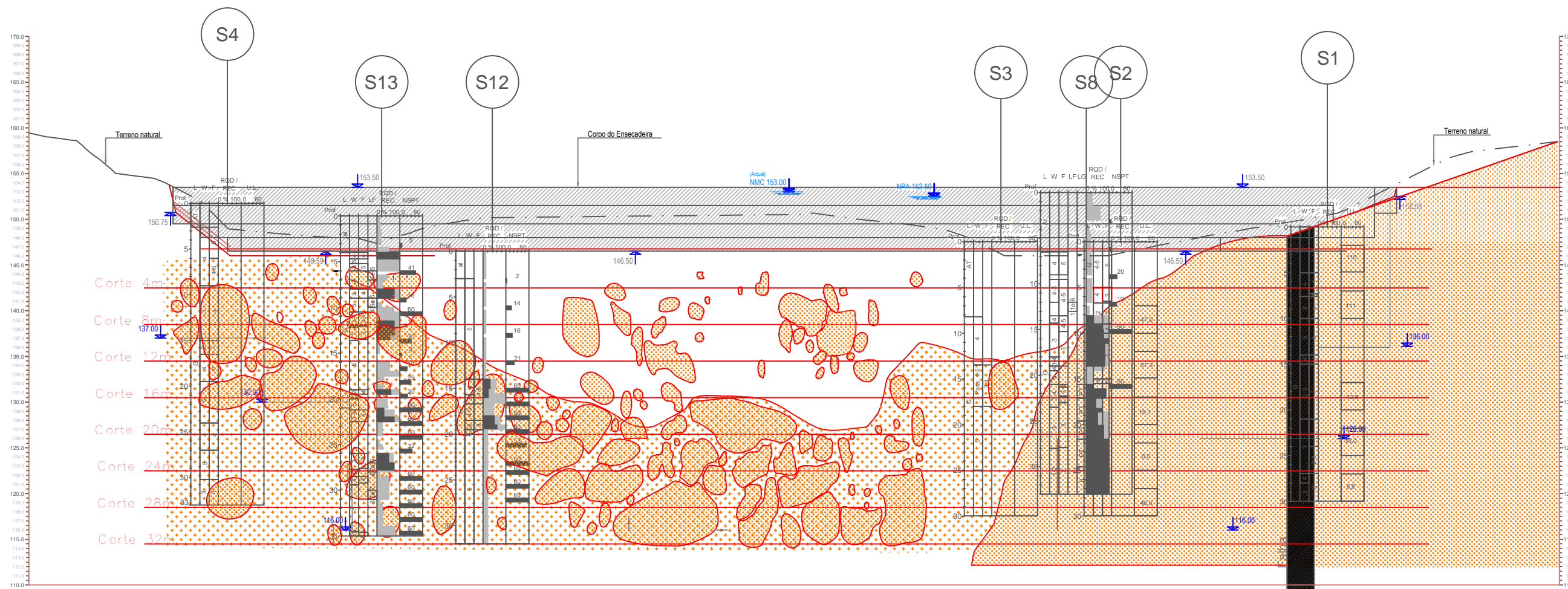
- GERAL**
- - Jet Grouting Ø1000mm afast. 0.80m
  - ◆ - Microestacas N80 88.9X6.5mm verticais
  - ◆ - Microestacas N80 139.7X9+1Ø35mm verticais
  - - Negativos para furos de injeção em 2ª Fase
  - - Furos de injeção a executar em 1ª Fase
  - - Perfis HEB160 inclinados
  - - Perfis HEB140 verticais
  - █ - Zona de aterro
  - ◆ - Piezómetros
  - - Inclinómetros
  - - Alvos topográficos
  - - Marcas topográficas
- TALUDES DE ESCAVAÇÃO**
- - Pregagens Ø25mm(A500NR) inclinadas a 10%
  - - Drenos Ø52mm inclinados a 3%

	<b>PEÇAS DESENHADAS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO</b>		<b>05</b>
	<b>PLANTA PORMENOR DA ENSCADEIRA EXECUTADA</b>		
ALUNO:	JOÃO CALATROIA - Nº 59092		DESENHO Nº:
DATA:	FICHEIRO:	ESCALA:	
ABRIL 2016	TESE FINAL.DWG	1:500	



## **Anexo VI**

Alçados esquemáticos (por montante da ensecadeira) - Desenho N°06



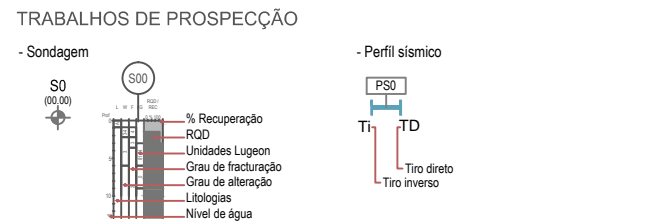
QUADRO DE COORDENADAS

ENSECADEIRA			MURO DE COROAMENTO DA ENSECADEIRA		
PONTO	M	P	PONTO	M	P
ENS.1	-8034.841	220182.189	MCE.1	-8102.925	220272.351
ENS.2	-8027.773	220188.941	MCE.2	-8103.537	220269.414
ENS.3	-8031.562	220204.983	MCE.3	-8071.111	220265.725
ENS.4	-8033.266	220214.120	ENS.4	-8101.178	220268.923
ENS.5	-8034.812	220227.431	MCE.4	-8101.433	220267.699
ENS.6	-8042.828	220223.508	MCE.5	-8091.121	220265.552
ENS.7	-8044.374	220236.818	MCE.5	-8091.274	220264.817
ENS.8	-8045.921	220250.128	MCE.6	-8070.510	220262.957
ENS.9	-8053.936	220246.205	MCE.6	-8069.949	220260.380
ENS.10	-8055.483	220259.516	MCE.7	-8065.164	220261.030
ENS.11	-8063.778	220263.687	MCE.7	-8064.512	220258.031
ENS.12	-8103.027	220271.862	MCE.8	-8056.355	220260.405
			MCE.9	-8060.051	220258.422
			MCE.10	-8032.649	220207.420
			MCE.11	-8037.406	220205.810
			MCE.12	-8028.325	220189.105
			MCE.13	-8033.849	220190.743
			MCE.14	-8033.331	220190.200
			MCE.15	-8035.455	220188.171
			MCE.16	-8034.592	220187.267
			MCE.17	-8036.761	220185.195
			MCE.18	-8034.689	220183.026

EIXO DESCARREGADOR		
PONTO	M	P
DC.1	-8074.543	220226.585

- CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DE SUPERFÍCIE
- Y7G - Granito calcio-alcino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro (Folha S8 da Carta Geológica de Portugal)
  - Maciço rochoso essencialmente decomposto com significativa espessura de solo residual (zonas de socatos, com habitações e terrenos agrícolas)
  - Maciço rochoso muito alterado a decomposto com reduzida espessura de solo residual (disjunção de blocos irregular)
  - Maciço rochoso decomprimido de moderada competência (disjunção de blocos irregular)
  - Afloramento rochoso competente (disjunção estereoidal e/ou fraturação organizada)
  - Zona de praia fluvial (areia média) com muita acumulação de blocos rochosos de natureza granítica
  - Fratura com inclinação
  - Alinhamento de fraqueza (interpretação geomorfológica)



- OUTRAS CONVENÇÕES GEOLÓGICAS E HIDRÁULICAS
- TV - Terra vegetal
  - G - Granito calcio-alcino de duas micas, porfírido, de grão grosseiro ou grão médio a grosseiro
  - AR - Areia argilosa
  - PT - Perda total (ensaio lugeron)
  - Limite da zona geotécnica
  - TD - Tiro direto
  - TI - Tiro inverso

ZONAMENTO GEOTÉCNICO

ZONAS GEOTÉCNICAS	LITOLOGIA	Narr. Caract.	Alteração (W)	Fraturação (F)	REC (%)	ROD (%)
ZG4A	Áreas de praia fluvial e aterro de solos (acessos)	<10	---	---	---	---
ZG4B	Depósito de material lançado (solos/blocos)					
ZG3	Solo residual granítico a maciço decomposto com intercalações de blocos rochosos	10 - 60	5	---	15-60	---
ZG2	Maciço rochoso granítico	---	3-4	3-4 a 4-5	50-75	50-75
ZG1	Maciço rochoso granítico	---	2-3	2-3	90-100	75-100

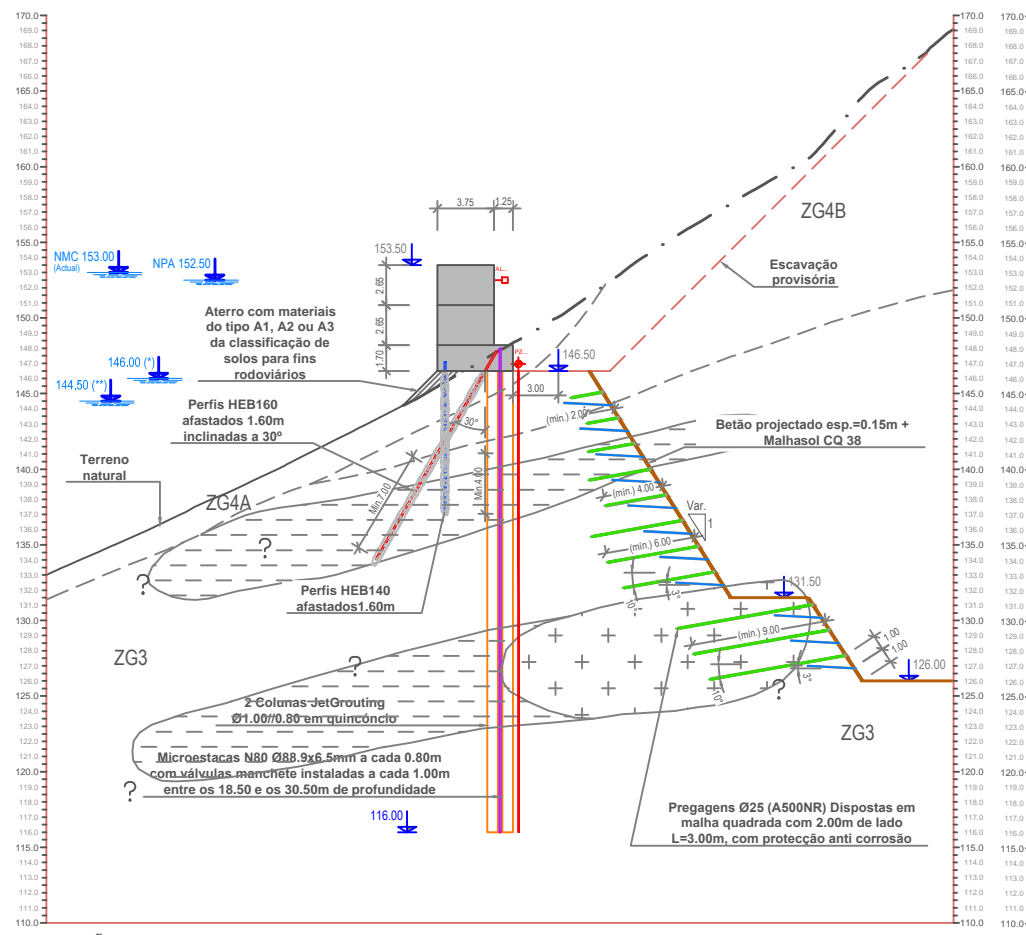
- GERAL
- Jet Grouting Ø1000mm afast. 0.80m
  - Microestacas N80 88.9x6.5mm verticais
  - Microestacas N80 139.7x9+1035mm verticais
  - Negativos para furos de injeção em 2ª Fase
  - Furos de injeção a executar em 1ª Fase
  - Perfis HEB160 inclinados
  - Perfis HEB140 verticais
  - Zona de aterro
  - Piezômetros
  - Inclinómetros
  - Alvos topográficos
  - Marcas topográficas
- TALUDES DE ESCAVAÇÃO
- Pregagens Ø25mm(A500NR) inclinadas a 10%
  - Drenos Ø52mm inclinados a 3%

	<b>PEÇAS DESENHADAS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO</b>		<b>06</b>
	ALUNO: JOÃO CALATROIA - Nº 59092	<b>ALÇADOS ESQUEMÁTICOS (POR MONTANTE DA ENSECADEIRA)</b>	
DATA: ABRIL 2016	FICHEIRO: TESE FINAL.DWG	ESCALA: 1:500	DESENHO Nº:

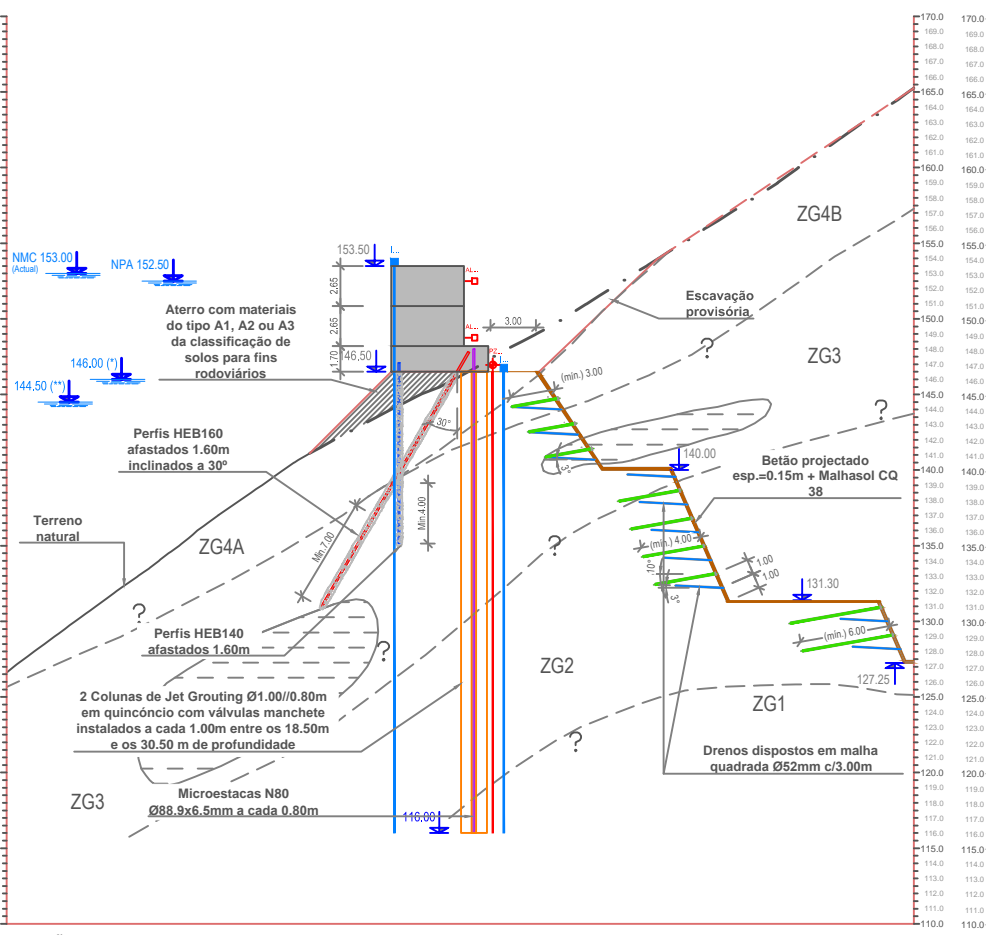
## **Anexo VII**

Secção transversal Corte 7, 8, 10, 2 e em CSM - Desenho N°07

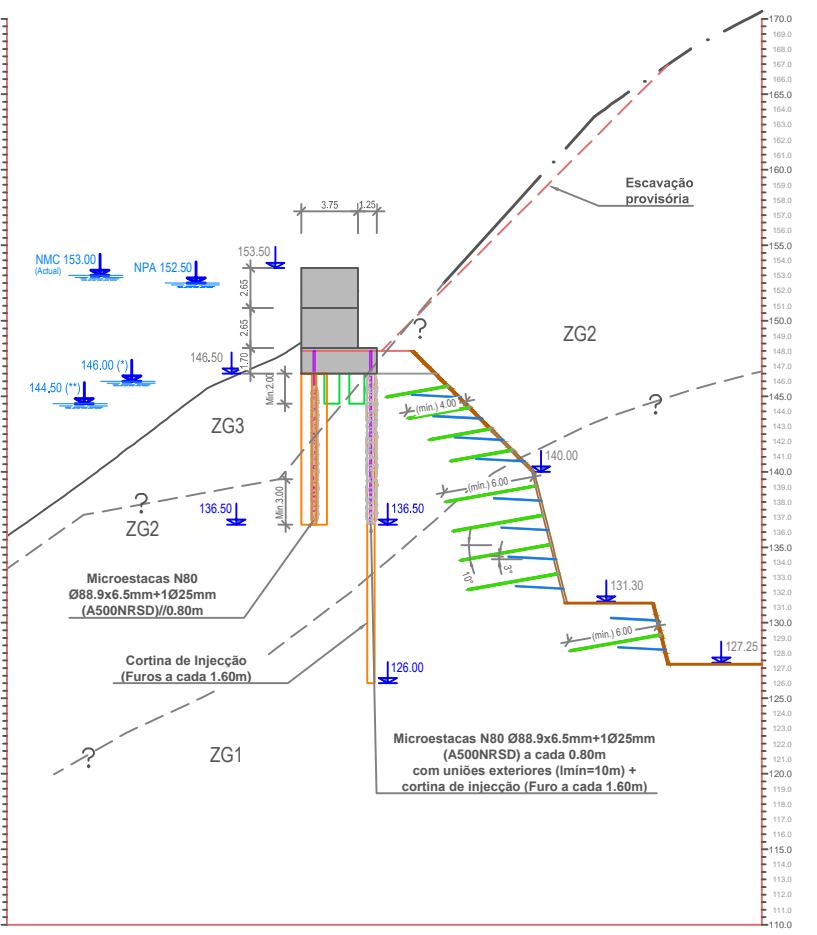




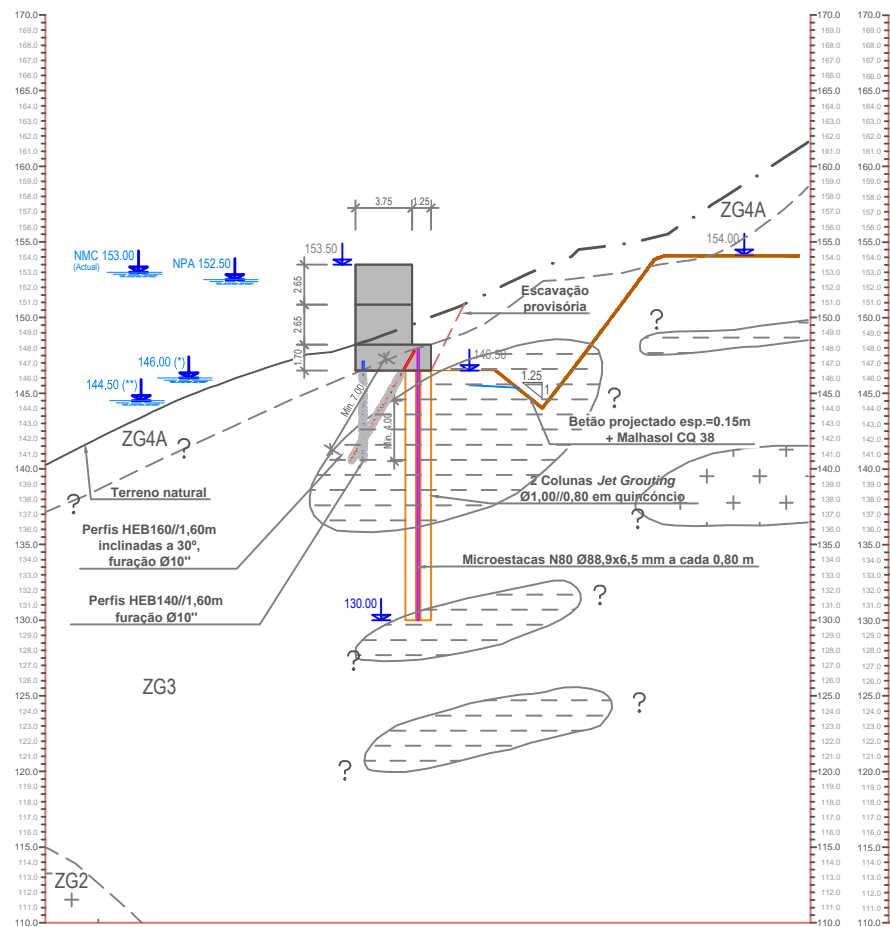
SECCÃO CORTE 7



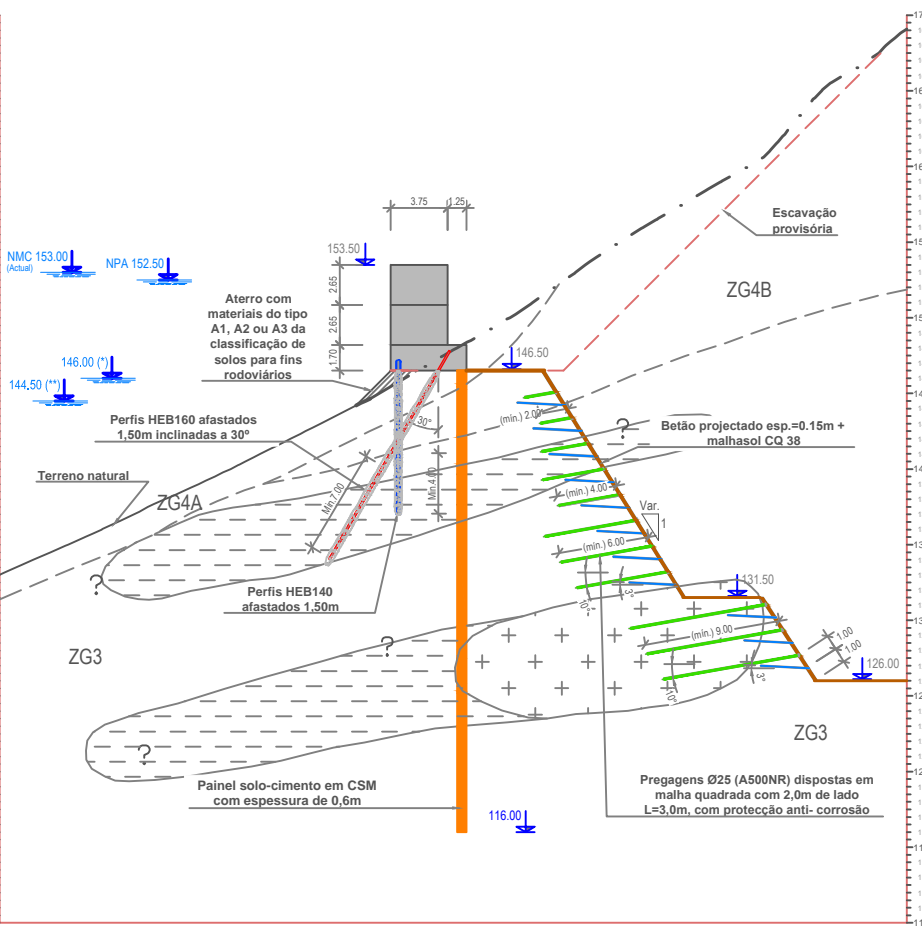
SECCÃO CORTE 8



SECCÃO CORTE 10



SECCÃO CORTE 2 (ENCONTRO ESQUERDO)



SECCÃO PAINEL SOLO-CIMENTO EM CSM

**LEGENDA:**

**GERAL:**

- JET GROUTING Ø1000mm AFAST. 0.80m
- MICROESTACAS N80 88.9x6.5mm VERTICAIS
- MICROESTACAS N80 139.7x9+1Ø35mm VERTICAIS
- NEGATIVOS PARA Furos DE INJECCÃO EM 2ª FASE
- Furos DE INJECCÃO A EXECUTAR EM 1ª FASE
- PERFIS HEB160 INCLINADOS
- PERFIS HEB140 VERTICAIS
- ZONA DE ATERRO (EVENTUAL) EM FUNÇÃO DO PERIODO DA OBRA
- + PZ... PIEZÓMETROS
- + I... INCLINÓMETROS
- + AL... ALVOS TOPOGRÁFICOS
- + M... MARCAS TOPOGRÁFICAS

**TALUDES DE ESCAVAÇÃO:**

- PREGAGENS Ø25mm(A500NR) INCLINADAS A 10%
- DRENOS Ø52mm INCLINADOS A 3%

<p><b>TÉCNICO LISBOA</b></p>	<b>PEÇAS DESENHADAS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO</b>	<b>DESENHO Nº:</b>	
	07	<b>SECÇÃO TRANSVERSAL CORTE 7, 8, 10, 2 E CSM</b>	
ALUNO : JOÃO CALATROIA - Nº 59092	DATA : ABRIL 2016	FICHEIRO : TESE FINAL.DWG	ESCALA : 1:500

## **Anexo VIII**

Notas, materiais e faseamento - Desenho N°08

**NOTAS:**

- Todas as dimensões encontram-se em metros.

**MATERIAIS:**

**Betão:**

Muro de Gravidade: EN206-1;C20/25;X0(Pt);S3;Dmax25mm;C11.0

Muro de betão armado: EN206-1;C25/30;XC2(Pt);S3;Dmax25mm;C10.4

Regularização: EN206-1;C12/15;X0(Pt);S3;Dmax25mm;C11.0

Betão Projectado (via húmida): Características de resistência e deformabilidade equivalentes a C25/30-XC2

**Aço:**

Perfis metálicos S355JR

Tubos metálicos de microestacas N80(API5A)

Muro (zona de amarração dos perfis metálicos): A 500 NR

Pregagens varão 32 mm, com centralizadores a cada 1 m: A 500 NR

Chapas metálicas: S275JR (EN 10025, fyd = 275MPa)

**Geodrenos:**

- Tubos de PVC 52 mm, crepinados, envoltos em geotêxtil (mín 200 gr/m<sup>2</sup>)

**Colunas de Jet Grouting:**

As colunas deverão garantir a mobilização dos seguintes parâmetros resistentes definidos em projeto:

- Resistência à compressão simples das colunas, aos 28 dias, valor de rotura: 40 kg/cm<sup>2</sup> (4,0 MPa);

- Módulo de deformabilidade das colunas-solo, aos 28 dias, quando submetidas a cargas axiais de compressão de serviço: 1,0 GPa (valor médio).

O valor de referência da permeabilidade a atingir nas colunas de Jet Grouting será de 1x10<sup>-8</sup>m/s (valor considerado na modelação numérica).

Tendo por base a informação sobre a constituição química da água e dos terrenos interessados, propõe-se a adopção do cimento tipo CEM II / 42,5 R.

Colunas de Jet Grouting sob Muros do Encontro Direito e Muro Ala: cimento tipo CEM IV / 32,5 R

**Calda de cimento:**

A calda que constitui o bolbo de selagem dos perfis metálicos do tipo HEB deverá ser injectada através de técnica adequada (tubo multiválvulas e obturador simples - IGU) e dispor das seguintes características:

- Injecção de selagem: A/C = 1/2,5
- Injecção a alta pressão (> 4,0MPa): A/C = 1/2,3
- Resistência à compressão simples (7 dias): 27 MPa
- Cimento CEM II 42,5 R
- Cimento CEM IV 32,5 R - Muro Ala e Encontro Direito

A calda de cimento a utilizar na cortina de injeções das fissuras dos blocos e materiais rochosos, deverá dispor das seguintes características:

- Injecção de selagem e a alta pressão (<5,0MPa): A/C = 1/2,5
- Resistência à compressão simples (7 dias): 27 MPa
- Cimento CEM I 42,5 R
- Cimento CEM IV 32,5 R - Muro Ala e Encontro Direito


A calda de cimento a utilizar no preenchimento do furo após instalação das microestacas, realizado de baixo para cima, deverá dispor das seguintes características:

- Injecção de preenchimento e selagem: A/C = 1/2,5
- Resistência à compressão simples (7 dias): 27 MPa
- Cimento CEM I 42,5 R
- Cimento CEM IV 32,5 R - Muro Ala e Encontro Direito

**FASEAMENTO – ENSECADEIRA / MURO DE GRAVIDADE:**

O faseamento construtivo considerado no documento Projecto de Execução. Memória Descritiva e Justificativa - Revisão "A" elaborado pela empresa JetSJ Geotecnia, Lda, propõe:

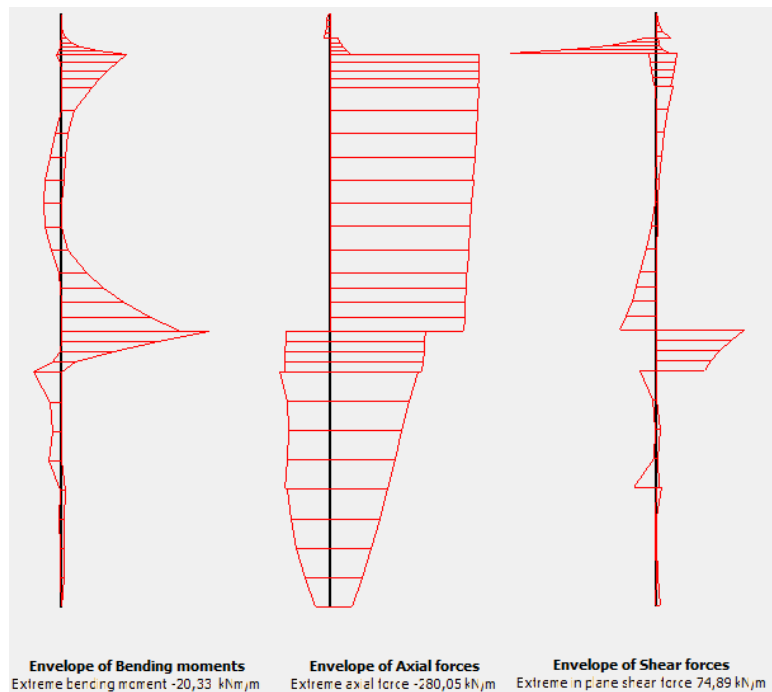
- a) Realização de cortina de colunas teste, incluindo ensaios complementares, conforme definido em especificação própria;
- b) Rebaixamento do nível da albufera até à cota (144,50);
- c) Escavação provisória até à cota (146,50), correspondente à base dos muros a executar no coroamento da ensecadeira, assegurando a materialização de uma superfície horizontal e regular ao longo de todo o desenvolvimento da ensecadeira;
- d) Preparação da plataforma de trabalho onde poderão circular os equipamentos de execução de microestacas, de perfis HEB e de colunas de Jet Grouting. Esta preparação inclui os trabalhos de remoção de eventuais blocos rochosos, de elementos de madeira e metálicos depositados, nos alinhamentos onde está prevista a execução de colunas de Jet Grouting, e a eventual execução de aterros provisórios, recorrendo a material granular do tipo A1, A2 ou A3 da classificação de solos para fins rodoviários;
- e) Realização da 1ª fiada de colunas de Jet Grouting secantes, de forma alternada. Durante a realização das colunas deverá ser realizado o controlo e registo permanente de todos os parâmetros de execução, de forma a permitir identificar as zonas de ocorrência de blocos rochosos. Deverá ser realizada a diagrafia em profundidade para identificação dos diferentes níveis estratigráficos do terreno, assim como o registo da verticalidade através de medição inclinométrica. O comprimento total de cada coluna deverá garantir as cotas e os encastramentos definidos. O desvio máximo de verticalidade da furação, nas formações correspondentes às zonas geotécnicas ZG3 e ZG4, deverá ser em média cerca de 1,5%. A não observação deste critério, em complemento com a análise da posição das colunas com base nos registos da correspondente verticalidade, poderá determinar a execução de novas colunas de fecho dos espaços que venham a ser verificados entre colunas adjacentes. O controlo de qualidade e de execução, deverá respeitar o definido em especificação própria;
- f) Realização da 2ª fiada de colunas de Jet Grouting, de acordo com o definido em e);
- g) Execução dos perfis metálicos verticais do tipo HEB140, afastados de 1,60 m, no tardo do muro de betão, instalados em furos com 250 mm de diâmetro, na zona da secção corrente e encontro esquerdo. Estes perfis deverão dispor de comprimento mínimo de selagem, realizada através do sistema IGU, de 4,0 m na zona geotécnica ZG3;
- h) Execução dos perfis metálicos do tipo HEB160, inclinados de 30° em relação à vertical, afastados de 1,60 m, a meia secção do muro de betão, instalados em furos com 250 mm de diâmetro, na zona da secção corrente e encontro esquerdo. Estes perfis deverão dispor de comprimento mínimo de selagem, realizada através do sistema IGU, de 7,0 m na zona geotécnica ZG3;
- i) Furação com 150 mm de diâmetro, afastados de 1,6 m ou de 0,8 m, para instalação de tubos de microestaca no encontro direito (montante e jusante), na secção corrente e encontro esquerdo (jusante);
- j) Execução de injeções através de válvulas manchete nos tubos de microestacas instalados na zona da secção corrente e encontro esquerdo (jusante), nas profundidades indicadas nas peças desenhadas. O controlo de qualidade e de execução deverá respeitar o definido em especificação própria;
- k) Furação com 150 mm de diâmetro, afastados de 1,6 m, para execução de injeções de 1ª fase no encontro direito (jusante). O controlo de qualidade e de execução, deverá respeitar o definido em especificação própria;
- l) Instalação de cofragens e betonagem dos muros da ensecadeira, por módulos, devidamente fundado sobre o terreno e sobre as colunas de Jet Grouting e perfis metálicos / microestacas, deixando negativos em PVC nas zonas onde estão previstos inclinómetros e furos adicionais para injeções de reforço, conforme indicado nas peças desenhadas. Serão executadas juntas waterstop com cordões de bentonite / sódio, do tipo Waterstop RX101, ou equivalente, com reforço com malha DKNET, ou equivalente;
- m) Instalação e zeragem dos dispositivos de observação previstos no Plano de Instrumentação e Observação, nomeadamente marcas de nivelamento e alvos topográficos no muro, inclinómetros no muro e na plataforma à frente deste e piezómetros, conforme localização indicada nas peças desenhadas;
- n) Realização de ensaios de absorção de água do tipo Lugeon, para avaliação da permeabilidade da cortina, nos furos de reforço, a definir após análise dos resultados das injeções. Em função dos resultados dos ensaios de permeabilidade e de admissão de calda nas injeções da 1ª fase poderão, se justificável, ser realizadas novas injeções (2ª fase), utilizando os furos de reforço, materializados através dos negativos deixados nos muros de betão de coroamento da ensecadeira;
- o) Escavação faseada da zona interior da ensecadeira, com execução dos drenos, betão projectado e pregagens, de acordo com o faseamento descrito de seguida, de forma a que possa ser avaliada antecipadamente a resposta da mesma em termos de estabilidade e, sobretudo, de caudal percolado:
  - 1) Escavação até 0,50 m abaixo do 1º nível de pregagens e escoras. A área de cada frente de escavação poderá, à partida, ser no desenvolvimento total, mas deverá ser sempre aferida no decorrer dos respectivos trabalhos de forma a não colocar em risco a estabilidade do talude escavado e do terreno e muro a tardo.
  - 2) Realização da 1ª camada de betão projectado e do primeiro nível inferior da parede a executar sob o muro ala.
  - 3) Execução das pregagens. Inclui as operações de furação, limpeza, colocação e selagem. A selagem deverá ser realizada, de baixo para cima, através de tubo, com válvula localizada junto à base do varão. Para garantir um posicionamento correcto dos varões das pregagens deverão colocar-se centralizadores em PVC, de forma a que os varões sejam completamente envolvidos pela calda de selagem.
  - 4) Realização dos ensaios de recepção das pregagens em número e localização a especificar antes do início da obra, segundo os procedimentos da EN14490.
  - 5) Execução dos geodrenos. Inclui as operações de furação, limpeza e colocação.
  - 6) Realização da 2ª camada de betão projectado e do segundo nível da parede a executar sob o muro ala.
  - 7) Repetição dos pontos 1) a 6) para os restantes níveis de escavação.
- p) Execução das obras associadas ao Descarregador de Cheias Complementar da barragem de Caniçada;
- q) Demolição dos muros provisórios da ensecadeira e escavação até à cota final prevista no projecto do Descarregador de Cheias Complementar da Barragem de Caniçada, incluindo a demolição de parte da cortina e dos perfis metálicos.

		<b>PEÇAS DESENHADAS PARA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO</b>	DESENHO Nº:
ALUNO : JOÃO CALATROÍIA - Nº 59092		<b>NOTAS, MATERIAIS E FASEAMENTO</b>	<b>08</b>
DATA : ABRIL 2016	FICHEIRO : TESE FINAL.DWG		

## Anexo IX

Esforços obtidos da análise da Secção Corte 7

Perfil HEB 140



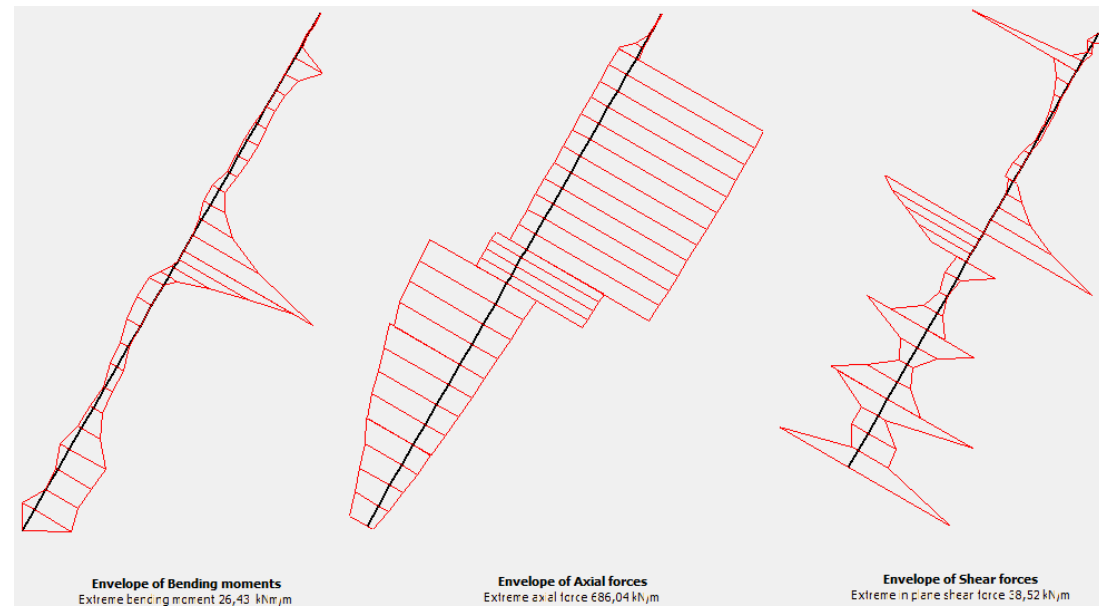
Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs. (kN/m)	V abs. (kN/m)	M abs. (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
4165	21	72	-11,52	0,00	-0,17	7,20	-0,81	0,03	11,52	7,20	0,81	0,00429	0,001308	2,16E-04	2,68	9,54	3,77	355	17,73	Verifica	20,0
4159	21	72	-9,56	0,00	-0,10	2,86	-0,31	0,01	9,56	2,86	0,31	0,00429	0,001308	2,16E-04	2,23	3,78	1,46	355	7,52	Verifica	47,2
4160	21	72	-8,01	0,00	-0,05	1,04	-0,11	0,01	8,01	1,04	0,11	0,00429	0,001308	2,16E-04	1,87	1,38	0,52	355	3,37	Verifica	105,3
4161	21	72	-6,78	0,00	-0,03	0,54	-0,05	0,00	6,78	0,54	0,05	0,00429	0,001308	2,16E-04	1,58	0,72	0,22	355	2,19	Verifica	162,1
4185	21	72	-5,82	0,00	-0,01	0,16	0,00	0,00	5,82	0,16	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	1,36	0,22	0,00	355	1,41	Verifica	252,1



3877	21	72	-280,05	0,00	-9,92	3,71	-0,61	8,99	280,05	9,92	8,99	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,28	13,14	41,60	355	109,27	Verifica	3,2
3650	21	71	-280,00	0,00	-9,33	3,32	-0,12	7,64	280,00	9,33	7,64	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,27	12,36	35,36	355	102,88	Verifica	3,5
3649	21	71	-279,79	0,00	-8,67	2,71	0,00	6,38	279,79	8,67	6,38	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,22	11,49	29,52	355	96,80	Verifica	3,7
3648	21	71	-279,49	0,00	-7,94	1,96	0,00	5,29	279,49	7,94	5,29	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,15	10,51	24,48	355	91,46	Verifica	3,9
3647	21	71	-279,16	0,00	-7,11	1,17	0,00	4,28	279,16	7,11	4,28	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,07	9,42	19,82	355	86,45	Verifica	4,1
4165	21	72	-13,61	0,00	-0,46	6,70	-0,03	0,81	13,61	6,70	0,81	0,00429	0,001308	2,16E-04	3,17	8,87	3,77	355	16,85	Verifica	21,1
3883	21	72	-17,86	0,00	-0,87	13,56	-0,08	1,52	17,86	13,56	1,52	0,00429	0,001308	2,16E-04	4,16	17,95	7,03	355	33,04	Verifica	10,7
3882	21	72	-23,36	0,00	-1,47	24,07	-0,15	2,75	23,36	24,07	2,75	0,00429	0,001308	2,16E-04	5,45	31,88	12,72	355	58,13	Verifica	6,1
3881	21	72	-30,00	0,00	-3,05	42,95	-0,30	5,03	30,00	42,95	5,03	0,00429	0,001308	2,16E-04	6,99	56,88	23,28	355	103,06	Verifica	3,4
3877	21	72	-37,69	0,00	-6,41	74,89	-0,61	8,99	37,69	74,89	8,99	0,00429	0,001308	2,16E-04	8,79	99,17	41,60	355	179,01	Verifica	2,0
3647	21	71	-280,04	0,00	-8,09	0,97	0,00	4,28	280,04	8,09	4,28	0,00429	0,001308	2,16E-04	65,28	10,72	19,82	355	87,10	Verifica	4,1
3355	21	71	-277,94	0,00	-5,76	0,00	0,00	1,86	277,94	5,76	1,86	0,00429	0,001308	2,16E-04	64,79	7,63	8,59	355	74,56	Verifica	4,8
3354	21	70	-275,47	0,00	-3,77	0,00	-0,78	0,89	275,47	3,77	0,89	0,00429	0,001308	2,16E-04	64,21	4,99	4,12	355	68,88	Verifica	5,2
3353	21	70	-272,69	0,00	-2,17	0,00	-1,59	0,63	272,69	2,17	1,59	0,00429	0,001308	2,16E-04	63,57	2,88	7,35	355	71,09	Verifica	5,0
3359	21	69	-269,67	0,00	-1,12	0,47	-2,18	0,35	269,67	1,12	2,18	0,00429	0,001308	2,16E-04	62,86	1,48	10,09	355	72,99	Verifica	4,9
3359	21	69	-269,70	0,00	-0,86	0,29	-2,18	0,35	269,70	0,86	2,18	0,00429	0,001308	2,16E-04	62,87	1,14	10,09	355	72,98	Verifica	4,9
3314	21	69	-266,73	0,00	-0,59	0,93	-2,36	0,09	266,73	0,93	2,36	0,00429	0,001308	2,16E-04	62,17	1,23	10,91	355	73,12	Verifica	4,9
3313	21	69	-263,68	0,00	-0,47	2,96	-2,13	0,00	263,68	2,96	2,13	0,00429	0,001308	2,16E-04	61,46	3,93	9,85	355	71,63	Verifica	5,0
3312	21	68	-260,67	0,00	-0,13	5,47	-1,33	0,88	260,67	5,47	1,33	0,00429	0,001308	2,16E-04	60,76	7,24	6,18	355	68,10	Verifica	5,2
3311	21	68	-257,79	0,00	0,00	8,20	-0,32	3,52	257,79	8,20	3,52	0,00429	0,001308	2,16E-04	60,09	10,85	16,30	355	78,67	Verifica	4,5
3311	21	68	-257,61	0,00	0,00	8,21	-0,32	3,52	257,61	8,21	3,52	0,00429	0,001308	2,16E-04	60,05	10,88	16,30	355	78,64	Verifica	4,5
3307	21	67	-256,04	0,00	0,00	10,30	-0,15	5,81	256,04	10,30	5,81	0,00429	0,001308	2,16E-04	59,68	13,64	26,91	355	89,76	Verifica	4,0
3306	21	67	-254,68	0,00	-0,01	12,65	0,00	8,66	254,68	12,65	8,66	0,00429	0,001308	2,16E-04	59,37	16,75	40,08	355	103,59	Verifica	3,4
3305	21	67	-253,38	0,00	-0,01	15,46	0,00	12,19	253,38	15,46	12,19	0,00429	0,001308	2,16E-04	59,06	20,48	56,44	355	120,83	Verifica	2,9
3599	21	67	-251,98	0,00	-0,01	18,95	0,00	16,51	251,98	18,95	16,51	0,00429	0,001308	2,16E-04	58,74	25,10	76,42	355	141,98	Verifica	2,5
3599	21	67	-178,60	83,66	-43,91	0,00	0,00	20,33	178,60	43,91	20,33	0,00429	0,001308	2,16E-04	41,63	58,14	94,11	355	169,02	Verifica	2,1
3592	21	67	-177,43	85,02	-37,57	0,00	0,00	13,22	177,43	37,57	13,22	0,00429	0,001308	2,16E-04	41,36	49,75	61,20	355	133,96	Verifica	2,7
3591	21	66	-176,24	85,75	-32,21	0,00	-0,10	7,14	176,24	32,21	7,14	0,00429	0,001308	2,16E-04	41,08	42,65	33,07	355	104,67	Verifica	3,4
3590	21	66	-174,91	86,11	-27,81	0,00	-1,17	1,94	174,91	27,81	1,94	0,00429	0,001308	2,16E-04	40,77	36,83	9,00	355	80,90	Verifica	4,4
3589	21	66	-173,28	86,40	-24,39	0,00	-3,70	0,00	173,28	24,39	3,70	0,00429	0,001308	2,16E-04	40,39	32,30	17,13	355	80,24	Verifica	4,4
3589	21		-165,10	97,02	0,00	8,55	-3,70	0,00	165,10	8,55	3,70	0,00429	0,001308	2,16E-04	38,48	11,32	17,13	355	58,97	Verifica	6,0

3575	21	66	-149,44	82,88	0,00	2,31	-1,50	0,00	149,44	2,31	1,50	0,00429	0,001308	2,16E-04	34,84	3,06	6,94	355	42,11	Verifica	8,4
3574	21	65	-134,86	79,48	-1,84	0,56	-1,24	0,04	134,86	1,84	1,24	0,00429	0,001308	2,16E-04	31,44	2,43	5,76	355	37,43	Verifica	9,5
3573	21	65	-120,97	82,38	-0,23	1,18	-1,74	0,00	120,97	1,18	1,74	0,00429	0,001308	2,16E-04	28,20	1,57	8,06	355	36,36	Verifica	9,8
3579	21	64	-107,40	87,15	-1,31	11,38	-0,17	0,55	107,40	11,38	0,55	0,00429	0,001308	2,16E-04	25,04	15,07	2,55	355	37,98	Verifica	9,3
3579	21	64	-106,60	81,23	-2,36	0,19	-0,17	0,55	106,60	2,36	0,55	0,00429	0,001308	2,16E-04	24,85	3,12	2,55	355	27,93	Verifica	12,7
3482	21	64	-92,36	75,36	-0,13	0,78	-0,27	0,41	92,36	0,78	0,41	0,00429	0,001308	2,16E-04	21,53	1,03	1,90	355	23,50	Verifica	15,1
3481	21	63	-76,48	64,20	-0,12	0,71	-0,15	0,47	76,48	0,71	0,47	0,00429	0,001308	2,16E-04	17,83	0,94	2,19	355	20,08	Verifica	17,7
3480	21	63	-59,21	48,96	-0,79	0,25	-0,16	0,47	59,21	0,79	0,47	0,00429	0,001308	2,16E-04	13,80	1,04	2,18	355	16,08	Verifica	22,1
3479	21	62	-40,84	29,62	-1,77	0,88	0,00	0,00	40,84	1,77	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	9,52	2,35	0,00	355	10,35	Verifica	34,3

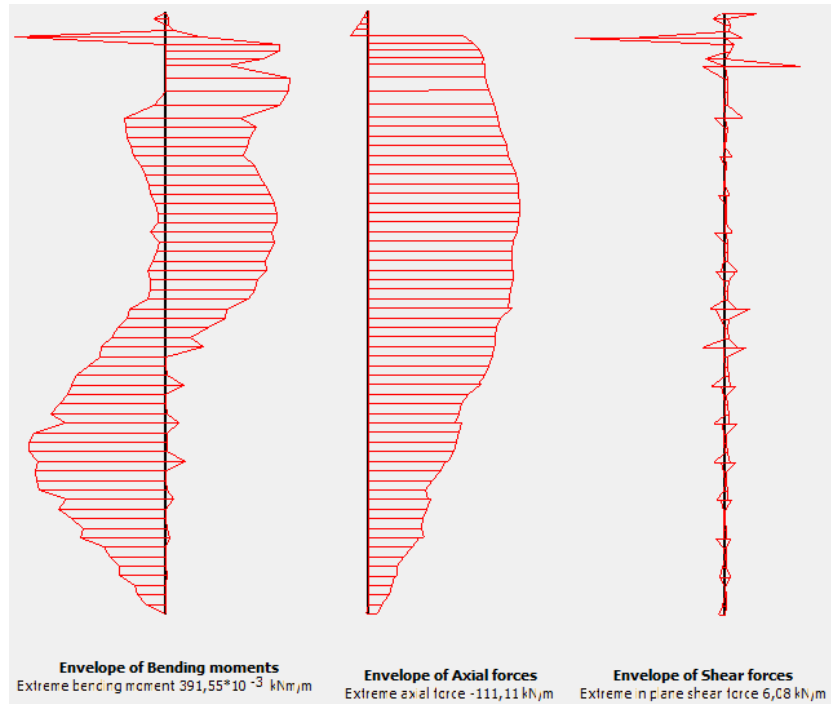
Perfil HEB160



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs. (kN/m)	V abs. (kN/m)	M abs. (kN.m/m)	Área (m²)	A <sub>v</sub> (m²)	W <sub>el</sub> (m³)	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
2983	17,67	61,83	-95,48	253,75	-30,26	17,98	-1,94	7,33	253,75	30,26	7,33	0,00543	0,001759	3,11E-04	46,73	29,80	23,56	355	87,21	Verifica	4,1
2969	17,38	61,33	-84,59	199,09	-2,50	5,95	-0,36	6,98	199,09	5,95	6,98	0,00543	0,001759	3,11E-04	36,67	5,86	22,43	355	59,96	Verifica	5,9
2968	17,08	60,82	-70,86	162,16	-9,92	5,96	-0,02	6,61	162,16	9,92	6,61	0,00543	0,001759	3,11E-04	29,86	9,77	21,24	355	53,83	Verifica	6,6
2967	16,79	60,32	-53,69	126,90	-10,69	2,30	-2,51	7,57	126,90	10,69	7,57	0,00543	0,001759	3,11E-04	23,37	10,52	24,35	355	51,08	Verifica	6,9
2973	16,50	59,81	-32,45	91,67	-36,31	24,64	0,00	0,00	91,67	36,31	0,00	0,00543	0,001759	3,11E-04	16,88	35,76	0,00	355	64,19	Verifica	5,5
2957	18,83	63,85	-133,36	378,47	-16,55	21,55	-1,38	1,51	378,47	21,55	1,51	0,00543	0,001759	3,11E-04	69,70	21,22	4,85	355	83,11	Verifica	4,3
2953	18,54	63,35	-124,96	343,71	-7,26	5,83	-0,37	1,51	343,71	7,26	1,51	0,00543	0,001759	3,11E-04	63,30	7,15	4,85	355	69,26	Verifica	5,1
2952	18,25	62,84	-115,66	314,51	-1,71	2,74	-0,67	2,01	314,51	2,74	2,01	0,00543	0,001759	3,11E-04	57,92	2,70	6,46	355	64,55	Verifica	5,5
2951	17,96	62,34	-105,89	288,33	-4,49	10,72	-0,71	3,79	288,33	10,72	3,79	0,00543	0,001759	3,11E-04	53,10	10,56	12,20	355	67,81	Verifica	5,2
2983	17,67	61,83	-96,06	248,17	-11,82	20,57	-1,94	7,33	248,17	20,57	7,33	0,00543	0,001759	3,11E-04	45,70	20,26	23,56	355	77,65	Verifica	4,6
3327	20,00	65,87	-161,47	413,32	-10,26	3,24	-2,99	0,00	413,32	10,26	2,99	0,00543	0,001759	3,11E-04	76,12	10,10	9,62	355	87,51	Verifica	4,1
2963	19,71	65,37	-154,18	402,15	-1,26	4,22	-3,18	0,01	402,15	4,22	3,18	0,00543	0,001759	3,11E-04	74,06	4,15	10,21	355	84,58	Verifica	4,2
2962	19,42	64,86	-147,46	398,57	0,00	2,50	-2,60	0,06	398,57	2,50	2,60	0,00543	0,001759	3,11E-04	73,40	2,46	8,36	355	81,87	Verifica	4,3
2961	19,13	64,36	-140,70	387,94	-2,03	4,55	-1,64	0,17	387,94	4,55	1,64	0,00543	0,001759	3,11E-04	71,44	4,48	5,27	355	77,11	Verifica	4,6
2957	18,83	63,85	-133,29	355,61	-6,19	13,25	-1,38	1,51	355,61	13,25	1,51	0,00543	0,001759	3,11E-04	65,49	13,05	4,85	355	73,88	Verifica	4,8
3631	21,38	68,25	-91,31	675,13	-3,01	0,31	-1,20	1,43	675,13	3,01	1,43	0,00543	0,001759	3,11E-04	124,33	2,97	4,60	355	129,04	Verifica	2,8
3625	21,61	68,66	-91,65	679,03	-3,09	0,00	-1,59	0,41	679,03	3,09	1,59	0,00543	0,001759	3,11E-04	125,05	3,04	5,13	355	130,29	Verifica	2,7
3626	21,85	69,06	-92,02	682,83	-1,87	0,27	-2,01	0,42	682,83	1,87	2,01	0,00543	0,001759	3,11E-04	125,75	1,84	6,47	355	132,26	Verifica	2,7
3627	22,08	69,47	-92,45	685,45	-0,43	0,78	-2,18	0,56	685,45	0,78	2,18	0,00543	0,001759	3,11E-04	126,23	0,76	6,99	355	133,23	Verifica	2,7
3861	22,32	69,88	-93,01	685,79	-0,57	0,77	-1,90	0,56	685,79	0,77	1,90	0,00543	0,001759	3,11E-04	126,30	0,76	6,12	355	132,43	Verifica	2,7
3861	22,32	69,88	-92,99	686,04	-0,43	0,83	-1,90	0,56	686,04	0,83	1,90	0,00543	0,001759	3,11E-04	126,34	0,81	6,12	355	132,47	Verifica	2,7
3865	22,55	70,28	-93,51	685,98	-1,19	0,74	-1,63	0,19	685,98	1,19	1,63	0,00543	0,001759	3,11E-04	126,33	1,17	5,25	355	131,60	Verifica	2,7
3866	22,78	70,69	-93,97	685,32	-2,30	0,14	-1,76	0,09	685,32	2,30	1,76	0,00543	0,001759	3,11E-04	126,21	2,27	5,65	355	131,92	Verifica	2,7
3867	23,02	71,09	-94,28	683,89	-4,60	0,12	-2,67	0,15	683,89	4,60	2,67	0,00543	0,001759	3,11E-04	125,95	4,53	8,58	355	134,75	Verifica	2,6
4195	23,25	71,50	-94,37	681,51	-8,05	0,00	-5,65	0,17	681,51	8,05	5,65	0,00543	0,001759	3,11E-04	125,51	7,93	18,15	355	144,32	Verifica	2,5
3327	20,00	65,87	-163,33	408,24	-12,49	0,00	0,00	2,99	408,24	12,49	2,99	0,00543	0,001759	3,11E-04	75,18	12,30	9,62	355	87,44	Verifica	4,1
3321	20,13	66,09	-163,94	412,36	-18,83	0,00	-1,76	1,66	412,36	18,83	1,76	0,00543	0,001759	3,11E-04	75,94	18,54	5,64	355	87,68	Verifica	4,0
3322	20,25	66,30	-164,13	414,19	-25,16	0,02	-7,25	0,56	414,19	25,16	7,25	0,00543	0,001759	3,11E-04	76,28	24,77	23,30	355	108,43	Verifica	3,3
3323	20,38	66,52	-164,08	415,56	-31,19	0,04	-14,18	0,01	415,56	31,19	14,18	0,00543	0,001759	3,11E-04	76,53	30,72	45,58	355	133,20	Verifica	2,7

3599	20,50	66,73	-164,00	418,27	-35,16	0,08	-22,50	0,03	418,27	35,16	22,50	0,00543	0,001759	3,11E-04	77,03	34,62	72,35	355	160,97	Verifica	2,2
4501	23,89	72,60	-1,95	0,99	-5,58	0,00	0,00	0,00	1,95	5,58	0,00	0,00543	0,001759	3,11E-04	0,36	5,50	0,00	355	9,53	Verifica	37,3
4199	23,73	72,33	-4,24	1,74	-0,07	2,01	-0,01	0,26	4,24	2,01	0,26	0,00543	0,001759	3,11E-04	0,78	1,98	0,83	355	3,79	Verifica	93,6
4200	23,57	72,05	-3,94	8,24	-1,37	0,00	-0,24	0,00	8,24	1,37	0,24	0,00543	0,001759	3,11E-04	1,52	1,35	0,78	355	3,28	Verifica	108,4
4201	23,41	71,78	-5,10	35,17	-0,20	3,97	-0,10	0,32	35,17	3,97	0,32	0,00543	0,001759	3,11E-04	6,48	3,91	1,03	355	10,11	Verifica	35,1
4195	23,25	71,50	-11,77	97,19	-0,27	37,59	-0,17	5,65	97,19	37,59	5,65	0,00543	0,001759	3,11E-04	17,90	37,01	18,15	355	73,55	Verifica	4,8
3599	20,50	66,73	-89,64	661,40	-0,02	38,52	-26,43	0,01	661,40	38,52	26,43	0,00543	0,001759	3,11E-04	121,81	37,93	84,98	355	216,97	Verifica	1,6
3600	20,72	67,11	-90,19	665,85	-0,02	21,71	-13,59	0,00	665,85	21,71	13,59	0,00543	0,001759	3,11E-04	122,62	21,38	43,70	355	170,40	Verifica	2,1
3601	20,94	67,49	-90,58	669,75	-0,01	11,58	-6,40	0,51	669,75	11,58	6,40	0,00543	0,001759	3,11E-04	123,34	11,40	20,59	355	145,28	Verifica	2,4
3602	21,16	67,87	-90,91	672,89	-0,04	5,72	-2,84	1,49	672,89	5,72	2,84	0,00543	0,001759	3,11E-04	123,92	5,64	9,12	355	133,40	Verifica	2,7
3631	21,38	68,25	-91,25	675,09	-1,62	1,58	-1,20	1,43	675,09	1,62	1,43	0,00543	0,001759	3,11E-04	124,33	1,60	4,60	355	128,96	Verifica	2,8

Perfil N80



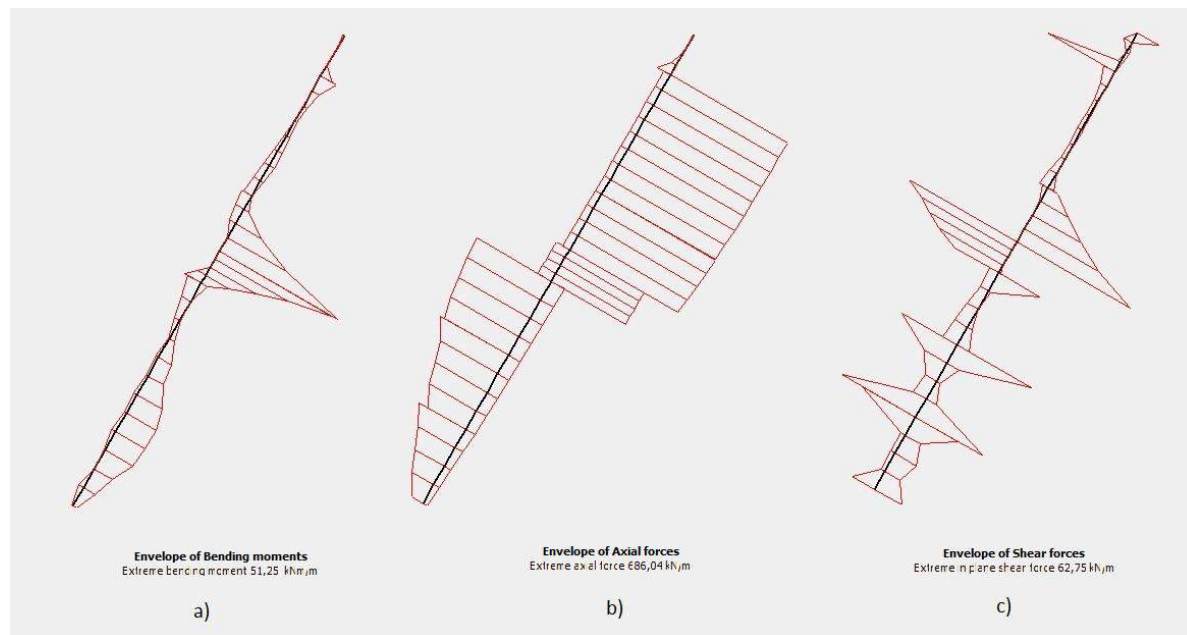


Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs. (kN/m)	V abs. (kN/m)	M abs. (kN.m/m)	Área (m²)	A <sub>v</sub> (m²)	W <sub>el</sub> (m³)	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
4883	24,25	71,53	-12,83	0,00	-3,90	0,67	-0,09	0,39	12,83	3,90	0,39	0,00168	0,0010695	3,15E-05	7,64	6,32	12,43	355	22,85	Verifica	15,5
4884	24,25	71,86	-8,95	0,00	0,00	0,14	-0,02	0,00	8,95	0,14	0,02	0,00168	0,0010695	3,15E-05	5,33	0,23	0,65	355	5,99	Verifica	59,3
4885	24,25	72,18	-6,09	0,00	-0,02	0,20	-0,01	0,00	6,09	0,20	0,01	0,00168	0,0010695	3,15E-05	3,62	0,33	0,20	355	3,86	Verifica	91,9
4886	24,25	72,51	-3,67	0,00	-0,49	0,08	-0,01	0,03	3,67	0,49	0,03	0,00168	0,0010695	3,15E-05	2,18	0,80	0,94	355	3,42	Verifica	103,9
4967	24,25	72,83	-1,11	0,00	-0,18	1,27	0,00	0,00	1,11	1,27	0,00	0,00168	0,0010695	3,15E-05	0,66	2,06	0,00	355	3,63	Verifica	97,8
4647	24,25	67,25	-95,41	0,00	0,00	0,45	-0,11	0,19	95,41	0,45	0,19	0,00168	0,0010695	3,15E-05	56,79	0,72	6,15	355	62,96	Verifica	5,6
4633	24,25	66,75	-96,54	0,00	-0,09	0,00	-0,10	0,23	96,54	0,09	0,23	0,00168	0,0010695	3,15E-05	57,47	0,15	7,46	355	64,93	Verifica	5,5
4632	24,25	66,24	-99,24	0,00	-0,03	0,02	-0,10	0,22	99,24	0,03	0,22	0,00168	0,0010695	3,15E-05	59,07	0,05	6,96	355	66,04	Verifica	5,4
4631	24,25	65,74	-101,82	0,00	0,00	0,08	-0,09	0,21	101,82	0,08	0,21	0,00168	0,0010695	3,15E-05	60,61	0,14	6,79	355	67,39	Verifica	5,3
4637	24,25	65,23	-102,59	0,00	-0,31	0,00	-0,08	0,20	102,59	0,31	0,20	0,00168	0,0010695	3,15E-05	61,06	0,50	6,38	355	67,45	Verifica	5,3
4637	24,25	65,23	-102,66	0,00	0,00	0,24	-0,08	0,20	102,66	0,24	0,20	0,00168	0,0010695	3,15E-05	61,11	0,39	6,38	355	67,49	Verifica	5,3
4224	24,25	64,73	-105,96	0,00	-0,03	0,01	-0,06	0,23	105,96	0,03	0,23	0,00168	0,0010695	3,15E-05	63,07	0,05	7,40	355	70,47	Verifica	5,0
4223	24,25	64,22	-108,48	0,00	0,00	0,02	-0,05	0,24	108,48	0,02	0,24	0,00168	0,0010695	3,15E-05	64,57	0,04	7,71	355	72,28	Verifica	4,9
4222	24,25	63,72	-110,04	0,00	0,00	0,07	-0,04	0,26	110,04	0,07	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,50	0,11	8,21	355	73,71	Verifica	4,8
4221	24,25	63,21	-110,40	0,00	-0,19	0,00	-0,04	0,27	110,40	0,19	0,27	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,71	0,31	8,64	355	74,35	Verifica	4,8
4221	24,25	63,21	-110,30	0,00	-0,04	0,28	-0,04	0,27	110,30	0,28	0,27	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,65	0,45	8,64	355	74,29	Verifica	4,8
4214	24,25	62,71	-111,10	0,00	-0,04	0,03	-0,02	0,28	111,10	0,04	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	66,13	0,07	9,00	355	75,13	Verifica	4,7
4213	24,25	62,21	-111,11	0,00	-0,03	0,02	-0,02	0,29	111,11	0,03	0,29	0,00168	0,0010695	3,15E-05	66,13	0,04	9,15	355	75,28	Verifica	4,7
4212	24,25	61,70	-110,50	0,00	-0,05	0,02	-0,02	0,29	110,50	0,05	0,29	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,77	0,07	9,16	355	74,93	Verifica	4,7
4211	24,25	61,20	-109,44	0,00	-0,28	0,00	-0,04	0,28	109,44	0,28	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,14	0,45	8,76	355	73,91	Verifica	4,8
4211	24,25	61,20	-109,57	0,00	-0,03	0,45	-0,04	0,28	109,57	0,45	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	65,22	0,73	8,76	355	73,99	Verifica	4,8
3702	24,25	60,69	-106,76	0,00	-0,10	0,03	-0,02	0,28	106,76	0,10	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	63,55	0,17	9,03	355	72,58	Verifica	4,9
3701	24,25	60,19	-105,47	0,00	-0,07	0,01	-0,02	0,27	105,47	0,07	0,27	0,00168	0,0010695	3,15E-05	62,78	0,11	8,66	355	71,44	Verifica	5,0
3700	24,25	59,68	-105,68	0,00	-0,06	0,09	-0,03	0,26	105,68	0,09	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	62,91	0,15	8,26	355	71,16	Verifica	5,0
3699	24,25	59,18	-105,84	0,00	-0,50	0,20	-0,05	0,26	105,84	0,50	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	63,00	0,81	8,29	355	71,30	Verifica	5,0
3699	24,25	59,18	-106,70	0,00	-0,38	0,41	-0,05	0,26	106,70	0,41	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	63,51	0,66	8,29	355	71,81	Verifica	4,9
3666	24,25	58,67	-106,74	0,00	-0,12	0,09	-0,04	0,24	106,74	0,12	0,24	0,00168	0,0010695	3,15E-05	63,53	0,19	7,64	355	71,17	Verifica	5,0
3665	24,25	58,17	-105,17	0,00	-0,06	0,01	-0,04	0,23	105,17	0,06	0,23	0,00168	0,0010695	3,15E-05	62,60	0,10	7,42	355	70,02	Verifica	5,1
3664	24,25	57,66	-103,39	0,00	-0,07	0,09	-0,05	0,22	103,39	0,09	0,22	0,00168	0,0010695	3,15E-05	61,54	0,14	6,85	355	68,39	Verifica	5,2

3663	24,25	57,16	-102,64	0,00	-0,44	0,66	-0,09	0,16	102,64	0,66	0,16	0,00168	0,0010695	3,15E-05	61,09	1,06	5,03	355	66,15	Verifica	5,4
3663	24,25	57,16	-105,37	0,00	-0,96	0,41	-0,09	0,16	105,37	0,96	0,16	0,00168	0,0010695	3,15E-05	62,72	1,56	5,03	355	67,80	Verifica	5,2
3234	24,25	56,65	-97,14	0,00	-0,15	0,15	-0,10	0,15	97,14	0,15	0,15	0,00168	0,0010695	3,15E-05	57,82	0,25	4,89	355	62,71	Verifica	5,7
3233	24,25	56,15	-93,93	0,00	-0,09	0,00	-0,12	0,11	93,93	0,09	0,12	0,00168	0,0010695	3,15E-05	55,91	0,15	3,93	355	59,84	Verifica	5,9
3232	24,25	55,64	-93,42	0,00	-0,15	0,03	-0,14	0,06	93,42	0,15	0,14	0,00168	0,0010695	3,15E-05	55,60	0,24	4,46	355	60,07	Verifica	5,9
3231	24,25	55,14	-93,29	0,00	-0,48	0,98	-0,17	0,10	93,29	0,98	0,17	0,00168	0,0010695	3,15E-05	55,53	1,58	5,37	355	60,96	Verifica	5,8
3231	24,25	55,14	-92,74	0,00	-0,82	0,10	-0,17	0,10	92,74	0,82	0,17	0,00168	0,0010695	3,15E-05	55,20	1,34	5,37	355	60,61	Verifica	5,9
3134	24,25	54,63	-91,26	0,00	-0,11	0,09	-0,17	0,00	91,26	0,11	0,17	0,00168	0,0010695	3,15E-05	54,32	0,17	5,48	355	59,80	Verifica	5,9
3133	24,25	54,13	-88,84	0,00	-0,11	0,03	-0,20	0,00	88,84	0,11	0,20	0,00168	0,0010695	3,15E-05	52,88	0,18	6,43	355	59,31	Verifica	6,0
3132	24,25	53,62	-85,39	0,00	-0,11	0,03	-0,23	0,00	85,39	0,11	0,23	0,00168	0,0010695	3,15E-05	50,83	0,18	7,37	355	58,20	Verifica	6,1
3131	24,25	53,12	-80,83	0,00	-0,16	0,58	-0,24	0,05	80,83	0,58	0,24	0,00168	0,0010695	3,15E-05	48,11	0,95	7,77	355	55,90	Verifica	6,4
3131	24,25	53,12	-82,94	0,00	-0,39	0,18	-0,24	0,05	82,94	0,39	0,24	0,00168	0,0010695	3,15E-05	49,37	0,64	7,77	355	57,14	Verifica	6,2
3124	24,25	52,61	-72,96	0,00	-0,02	0,09	-0,26	0,00	72,96	0,09	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	43,43	0,14	8,14	355	51,57	Verifica	6,9
3123	24,25	52,11	-68,90	0,00	-0,09	0,01	-0,28	0,00	68,90	0,09	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	41,01	0,14	8,75	355	49,77	Verifica	7,1
3122	24,25	51,60	-67,12	0,00	-0,12	0,02	-0,30	0,00	67,12	0,12	0,30	0,00168	0,0010695	3,15E-05	39,95	0,19	9,45	355	49,41	Verifica	7,2
3121	24,25	51,10	-64,00	0,00	-0,14	0,48	-0,26	0,03	64,00	0,48	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	38,09	0,78	8,34	355	46,45	Verifica	7,6
3121	24,25	51,10	-68,33	0,00	-0,44	0,14	-0,26	0,03	68,33	0,44	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	40,67	0,72	8,34	355	49,03	Verifica	7,2
2785	24,25	50,59	-67,13	0,00	-0,03	0,09	-0,34	0,01	67,13	0,09	0,34	0,00168	0,0010695	3,15E-05	39,96	0,14	10,93	355	50,88	Verifica	7,0
2784	24,25	50,09	-65,17	0,00	-0,01	0,05	-0,36	0,00	65,17	0,05	0,36	0,00168	0,0010695	3,15E-05	38,79	0,08	11,35	355	50,14	Verifica	7,1
2783	24,25	49,58	-62,52	0,00	-0,08	0,03	-0,36	0,00	62,52	0,08	0,36	0,00168	0,0010695	3,15E-05	37,22	0,13	11,27	355	48,49	Verifica	7,3
2789	24,25	49,08	-59,25	0,00	-0,20	0,50	-0,33	0,05	59,25	0,50	0,33	0,00168	0,0010695	3,15E-05	35,27	0,81	10,59	355	45,88	Verifica	7,7
2789	24,25	49,08	-56,58	0,00	-0,40	0,17	-0,33	0,05	56,58	0,40	0,33	0,00168	0,0010695	3,15E-05	33,68	0,64	10,59	355	44,28	Verifica	8,0
2792	24,25	48,57	-53,26	0,00	-0,02	0,05	-0,34	0,00	53,26	0,05	0,34	0,00168	0,0010695	3,15E-05	31,70	0,09	10,74	355	42,44	Verifica	8,4
2791	24,25	48,07	-46,61	0,00	-0,01	0,03	-0,34	0,00	46,61	0,03	0,34	0,00168	0,0010695	3,15E-05	27,74	0,05	10,71	355	38,45	Verifica	9,2
2790	24,25	47,56	-41,64	0,00	-0,06	0,05	-0,33	0,00	41,64	0,06	0,33	0,00168	0,0010695	3,15E-05	24,79	0,10	10,41	355	35,20	Verifica	10,1
2799	24,25	47,06	-43,40	0,00	-0,08	0,39	-0,26	0,02	43,40	0,39	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	25,84	0,63	8,23	355	34,09	Verifica	10,4
2799	24,25	47,06	-45,70	0,00	-0,23	0,15	-0,26	0,02	45,70	0,23	0,26	0,00168	0,0010695	3,15E-05	27,20	0,37	8,23	355	35,44	Verifica	10,0
2699	24,25	46,55	-42,49	0,00	0,00	0,06	-0,28	0,00	42,49	0,06	0,28	0,00168	0,0010695	3,15E-05	25,29	0,09	8,85	355	34,14	Verifica	10,4
2698	24,25	46,05	-39,75	0,00	0,00	0,08	-0,25	0,00	39,75	0,08	0,25	0,00168	0,0010695	3,15E-05	23,66	0,13	7,79	355	31,46	Verifica	11,3
2697	24,25	45,54	-38,73	0,00	-0,05	0,05	-0,22	0,00	38,73	0,05	0,22	0,00168	0,0010695	3,15E-05	23,05	0,09	6,83	355	29,88	Verifica	11,9
2703	24,25	45,04	-40,65	0,00	-0,03	0,09	-0,22	0,01	40,65	0,09	0,22	0,00168	0,0010695	3,15E-05	24,20	0,15	7,04	355	31,24	Verifica	11,4

2703	24,25	45,04	-37,60	0,00	-0,17	0,41	-0,22	0,01	37,60	0,41	0,22	0,00168	0,0010695	3,15E-05	22,38	0,66	7,04	355	29,44	Verifica	12,1
2706	24,25	44,53	-32,62	0,00	-0,05	0,07	-0,16	0,00	32,62	0,07	0,16	0,00168	0,0010695	3,15E-05	19,42	0,12	5,14	355	24,56	Verifica	14,5
2705	24,25	44,03	-25,69	0,00	-0,02	0,04	-0,14	0,00	25,69	0,04	0,14	0,00168	0,0010695	3,15E-05	15,29	0,06	4,54	355	19,83	Verifica	17,9
2704	24,25	43,52	-20,66	0,00	-0,04	0,11	-0,12	0,00	20,66	0,11	0,12	0,00168	0,0010695	3,15E-05	12,30	0,17	3,83	355	16,13	Verifica	22,0
2713	24,25	43,02	-21,38	0,00	-0,26	0,21	-0,12	0,00	21,38	0,26	0,12	0,00168	0,0010695	3,15E-05	12,72	0,42	3,85	355	16,59	Verifica	21,4
2713	24,25	43,02	-19,35	0,00	-0,18	0,25	-0,12	0,00	19,35	0,25	0,12	0,00168	0,0010695	3,15E-05	11,52	0,40	3,85	355	15,38	Verifica	23,1
2454	24,25	42,51	-17,60	0,00	0,00	0,02	-0,08	0,00	17,60	0,02	0,08	0,00168	0,0010695	3,15E-05	10,48	0,04	2,58	355	13,06	Verifica	27,2
2453	24,25	42,01	-15,59	0,00	-0,02	0,02	-0,07	0,00	15,59	0,02	0,07	0,00168	0,0010695	3,15E-05	9,28	0,04	2,31	355	11,59	Verifica	30,6
2452	24,25	41,50	-9,57	0,00	-0,03	0,11	-0,05	0,00	9,57	0,11	0,05	0,00168	0,0010695	3,15E-05	5,70	0,17	1,57	355	7,28	Verifica	48,8
2451	24,25	41,00	-6,99	1,50	0,00	0,26	0,00	0,00	6,99	0,26	0,00	0,00168	0,0010695	3,15E-05	4,16	0,42	0,00	355	4,22	Verifica	84,1
4883	24,25	71,53	-69,11	0,00	0,00	6,08	-0,39	0,09	69,11	6,08	0,39	0,00168	0,0010695	3,15E-05	41,14	9,85	12,43	355	56,22	Verifica	6,3
4879	24,25	71,16	-77,11	0,00	-0,34	0,00	0,00	0,30	77,11	0,34	0,30	0,00168	0,0010695	3,15E-05	45,90	0,55	9,43	355	55,34	Verifica	6,4
4878	24,25	70,79	-82,22	0,00	-0,20	0,00	0,00	0,30	82,22	0,20	0,30	0,00168	0,0010695	3,15E-05	48,94	0,32	9,41	355	58,36	Verifica	6,1
4877	24,25	70,41	-84,52	0,00	0,00	0,79	0,00	0,25	84,52	0,79	0,25	0,00168	0,0010695	3,15E-05	50,31	1,28	8,07	355	58,42	Verifica	6,1
5053	24,25	70,04	-84,05	0,00	-3,07	0,00	0,00	0,16	84,05	3,07	0,16	0,00168	0,0010695	3,15E-05	50,03	4,97	5,18	355	55,88	Verifica	6,4
5053	24,25	70,04	-85,36	0,00	0,00	0,90	0,00	0,16	85,36	0,90	0,16	0,00168	0,0010695	3,15E-05	50,81	1,46	5,18	355	56,05	Verifica	6,3
4650	24,25	69,34	-86,12	0,00	-0,09	0,00	0,00	0,32	86,12	0,09	0,32	0,00168	0,0010695	3,15E-05	51,26	0,15	10,28	355	61,54	Verifica	5,8
4649	24,25	68,65	-89,00	0,00	-0,08	0,00	0,00	0,32	89,00	0,08	0,32	0,00168	0,0010695	3,15E-05	52,97	0,13	10,15	355	63,12	Verifica	5,6
4648	24,25	67,95	-92,58	0,00	-0,08	0,09	-0,03	0,30	92,58	0,09	0,30	0,00168	0,0010695	3,15E-05	55,11	0,15	9,45	355	64,56	Verifica	5,5
4647	24,25	67,25	-95,43	0,00	-0,72	0,00	-0,11	0,19	95,43	0,72	0,19	0,00168	0,0010695	3,15E-05	56,80	1,17	6,15	355	62,99	Verifica	5,6

# Pregagem



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	<u>N</u> absoluto (kN/m)	<u>V</u> absoluto (kN/m)	<u>M</u> absoluto (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<u>N</u> tensão (MPa)	<u>V</u> tensão (MPa)	<u>M</u> tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
7221	44,38	54,13	0,0	82,9	-1,1	0,2	0,0	0,2	82,88	1,09	0,15	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	168,84	6,03	100,43	355	269,47	Verifica	1,3
6644	43,83	54,03	0,0	73,7	-0,1	0,1	0,0	0,0	73,74	0,13	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	150,23	0,72	16,06	355	166,29	Verifica	2,1
6645	43,27	53,94	0,0	74,2	0,0	0,0	0,0	0,0	74,21	0,05	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	151,18	0,28	6,60	355	157,78	Verifica	2,2
6646	42,72	53,84	0,0	76,3	-0,2	0,0	0,0	0,0	76,28	0,21	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	155,40	1,16	11,03	355	166,45	Verifica	2,1
6643	42,17	53,74	0,0	72,4	-0,8	0,7	-0,2	0,0	72,41	0,75	0,19	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	147,51	4,17	123,03	355	270,63	Verifica	1,3
6643	42,17	53,74	0,0	75,6	-0,5	1,4	-0,2	0,0	75,60	1,41	0,19	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	154,02	7,82	123,03	355	277,37	Verifica	1,3
5779	41,61	53,64	0,0	78,8	-0,2	0,1	0,0	0,0	78,78	0,18	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	160,50	0,97	11,64	355	172,14	Verifica	2,1
5778	41,06	53,55	0,0	87,3	0,0	0,0	0,0	0,0	87,28	0,03	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	177,81	0,19	9,02	355	186,84	Verifica	1,9
5777	40,50	53,45	0,0	96,8	-0,1	0,2	0,0	0,0	96,84	0,23	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	197,27	1,27	10,87	355	208,15	Verifica	1,7
5773	39,95	53,35	0,0	103,2	-1,3	0,3	-0,1	0,0	103,17	1,27	0,12	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	210,18	7,03	76,17	355	286,60	Verifica	1,2
5773	39,95	53,35	0,0	106,7	-0,2	1,2	-0,1	0,0	106,72	1,22	0,12	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	217,41	6,74	76,17	355	293,81	Verifica	1,2

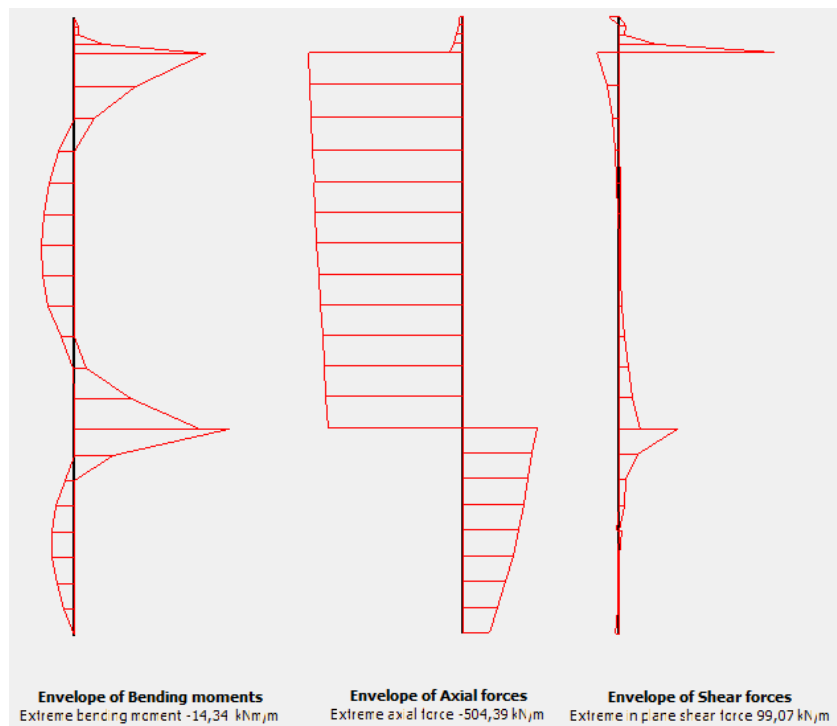


5286	39,40	53,25	0,0	114,9	-0,2	0,0	0,0	0,0	114,88	0,18	0,03	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	234,03	0,99	22,64	355	256,67	Verifica	1,4
5287	38,84	53,16	0,0	119,7	0,0	0,0	0,0	0,0	119,66	0,05	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	243,76	0,25	9,98	355	253,74	Verifica	1,4
5288	38,29	53,06	0,0	123,7	0,0	0,2	0,0	0,0	123,73	0,18	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	252,06	1,00	3,66	355	255,73	Verifica	1,4
5285	37,74	52,96	0,0	129,8	-0,9	0,1	-0,1	0,0	129,77	0,93	0,08	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	264,37	5,17	51,50	355	316,00	Verifica	1,1
5285	37,74	52,96	0,0	127,2	-0,1	0,5	-0,1	0,0	127,21	0,53	0,08	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	259,15	2,95	51,50	355	310,69	Verifica	1,1
4792	37,18	52,86	0,0	122,0	0,0	0,0	0,0	0,0	122,04	0,04	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	248,63	0,24	5,16	355	253,79	Verifica	1,4
4791	36,63	52,77	0,0	104,9	0,0	0,0	0,0	0,0	104,95	0,03	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	213,79	0,19	1,50	355	215,30	Verifica	1,6
4790	36,07	52,67	0,0	80,4	0,0	0,1	0,0	0,0	80,43	0,08	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	163,84	0,44	6,83	355	170,68	Verifica	2,1
4789	35,52	52,57	0,0	55,5	-0,2	0,0	0,0	0,0	55,50	0,19	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	113,07	1,04	0,00	355	113,08	Verifica	3,1

## Anexo X

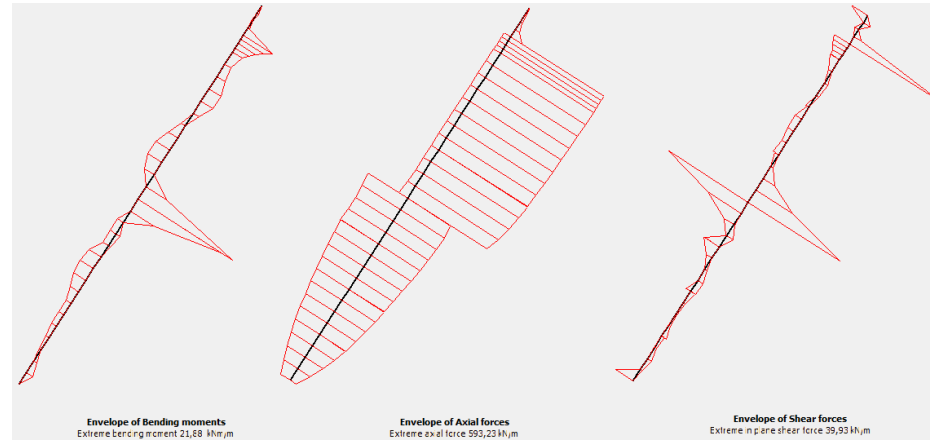
Esforços obtidos da análise da Secção Corte 8

Perfil HEB140



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs (kN/m)	V abs (kN/m)	M abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
3221	50,50	62,21	-181,86	0,00	-1,62	0,39	-2,12	0,00	181,86	1,62	2,12	0,00429	0,001308	2,16E-04	42,39	2,14	9,83	355	52,35	Verifica	6,8
3224	50,50	61,71	-163,68	0,00	0,00	0,96	-2,04	0,00	163,68	0,96	2,04	0,00429	0,001308	2,16E-04	38,15	1,27	9,43	355	47,64	Verifica	7,5
3223	50,50	61,21	-138,86	0,00	0,00	1,14	-1,60	0,00	138,86	1,14	1,60	0,00429	0,001308	2,16E-04	32,37	1,51	7,40	355	39,86	Verifica	8,9
3222	50,50	60,71	-111,33	0,00	0,00	1,40	-0,95	0,00	111,33	1,40	0,95	0,00429	0,001308	2,16E-04	25,95	1,85	4,41	355	30,53	Verifica	11,6
3345	50,50	60,21	-85,02	0,00	-0,05	3,26	0,00	0,00	85,02	3,26	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	19,82	4,32	0,00	355	21,18	Verifica	16,8
3243	50,50	64,21	-240,26	0,00	-36,71	0,00	0,00	14,34	240,26	36,71	14,34	0,00429	0,001308	2,16E-04	56,00	48,61	66,37	355	148,54	Verifica	2,4

3217	50,50	63,71	-225,11	0,00	-11,26	0,00	0,00	3,60	225,11	11,26	3,60	0,00429	0,001308	2,16E-04	52,47	14,92	16,66	355	73,80	Verifica	4,8
3216	50,50	63,21	-213,07	0,00	-3,79	0,07	-0,90	0,00	213,07	3,79	0,90	0,00429	0,001308	2,16E-04	49,67	5,02	4,18	355	54,55	Verifica	6,5
3215	50,50	62,71	-199,51	0,00	-2,73	0,00	-1,74	0,00	199,51	2,73	1,74	0,00429	0,001308	2,16E-04	46,51	3,61	8,05	355	54,91	Verifica	6,5
3221	50,50	62,21	-180,79	0,00	0,00	2,21	-2,12	0,00	180,79	2,21	2,12	0,00429	0,001308	2,16E-04	42,14	2,92	9,83	355	52,21	Verifica	6,8
3243	50,50	64,21	-441,28	0,00	-0,01	13,67	-11,72	0,00	441,28	13,67	11,72	0,00429	0,001308	2,16E-04	102,86	18,10	54,26	355	160,22	Verifica	2,2
2917	50,50	64,81	-449,30	0,00	0,00	8,56	-5,25	0,00	449,30	8,56	5,25	0,00429	0,001308	2,16E-04	104,73	11,33	24,30	355	130,52	Verifica	2,7
2918	50,50	65,40	-454,86	0,00	0,00	5,29	-1,15	0,16	454,86	5,29	1,15	0,00429	0,001308	2,16E-04	106,03	7,00	5,31	355	112,00	Verifica	3,2
2919	50,50	66,00	-459,97	0,00	-0,01	3,01	0,00	1,26	459,97	3,01	1,26	0,00429	0,001308	2,16E-04	107,22	3,98	5,84	355	113,27	Verifica	3,1
2939	50,50	66,59	-466,63	0,00	-0,12	1,31	0,00	2,48	466,63	1,31	2,48	0,00429	0,001308	2,16E-04	108,77	1,74	11,48	355	120,28	Verifica	3,0
2939	50,50	66,59	-466,33	0,00	-0,13	1,30	0,00	2,48	466,33	1,30	2,48	0,00429	0,001308	2,16E-04	108,70	1,73	11,48	355	120,21	Verifica	3,0
2933	50,50	67,19	-472,28	0,00	-0,15	0,50	0,00	2,94	472,28	0,50	2,94	0,00429	0,001308	2,16E-04	110,09	0,66	13,61	355	123,71	Verifica	2,9
2934	50,50	67,78	-477,86	0,00	-0,29	0,53	0,00	3,04	477,86	0,53	3,04	0,00429	0,001308	2,16E-04	111,39	0,70	14,08	355	125,48	Verifica	2,8
2935	50,50	68,38	-483,00	0,00	-0,89	0,64	0,00	2,78	483,00	0,89	2,78	0,00429	0,001308	2,16E-04	112,59	1,17	12,87	355	125,47	Verifica	2,8
3275	50,50	68,98	-487,65	0,00	-1,82	0,52	0,00	2,27	487,65	1,82	2,27	0,00429	0,001308	2,16E-04	113,67	2,42	10,52	355	124,26	Verifica	2,9
3591	50,50	71,50	-44,21	0,00	0,00	99,07	-12,20	0,00	44,21	99,07	12,20	0,00429	0,001308	2,16E-04	10,30	131,19	56,49	355	236,85	Verifica	1,5
3592	50,50	71,68	-29,78	0,00	0,00	23,80	-2,74	0,00	29,78	23,80	2,74	0,00429	0,001308	2,16E-04	6,94	31,52	12,70	355	58,02	Verifica	6,1
3593	50,50	71,85	-19,92	0,00	0,00	3,12	-0,36	0,00	19,92	3,12	0,36	0,00429	0,001308	2,16E-04	4,64	4,13	1,65	355	9,52	Verifica	37,3
3594	50,50	72,03	-13,85	0,00	0,00	3,90	-0,40	0,00	13,85	3,90	0,40	0,00429	0,001308	2,16E-04	3,23	5,17	1,86	355	10,30	Verifica	34,5
3797	50,50	72,20	-10,77	0,00	-6,94	0,00	0,00	0,00	10,77	6,94	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	2,51	9,18	0,00	355	16,10	Verifica	22,0
3275	50,50	68,98	-486,06	0,00	-1,93	0,16	0,00	2,27	486,06	1,93	2,27	0,00429	0,001308	2,16E-04	113,30	2,56	10,52	355	123,90	Verifica	2,9
3276	50,50	69,61	-491,86	0,00	-2,79	0,00	0,00	1,45	491,86	2,79	1,45	0,00429	0,001308	2,16E-04	114,65	3,70	6,71	355	121,53	Verifica	2,9
3277	50,50	70,24	-497,08	0,00	-4,75	0,00	-1,89	0,00	497,08	4,75	1,89	0,00429	0,001308	2,16E-04	115,87	6,29	8,76	355	125,10	Verifica	2,8
3278	50,50	70,87	-501,38	0,00	-8,13	0,00	-5,69	0,00	501,38	8,13	5,69	0,00429	0,001308	2,16E-04	116,87	10,76	26,33	355	144,41	Verifica	2,5
3591	50,50	71,50	-504,39	0,00	-14,33	0,00	-12,20	0,00	504,39	14,33	12,20	0,00429	0,001308	2,16E-04	117,57	18,98	56,49	355	177,14	Verifica	2,0

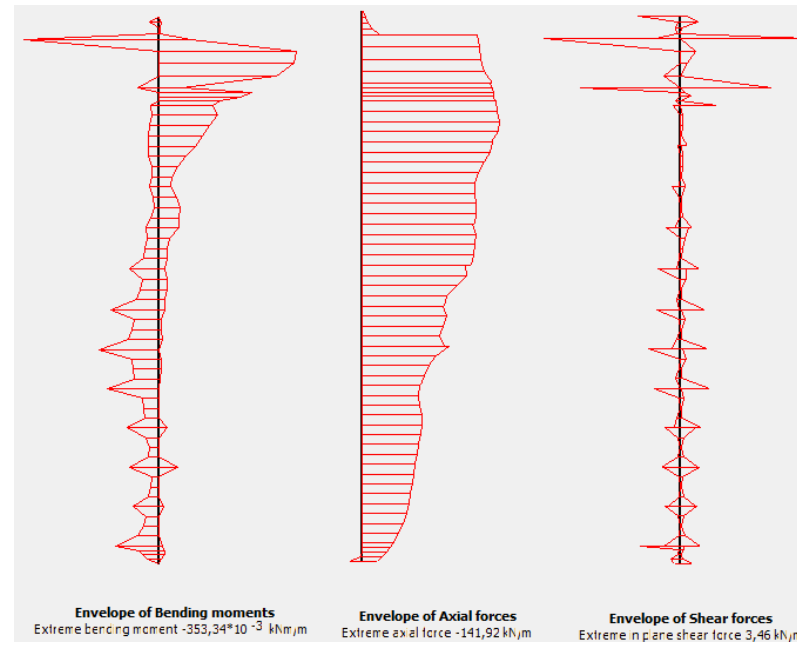


Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N_abs (kN/m)	V_abs (kN/m)	M_abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<u>N</u> tensão (MPa)	<u>V</u> tensão (MPa)	<u>M</u> tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
2297	45,20	56,00	-58,83	38,00	-7,53	0,00	0,00	0,00	58,83	7,53	0,00	0,00543	0,00176	3,11E-04	10,84	7,42	0,00	355	16,80	Verifica	4,0
2298	45,53	56,51	-86,28	80,90	0,00	0,89	-1,53	0,00	86,28	0,89	1,53	0,00543	0,00176	3,11E-04	15,89	0,88	4,91	355	20,85	Verifica	17,0
2299	45,86	57,03	-112,54	115,45	0,00	2,02	-0,72	0,01	115,45	2,02	0,72	0,00543	0,00176	3,11E-04	21,26	1,99	2,33	355	23,84	Verifica	14,9
2300	46,19	57,54	-135,70	142,98	-0,15	0,74	0,00	0,41	142,98	0,74	0,41	0,00543	0,00176	3,11E-04	26,33	0,73	1,33	355	27,69	Verifica	12,8
2413	46,53	58,05	-153,82	165,29	0,00	1,16	0,00	0,67	165,29	1,16	0,67	0,00543	0,00176	3,11E-04	30,44	1,14	2,15	355	32,65	Verifica	10,9
2413	46,53	58,05	-153,72	166,31	-0,21	1,96	0,00	0,67	166,31	1,96	0,67	0,00543	0,00176	3,11E-04	30,63	1,93	2,15	355	32,94	Verifica	10,8
2419	46,86	58,57	-168,85	184,15	-0,06	0,68	0,00	1,13	184,15	0,68	1,13	0,00543	0,00176	3,11E-04	33,91	0,67	3,63	355	37,57	Verifica	9,4
2418	47,19	59,08	-182,71	200,36	-0,16	0,41	0,00	1,10	200,36	0,41	1,10	0,00543	0,00176	3,11E-04	36,90	0,41	3,53	355	40,43	Verifica	8,8
2417	47,52	59,59	-195,42	214,60	0,00	0,77	0,00	1,21	214,60	0,77	1,21	0,00543	0,00176	3,11E-04	39,52	0,76	3,88	355	43,42	Verifica	8,2
2797	47,85	60,11	-207,10	226,29	0,00	1,85	0,00	1,93	226,29	1,85	1,93	0,00543	0,00176	3,11E-04	41,67	1,82	6,19	355	47,97	Verifica	7,4
2797	47,85	60,11	-206,20	224,46	-2,02	2,09	0,00	1,93	224,46	2,09	1,93	0,00543	0,00176	3,11E-04	41,34	2,06	6,19	355	47,66	Verifica	7,4
2798	48,18	60,62	-217,33	236,39	0,00	2,15	0,00	2,86	236,39	2,15	2,86	0,00543	0,00176	3,11E-04	43,53	2,11	9,20	355	52,86	Verifica	6,7
2799	48,51	61,13	-226,59	246,88	-0,27	0,86	0,00	3,20	246,88	0,86	3,20	0,00543	0,00176	3,11E-04	45,47	0,85	10,28	355	55,76	Verifica	6,4
2800	48,84	61,64	-234,11	256,53	-2,62	0,00	0,00	2,74	256,53	2,62	2,74	0,00543	0,00176	3,11E-04	47,24	2,58	8,82	355	56,24	Verifica	6,3
2807	49,18	62,16	-240,08	265,97	-6,82	0,03	-0,46	1,32	265,97	6,82	1,32	0,00543	0,00176	3,11E-04	48,98	6,71	4,23	355	54,47	Verifica	6,5
2807	49,18	62,16	-240,43	267,76	-6,31	0,12	-0,46	1,32	267,76	6,31	1,32	0,00543	0,00176	3,11E-04	49,31	6,21	4,23	355	54,61	Verifica	6,5



2715	49,51	62,67	-235,44	272,91	-0,20	2,96	-1,04	1,36	272,91	2,96	1,36	0,00543	0,00176	3,11E-04	50,26	2,92	4,37	355	54,86	Verifica	6,5
2716	49,84	63,18	-235,20	279,14	-4,10	0,55	0,00	1,38	279,14	4,10	1,38	0,00543	0,00176	3,11E-04	51,41	4,04	4,43	355	56,27	Verifica	6,3
2717	50,17	63,70	-240,80	281,18	-14,49	0,00	-5,24	0,00	281,18	14,49	5,24	0,00543	0,00176	3,11E-04	51,78	14,27	16,84	355	72,94	Verifica	4,9
3243	50,50	64,21	-253,32	273,77	-35,27	0,00	-19,28	0,00	273,77	35,27	19,28	0,00543	0,00176	3,11E-04	50,42	34,73	61,98	355	127,48	Verifica	2,8
3243	50,50	64,21	-57,44	505,29	0,00	39,93	-21,88	0,00	505,29	39,93	21,88	0,00543	0,00176	3,11E-04	93,06	39,32	70,35	355	177,03	Verifica	2,0
3244	50,85	64,76	-49,14	530,38	0,00	16,09	-4,68	0,00	530,38	16,09	4,68	0,00543	0,00176	3,11E-04	97,68	15,84	15,05	355	116,02	Verifica	3,1
3245	51,20	65,30	-46,01	547,90	0,00	4,85	0,00	2,19	547,90	4,85	2,19	0,00543	0,00176	3,11E-04	100,90	4,77	7,03	355	108,25	Verifica	3,3
3246	51,55	65,85	-44,97	559,73	-0,10	0,82	0,00	3,20	559,73	0,82	3,20	0,00543	0,00176	3,11E-04	103,08	0,81	10,28	355	113,37	Verifica	3,1
3387	51,90	66,40	-44,82	567,77	-1,67	0,00	0,00	3,16	567,77	1,67	3,16	0,00543	0,00176	3,11E-04	104,56	1,64	10,17	355	114,76	Verifica	3,1
3387	51,90	66,40	-44,83	566,53	-2,43	0,00	0,00	3,16	566,53	2,43	3,16	0,00543	0,00176	3,11E-04	104,33	2,39	10,17	355	114,57	Verifica	3,1
3388	52,25	66,94	-45,03	572,97	-1,79	0,00	0,00	2,16	572,97	1,79	2,16	0,00543	0,00176	3,11E-04	105,52	1,76	6,95	355	112,51	Verifica	3,2
3389	52,60	67,49	-45,07	577,27	-2,58	0,00	0,00	1,03	577,27	2,58	1,03	0,00543	0,00176	3,11E-04	106,31	2,54	3,31	355	109,71	Verifica	3,2
3390	52,95	68,04	-44,93	580,56	-2,87	0,00	-1,33	0,00	580,56	2,87	1,33	0,00543	0,00176	3,11E-04	106,92	2,83	4,29	355	111,31	Verifica	3,2
3575	53,30	68,58	-44,58	583,98	-0,88	0,11	-2,72	0,00	583,98	0,88	2,72	0,00543	0,00176	3,11E-04	107,55	0,86	8,75	355	116,30	Verifica	3,1
3575	53,30	68,58	-44,68	583,98	-1,54	0,00	-2,72	0,00	583,98	1,54	2,72	0,00543	0,00176	3,11E-04	107,55	1,51	8,75	355	116,32	Verifica	3,1
3579	53,65	69,13	-44,33	587,39	-0,07	0,97	-2,75	0,00	587,39	0,97	2,75	0,00543	0,00176	3,11E-04	108,18	0,95	8,86	355	117,04	Verifica	3,0
3580	54,00	69,68	-44,01	590,79	-0,03	1,38	-1,91	0,00	590,79	1,38	1,91	0,00543	0,00176	3,11E-04	108,80	1,36	6,15	355	114,97	Verifica	3,1
3581	54,35	70,22	-43,77	592,85	-1,52	0,06	-1,39	0,00	592,85	1,52	1,39	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,18	1,49	4,46	355	113,67	Verifica	3,1
3833	54,70	70,77	-43,63	592,28	-4,03	0,00	-2,30	0,00	592,28	4,03	2,30	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,07	3,96	7,39	355	116,67	Verifica	3,0
3833	54,70	70,77	-43,40	592,93	-3,78	0,00	-2,30	0,00	592,93	3,78	2,30	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,19	3,72	7,39	355	116,77	Verifica	3,0
3837	54,82	70,95	-43,20	593,23	-4,25	0,00	-3,10	0,00	593,23	4,25	3,10	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,25	4,19	9,97	355	119,44	Verifica	3,0
3838	54,93	71,13	-43,38	592,99	-5,12	0,00	-4,11	0,00	592,99	5,12	4,11	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,21	5,05	13,22	355	122,74	Verifica	2,9
3839	55,05	71,32	-43,59	592,74	-6,08	0,00	-5,32	0,00	592,74	6,08	5,32	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,16	5,99	17,12	355	126,70	Verifica	2,8
4233	55,17	71,50	-43,47	592,98	-6,67	0,00	-6,72	0,00	592,98	6,67	6,72	0,00543	0,00176	3,11E-04	109,20	6,56	21,61	355	131,31	Verifica	2,7
4233	55,17	71,50	-3,44	70,04	0,00	39,88	-6,72	0,00	70,04	39,88	6,72	0,00543	0,00176	3,11E-04	12,90	39,27	21,61	355	76,27	Verifica	4,7
4239	55,38	71,83	-0,01	27,17	0,00	2,94	-0,38	0,00	27,17	2,94	0,38	0,00543	0,00176	3,11E-04	5,00	2,89	1,23	355	8,00	Verifica	44,4
4238	55,58	72,15	0,00	11,19	-1,67	0,00	0,00	0,20	11,19	1,67	0,20	0,00543	0,00176	3,11E-04	2,06	1,65	0,64	355	3,93	Verifica	90,3
4237	55,79	72,48	-0,06	8,50	0,00	2,85	-0,41	0,00	8,50	2,85	0,41	0,00543	0,00176	3,11E-04	1,56	2,80	1,32	355	5,65	Verifica	62,9
4639	56,00	72,80	0,00	5,51	-7,23	0,00	0,00	0,00	5,51	7,23	0,00	0,00543	0,00176	3,11E-04	1,01	7,12	0,00	355	12,37	Verifica	28,7

Perfil N80



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	<u>N</u> abs (kN/m)	<u>V</u> abs (kN/m)	<u>M</u> abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<u>N</u> tensão (MPa)	<u>V</u> tensão (MPa)	<u>M</u> tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
5039	56,25	71,50	-118,05	0,00	0,00	3,46	-0,35	0,08	118,05	3,46	0,35	0,00168	0,001070	3,15E-05	70,27	5,60	11,08	355	81,92	Verifica	4,3
4673	56,25	70,79	-120,69	0,00	-0,37	0,00	0,00	0,35	120,69	0,37	0,35	0,00168	0,001070	3,15E-05	71,84	0,61	11,22	355	83,06	Verifica	4,3
4672	56,25	70,08	-121,97	0,00	-0,17	0,00	0,00	0,35	121,97	0,17	0,35	0,00168	0,001070	3,15E-05	72,60	0,28	11,06	355	83,66	Verifica	4,2
4671	56,25	69,36	-125,52	0,00	0,00	0,42	0,00	0,30	125,52	0,42	0,30	0,00168	0,001070	3,15E-05	74,71	0,68	9,63	355	84,35	Verifica	4,2
4677	56,25	68,65	-134,97	0,00	-2,30	0,00	-0,05	0,06	134,97	2,30	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	80,34	3,73	1,90	355	82,50	Verifica	4,3
5029	56,25	72,80	-0,69	0,00	-0,14	1,09	0,00	0,00	0,69	1,09	0,00	0,00168	0,001070	3,15E-05	0,41	1,76	0,00	355	3,08	Verifica	115,3
5032	56,25	72,48	-3,04	0,00	-0,43	0,06	-0,02	0,01	3,04	0,43	0,02	0,00168	0,001070	3,15E-05	1,81	0,69	0,77	355	2,85	Verifica	124,6
5031	56,25	72,15	-5,62	0,00	-0,03	0,14	0,00	0,00	5,62	0,14	0,00	0,00168	0,001070	3,15E-05	3,34	0,23	0,07	355	3,44	Verifica	103,3
5030	56,25	71,83	-10,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	10,00	0,10	0,00	0,00168	0,001070	3,15E-05	5,95	0,16	0,11	355	6,07	Verifica	58,5
5039	56,25	71,50	-17,76	0,00	-3,27	0,62	-0,35	0,08	17,76	3,27	0,35	0,00168	0,001070	3,15E-05	10,57	5,29	11,08	355	23,51	Verifica	15,1

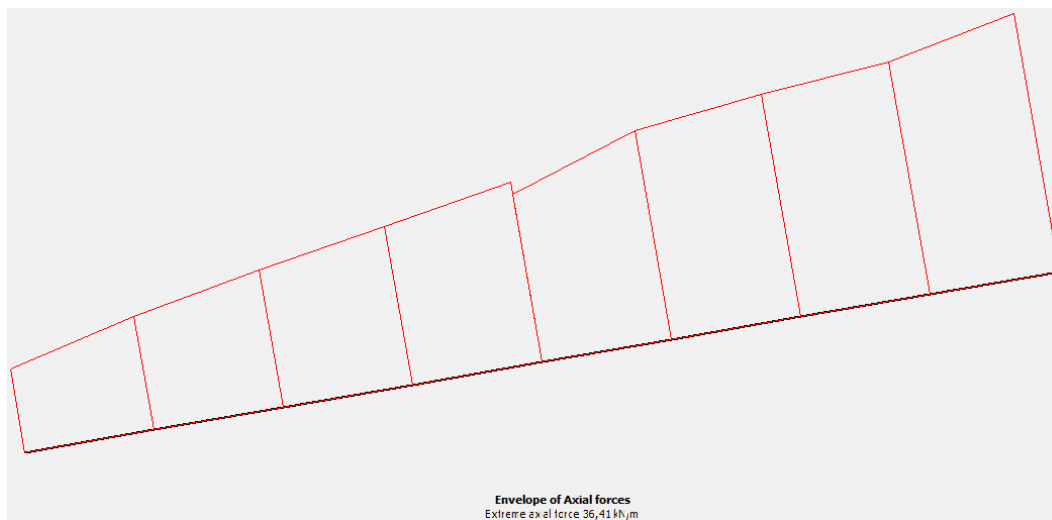
3517	56,25	55,75	-83,19	0,00	-0,03	0,60	-0,12	0,01	83,19	0,60	0,12	0,00168	0,001070	3,15E-05	49,52	0,96	3,93	355	53,48	Verifica	6,6
3493	56,25	55,18	-86,45	0,00	-0,11	0,03	-0,06	0,00	86,45	0,11	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	51,46	0,18	2,05	355	53,50	Verifica	6,6
3492	56,25	54,61	-83,26	0,00	-0,02	0,01	-0,07	0,01	83,26	0,02	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	49,56	0,03	2,22	355	51,79	Verifica	6,9
3491	56,25	54,04	-80,33	0,00	-0,01	0,09	-0,08	0,01	80,33	0,09	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	47,82	0,14	2,50	355	50,32	Verifica	7,1
3497	56,25	53,47	-84,36	0,00	-0,66	0,21	-0,16	0,00	84,36	0,66	0,16	0,00168	0,001070	3,15E-05	50,21	1,06	4,96	355	55,20	Verifica	6,4
3543	56,25	58,13	-106,87	0,00	-0,14	0,58	-0,08	0,01	106,87	0,58	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	63,61	0,94	2,48	355	66,11	Verifica	5,4
3520	56,25	57,54	-107,09	0,00	-0,14	0,01	-0,04	0,02	107,09	0,14	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	63,75	0,23	1,38	355	65,13	Verifica	5,5
3519	56,25	56,94	-97,46	0,00	-0,02	0,01	-0,05	0,02	97,46	0,02	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	58,01	0,04	1,61	355	59,62	Verifica	6,0
3518	56,25	56,35	-87,08	0,00	-0,02	0,10	-0,06	0,01	87,08	0,10	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	51,84	0,16	1,86	355	53,69	Verifica	6,6
3517	56,25	55,75	-85,10	0,00	-0,60	0,05	-0,12	0,01	85,10	0,60	0,12	0,00168	0,001070	3,15E-05	50,65	0,97	3,93	355	54,61	Verifica	6,5
3949	56,25	60,51	-114,09	0,00	-0,20	0,37	-0,04	0,05	114,09	0,37	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	67,91	0,59	1,58	355	69,50	Verifica	5,1
3546	56,25	59,92	-117,03	0,00	-0,09	0,01	-0,03	0,03	117,03	0,09	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,66	0,15	1,00	355	70,66	Verifica	5,0
3545	56,25	59,32	-116,70	0,00	-0,03	0,01	-0,04	0,02	116,70	0,03	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,46	0,06	1,19	355	70,66	Verifica	5,0
3544	56,25	58,73	-114,54	0,00	-0,02	0,04	-0,04	0,02	114,54	0,04	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	68,18	0,06	1,27	355	69,45	Verifica	5,1
3543	56,25	58,13	-112,02	0,00	-0,47	0,09	-0,08	0,01	112,02	0,47	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	66,68	0,76	2,48	355	69,17	Verifica	5,1
3981	56,25	62,90	-116,05	0,00	-0,10	0,21	-0,02	0,03	116,05	0,21	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,08	0,35	0,94	355	70,02	Verifica	5,1
3952	56,25	62,30	-115,78	0,00	-0,01	0,05	-0,01	0,04	115,78	0,05	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	68,92	0,07	1,38	355	70,30	Verifica	5,0
3951	56,25	61,71	-117,08	0,00	-0,01	0,01	-0,01	0,05	117,08	0,01	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,69	0,02	1,72	355	71,41	Verifica	5,0
3950	56,25	61,11	-117,90	0,00	-0,04	0,02	-0,02	0,05	117,90	0,04	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	70,18	0,06	1,64	355	71,83	Verifica	4,9
3949	56,25	60,51	-116,10	0,00	-0,28	0,15	-0,04	0,05	116,10	0,28	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,11	0,46	1,58	355	70,70	Verifica	5,0
4371	56,25	65,28	-134,59	0,00	-0,02	0,07	-0,03	0,09	134,59	0,07	0,09	0,00168	0,001070	3,15E-05	80,11	0,11	2,97	355	83,08	Verifica	4,3
3984	56,25	64,68	-131,58	0,00	-0,05	0,01	-0,03	0,07	131,58	0,05	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	78,32	0,09	2,16	355	80,48	Verifica	4,4
3983	56,25	64,09	-125,71	0,00	-0,03	0,01	-0,02	0,05	125,71	0,03	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	74,83	0,05	1,53	355	76,36	Verifica	4,6
3982	56,25	63,49	-119,76	0,00	-0,02	0,02	-0,02	0,03	119,76	0,02	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	71,28	0,03	1,06	355	72,34	Verifica	4,9
3981	56,25	62,90	-116,50	0,00	-0,14	0,03	-0,02	0,03	116,50	0,14	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	69,34	0,22	0,94	355	70,28	Verifica	5,1
4381	56,25	67,66	-137,89	0,00	0,00	0,20	-0,02	0,14	137,89	0,20	0,14	0,00168	0,001070	3,15E-05	82,08	0,32	4,38	355	86,46	Verifica	4,1
4367	56,25	67,06	-139,74	0,00	-0,06	0,00	-0,02	0,15	139,74	0,06	0,15	0,00168	0,001070	3,15E-05	83,18	0,09	4,79	355	87,97	Verifica	4,0
4366	56,25	66,47	-141,92	0,00	-0,04	0,00	-0,03	0,13	141,92	0,04	0,13	0,00168	0,001070	3,15E-05	84,48	0,07	4,17	355	88,64	Verifica	4,0
4365	56,25	65,87	-140,79	0,00	-0,01	0,02	-0,03	0,11	140,79	0,02	0,11	0,00168	0,001070	3,15E-05	83,80	0,03	3,52	355	87,32	Verifica	4,1
4371	56,25	65,28	-132,70	0,00	-0,16	0,00	-0,03	0,09	132,70	0,16	0,09	0,00168	0,001070	3,15E-05	78,99	0,26	2,97	355	81,95	Verifica	4,3
4677	56,25	68,65	-132,05	0,00	0,00	2,55	-0,05	0,06	132,05	2,55	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	78,60	4,12	1,90	355	80,82	Verifica	4,4

4384	56,25	68,40	-134,51	0,00	-0,11	0,02	0,00	0,24	134,51	0,11	0,24	0,00168	0,001070	3,15E-05	80,07	0,17	7,56	355	87,63	Verifica	4,1
4383	56,25	68,16	-135,22	0,00	-0,25	0,00	0,00	0,21	135,22	0,25	0,21	0,00168	0,001070	3,15E-05	80,49	0,41	6,67	355	87,16	Verifica	4,1
4382	56,25	67,91	-135,47	0,00	0,00	0,14	0,00	0,16	135,47	0,14	0,16	0,00168	0,001070	3,15E-05	80,64	0,23	4,97	355	85,61	Verifica	4,1
4381	56,25	67,66	-136,54	0,00	-0,90	0,00	-0,02	0,14	136,54	0,90	0,14	0,00168	0,001070	3,15E-05	81,28	1,45	4,38	355	85,69	Verifica	4,1
2519	56,25	44,33	-48,40	0,00	-0,40	0,40	-0,07	0,01	48,40	0,40	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	28,81	0,65	2,15	355	30,98	Verifica	11,5
2206	56,25	43,75	-46,02	0,00	-0,09	0,08	-0,04	0,00	46,02	0,09	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	27,39	0,14	1,11	355	28,51	Verifica	12,5
2205	56,25	43,18	-42,44	0,00	-0,03	0,00	-0,04	0,00	42,44	0,03	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	25,26	0,04	1,33	355	26,59	Verifica	13,4
2204	56,25	42,61	-37,69	0,00	-0,11	0,05	-0,06	0,00	37,69	0,11	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	22,43	0,17	1,76	355	24,20	Verifica	14,7
2203	56,25	42,04	-31,82	0,00	-0,49	0,42	-0,11	0,01	31,82	0,49	0,11	0,00168	0,001070	3,15E-05	18,94	0,79	3,64	355	22,62	Verifica	15,7
2561	56,25	46,61	-54,43	0,00	-0,46	0,43	-0,08	0,05	54,43	0,46	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	32,40	0,74	2,42	355	34,84	Verifica	10,2
2522	56,25	46,04	-52,90	0,00	-0,06	0,05	-0,02	0,00	52,90	0,06	0,02	0,00168	0,001070	3,15E-05	31,49	0,09	0,62	355	32,11	Verifica	11,1
2521	56,25	45,47	-51,40	0,00	-0,01	0,01	-0,02	0,00	51,40	0,01	0,02	0,00168	0,001070	3,15E-05	30,60	0,02	0,70	355	31,29	Verifica	11,3
2520	56,25	44,90	-49,93	0,00	-0,07	0,06	-0,03	0,00	49,93	0,07	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	29,72	0,11	0,85	355	30,57	Verifica	11,6
2519	56,25	44,33	-48,45	0,00	-0,37	0,31	-0,07	0,01	48,45	0,37	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	28,84	0,60	2,15	355	31,01	Verifica	11,4
3055	56,25	48,90	-61,34	0,00	-0,37	0,40	-0,08	0,02	61,34	0,40	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	36,51	0,65	2,67	355	39,20	Verifica	9,1
2564	56,25	48,32	-60,05	0,00	-0,08	0,08	-0,03	0,00	60,05	0,08	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	35,75	0,13	1,06	355	36,81	Verifica	9,6
2563	56,25	47,75	-58,19	0,00	-0,01	0,02	-0,02	0,00	58,19	0,02	0,02	0,00168	0,001070	3,15E-05	34,64	0,03	0,79	355	35,42	Verifica	10,0
2562	56,25	47,18	-56,18	0,00	-0,07	0,08	-0,03	0,00	56,18	0,08	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	33,44	0,12	0,86	355	34,30	Verifica	10,3
2561	56,25	46,61	-54,46	0,00	-0,44	0,49	-0,08	0,05	54,46	0,49	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	32,42	0,79	2,42	355	34,87	Verifica	10,2
3065	56,25	51,18	-59,24	0,00	-0,01	0,68	-0,14	0,00	59,24	0,68	0,14	0,00168	0,001070	3,15E-05	35,26	1,10	4,31	355	39,61	Verifica	9,0
3058	56,25	50,61	-58,43	0,00	-0,07	0,03	-0,04	0,00	58,43	0,07	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	34,78	0,12	1,33	355	36,11	Verifica	9,8
3057	56,25	50,04	-59,37	0,00	-0,02	0,00	-0,04	0,00	59,37	0,02	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	35,34	0,03	1,25	355	36,59	Verifica	9,7
3056	56,25	49,47	-61,87	0,00	-0,01	0,11	-0,04	0,00	61,87	0,11	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	36,83	0,17	1,21	355	38,04	Verifica	9,3
3055	56,25	48,90	-61,72	0,00	-0,53	0,16	-0,08	0,02	61,72	0,53	0,08	0,00168	0,001070	3,15E-05	36,74	0,86	2,67	355	39,44	Verifica	9,0
3497	56,25	53,47	-89,00	0,00	-0,06	0,80	-0,16	0,00	89,00	0,80	0,16	0,00168	0,001070	3,15E-05	52,97	1,30	4,96	355	57,97	Verifica	6,1
3068	56,25	52,89	-76,29	0,00	-0,13	0,00	-0,07	0,01	76,29	0,13	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	45,41	0,21	2,27	355	47,68	Verifica	7,4
3067	56,25	52,32	-69,15	0,00	0,00	0,04	-0,07	0,00	69,15	0,04	0,07	0,00168	0,001070	3,15E-05	41,16	0,07	2,17	355	43,33	Verifica	8,2
3066	56,25	51,75	-63,51	0,00	0,00	0,14	-0,06	0,00	63,51	0,14	0,06	0,00168	0,001070	3,15E-05	37,80	0,23	2,05	355	39,86	Verifica	8,9
3065	56,25	51,18	-59,89	0,00	-0,74	0,00	-0,14	0,00	59,89	0,74	0,14	0,00168	0,001070	3,15E-05	35,65	1,20	4,31	355	40,01	Verifica	8,9
2203	56,25	42,04	-32,26	0,00	-0,07	1,03	-0,11	0,01	32,26	1,03	0,11	0,00168	0,001070	3,15E-05	19,20	1,67	3,64	355	23,02	Verifica	15,4
1761	56,25	41,78	-29,02	0,01	-0,08	0,04	-0,05	0,02	29,02	0,08	0,05	0,00168	0,001070	3,15E-05	17,27	0,13	1,62	355	18,89	Verifica	18,8



1760	56,25	41,52	-25,05	0,00	-0,02	0,08	-0,04	0,01	25,05	0,08	0,04	0,00168	0,001070	3,15E-05	14,91	0,13	1,38	355	16,29	Verifica	21,8
1759	56,25	41,26	-20,41	1,51	-0,06	0,24	-0,03	0,01	20,41	0,24	0,03	0,00168	0,001070	3,15E-05	12,15	0,38	1,03	355	13,19	Verifica	26,9
1755	56,25	41,00	-15,17	14,22	-0,28	0,15	0,00	0,00	15,17	0,28	0,00	0,00168	0,001070	3,15E-05	9,03	0,46	0,00	355	9,06	Verifica	39,2

## Pregagem

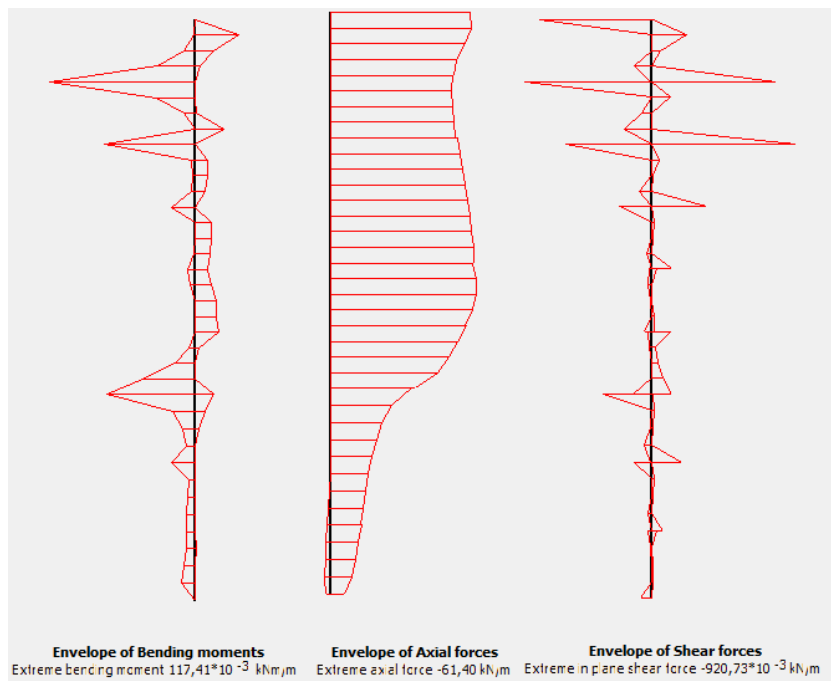


Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs (kN/m)	V abs (kN/m)	M abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<u>N</u> tensão (MPa)	<u>V</u> tensão (MPa)	<u>M</u> tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
5161	72,84	58,01	0,00	36,41	0,00	0,12	-0,02	0,00	36,41	0,12	0,02	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	74,17	0,68	10,19	355	84,37	Verifica	4,2
4780	72,35	57,93	0,00	32,69	-0,01	0,00	0,00	0,00	32,69	0,01	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	66,59	0,07	0,30	355	66,89	Verifica	5,3
4781	71,86	57,84	0,00	31,37	0,00	0,00	0,00	0,00	31,37	0,00	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	63,91	0,01	0,26	355	64,17	Verifica	5,5
4782	71,36	57,75	0,00	29,38	0,00	0,02	0,00	0,00	29,38	0,02	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	59,85	0,10	0,28	355	60,13	Verifica	5,9
4779	70,87	57,67	0,00	23,61	-0,09	0,00	-0,01	0,00	23,61	0,09	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	48,10	0,48	4,37	355	52,48	Verifica	6,8
4779	70,87	57,67	0,00	25,38	0,00	0,05	-0,01	0,00	25,38	0,05	0,01	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	51,70	0,26	4,37	355	56,08	Verifica	6,3
4332	70,38	57,58	0,00	22,32	0,00	0,00	0,00	0,00	22,32	0,00	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	45,48	0,02	0,24	355	45,71	Verifica	7,8
4333	69,89	57,50	0,00	19,35	0,00	0,00	0,00	0,00	19,35	0,00	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	39,43	0,01	0,03	355	39,46	Verifica	9,0
4334	69,39	57,41	0,00	16,00	0,00	0,01	0,00	0,00	16,00	0,01	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	32,60	0,04	0,29	355	32,89	Verifica	10,8
4331	68,90	57,32	0,00	11,79	-0,02	0,00	0,00	0,00	11,79	0,02	0,00	0,0004909	0,0003125	1,53E-06	24,03	0,10	0,00	355	24,03	Verifica	14,8

## Anexo XI

Esforços obtidos da análise da Secção Corte 10

N80+1Ø25mm anterior

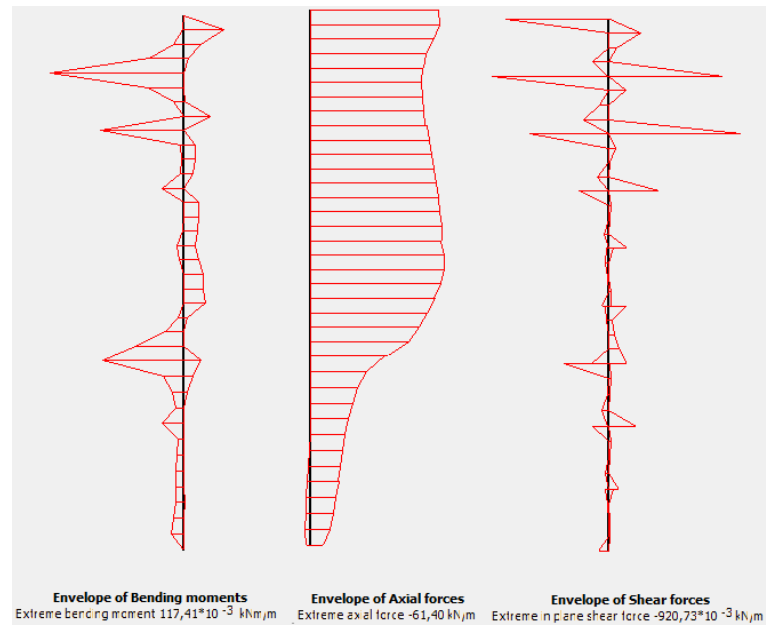


Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs (kN/m)	V abs (kN/m)	M abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<u>N</u> tensão (MPa)	<u>V</u> tensão (MPa)	<u>M</u> tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
4505	54,63	71,50	-58,62	0,00	0,00	0,71	0,00	0,00	58,62	0,71	0,00	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,00	0,89	0,00	355	27,04	Verifica	13,1
4358	54,63	70,95	-59,37	0,00	-0,22	0,00	0,00	0,04	59,37	0,22	0,04	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,35	0,28	1,06	355	28,41	Verifica	12,5
4357	54,63	70,40	-56,54	0,00	-0,06	0,00	-0,01	0,01	56,54	0,06	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,05	0,07	0,45	355	26,50	Verifica	13,4
4356	54,63	69,84	-53,09	0,00	0,00	0,11	-0,03	0,00	53,09	0,11	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	24,46	0,14	0,91	355	25,37	Verifica	14,0
4355	54,63	69,29	-52,01	0,00	-0,80	0,00	-0,12	0,00	52,01	0,80	0,12	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,96	1,00	3,55	355	27,57	Verifica	12,9
4355	54,63	69,29	-51,58	0,00	0,00	0,81	-0,12	0,00	51,58	0,81	0,12	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,76	1,01	3,55	355	27,37	Verifica	13,0
4052	54,63	68,74	-50,94	0,00	-0,12	0,00	-0,03	0,00	50,94	0,12	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,46	0,15	0,93	355	24,39	Verifica	14,6

4051	54,63	68,19	-51,35	0,00	0,00	0,06	-0,01	0,00	51,35	0,06	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,65	0,07	0,27	355	23,93	Verifica	14,8
4050	54,63	67,64	-51,92	0,00	0,00	0,18	0,00	0,02	51,92	0,18	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,92	0,22	0,71	355	24,64	Verifica	14,4
4049	54,63	67,08	-52,48	0,00	-0,92	0,00	-0,07	0,00	52,48	0,92	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	24,17	1,15	2,22	355	26,46	Verifica	13,4
4049	54,63	67,08	-53,83	0,00	0,00	0,54	-0,07	0,00	53,83	0,54	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	24,80	0,68	2,22	355	27,04	Verifica	13,1
4045	54,63	66,53	-54,54	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,01	54,54	0,04	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	25,12	0,06	0,31	355	25,43	Verifica	14,0
4044	54,63	65,98	-55,63	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	55,63	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	25,63	0,01	0,31	355	25,94	Verifica	13,7
4043	54,63	65,43	-56,83	0,00	0,00	0,08	0,00	0,01	56,83	0,08	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,18	0,10	0,24	355	26,42	Verifica	13,4
4039	54,63	64,88	-57,85	0,00	-0,35	0,00	-0,02	0,00	57,85	0,35	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,65	0,44	0,57	355	27,23	Verifica	13,0
4039	54,63	64,88	-57,94	0,00	0,00	0,20	-0,02	0,00	57,94	0,20	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,69	0,25	0,57	355	27,27	Verifica	13,0
3764	54,63	64,32	-58,77	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,01	58,77	0,02	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,07	0,02	0,41	355	27,48	Verifica	12,9
3763	54,63	63,77	-59,62	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	59,62	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,46	0,01	0,39	355	27,86	Verifica	12,7
3762	54,63	63,22	-60,22	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	60,22	0,03	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,74	0,04	0,38	355	28,11	Verifica	12,6
3761	54,63	62,67	-60,46	0,00	-0,13	0,00	-0,01	0,01	60,46	0,13	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,85	0,16	0,30	355	28,15	Verifica	12,6
3761	54,63	62,67	-59,63	0,00	-0,04	0,02	-0,01	0,01	59,63	0,04	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,47	0,05	0,30	355	27,76	Verifica	12,8
3597	54,63	62,11	-61,40	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	61,40	0,02	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	28,28	0,03	0,41	355	28,69	Verifica	12,4
3596	54,63	61,56	-61,30	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	61,30	0,01	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	28,24	0,01	0,52	355	28,76	Verifica	12,3
3595	54,63	61,01	-59,66	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,02	59,66	0,01	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	27,48	0,02	0,52	355	28,00	Verifica	12,7
3591	54,63	60,46	-56,80	0,00	-0,01	0,04	0,00	0,02	56,80	0,04	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,16	0,06	0,59	355	26,75	Verifica	13,3
3591	54,63	60,46	-57,19	0,00	-0,12	0,02	0,00	0,02	57,19	0,12	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,35	0,15	0,59	355	26,94	Verifica	13,2
3226	54,63	59,91	-53,34	0,00	-0,02	0,02	-0,01	0,00	53,34	0,02	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	24,57	0,03	0,16	355	24,73	Verifica	14,4
3225	54,63	59,35	-50,05	0,00	-0,04	0,00	-0,02	0,00	50,05	0,04	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,06	0,05	0,49	355	23,55	Verifica	15,1
3224	54,63	58,80	-44,95	0,00	-0,07	0,00	-0,04	0,00	44,95	0,07	0,04	0,002171	0,001382	3,30E-05	20,70	0,09	1,27	355	21,97	Verifica	16,2
3223	54,63	58,25	-35,62	0,00	-0,13	0,12	-0,07	0,02	35,62	0,13	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	16,41	0,16	2,16	355	18,57	Verifica	19,1
3223	54,63	58,25	-34,17	0,00	-0,01	0,31	-0,07	0,02	34,17	0,31	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	15,74	0,39	2,16	355	17,92	Verifica	19,8
3088	54,63	57,65	-25,55	0,00	-0,01	0,00	-0,02	0,01	25,55	0,01	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	11,77	0,02	0,54	355	12,31	Verifica	28,8
3087	54,63	57,04	-21,73	0,00	-0,01	0,01	-0,01	0,00	21,73	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	10,01	0,01	0,31	355	10,32	Verifica	34,4
3086	54,63	56,44	-19,28	0,00	0,00	0,04	-0,01	0,00	19,28	0,04	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	8,88	0,06	0,21	355	9,09	Verifica	39,0
3085	54,63	55,83	-17,27	0,00	-0,19	0,00	-0,02	0,00	17,27	0,19	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	7,96	0,24	0,57	355	8,54	Verifica	41,6
3085	54,63	55,83	-17,42	0,00	0,00	0,11	-0,02	0,00	17,42	0,11	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	8,03	0,14	0,57	355	8,60	Verifica	41,3
2826	54,63	55,23	-15,90	0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	15,90	0,01	0,00	0,002171	0,001382	3,30E-05	7,33	0,02	0,15	355	7,47	Verifica	47,5
2825	54,63	54,63	-14,72	0,49	-0,01	0,00	-0,01	0,00	14,72	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	6,78	0,01	0,18	355	6,96	Verifica	51,0

2824	54,63	54,02	-13,69	0,94	0,00	0,02	-0,01	0,00	13,69	0,02	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	6,31	0,02	0,20	355	6,51	Verifica	54,5
2823	54,63	53,42	-12,64	1,47	-0,07	0,00	-0,01	0,00	12,64	0,07	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	5,82	0,09	0,20	355	6,02	Verifica	58,9
2823	54,63	53,42	-12,86	1,49	-0,03	0,02	-0,01	0,00	12,86	0,03	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	5,92	0,04	0,20	355	6,13	Verifica	57,9
2504	54,63	52,81	-11,28	1,92	0,00	0,01	-0,01	0,00	11,28	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	5,20	0,01	0,22	355	5,42	Verifica	65,5
2503	54,63	52,21	-10,31	2,33	-0,01	0,00	-0,01	0,00	10,31	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	4,75	0,01	0,28	355	5,03	Verifica	70,5
2502	54,63	51,60	-8,78	2,49	-0,01	0,00	-0,01	0,00	8,78	0,01	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	4,04	0,01	0,34	355	4,39	Verifica	80,9
2501	54,63	51,00	-5,51	2,17	0,00	0,07	0,00	0,00	5,51	0,07	0,00	0,002171	0,001382	3,30E-05	2,54	0,09	0,00	355	2,54	Verifica	139,7

N80+1∅25mm posterior

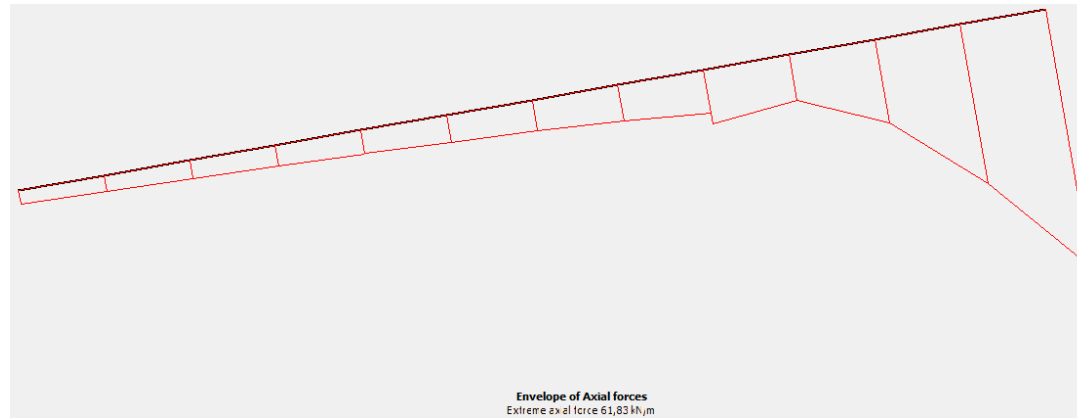


Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs [kN/m]	V abs [kN/m]	M abs [kN.m/m]	Área (m²)	A <sub>v</sub> (m²)	W <sub>el</sub> (m³)	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Verificação	F.S
3821	50,38	71,50	-79,82	0,02	0,00	0,62	0,00	0,00	79,82	0,62	0,00	0,002171	0,001382	3,30E-05	36,77	0,78	0,00	355	36,79	Verifica	9,6
3786	50,38	70,90	-91,24	0,01	-0,14	0,00	0,00	0,07	91,24	0,14	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	42,03	0,18	1,97	355	44,01	Verifica	8,1
3785	50,38	70,29	-91,24	0,00	-0,06	0,00	0,00	0,06	91,24	0,06	0,06	0,002171	0,001382	3,30E-05	42,03	0,08	1,67	355	43,70	Verifica	8,1



3784	50,38	69,69	-85,93	0,00	0,00	0,07	-0,01	0,04	85,93	0,07	0,04	0,002171	0,001382	3,30E-05	39,58	0,09	1,24	355	40,82	Verifica	8,7
3783	50,38	69,09	-81,41	0,00	-0,52	0,00	-0,07	0,05	81,41	0,52	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	37,50	0,65	2,09	355	39,61	Verifica	9,0
3783	50,38	69,09	-80,78	0,00	-0,34	0,34	-0,07	0,05	80,78	0,34	0,07	0,002171	0,001382	3,30E-05	37,21	0,43	2,09	355	39,30	Verifica	9,0
3402	50,38	68,48	-74,57	0,00	-0,04	0,06	-0,02	0,02	74,57	0,06	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	34,35	0,07	0,69	355	35,04	Verifica	10,1
3401	50,38	67,88	-70,14	0,00	-0,06	0,01	-0,02	0,00	70,14	0,06	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	32,31	0,07	0,51	355	32,82	Verifica	10,8
3400	50,38	67,27	-66,81	0,00	-0,08	0,08	-0,03	0,00	66,81	0,08	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	30,77	0,10	0,91	355	31,69	Verifica	11,2
3399	50,38	66,67	-63,90	0,00	-0,26	0,59	-0,02	0,06	63,90	0,59	0,06	0,002171	0,001382	3,30E-05	29,43	0,73	1,71	355	31,16	Verifica	11,4
3399	50,38	66,67	-62,43	0,00	-0,23	0,14	-0,02	0,06	62,43	0,23	0,06	0,002171	0,001382	3,30E-05	28,76	0,28	1,71	355	30,47	Verifica	11,7
3395	50,38	66,02	-56,53	0,00	-0,03	0,03	0,00	0,03	56,53	0,03	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	26,04	0,04	0,83	355	26,87	Verifica	13,2
3394	50,38	65,38	-51,20	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,02	51,20	0,01	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	23,58	0,02	0,73	355	24,32	Verifica	14,6
3393	50,38	64,73	-46,05	0,00	-0,04	0,02	0,00	0,02	46,05	0,04	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	21,21	0,05	0,69	355	21,90	Verifica	16,2
3389	50,38	64,09	-40,71	0,00	-0,10	0,16	-0,01	0,03	40,71	0,16	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	18,75	0,20	1,00	355	19,76	Verifica	18,0
3389	50,38	64,09	-41,74	0,00	-0,22	0,05	-0,01	0,03	41,74	0,22	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	19,23	0,28	1,00	355	20,24	Verifica	17,5
3181	50,38	63,44	-35,35	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,00	35,35	0,02	0,01	0,002171	0,001382	3,30E-05	16,29	0,03	0,30	355	16,58	Verifica	21,4
3180	50,38	62,79	-31,75	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	31,75	0,02	0,02	0,002171	0,001382	3,30E-05	14,62	0,03	0,63	355	15,26	Verifica	23,3
3179	50,38	62,15	-25,75	0,00	-0,05	0,01	-0,03	0,00	25,75	0,05	0,03	0,002171	0,001382	3,30E-05	11,86	0,06	1,00	355	12,87	Verifica	27,6
3175	50,38	61,50	-12,19	1,38	-0,02	0,26	0,00	0,00	12,19	0,26	0,00	0,002171	0,001382	3,30E-05	5,61	0,32	0,00	355	5,64	Verifica	62,9

# Pregagem



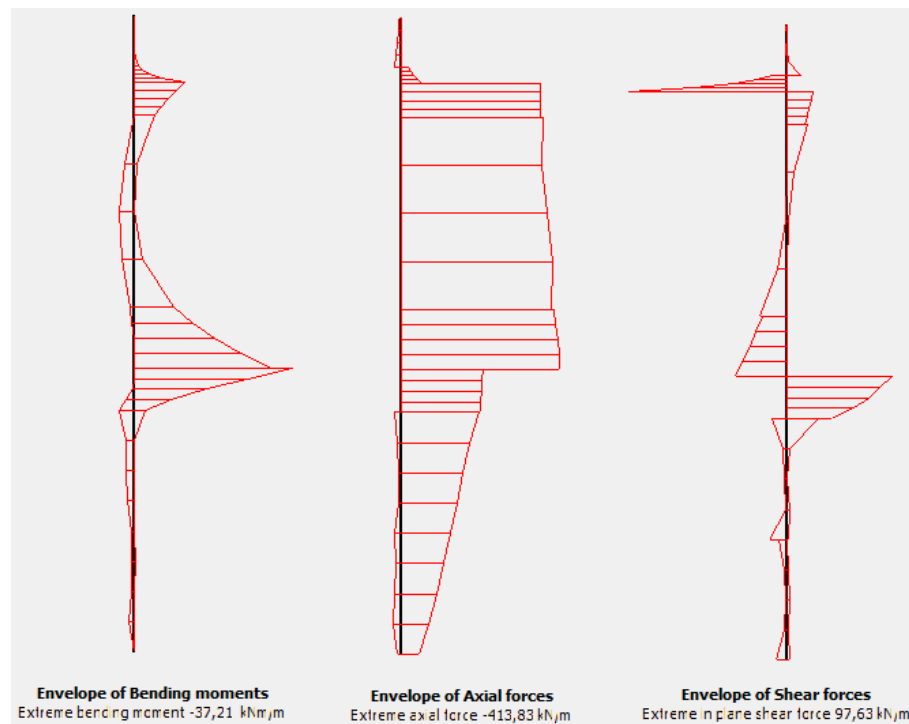
Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	N abs (kN/m)	V abs (kN/m)	M abs (kN.m/m)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	N tensão (MPa)	V tensão (MPa)	M tensão (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
3707	61,42	57,19	0,00	3,25	-0,05	0,00	0,00	0,00	3,25	0,05	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	6,61	0,26	0,00	355	6,63	Verifica	53,6
3713	61,91	57,28	0,00	3,73	0,00	0,02	0,00	0,00	3,73	0,02	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	7,60	0,10	0,89	355	8,49	Verifica	41,8
3712	62,40	57,36	0,00	4,28	-0,01	0,00	0,00	0,00	4,28	0,01	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	8,72	0,04	0,02	355	8,74	Verifica	40,6
3711	62,90	57,45	0,00	4,92	-0,01	0,00	0,00	0,00	4,92	0,01	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	10,03	0,05	0,85	355	10,88	Verifica	32,6
4333	63,39	57,54	0,00	5,68	0,00	0,12	0,00	0,02	5,68	0,12	0,02	0,0004909	0,000313	1,53E-06	11,58	0,69	11,29	355	22,90	Verifica	15,5
4333	63,39	57,54	0,00	5,58	-0,22	0,00	0,00	0,02	5,58	0,22	0,02	0,0004909	0,000313	1,53E-06	11,37	1,23	11,29	355	22,76	Verifica	15,6
4329	63,88	57,62	0,00	6,49	0,00	0,05	0,00	0,00	6,49	0,05	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	13,22	0,26	0,99	355	14,22	Verifica	25,0
4328	64,37	57,71	0,00	7,40	-0,01	0,00	0,00	0,00	7,40	0,01	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	15,07	0,04	0,05	355	15,12	Verifica	23,5
4327	64,86	57,80	0,00	8,59	-0,04	0,00	0,00	0,00	8,59	0,04	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	17,51	0,20	0,87	355	18,38	Verifica	19,3
4863	65,35	57,88	0,00	10,35	0,00	0,31	0,00	0,04	10,35	0,31	0,04	0,0004909	0,000313	1,53E-06	21,09	1,69	23,25	355	44,44	Verifica	8,0
4863	65,35	57,88	0,00	12,97	-0,41	0,00	0,00	0,04	12,97	0,41	0,04	0,0004909	0,000313	1,53E-06	26,41	2,25	23,25	355	49,81	Verifica	7,1
4866	65,85	57,97	0,00	11,07	0,00	0,07	0,00	0,00	11,07	0,07	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	22,55	0,41	1,20	355	23,75	Verifica	14,9
4865	66,34	58,06	0,00	20,10	-0,01	0,00	0,00	0,00	20,10	0,01	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	40,95	0,05	0,19	355	41,13	Verifica	8,6
4864	66,83	58,14	0,00	38,22	-0,07	0,00	0,00	0,00	38,22	0,07	0,00	0,0004909	0,000313	1,53E-06	77,86	0,37	1,77	355	79,63	Verifica	4,5
5003	67,32	58,23	0,00	61,83	0,00	0,49	0,00	0,05	61,83	0,49	0,05	0,0004909	0,000313	1,53E-06	125,96	2,72	34,02	355	160,05	Verifica	2,2



## Anexo XII

Esforços obtidos da análise da Secção painel solo-cimento em CSM

Perfil HEB 140



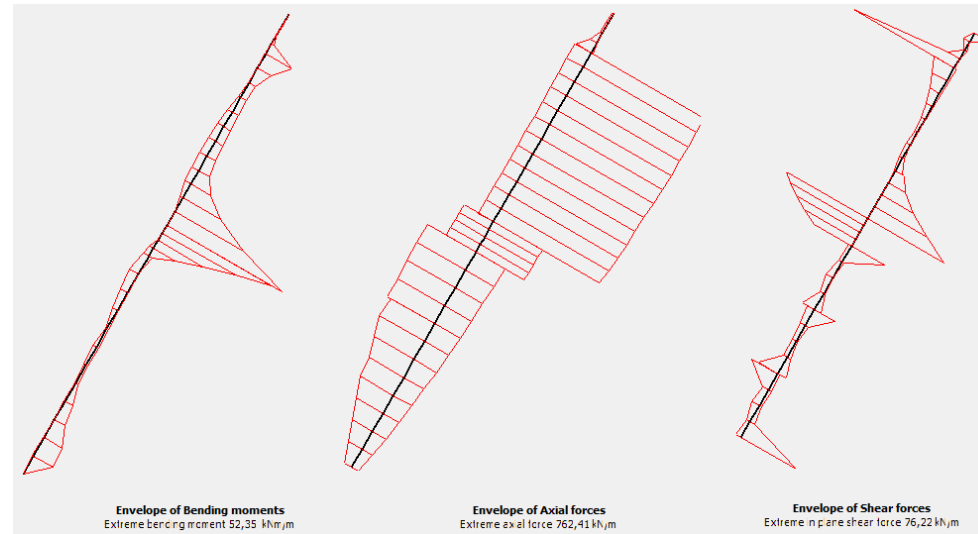
Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	<b>N absoluto (kN/m)</b>	<b>V absoluto (kN/m)</b>	<b>M absoluto (kN.m/m)</b>	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<b>N tensão (MPa)</b>	<b>V tensão (MPa)</b>	<b>M tensão (MPa)</b>	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
5107	20,50	64,02	-128,3	17,2	-0,3	4,3	-0,6	0,0	128,27	4,27	0,58	0,00429	0,001308	2,16E-04	29,90	5,65	2,71	355	34,04	Verifica	10,4
5078	20,50	63,51	-112,6	11,5	-0,9	0,9	-0,4	0,5	112,61	0,90	0,53	0,00429	0,001308	2,16E-04	26,25	1,20	2,47	355	28,79	Verifica	12,3
5077	20,50	63,01	-93,5	17,4	-1,9	0,4	-0,5	0,0	93,52	1,92	0,47	0,00429	0,001308	2,16E-04	21,80	2,54	2,19	355	24,39	Verifica	14,6
5076	20,50	62,50	-72,0	19,8	-1,4	1,0	-1,0	0,0	72,01	1,39	0,97	0,00429	0,001308	2,16E-04	16,79	1,84	4,47	355	21,49	Verifica	16,5
5075	20,50	62,00	-49,1	10,1	-2,0	6,6	0,0	0,0	49,07	6,55	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	11,44	8,68	0,00	355	18,89	Verifica	18,8
5947	20,50	71,78	-19,8	0,0	0,0	9,0	0,0	1,1	19,84	8,97	1,09	0,00429	0,001308	2,16E-04	4,62	11,88	5,02	355	22,72	Verifica	15,6



5771	20,50	71,71	-25,5	0,0	0,0	18,0	0,0	2,0	25,51	17,98	2,02	0,00429	0,001308	2,16E-04	5,95	23,81	9,35	355	43,99	Verifica	8,1
5770	20,50	71,64	-33,1	0,0	0,0	31,8	0,0	3,7	33,10	31,82	3,65	0,00429	0,001308	2,16E-04	7,71	42,14	16,90	355	77,03	Verifica	4,6
5769	20,50	71,57	-42,4	0,0	0,0	56,4	0,0	6,7	42,38	56,40	6,65	0,00429	0,001308	2,16E-04	9,88	74,68	30,80	355	135,60	Verifica	2,6
5765	20,50	71,50	-53,1	0,0	0,0	97,6	0,0	11,8	53,14	97,63	11,83	0,00429	0,001308	2,16E-04	12,39	129,28	54,76	355	233,77	Verifica	1,5
5755	20,50	70,94	-370,5	0,0	-12,9	0,0	0,0	4,9	370,45	12,87	4,94	0,00429	0,001308	2,16E-04	86,35	17,05	22,86	355	113,13	Verifica	3,1
5200	20,50	70,14	-366,5	0,0	-4,8	0,0	-2,1	0,7	366,52	4,76	2,15	0,00429	0,001308	2,16E-04	85,44	6,31	9,94	355	96,00	Verifica	3,7
5199	20,50	69,34	-380,7	0,0	-1,4	0,8	-3,3	0,0	380,71	1,42	3,33	0,00429	0,001308	2,16E-04	88,74	1,88	15,40	355	104,19	Verifica	3,4
5198	20,50	68,54	-394,5	0,0	-0,4	5,4	-2,7	2,0	394,51	5,41	2,71	0,00429	0,001308	2,16E-04	91,96	7,17	12,56	355	105,25	Verifica	3,4
5197	20,50	67,74	-392,1	0,0	0,0	16,0	-0,9	9,5	392,10	16,04	9,50	0,00429	0,001308	2,16E-04	91,40	21,24	44,00	355	140,31	Verifica	2,5
5197	20,50	67,74	-399,0	0,0	0,0	15,0	-0,9	9,5	398,97	14,99	9,50	0,00429	0,001308	2,16E-04	93,00	19,85	44,00	355	141,25	Verifica	2,5
5193	20,50	67,49	-403,0	0,0	0,0	18,5	-0,4	13,7	403,01	18,49	13,70	0,00429	0,001308	2,16E-04	93,94	24,48	63,43	355	162,99	Verifica	2,2
5192	20,50	67,24	-407,3	0,0	0,0	22,6	0,0	18,9	407,29	22,60	18,88	0,00429	0,001308	2,16E-04	94,94	29,93	87,39	355	189,56	Verifica	1,9
5191	20,50	66,98	-411,1	0,0	0,0	27,0	0,0	25,1	411,12	27,02	25,12	0,00429	0,001308	2,16E-04	95,83	35,78	116,28	355	220,98	Verifica	1,6
5409	20,50	66,73	-413,8	0,0	0,0	31,5	0,0	32,5	413,83	31,45	32,49	0,00429	0,001308	2,16E-04	96,46	41,65	150,41	355	257,19	Verifica	1,4
5409	20,50	66,73	-212,4	0,0	-65,1	0,0	0,0	37,2	212,37	65,06	37,21	0,00429	0,001308	2,16E-04	49,50	86,16	172,26	355	267,29	Verifica	1,3
5405	20,50	66,56	-210,9	0,0	-57,7	0,0	0,0	26,5	210,90	57,74	26,50	0,00429	0,001308	2,16E-04	49,16	76,46	122,67	355	216,94	Verifica	1,6
5404	20,50	66,38	-209,5	0,0	-50,8	0,0	0,0	16,9	209,50	50,85	16,92	0,00429	0,001308	2,16E-04	48,84	67,33	78,35	355	172,55	Verifica	2,1
5403	20,50	66,21	-208,1	0,0	-41,8	0,0	-1,6	8,8	208,09	41,82	8,80	0,00429	0,001308	2,16E-04	48,51	55,38	40,73	355	131,01	Verifica	2,7
5419	20,50	66,03	-206,6	0,0	-28,1	0,0	-3,5	2,6	206,56	28,10	3,49	0,00429	0,001308	2,16E-04	48,15	37,21	16,17	355	91,05	Verifica	3,9
5419	20,50	66,03	-203,0	15,6	-19,6	9,2	-3,5	2,6	203,03	19,61	3,49	0,00429	0,001308	2,16E-04	47,33	25,97	16,17	355	77,81	Verifica	4,6
5113	20,50	65,53	-180,1	9,1	-1,8	2,4	-1,8	0,0	180,11	2,43	1,80	0,00429	0,001308	2,16E-04	41,98	3,22	8,35	355	50,64	Verifica	7,0
5112	20,50	65,02	-161,4	5,9	0,0	1,3	-1,8	0,0	161,41	1,31	1,78	0,00429	0,001308	2,16E-04	37,62	1,74	8,26	355	45,99	Verifica	7,7
5111	20,50	64,52	-144,9	7,1	-1,8	0,5	-1,4	0,0	144,91	1,84	1,40	0,00429	0,001308	2,16E-04	33,78	2,43	6,50	355	40,50	Verifica	8,8
5107	20,50	64,02	-128,6	16,4	-1,2	10,4	-0,6	0,0	128,62	10,41	0,58	0,00429	0,001308	2,16E-04	29,98	13,79	2,71	355	40,48	Verifica	8,8
5765	20,50	71,50	-363,3	0,0	-16,2	0,0	0,0	11,8	363,25	16,24	11,83	0,00429	0,001308	2,16E-04	84,67	21,50	54,76	355	144,32	Verifica	2,5
5751	20,50	71,36	-363,3	0,0	-15,2	0,0	0,0	9,9	363,30	15,21	9,88	0,00429	0,001308	2,16E-04	84,69	20,14	45,72	355	134,99	Verifica	2,6
5750	20,50	71,22	-363,8	0,0	-14,0	0,0	0,0	8,1	363,81	13,99	8,08	0,00429	0,001308	2,16E-04	84,81	18,52	37,42	355	126,37	Verifica	2,8
5749	20,50	71,08	-364,2	0,0	-12,7	0,0	0,0	6,4	364,23	12,70	6,44	0,00429	0,001308	2,16E-04	84,90	16,82	29,79	355	118,34	Verifica	3,0
5755	20,50	70,94	-364,0	0,0	-11,4	0,0	0,0	4,9	364,01	11,42	4,94	0,00429	0,001308	2,16E-04	84,85	15,13	22,86	355	110,85	Verifica	3,2
5947	20,50	71,78	-15,9	0,0	0,0	8,7	-1,1	0,0	15,85	8,74	1,09	0,00429	0,001308	2,16E-04	3,70	11,58	5,02	355	21,87	Verifica	16,2
5948	20,50	71,98	-11,9	0,0	0,0	1,6	-0,2	0,0	11,85	1,57	0,18	0,00429	0,001308	2,16E-04	2,76	2,08	0,84	355	5,10	Verifica	69,6

5949	20,50	72,19	-8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,95	0,03	0,01	0,00429	0,001308	2,16E-04	2,09	0,04	0,06	355	2,15	Verifica	165,3
5950	20,50	72,39	-6,9	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	6,91	0,40	0,05	0,00429	0,001308	2,16E-04	1,61	0,52	0,23	355	2,05	Verifica	173,2
5957	20,50	72,60	-5,5	0,0	-0,8	0,0	0,0	0,0	5,50	0,82	0,00	0,00429	0,001308	2,16E-04	1,28	1,09	0,00	355	2,28	Verifica	155,5

Perfil HEB 160



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	<b>N absoluto (kN/m)</b>	<b>V absoluto (kN/m)</b>	<b>M absoluto (kN.m/m)</b>	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (m <sup>3</sup> )	<b>N tensão (MPa)</b>	<b>V tensão (MPa)</b>	<b>M tensão (MPa)</b>	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
6683	23,89	72,60	0,0	8,9	-11,7	0,3	0,0	0,0	8,89	11,75	0,00	0,00543	0,001759	3,11E-04	1,64	11,57	0,00	355	20,11	Verifica	17,7
6333	23,73	72,33	-0,3	10,5	0,0	4,5	0,0	0,5	10,55	4,48	0,53	0,00543	0,001759	3,11E-04	1,94	4,41	1,70	355	8,46	Verifica	41,9
6334	23,57	72,05	-0,8	16,4	-2,0	0,4	-0,3	0,1	16,40	1,96	0,28	0,00543	0,001759	3,11E-04	3,02	1,93	0,90	355	5,16	Verifica	68,8
6335	23,41	71,78	-4,9	42,8	-0,1	8,7	-0,1	1,1	42,85	8,71	1,10	0,00543	0,001759	3,11E-04	7,89	8,58	3,53	355	18,74	Verifica	18,9
6329	23,25	71,50	-16,0	106,3	-0,2	76,2	-0,1	12,0	106,28	76,22	12,02	0,00543	0,001759	3,11E-04	19,57	75,05	38,63	355	142,43	Verifica	2,5
5781	22,32	69,88	-104,2	760,1	-2,3	0,8	-3,0	2,3	760,13	2,34	2,97	0,00543	0,001759	3,11E-04	139,99	2,30	9,55	355	149,59	Verifica	2,4
5785	22,55	70,28	-105,1	761,6	-4,2	0,9	-2,8	0,9	761,62	4,24	2,80	0,00543	0,001759	3,11E-04	140,26	4,18	9,01	355	149,45	Verifica	2,4
5786	22,78	70,69	-106,2	761,6	-7,1	1,3	-3,0	0,1	761,62	7,09	2,98	0,00543	0,001759	3,11E-04	140,26	6,98	9,59	355	150,34	Verifica	2,4
5787	23,02	71,09	-107,0	761,4	-10,9	1,6	-6,1	0,1	761,45	10,88	6,08	0,00543	0,001759	3,11E-04	140,23	10,71	19,55	355	160,85	Verifica	2,2

6329	23,25	71,50	-107,6	762,4	-15,3	1,7	-12,0	0,1	762,41	15,34	12,02	0,00543	0,001759	3,11E-04	140,41	15,11	38,63	355	180,94	Verifica	2,0
5695	21,38	68,25	-101,8	739,6	-0,7	5,2	-5,3	2,9	739,63	5,24	5,27	0,00543	0,001759	3,11E-04	136,21	5,16	16,94	355	153,42	Verifica	2,3
5696	21,61	68,66	-102,1	746,6	-2,7	1,3	-4,0	3,0	746,58	2,67	3,96	0,00543	0,001759	3,11E-04	137,49	2,63	12,73	355	150,29	Verifica	2,4
5697	21,85	69,06	-102,6	752,8	-2,4	0,5	-3,5	3,1	752,84	2,43	3,52	0,00543	0,001759	3,11E-04	138,64	2,40	11,32	355	150,02	Verifica	2,4
5698	22,08	69,47	-103,2	757,6	-1,8	0,9	-3,3	2,9	757,62	1,79	3,29	0,00543	0,001759	3,11E-04	139,52	1,77	10,57	355	150,13	Verifica	2,4
5781	22,32	69,88	-104,2	760,1	-2,5	0,2	-3,0	2,3	760,13	2,52	2,97	0,00543	0,001759	3,11E-04	139,99	2,48	9,55	355	149,59	Verifica	2,4
5409	20,50	66,73	-101,9	713,3	0,0	57,5	-52,4	0,0	713,31	57,53	52,35	0,00543	0,001759	3,11E-04	131,37	56,64	168,34	355	315,35	Verifica	1,1
5410	20,72	67,11	-101,3	724,3	0,0	39,6	-31,1	0,0	724,26	39,63	31,08	0,00543	0,001759	3,11E-04	133,38	39,02	99,93	355	242,90	Verifica	1,5
5411	20,94	67,49	-101,2	732,4	0,0	24,1	-17,3	1,2	732,41	24,13	17,29	0,00543	0,001759	3,11E-04	134,88	23,76	55,59	355	194,86	Verifica	1,8
5412	21,16	67,87	-101,4	738,0	0,0	12,7	-9,3	2,4	738,00	12,70	9,31	0,00543	0,001759	3,11E-04	135,91	12,50	29,95	355	167,27	Verifica	2,1
5695	21,38	68,25	-101,6	741,3	-0,4	7,0	-5,3	2,9	741,28	7,00	5,27	0,00543	0,001759	3,11E-04	136,51	6,89	16,94	355	153,92	Verifica	2,3
5133	20,00	65,87	-198,4	324,2	-28,2	0,0	-1,6	2,6	324,18	28,23	2,59	0,00543	0,001759	3,11E-04	59,70	27,80	8,34	355	83,35	Verifica	4,3
5134	20,13	66,09	-198,9	326,2	-38,4	0,0	-9,9	1,7	326,25	38,45	9,85	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,08	37,86	31,68	355	112,78	Verifica	3,1
5135	20,25	66,30	-198,9	326,8	-47,4	0,0	-20,5	0,4	326,81	47,42	20,53	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,19	46,69	66,02	355	149,90	Verifica	2,4
5136	20,38	66,52	-198,8	326,8	-54,9	0,0	-33,3	0,0	326,82	54,94	33,25	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,19	54,09	106,92	355	191,58	Verifica	1,9
5409	20,50	66,73	-198,7	327,3	-60,8	0,1	-47,6	0,0	327,27	60,77	47,63	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,27	59,84	153,16	355	237,27	Verifica	1,5
5133	20,00	65,87	-197,3	323,1	-24,6	1,8	-2,6	1,6	323,09	24,56	2,59	0,00543	0,001759	3,11E-04	59,50	24,18	8,34	355	79,73	Verifica	4,5
4876	19,71	65,37	-190,1	329,0	-1,5	2,6	-4,1	0,0	329,05	2,56	4,10	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,60	2,52	13,19	355	73,92	Verifica	4,8
4877	19,42	64,86	-184,2	327,7	0,0	5,0	-3,2	0,1	327,66	5,05	3,21	0,00543	0,001759	3,11E-04	60,34	4,97	10,31	355	71,18	Verifica	5,0
4878	19,13	64,36	-178,4	318,5	-1,0	2,8	-2,1	0,3	318,51	2,83	2,10	0,00543	0,001759	3,11E-04	58,66	2,79	6,77	355	65,60	Verifica	5,4
4875	18,84	63,85	-171,3	318,9	-4,5	9,2	-0,5	0,8	318,89	9,16	0,83	0,00543	0,001759	3,11E-04	58,73	9,02	2,66	355	63,34	Verifica	5,6
4875	18,84	63,85	-171,5	294,0	-15,4	5,5	-0,5	0,8	293,98	15,37	0,83	0,00543	0,001759	3,11E-04	54,14	15,13	2,66	355	62,55	Verifica	5,7
4593	18,55	63,35	-162,0	300,3	-2,3	3,7	-1,5	1,0	300,29	3,70	1,50	0,00543	0,001759	3,11E-04	55,30	3,64	4,83	355	60,46	Verifica	5,9
4592	18,25	62,84	-150,5	269,2	-1,0	2,9	-0,8	1,0	269,17	2,94	1,03	0,00543	0,001759	3,11E-04	49,57	2,89	3,30	355	53,11	Verifica	6,7
4591	17,96	62,34	-137,6	231,8	-2,9	3,0	-0,4	1,3	231,79	2,97	1,30	0,00543	0,001759	3,11E-04	42,69	2,92	4,19	355	47,15	Verifica	7,5
4587	17,67	61,83	-124,4	222,4	-6,2	14,4	-0,6	3,6	222,37	14,41	3,56	0,00543	0,001759	3,11E-04	40,95	14,19	11,45	355	57,88	Verifica	6,1
4587	17,67	61,83	-123,9	224,4	-1,5	19,4	-0,6	3,6	224,38	19,45	3,56	0,00543	0,001759	3,11E-04	41,32	19,15	11,45	355	62,33	Verifica	5,7
4573	17,38	61,33	-109,6	175,7	-2,4	4,1	0,0	4,9	175,69	4,10	4,93	0,00543	0,001759	3,11E-04	32,35	4,04	15,87	355	48,73	Verifica	7,3
4572	17,09	60,82	-91,0	134,9	-1,9	5,6	-0,3	8,2	134,85	5,56	8,20	0,00543	0,001759	3,11E-04	24,83	5,48	26,35	355	52,06	Verifica	6,8
4571	16,80	60,32	-68,8	95,5	-3,4	2,7	-0,6	9,0	95,49	3,42	9,01	0,00543	0,001759	3,11E-04	17,59	3,37	28,98	355	46,94	Verifica	7,6
4577	16,50	59,81	-43,4	46,6	-41,9	4,0	0,0	0,0	46,62	41,90	0,00	0,00543	0,001759	3,11E-04	8,59	41,26	0,00	355	71,97	Verifica	4,9

Pregagem



Node	X [m]	Y [m]	N_min [kN/m]	N_max [kN/m]	Q_min [kN/m]	Q_max [kN/m]	M_min [kNm/m]	M_max [kNm/m]	<u>N</u> <u>absoluto</u> <u>(kN/m)</u>	<u>V</u> <u>absoluto</u> <u>(kN/m)</u>	<u>M</u> <u>absoluto</u> <u>(kN.m/m)</u>	Área (m²)	A <sub>v</sub> (m²)	W <sub>el</sub> (m³)	<u>N</u> <u>tensão</u> <u>(MPa)</u>	<u>V</u> <u>tensão</u> <u>(MPa)</u>	<u>M</u> <u>tensão</u> <u>(MPa)</u>	f <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>comp</sub> (MPa)	Condição	F.S
7051	44,38	54,13	0,0	55,8	-2,6	0,0	0,0	0,3	55,75	2,55	0,29	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	113,58	14,14	189,38	355	303,95	Verifica	1,2
6819	43,83	54,03	0,0	52,8	0,0	0,4	0,0	0,0	52,81	0,38	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	107,58	2,13	4,54	355	112,19	Verifica	3,2
6820	43,27	53,94	0,0	57,3	0,0	0,0	0,0	0,0	57,29	0,02	0,00	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	116,71	0,09	1,83	355	118,55	Verifica	3,0
6821	42,72	53,84	0,0	65,4	-0,4	0,0	0,0	0,0	65,37	0,40	0,00	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	133,16	2,20	1,26	355	134,48	Verifica	2,6
6825	42,17	53,74	0,0	73,5	0,0	2,4	0,0	0,3	73,46	2,43	0,26	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	149,66	13,49	171,15	355	321,66	Verifica	1,1
6825	42,17	53,74	0,0	88,6	-2,5	0,0	0,0	0,3	88,65	2,54	0,26	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	180,59	14,10	171,15	355	352,59	Verifica	1,0
6158	41,61	53,64	0,0	76,9	0,0	0,4	0,0	0,0	76,86	0,40	0,04	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	156,59	2,19	27,30	355	183,92	Verifica	1,9
6159	41,06	53,55	0,0	83,2	0,0	0,1	0,0	0,0	83,17	0,09	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	169,43	0,50	4,97	355	174,41	Verifica	2,0
6160	40,50	53,45	0,0	94,1	-0,4	0,0	0,0	0,0	94,15	0,39	0,03	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	191,79	2,15	17,98	355	209,81	Verifica	1,7
6157	39,95	53,35	0,0	99,8	0,0	2,0	0,0	0,2	99,81	2,03	0,20	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	203,34	11,23	133,14	355	337,04	Verifica	1,1
6157	39,95	53,35	0,0	105,8	-1,3	0,0	0,0	0,2	105,81	1,29	0,20	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	215,56	7,18	133,14	355	348,92	Verifica	1,0
6151	39,40	53,25	0,0	117,4	0,0	0,1	0,0	0,0	117,36	0,11	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	239,08	0,64	7,28	355	246,37	Verifica	1,4
6152	38,84	53,16	0,0	124,8	0,0	0,0	0,0	0,0	124,76	0,02	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	254,16	0,12	4,66	355	258,81	Verifica	1,4
6153	38,29	53,06	0,0	129,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	129,18	0,19	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	263,17	1,06	7,41	355	270,58	Verifica	1,3
6253	37,74	52,96	0,0	131,8	0,0	0,9	0,0	0,1	131,80	0,86	0,07	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	268,51	4,78	48,30	355	316,92	Verifica	1,1
6253	37,74	52,96	0,0	126,9	-0,5	0,0	0,0	0,1	126,89	0,48	0,07	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	258,49	2,67	48,30	355	306,83	Verifica	1,2



5994	37,18	52,86	0,0	121,8	0,0	0,0	0,0	0,0	121,78	0,03	0,01	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	248,09	0,17	4,76	355	252,85	Verifica	1,4
5995	36,63	52,77	0,0	103,2	0,0	0,0	0,0	0,0	103,19	0,02	0,00	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	210,22	0,11	2,65	355	212,88	Verifica	1,7
5996	36,07	52,67	0,0	80,8	-0,1	0,0	0,0	0,0	80,78	0,07	0,00	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	164,56	0,38	0,97	355	165,53	Verifica	2,1
5993	35,52	52,57	0,0	57,7	0,0	0,2	0,0	0,0	57,72	0,20	0,00	0,00049087	0,0003125	1,53E-06	117,58	1,12	0,00	355	117,60	Verifica	3,0