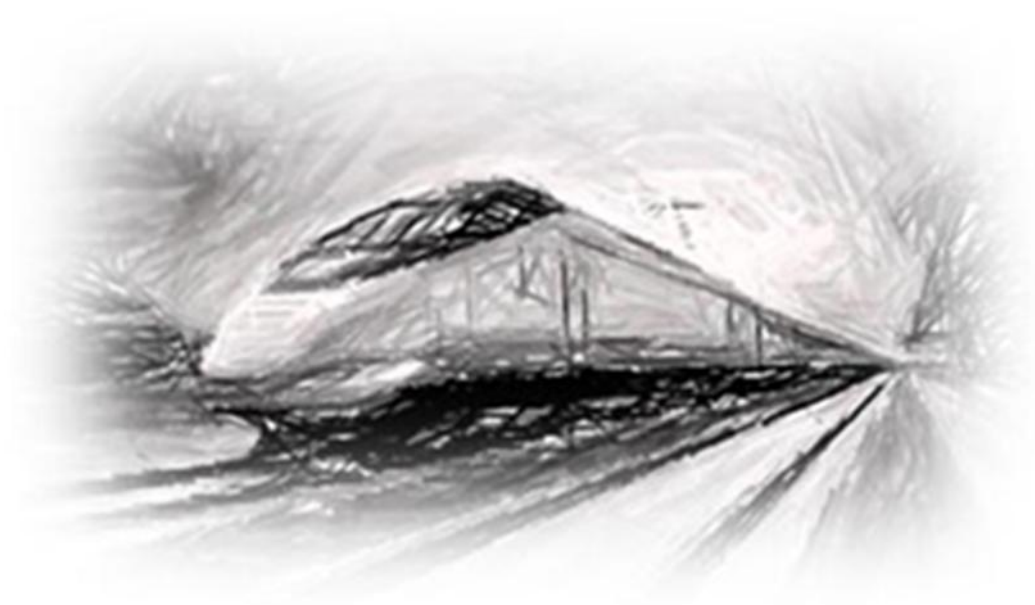


**LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE
PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA
TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ
SUBTROÇO A6 – LIGAÇÃO DE CANELAS**



**PROJETO DE EXECUÇÃO
V01 – INFRA-ESTRUTURA E PLATAFORMA DE VIA FÉRREA
Tomo 01.03.00.00 – ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DA
PLATAFORMA**

Memória descritiva e justificativa

LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENT00 PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA

**TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ
SUBTROÇO A6 – LIGAÇÃO À LN EM CANELAS**

PROJETO EXECUÇÃO

V01 – INFRA-ESTRUTURA E PLATAFORMA DE VIA-FÉRREA

TOMO 01.03.00.00 – ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DA PLATAFORMA

ÍNDICE DE PEÇAS ESCRITAS		
CÓDIGO DOCUMENTO	DATA	DESIGNAÇÃO
PF102A6.PR.01.03.00.00.IND.00	14.08.2025	ÍNDICE
PF102A6.PR.01.03.00.00.MDJ.00	14.08.2025	MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

ÍNDICE DE PEÇAS DESENHADAS			
CÓDIGO DOCUMENTO	DATA	DESIGNAÇÃO	Nº ORDEM
PF102A6.PR.01.03.00.00.101.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Consolidação de aterro existente (LN). Planta e Corte Tipo	EEP 101
PF102A6.PR.01.03.00.00.102.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Alargamento de aterro com reforço de fundação. Planta e Corte Tipo	EEP 102
PF102A6.PR.01.03.00.00.103.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Reforço de fundação. Aterro em linha de topo (VA). Planta e Corte Tipo	EEP 103
PF102A6.PR.01.03.00.00.104.00	14.08.2025	A4_1A - PK 5+330 A PK 5+392 – VA Planta e Corte Tipo	EEP 104
PF102A6.PR.01.03.00.00.105.00	14.08.2025	A5_1A - PK 5+979 A PK 6+010 – VA Planta e Corte Tipo	EEP 105
PF102A6.PR.01.03.00.00.106.00	14.08.2025	A6_1A - PK 6+775 A PK 6+813 VA Planta e Corte Tipo	EEP 106
PF102A6.PR.01.03.00.00.201.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Consolidação de aterro existente (LN). Planta e Corte Tipo	EEP 201
PF102A6.PR.01.03.00.00.202.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Alargamento de aterro com reforço de fundação. Planta e Corte Tipo	EEP 202
PF102A6.PR.01.03.00.00.203.00	14.08.2025	LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE Reforço de fundação. Aterro em linha de topo (VD). Planta e Corte Tipo	EEP 203
PF102A6.PR.01.03.00.00.204.00	14.08.2025	A5_1D - PK 5+914 A 5+951 - VD Planta e Corte Tipo	EEP 204
PF102A6.PR.01.03.00.00.205.00	14.08.2025	A6_1D - PK 6+691 A 6+825 – VD Planta e Corte Tipo	EEP 205
PF102A6.PR.01.03.00.00.206.00	14.08.2025	A7_1D - PK 7+416 a PK 7+521 Planta e Corte Tipo	EEP 206

Controlo de Assinaturas

Realizado	Revisto	Aprovado Coordenador Projeto
Pedro Antunes Mário Freire Helena Costa Teresa Santos	Pedro Antunes	Eduardo Mira Fernandes
14-08-2025	14-08-2025	14-08-2025
Data e Assinatura	Data e Assinatura	Data e Assinatura

Não necessita de assinatura se aprovado eletronicamente

Informação Adicional	Informação do Documento	
O Gestor de Projeto -	Código Documento PF102A6.PR.01.03.00.00.MDJ.00.docx	
O Responsável Unidade -	Revisão 00	Data 14-08-2025
O Responsável Departamento -	Código Projetista	
O Diretor -	Nome do Ficheiro PF102A6.PR.01.03.00.00.MDJ.00.docx	

Registo de Alterações

Rev	Data	Autor	Secção Afetada	Alterações
00	14-08-2025	Vários	Edição inicial	-----

LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA**TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ****SUBTROÇO A6 – LIGAÇÃO DE CANELAS****PROJETO DE EXECUÇÃO****V01 – INFRA-ESTRUTURA E PLATAFORMA DE VIA FÉRREA****TOMO 01.03.00.00 – ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DA PLATAFORMA****MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA****ÍNDICE**

1	INTRODUÇÃO	1
2	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	2
3	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	3
4	ATERROS.....	4
4.1	Solução de reforço ligação à linha do norte	5
4.1.1	Descrição do trecho em análise.....	5
4.1.2	Faseamento construtivo.....	8
4.1.3	Plano de Instrumentação e Observação	12
4.2	Solução de reforço A4_1A e A4_1D (PK 5+330 a PK 5+392)	12
4.2.1	Descrição do trecho em análise.....	12
4.2.2	Solução de reforço proposta.....	19
4.2.3	Faseamento construtivo.....	20
4.2.4	Plano de Instrumentação e Observação	21
4.3	Solução de reforço A5_1A e A5_1D (PK 5+979 a PK 6+010 / PK 5+914 a 5+951 – VA/VD)	23
4.3.1	Descrição do trecho em análise.....	23
4.3.2	Solução de reforço proposta.....	27
4.3.3	Faseamento construtivo.....	29
4.3.4	Plano de Instrumentação e Observação	30
4.4	Solução de reforço A6_1A e A6_1D (PK 6+775 a PK 6+813 / PK 6+691 a 6+825 – VA/VD)	31
4.4.1	Descrição do trecho em análise.....	31
4.4.2	Solução de reforço proposta.....	38
4.4.3	Faseamento construtivo.....	39
4.4.4	Plano de Instrumentação e Observação	40

4.5	Solução de reforço A7_1D (PK 7+416 a PK 7+521)	42
4.5.1	Descrição do trecho em análise.....	42
4.5.2	Solução de reforço proposta.....	45
4.5.3	Faseamento construtivo.....	46
4.5.4	Plano de Instrumentação e Observação	47
5	VERIFICAÇÃO DE ASSENTAMENTOS EM ATERROS TIPO DE GRANDE ALTURA	49
5.1	Estados Limites de Utilização (Assentamentos)	49
5.1.1	Cálculo dos assentamentos imediatos (s_i).....	49
5.1.2	Cálculo dos assentamentos por consolidação primária (s_c).....	50
5.1.3	Cálculo dos assentamentos por consolidação secundária (fluência) (s_d).....	51
5.2	Modelos Numéricos	51
5.2.1	Aterros $H \leq 10,0m$	52
5.2.2	Aterros $H \leq 15,0m$	56
5.2.3	Aterros $H \leq 20,0m$	61
5.2.4	Discussão de Resultados	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do aterro até ao Pk 0+000 da ligação da L.N. com L.C. sobre ortofotomapa, incluindo as novas linhas de topo	5
Figura 2 - Representação do aterro do PK 0+000 até ao PK 0+285 no viaduto ASC e PK 0+400 no viaduto DES sobre ortofotomapa.	6
Figura 3 - Representação do aterro até ao Pk 0+000 da ligação da L.N. sobre cartografia geológica à escala 1:1.000, incluindo as novas linhas de topo	6
Figura 4 - Representação do aterro do PK 0+000 até ao PK 0+285 no viaduto ASC e Pk 0+400 no viaduto DES sobre cartografia geológica à escala 1:1.000.	6
Figura 5 – Representação do aterro entre os PK 4+467 e 5+461 (LC VA) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15 m$)	13
Figura 6 - Representação do aterro entre os PK 4+467 e 5+461 (LC VA) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15 m$)	13
Figura 7 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	14
Figura 8 – Localização esquemática dos empréstimos na linha mais próximos do aterro em análise (1/2)	18
Figura 9 – Localização esquemática dos empréstimos na linha mais próximos do aterro em análise (2/2)	18
Figura 10 – Representação dos aterros entre os PK 5+900 e 6+079 (LC VA) e entre os PK 5+451 e 6+035 (LC VD) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15 m$)	23
Figura 11 - Representação do aterro entre os PK 5+900 e 6+079 (LC VA) e entre os PK 5+451 e 6+035 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15 m$)	24

Figura 12 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	24
Figura 13 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	25
Figura 14 – Representação do aterro entre os PK 6+671 e 6+861 (LC VA) e entre os PK 6+691 e 6+825 (LC VD) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)	32
Figura 15 - Representação do aterro entre os PK 6+671 e 6+861 (LC VA) e entre os PK 6+691 e 6+825 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)	33
Figura 16 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	34
Figura 17 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	35
Figura 18 - Detalhe da presença de linhas de água secundárias na fundação dos aterros previstos	36
Figura 19 – Representação do aterro entre os PK 7+377 e 7+732 (LC VD) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)	42
Figura 20 Representação do aterro entre os PK 7+377 e 7+732 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)	43
Figura 21 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).	43
Figura 22 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase6)	54
Figura 23 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 6)	54
Figura 24 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 6)	55
Figura 25 – Aterro $H \leq 10,0$ - Gráfico dos assentamentos em função do tempo	55
Figura 26 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase7)	58
Figura 27 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Sem Reforço	58
Figura 28 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Sem Reforço	59
Figura 29 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Com Reforço	59
Figura 30 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Com Reforço	60
Figura 31 – Aterro $H \leq 15,0$ - Gráfico dos assentamentos em função do tempo	60
Figura 32 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase8)	63
Figura 33 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Sem Reforço	63
Figura 34 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Sem Reforço	64
Figura 35 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Com Reforço	64
Figura 36 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Com Reforço	65
Figura 37 – Aterro $H \leq 20,0$ - Gráfico dos assentamentos em função do tempo	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros geotécnicos para materiais terrosos.	3
Quadro 2 - Parâmetros geotécnicos para materiais rochosos.	3
Quadro 3 - Solução de reforço detalhada entre os PK 5+330 - PK 5+392 – VA	20
Quadro 4 - Solução de reforço detalhada entre os PK 5+979 - PK 6+010 / PK 5+914 a 5+951 – VA/VD	29
Quadro 5 - Solução de reforço detalhada entre os PK 6+775 - PK 6+813 / PK 6+691 a 6+825 – VA/VD	39
Quadro 6 - Solução de reforço detalhada entre os PK 7+416 - PK 7+521 – VD	46
Quadro 7 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos	53

Quadro 8 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS	53
Quadro 9 – Aterro $H \leq 10,0$ – Taxas de Deformação	56
Quadro 10 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos.....	57
Quadro 11 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS	57
Quadro 12 – Aterro $H \leq 15,0$ – Taxas de Deformação	61
Quadro 13 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos.....	62
Quadro 14 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS	62
Quadro 15 – Aterro $H \leq 20,0$ – Taxas de Deformação	66

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo é parte integrante da Ligação Ferroviária de Alta Velocidade entre o Porto e Lisboa.

O troço em desenvolvimento denominado como Lote A, tem uma extensão aproximada de 70km, e situa-se entre o Porto (Campanhã) e Aveiro (Oiã), tendo sido subdividido em 6 zonas:

- Subtroço A1 – km 0+000 ao km 15+500
- Subtroço A2 – km 15+500 ao km 33+200
- Subtroço A3 – km 33+200 ao km 49+900
- Subtroço A4 – km 49+900 ao km 70+225
- Subtroço A5 – Estação da Campanhã
- **Subtroço A6 – Ligação à Linha do Norte em Canelas**

O presente documento diz respeito ao projeto de execução das Estruturas de Proteção e Estabilização da Plataforma, referente ao Subtroço A6 ligação à Linha do Norte em Canelas. Este projeto tem por base o estudo de Plataforma da Via / Terraplenagens, que é parte integrante deste projeto e que pode ser consultado no Tomo 1.1.

Além desta memória descritiva e justificativa, integram o presente estudo, um conjunto de peças desenhadas, constituídas por plantas e perfis transversais tipo das soluções adotadas.

2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O enquadramento geológico-geotécnico do sublte interessado nesta memória descritiva e justificativa (assim como a caracterização geotécnica dos materiais a intersetar) poderá ser consultado no Tomo 1.7 do presente volume.

3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros geotécnicos dos materiais interessados nas zonas de intervenção definidas neste documento foram definidos no âmbito do enquadramento geológico-geotécnico da ligação à Linha do Norte, que poderão ser consultados no tomo 1.7 do presente volume.

Por forma a facilitar a consulta do documento, os referidos parâmetros são transcritos nos quadros seguintes.

Quadro 1 - Parâmetros geotécnicos para materiais terrosos.

Descrição	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	c_u (kPa)	E (MPa)
Aterros	16 - 20	25 - 28	0 - 5	-	10 - 20
Aluviões (Al), areias	14 - 18	29 - 34	0	-	10 - 20
Aluviões (Al), argilas	16 - 19	20 - 25	0 - 2	15 - 100	5 - 10
Aluviões – Esteiro de Canelas	14 - 16	18 - 24	0 - 2	10 - 20	0,5 - 2
Depósitos de Terraço (Q)	18 - 21	28 - 33	5 - 10	-	15 - 30
Unidade de Arada (X) (W5 a W4, F4-5)	19 - 22	30 - 35	20 - 60	-	50 - 100

Quadro 2 - Parâmetros geotécnicos para materiais rochosos.

Descrição	γ (kN/m ³)	Parâmetros de rotura de Hoek-Brown							E (MPa)
		σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	D	mb	s	a	
Unidade de Arada (X) (W4 a W3, F4 ou melhor)	21 - 24	5 - 25	20 - 35	5 - 10	0,7	25 - 50	9,22 x 10 ⁻⁶ - 8,11 x 10 ⁻⁵	0,544 - 0,516	150 - 300
Unidade de Arada (X) (W3-2, F3)	22 - 25	25 - 50	30 - 40			50 - 100	3,93 x 10 ⁻⁵ - 1,67 x 10 ⁻⁴	0,522 - 0,511	

4 ATERROS

Considerando as características dos materiais a utilizar nos aterros, os condicionamentos de ocupação do solo, as alturas de aterro, a disponibilidade de material adequado e a integração paisagística, considera-se genericamente uma inclinação de 1/2 (V/H) para os taludes de aterro.

Em taludes com altura superior a 10 metros, preconiza-se ainda a execução de uma estabilizadora intermédia, com 3,0 metros de largura e posicionada 10 metros abaixo da rasante, que permitirá diminuir a inclinação média e o percurso de escorrência de águas superficiais, que serão captadas por valetas de banqueta.

A inclinação relativamente baixa dos taludes, assim como a adoção de espaldares reforçados em solo-cimento ou ABGE previstos nos trechos de aterros altos ($H_{\text{eixo}} > 15$ m), contribuem favoravelmente para a estabilidade.

As inclinações estabelecidas para os taludes são compatíveis com o revestimento de terra vegetal, devendo este ser aplicado nos taludes, conjuntamente com vegetação autóctone, de modo a prevenir a erosão provocada pela escorrência de água superficial sobre a face. A espessura da camada de terra vegetal deverá ser de 0,15 m.

Apresenta-se, no presente capítulo, a listagem dos aterros no subtroço A6 que atingem altura máxima ao eixo superior a 15 m.

- PK 4+467 – 5+461 (LC VA)
- PK 5+900 – 6+079 (LC VA) + PK 5+451 – 6+035 (LC VD);
- PK 6+671 – 6+861 (LC VA) + PK 6+691 – 6+825 (LC VD)
- PK 7+377 – 7+731 (LC VD);

Notar que os PK indicados na listagem apresentada indicam toda a extensão do aterro, sendo as extensões mais críticas ($h > 15$ m) subtrechos dos trechos indicados.

No subtroço ST6, além dos aterros altos acima mencionados, é de elevada importância analisar o arranque da Ligação de Canelas, no ponto em que se dá a transição para a Linha do Norte, zona essa onde, apesar de os aterros previstos não possuírem alturas significativas, ocorrem solos muito moles ao nível da fundação com possanças superiores a 20 m.

Nos subcapítulos seguintes descreve-se cada uma das situações acima elencadas, no que se refere ao seu enquadramento geológico e geomorfológico, à caracterização geotécnica disponível ao nível das condições de fundação do aterro e ainda a definição das soluções de reforço.

4.1 SOLUÇÃO DE REFORÇO LIGAÇÃO À LINHA DO NORTE

4.1.1 Descrição do trecho em análise

4.1.1.1 Descrição Geral

Nas Figuras 1 a 4 apresentam-se os aterros da Linha do Norte até ao PK 0+000 (ou seja, que antecedem o início da Ligação de Canelas), bem como os troços em aterro localizados entre os PK 0+000 e PK 0+285 da Via Ascendente (VA) e entre os PK 0+000 e PK 0+400 da Via Descendente (VD), no âmbito da Ligação de Canelas. Estes aterros desenvolvem-se sobre solos moles de origem aluvionar, com resistência ao corte muito reduzida e elevada deformabilidade, o que condiciona o seu desempenho estrutural. Adicionalmente, importa referir o potencial de assentamentos diferenciais, uma vez que a Linha do Norte se encontra já consolidada, enquanto os novos aterros da VA e VD serão construídos sobre solos ainda não consolidados. As situações referidas encontram-se representadas em plantas sobre ortofotomapa e em plantas com base na cartografia geológica à escala 1:1.000.

As vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas arrancam de forma paralela à Linha do Norte, estando esta posicionada no centro e as vias ascendente e descendente nas laterais, sendo que a sua implantação irá requerer o alargamento localizado do aterro existente da Linha do Norte, até aos encontros dos viadutos de Canelas.

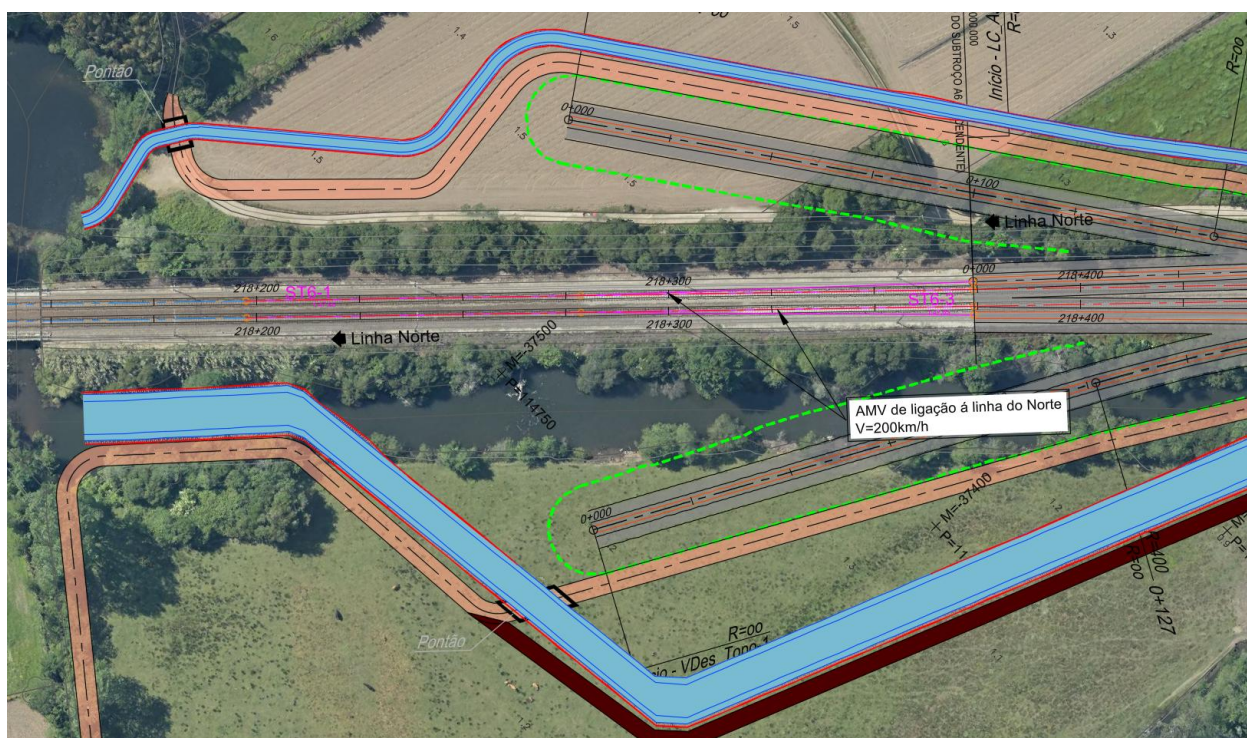


Figura 1 - Representação do aterro até ao Pk 0+000 da ligação da L.N. com L.C. sobre ortofotomapa, incluindo as novas linhas de topo

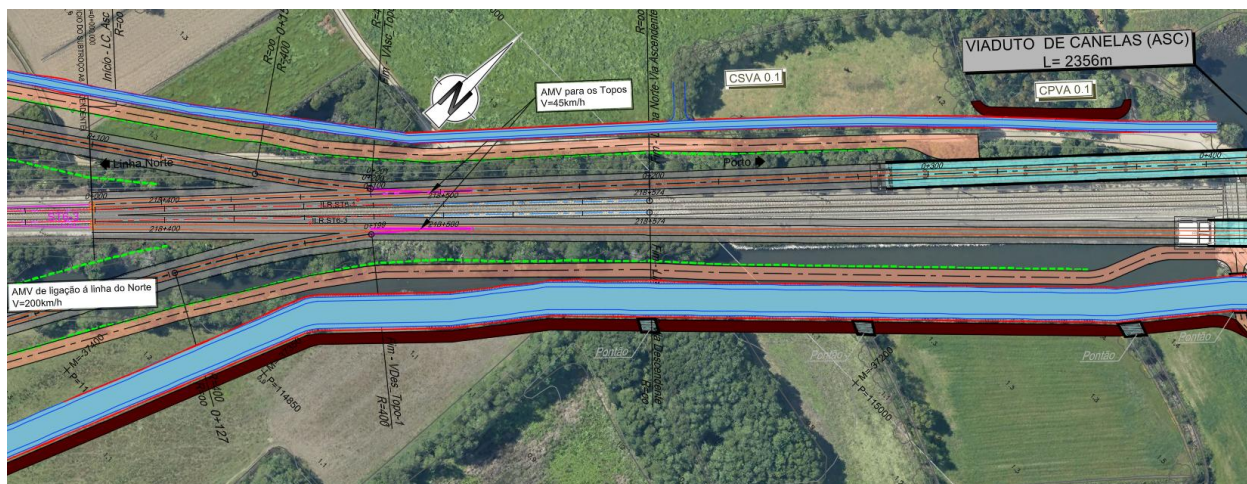


Figura 2 - Representação do aterro do PK 0+000 até ao PK 0+285 no viaduto ASC e PK 0+400 no viaduto DES sobre ortofotomapa.

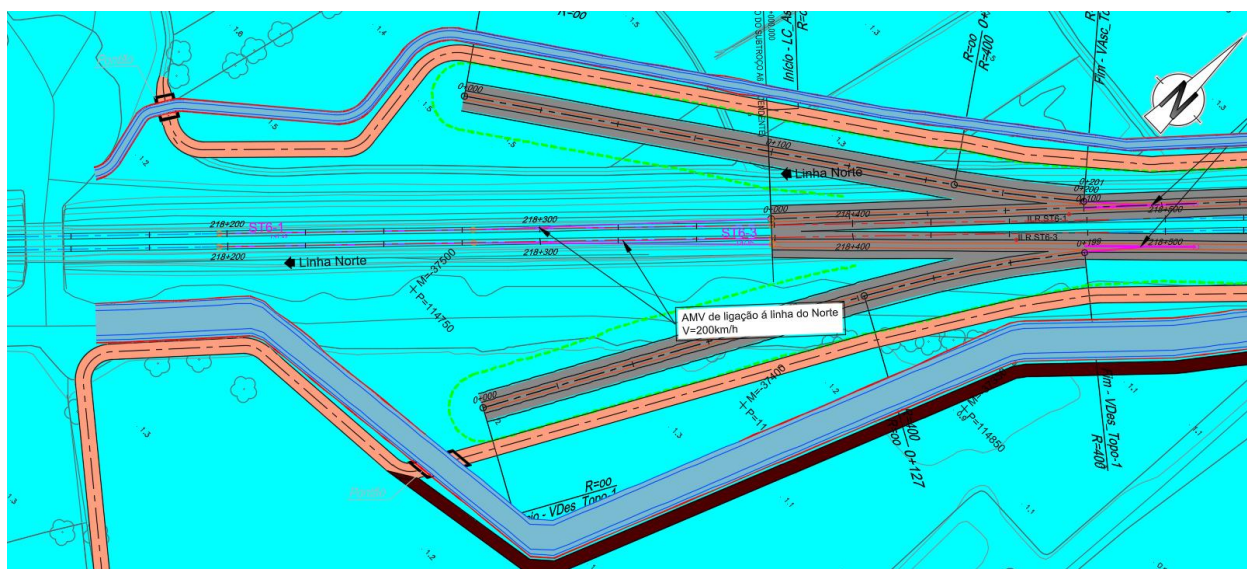


Figura 3 - Representação do aterro até ao Pk 0+000 da ligação da L.N. sobre cartografia geológica à escala 1:1.000, incluindo as novas linhas de topo.

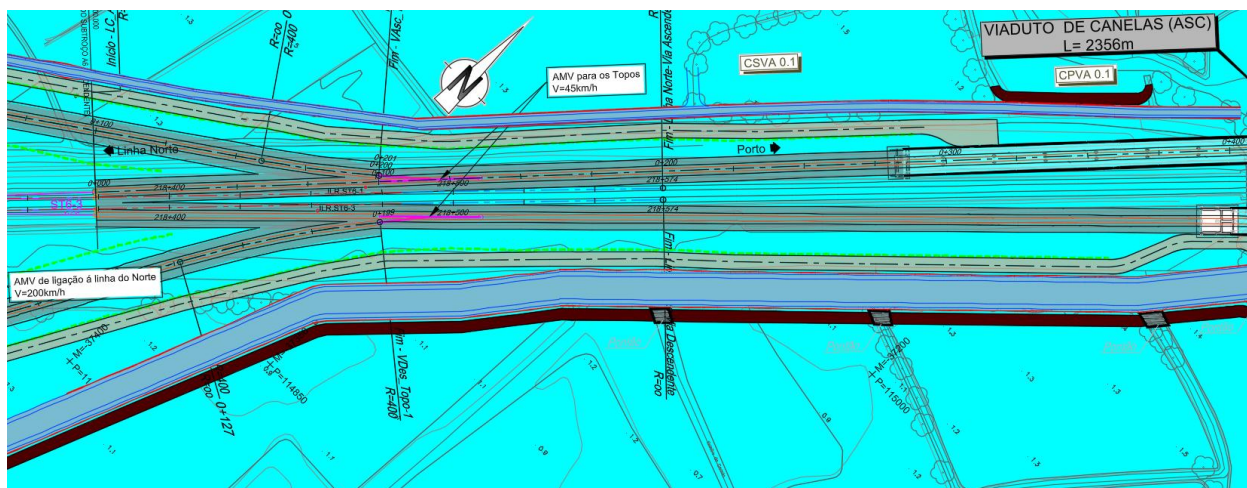


Figura 4 - Representação do aterro do PK 0+000 até ao PK 0+285 no viaduto ASC e PK 0+400 no viaduto DES sobre cartografia geológica à escala 1:1.000.

4.1.1.2 Considerações Geológicas e geotécnicas

Ao longo do ST A6, as aluviões ocorrem em dois contextos: i) em associação com linhas de água muito encaixadas, entalhadas nos Xistos de Arada, apresentando, nestes casos, possança e desenvolvimento pouco significativos e; ii) no Esteiro de Canelas, onde ocorrem com largo desenvolvimento e em associação com o sistema do Baixo Vouga Lagunar / Ria de Aveiro, onde a possança pode ser muito significativa (tendo-se detetado uma espessura máxima de 26,7 m – sondagem S068A-23).

Numa análise mais aprofundada das aluviões, importa realçar as aluviões no Esteiro de Canelas, que serão interseccionadas entre os km 0+000 e 2+543 da via ascendente e entre os km 0+000 e 2+445 da via descendente. Estas aluviões encontram-se caracterizadas pelas sondagens S068A-23, S069A-23 e S070A-23 e pelos ensaios DPSH DPSH029A-23 e DPSH030A-23, executados na fase de atualização do Estudo Prévio (2023).

Os elementos de prospeção referidos revelam que as aluviões são constituídas por areias de grão fino, siltosas a lodosas, siltes argilo-lodosos e argilas lodosas, quase sempre caracterizadas por valores de NSPT compreendidos entre 0 e 1. Foi ainda detetado um nível de cascalheira na base destas aluviões, nas sondagens S068A-23 e S069A-23, o qual é caracterizado, maioritariamente, por valores NSPT ≥ 60 .

Subjacentemente às aluviões observou-se, em todas as sondagens analisadas, a presença da Unidade de Arada, a qual foi reconhecida, nas sondagens S068A-23 e S069A-23 na forma de um maciço grauvacóide muito alterado a um solo residual silto-argiloso com fragmentos rochosos. Na sondagem S070A-23, a Unidade de Arada foi detetada na forma de xistos, com frequentes filonetes quartzíticos, de cor cinzenta, muito a medianamente alterados (W4-3) e extremamente fraturados (F5-4). O maciço apresenta-se muito a medianamente alterado (W4-3) e extremamente fraturado (F5-4), ocorrendo passagens decompostas onde toma a forma de um solo argilo-siltoso rijo.

Por fim, a respeito da caracterização das aluviões situadas no Esteiro de Canelas, indicam-se os DPSH029A-23 e DPSH030A-23, executados entre a sondagem S070A-23 e o término das aluviões. De acordo com a interpretação destes ensaios, considera-se que, nos pontos ensaiados, as aluviões possuam espessura de 4,2 a 8,4 m, pese embora também deva ser considerada a possibilidade de a “nega” ter sido atingida num nível de cascalheira de base e não na base das aluviões. Tal como as sondagens, os DPSH revelam que as aluviões são muito moles, embora não tanto como o revelado pelos ensaios SPT efetuados nas sondagens descritas anteriormente.

4.1.1.3 Caracterização da fundação do aterro

O arranque da Ligação de Canelas corresponde ao trecho que se inicia com o local onde se prevê a instalação do AMV na atual LN e que se desenvolve até se concretizar a transição da solução de terraplenagem para uma solução estrutural (os Viadutos de Canelas). Este trecho situa-se, aproximadamente, entre o km 0-095 e o km 0+285 da VA e 0-095 e 0+400 da VD, constituindo uma situação condicionante visto que prevê a execução de aterros novos sobre aluviões muito moles de elevada possança, incluindo as novas linhas de topo.

Neste sentido, refere-se à caracterização geotécnica apresentada anteriormente a respeito das aluviões. No arranque da Ligação de Canelas, destacam-se os dados da sondagem S068A-23, a qual atravessou aluviões numa espessura total de 26,7 m, dos quais 22,2 correspondem a uma camada

compressível que compreende intercalações de areias finas lodosas com siltes argilo-lodosos. Atendendo ao contexto geomorfológico em que se inserem estas aluviões (Baixo Vouga Lagunar), estas deverão encontrar-se permanentemente saturadas durante a execução da obra e do período de exploração da via.

Conforme já referido, os trabalhos de terraplenagem a executar neste trecho implicam o alargamento da LN (existente). Atendendo às características extremamente débeis do terreno de fundação (até profundidades superiores a 20 m), o alargamento dos aterros desencadeará fenómenos de assentamentos diferenciais diferidos no tempo, já que o aterro novo irá induzir assentamentos imediatos e por consolidação do terreno “virgem”, enquanto as aluviões sob a Linha do Norte encontram-se já fortemente consolidadas. Além dos problemas de deformabilidade, refere-se a baixa resistência ao corte destes materiais, a qual poderá exigir uma execução faseada dos aterros, cuja evolução ficará dependente do acréscimo de resistência ao corte não drenada dos materiais de fundação.

Importa referir que a execução das vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas deverão ser realizadas de modo a não afetar a geometria das vias existentes (LN).

4.1.2 Faseamento construtivo

No que respeita ao processo construtivo previsto para esta intervenção, os trabalhos serão realizados durante períodos de interdição programados (noturnos), de forma a minimizar o impacto na circulação ferroviária da Linha do Norte. As operações decorrerão com a superestrutura ferroviária existente mantida no local, sem necessidade de remoção dos carris e travessas.

Estas intervenções deverão ser executadas com equipamentos mecânicos adequados, garantindo a salvaguarda dos elementos da infraestrutura ferroviária e assegurando a estabilidade dos taludes adjacentes. O tratamento da plataforma com recurso à tecnologia Mini-jet será exclusivo para a Linha do Norte, constituindo uma fase inicial essencial para a preparação da plataforma de trabalho que antecede as duas soluções de intervenção previstas no projeto.

- Na Linha do Norte, entre os PK 0-187 e PK 0-095 (referenciados ao eixo da Ligação de Canelas - VA), será realizada a consolidação do aterro existente através de injeção rotativa a baixa pressão, com ligante (Mini-jet);
- Entre os PK 0-095 e 0+150 serão realizados dois tratamentos:
 - Consolidação do aterro existente da LN, conforme exposto no parágrafo anterior;
 - Alargamento do aterro existente, de modo a acomodar as vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas, sendo a fundação reforçada com plataformas de transferência de carga (PTC) apoiadas em inclusões rígidas;
- Na Via Ascendente (PK 0+150 a PK 0+285) e na Via Descendente (PK 0+150 a PK 0+400), proceder-se-á ao alargamento do aterro existente com reforço de fundação/plataforma de transferência de carga (PTC) apoiada em “inclusões rígidas”.
- Nas linhas de topo, as quais desenvolver-se-ão em perfil de aterro, o qual estará fundado em terrenos aluvionares não consolidados, prevê-se o reforço da fundação com recurso a uma plataforma de transferência de carga apoiada em “inclusões rígidas”.

Cada uma destas soluções apresenta um faseamento construtivo próprio e deve obedecer ao estipulado no Caderno de Encargos da Obra.

Consolidação de aterro existente da LN com "Mini-Jet" (entre o PK 0-187 ao PK 0-095)

No que se refere ao processo construtivo, a execução do tratamento de solos recorrendo à injeção rotativa a baixa pressão com ligante, do tipo Mini-jet, deverá respeitar o "Procedimento operacional" Para o tratamento de solos recorrendo a injeção rotativa de ligantes – Mini-jet" da MOTA-Engil. Contudo, importa salientar os seguintes aspetos relevantes para garantir a qualidade e uniformidade do processo:

Deverá ser executado previamente um trecho experimental, com o objetivo de aferir os parâmetros de injeção, composição e volume da calda, penetração no solo e geometria das colunas. Estes trechos servirão ainda para a definição da malha de tratamento bem como calibrar o processo de controlo de qualidade que será aplicado na avaliação final do tratamento;

No tratamento por injeção rotativa e ascendente de calda de cimento (Mini-Jet), segundo a malha de tratamento definida, cumprindo os parâmetros de injeção e composição da calda definida no trecho experimental. Este tratamento será segundo uma malha regular de furos a definir pelo projetista e após a análise dos resultados do campo experimental, que irá fornecer a informação necessária à definição da geometria de tratamento.

Tendo como base esta fase preliminar, a execução do tratamento com Mini-jet deverá obedecer às seguintes etapas sequenciais, por cada coluna a executar:

- Numa primeira fase, e de modo a aceder, em profundidade, aos solos a tratar, serão realizados furos verticais à rotação, destrutivos de diâmetro de 90-110mm, sem recolha de amostra. A verticalidade será confirmada através de níveis colocados na torre do equipamento de perfuração em dois planos perpendiculares.
- Após a perfuração, será introduzido um tubo de revestimento (negativo do furo), que servirá para proteger a camada superior e evitar a contaminação do balastro existente. Só depois de instalado este tubo se iniciará a injeção da calda, que decorrerá até atingir o topo da camada de sub-balastro. O posicionamento dos furos deve respeitar a malha de injeção definida e o seu posicionamento em obra deve ser rigoroso, com recurso a apoio topográfico.
- Numa segunda fase, consiste na injeção de calda de cimento cujo a composição será determinada após os testes experimentais, a pressões que não excederão os 200Bar, de modo ascendente controlando a velocidade de rotação e velocidade ascensão, de modo a conseguir a injeção de colunas com a geometria e quantidade de ligante pretendidas.
- A calda de cimento (com ou sem aditivos) deve ser preparada localmente, garantindo-se uma proporção água/cimento adequada (variar 1:1 até 2:1, A/C), bem como a sua homogeneidade. A composição a utilizar em obra será definida após os resultados a realizar no trecho experimental.
- Perfuração do solo com equipamento rotativo até à cota de projeto, inicia-se a injeção, através de bombagem da calda de cimento preparada, iniciando o processo da base para o topo da seção a tratar.

- Durante ascensão, serão controlados os parâmetros de injeção, destacando a pressão, rotação e a velocidade de ascensão de modo a produzir as colunas pretendidas.
- Terminada a injeção, procede-se ao fecho recorrendo a calda de cimento.

No troço compreendido entre o PK 0+095 e o PK 0+150, o processo construtivo prevê a conjugação da técnica de injeção rotativa a baixa pressão com ligante (Mini-Jet) com a execução de estacas, de forma a reforçar a estabilidade e capacidade resistente do aterro nesta zona.

A execução do Mini-Jet será realizada conforme o procedimento anteriormente descrito, assegurando a melhoria das características do solo mediante a injeção controlada de calda de cimento, de acordo com os parâmetros definidos no trecho experimental.

Em simultâneo, serão executadas estacas, conforme descrito no parágrafo seguinte, através de perfuração vertical, betonagem in situ com betão simples (não armado) e construção dos respetivos capitéis, garantindo a rigidez e a correta distribuição dos esforços ao reforço do aterro.

Alargamento do aterro existente da LN com reforço de fundação (PK 0+000 a PK 0+285 / PK 0+000 a PK 0+400 – VAVD)

No que se refere ao processo construtivo, a execução do alargamento do aterro existente, deverá cumprir o estabelecido no projeto de execução. Os trabalhos serão desenvolvidos de forma faseada, alternando-se entre as vias ascendente e descendente, segundo a seguinte sequência

1. A execução de uma parede de Berlim provisória, iniciando-se com a perfuração e execução das microestacas verticais, injetadas com calda de cimento, seguidas da escavação faseada, com colocação de painéis entre microestacas para contenção do solo e instalação de tirantes provisórios, garantindo a estabilidade da escavação;
2. Enchimento do canal, adjacente ao aterro existente do lado da Via Descendente com brita, leca ou areia limpa, sobre manta geotêxtil, assim como outros canais ou valas adjacentes no alcance dos aterros..
3. Escavação parcial do aterro existente, em degraus, remoção controlada do solo até à cota definida em projeto, garantindo a segurança das estruturas adjacentes.
4. Execução das estacas não armadas “inclusões rígidas”, por perfuração vertical e posterior betonagem in situ com betão simples (sem armadura), respeitando os diâmetros, profundidades e espaçamentos definidos no projeto de fundações;
5. Construção dos capitéis, consistindo na execução de blocos de coroamento moldados in situ sobre as cabeças das estacas, garantindo a solidarização e distribuição de esforços entre estacas;
6. Execução da primeira plataforma de transferência de carga (ao nível do terreno natural), com aplicação de camadas de material de ABGE, intercaladas com dois níveis de geogrelhas de reforço, assegurando a redistribuição eficaz das cargas verticais para os elementos de fundação;

7. Execução do novo aterro, em materiais tipo QS2, por camadas de material selecionado, com compactação adequada, até atingir o nível da segunda plataforma de transferência de carga, acompanhando com a execução do aterro de enchimento no contacto com o aterro original da LN;
8. Execução da segunda plataforma de transferência de carga, com aplicação de camadas de material de ABGE, intercaladas com dois níveis de geogrelhas de reforço (assegurando a redistribuição eficaz das cargas verticais para os elementos de fundação), em simultâneo com o aterro adjacente em materiais tipo QS2;
9. Remoção progressiva da contenção provisória assim que o aterro atinja o nível dos tirantes, procedendo-se ao desmantelamento da parede de Berlim e à selagem dos furos dos tirantes com calda de cimento de forma a garantir a estabilidade;
10. Continuação da execução do aterro, em materiais tipo QS2, por camadas até ao nível final da via ascendente e via descendentes da Ligação de Canelas;
11. Montagem das novas linhas, nas vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas (incluindo carris, travessas e balastro), conforme o traçado e características técnicas definidas em projeto.

No que se refere ao processo construtivo específico a considerar para os aterros nas linhas de topo, deverá ser atendido o seguinte:

1. Preparação do terreno existente, incluindo o enchimento de quaisquer canais e valas que sejam intersetados pelos aterros das linhas de topo, ou que lhe estejam posicionadas adjacente, com recurso a brita, leca ou areia limpa, sobre manta geotêxtil;
2. Execução das estacas não armadas “inclusões rígidas”, por perfuração vertical e posterior betonagem *in situ* com betão simples (sem armadura), respeitando os diâmetros, profundidades e espaçamentos definidos no projeto de fundações;
3. Construção dos capitéis, consistindo na execução de blocos de coroamento moldados *in situ* sobre as cabeças das estacas, garantindo a solidarização e distribuição de esforços entre estacas;
4. Execução de plataforma de transferência de carga (ao nível do terreno natural), com aplicação de camadas de material de ABGE, intercaladas com dois níveis de geogrelhas de reforço, assegurando a redistribuição eficaz das cargas verticais para os elementos de fundação;
5. Execução do aterro, em materiais tipo QS2, por camadas de material selecionado, com compactação adequada, até à cota final;
6. Execução dos maciços de topo;
7. Execução da superestrutura ferroviária das linhas de topo, nas vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas (incluindo carris, travessas e balastro), conforme o traçado e características técnicas definidas em projeto.

4.1.3 Plano de Instrumentação e Observação

O plano de Instrumentação e Observação permitirá avaliar o desempenho das estruturas durante as fases construtiva e de exploração, mediante o reconhecimento de critérios de alerta, traduzindo diferentes níveis de gravidade, suscitados por medições anómalas das grandezas monitorizadas, os quais poderão indiciar a necessidade de intervenções com vista a garantir a segurança e a economia das Obras em causa.

Este Plano foi concebido com base nos condicionamentos próprios da Obra, atendendo aos riscos a eles associados.

Por forma a caracterizar o comportamento das estruturas, no que se refere às suas deformações internas e superficiais, o Plano de Instrumentação e Observação contempla a instalação de dispositivos de observação e de instrumentação, a saber:

- Marcas topográficas, para medição das grandezas deslocamento horizontal e deslocamento vertical, na superfície dos aterros;
- Extensómetros, para medição da grandeza deslocamento vertical, no interior dos aterros;
- Inclínómetros, para medição da grandeza deslocamento horizontal, no interior dos aterros.

Os dispositivos de observação previstos serão instalados nos coroamentos e nas saias dos aterros, de acordo com o descritivo seguinte e representado nas peças desenhadas do projeto.

- Coroamento: Marcas topográficas;
- Aterro e respetivo pé: Marcas topográficas, Extensómetros, Inclínómetros e placas de assentamento.

4.2 SOLUÇÃO DE REFORÇO A4_1A E A4_1D (PK 5+330 A PK 5+392)

4.2.1 Descrição do trecho em análise

4.2.1.1 Descrição Geral

Nas figuras 5, 6 e 7 e apresentam-se excertos do aterro situado entre os PK 4+467 e 5+461 da Via Ascendente (VA), da Ligação de Canelas, com particular para ênfase para a extensão crítica do aterro (onde heixo > 15 m), em planta sobre ortofotomapa, em planta sobre a cartografia geológica à escala 1:1.000 e em perfil longitudinal.

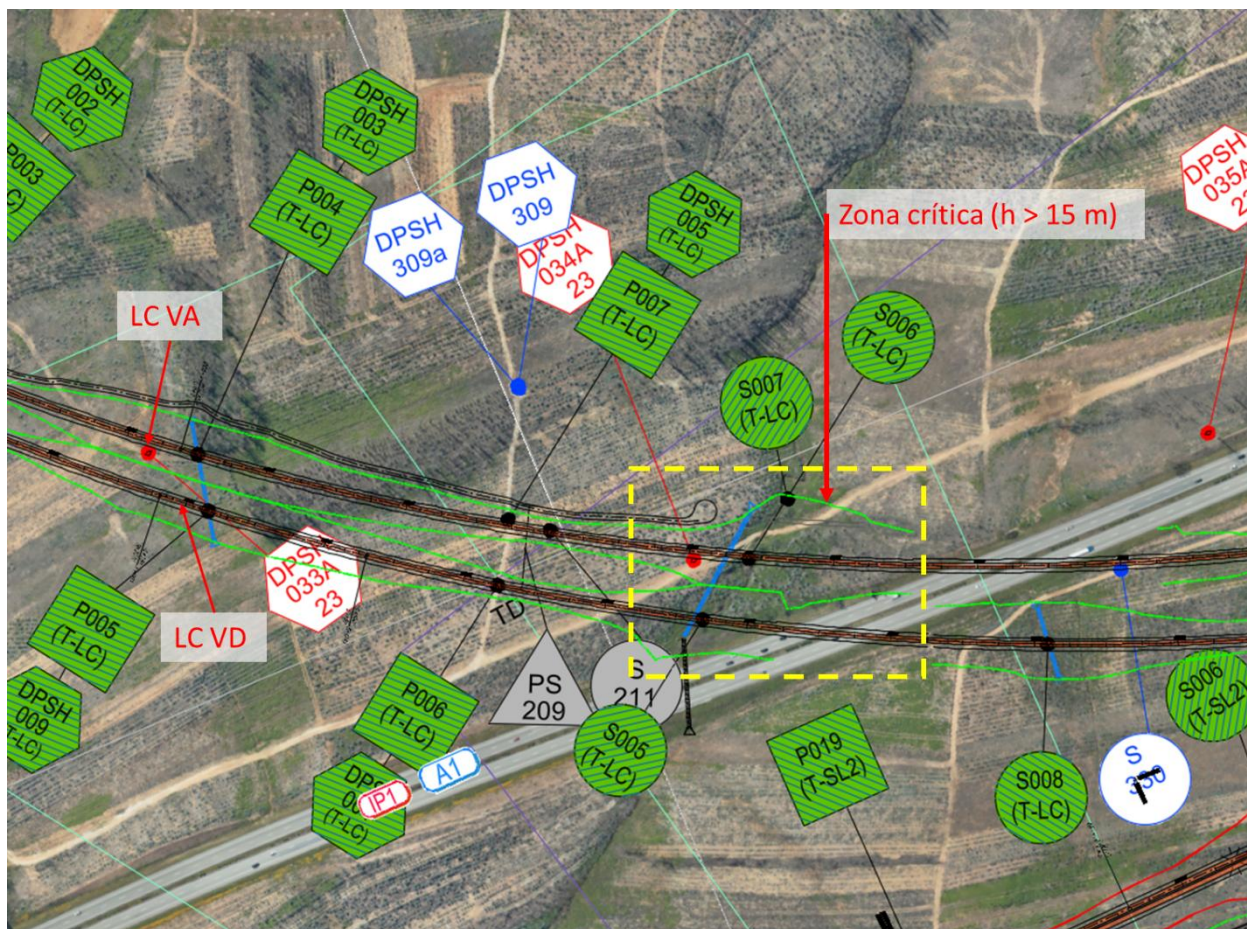


Figura 5 – Representação do aterro entre os PK 4+467 e 5+461 (LC VA) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

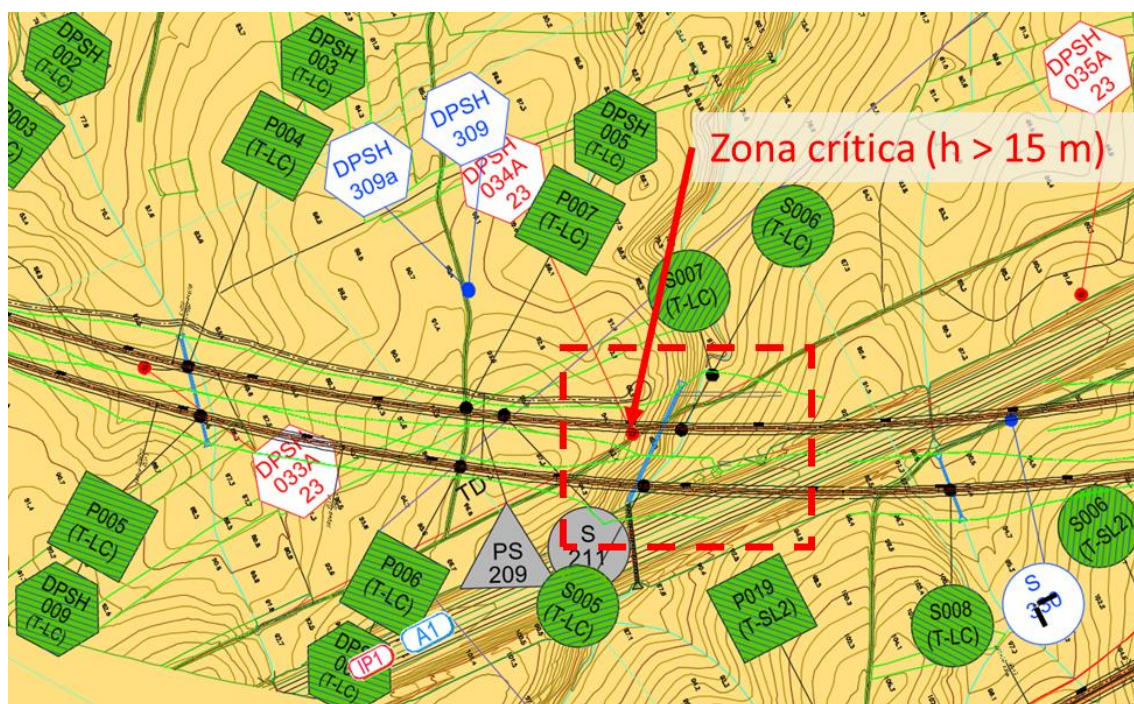


Figura 6 - Representação do aterro entre os PK 4+467 e 5+461 (LC VA) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

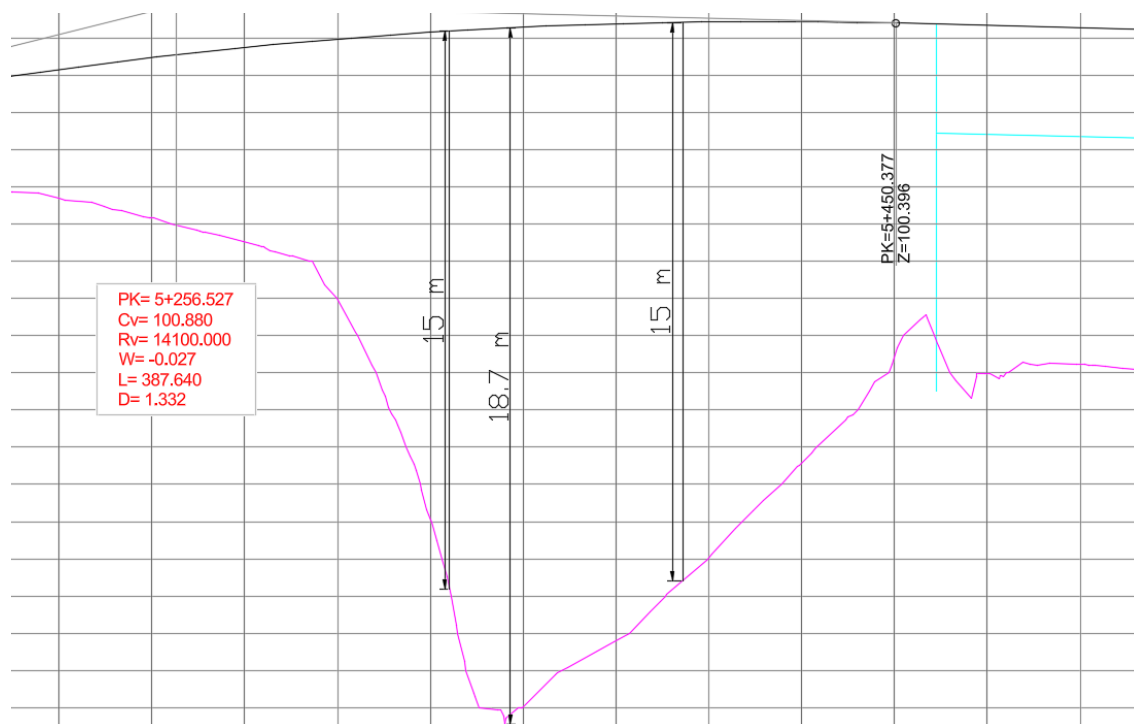


Figura 7 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

A zona mais crítica deste aterro encontra-se situada entre os PK 5+330 e PK 5+392 da via ascendente da Ligação de Canelas (62 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0m e 18,7 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 5+345.

A zona mais crítica dos aterros interessados ocorre na interseção de uma linha de água bastante encaixada, disposta transversalmente ao traçado. Na fotografia aérea é bem visível que esta linha de água se materializa na forma de uma pequena ribeira, com largura muito reduzida, dando-se o fluxo no sentido E-W. O vale atravessado é caracterizado por um flanco oeste mais íngreme do que o flanco este, estando esta geometria condicionada pela presença da autoestrada A1 (em perfil de aterro) imediatamente a oeste da zona mais alta do aterro previsto.

A linha de água indicada no parágrafo anterior é captada por uma PH associada à A1, sendo crucial que, na fundação do aterro ferroviário, se garanta a canalização desta linha de água e adequada ligação à estrutura existente do aterro rodoviário. Observa-se que o aterro proposto (VA) irá interferir com o aterro existente da A1.

4.2.1.2 Considerações Geológicas e geotécnicas

A formação geológica sobre a qual se desenvolve este aterro corresponde à Unidade de Arada, sendo esta uma formação de cariz metamórfico, representada, essencialmente, por filitos negros e esverdeados constituídos por xistos argilo-quartzo-sericíticos, quartzo-sericito-cloríticos, clorito-sericito-moscovíticos, geralmente físseis, que se apresentam mais ou menos ondulados e contêm intercalações quartzosas lenticulares.

Apesar de não se encontrar cartografado na planta geológica à escala 1:1.000, é possível a presença de solos aluvionares/coluvionares no fundo do vale, embora não sendo expectável que ocorram com extensão e possança significativa.

Relativamente à prospeção geotécnica existente, destacam-se os seguintes elementos:

- S211 (Ex-Rave): A sondagem S211 foi executada, sensivelmente ao PK 5+200 (VA) / 5+150 (VD). Não se dispõe do log desta sondagem, mas, no entanto, é possível inferir alguma informação a partir do diagrama patente nos desenhos de planta-perfil longitudinal do tomo de geologia e geotecnia. Esta sondagem é representativa das condições de fundação do aterro 150 m para W do início do trecho mais crítico.
- DPSH034A-23 (Estudo Prévio, IP): O DPSH034A-23 foi executado sobre um caminho existente, junto ao PK 5+300, ao eixo do traçado. Situa-se imediatamente antes do flanco W do vale.
- Perfil sísmico PS209 (Ex-Rave): O Perfil sísmico PS209 foi realizado cerca do PK 5+185 com disposição transversal do traçado. Tal como na sondagem anterior, não se dispõe do log deste ensaio, embora seja possível inferir alguma informação a partir do diagrama patente nos desenhos de planta-perfil longitudinal do tomo de geologia e geotecnia.

Síntese dos resultados da sondagem S211: A sondagem S108 detetou, até à profundidade de $\approx 1,5$ m, maciço decomposto (W5). Abaixo da referida profundidade, dá-se a passagem a maciço rochoso com grau de alteração W4 a W3/2 e grau de fracturação F5 a F3/4. Atendendo ao facto de não se dispor do log desta sondagem, não é possível aferir as características geotécnicas do solo, reconhecendo-se, apenas, que se obteve uma “nega” em ensaio SPT.

Síntese dos resultados da sondagem DPSH034A-23: Neste ensaio intersetaram-se terrenos competentes, verificando-se $N_{20} < 20$ apenas até aos 0,60 m de profundidade, tendo-se obtido a “nega” no ensaio ao 1,60 m.

Síntese dos resultados do perfil sísmico PS209: Já o perfil sísmico PS209 sugere a existência de um horizonte superficial mais descomprimido até aos 4,0 m de profundidade, caracterizado por $V_P < 900$ m/s, imediatamente abaixo, o terreno é caracterizado por V_P de 900 a 2000 m/s, passando a $V_P > 2000$ m/s abaixo dos $\approx 8,5$ m.

Em suma, embora a prospeção existente permita uma avaliação preliminar das condições de fundação do aterro, não existem elementos que permitam caracterizar, especificamente, as condições de fundação na sua zona mais crítica.

4.2.1.3 Caracterização da fundação do aterro

Conforme mencionado anteriormente, não existem dados de prospeção geotécnica que permitam uma caracterização específica das condições de fundação do aterro no seu trecho mais crítico. No entanto, é possível referir os seguintes aspetos.

- Apesar de não se encontrar ainda cartografada à escala 1:1.000, é plausível a existência de aluviões/coluviões ao longo do alinhamento da linha de água, embora seja expectável que estas não possuam possança nem desenvolvimento significativo. A prospeção proposta permitirá confirmar a existência (ou inexistência) de aluviões.

- Não obstante o referido no ponto anterior, será sempre expectável a existência de um horizonte superficial de material mais descomprimido/alterado, passível de ser saneado.
- Fora da zona mais baixa, é expectável que a fundação do aterro assente sobre solos residuais silto-argilosos rijos, com alguma componente pedregosa ou, eventualmente, maciço rochoso aflorante a subaflorante.

No trecho mais crítico deste aterro, observa-se que o pano esquerdo irá sobrepor-se ao aterro existente da A1/IP1 ($\approx$ km 251), situação que acarreta implicações geotécnicas significativas, exigindo a criação de endentamentos e a avaliação da capacidade de suporte dos materiais de aterro existentes.

4.2.1.4 Caracterização de empréstimos

Não existem escavações de dimensão significativa muito próximas do aterro interessado. Com efeito, as escavações com maiores dimensões mais próximas deste aterro estão localizadas no Sublote 2, que são as seguintes:

$\approx$ 20+900 – 21+500 (SL2): Os elementos de prospeção existentes mais próximos do traçado incluem o poço P111 e o perfil sísmico PS003A-23

- Resultados do poço P111 (ensaios laboratoriais):
 - Este poço (da fase da Ex-RAVE) foi realizado ao PK $\approx$ 22+325, intersectou a Unidade de Arada e revelou a presença de solos classificados como A-1-b (0) / GM – Cascalho siltooso com areia / C1-B5 (classificações AASHTO / ASTM / LCPC, respetivamente). Os dados disponíveis indicam que o solo analisado tem teor de finos de 18 %, limite de liquidez de 42 %, Limite de plasticidade NP, teor em água de 15,5 % e equivalente de areia de 17 %. Não obstante a classificação de solos sugerir solos de excelente qualidade, este material seria classificado como QS1 ao abrigo da classificação de solos patente no normativo IRS70719;
- Resultados do perfil sísmico PS003A-23:
 - Este perfil sísmico (Estudo Prévio, 2023) foi executado ao PK $\approx$ 21+400, com disposição transversal ao traçado, revelando que o maciço rochoso deverá ocorrer de modo subaflorante, a profundidades estimadas entre os 2 e os 4 m, tornando-se mais compacto em profundidade (atingindo-se VP > 3000 m/s a partir dos 6,5 a 10 m de profundidade).

Além dos elementos acima elencados, refere-se, ainda, a sondagens S074A-23, que embora esteja bastante afastada do eixo de traçado (ca. 170 m), auxilia na caracterização do maciço interessado. Como efeito, os dados desta sondagem estão coerentes com o perfil sísmico PS003A-23, revelando a presença de solos residuais argilo-siltosos rijos ($N_{SPT} \geq 60$), de origem xisto-grauvacóide, passando a maciço rochoso com grau de alteração W4 a W3 e grau de fracturação F5-4 a F4-3, caracterizado por xistosidade sub-vertical, possuindo as superfícies das descontinuidades fortes sinais de oxidação

$\approx$ 21+600 – 22+350 (SL2): Nesta escavação consideram-se os dados patentes nas sondagens S075A-23, S014A-23 e S015A-23.

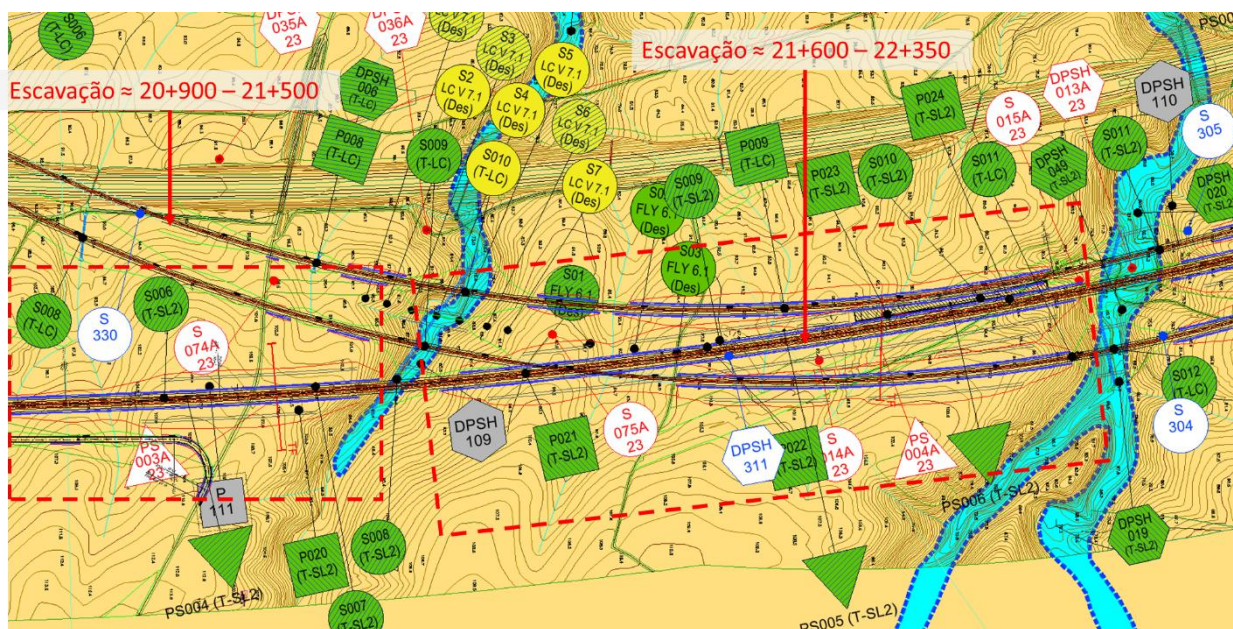
- Resultados da sondagem S075A-23:

- Unidade de Arada: intersetada na forma de maciço rochoso desde a superfície, apresentando-se os 1,60 m superficiais na forma de maciço muito alterado a decomposto (solo residual silto-argiloso com abundantes fragmentos grauvacóides), passando, seguidamente, a xistos grauvacóides, algo luzentes, com grau de alteração W3 e grau de fracturação F4. Observa-se intensa oxidação nas paredes das descontinuidades e alguns filonetes de quartzo;
- Resultados da sondagem S014A-23:
 - Unidade de Arada: intersetada na forma de grauvaques xistentos até aos 5,5 m de profundidade, a partir de onde indica-se a passagem a xistos grauvacóides, com xistosidade orientada a 45° com o eixo da sondagem, verticalizando em profundidade e frequentes filonetes quartzíticos. O maciço rochoso apresenta grau de fracturação compreendido entre W4 e W3 e grau de fracturação entre F5 e F4-3.
- Resultados da sondagem S015A-23:
 - Unidade de Arada: Intersectada na forma de xistos grauvacóides, por vezes algo luzentes, com grau de alteração compreendido entre W4 e W3-2, verificando-se melhoria progressiva da qualidade do maciço em profundidade. O grau de fracturação varia entre F5 e F4. Observam-se vários filonetes de quartzo e fortes indícios de oxidação nas superfícies das descontinuidades.
- PS004A-23:
 - Este perfil sísmico (Estudo Prévio, 2023) foi executado ao PK ≈22+115, com disposição aproximadamente transversal ao traçado, revelando que o maciço rochoso deverá ocorrer de modo aflorante a subaflorante, a profundidades estimadas inferiores a 3 m, tornando-se mais compacto em profundidade. O perfil sísmico sugere que o maciço rochoso torna-se aflorante de W para E.

≈ 22+475 – 23+000 (SL2): Nesta escavação consideram-se os dados obtidos nas sondagens S304 e S305 (mais representativas da transição aterro/escavação do que da escavação em análise) e do perfil sísmico PS005B-23.

- Resultados da sondagem S304:
 - Unidade de Arada: intersetada na forma de maciço rochoso muito alterado a decomposto (W4-5), com algumas passagens menos alteradas (W4-3). Quando exhibe aspeto rochoso, esta unidade materializa-se na forma de xisto com passagens argilosas e frequentes filonetes de quartzo. Foram realizados ensaios SPT em toda a profundidade desta sondagem, tendo-se obtido “negas” em todos os ensaios;
- Resultados da sondagem S305:
 - Unidade de Arada: intersetada, também, na forma de um maciço muito alterado a decomposto, em tudo idêntico ao descrito na sondagem S304.
- Resultados da sondagem PS005B-23:
 - Este perfil sísmico (Estudo Prévio, 2023) foi executado ao PK ≈22+715, com disposição aproximadamente transversal ao traçado, revelando que o maciço rochoso deverá ocorrer de modo subaflorante, a profundidades estimadas entre os 3 e os 4 m, tornando-se mais compacto em profundidade (atingindo-se VP > 3000 m/s a partir dos 8-9 m de profundidade).

Tratam-se de três trechos em escavação consecutivos que irão intersetar a Unidade de Arada e onde é expectável obter um volume significativo de geomateriais. Importa referir que estas escavações estão referenciadas, apenas, ao eixo principal da LAV, importando mencionar que paralelamente desenvolvem-se as escavações correspondentes às vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas, o que se traduz em escavações bastante largas.



(Unidade de Arada) deverá fornecer materiais heterogéneos, podendo tratar-se de solos finos com fragmentos rochosos, materiais tipo solo-enrocamento de matriz fina ou rocha xistenta muito a medianamente alterada, com evidente aspeto evolutivo. A análise do normativo IRS70719 sugere que, de um ponto de vista qualitativo, estes materiais deverão ser classificados como QS1 (*"Evolutive or degradable rock"*)

Os materiais a obter da Unidade de Arada, quando espalhados e compactados, corresponderão a materiais de matriz fina, que, potencialmente, poderão ser utilizados no corpo do aterro sem limitações. No entanto, a sua matriz fina deverá torná-los inviáveis de serem tratados com cimento.

A eventual aplicação de enrocamentos na fundação dos aterros estará dependente da sua obtenção em empréstimo já que, mesmo que possam ser obtidos materiais rochosos na base das escavações, estes não têm características para serem aplicados com esta finalidade (materiais excessivamente friáveis e alteráveis).

4.2.2 Solução de reforço proposta

Como possíveis soluções para este aterro, no seu trecho crítico, preconizam-se (preliminarmente) as seguintes:

- Fundação do aterro:
 - Saneamento numa espessura mínima de 1,0 m e substituição por enrocamento envolto em geotêxtil (camada drenante);
 - Eventual escavação de endentamentos no terreno natural, onde este apresentar pendente superior a 1:5 (v:h);
- Parte inferior do aterro:
 - Aplicação de materiais insensíveis à água (enrocamento) - A aplicação de enrocamento deverá ser considerada até 0,5 m acima do nível máximo de cheia, o qual deverá ser determinado pela especialidade de hidrologia.
- Corpo do aterro:
 - Execução do aterro com materiais de características equiparáveis à classe QS2 ou QS1 (IRS70719), desde que o material seja caracterizado com valores de CBR > 10%, aplicados em camadas com espessura máxima de 30 cm e compactados a 95 % da baridade seca máxima (a aferir com o ensaio Proctor modificado). No caso de se aplicarem materiais xistentos, de características evolutivas, deverá assegurar-se que a compactação é realizada com cilindros pé-de-carneiro.
- Espaldar do aterro:
 - Aplicação de materiais com características idênticas ao corpo do aterro, mas tratados com cimento (teor estimado de 3 a 4 %, a validar com estudo de formulação específico). O tratamento com cimento deverá ser executado com uma largura de 7 a 10 m (pano superior e pano inferior do aterro, respetivamente). Estes espaldares podem também ser executados com materiais granulares britados do tipo ABGE, devendo ser assegurada a drenagem para o exterior do aterro.
- Parte superior do aterro / coroamento

- Atendendo aos exigentes critérios de deformabilidade a que os projetos têm de atender, considera-se que também o coroamento e a parte superior do aterro devem ser alvo de tratamento com cimento, nos mesmos termos que o indicado para os espaldares do aterro. Nesta fase preconiza-se uma espessura de 3 m para o coroamento / PSA tratado com cimento. Tal como referido para os espaldares do aterro, também neste caso admite-se a possibilidade de se considerar uma solução equivalente com aplicação de ABGE.

As soluções propostas foram definidas em função da altura do aterro, estando a sua distribuição ao longo do traçado sintetizada na tabela seguinte:

Quadro 3 - Solução de reforço detalhada entre os PK 5+330 - PK 5+392 – VA

Aterro Geral					Zona de tratamento				
Via	Km inicial	Km final	Extensão Total (m)	H _{máx} (eixo) (m)	Km inicial	Km final	Extensão(m)	H(eixo) (m)	Tipo do Solução
Ascendente	4+467	5+461	994	18,7	5+330	5+359	29	Heixo > 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 7m pano superior: e = 10 m Coroamento: e = 3m
					5+359	5+392	33	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m

4.2.3 Faseamento construtivo

No que se refere ao processo construtivo, a execução dos aterros propostos deve obedecer ao estipulado no Caderno de Encargos da Obra. Não obstante, importa referir que:

- Deverá promover-se a utilização de materiais com a mesma origem, e bem assim com comportamento uniforme, ao longo da mesma camada, em particular nos espaldares, não sendo permitida a alternância entre materiais xistosos e graníticos. Também em altura, a alternância destes materiais só é permitida, no mínimo, a cada 5 camadas (2m);
- Os materiais devem ser dispostos em “cordão”, a cerca de 5 metros da frente da camada, sendo depois espalhados pelo “Buldozer”, com a sua lâmina progressivamente mais baixa, por forma a permitir a boa envolvência dos materiais mais grossos com os mais finos, que se reveste de fundamental importância, em particular, nos materiais xistosos dada a sua forte anisotropia e heterogeneidade conferida pela xistosidade. Com este procedimento consegue-se ainda uma fragmentação secundária, provocada pela passagem das lagartas do “Buldozer”, bastante benéfica, atendendo ao carácter evolutivo dos xistos; e,
- As camadas não deverão ter espessura superior a 0,40 m e deverão ser sujeitas a uma compactação intensa.

A execução de solo-cimento in situ pressupõe que as camadas dos espaldares sejam feitas em simultâneo com o restante aterro, não havendo diferenciação dessa parte do aterro relativamente ao restante até ao início do processo de enriquecimento do solo com cimento, que ocorre após a compactação da camada (que deverá estar minimamente desempenada).

O cimento deve ser adicionado na proporção ponderal de 3 a 4% (esta percentagem de cimento, por ser relativamente diminuta, mas claramente suficiente, não deverá conduzir a fenómenos de fissuração das camadas tratadas).

As camadas devem ser tratadas em toda a sua espessura (0,40 m), nas larguras apresentadas anteriormente, o que implica, a sua execução por faixas adjacentes de largura limitada à do tambor misturador da recicladora (usualmente com 2,5 m).

A execução de solo-cimento in situ pressupõe a realização sequencial das seguintes etapas construtivas, após a compactação inicial de cada camada:

- Espalhamento do cimento pelo camião-silo;
- Execução da mistura com adição de água, pela recicladora acoplada à cisterna. Quando decorra mais de 4 horas entre a realização de camadas consecutivas de solo-cimento, a recicladora deverá proceder à escarificação da camada abaixo da que se pretende tratar, em 1-2 cm, para que, desta forma, se promova a adequada ligação entre camadas;
- Compactação final com cilindro; e,
- Espalhamento, até um máximo de 4 horas após a compactação final, de uma nova camada, para execução imediata de solo-cimento ou apenas para cobertura, o que permitirá reduzir a exposição da camada tratada e funcionar como cura (substituindo a rega betuminosa que se utiliza usualmente para esse fim).

A construção dos aterros deve ser antecedida da realização de um trecho experimental de aterro corrente e de outro em solo-cimento, que permitirão confirmar os pressupostos de projeto, aferir a gama de valores de teor em água dos materiais mais adequada à construção dos aterros, e no que se refere ao trecho em solo-cimento, avaliar as resistências obtidas para a percentagem de cimento adicionada e a sua evolução temporal, em particular nos primeiros tempos.

4.2.4 Plano de Instrumentação e Observação

O plano de Instrumentação e Observação permitirá avaliar o desempenho das estruturas durante as fases construtiva e de exploração, mediante o reconhecimento de critérios de alerta, traduzindo diferentes níveis de gravidade, suscitados por medições anómalas das grandezas monitorizadas, os quais poderão indiciar a necessidade de intervenções com vista a garantir a segurança e a economia das obras em causa.

Este Plano foi concebido com base nos condicionamentos próprios da obra, atendendo aos riscos a eles associados.

Por forma a caracterizar o comportamento das estruturas, no que se refere às suas deformações internas e superficiais, o Plano de Instrumentação e Observação contempla a instalação de dispositivos de observação e de instrumentação, a saber:

- Marcas topográficas, para medição das grandezas deslocamento horizontal e deslocamento vertical, na superfície dos aterros;
- Extensómetros, para medição da grandeza deslocamento vertical, no interior dos aterros;

- Inclinómetros, para medição da grandeza deslocamento horizontal, no interior dos aterros.

Os dispositivos de observação previstos serão instalados nos coroamentos, nas banquetas e nas saias dos aterros, de acordo com o descritivo seguinte e representado nas peças desenhadas do projeto.

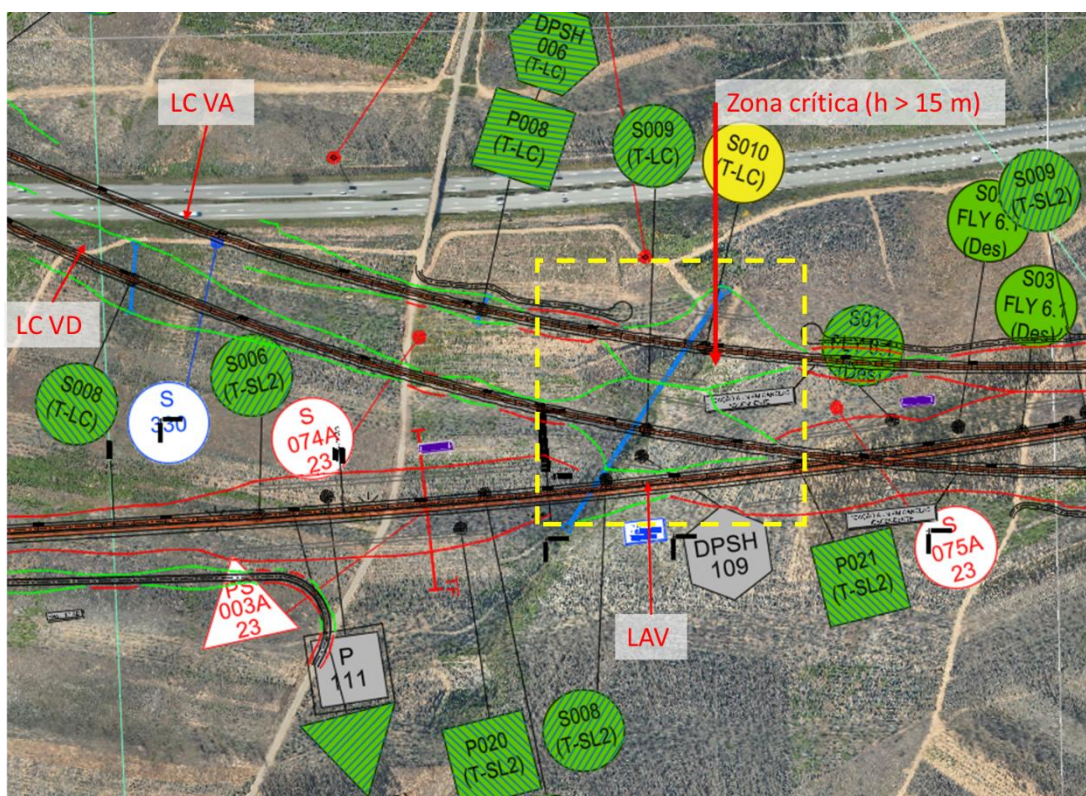
- Coroamento: Marcas topográficas, inclinómetros e extensómetros;
- Banquetas: Marcas topográficas e inclinómetros;
- Pé do aterro: Marcas topográficas;

4.3 SOLUÇÃO DE REFORÇO A5_1A E A5_1D (PK 5+979 A PK 6+010 / PK 5+914 A 5+951 – VA/VD)

4.3.1 Descrição do trecho em análise

4.3.1.1 Descrição Geral

Nas figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam-se excertos dos aterros situados entre os PK 5+900 e PK 6+079 da Via Ascendente e entre os PK 5+451 e PK 6+035 da Via Descendente, da Ligação de Canelas, com particular para ênfase para a extensão crítica do aterro (onde $h_{eixo} > 15$ m), em planta sobre ortofotomapa, em planta sobre a cartografia geológica à escala 1:1.000 e em perfil longitudinal. Os aterros analisados estão dispostos paralelamente, existindo sobreposição entre o pano direito do aterro da VA e o pano esquerdo do aterro da VD. Aparenta também existir sobreposição entre o pano direito aterro da VD e o pano esquerdo do aterro da LAV.



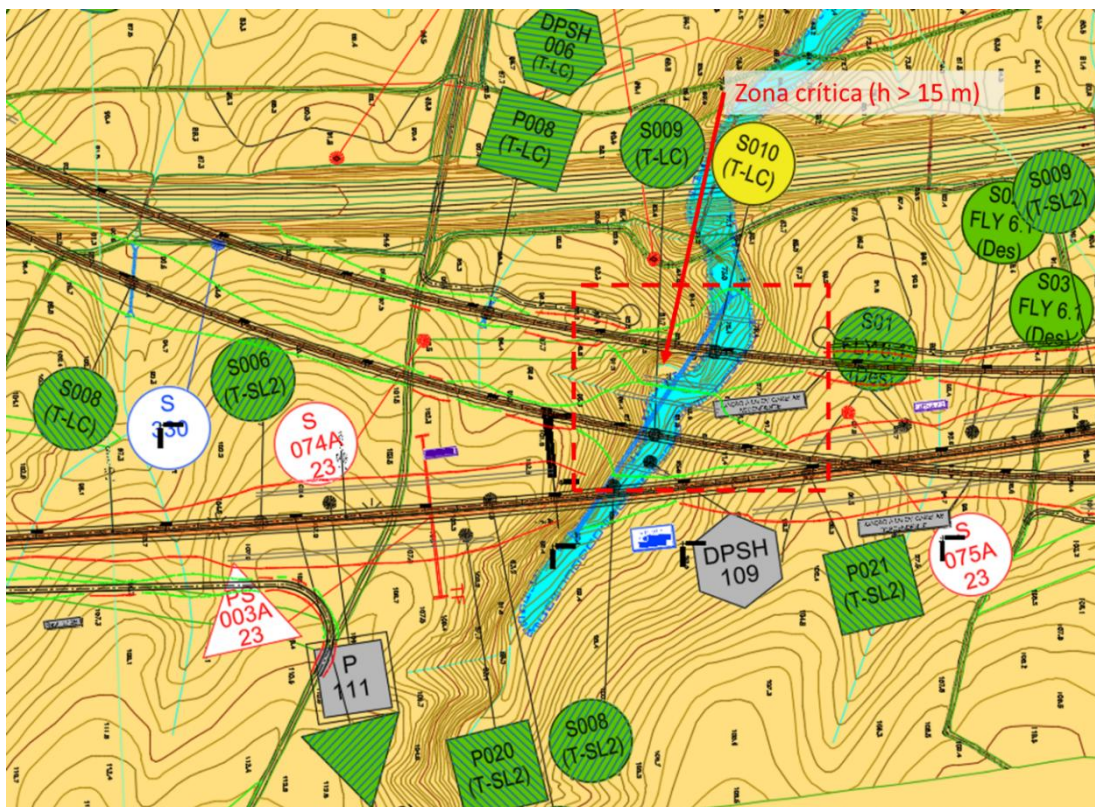


Figura 11 - Representação do aterro entre os PK 5+900 e 6+079 (LC VA) e entre os PK 5+451 e 6+035 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

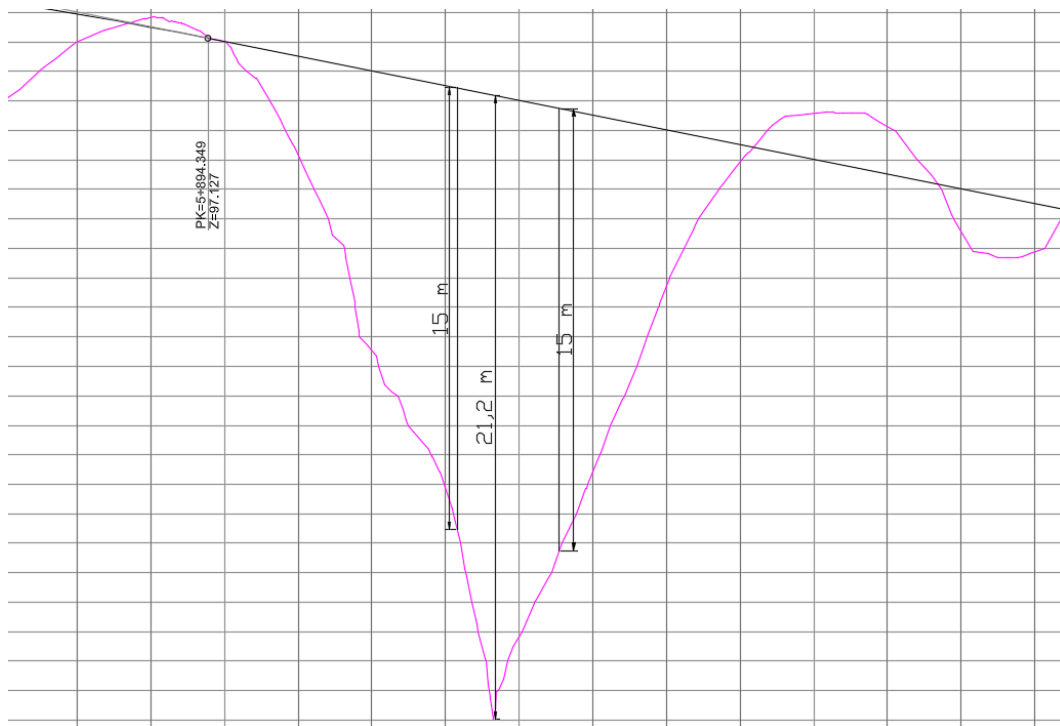


Figura 12 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

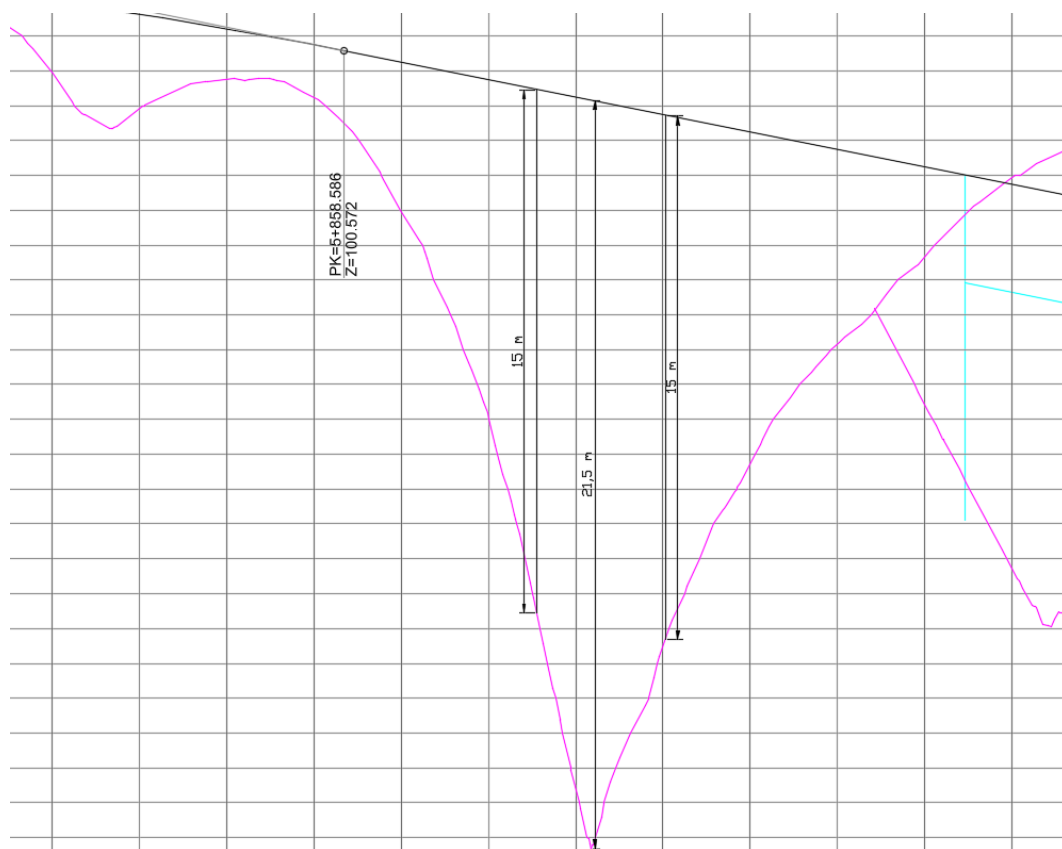


Figura 13 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

As zonas mais críticas destes aterros encontram-se situadas entre os PK 5+979 e PK 6+010 da via ascendente da Ligação de Canelas (31 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0 e 21,2 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 5+991, e entre os PK 5+914 e PK 5+951 da via descendente da Ligação de Canelas (37 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0 e 21,5 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 5+929.

A zona mais crítica dos aterros interessados ocorre no atravessamento de viés de uma linha de água muito encaixada, cujo fluxo se dá de SE para NW. Ao contrário do que tem vindo a ser constatado nos casos de estudo anteriormente descritos, observa-se que o vale apresenta um perfil aproximadamente simétrico (tanto na via ascendente como na via descendente). A altura máxima do aterro é atingida no fundo do vale, onde se encontra encaixada a linha de água.

A linha de água indicada no parágrafo anterior será captada por uma PH, a qual possuirá uma extensão de cerca de 200 m, sendo esta extensão consequência desta PH servir três aterros contíguos (associados às vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas, assim como ao traçado da LAV).

4.3.1.2 Considerações Geológicas e geotécnicas

A formação geológica sobre a qual se desenvolve este aterro corresponde à Unidade de Arada, sendo esta uma formação de cariz metamórfico, representada, essencialmente, por filitos negros e esverdeados constituídos por xistos argilo-quartzo-sericíticos, quartzo-sericito-cloríticos, clorito-

sericito-moscovíticos, geralmente físseis, que se apresentam mais ou menos ondulados e contêm intercalações quartzosas lenticulares.

Ao nível do fundo de vale, é expectável o atravessamento de aluviões, embora a composição litológica dos materiais constituintes permaneça desconhecida.

No que respeita à prospeção geotécnica existente, salientam-se os seguintes elementos:

- S075A-23 (Estudo Prévio, IP): Esta sondagem situa-se ao PK 6+100 (VA) / PK 6+125 (VD), estando a cerca de 35 m de ambos os eixos de traçado. Esta sondagem situa-se imediatamente após o término do aterro, sendo mais representativa da escavação que se inicia imediatamente após. Não obstante, a análise desta sondagem permitirá avaliar a tipologia de materiais que deverão ocorrer na fundação do aterro.
- DPSH109 (Ex-Rave): O DPSH109 foi executado no fundo do vale, a grande proximidade da linha de água. É mais representativo das condições de fundação ao nível do aterro da via descendente, situando-se, sensivelmente, ao PK 5+930.

Síntese dos resultados da S075A-23: A sondagem S075A-23 interseitou a Unidade de Arada em todo o seu comprimento, a qual manifestou-se na forma de grauvaques decompostos a muito alterados (W5/4) até aos 1,6 m de profundidade. Abaixo deste horizonte, transita-se para xistos grauvacóides W3 a W3/2 e F5 a F4, com xistosidade subvertical.

Síntese dos resultados do DPSH109: O DPSH109A-23 revela que o horizonte superficial de terreno mais descomprimido ($N_{20} < 10$) tem apenas 0,4 m de espessura. A “nega” foi obtida aos 1,0 m de profundidade.

Em suma, a prospeção existente é insuficiente para caracterizar adequadamente a fundação dos aterros previstos, sendo que o único dado representativo da zona mais crítica é o DPSH109, o qual apenas permite avaliar, pontualmente, que a espessura de solos descomprimidos deverá ser reduzida.

4.3.1.3 Caracterização da fundação do aterro

Conforme referido anteriormente, não existem dados de prospeção geotécnica que permitam uma caracterização detalhada das condições de fundação do aterro no seu trecho mais crítico. No entanto, é possível referir os seguintes aspetos.

- A prospeção proposta deverá permitir uma caracterização dos solos aluvionares existentes (embora seja expectável que estes constituam um horizonte pouco espesso e extenso);
- Não obstante o referido no ponto anterior, de acordo com o resultado do DPSH109, observa-se que o metro superficial de terreno apresenta-se mais descomprimido, devendo este ser alvo de saneamento;
- É também provável a necessidade de saneamentos e substituições por enrocamento ao longo das linhas de água secundárias que irão desaguar na linha de água principal e que se encontram orientadas na direção NS.
- Fora da zona mais baixa, é expectável que a fundação do aterro assente sobre solos residuais silto-argilosos rijos, com alguma componente pedregosa, estando o maciço rochoso a

reduzida profundidade. Nalguns locais, é provável que o maciço possa apresentar-se aflorante;

- Será de elevada importância garantir boas condições de fundação para a passagem hidráulica prevista para a fundação dos três aterros contíguos, já que o bom funcionamento desta estrutura será fundamental para a estabilidade destes aterros a longo prazo.

4.3.1.4 Caracterização de empréstimos

Para este capítulo aplicam-se as considerações apresentadas no subcapítulo 4.2.1.4.

4.3.2 Solução de reforço proposta

Como possíveis soluções para este aterro, no seu trecho crítico, preconizam-se (preliminarmente) as seguintes:

- Fundação do aterro:
 - Saneamento numa espessura mínima de 1,0 m e substituição por enrocamento envolto em geotêxtil (camada drenante);
 - Escavação de endentamentos no terreno natural, onde este apresentar elevada pendente (1:5 – v:h);
- Parte inferior do aterro:
 - Aplicação de materiais insensíveis à água (enrocamento) - A aplicação de enrocamento deverá ser considerada até 0,5 m acima do nível máximo de cheia, o qual deverá ser determinado pela especialidade de hidrologia.
- Corpo do aterro:
 - Execução do aterro com materiais de características à classe QS2 ou QS1 (IRS70719), desde que o material seja caracterizado com valores de CBR > 10%, aplicados em camadas com espessura máxima de 30 cm e compactados a 95 % da baridade seca máxima (a aferir com o ensaio Proctor modificado). No caso de se aplicarem materiais existentes, de características evolutivas, deverá assegurar-se que a compactação é realizada com cilindros pé-de-carneiro.
- Espaldar do aterro:
 - Aplicação de materiais com características idênticas ao corpo do aterro, mas tratados com cimento (teor estimado de 3 a 4 %, a validar com estudo de formulação específico). O tratamento com cimento deverá ser executado com uma largura de 7 a 10 m (pano superior e pano inferior do aterro, respetivamente). Estes espaldares podem também ser executados com materiais granulares britados do tipo ABGE, devendo ser assegurada a drenagem para o exterior do aterro.
- Parte superior do aterro / coroamento
 - Atendendo aos exigentes critérios de deformabilidade a que os Projetos têm de atender, considera-se que também o coroamento e a parte superior do aterro devem ser alvo de tratamento com cimento, nos mesmos termos que o indicado para os espaldares do aterro. Nesta fase preconiza-se uma espessura de 3 m para o

coroamento / PSA tratado com cimento. Tal como referido para os espaldares do aterro, também neste caso admite-se a possibilidade de se considerar uma solução equivalente com aplicação de ABGE.

As soluções adotadas foram estabelecidas de acordo com a altura dos aterros, sendo a sua distribuição ao longo do traçado apresentada na tabela abaixo:

Quadro 4 - Solução de reforço detalhada entre os PK 5+979 - PK 6+010 / PK 5+914 a 5+951 – VA/VD

Aterro Geral					Zona de tratamento				
Via	Km inicial	Km final	Extensão Total (m)	Hmáx (eixo) (m)	Km inicial	Km final	Extensão(m)	H(eixo) (m)	Tipo do Solução
Ascendente	5+900	6+079	179	21,2	5+979	6+003	24	Heixo > 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 7m pano superior: e = 10 m Coroamento: e = 3m
					6+003	6+010	7	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m
Descendente	5+451	6+035	584	21,5	5+914	5+951	37	Heixo > 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 7m pano superior: e = 10 m Coroamento: e = 3m

4.3.3 Faseamento construtivo

No que se refere ao processo construtivo, a execução dos aterros propostos, deve obedecer ao estipulado no Caderno de Encargos da Obra. Não obstante, importa referir que:

- Deverá promover-se a utilização de materiais com a mesma origem, e bem assim com comportamento uniforme, ao longo da mesma camada, em particular nos espaldares, não sendo permitida a alternância entre materiais xistosos e graníticos. Também em altura, a alternância destes materiais só é permitida no mínimo a cada 5 camadas (2m);
- Os materiais devem ser dispostos em “cordão”, a cerca de 5 metros da frente da camada, sendo depois espalhados pelo “Buldozer”, com a sua lâmina progressivamente mais baixa, por forma a permitir a boa envolvimento dos materiais mais grossos com os mais finos, que se reveste de fundamental importância, em particular, nos materiais xistosos dada a sua forte anisotropia e heterogeneidade conferida pela xistosidade. Com este procedimento consegue-se ainda uma fragmentação secundária, provocada pela passagem das lagartas do “Buldozer”, bastante benéfica, atendendo ao carácter evolutivo dos xistos; e,
- As camadas não deverão ter espessura superior a 0,40 m e deverão ser sujeitas a uma compactação intensa.

A execução de solo-cimento in situ pressupõe que as camadas dos espaldares sejam feitas em simultâneo com o restante aterro, não havendo diferenciação dessa parte do aterro relativamente ao restante até ao início do processo de enriquecimento do solo com cimento, que ocorre após a compactação da camada (que deverá estar minimamente desempenada).

O cimento deve ser adicionado na proporção ponderal de 3 a 4% (esta percentagem de cimento, por ser relativamente diminuta, mas claramente suficiente, não deverá conduzir a fenómenos de fissuração das camadas tratadas).

As camadas devem ser tratadas em toda a sua espessura (0,40 m), nas larguras apresentadas anteriormente, o que implica, a sua execução por faixas adjacentes de largura limitada à do tambor misturador da recicladora (usualmente com 2,5 m).

A execução de solo-cimento in situ pressupõe a realização sequencial das seguintes etapas construtivas, após a compactação inicial da cada camada:

- Espalhamento do cimento pelo camião-silo;
- Execução da mistura com adição de água, pela recicladora acoplada à cisterna. Quando decorram mais de 4 horas entre a realização de camadas consecutivas de solo-cimento, a recicladora deverá proceder à escarificação da camada abaixo da que se pretende tratar, em 1-2 cm, para que, desta forma, se promova a adequada ligação entre camadas;
- Compactação final com cilindro;
- Espalhamento, até um máximo de 4 horas após a compactação final, de uma nova camada, para execução imediata de solo-cimento ou apenas para cobertura, o que permitirá reduzir a exposição da camada tratada e funcionar como cura (substituindo a rega betuminosa que se utiliza usualmente para esse fim).

A construção dos aterros deve ser antecedida da realização de um trecho experimental de aterro corrente e de outro em solo-cimento, que permitirão confirmar os pressupostos de projeto, aferir a gama de valores de teor em água dos materiais mais adequada à construção dos aterros, e no que se refere ao trecho em solo-cimento, avaliar as resistências obtidas para a percentagem de cimento adicionada e a sua evolução temporal, em particular nos primeiros tempos.

4.3.4 Plano de Instrumentação e Observação

O plano de Instrumentação e Observação permitirá avaliar o desempenho das estruturas durante as fases construtiva e de exploração, mediante o reconhecimento de critérios de alerta, traduzindo diferentes níveis de gravidade, suscitados por medições anómalas das grandezas monitorizadas, os quais poderão indiciar a necessidade de intervenções com vista a garantir a segurança e a economia das obras em causa.

Este Plano foi concebido com base nos condicionamentos próprios da obra, atendendo aos riscos a eles associados.

Por forma a caracterizar o comportamento das estruturas, no que se refere às suas deformações internas e superficiais, o Plano de Instrumentação e Observação contempla a instalação de dispositivos de observação e de instrumentação, a saber:

- Marcas topográficas, para medição das grandezas deslocamento horizontal e deslocamento vertical, na superfície dos aterros;
- Extensómetros, para medição da grandeza deslocamento vertical, no interior dos aterros; e,
- Inclínómetros, para medição da grandeza deslocamento horizontal, no interior dos aterros.

Os dispositivos de observação previstos serão instalados nos coroamentos, nas banquetas e nas saias dos aterros, de acordo com o descritivo seguinte e representado nas peças desenhadas do projeto.

- Coroamento: Marcas topográficas, inclínómetros e extensómetros;

- Banquetas: Marcas topográficas e inclinómetros;
- Pé do aterro: Marcas topográficas;

4.4 SOLUÇÃO DE REFORÇO A6_1A E A6_1D (PK 6+775 A PK 6+813 / PK 6+691 A 6+825 – VA/VD)

4.4.1 Descrição do trecho em análise

4.4.1.1 Descrição Geral

Nas figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam-se excertos dos aterros situados entre os PK 6+671 e PK 6+861 da Via Ascendente e entre os PK 6+691 e PK 6+825 da Via Descendente, da Ligação de Canelas, com particular para ênfase para a extensão crítica do aterro (onde $h_{\text{eixo}} > 15$ m), em planta sobre ortofotomapa, em planta sobre a cartografia geológica à escala 1:1.000 e em perfil longitudinal. Os aterros analisados estão dispostos paralelamente, existindo sobreposição entre o pano direito do aterro da VA e o pano esquerdo do aterro da LAV. Aparentemente, não existe sobreposição entre o pano direito da LAV e o pano esquerdo do aterro da VD.

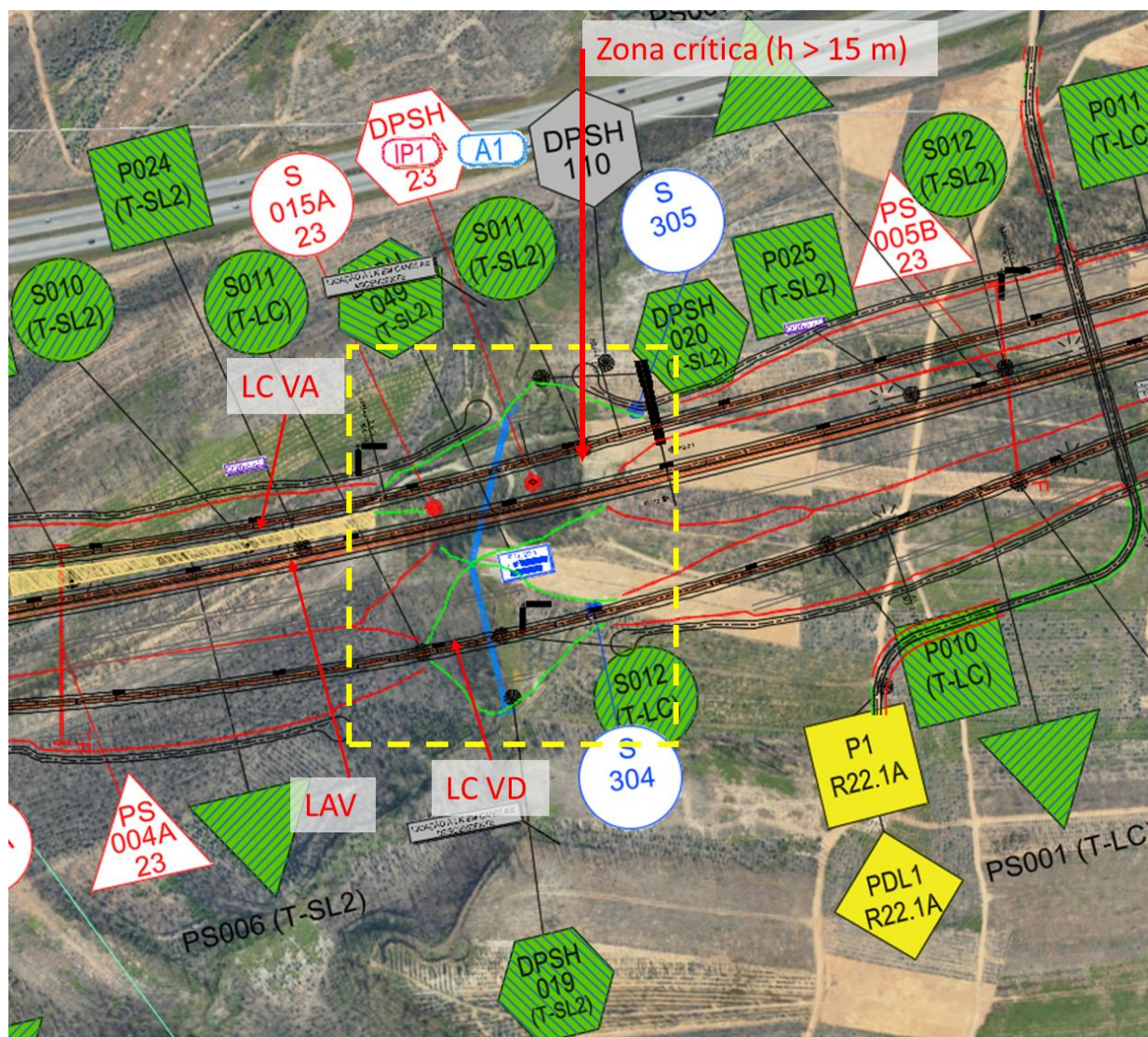


Figura 14 – Representação do aterro entre os PK 6+671 e 6+861 (LC VA) e entre os PK 6+691 e 6+825 (LC VD) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica (h > 15 m)

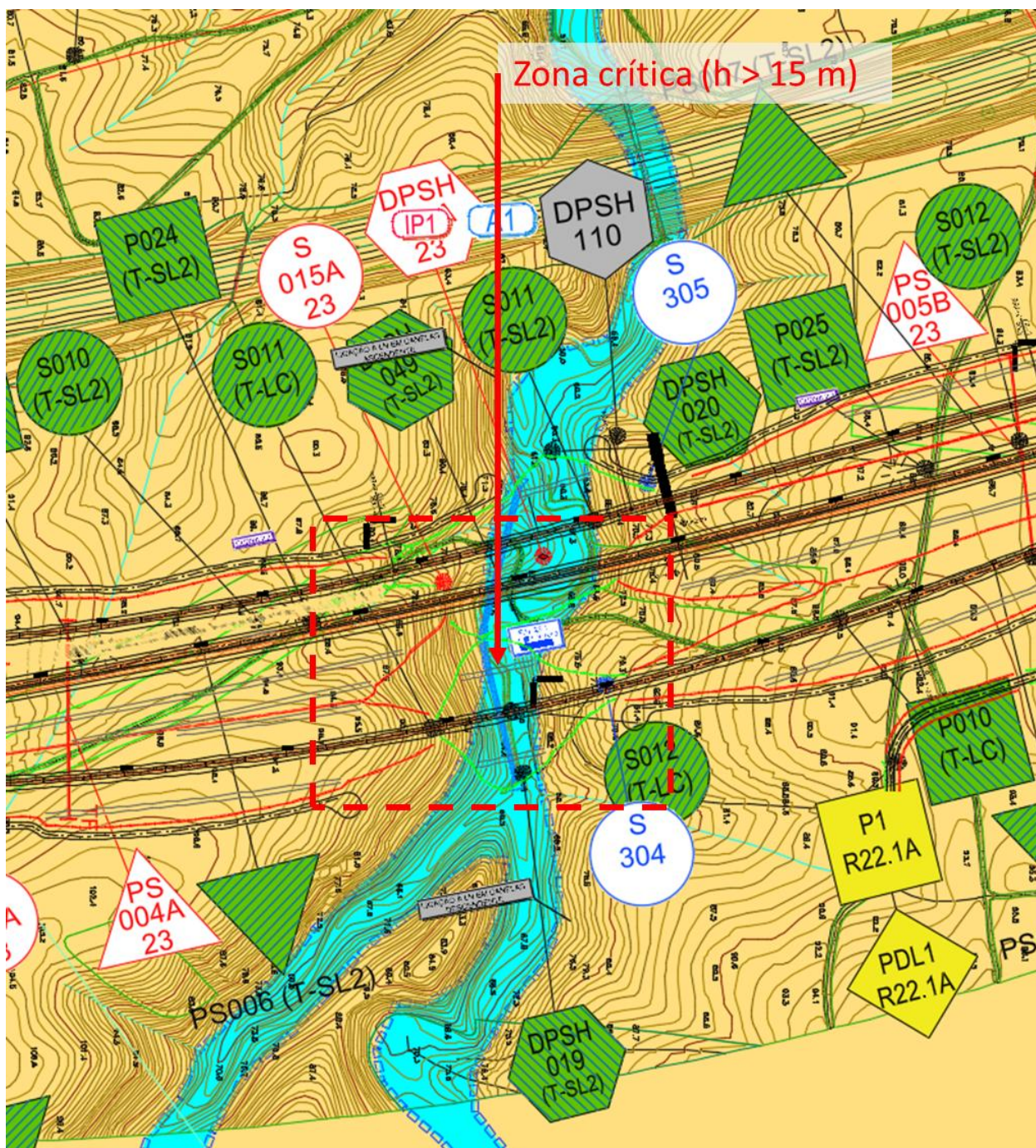


Figura 15 - Representação do aterro entre os PK 6+671 e 6+861 (LC VA) e entre os PK 6+691 e 6+825 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Enfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

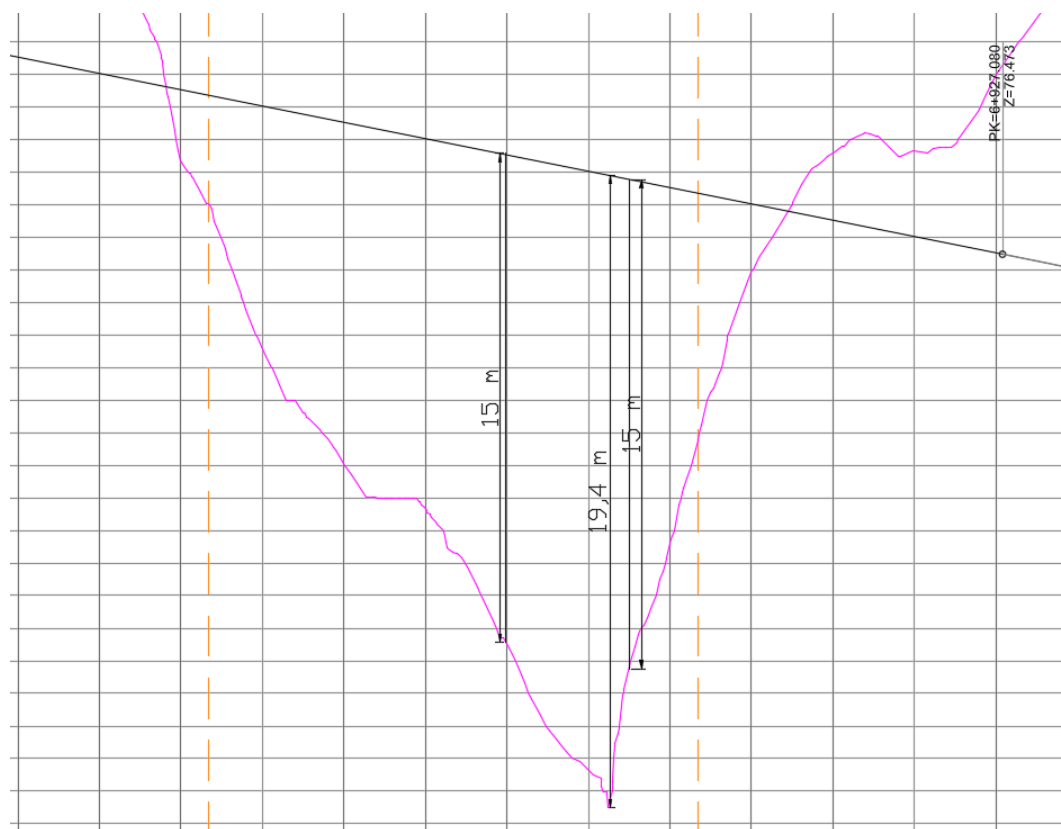


Figura 16 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VA) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

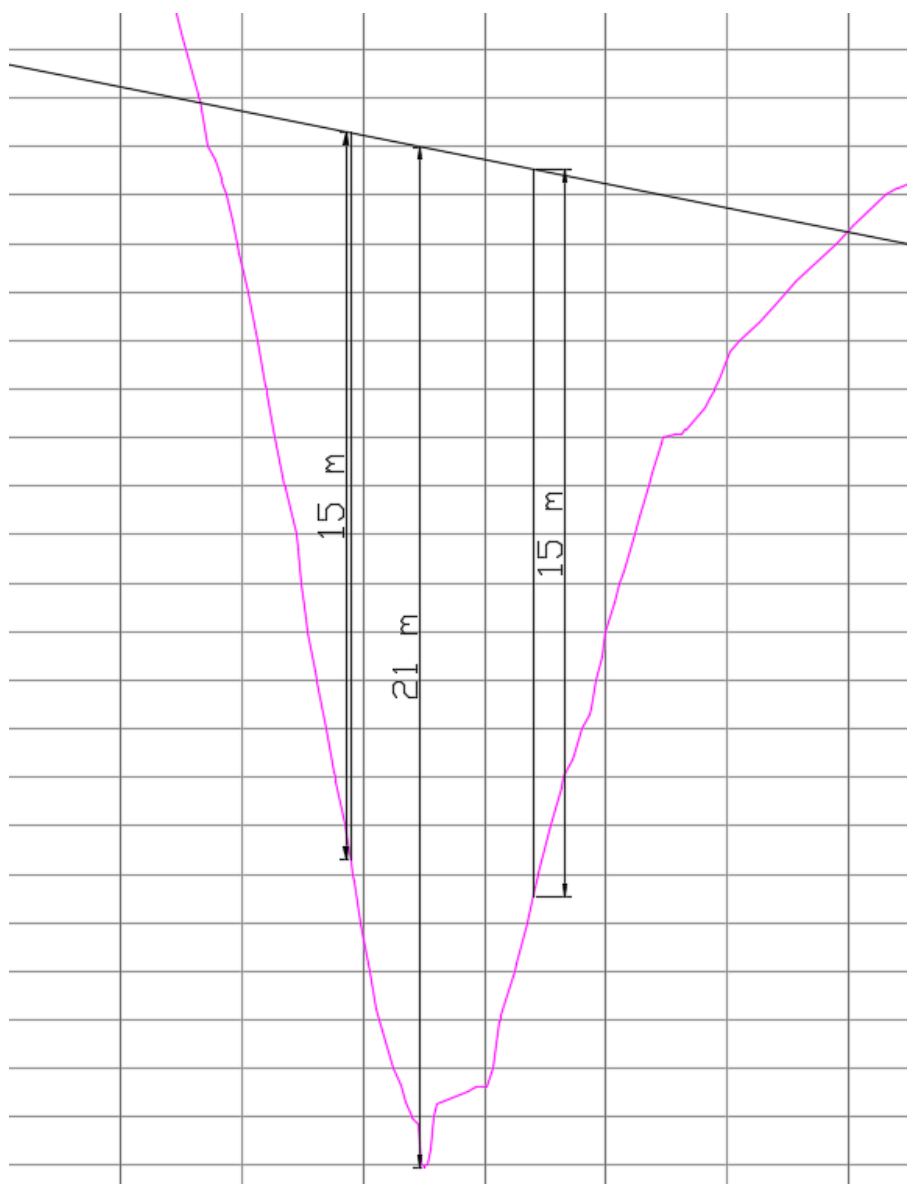


Figura 17 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

As zonas mais críticas destes aterros encontram-se situadas entre os PK 6+775 e PK 6+813 da via ascendente da Ligação de Canelas (38 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0 e 19,4 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 6+806, e entre os PK 6+722 e PK 6+760 da via descendente da Ligação de Canelas (38 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0 e 21,0 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 6+738.

A zona mais crítica dos aterros interessados ocorre no atravessamento de uma linha de água muito encaixada e alinhamento sinuoso, cujo fluxo se dá de E para W. A altura máxima dos aterros é atingida no fundo do vale, onde se encontra encaixada a linha de água.

Além da linha de água principal, observa-se a presença de linhas de água secundárias com alinhamento NS, nos flancos S e N do vale. A implantação prevista para os aterros irá sobrepor-se ao alinhamento destas linhas de água.



- S015A-23 (Estudo Prévio, IP): A sondagem S015A-23 situa-se ao PK 6+710 da VA, a curta distância do eixo de traçado, encontrando-se a 60 m para S do início do trecho mais crítico. A informação contida nesta sondagem é útil para caracterizar, de um modo geral, os materiais expectáveis de interseção na fundação do aterro.
- DPSH013A-23 (Estudo Prévio, IP): Situado, sensivelmente, ao km 6+775 da VA, este DPSH é representativo do trecho mais crítico do aterro.
- S304 (Fase de Concurso): A sondagem S304 foi executada, sensivelmente ao PK 6+800 da VD, ao eixo do traçado. Esta sondagem é representativa das condições de fundação do aterro na sua parte final.

- S305 (Fase de Concurso): A sondagem S304 foi executada, sensivelmente ao PK 6+850 da VA, a grande proximidade do eixo do traçado. Esta sondagem é representativa das condições de fundação do aterro na sua parte final.
- DPSH110 (Ex-RAVE): Por fim, o DPSH110 foi executado, aparentemente, junto ao limite geológico entre as aluviões e a Unidade de Arada, próximo do PK 6+835, estando afastado cerca de 50 m do eixo do traçado.

Síntese dos resultados da S015A-23: A sondagem S015A-23 interseitou a Unidade de Arada em todo o seu comprimento, a qual manifestou-se na forma de maciço rochoso aflorante de xisto grauvacóide, com grau de alteração W4 a W3/2 e grau de fracturação F5 a F4 (melhoria progressiva do maciço em profundidade). É notória xistosidade subvertical e passagens ricas em filonetes quartzíticos.

Síntese dos resultados do DPSH013A-23: O DPSH013A-23 revela que, no horizonte superficial de terreno, obteve-se resistência dinâmica de ponta (qd) superior a 10 MPa logo a partir do 0,60 m. A “nega” foi obtida aos 1,8 m de profundidade.

Síntese dos resultados da sondagem S304: A sondagem S304 detetou, até à profundidade de 1,5 m, a Unidade de Arada na forma de xisto decomposto (W5), o qual toma a forma de um solo argiloso. Abaixo da referida profundidade, dá-se a passagem a maciço rochoso de muito fraca qualidade, com grau de alteração W4-3 e grau de fracturação F5. Foram efetuados ensaios SPT até ao final da sondagem, tendo-se obtido “negas” em todas as ocasiões (i.e., $N_{SPT} \geq 60$). É visível a xistosidade subvertical característica desta formação. Refere-se a existência de uma camada de aterros de 0,5 m de espessura à superfície.

Síntese dos resultados da sondagem S305: Na sondagem S305 obteve-se um cenário geológico geotécnico em tudo semelhante ao descrito para a sondagem S304, diferindo apenas no facto de, à superfície, não ter sido detetado maciço decomposto (W5).

Síntese dos resultados do DPSH110: O DPSH110 revela a existência de um horizonte superficial de terreno mais descomprimido, sendo os primeiros 0,8 m caracterizados por $q_d < 5$ MPa passando-se a um horizonte caracterizado por q_d variável entre 0,8 e 2,0 MPa até aos 2,0 m de profundidade. A “nega” foi obtida aos 2,4 m de profundidade. Refere-se a existência de uma camada de aterros de 0,3 m de espessura à superfície.

Em suma, embora a prospeção existente permita uma avaliação preliminar das condições de fundação do aterro, nomeadamente através dos ensaios DPSH analisados, mais próximos da zona mais funda do vale, não existem elementos que permitam caracterizar com detalhe as condições de fundação nesta zona.

4.4.1.3 Caracterização da fundação do aterro

Conforme mencionado anteriormente, os dados de prospeção geotécnica existentes não permitem uma caracterização aprofundada das condições de fundação do aterro no seu trecho mais crítico. No entanto, é possível referir os seguintes aspetos.

- Embora existam elementos de prospeção que, aparentemente, interseitaram as aluviões, não é conhecida a sua natureza litológica. Os dados disponíveis sugerem que a sua possança será limitada, sendo que o perfil do vale sugere que a sua extensão será, também, limitada;

- Em adição ao ponto anterior, será sempre expectável a existência de um horizonte superficial de material mais descomprimido/alterado, passível de ser saneado (evidenciado pelo DPSH110), embora este possa não ocorrer em toda a área de implantação do aterro já que, conforme evidenciado pelas sondagens analisadas, deverá ser intersetado maciço rochoso aflorante a sub aflorante no topo das vertentes do vale;
- Pontualmente poderão ocorrer pequenos depósitos de aterro, localizados, que deverão ser alvo de saneamento em toda a sua espessura;
- Tal como no caso anterior, observa-se que nesta zona existirão três aterros contíguos, sendo os aterros das vias ascendente e descendente da Ligação de Canelas mais altos que o aterro da LAV, sob os quais irá passar uma PH com extensão aproximada de 200 m. Será crucial assegurar boas condições de fundação para esta estrutura, já que o seu bom funcionamento é fundamental para a longevidade do aterro;

4.4.1.4 Caracterização de empréstimos

Para este capítulo aplicam-se as considerações apresentadas no subcapítulo 4.2.1.4.

4.4.2 Solução de reforço proposta

Como possíveis soluções para este aterro, no seu trecho crítico, preconizam-se (preliminarmente) as seguintes:

- Fundação dos aterros:
 - Saneamento numa espessura mínima de 1,0m a 2,0 m e substituição por enrocamento envolto em geotêxtil (camada drenante);
 - Escavação de endentamentos no terreno natural, devido à sua elevada pendente;
- Parte inferior do aterro:
 - Aplicação de materiais insensíveis à água (enrocamento) - A aplicação de enrocamento deverá ser considerada até 0,5 m acima do nível máximo de cheia, o qual deverá ser determinado pela especialidade de hidrologia.
- Corpo dos aterros:
 - Execução do aterro com materiais de características equiparáveis à classe QS2 ou QS1 (IRS70719), desde que o material seja caracterizado com valores de CBR > 10%, aplicados em camadas com espessura máxima de 30 cm e compactados a 95 % da baridade seca máxima (a aferir com o ensaio Proctor modificado). No caso de se aplicarem materiais xistentos, de características evolutivas, deverá assegurar-se que a compactação é realizada com cilindros pé-de-carneiro.
- Espaldar dos aterros:
 - Aplicação de materiais com características idênticas ao corpo do aterro, mas tratados com cimento (teor estimado de 3 a 4 %, a validar com estudo de formulação específico). O tratamento com cimento deverá ser executado com uma largura de 7 a 10 m (pano superior e pano inferior do aterro, respetivamente). Estes espaldares

podem também ser executados com materiais granulares britados do tipo ABGE, devendo ser assegurada a drenagem para o exterior do aterro.

- Parte superior do aterro / coroamento
 - Atendendo aos exigentes critérios de deformabilidade a que os Projetos têm de atender, considera-se que também o coroamento e a parte superior do aterro devem ser alvo de tratamento com cimento, nos mesmos termos que o indicado para os espaldares do aterro. Nesta fase preconiza-se uma espessura de 3 m para o coroamento / PSA tratado com cimento. Tal como referido para os espaldares do aterro, também neste caso admite-se a possibilidade de se considerar uma solução equivalente com aplicação de ABGE.

As soluções propostas foram definidas em função da altura do aterro, estando a sua distribuição ao longo do traçado sintetizada na tabela seguinte:

Quadro 5 - Solução de reforço detalhada entre os PK 6+775 - PK 6+813 / PK 6+691 a 6+825 – VA/VD

Aterro Geral					Zona de tratamento				
Via	Km inicial	Km final	Extensão Total (m)	Hmáx (eixo) (m)	Km inicial	Km final	Extensão(m)	H(eixo) (m)	Tipo do Solução
Ascendente	6+671	6+861	190	19,4	6+775	6+790	15	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m
					6+790	6+813	23	Heixo > 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 7m pano superior: e = 10 m Coroamento: e = 3m
Descendente	6+691	6+825	134	21	6+691	6+722	31	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m
					6+722	6+760	38	Heixo > 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 7m pano superior: e = 10 m Coroamento: e = 3m
					6+760	6+825	65	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m

4.4.3 Faseamento construtivo

No que se refere ao processo construtivo, a execução dos aterros propostos, deve obedecer ao estipulado no Caderno de Encargos da Obra. Não obstante, importa referir que:

- Deverá promover-se a utilização de materiais com a mesma origem, e bem assim com comportamento uniforme, ao longo da mesma camada, em particular nos espaldares, não sendo permitida a alternância entre materiais xistosos e graníticos. Também em altura, a alternância destes materiais só é permitida no mínimo a cada 5 camadas (2m);
- Os materiais devem ser dispostos em “cordão”, a cerca de 5 metros da frente da camada, sendo depois espalhados pelo “Buldozer”, com a sua lâmina progressivamente mais baixa, por forma a permitir a boa envolvência dos materiais mais grossos com os mais finos, que se reveste de fundamental importância, em particular, nos materiais xistosos dada a sua forte

anisotropia e heterogeneidade conferida pela xistosidade. Com este procedimento consegue-se ainda uma fragmentação secundária, provocada pela passagem das lagartas do “Buldozer”, bastante benéfica, atendendo ao carácter evolutivo dos xistos; e,

- As camadas não deverão ter espessura superior a 0,40 m e deverão ser sujeitas a uma compactação intensa.

A execução de solo-cimento in situ pressupõe que as camadas dos espaldares sejam feitas em simultâneo com o restante aterro, não havendo diferenciação dessa parte do aterro relativamente ao restante até ao início do processo de enriquecimento do solo com cimento, que ocorre após a compactação da camada (que deverá estar minimamente desempenada).

O cimento deve ser adicionado na proporção ponderal de 3 a 4% (esta percentagem de cimento, por ser relativamente diminuta, mas claramente suficiente, não deverá conduzir a fenómenos de fissuração das camadas tratadas).

As camadas devem ser tratadas em toda a sua espessura (0,40 m), nas larguras apresentadas anteriormente, o que implica, a sua execução por faixas adjacentes de largura limitada à do tambor misturador da recicladora (usualmente com 2,5 m).

A execução de solo-cimento in situ pressupõe a realização sequencial das seguintes etapas construtivas, após a compactação inicial da cada camada:

- Espalhamento do cimento pelo camião-silo;
- Execução da mistura com adição de água, pela recicladora acoplada à cisterna. Quando decorra mais de 4 horas entre a realização de camadas consecutivas de solo-cimento, a recicladora deverá proceder à escarificação da camada abaixo da que se pretende tratar, em 1-2 cm, para que, desta forma, se promova a adequada ligação entre camadas;
- Compactação final com cilindro;
- Espalhamento, até um máximo de 4 horas após a compactação final, de uma nova camada, para execução imediata de solo-cimento ou apenas para cobertura, o que permitirá reduzir a exposição da camada tratada e funcionar como cura (substituindo a rega betuminosa que se utiliza usualmente para esse fim).

A construção dos aterros deve ser antecedida da realização de um trecho experimental de aterro corrente e de outro em solo-cimento, que permitirão confirmar os pressupostos de projeto, aferir a gama de valores de teor em água dos materiais mais adequada à construção dos aterros, e no que se refere ao trecho em solo-cimento, avaliar as resistências obtidas para a percentagem de cimento adicionada e a sua evolução temporal, em particular nos primeiros tempos.

4.4.4 Plano de Instrumentação e Observação

O plano de Instrumentação e Observação permitirá avaliar o desempenho das estruturas durante as fases construtiva e de exploração, mediante o reconhecimento de critérios de alerta, traduzindo diferentes níveis de gravidade, suscitados por medições anómalas das grandezas monitorizadas, os quais poderão indiciar a necessidade de intervenções com vista a garantir a segurança e a economia das obras em causa.

Este Plano foi concebido com base nos condicionamentos próprios da obra, atendendo aos riscos a eles associados.

Por forma a caracterizar o comportamento das estruturas, no que se refere às suas deformações internas e superficiais, o Plano de Instrumentação e Observação contempla a instalação de dispositivos de observação e de instrumentação, a saber:

- Marcas topográficas, para medição das grandezas deslocamento horizontal e deslocamento vertical, na superfície dos aterros;
- Extensómetros, para medição da grandeza deslocamento vertical, no interior dos aterros;
- Inclínómetros, para medição da grandeza deslocamento horizontal, no interior dos aterros.

Os dispositivos de observação previstos serão instalados nos coroamentos, nas banquetas e nas saias dos aterros, de acordo com o descritivo seguinte e representado nas peças desenhadas do projeto.

- Coroamento: Marcas topográficas, inclínómetros e extensómetros;
- Banquetas: Marcas topográficas e inclínómetros;
- Pé do aterro: Marcas topográficas;

4.5 SOLUÇÃO DE REFORÇO A7_1D (PK 7+416 A PK 7+521)

4.5.1 Descrição do trecho em análise

4.5.1.1 Descrição Geral

Nas figuras 19, 20 e 21 apresentam-se excertos do aterro entre o PK 7+377 – 7+731 da via Descendente da Ligação de Canelas, com particular para ênfase para a extensão crítica do aterro (onde $h_{eixo} > 15$ m), em planta sobre ortofotomapa, em planta sobre a cartografia geológica à escala 1:1.000 e em perfil longitudinal. Este aterro desenvolve-se paralelo à LAV e à VA da Ligação de Canelas, as quais desenvolvem-se, neste trecho, em Obra d'arte especial.

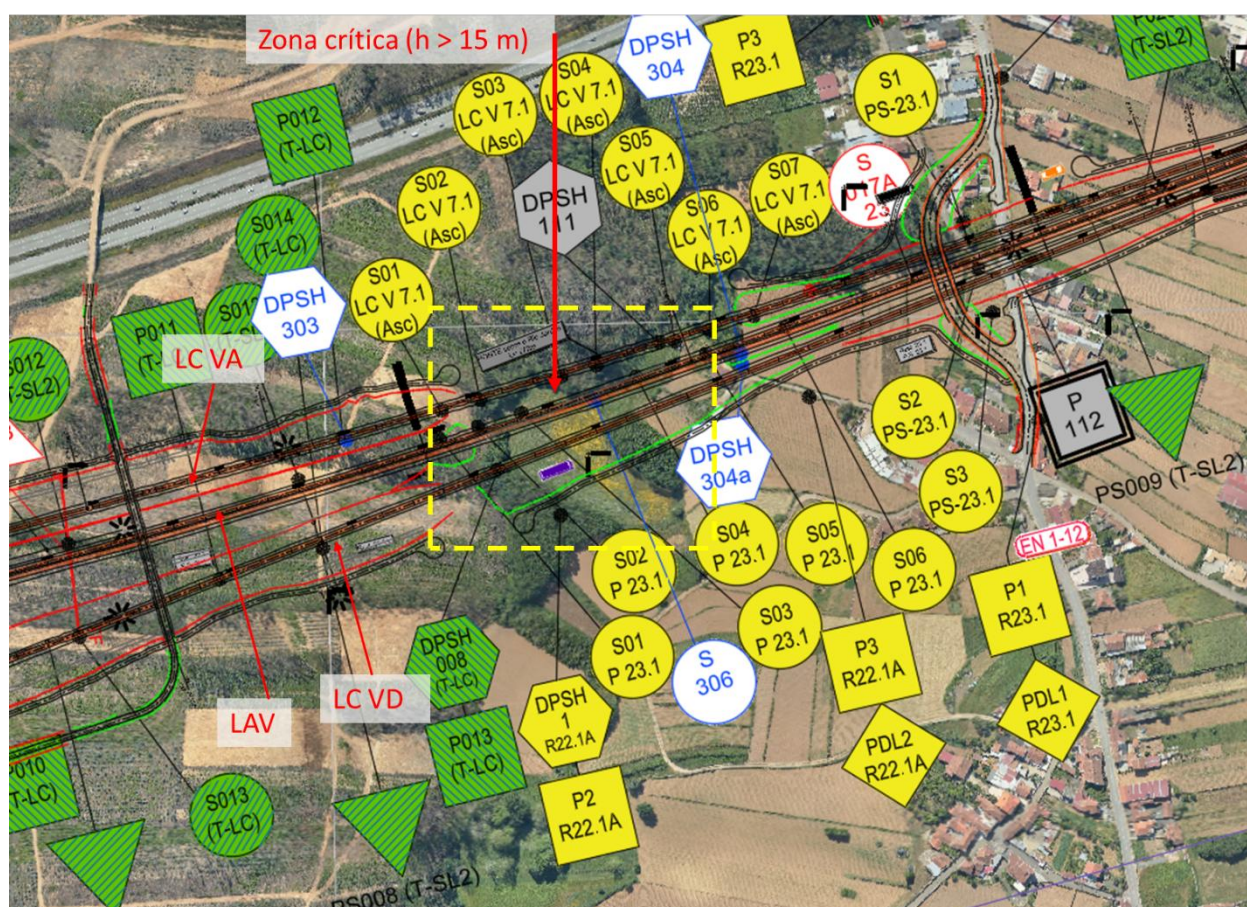


Figura 19 – Representação do aterro entre os PK 7+377 e 7+732 (LC VD) sobre ortofotomapa. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

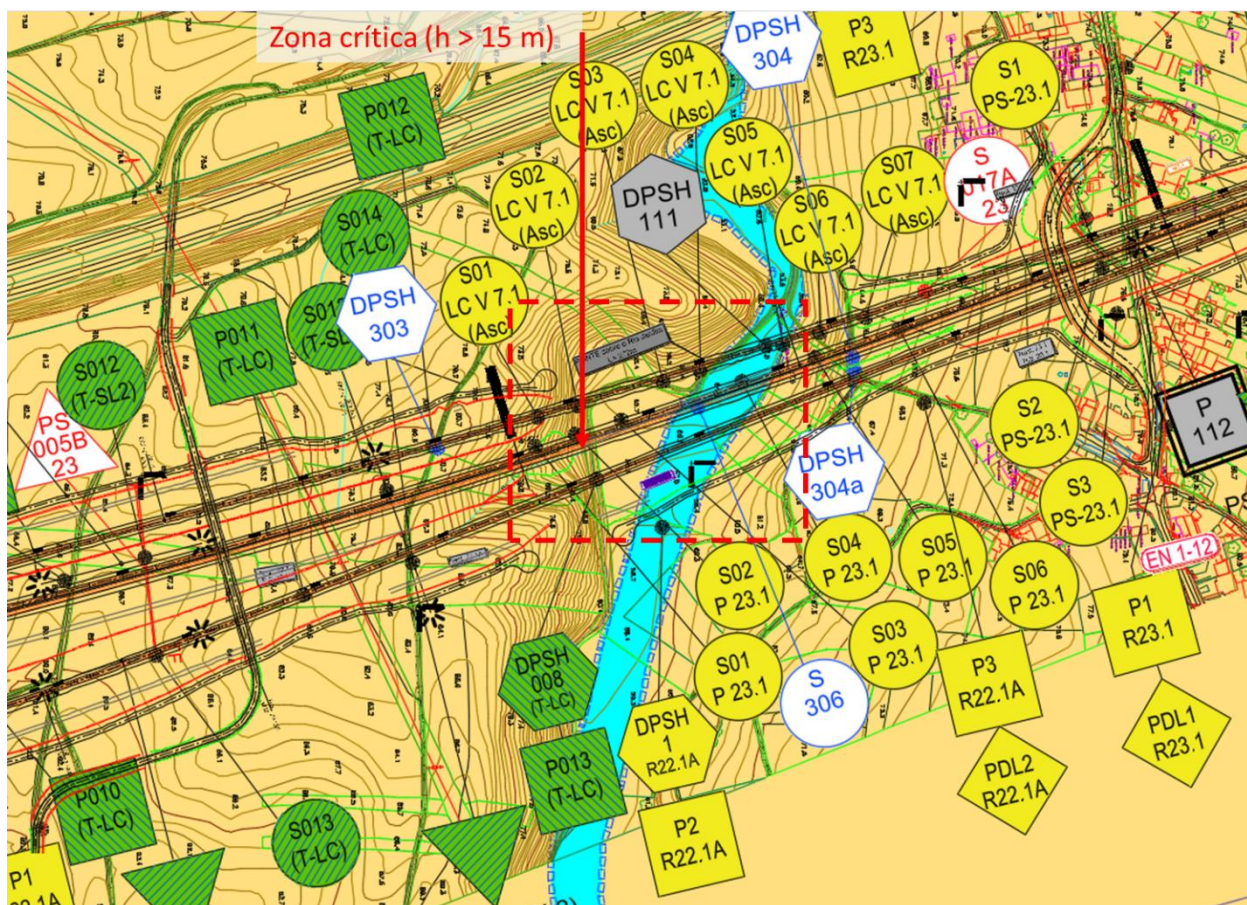


Figura 20 Representação do aterro entre os PK 7+377 e 7+732 (LC VD) sobre cartografia geológica à escala 1:1.000. Ênfase para a zona crítica ($h > 15$ m)

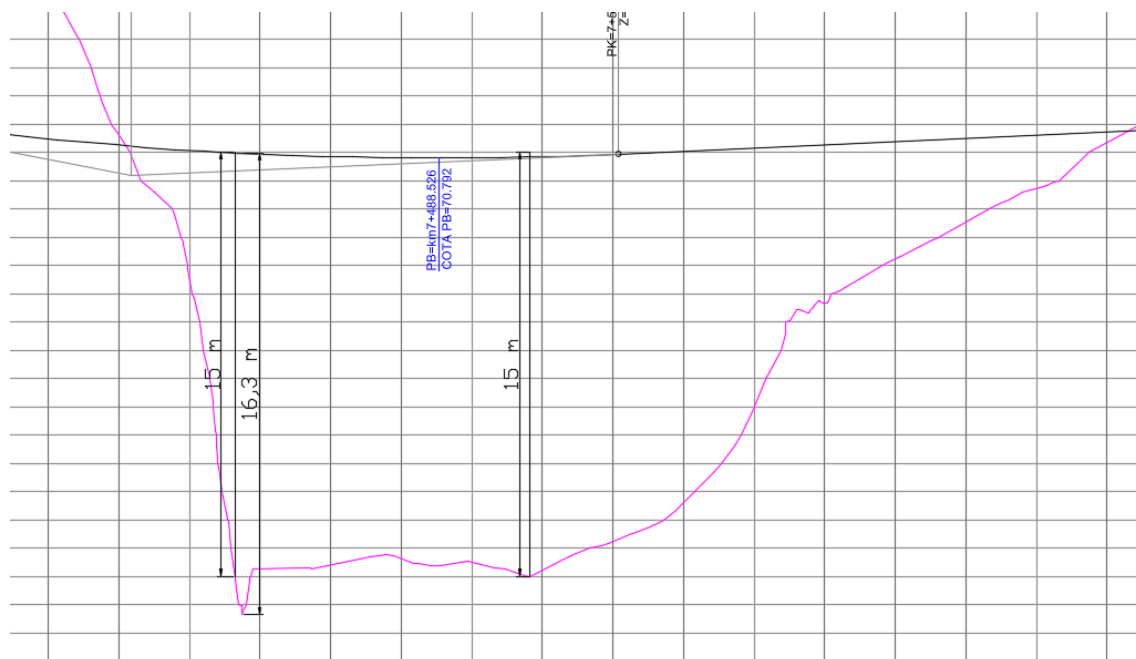


Figura 21 - Representação do trecho mais crítico do aterro (LC VD) em perfil longitudinal escala 1:1.000/1:100 (H/V).

A zona mais crítica do aterro encontra-se situada entre os PK 7+416 e PK 7+521 (105 m), onde a altura ao eixo varia entre 15,0 e 16,3 m, sendo este valor máximo atingido ao PK 7+419.

A zona mais crítica do aterro interessado ocorre no atravessamento de uma linha de água encaixada (Rio Jardim), que flui, junto à base da encosta imediatamente a sul, no sentido E-W. Imediatamente para N da linha de água, numa extensão de aproximadamente 125 m, o terreno apresenta-se bastante aplanado (aparente leito de cheia do Rio Jardim). O trecho mais crítico do aterro termina contra a vertente N do vale do Rio Jardim.

4.5.1.2 Considerações Geológicas e geotécnicas

A formação geológica sobre a qual se desenvolve este aterro corresponde à Unidade de Arada, sendo esta uma formação de cariz metamórfico, representada, essencialmente, por filitos negros e esverdeados constituídos por xistos argilo-quartzo-sericíticos, quartzo-sericito-cloríticos, clorito-sericito-moscovíticos, geralmente físseis, que se apresentam mais ou menos ondulados e contêm intercalações quartzosas lenticulares.

No fundo do vale deverão ser atravessadas aluviões, desconhecendo-se a litologia dos materiais constituintes.

Relativamente à prospeção geotécnica existente, destacam-se os seguintes elementos:

- S306 (fase de concurso): Esta sondagem situa-se ao PK 7+500 da VD, estando situada a curta distância do eixo de traçado (≈ 20 m), sendo representativa do trecho mais crítico do aterro, em zona cartografada como aluviões;
- DPSH304 (fase de concurso): O DPSH304 foi executado, sensivelmente, ao km 7+625 da VD, perto do eixo do traçado, imediatamente após o final do trecho mais crítico;
- DPSH304a (fase de concurso): DPSH situado na mesma localização do DPSH anterior;
- DPSH111 (Ex-Rave): O DPSH111 é mais representativo do traçado da VA e da LAV, estando situado ao PK 7+565 da VD a cerca de 45 m do seu eixo, sendo representativo da zona cartografada como aluviões.

Síntese dos resultados da S306: A sondagem S306 intersetou, superficialmente, 3,0 m de aterros argilosos, com raízes no topo e fragmentos rochosos na sua base, tendo-se obtido N_{SPT} de 24. Subjacentemente, intersetou-se a Unidade de Arada, na forma de xistos luzentes decompostos a muito alterados (W4-5 a W4) e grau de fracturação de F5 a F4/3. A rocha apresenta cor anegrada, aparentando aspeto grafitoso.

Síntese dos resultados do DPSH304: Neste DPSH observou-se que, superficialmente, o aterro é caracterizado por resistência dinâmica de ponta (qd) de aproximadamente 10 MPa até 1,5 m de profundidade, a partir de onde dá-se um aumento de resistência até se atingir a “nega” aos 2,4 m de profundidade.

Síntese dos resultados do DPSH304a: No DPSH304a foram obtidos resultados em tudo similares aos descritos para o DPSH304.

Síntese dos resultados do DPSH111: No DPSH111 intersetaram-se solos menos competentes até aos 1,6 m de profundidade (qd < 10 MPa), tendo-se obtido a “nega” no ensaio aos 1,8 m de profundidade.

Os elementos de prospeção disponíveis permitem alguma caracterização das condições de fundação do aterro em análise, embora sejam mais representativos das condições de fundação dos viadutos previstos para a VA e para a LAV.

4.5.1.3 Caracterização da fundação do aterro

A prospeção disponível é representativa das condições de fundação do aterro, embora em quantidade insuficiente para permitir a sua caracterização completa.

- A sondagem S306, executada a grande proximidade da linha de água, ao eixo da LAV, detetou 3,0 m de aterros argilosos, com constituição rochosa na sua base. A informação disponível até ao momento não permite aferir se estes aterros constituem um enchimento pontual ou se ocorrem com algum desenvolvimento.
- Atendendo aos resultados da sondagem anterior, torna-se difícil de compreender se o horizonte menos competente intersetado no DPSH111 corresponde a aluviões ou aos aterros argilosos mencionados.
- Apesar de, contrariamente aos casos anteriores analisados, o vale não se apresentar tão apertado, é expectável que a espessura de solos aluvionares ou de maciço mais descomprimido seja reduzida. No caso concreto dos terrenos da Unidade de Arada, é expectável que, superficialmente, na zona mais baixa, ocorra na forma de solo residual silto-argiloso com forte componente pedregosa;
- Refere-se, também, que de acordo com a fotografia aérea, alguns dos terrenos intersetados aparentam ser utilizados para cultivo, pelo que a espessura do horizonte orgânico poderá ser significativa;

4.5.1.4 Caracterização de empréstimos

Para este capítulo aplicam-se as considerações apresentadas no subcapítulo 4.2.1.4.

4.5.2 Solução de reforço proposta

Como possíveis soluções para este aterro, no seu trecho crítico, preconizam-se (preliminarmente) as seguintes:

- Fundação do aterro:
 - Saneamento numa espessura variável de até 3,0 m e substituição por enrocamento envolto em geotêxtil (camada drenante);
 - De acordo com a planta de traçado, aparentemente, não está a ser prevista nenhuma PH para canalizar a linha de água existente sob o aterro. Deverá prever-se uma estrutura para este fim;
- Parte inferior do aterro:
 - Aplicação de materiais insensíveis à água (enrocamento) - A aplicação de enrocamento deverá ser considerada até 0,5 m acima do nível máximo de cheia, o qual deverá ser determinado pela especialidade de hidrologia.

- Corpo do aterro:
 - Execução do aterro com materiais de características à classe QS2 ou QS1 (IRS70719), desde que o material seja caracterizado com valores de CBR > 10%, aplicados em camadas com espessura máxima de 30 cm e compactados a 95 % da baridade seca máxima (a aferir com o ensaio Proctor modificado). No caso de se aplicarem materiais xistentos, de características evolutivas, deverá assegurar-se que a compactação é realizada com cilindros pé-de-carneiro.
- Espaldar do aterro:
 - Aplicação de materiais com características idênticas ao corpo do aterro, mas tratados com cimento (teor estimado de 3 a 4 %, a validar com estudo de formulação específico). O tratamento com cimento deverá ser executado com uma largura de 7 a 10 m (pano superior e pano inferior do aterro, respetivamente). Estes espaldares podem também ser executados com materiais granulares britados do tipo ABGE, devendo ser assegurada a drenagem para o exterior do aterro.
- Parte superior do aterro / coroamento
 - Atendendo aos exigentes critérios de deformabilidade a que os Projetos têm de atender, considera-se que também o coroamento e a parte superior do aterro devem ser alvo de tratamento com cimento, nos mesmos termos que o indicado para os espaldares do aterro. Nesta fase preconiza-se uma espessura de 3 m para o coroamento / PSA tratado com cimento. Tal como referido para os espaldares do aterro, também neste caso admite-se a possibilidade de se considerar uma solução equivalente com aplicação de ABGE.

As soluções adotadas foram estabelecidas de acordo com a altura dos aterros, sendo a sua distribuição ao longo do traçado apresentada na tabela abaixo:

Quadro 6 - Solução de reforço detalhada entre os PK 7+416 - PK 7+521 – VD

Aterro Geral					Zona de tratamento				
Via	Km inicial	Km final	Extensão Total (m)	Hmáx (eixo) (m)	Km inicial	Km final	Extensão(m)	H(eixo) (m)	Tipo do Solução
Descendente	7+377	7+731	354	16	7+416	7+521	105	15 < Heixo < 17,5 m	Solo cimento pano inferior: e = 5m pano superior: e = 8 m Coroamento: e = 3m

4.5.3 Faseamento construtivo

No que se refere ao processo construtivo, a execução dos aterros propostos, deve obedecer ao estipulado no Caderno de Encargos da Obra. Não obstante, importa referir que:

- Deverá promover-se a utilização de materiais com a mesma origem, e bem assim com comportamento uniforme, ao longo da mesma camada, em particular nos espaldares, não sendo permitida a alternância entre materiais xistosos e graníticos. Também em altura, a alternância destes materiais só é permitida no mínimo a cada 5 camadas (2m);
- Os materiais devem ser dispostos em “cordão”, a cerca de 5 metros da frente da camada, sendo depois espalhados pelo “Buldozer”, com a sua lâmina progressivamente mais baixa,

por forma a permitir a boa envolvimento dos materiais mais grossos com os mais finos, que se reveste de fundamental importância, em particular, nos materiais xistosos dada a sua forte anisotropia e heterogeneidade conferida pela xistosidade. Com este procedimento consegue-se ainda uma fragmentação secundária, provocada pela passagem das lagartas do “Buldozer”, bastante benéfica, atendendo ao carácter evolutivo dos xistos; e,

- As camadas não deverão ter espessura superior a 0,40 m e deverão ser sujeitas a uma compactação intensa.

A execução de solo-cimento in situ pressupõe que as camadas dos espaldares sejam feitas em simultâneo com o restante aterro, não havendo diferenciação dessa parte do aterro relativamente ao restante até ao início do processo de enriquecimento do solo com cimento, que ocorre após a compactação da camada (que deverá estar minimamente desempenada).

O cimento deve ser adicionado na proporção ponderal de 3 a 4% (esta percentagem de cimento, por ser relativamente diminuta, mas claramente suficiente, não deverá conduzir a fenómenos de fissuração das camadas tratadas).

As camadas devem ser tratadas em toda a sua espessura (0,40 m), nas larguras apresentadas anteriormente, o que implica, a sua execução por faixas adjacentes de largura limitada à do tambor misturador da recicladora (usualmente com 2,5 m).

A execução de solo-cimento in situ pressupõe a realização sequencial das seguintes etapas construtivas, após a compactação inicial da cada camada:

- Espalhamento do cimento pelo camião-silo;
- Execução da mistura com adição de água, pela recicladora acoplada à cisterna. Quando decorra mais de 4 horas entre a realização de camadas consecutivas de solo-cimento, a recicladora deverá proceder à escarificação da camada abaixo da que se pretende tratar, em 1-2 cm, para que, desta forma, se promova a adequada ligação entre camadas;
- Compactação final com cilindro; e,
- Espalhamento, até um máximo de 4 horas após a compactação final, de uma nova camada, para execução imediata de solo-cimento ou apenas para cobertura, o que permitirá reduzir a exposição da camada tratada e funcionar como cura (substituindo a rega betuminosa que se utiliza usualmente para esse fim).

A construção dos aterros deve ser antecedida da realização de um trecho experimental de aterro corrente e de outro em solo-cimento, que permitirão confirmar os pressupostos de projeto, aferir a gama de valores de teor em água dos materiais mais adequada à construção dos aterros, e no que se refere ao trecho em solo-cimento, avaliar as resistências obtidas para a percentagem de cimento adicionada e a sua evolução temporal, em particular nos primeiros tempos.

4.5.4 Plano de Instrumentação e Observação

O plano de Instrumentação e Observação permitirá avaliar o desempenho das estruturas durante as fases construtiva e de exploração, mediante o reconhecimento de critérios de alerta, traduzindo diferentes níveis de gravidade, suscitados por medições anómalas das grandezas monitorizadas, os

quais poderão indiciar a necessidade de intervenções com vista a garantir a segurança e a economia das obras em causa.

Este Plano foi concebido com base nos condicionamentos próprios da obra, atendendo aos riscos a eles associados.

Por forma a caracterizar o comportamento das estruturas, no que se refere às suas deformações internas e superficiais, o Plano de Instrumentação e Observação contempla a instalação de dispositivos de observação e de instrumentação, a saber:

- Marcas topográficas, para medição das grandezas deslocamento horizontal e deslocamento vertical, na superfície dos aterros;
- Extensómetros, para medição da grandeza deslocamento vertical, no interior dos aterros;
- Inclínómetros, para medição da grandeza deslocamento horizontal, no interior dos aterros.

Os dispositivos de observação previstos serão instalados nos coroamentos, nas banquetas e nas saias dos aterros, de acordo com o descritivo seguinte e representado nas peças desenhadas do projeto.

- Coroamento: Marcas topográficas, inclínómetros e extensómetros;
- Banquetas: Marcas topográficas e inclínómetros;
- Pé do aterro: Marcas topográficas;

5 VERIFICAÇÃO DE ASSENTAMENTOS EM ATERROS TIPO DE GRANDE ALTURA

5.1 Estados Limites de Utilização (Assentamentos)

De acordo com o definido na GR.IT.GEO.011 deve ser feita uma estimativa, devidamente justificada, do valor dos assentamentos esperados a longo prazo e propostas soluções que garantam as condições de funcionalidade da superestrutura ferroviária nos aterros com alturas da ordem dos 10 m ou superiores, constituídos por materiais coesivos e/ou evolutivos e com alturas da ordem dos 15 m ou superiores nos aterros com soluções de reforço, no âmbito da verificação aos Estados Limites de Utilização

Os assentamentos totais a longo prazo (s_t) deverão ser obtidos pela soma das seguintes parcelas:

- Assentamento imediato (s_i) correspondente à fase de construção
- Assentamento por consolidação primária (s_c) após construção
- Assentamento por consolidação secundária ou fluência (s_d)

Deverão ser tidos em consideração os assentamentos por consolidação ao nível do material de fundação, os assentamentos por consolidação do próprio aterro e os assentamentos induzidos pelo tráfego ferroviário. Neste caso foram analisados os assentamentos por fluência do próprio aterro.

Segundo o CE os assentamentos imediatos que ocorram nas vias em exploração, durante os trabalhos de terraplenagem para alargamento de aterros existentes, deverão cumprir com as tolerâncias de ação imediata dos valores de nivelamento longitudinal previstos na **GR.IT.VIA.018**.

Os assentamentos nos aterros, para o período de vida útil atribuído à plataforma de via, deverão ser limitados a 10 cm em plena via, ao valor admissível para a estrutura no início do bloco técnico e no final do bloco técnico às tolerâncias de intervenção estabelecidas na GR.IT.VIA.018 para nivelamento longitudinal em função da velocidade.

Como valores de referência/comparativo temos:

- Systra, guidelines 2023 - Como referência, devem considera-se como valores máximos de assentamento total dos aterros 30mm a 100mm, com uma taxa anual de deformação inferior a 5-10 mm/ano.
- NT.IP. infraestruturas. v03 - Os assentamentos totais calculados após entrada em exploração da obra, não deverão exceder nunca os 25 mm junto a obras de arte e hidráulicas e os 10 cm em plena via

5.1.1 Cálculo dos assentamentos imediatos (s_i)

O valor do assentamento imediato pode ser estimado, em termos simplificados supondo para a fundação um comportamento elástico linear isotrópico e meio semi-infinito a volume constante. Assim, este pode ser calculado assimilando a ação da fundação a uma tensão vertical uniforme (q) atuando sobre uma determinada área, assim como as características elásticas do maciço, constantes em

profundidade. Com base na lei de Hooke, o assentamento imediato (s_i) à superfície pode ser obtido a partir da equação 2-8, definida em Matos Fernandes (2008):

$$s_i = q \cdot (B(1-\nu^2)/E_s \cdot I_p$$

Onde:

q – Pressão aplicada no terreno;

B – Menor dimensão do elemento de fundação;

ν – Coeficiente de Poisson;

E_s – Módulo de deformabilidade do solo;

I_p – Valor adimensional, função da geometria da área carregada, profundidade da fundação e do ponto sob o qual se pretende obter o assentamento.

5.1.2 Cálculo dos assentamentos por consolidação primária (s_c)

A consolidação primária (ou hidrodinâmica) está associada à expulsão de água dos vazios do solo saturado, sendo particularmente relevante em solos argilosos de baixa permeabilidade. O cálculo é feito com base na “Teoria da Consolidação” de Terzaghi, utilizando-se a equação referente a solos normalmente consolidados (NC):

$$s_c = h_0 / (1+e_0) \cdot C_c \cdot \text{Log}_{10} ((\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v)/\sigma'_{v0})$$

Onde,

h_0 – espessura inicial da camada;

e_0 – índice de vazios inicial;

C_c – índice de compressibilidade;

σ'_p – tensão de pré-consolidação;

σ'_{v0} – tensão efetiva vertical de repouso;

$\Delta\sigma'_v$ – acréscimo da tensão efetiva vertical, devido ao carregamento;

Para a avaliação do tempo de consolidação, pode recorrer-se à equação do fator tempo, admitindo o excesso de pressão neutra inicial constante ao longo da espessura do estrato.

$$T = (C_v \cdot t) / H^2$$

onde,

T – Fator tempo;

H – Maior distância que uma partícula de água tem de percorrer para abandonar o estrato em consolidação em direção a uma fronteira drenante;

Cv – Valor do coeficiente de consolidação;

t – Instante ao fim do qual se pretende determinar o assentamento.

Assume-se que uma taxa de consolidação de 90%, é suficiente para estimar o tempo necessário para o assentamento por consolidação.

5.1.3 Cálculo dos assentamentos por consolidação secundária (fluência) (s_d)

Após o término da consolidação primária, o solo continua a sofrer deformações ao longo do tempo, mesmo sob tensão constante. Esse processo é conhecido como consolidação secundária ou "creep", especialmente significativo em argilas orgânicas e solos altamente compressíveis. A estimativa desse assentamento é dada por:

$$\Delta h = C_\alpha / (1+e_0) \cdot H \cdot \log (t/t_p)$$

Onde,

C_α – Coeficiente de fluência;

e_0 – Índice de vazios do solo;

H – Espessura da camada de solo;

t, t_p – Tempos inicial e final do período considerado. Tempo inicial coincide com o término da consolidação primária.

O valor de C_α pode ser determinado diretamente através de ensaios edométricos de longa duração, que permitem medir a deformação associada à compressão secundária sob carga constante. Alternativamente, este parâmetro pode ser estimado por correlações empíricas com base no índice de compressibilidade C_c .

Neste contexto, é comum assumir uma relação proporcional entre o coeficiente de fluência e o índice de compressibilidade, expressa pela razão C_α/C_c , cujo intervalo típico varia entre 0,025 e 0,10, consoante a natureza e a sensibilidade do solo. Esta gama de valores tem sido observada para uma variedade de solos naturais, incluindo argilas altamente sensíveis, conforme documentado por vários autores.

5.2 Modelos Numéricos

Neste capítulo, apresenta-se a análise numérica de tensão-deformação para uma abordagem global estática para situações a longo prazo, de forma a estimar a magnitude dos assentamentos por consolidação secundária (fluência) do corpo do aterro, considerando diferentes cenários em função da altura dos aterros e com e sem implementação de soluções de reforço de zonas tratadas. As análises foram realizadas com o software PLAXIS 2D (versão 2016), utilizando o método dos elementos finitos.

Foram considerados diferentes cenários de dimensionamento para os aterros ferroviários, avaliando-se situações com taludes de 20, 15 e 10 metros de altura sem qualquer solução de reforço com solo-cimento, bem como cenários com taludes de 20 e 15 metros de altura com inclusão de reforço por meio de zonas tratadas com solo-cimento nos espaldares.

A sobrecarga ferroviária foi definida com base no modelo de cargas LM71, aplicável à combinação frequente de ações nos Estados Limites de Serviço, tendo sido afetada por um coeficiente de classificação das cargas $\alpha=1,33$ e por um fator de segurança do modelo de carga de 1,50, de forma a refletir adequadamente os efeitos do tráfego ferroviário de alta intensidade e velocidade.

Relativamente aos materiais utilizados, o corpo do aterro será modelado com solos da classe QS2 ou superior, de acordo com as especificações técnicas do LNEC (IRS 70719). A fundação dos aterros é composta por materiais de elevada resistência e baixa deformabilidade, representando uma fundação de natureza rochosa de boa qualidade. Nos cenários com reforço, prevê-se a utilização de solo tratado com cimento nos espaldares, com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico e a estabilidade global da estrutura.

Quanto à geometria dos taludes, foi adotada uma inclinação geral de 1V:2H (vertical: horizontal). Para os aterros com alturas superiores a 10 metros, prevê-se a introdução de uma banquetta com 3,0 metros de largura, com a finalidade de facilitar a execução faseada e garantir condições adequadas de estabilidade durante e após a construção.

5.2.1 ATERROS H≤10,0M

No caso dos aterros com alturas iguais ou inferiores a 10,0 não está previsto a implementação de soluções de reforço. Por isso, foi simulado para um único cenário, aterro sem solução de reforço.

5.2.1.1 Descrição do modelo de cálculo

O modelo de cálculo é constituído pelos seguintes elementos:

- Elementos finitos triangulares com 15 nós utilizados na simulação do solo;
- Carga uniformemente distribuída vertical na superfície do topo do talude de 50 kN/m (25x1,33x1.5);
- As condições de fronteira do modelo foram definidas de forma a ter um conjunto de apoios fixos na base, e apoios móveis nas zonas laterais, permitindo os deslocamentos verticais na zona lateral.

O solo de fundação foi modelado com o modelo constitutivo Mohr-Coulomb, os materiais constituintes da superestrutura foram modelados com o modelo constitutivo Elástico-linear, em regime drenado. Enquanto que o material de aterro foi modelado com o modelo constitutivo Soft Soil Creep (SSC), que consiste numa extensão do modelo constitutivo Soft Soil (SS) com a característica adicional de conseguir reproduzir o comportamento do solo quando este se encontra no estado elástico, ou seja, tem em consideração o efeito da fluência ao longo do tempo. A rotura do solo foi avaliada com base no critério de Mohr-Coulomb.

No quadro seguinte apresentam-se os valores característicos dos parâmetros geotécnicos de cada uma das camadas do solo.

Quadro 7 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_{v2} (MPa)	C_c	C_α	$C_\alpha/(1+e_0)$
Corpo aterro (SSC)	18	5	32	60	0,03	0,0015	0,0023
Fundação (MC)	19	200	500	200	-	-	-

De forma a reproduzir o faseamento construtivo previsto em fase de construção e de serviço, este foi modelado através de várias fases de construção do aterro, seguidas da ativação da sobrecarga estática ferroviária prevista para cálculo da consolidação, sendo considerado o seguinte faseamento genérico simplificado:

Quadro 8 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS

Faseamento Construtivo PLAXIS	
Fases	Descrição
Inicial	Ativação do estado de tensão inicial instalado do maciço
1-2	Construção do aterro (Camadas com espessura de 5,0m com duração de 30 dias por fase)
3	Construção do aterro (Superestrutura com duração de 30 dias)
4	Construção do aterro (em repouso com duração de 30 dias)
5	Ativação da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 1 dia)
6	Permanecia da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 100 anos)

Optou-se por uma altura máxima de construção do aterro de 5,0 m por fase, com uma duração de 30 dias, onde se assume que a magnitude dos assentamentos dos aterros que ocorrem nesta fase são compensados no final da construção.

A análise na fase de serviço foi realizada para uma duração de 100 anos, correspondente à duração da vida útil da estrutura.

Na figura seguinte apresenta-se a malha de elementos finitos adotada no final da fase de serviço (Fase 6).

AVANTE
NORTE

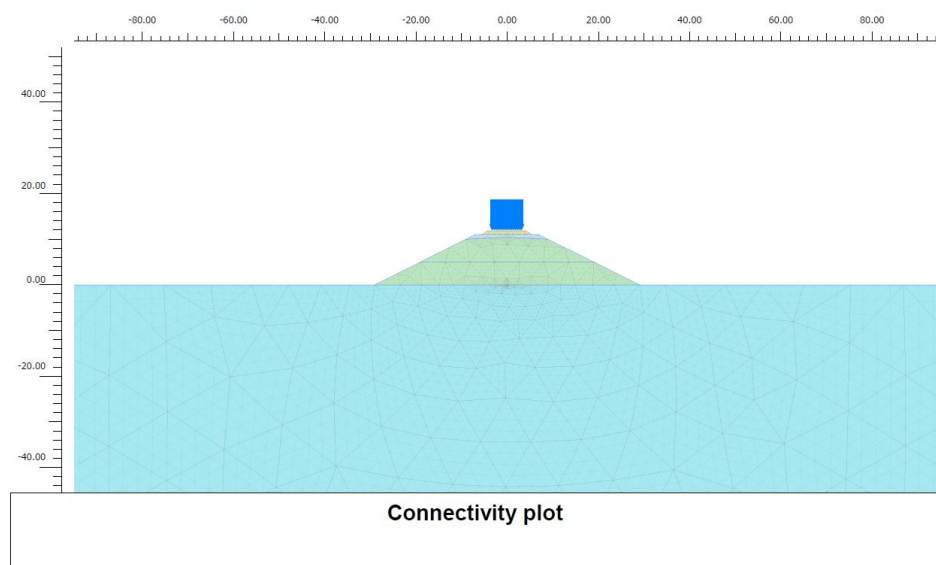


Figura 22 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase6)

5.2.1.2 Resultados obtidos

Apresentam-se as figuras com os deslocamentos horizontais e verticais verificados, valores acumulativos obtidos na última fase, após os 100 anos (Fase 6).

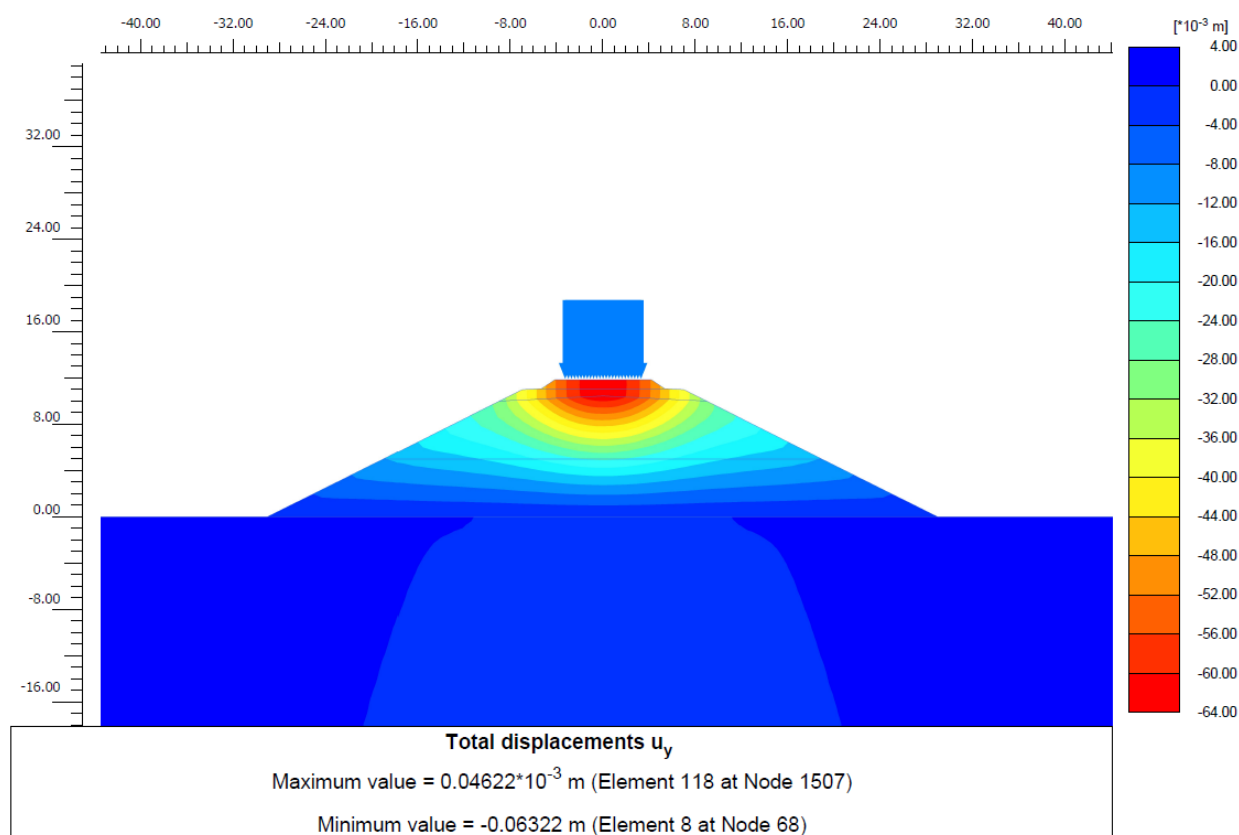


Figura 23 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 6)

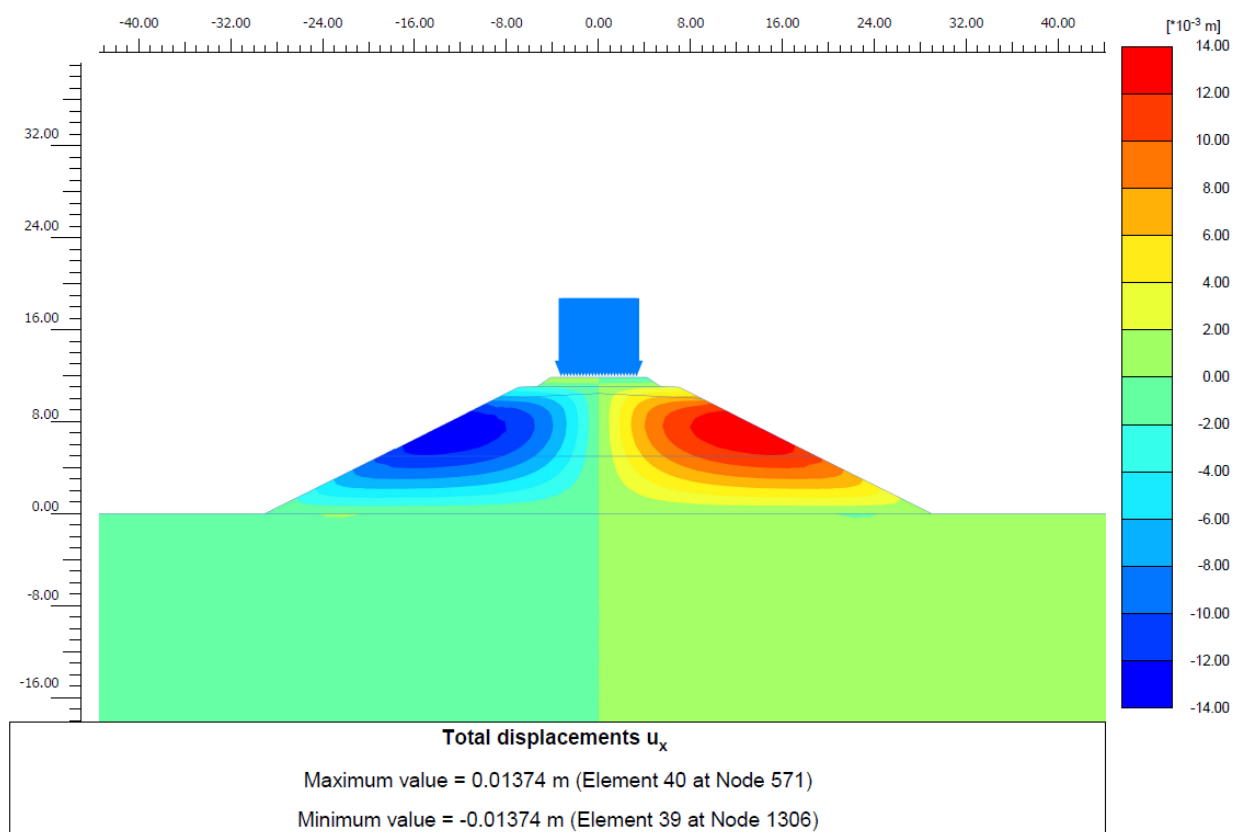


Figura 24 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 6)

De seguida apresentam-se os gráficos da estimativa dos assentamentos em função do tempo após entrada de serviço da linha, bem como as taxas de deformação referentes a 0-6 meses, anuais nos primeiros 5 anos, entre 5-10 anos, 10-50 anos e entre 50-100 anos.

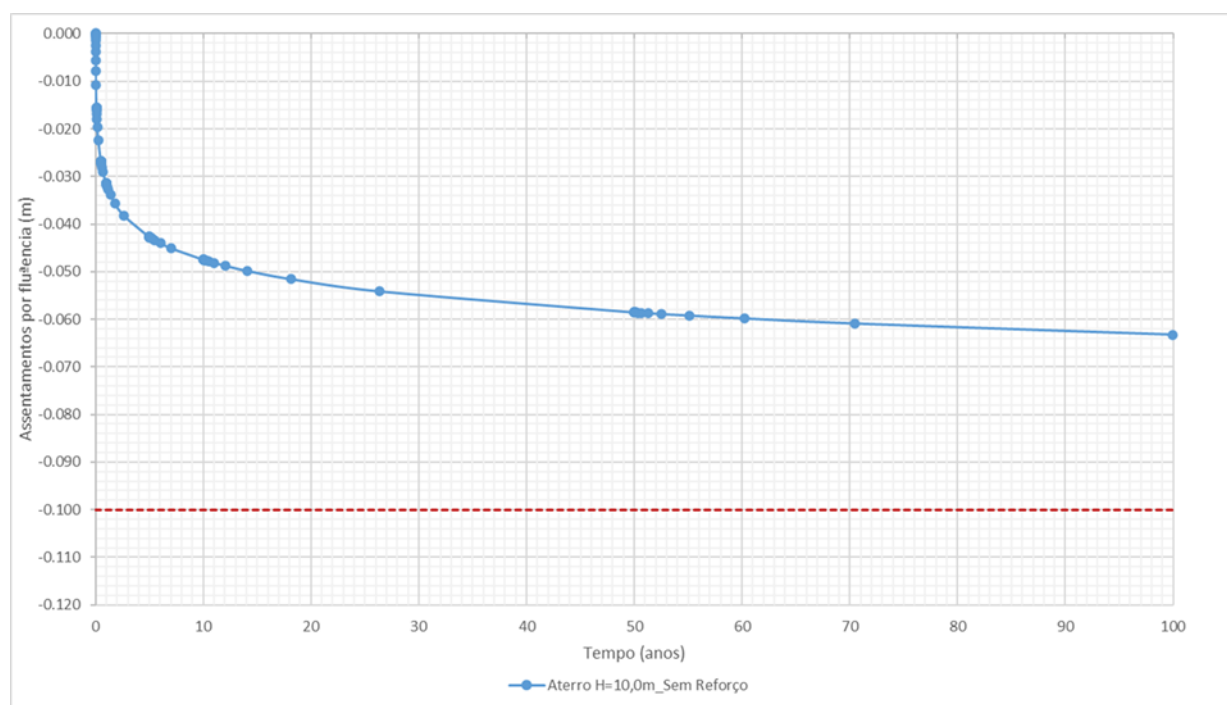


Figura 25 – Aterro $H \leq 10,0$ - Gráfico dos assentamentos em função do tempo

Quadro 9 – Aterro H≤10,0 – Taxas de Deformação

H=10m s/ Reforço	
Ano	Taxa de deformação (mm/ano)
1	32 (>10)
2	5
3	3
4	3
5	2
10	1
50	0
100	0

5.2.2 ATERROS H≤15,0M

No caso dos aterros com alturas iguais ou inferiores a 15,0 m foram considerados dois cenários, nomeadamente o aterro sem e com a implementação da solução de reforço.

5.2.2.1 Descrição do modelo de cálculo

O modelo de cálculo é constituído pelos seguintes elementos:

- Elementos finitos triangulares com 15 nós utilizados na simulação do solo;
- Carga uniformemente distribuída vertical na superfície do topo do talude de 50 kN/m (25x1,33x1.5);
- As condições de fronteira do modelo foram definidas de forma a ter um conjunto de apoios fixos na base, e apoios móveis nas zonas laterais, permitindo os deslocamentos verticais na zona lateral.

O solo de fundação foi modelado com o modelo constitutivo Mohr-Coulomb, os materiais constituintes da superestrutura foram modelados com o modelo constitutivo Elástico-linear, e o solo-cimento com o modelo constitutivo Hardening Soil (HS), em regime drenado. Enquanto que o material de aterro foi modelado com o modelo constitutivo Soft Soil Creep (SSC), que consiste numa extensão do modelo constitutivo Soft Soil (SS) com a característica adicional de conseguir reproduzir o comportamento do solo quando este se encontra no estado elástico, ou seja, tem em consideração o efeito da fluência ao longo do tempo. A rotura do solo foi avaliada com base no critério de Mohr-Coulomb.

No quadro seguinte apresentam-se os valores característicos dos parâmetros geotécnicos de cada uma das camadas do solo.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_{v2} (MPa)	C_c	C_α	$C_\alpha/(1+e_0)$
Corpo Aterro (SSC)	18	5	32	60	0,03	0,0015	0,0023
Fundação (MC)	19	200	500	200	-	-	-
Solo-cimento (HS)	21	200	38	1000	-	-	-

Quadro 10 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos

De forma a reproduzir o faseamento construtivo previsto em fase de construção e de serviço, este foi modelado através de várias fases de construção do aterro, seguidas da ativação da sobrecarga estática ferroviária prevista para cálculo da consolidação secundária, sendo considerado o seguinte faseamento genérico simplificado.

Faseamento Construtivo PLAXIS	
Fases	Descrição
Inicial	Ativação do estado de tensão inicial instalado do maciço
1-3	Construção do aterro (Camadas com espessura de 5,0m com duração de 30 dias por fase)
4	Construção do aterro (Superestrutura com duração de 30 dias)
5	Construção do aterro (em repouso com duração de 30 dias)
6	Ativação da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 1 dia)
7	Permanecia da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 100 anos)

Quadro 11 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS

Optou-se por uma altura máxima de construção do aterro de 5,0 m por fase, com uma duração de 30 dias, onde se assume que a magnitude dos assentamentos dos aterros que ocorrem nesta fase são compensados no final da construção.

A análise na fase de serviço foi realizada para uma duração de 100 anos, correspondente à duração da vida útil da estrutura.

Na figura seguinte apresenta-se a malha de elementos finitos adotada no final da fase de serviço (Fase 7).

AVANTE
NORTE

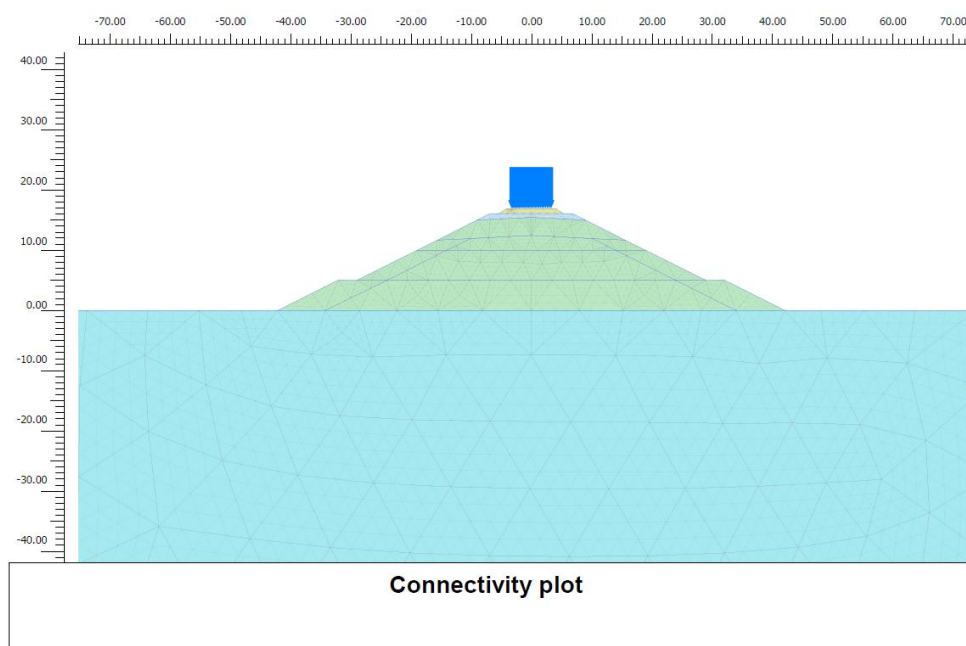


Figura 26 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase7)

5.2.2.2 Resultados obtidos

Apresentam-se as figuras com os deslocamentos horizontais e verticais verificados, valores acumulativos obtidos na última fase, após os 100 anos (Fase 7).

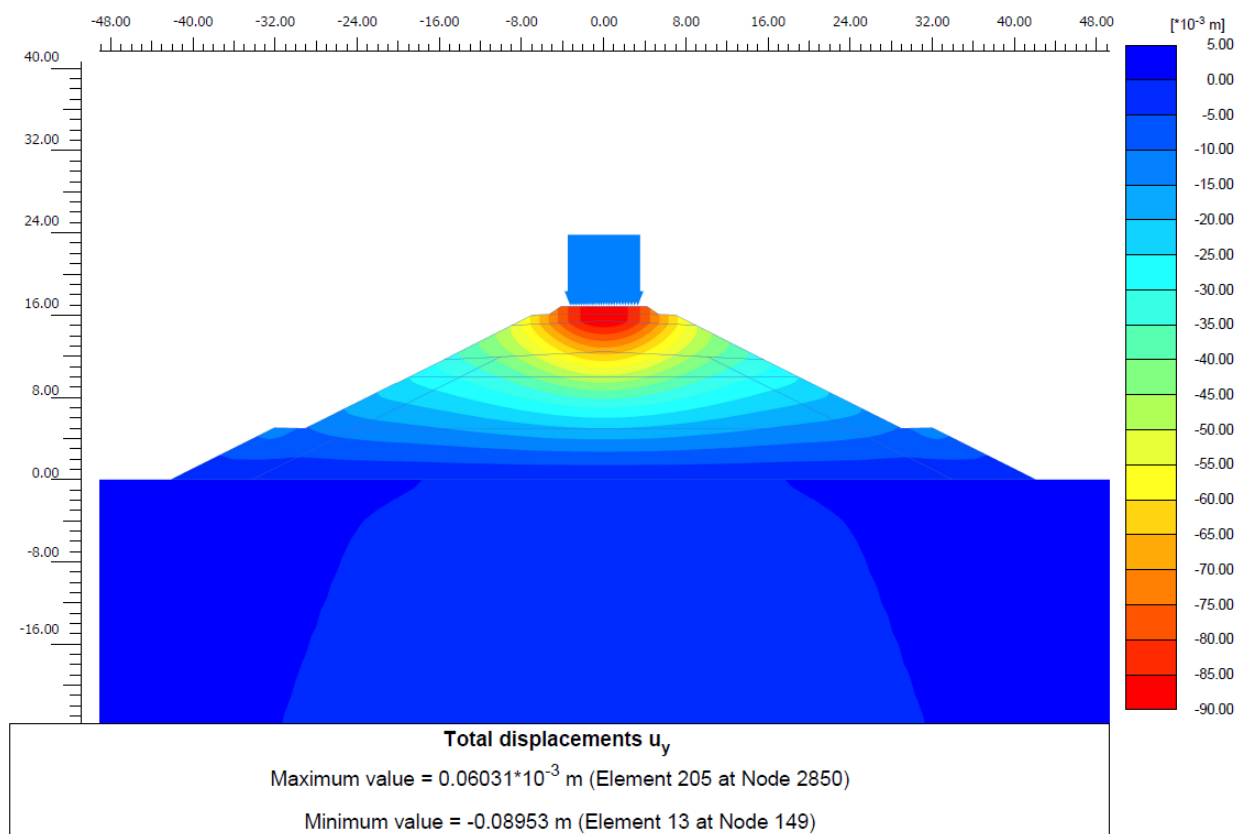


Figura 27 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Sem Reforço

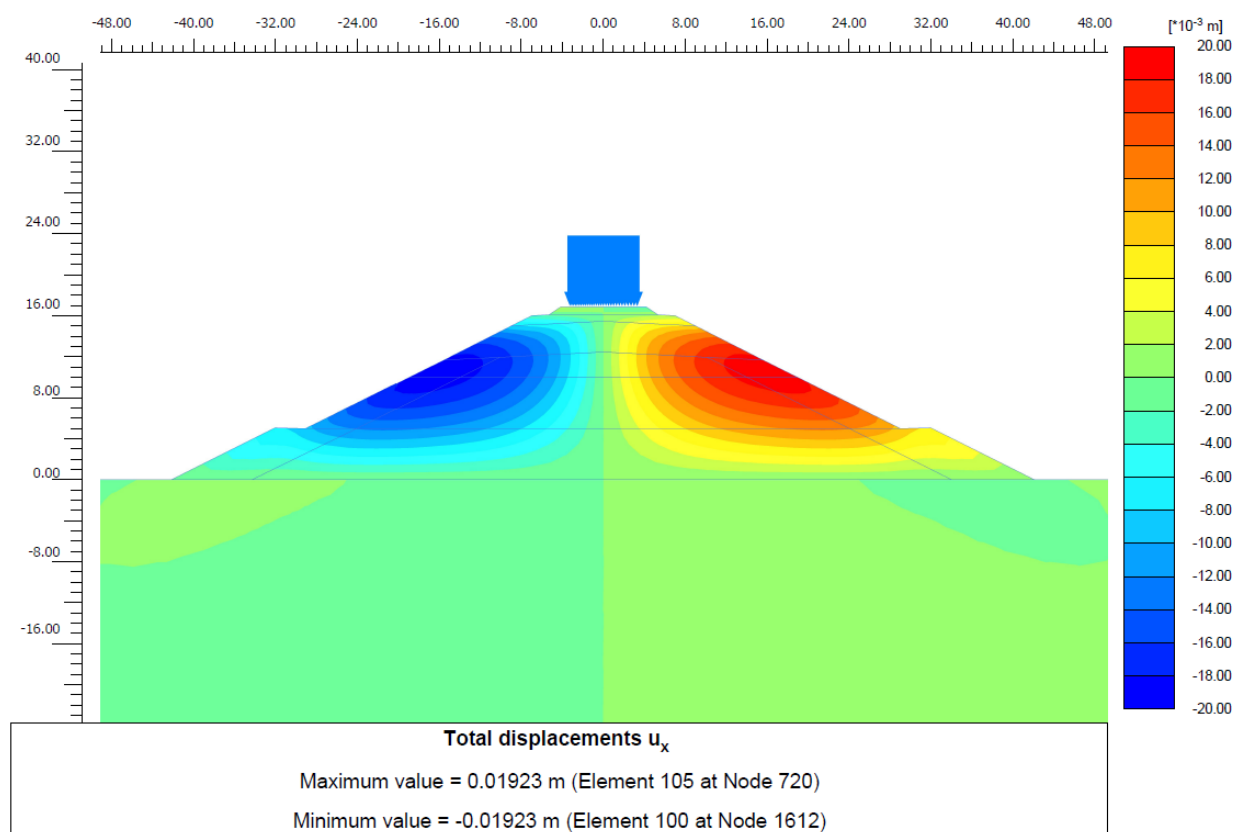


Figura 28 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Sem Reforço

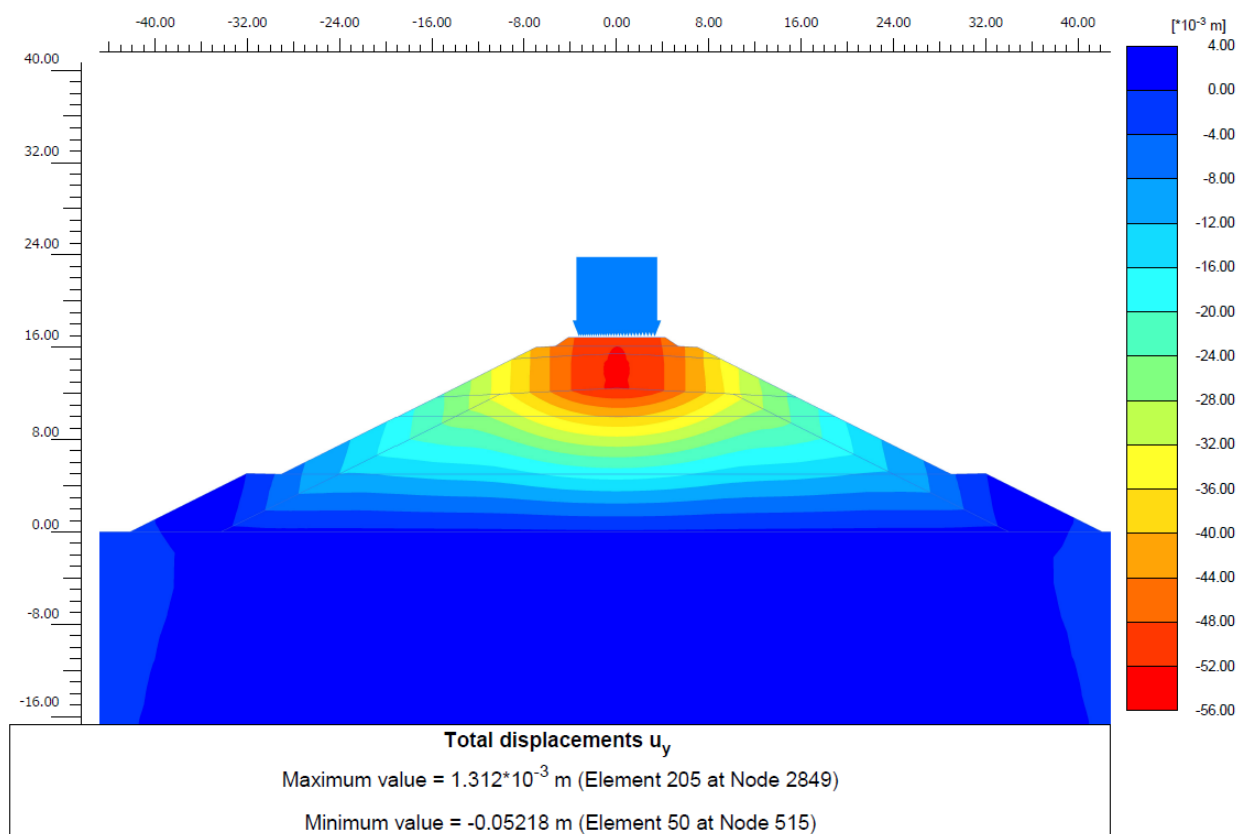


Figura 29 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Com Reforço

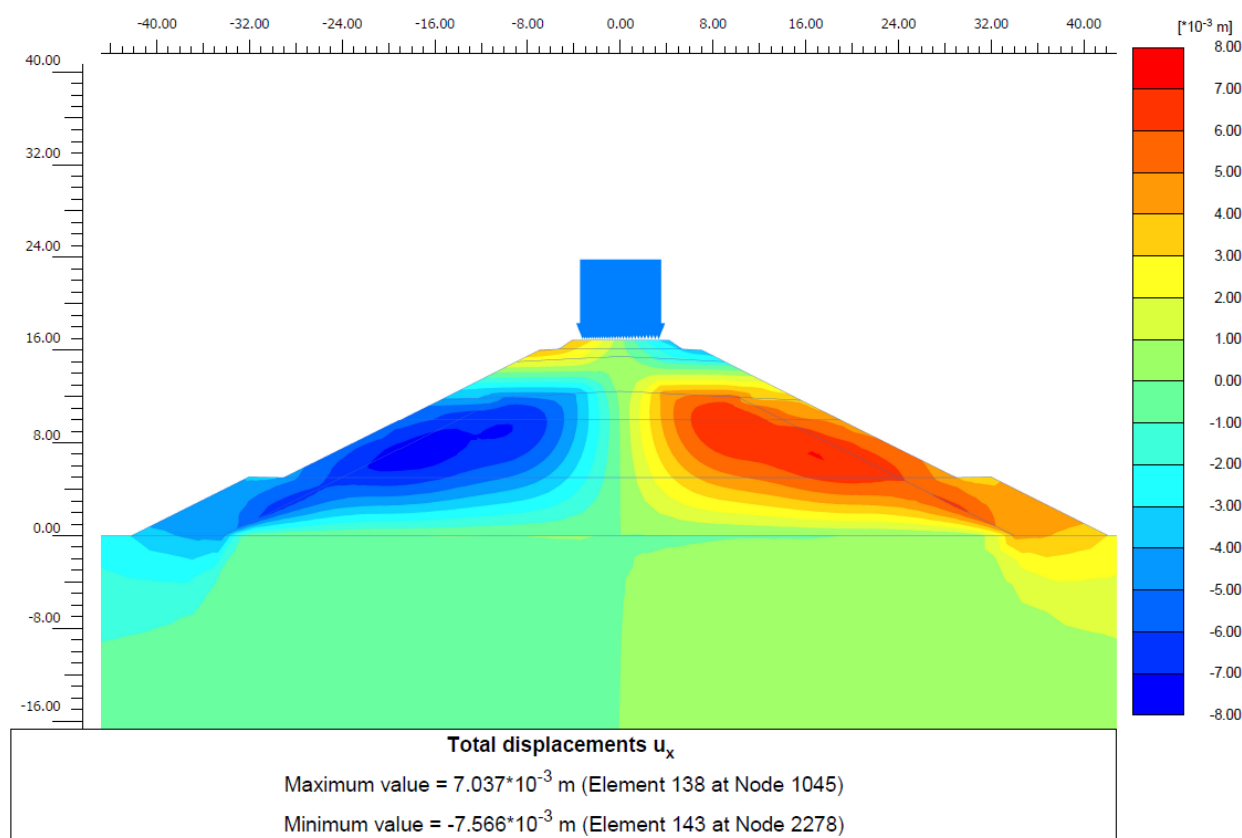


Figura 30 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 7) – Com Reforço

De seguida apresentam-se os gráficos da estimativa dos assentamentos em função do tempo após entrada de serviço da linha, bem como as taxas de deformação referentes a 0-6 meses, anuais nos primeiros 5 anos, entre 5-10 anos, 10-50 anos e entre 50-100 anos.

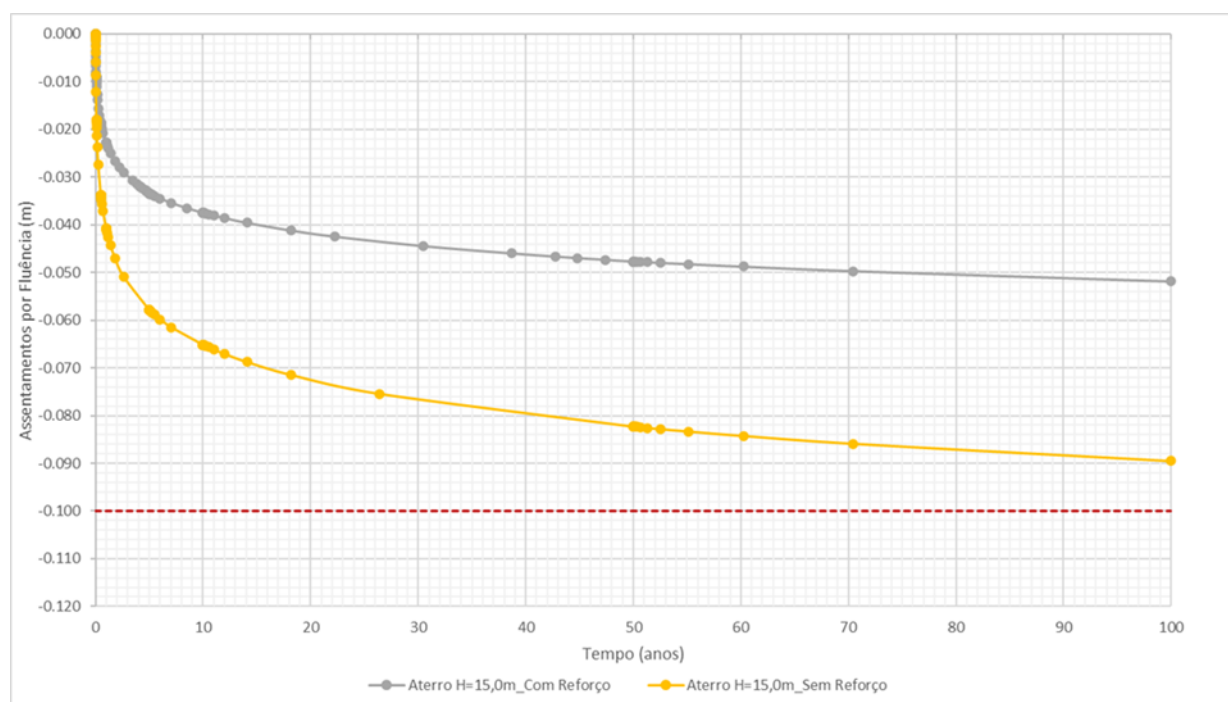


Figura 31 – Aterro H≤15,0 - Gráfico dos assentamentos em função do tempo

Quadro 12 – Aterro H≤15,0 – Taxas de Deformação

H=15m s/ Reforço		H=15m c/ Reforço	
Ano	Taxa de deformação (mm/ano)	Ano	Taxa de deformação (mm/ano)
1	41 (>10)	1	23 (>10)
2	8	2	5
3	5	3	3
4	5	4	2
5	3	5	2
10	1	10	1
50	0	50	0
100	0	100	0

5.2.3 ATERROS H≤20,0M

No caso dos aterros com alturas iguais ou inferiores a 20,0 m foram considerados dois cenários, nomeadamente o aterro sem e com a implementação da solução de reforço.

5.2.3.1 Descrição do modelo de cálculo

O modelo de cálculo é constituído pelos seguintes elementos:

- Elementos finitos triangulares com 15 nós utilizados na simulação do solo;
- Carga uniformemente distribuída vertical na superfície do topo do talude de 50 kN/m (25x1,33x1.5);
- As condições de fronteira do modelo foram definidas de forma a ter um conjunto de apoios fixos na base, e apoios móveis nas zonas laterais, permitindo os deslocamentos verticais na zona lateral.

O solo de fundação foi modelado com o modelo constitutivo Mohr-Coulomb, os materiais constituintes da superestrutura foram modelados com o modelo constitutivo Elástico-linear, e o solo-cimento com o modelo constitutivo Hardening Soil (HS), em regime drenado. Enquanto que o material de aterro foi modelado com o modelo constitutivo Soft Soil Creep (SSC), que consiste numa extensão do modelo constitutivo Soft Soil (SS) com a característica adicional de conseguir reproduzir o comportamento do solo quando este se encontra no estado elástico, ou seja, tem em consideração o efeito da fluência ao longo do tempo. A rotura do solo foi avaliada com base no critério de Mohr-Coulomb.

No quadro seguinte apresentam-se os valores característicos dos parâmetros geotécnicos de cada uma das camadas do solo.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_{v2} (MPa)	C_c	C_α	$C_\alpha/(1+e_0)$
Corpo aterro (SSC)	18	5	32	60	0,03	0,0015	0,0023
Fundação (MC)	19	200	500	200	-	-	-
Solo-cimento (HS)	21	200	38	1000	-	-	-

Quadro 13 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos

De forma a reproduzir o faseamento construtivo previsto em fase de construção e de serviço, este foi modelado através de várias fases de construção do aterro, seguidas da ativação da sobrecarga estática ferroviária prevista para cálculo da consolidação secundária, sendo considerado o seguinte faseamento genérico simplificado.

Quadro 14 – Faseamento construtivo adotado no PLAXIS

Faseamento Construtivo PLAXIS	
Fases	Descrição
Inicial	Ativação do estado de tensão inicial instalado do maciço
1-4	Construção do aterro (Camadas com espessura de 5,0m com duração de 30 dias por fase)
5	Construção do aterro (Superestrutura com duração de 30 dias)
6	Construção do aterro (em repouso com duração de 30 dias)
7	Ativação da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 1 dia)
8	Permanência da sobrecarga dinâmica equivalente ferroviária de 50kN/m ² (duração de 100 anos)

Optou-se por uma altura máxima de construção do aterro de 5,0 m por fase, com uma duração de 30 dias, onde se assume que a magnitude dos assentamentos dos aterros que ocorrem nesta fase são compensados no final da construção.

A análise na fase de serviço foi realizada para uma duração de 100 anos, correspondente à duração da vida útil da estrutura.

Na figura seguinte apresenta-se a malha de elementos finitos adotada no final da fase de serviço (Fase 8).

AVANTE
NORTE

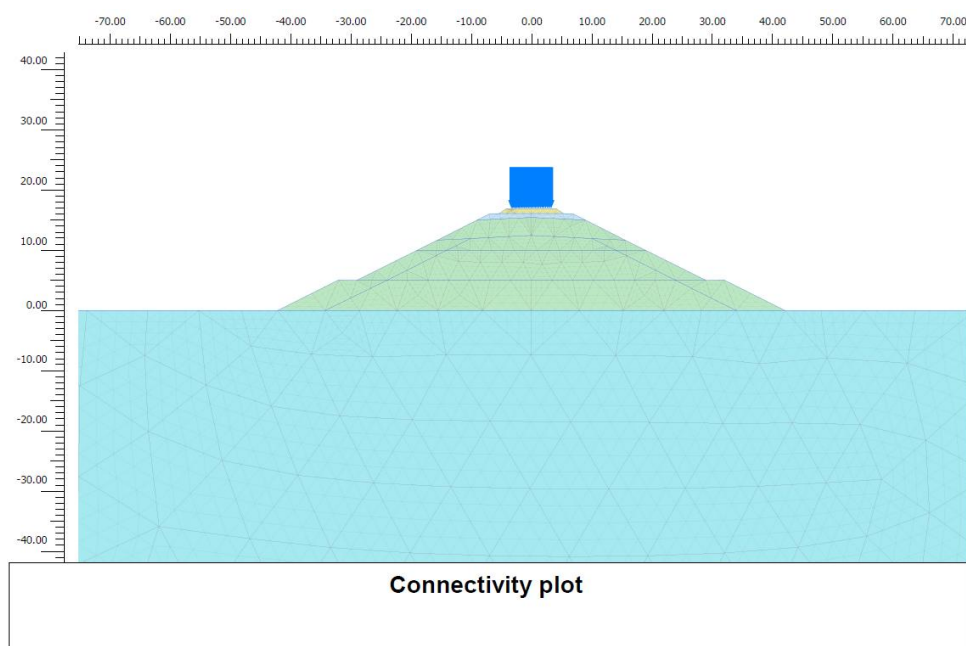


Figura 32 – Malha de elementos finitos adotada no PLAXIS (Fase8)

5.2.3.2 Resultados obtidos

Apresentam-se as figuras com os deslocamentos horizontais e verticais verificados, valores acumulativos obtidos na última fase, após os 100 anos (Fase 8).

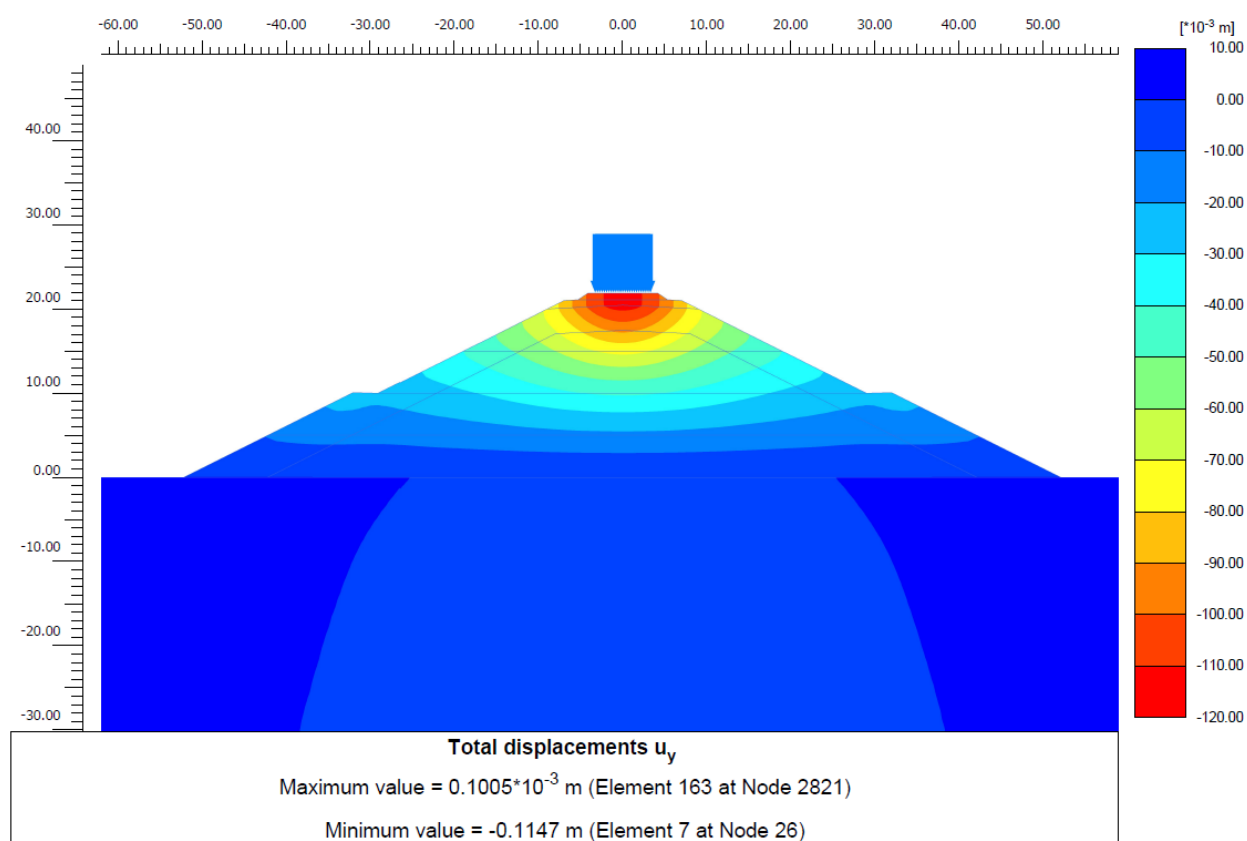


Figura 33 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Sem Reforço

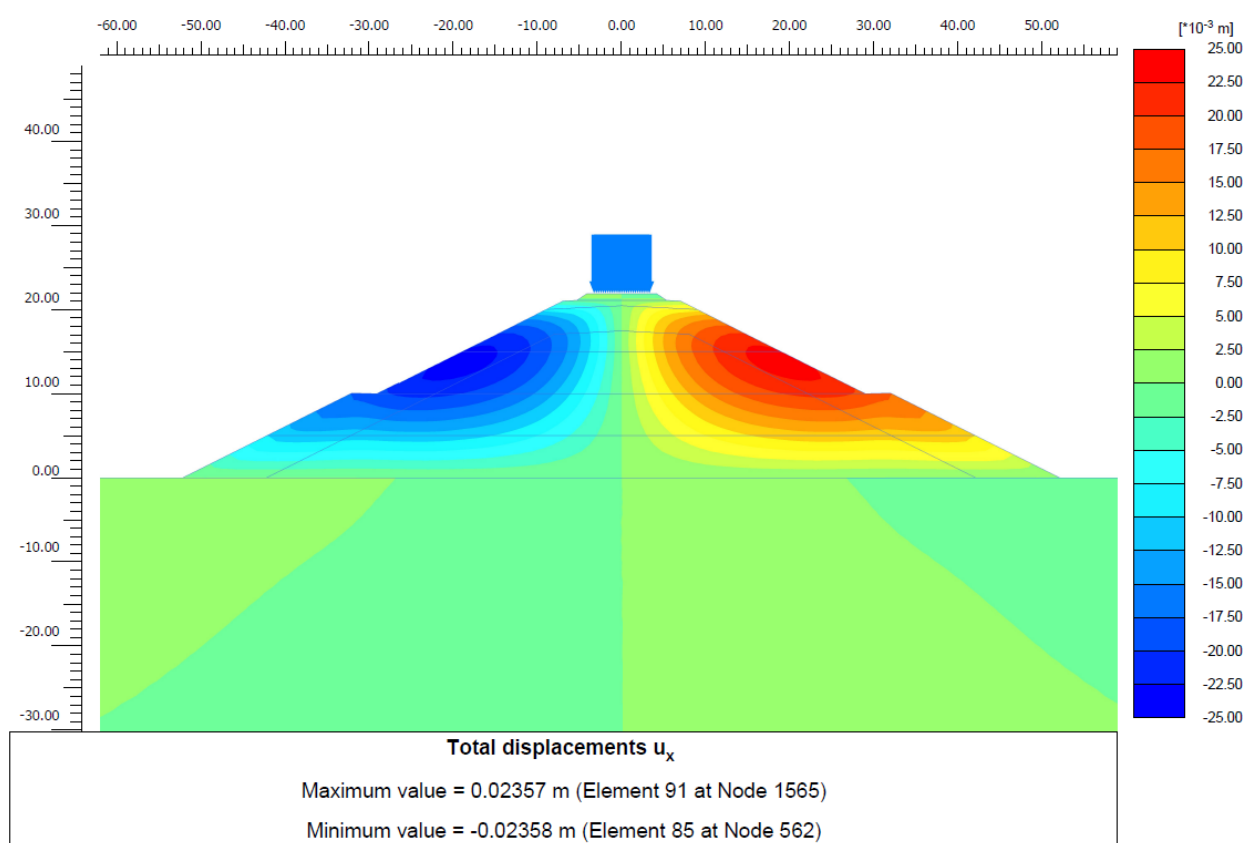


Figura 34 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Sem Reforço

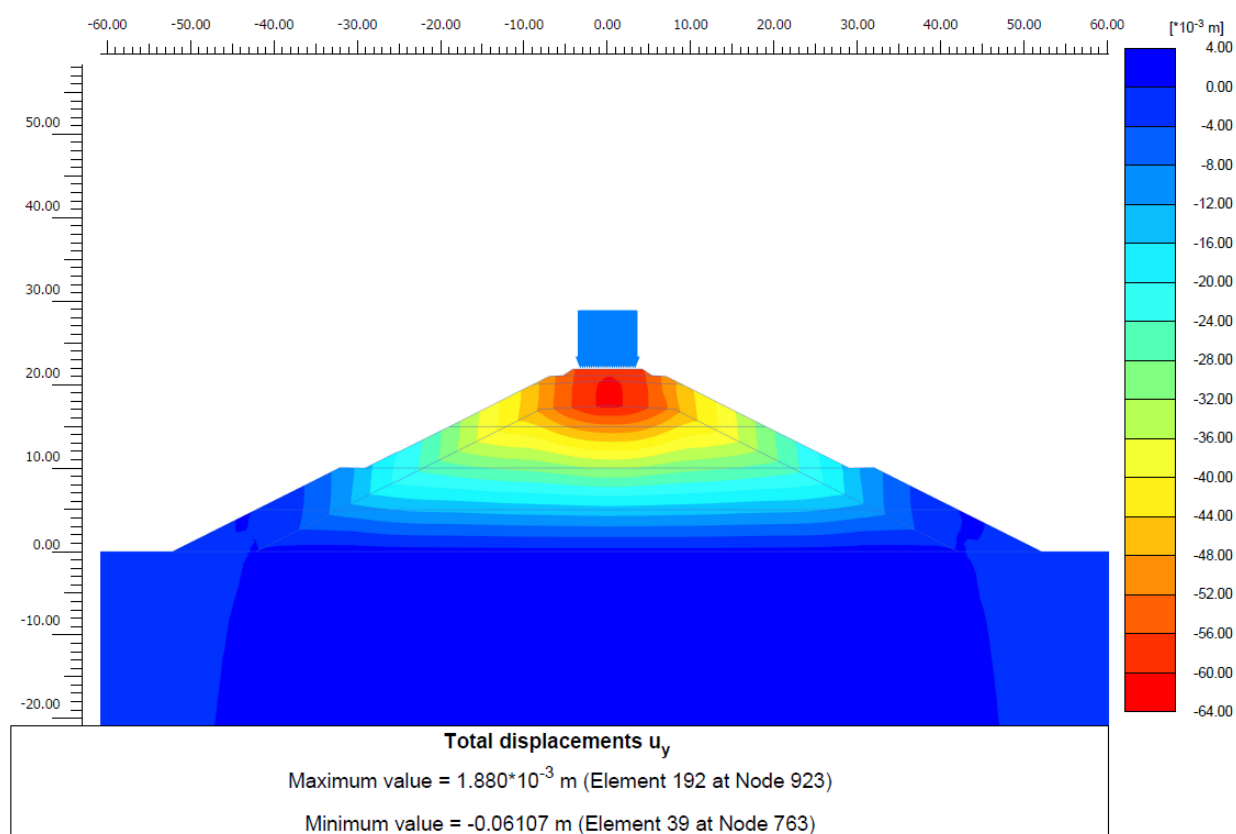


Figura 35 – Valor dos deslocamentos verticais, u_y , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Com Reforço

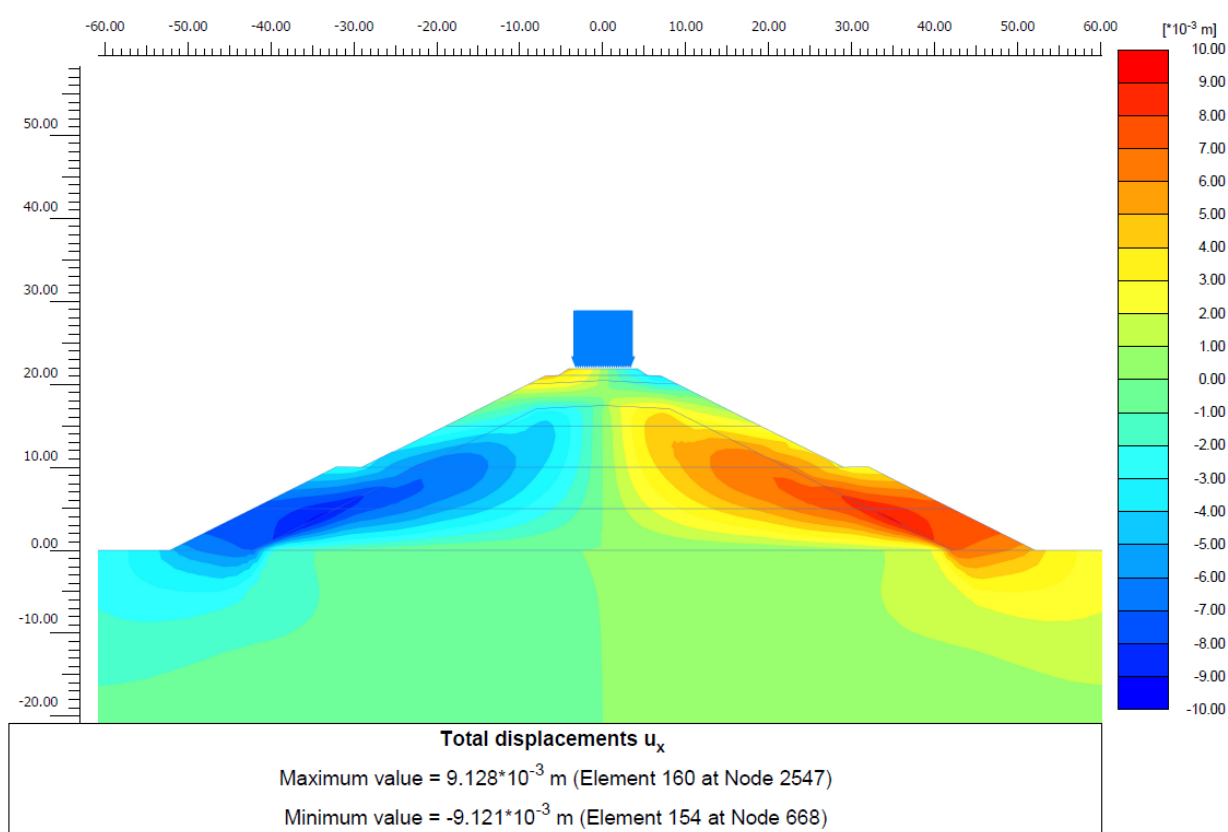


Figura 36 Valor dos deslocamentos horizontais, u_x , obtidos no PLAXIS (Fase 8) – Com Reforço

De seguida apresentam-se os gráficos da estimativa dos assentamentos em função do tempo após entrada de serviço da linha, bem como as taxas de deformação referentes a 0-6 meses, anuais nos primeiros 5 anos, entre 5-10 anos, 10-50 anos e entre 50-100 anos.

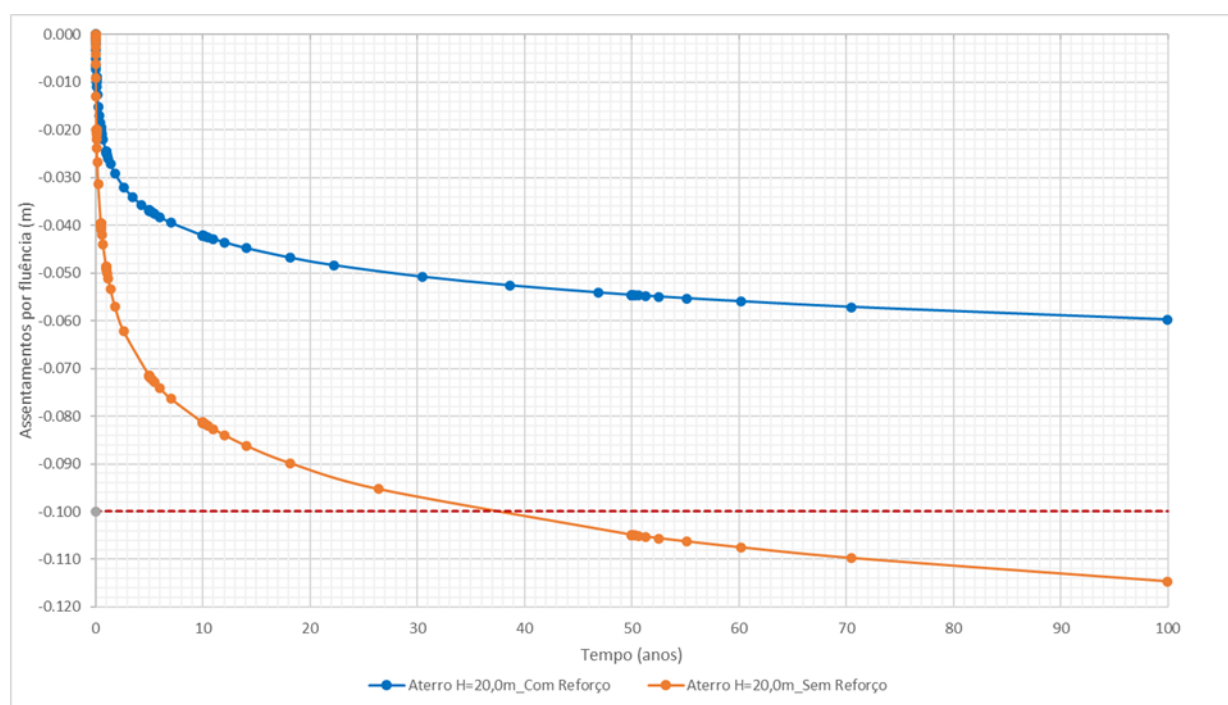


Figura 37 – Aterro H≤20,0 - Gráfico dos assentamentos em função do tempo

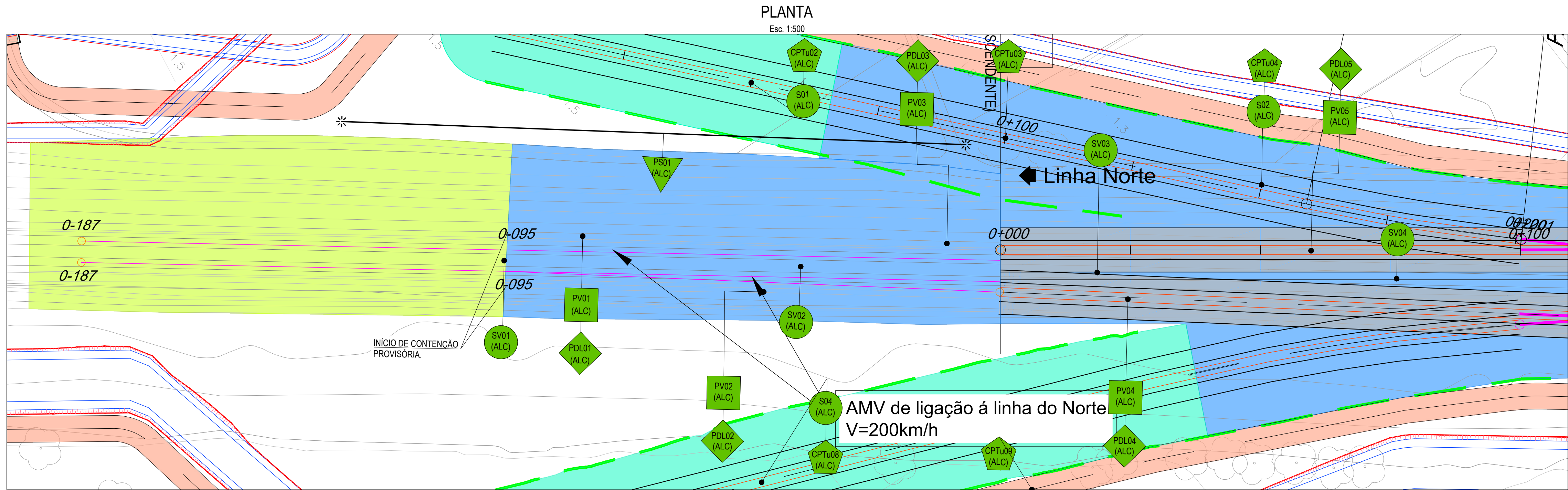
Quadro 15 – Aterro H≤20,0 – Taxas de Deformação

H=20m s/ Reforço		H=20m c/ Reforço	
Ano	Taxa de deformação (mm/ano)	Ano	Taxa de deformação (mm/ano)
1	49 (>10)	1	25 (>10)
2	10	2	6
3	6	3	3
4	6	4	2
5	4	5	2
10	2	10	1
50	1	50	0
100	0	100	0

5.2.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Com base nos resultados podemos tecer as seguintes conclusões:

- Na análise dos assentamentos por fluência do próprio aterro não foram considerados os efeitos da presença do nível freático e os assentamentos do material de fundação;
- Para os cenários sem aplicação do reforço foram obtidos assentamentos no topo do aterro inferiores a 100 mm, exceto no caso do aterro com H=20m, onde foi obtido um assentamento de 115 mm. Foram determinadas taxas de deformação inferiores aos limites estabelecidos de 5-10 mm/ano para os assentamentos totais, exceto no primeiro ano onde foram obtidas taxas entre 49 e 32 mm/ano (no 1º semestre, entre 80 e 54mm/semestre; no 2º semestre, entre 18 e 9mm/semestre);
- Para os cenários com aplicação do reforço foram obtidos assentamentos no topo do aterro inferiores a 100mm, entre 60 (H=20m) e 52mm (H=15m). Foram determinadas taxas de deformação inferiores aos limites estabelecidos de 5-10 mm/ano para os assentamentos totais, exceto no primeiro ano onde foram obtidas taxas de 25 e 23 mm/ano (no 1º semestre, de 40mm/semestre; no 2º semestre, de 10 e 9mm/semestre);
- Manutenção mais cuidada nos aterros com altura iguais ou superiores a 10m durante no primeiro semestre após entrada em serviço;
- Validação da necessidade de reforçar os taludes com alturas superiores a 15 m.



LEGENDA

PLANTA

- Eixo de Projeto
- Eixo de Representação de Perfil Longitudinal
- Saia de Escavação
- Saia de Aterro
- Viaduto / Ponte
- Túnel
- Caminho de Serviço
- Acesso de Emergência ao Túnel
- Muro de Contenção
- Poligonal de Apoio

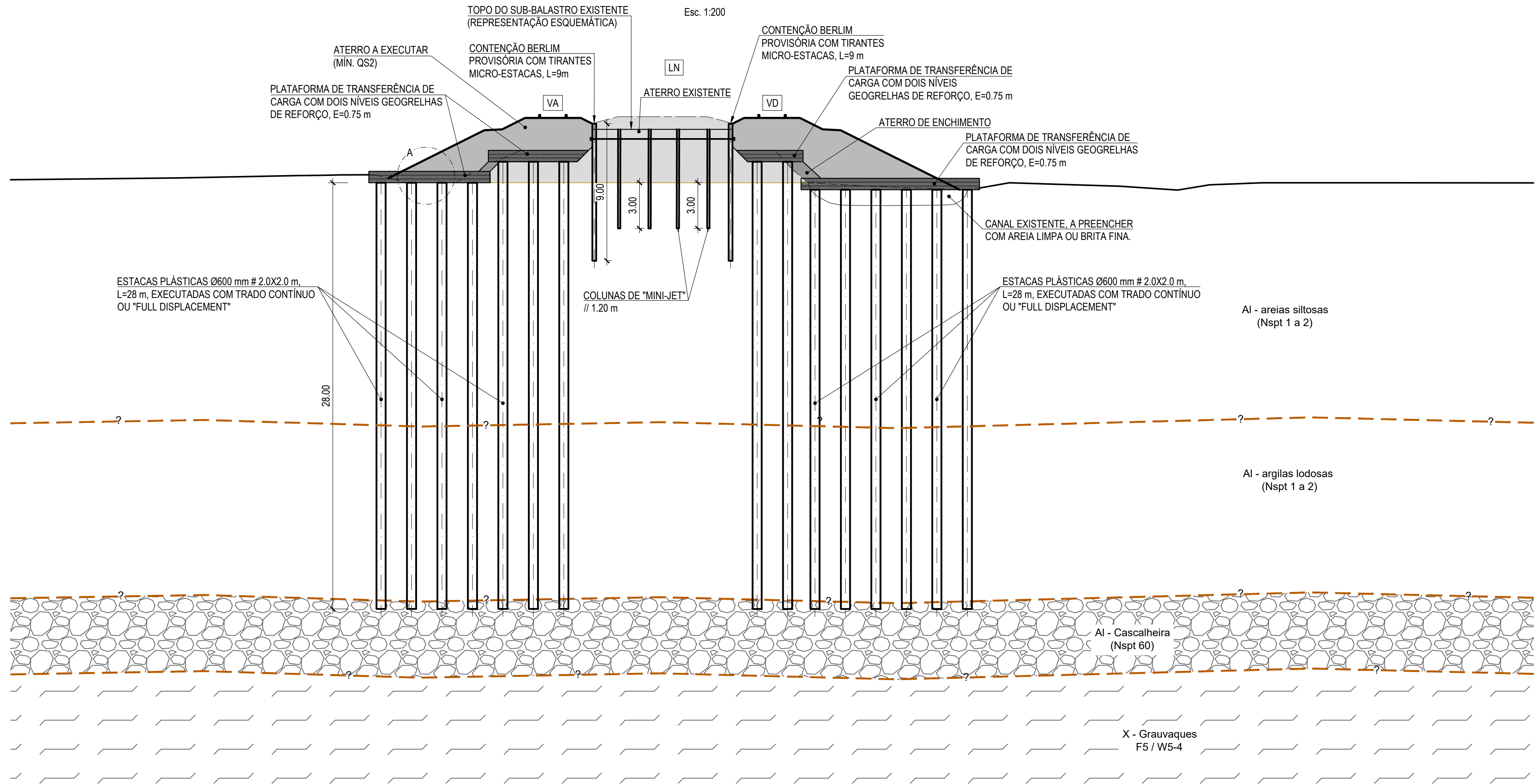
GERAL

- Passagem Hidráulica
- Passagem Superior / Inferior
- Ponte / Viaduto
- PUEC
- Muro
- Caminho Paralelo / Serviço

PERFIL LONGITUDINAL

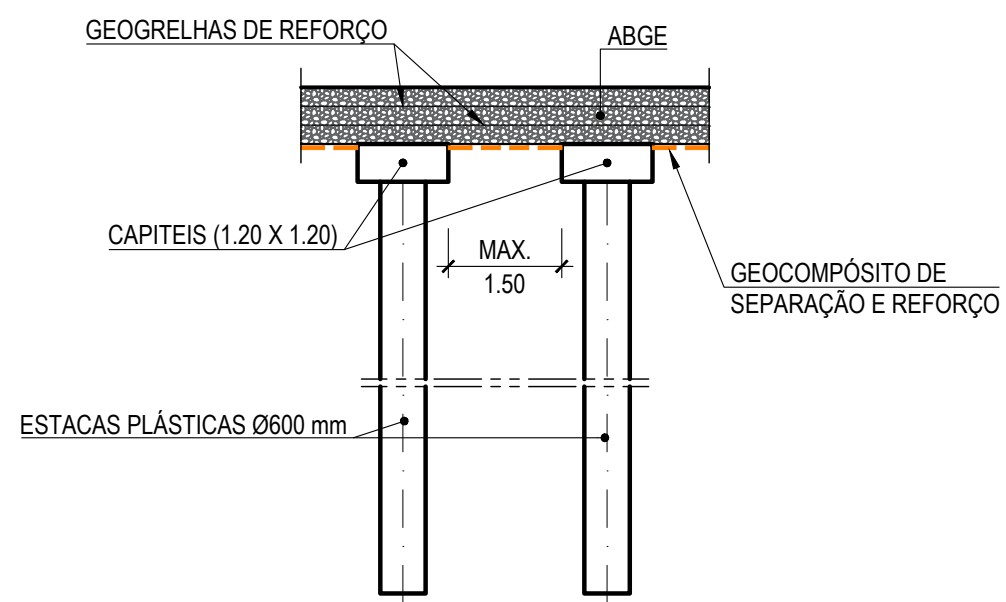
- Rasante de projeto
- Terreno
- Cota da PH no Eixo de Projeto
- Passagem Superior (PS)
- Passagem Inferior / Passagem Agrícola (PI / PA)
- Viaduto / Ponte
- Túnel
- Estrada
- Aparelho De Mudança De Via
- Linha
- Indicador De Limite De Resguardo
- Curva

SECÇÃO ESQUEMÁTICA
ALARGAMENTO DE ATERRO COM REFORÇO DE FUNDAÇÃO
LIGAÇÃO DE CANELAS - CONSOLIDAÇÃO DO ATERRO DA LN



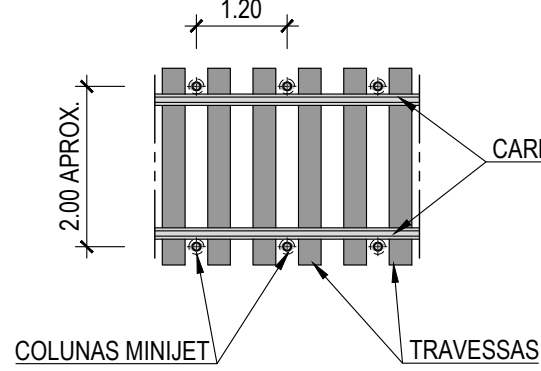
PORMENOR A

Esc. 1:100



MALHA ESQUEMÁTICA DAS COLUNAS DE MINIJET

Esc. 1:100

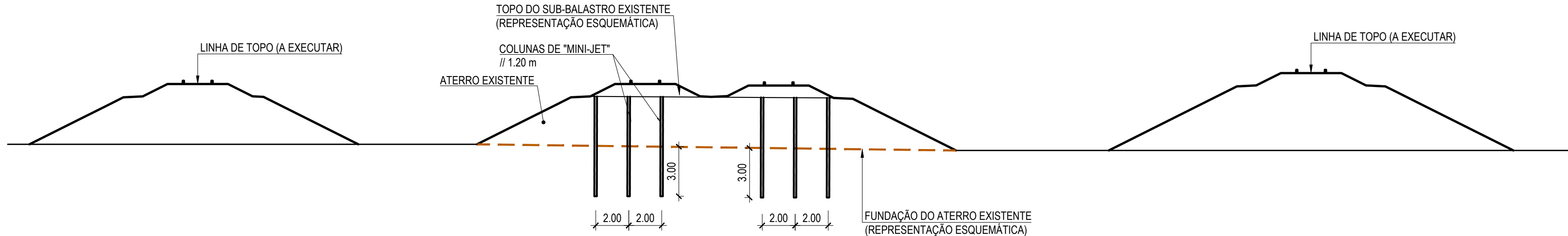


SISTEMA DE REFERÊNCIA

PT-TM06 / ETRS 89

SECÇÃO ESQUEMÁTICA
LIGAÇÃO DE CANELAS - CONSOLIDAÇÃO DO ATERRO DA LN

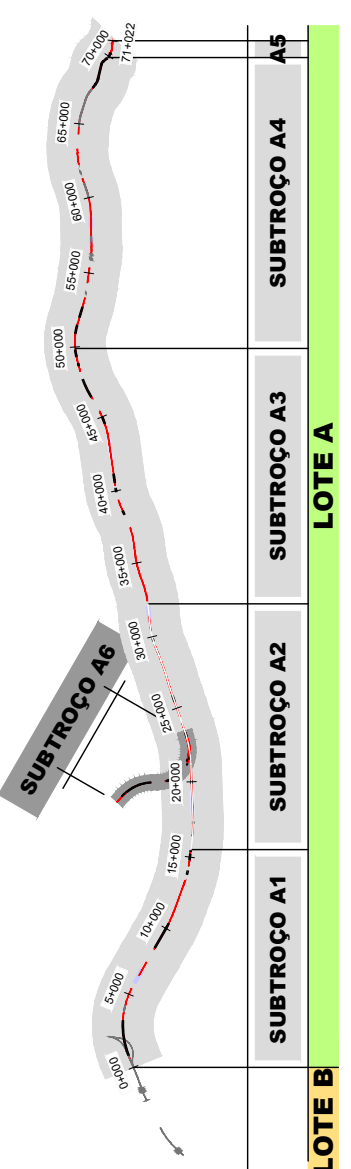
Esc. 1:200



LEGENDA:

SIMBOLOGIA

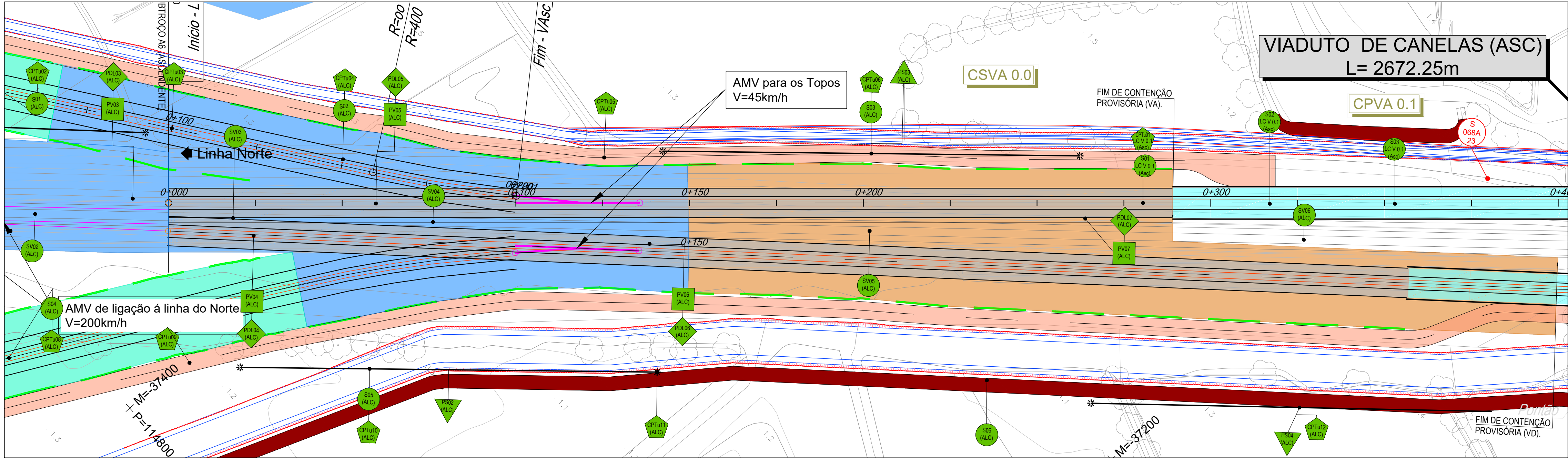
- Aterro reforçado com colunas de "Mini-jet".
- Alargamento de aterro com reforço de fundação e colunas de "Mini-jet" no aterro existente.
- Reforço de fundação em via única (topo)
Consultar Desenho PF102A6A-PR.01.03.00.00.103.00



Cofinanciado pela
União Europeia

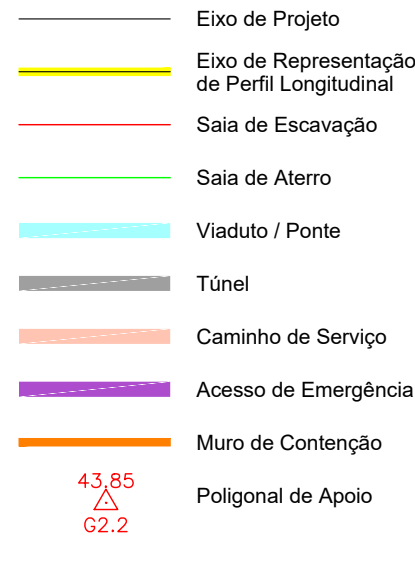
AVAN
CONCESSÕES DE ALTA VELOCIDADE
AVACE
NORTE
BETAR
CONCESSÃO TAV

PLANTA
Esc. 1:750

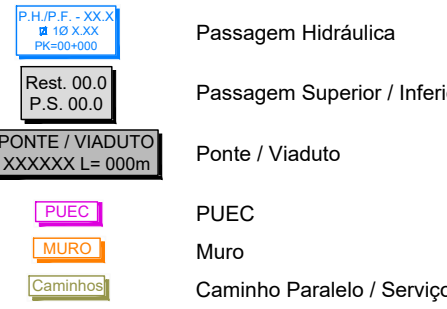


LEGENDA

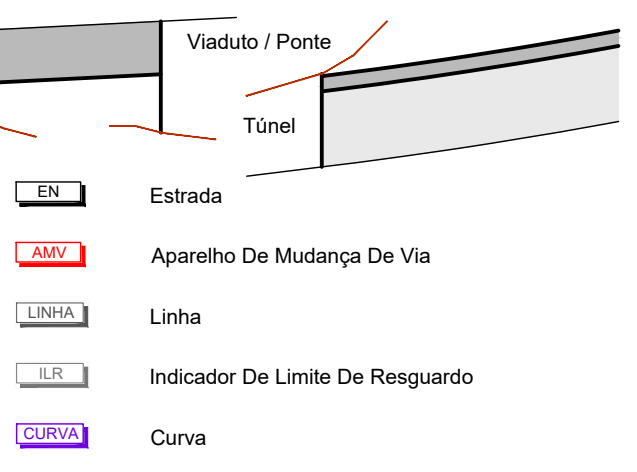
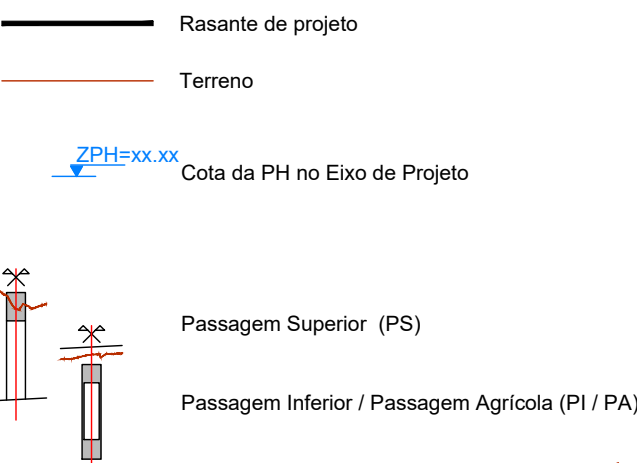
PLANTA



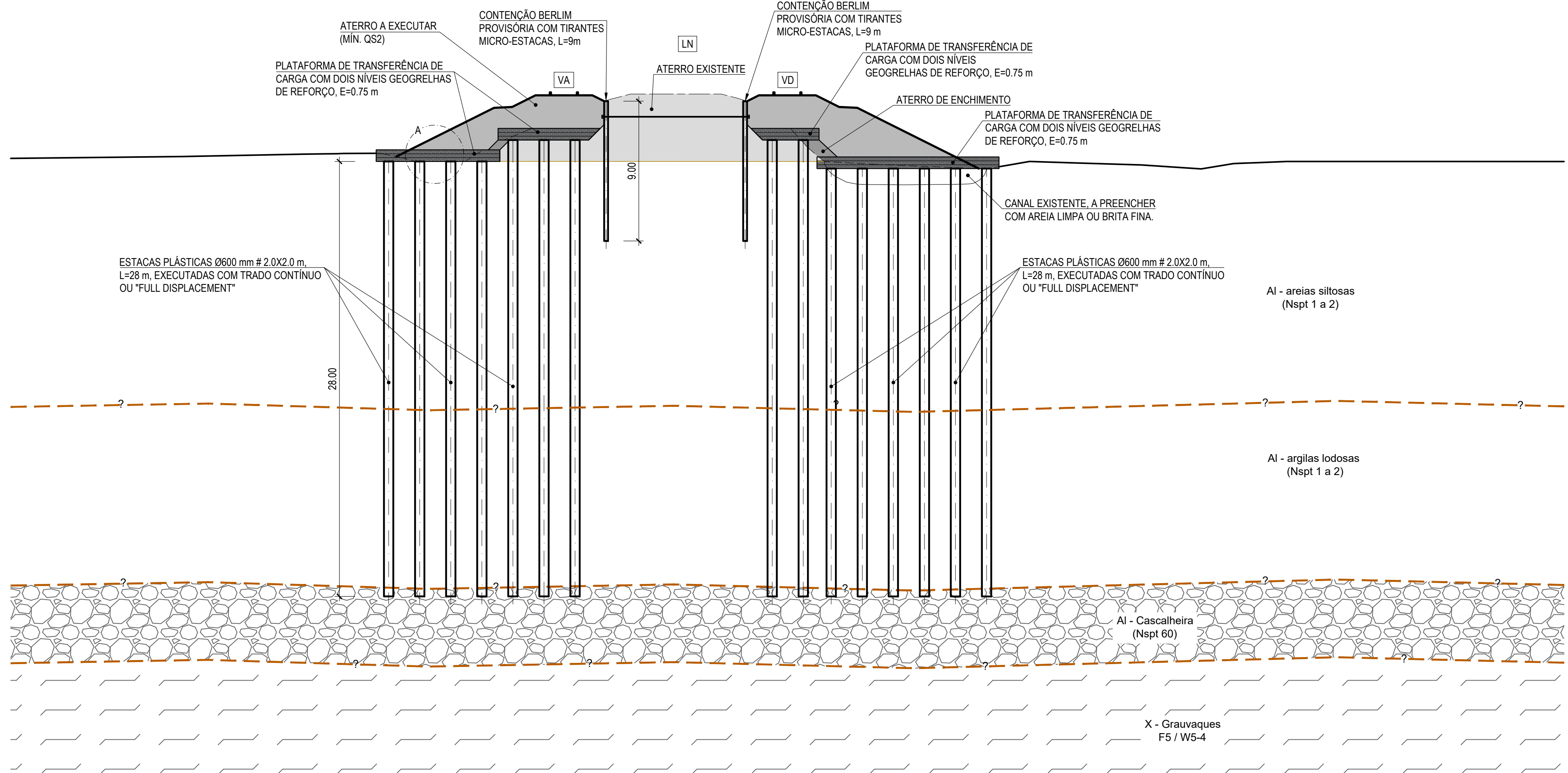
GERAL



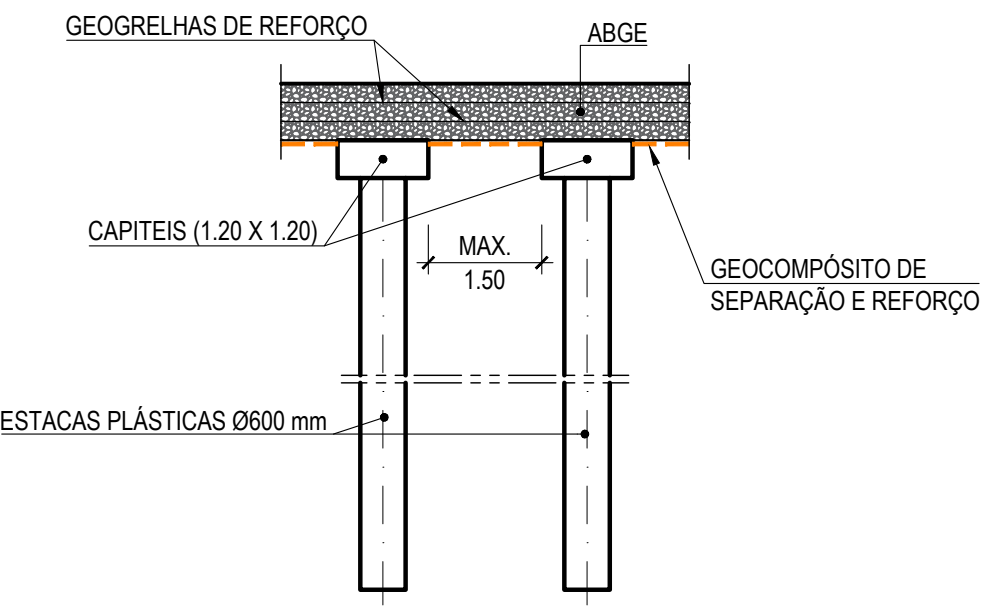
PERFIL LONGITUDINAL



SECÇÃO ESQUEMÁTICA
ALARGAMENTO DE ATERRAMENTO COM REFORÇO DE FUNDAÇÃO
Esc. 1:200

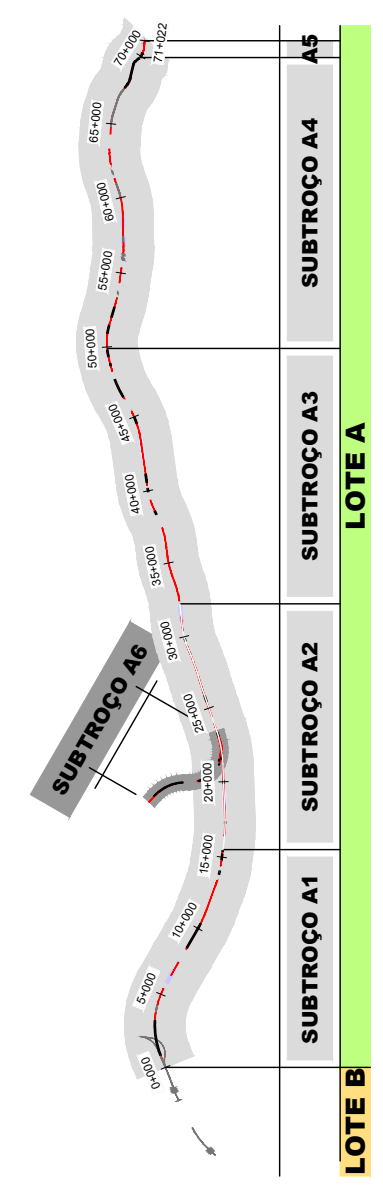
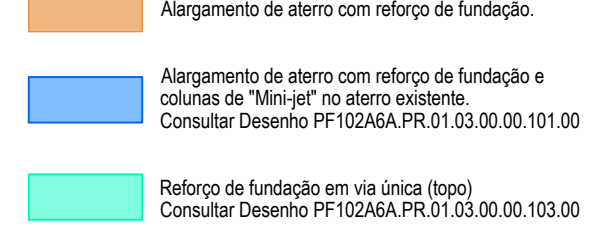


PORMENOR A
Esc. 1:100



LEGENDA:

SIMBOLOGIA



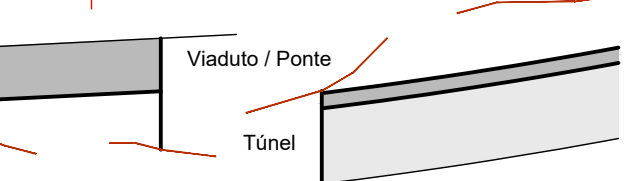
SISTEMA DE REFERÊNCIA
PT-TM06 / ETRS 89

Cofinanciado pela
União Europeia

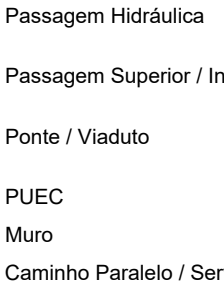


				 CONCESSÃO DE ALTA VELOCIDADE		 CONSTRUTORES	
				Código Propriedade		AVACE NORTE	
00	14.08.2025	Edição Inicial	E. M. Fernandes	Fichado	PF 102A6-PR.01.03.00.00.101-106.00.DWG		
Rev.	Data	Descrição	Responsável	Programa	Desenho	Valido	
				Pedro Antunes	Pedro Bilbaio	Eduardo M. Fernandes	
O Gestor de Projeto				Projeto			
Infraestruturas de Portugal				Linha			
O Responsável Unidade				Linha			
O Responsável Departamento				Linha			
O Diretor				Linha			
Ocupa				Ocupa			
Estudos e Projetos Ferroviários				Estudos			
Empreendimento				Empreendimento			
Fase				Fase			
Projeto Execução				Projeto Execução			
Local				Local			
Especialidade				Especialidade			
Título do Documento				Título do Documento			
N.º				N.º			
Ligação A Linha do Norte				Ligação A Linha do Norte			
Alargamento de alerço com reforço de fundação.				Alargamento de alerço com reforço de fundação.			
Planta e Corte Tipo				Planta e Corte Tipo			
Data				Data			
N.º de Alterações				N.º de Alterações			
Verbo				Verbo			
DEP 102				DEP 102			
Escalas				Escalas			
1:100				1:100			
1:250				1:250			
1:750				1:750			

Esc. 1:500

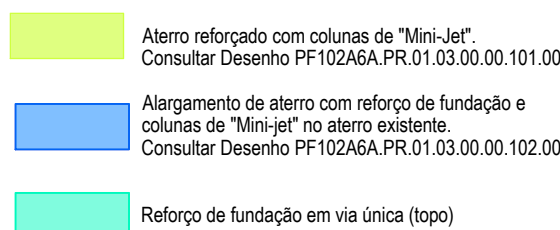


100/100

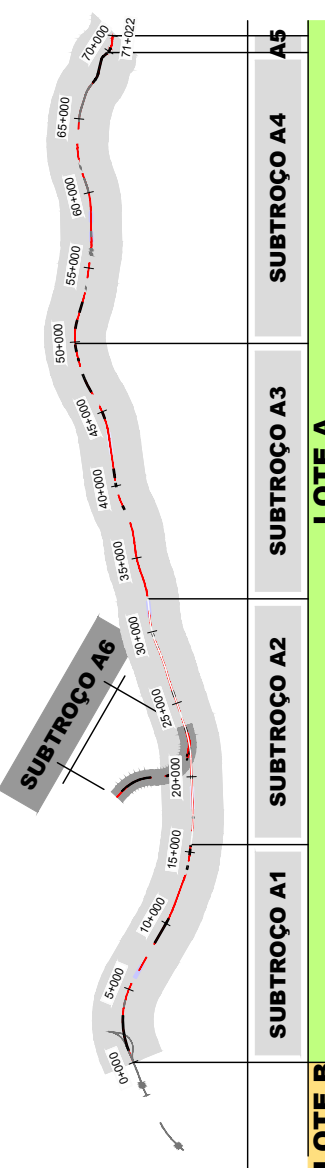
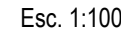


LEGENDA:

SIMBOLOGIA



Esc. 1:200

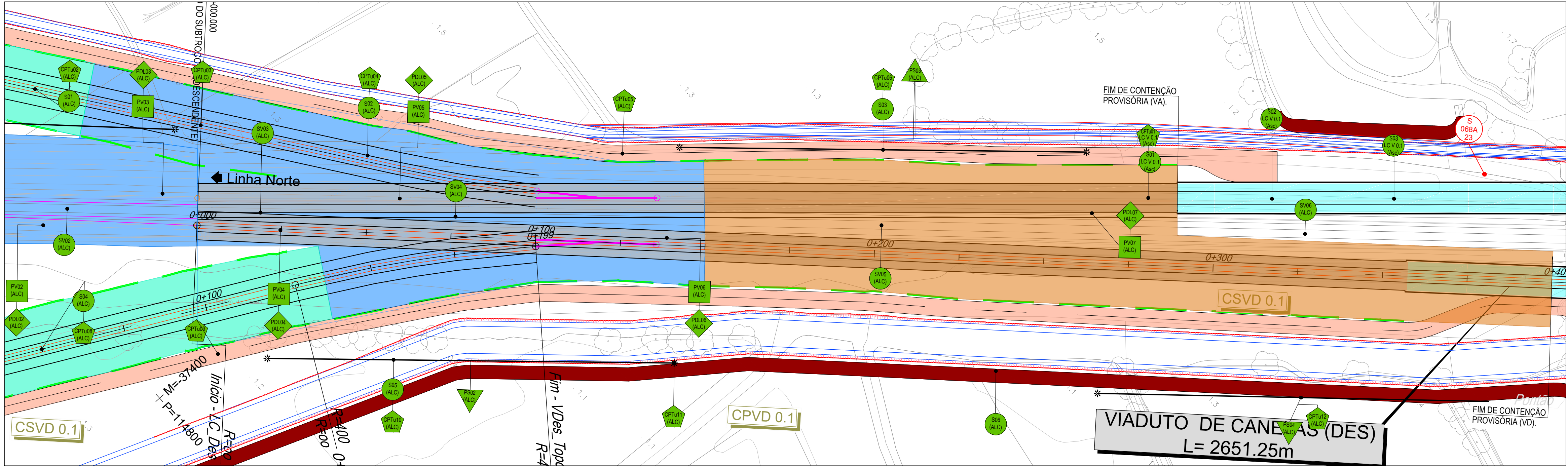


SISTEMA DE REFERÊNCIA

PT-TM06 / ETRS 89

[illegible]

PLANTA
Esc. 1:750



LEGENDA

PLANTA

- Eixo de Projeto
- Eixo de Representação de Perfil Longitudinal
- Sala de Escavação
- Sala de Aterro
- Viaduto / Ponte
- Túnel
- Caminho de Serviço
- Acesso de Emergência ao Túnel
- Muro de Contenção
- Poligonal de Apoio

GERAL

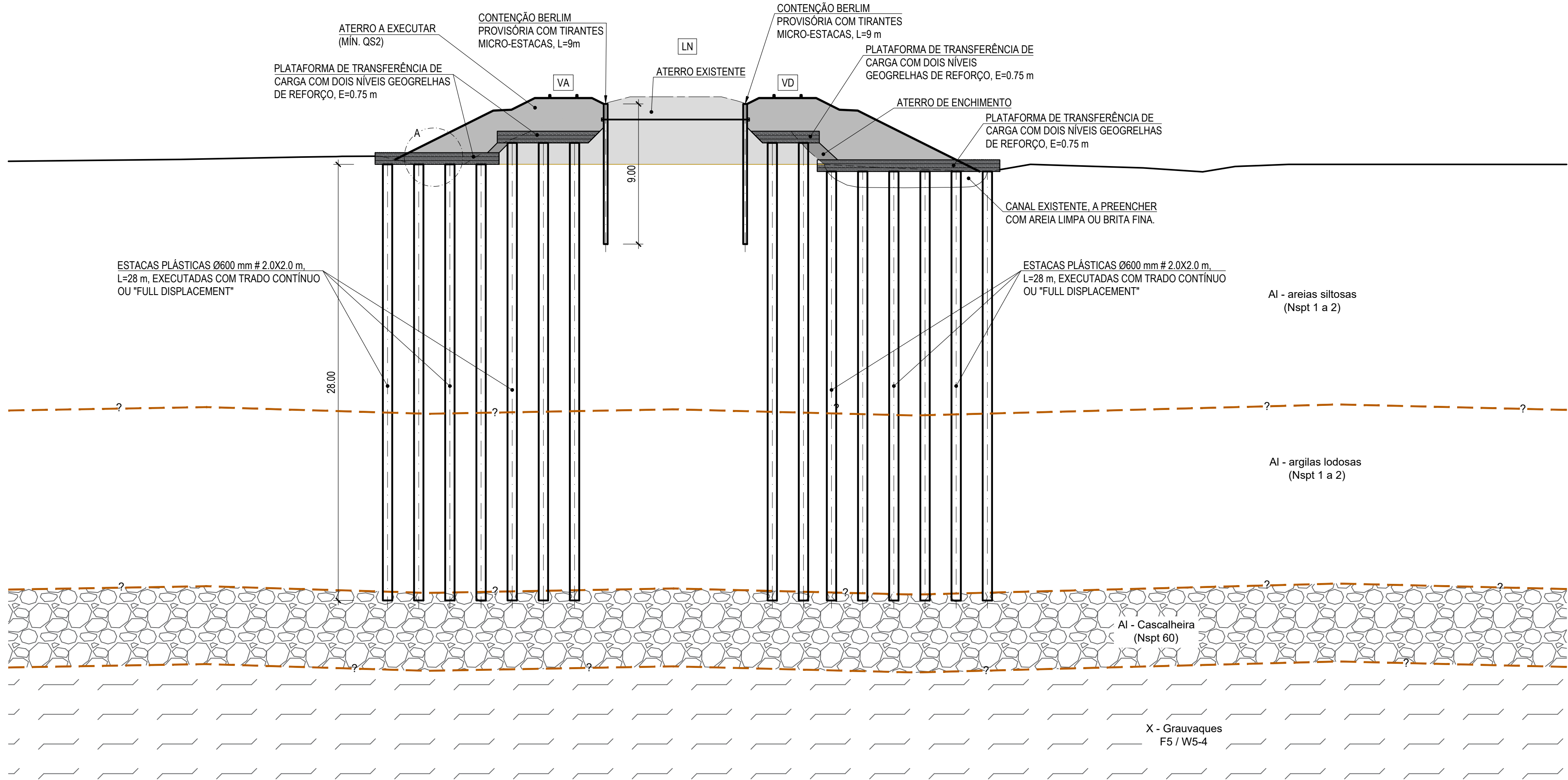
- Passagem Hidráulica
- Passagem Superior / Inferior
- Ponte / Viaduto
- PUEC
- Muro
- Caminho Paralelo / Serviço

PERFIL LONGITUDINAL

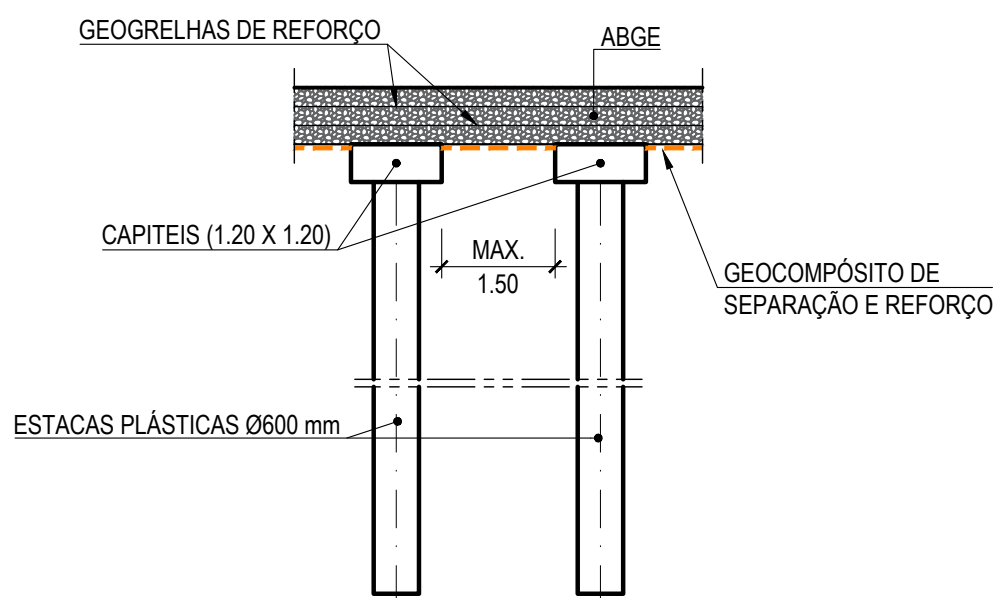
- Rasante de projeto
- Terreno
- Cota da PH no Eixo de Projeto
- Passagem Superior (PS)
- Passagem Inferior / Passagem Agrícola (PI / PA)

- EN Estrada
- AMV Aparelho De Mudança De Via
- LINHA Linha
- ILR Indicador De Limite De Resguardo
- CURVA Curva

SECÇÃO ESQUEMÁTICA
ALARGAMENTO DE ATERRO COM REFORÇO DE FUNDAÇÃO
Esc. 1:200



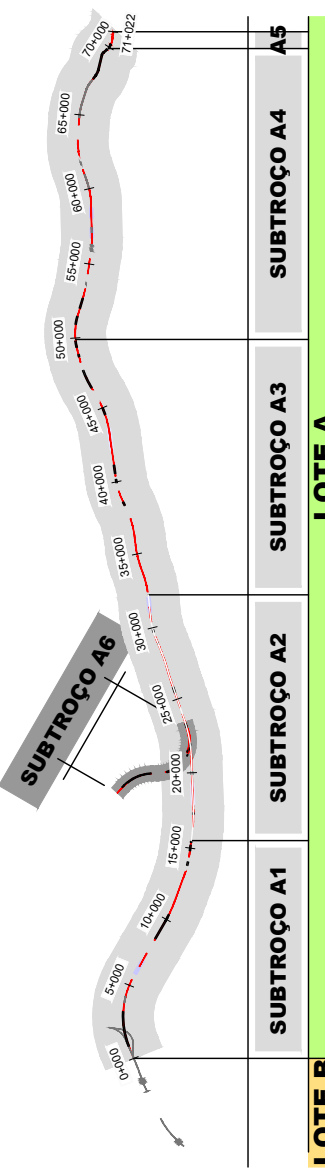
PORMENOR A
Esc. 1:100



LEGENDA:

SIMBOLOGIA

- Alargamento de aterro com reforço de fundação.
- Alargamento de aterro com reforço de fundação e colunas de "Mini-jet" no aterro existente. Consultar Desenho PF102A6A-PR.01.03.00.00.101.00
- Reforço de fundação em via (única topo). Consultar Desenho PF102A6A-PR.01.03.00.00.103.00



SISTEMA DE REFERÊNCIA

PT-TM06 / ETRS 89

Cofinanciado pela União Europeia



						 CONCEÇÕES DE ALTA VELOCIDADE		 BETA	
						AVACE NORTE			
				Codigo Projeto					
00		14.08.2025		Edição inicial		E. M. Fernandes		Fichado PF102A6-PR.01.03.00.00.201-206.00.DWG	
Rev.	Data	Descrição		Responsável	Projeto	Desenho	Valido	Elaborado	
					Pedro Antunes	Pedro Bilbao		Eduardo M. Ferman	
						Codigo Desenho		PF102A6-PR.01.03.00.00.202	
						Nº "Registo GEP"			
						Data		14.08.2025	
						Nº "As Omitido"		Valido	
						Título do Desenho		1:100 1:200 1:750	
						Consolidação de altemo da LN. Alargamento de altemo com reforço de fundação. Planta e Corte Tipo (2/2)			

Esc. 1:500



	Eixo de Projeto
	Eixo de Representação de Perfil Longitudinal
	Saia de Escavação
	Saia de Aterro
	Viaduto / Ponte
	Túnel
	Caminho de Serviço
	Acesso de Emergência
	Muro de Contenção
	Polygonal de Apoio

Rasante de projeto

Terreno

ZPH=xx.xx

Cota da PH no Eixo de Projeto

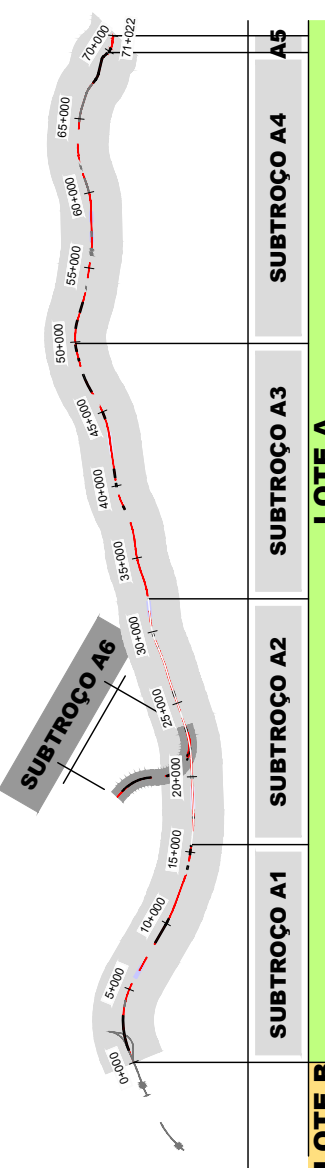
Passagem Superior (PS)

Passagem Inferior / Passagem Agrícola (PI / PA)

	Passagem Hidráulica
	Passagem Superior / Inferior
	Ponte / Viaduto
	PUEC
	Muro
	Caminho Paralelo / Serviço

SIMBOLOGIA

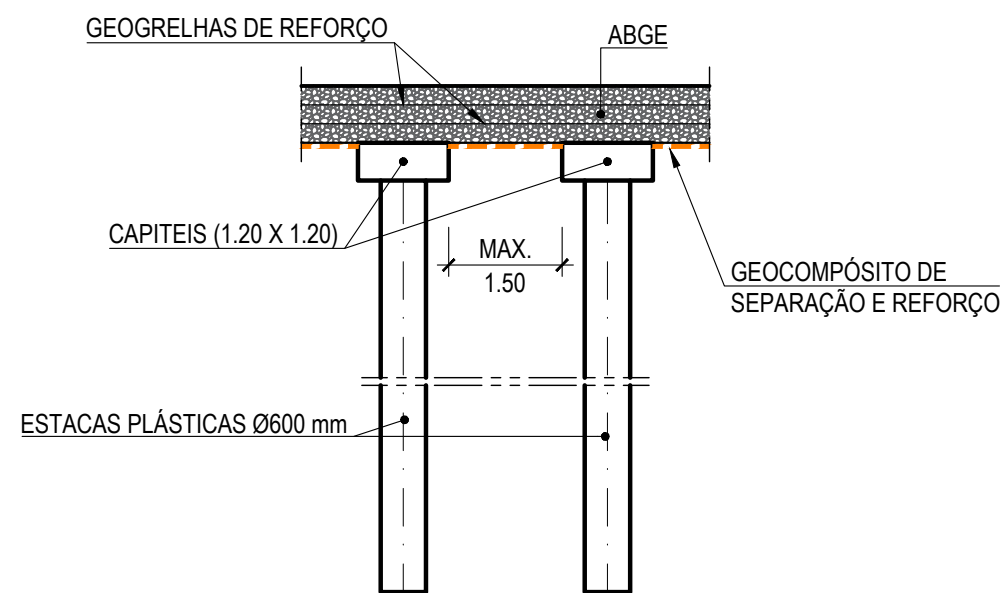
- | | |
|--|--|
| | Aterro reforçado com colunas de "Mini-Jet".
Consultar Desenho PF102A6A.PR.01.03.00.00.101.00 |
| | Alargamento de aterro com reforço de fundação e colunas de "Mini-jet" no aterro existente.
Consultar Desenho PF102A6A.PR.01.03.00.00.102.00 |
| | Reforço de fundação em via única (topo) |



Esc. 1:200



Esc. 1:100



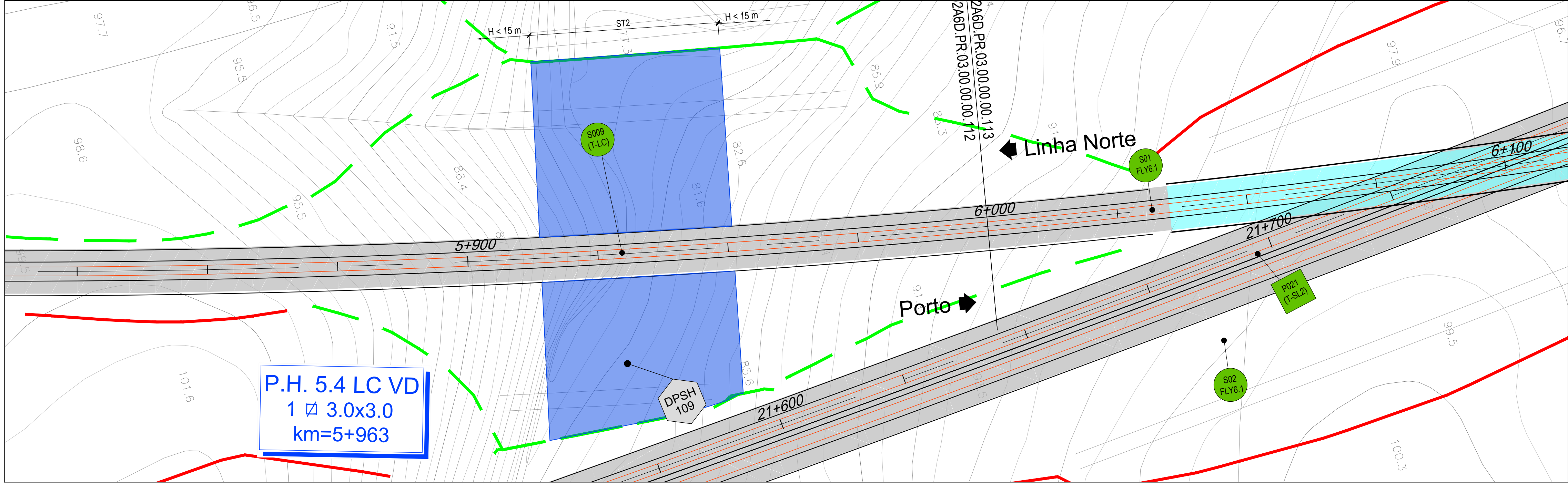
SISTEMA DE REFERÊNCIA

PT-TM06 / ETRS 89

[illegible]

PLANTA

Esc. 1:500



LEGENDA

PLANTA

- Eixo de Projeto
- Eixo de Representação de Perfil Longitudinal
- Saia de Escavação
- Saia de Aterro
- Viaduto / Ponte
- Túnel
- Caminho de Serviço
- Acesso de Emergência ao Túnel
- Muro de Contenção
- Poligonal de Apoio

GERAL

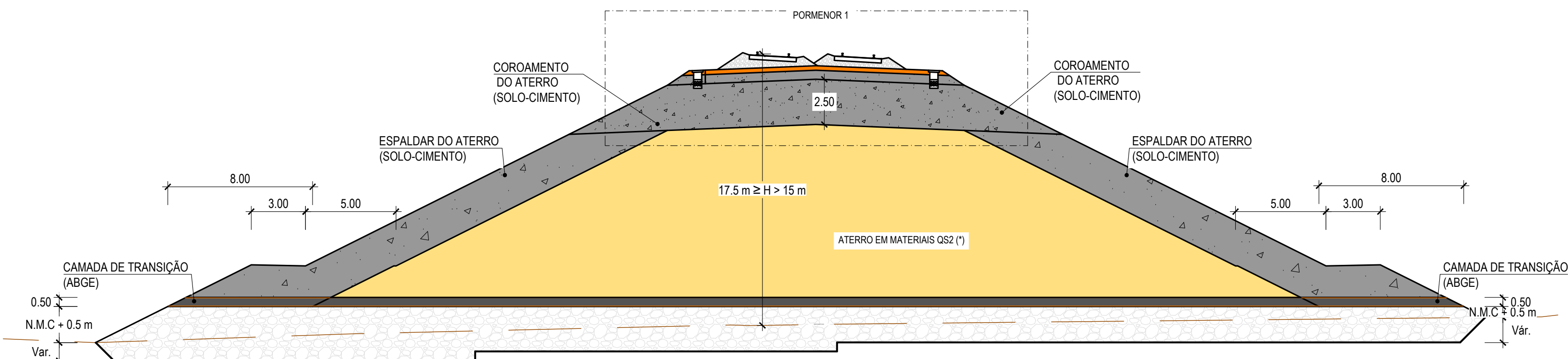
- Passagem Hidráulica
- Passagem Superior / Inferior
- Ponte / Viaduto
- PUEC
- Muro
- Caminho Paralelo / Serviço

PERFIL LONGITUDINAL

- Rasante de projeto
- Terreno
- Cola da PH no Eixo de Projeto
- Passagem Superior (PS)
- Passagem Inferior / Passagem Agrícola (PI / PA)
- Viaduto / Ponte
- Túnel
- Estrada
- Aparelho De Mudança De Via
- Linha
- Indicador De Limite De Resguardo
- Curva

PERFIL TIPO ST1

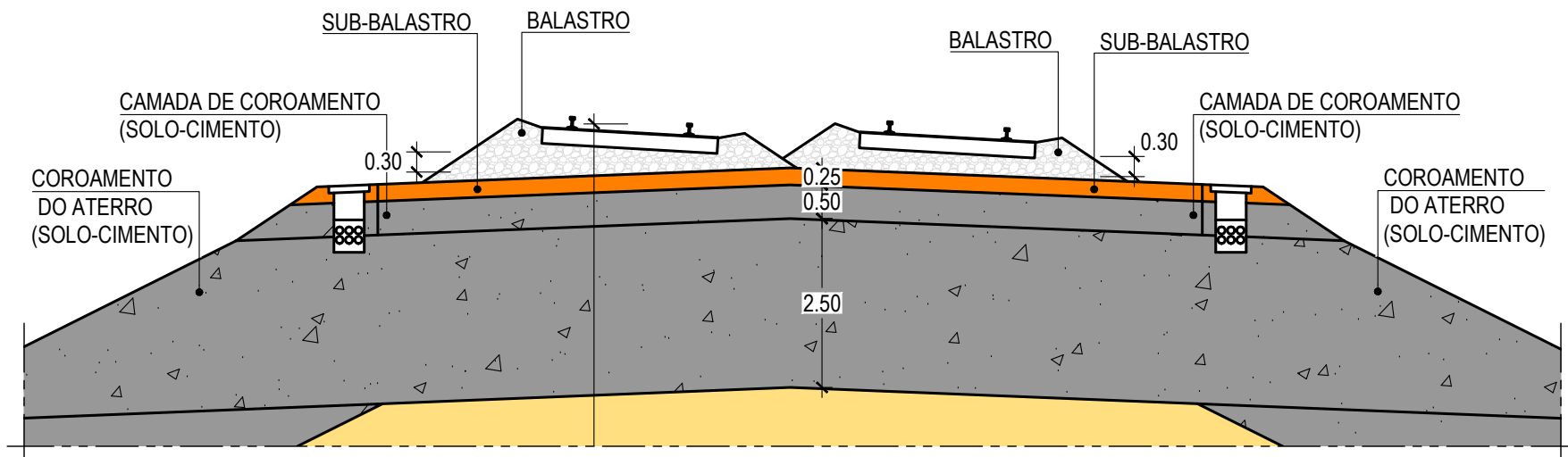
Esc. 1:200



NOTA (*): CASO EXISTA INDISPONIBILIDADE DE MATERIAIS COM CARACTERÍSTICAS Q52, PODERÃO APLICAR-SE MATERIAIS Q51 DESDE QUE POSSUAM CBR ≥ 10 %.

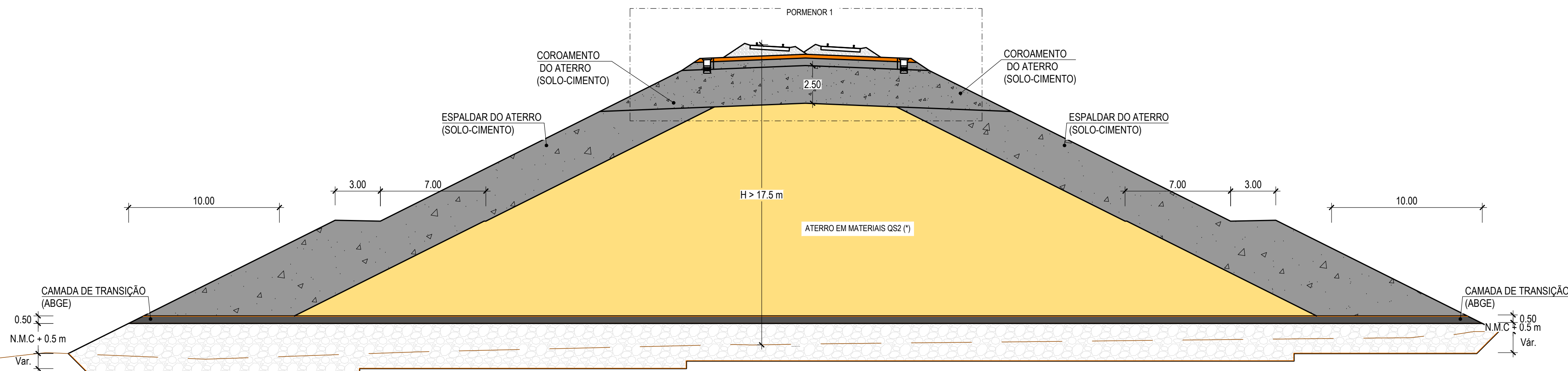
PORMENOR 1

Esc. 1:100



PERFIL TIPO ST2

Esc. 1:200



NOTA (*): CASO EXISTA INDISPONIBILIDADE DE MATERIAIS COM CARACTERÍSTICAS Q52, PODERÃO APLICAR-SE MATERIAIS Q51 DESDE QUE POSSUAM CBR ≥ 10 %.

LEGENDA:

SIMBOLOGIA

- Aterro reforçado - Secção Tipo 1 (ST1)
- Aterro reforçado - Secção Tipo 2 (ST2)

SISTEMA DE REFERÊNCIA

PT-TM06 / ETRS 89

Cofinanciado pela União Europeia



00		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Fichado	PF102A6.PR.01.03.00.00.201-206.00.DWG
Rev.	Data	Descrição	Responsável	Projeto	Desenho	Valido
01	14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Desenho	Valido
02		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
03		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
04		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
05		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
06		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
07		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
08		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
09		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
10		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
11		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
12		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
13		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
14		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
15		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
16		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
17		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
18		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
19		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
20		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
21		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
22		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
23		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
24		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
25		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
26		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
27		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
28		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
29		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
30		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
31		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
32		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
33		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
34		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
35		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
36		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
37		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
38		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
39		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
40		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
41		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
42		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
43		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
44		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
45		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
46		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
47		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
48		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
49		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
50		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
51		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
52		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
53		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
54		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
55		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
56		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
57		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
58		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
59		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
60		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
61		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
62		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
63		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
64		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
65		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
66		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
67		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
68		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
69		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
70		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
71		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
72		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
73		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
74		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
75		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
76		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
77		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
78		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
79		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
80		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
81		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
82		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
83		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
84		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
85		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
86		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
87		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
88		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
89		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
90		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
91		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
92		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
93		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
94		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
95		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
96		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
97		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
98		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
99		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido
100		14.08.2025	Edição inicial	E. M. Fernandes	Projeto	Valido

