

CONDIÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS E OBRAS GEOTÉCNICAS DO SUBLANÇO ARRUDA DOS VINHOS/CARREGADO (A1) DA A10

GEOTECHNICAL CONDITIONS AND GEOTECHNICAL WORKS OF THE ARRUDA DOS VINHOS/CARREGADO (A1) SECTION OF HIGHWAY A10

Rosa, Sérgio P. Parada, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, srosa@cenorgeo.pt*

Nunes, Alfredo J. Carvalho, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal*

Oliveira, Sandra Isabel da Cruz, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, soliveira@cenorgeo.pt*

Brito, José A. Mateus, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, mbrito@cenorgeo.pt*

RESUMO

O sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado (A1) desenvolve-se ao longo de uma região de morfologia muito acidentada, com vales muito largos e com vertentes muito extensas, algumas das quais com indícios de antigos escorregamentos, onde predominam formações margosas sobreconsolidadas e evolutivas do Jurássico. É objectivo deste trabalho a apresentação dos aspectos geológico-geotécnicos mais relevantes e condicionantes ocorrentes ao longo desta via e dos estudos efectuados para caracterização dos materiais margosos tendo em vista a sua reutilização nos aterros especiais. Apresentam-se, ainda, as soluções adoptadas para a execução destes aterros e das escavações.

ABSTRACT

The Arruda dos Vinhos/Carregado (A1) section is located in mountainous region with large valleys and long slopes, some with signs of ancient landslides, along which predominate overconsolidated Jurassic marls in evolutive process. It is the objective of this paper to present the most relevant geotechnical conditions that occur along this highway section and the characterization studies of the marls regarding their application in special embankments. The solutions adopted for the execution of these embankments and the excavation are also presented.

1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO TRAÇADO

A A10 - Auto-estrada Bucelas/Carregado/A13 situada na margem direita do rio Tejo, destina-se a constituir uma alternativa ao troço inicial da A1-Auto-estrada do Norte, entre a zona do Carregado e a zona Norte de Lisboa. O sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado (A1), com uma extensão total de 9 850 m (Figura 1), desenvolve-se na continuidade do sublanço anterior que se encontra em serviço entre o nó de ligação à auto-estrada A9, na zona de Bucelas e o nó de Arruda dos Vinhos, onde se prevê que no futuro venha também a existir uma ligação ao futuro aeroporto da Ota. Este sublanço foi dividido por razões executivas em dois trechos, o primeiro compreendido entre Arruda dos Vinhos e o IC11 com cerca de 4 000 m de comprimento e o segundo entre o IC11 e o Carregado com 5 850 m de extensão. O segundo trecho incluiu ainda o nó de interligação com a A1, na zona do Carregado. Todo o sublanço desenvolve-se ao longo de uma região de morfologia acidentada, formada por colinas separadas por vales muito extensos e profundos, onde predominam formações margosas evolutivas do Jurássico. Na parte final do traçado, na zona do Carregado, é atravessada uma extensa baixa aluvionar com níveis lodosos compressíveis, com espessura máxima de cerca de 30 m. Tendo-se verificado que existia um excesso de terras ao longo deste sublanço, com um volume total de escavações da ordem de 1 300 000 m³ para um volume total de aterros de 700 000 m³ e atendendo ao facto de não

existirem na região, a distâncias aceitáveis, materiais de empréstimo com características adequadas e em quantidade suficiente para utilização nos aterros, foi necessário prever a utilização das formações margosas na sua execução. Para além dos fortes condicionamentos geológico-geotécnicos, existiram também condicionamentos económicos e construtivos impostos pelo traçado desta via, que levaram a que fosse necessário conceber um conjunto de obras importantes, constituído por 7 obras de arte especiais perfazendo um comprimento total de 4 275 m, 3 obras de arte correntes, 2 estruturas de suporte ancoradas com cerca de 265 m de extensão, 6 escavações com alturas ao eixo entre 9 e 18 m e 5 aterros especiais tratados com cal com alturas máximas entre 8 e 14 m. No Quadro 1 apresentam-se as características dos principais aterros, das escavações e dos viadutos deste sublanço.

Quadro 1 - Características dos principais aterros, escavações e viadutos

Designação	Localização km	Extensão (m)	Perfil mais desfavorável	Desnível máximo		Altura	
				esq.	dir.	no eixo	máxima
Viaduto das Antas	0+550 - 0+825 ¹	275	-	-	-	-	-
Aterro	0+950 - 1+125 ¹	175	1+100	3,0	14,0	6,0	9,0
Escavação/Aterro	1+125 - 1+275 ¹	150	1+275	14,0	-	-	7,0
				-	15,0	4,5	9,0
Escavação	1+275 - 1+475 ¹	200	1+350	17,0	7,0	9,0	12,0
Viaduto de S. Lourenço	1+475 - 1+800 ¹	325	-	-	-	-	-
Escavação	1+800 - 2+175 ¹	375	2+000	20,5	16,0	19,0	20,0
Escavação	2+600 - 2+925 ¹	325	2+825	6,0	19,0	17,0	17,5
Aterro	2+925 - 3+225 ¹	300	3+050	20,0	10,0	13,0	14,0
Viaduto da ribeira de S. Sebastião	3+325 - 3+775 ¹	450	-	-	-	-	-
Escavação	3+775 - 4+050 ¹	275	3+850	21,0	7,0	11,0	14,0
Viaduto da Granja	0+035 - 0+155 ²	120	-	-	-	-	-
Escavação	0+155 - 0+500 ²	345	0+375	18	6	10,5	13
Aterro	0+500 - 0+625 ²	125	0+625	9	11,5	10,5	10,5
Viaduto de Santana de Carnota	0+625 - 1+400 ²	775	-	-	-	-	-
Escavação/Aterro	1+400 - 1+750 ²	350	1+550	19,5	-	4,5	10
				-	13	-	3,5
Escavação	1+750 - 1+975 ²	225	1+850	10	25	18	20
Aterro/Escavação	1+975 - 2+025 ²	50	2+050	12,5	-	4	7,5
				-	16	2	6
Viaduto de Vale Flores	2+950 - 4+000 ²	1050	-	-	-	-	-
Viaduto do Nó da A1	4+250 - 5+425 ²	1175	-	-	-	-	-

¹ - Quilometragem do Trecho 1; ² - Quilometragem do Trecho 2

Faz parte ainda deste sublanço, o nó de interligação A10/A1 constituído por cerca de 3 000 m de ramos em viaduto e cerca de 1 000 m de ramos em aterro com uma altura máxima da ordem de 3 m, cujas condições geológicas e geotécnicas são descritas pormenorizadamente em Oliveira S. *et al*, 2006 [1].

2. TRABALHOS DE RECONHECIMENTO GEOTÉCNICO

Em face das desfavoráveis condições topográficas, das condições geológicas ocorrentes e da necessidade de se ter de utilizar as margas na execução dos aterros, foram efectuados estudos geotécnicos cuidados, baseados em pormenorizados reconhecimentos geológicos de superfície e na execução de trabalhos de prospecção constituídos por sondagens à rotação e à percussão,

poços, perfis sísmicos, ensaios “in situ” e ensaios de laboratório. Estes estudos foram desenvolvidos em várias fases, tendo sido direccionados de forma a obter-se, tanto quanto possível, uma completa classificação das formações ocorrentes em linha segundo as classificações Unificada, AASHTO e LCPC/SETRA. No Quadro 2 apresentam-se os tipos e quantidades de trabalhos de prospecção realizados para o reconhecimento deste sublanço.

Quadro 2 - Tipos e quantidades de trabalhos de prospecção

	Trecho 1	Trecho 2	Total
Perfis sísmicos	6	6	12
Poços	17	23	40
Sondagens à rotação	26	28	54
Furação à rotação	440	550	990
Sondagens à percussão	-	11	11
Furação à percussão	-	260	260
Ensaio SPT	66	478	544
Ensaio de corte rotativo	-	16	16
Ensaio de laboratório sobre amostras remexidas			
• Granulometrias	23	19	42
• Teor em água natural	15	19	34
• Limites de liquidez e de plasticidade	23	19	42
• Azul de metileno	10	11	21
• CBR imediato	5	6	11
• Compactação pesada	12	8	20
• CBR	6	4	10
• Corte directo reversível	2	-	2
• Triaxial	2	-	2
Ensaio de laboratório sobre amostras de tarolos de sondagens			
• Peso volúmico	23	17	40
• Teor em água natural	23	17	40
• Fragmentabilidade	3	1	4
• Degradabilidade	3	1	4

3. CONDIÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

A região onde se situa o traçado da auto-estrada A10, localiza-se na orla mesocenozóica ocidental, numa área formada essencialmente por formações sedimentares da sub-bacia de Arruda dos Vinhos. A estrutura desta região constitui um grande empolamento anticlinal das formações jurássicas, com cerca de 20 km de largura, em que o núcleo é constituído pelas “Camadas da Abadia”. Esta estrutura estende-se desde Arruda dos Vinhos e Sobral de Monte Agraço até à margem direita do Tejo entre Alhandra e Castanheira do Ribatejo. As formações jurássicas, além deste empolamento regional, sofreram ainda os efeitos de uma tectónica compressiva de direcção W-E, que deu origem a falhas inversas de direcção NE-SW, paralelas à margem do Tejo. Encontram-se, por isso, muito deformadas e deslocadas por falhas, apresentando-se alguns destes acidentes injectados com filões ou diques de natureza dolerítica. A inclinação das camadas, embora possa variar localmente devido aos efeitos dos movimentos das falhas e das deformações ocorridas, é predominantemente para SE no quadrante Sul, e para N no quadrante NE [2]. O corredor onde se desenvolve o traçado atravessa desde o início até cerca do km 2+950 da quilometragem do trecho 2 formações do Jurássico, entre cerca dos kms 2+950 e 3+300 formações do Paleogénico e do Miocénico, e do km 3+300 até final do traçado, onde intercepta a auto-estrada A1, formações do Plio-Plistocénico (Figura 1). As formações jurássicas compreendem o complexo pterociano (J^4), as camadas de Amaral (J_d^3) e as camadas da Abadia (J_c^3). O complexo pterociano é constituído essencialmente por níveis gresos-margosos e por calcários por vezes apinhoados, branco-amarelados. As camadas de Amaral correspondem a um complexo constituído por massas calcárias, mais ou menos arredondadas, separadas por margas e por margo-calcários, por vezes com intercalações de níveis mais gresosos. As camadas da Abadia constituem um complexo argiloso, que atinge no conjunto cerca de 800 m de espessura, e que é formado essencialmente por camadas de siltitos, argilitos e margas cinzentas

ou azuladas, que se tornam amareladas quando mais alteradas. Ocorrem ainda, por vezes, intercalações de calcários, de arenitos e de conglomerados, embora com menor expressão [3].

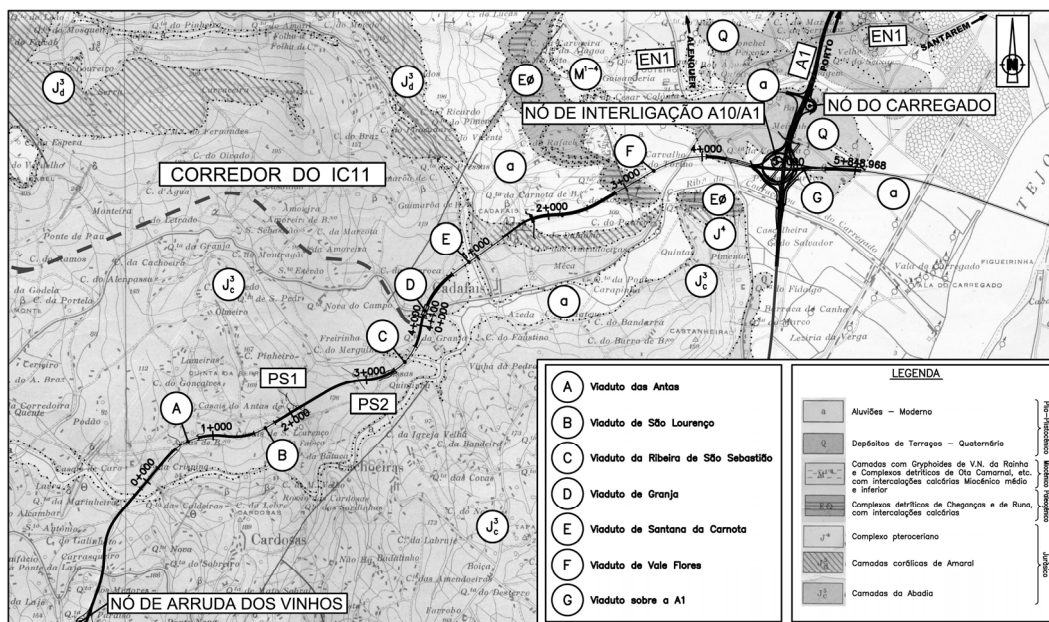


Figura 1 - Extracto da carta geológica de Portugal à escala 1/50 000 com a localização das principais obras do sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado

O Paleogénico ($E\emptyset$) aflora numa faixa relativamente reduzida com cerca de 250 m de largura, fazendo a transição entre as formações jurássicas e miocénicas. Corresponde a um complexo constituído por calcários, margas, argilas, grés e conglomerados, com cerca de 70 m de espessura total. O Miocénico aflora apenas numa estreita faixa com cerca de 60 m de largura, entre as formações do Paleogénico e do Plio-Plistocénico. Está representado pelas camadas com *Gryphaea* (M^{1-4}), constituídas por alternâncias de grés grosseiros e finos, argilas arenosas com cores amareladas, cinzento-esbranquiçadas e acastanhadas. As formações do Plio-Plistocénico, que ocupam uma vasta área na zona do Carregado, estão representadas pelos depósitos de antigos terraços fluviais (Q) e pelas aluviões (a). Os depósitos de terraços têm grande desenvolvimento ao longo da baixa correspondente à vala do Carregado, estando a sua formação directamente associada ao transporte e deposição de materiais pelo rio Tejo e seus afluentes. São constituídos essencialmente por argilas, areias e cascalheiras. As aluviões têm também grande desenvolvimento nesta zona chegando a atingir, na zona do nó do Carregado, cerca de 30 m de espessura. Correspondem a um complexo flúvio-marinho constituído predominantemente por lodos com intercalações de areias mais ou menos lodosas, com cores acinzentadas escuras. Na base das aluviões é também frequente a ocorrência de níveis de cascalheiras de calhaus rolados.

4. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DAS FORMAÇÕES JURÁSSICAS

Uma vez que um dos principais obstáculos à execução das obras eram as formações margosas do Jurássico, nomeadamente as margas da Abadia, que ocorrem ao longo de praticamente todo o traçado, foi realizada uma caracterização geotécnica bastante desenvolvida destas formações, com o objectivo de conhecer melhor o seu comportamento quer nos taludes de escavação, quer como material de aterro. Trata-se de formações com características geotécnicas particularmente desfavoráveis que resultam da degradação das suas características resistentes.

Sobre amostras colhidas nestas formações foram realizados ensaios laboratoriais de identificação (análises granulométricas por peneiração e sedimentação, limites de consistência, valor do azul metileno, índice de CBR imediato, peso volúmico seco e teor em água natural), de compactação, de CBR, de fragmentabilidade, de degradabilidade, de corte directo reversível e ensaios triaxiais. No Quadro 3 apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de identificação.

Quadro 3 - Ensaio de identificação. Resumo dos resultados

Nº de amostras ensaiadas	Formação	w _n (%)	%<#200 (74µ) (%)	LL (%)	IP (%)	VBS (g/100g)	IPI (%)	Classificações		
								Unificada	AASTHO	LCPC/SETRA
20	J _c ³ – Margas da Abadia	5 e 21	62 e 99 ^{a)}	31 e 47	12 e 24	3,3 e 6	22 e 32	ML e CL	A-6 e A-7-6 (8 e 14)	A ₂ e A ₃
6	J _e ^{3a} – Margas da Abadia com intercalações de arenitos	15 e 16	2 e 60	28 e 33	6 e 13	1,3 ^{b)}	-	GP, GP-GC, SM, SC e CL	A-1-a, A-2-6 e A-4 (0 e 5)	A ₁ e A ₂
2	J _d ³ – Camadas de Amaral	18 e 21	96	41 e 47	19 e 24	5,2 e 6,3	-	CL	A-7-6 (12 e 15)	A ₂
8	J ¹ – Margas e argilas do complexo pterocariano	17 e 21	57 e 84 ^{c)}	34 e 45	14 e 25	2,7 e 5,8	-	CL	A-6, A-7-5 e A-7-6 (7 e 15)	A ₂
4	J ^{4a} – Margas e argilas do complexo pterocariano com intercalações de arenitos e calcários	6 e 17	13 e 46	24 e 29	NP e 10	2,8 ^{b)}	-	SM, SM-SC, SC e CL	A-1-b, A-2-4 e A-4 (0 e 2)	A ₁ , B ₃ , C ₁ ou C ₂

a) apenas em quatro das amostras se obtiveram valores inferiores a 80%; b) apenas uma amostra; c) apenas uma das amostras se situa abaixo dos 70%.

Para se estudar de forma indirecta a variação do estado de alteração das margas da Abadia e do complexo pterocariano com a profundidade, foram seleccionadas várias amostras de tarolos de três sondagens, onde se procedeu à determinação do peso volúmico seco e do teor em água natural. A análise dos resultados das margas da Abadia permite evidenciar uma diminuição acentuada do teor em água natural e o crescimento do peso volúmico seco com o aumento da profundidade (Figura 2). Estes resultados evidenciam claramente a tendência das margas para absorverem água quando mais descomprimidas e fissuradas até uma profundidade significativa. No caso das margas da Abadia esta profundidade situa-se claramente entre 7 e 8 m, apresentando um valor médio do teor em água de cerca de 17,2% na zona superior e 9,1% na zona inferior.

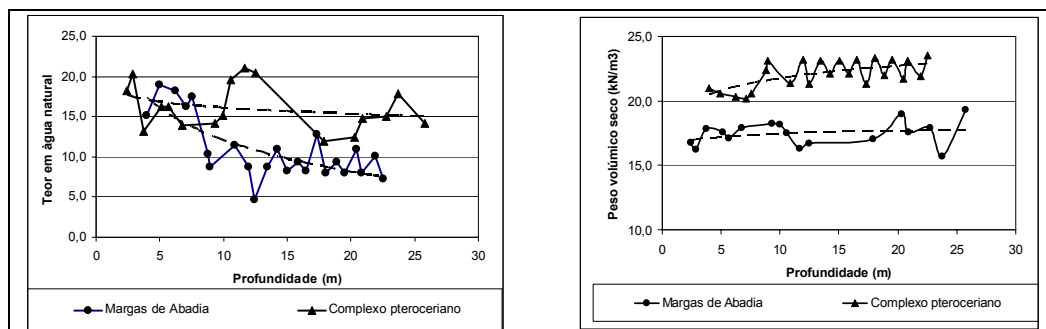


Figura 2 – Variação do teor em água natural e do peso volúmico seco com a profundidade

Relativamente ao complexo pterocariano, verifica-se que, tal como na formação das margas da Abadia existe também, embora de forma muito mais atenuada, uma diminuição do teor em água natural e o aumento do peso volúmico seco com a profundidade. Esta diminuição da absorção de água dá-se sensivelmente a partir de cerca de 18 m de profundidade, correspondendo os materiais acima deste nível às margas muito alteradas e desagregadas, enquanto que as margas pouco alteradas ocorrem abaixo desta profundidade (Figura 2).

Em termos de classificação Unificada, verifica-se uma clara preponderância dos solos classificados como CL ocorrendo ainda com alguma frequência solos do tipo ML. Quando estas formações apresentam intercalações de arenitos e de calcários, passam a enquadrar-se nos solos das classes GP, GP-GC, SM e SC. Segundo a classificação rodoviária estes solos são essencialmente classificados como A-6, A-7-5 e A-7-6 (solos argilosos). Quando mais arenosos são dos tipos A-1-a, A-1-b, A-2-4 e A-4. Segundo a classificação LCPC/SETRA os solos mais representativos incluem-se nas sub-classes A_2 e A_3 (siltes, argilas e margas), enquanto os solos com intercalações de arenitos e de calcários, pertencem às sub-classes A_1 , A_2 , B_5 e C_1 ou C_2 . Os solos margosos são no conjunto solos finos, com $\% \leq 74\mu$ geralmente superior a 80 a 90% e IP entre 12 e 24%. Relativamente aos restantes solos verifica-se que a percentagem de finos é inferior a 50% e o IP varia desde NP até um valor máximo de 13%. Em termos gerais, foi possível concluir que os solos das escavações deste sublanço são solos evolutivos no tempo e maioritariamente com características não recomendáveis para utilização na execução de aterros, principalmente de grande altura, a não ser que se tomem cuidados muito especiais na sua utilização. A análise da carta de plasticidade (Figura 3) mostra que não é possível fazer uma diferenciação clara entre os solos das várias formações jurássicas, apresentando, quer as camadas da Abadia, quer das camadas de Amaral e do complexo pteroceriano características muito idênticas.

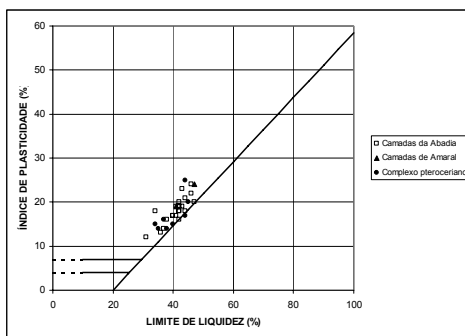


Figura 3 – Carta de plasticidade das formações jurássicas

As poucas amostras de margas com arenitos pertencentes à formação das camadas da Abadia e ao complexo pteroceriano que revelaram ter características mais adequadas para poderem ser utilizados na execução dos aterros, não apresentavam geralmente continuidade espacial para poderem ser exploradas. A reduzida espessura das camadas de arenitos intercalados nas margas, intersectadas nas zonas de escavação, não possibilitaram a sua individualização, pelo que os solos que se obtiveram eram constituídos por uma mistura de margas com arenitos, com grande predominância das margas. No complexo pteroceriano onde era previsível que pudessem ser encontradas camadas de calcário com alguma espessura foi recomendado que, sempre que fosse possível, essas camadas fossem exploradas em separado, de modo a evitar-se uma mistura com as margas.

As características de compactação foram determinadas a partir da realização de ensaios de compactação pesada sobre 22 amostras, 14 pertencentes à formação da Abadia, 1 às camadas de Amaral e 6 ao complexo pteroceriano. Na formação da Abadia obtiveram-se valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ entre 17,8 e 19,8 kN/m³ e de $w_{\acute{o}pt}$ entre 11 e 18,1%. Os resultados mostram que a variação do peso volúmico não é muito sensível à variação do teor em água. Nas camadas de Amaral obteve-se um valor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ de 18,2 kN/m³ e um valor do $w_{\acute{o}pt}$ de 14,7%. No complexo pteroceriano obtiveram-se valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ entre 17,1 e 20,8 kN/m³ e do $w_{\acute{o}pt}$ entre 7,8 e 15,5%. Estes resultados parecem indicar, que nestas formações, a variação do peso volúmico é mais sensível à variação do teor em água. Da comparação dos resultados obtidos entre o teor em água natural (w_n) e o teor em água óptimo ($w_{\acute{o}pt}$) obtido no ensaio de compactação pesada, parece

poder apontar-se para uma certa tendência das margas apresentarem um teor em água abaixo ou próximo do limite inferior do óptimo, principalmente com o aumento da profundidade. Esta tendência é mais evidente nas amostras colhidas na formação das margas da Abadia.

A avaliação da capacidade de carga foi obtida a partir de ensaios CBR realizados em 16 amostras das formações jurássicas, sobre três provetes de cada amostra. Obtiveram-se valores de CBR entre 1 e 6%. Dos resultados obtidos verifica-se que a capacidade de suporte destes solos é bastante baixa em todas as formações.

Sobre amostras de três sondagens, foram realizados também ensaios de determinação do "coeficiente de fragmentabilidade" e do "coeficiente de degradabilidade" de acordo com as normas francesas NF P94-066 e NF P94-067 de Dezembro de 1992. Os respectivos resultados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Resumo dos resultados dos ensaios de fragmentabilidade e de degradabilidade

Sondagem	Local de colheita		Litologia	FR	DG	Classificação LCPC/SETRA
	km	Prof. (m)				
SC26	1+925 ¹	10,3 - 15,0	J _c ³ - Margas rijas, cinzentas	13	-	R ₃₄ - Rocha argilosa fragmentável
SC5	1+750 ¹	5,0 - 7,5	J _c ³ - Margas pouco alteradas, compactas, amareladas e acinzentadas	6,5	13	R ₃₂ - Rocha argilosa pouco fragmentável e medianamente degradável
SC7	2+525 ¹	6,5 - 8,2	J ⁴ - Margas alteradas, desagregadas, amareladas e acinzentadas	8,7	9,3	R ₃₄ - Rocha argilosa fragmentável
SC51	2+350 ²	10,7 - 12,0	J _c ³ - Marga calcária, pouco alterada, cinzenta esbranquiçada	5	>13	R ₃₂ - Rocha argilosa pouco fragmentável e medianamente degradável

¹ - Quilometragem do Trecho 1; ² - Quilometragem do Trecho 2

Os resultados destes ensaios revelam que as amostras das sondagens SC5 e SC51 correspondem a zonas menos alteradas, onde as margas se apresentam relativamente compactas. Para estas amostras obtiveram-se valores do coeficiente de fragmentabilidade FR entre 5 e 6,5 e do coeficiente de degradabilidade $DG \geq 13$. Pertencem à sub-classe R₃₂ das rochas argilosas fragmentáveis e medianamente desagregáveis. Nas amostras das sondagens SC7 e SC26, verifica-se que as margas estão mais alteradas e desagregadas, tendo-se obtido valores de FR entre 8,7 e 13 e $DG = 9,3$ para a amostra SC7. Na amostra SC26 não foi possível determinar D₁₀ final, porque a amostra se desfez completamente. Trata-se de terrenos que pertencem à sub-classe R₃₄ das rochas argilosas fragmentáveis. De acordo com os resultados obtidos, foi proposto que se utilizassem na execução dos aterros, preferencialmente, o horizonte constituído pelas margas amareladas e a parte mais superficial das margas acinzentadas, por serem rochas mais fragmentáveis e desagregáveis.

Para a determinação das características de resistência mecânica (coesão e ângulo de atrito) foram realizados 2 ensaios de corte directo reversível sobre duas amostras representativas do complexo pteroceriano (J⁴), assim como 2 ensaios triaxiais e 2 ensaios de corte directo reversível sobre duas amostras representativas das margas da Abadia (J_c³), tendo em vista a sua utilização nos aterros. Os ensaios de corte directo foram conduzidos a grandes deformações e com velocidades de corte muito lentas de forma a determinarem-se os parâmetros de resistência máxima e residual em termos de tensões efectivas. Para tal, estes ensaios foram realizados segundo a técnica de ensaio indicada em Blondeau *et al.* [4]. As amostras de margas foram previamente desagregadas em laboratório e moldadas na caixa de corte de acordo com o peso volúmico e o teor em água óptimo obtidos no ensaio de compactação pesada. Os provetes ensaiados foram imersos em água para saturação durante 24 horas e consolidados sob tensões de 0,15, de 0,30 e de 0,50 MPa. A interpretação dos resultados a partir das curvas tensão de corte-

-deslocamento forneceu os seguintes valores dos parâmetros de resistência máxima e residual correspondentes, respectivamente, ao primeiro curso de 14 mm da caixa de corte (resistência máxima) e para o curso total alternado de 70 mm (resistência residual): $c' = 5$ a 10 kPa, $\phi' = 19$ a $20,2^\circ$ e $c'_{res} = 0$ a 2 kPa, $\phi'_{res} = 5$ a $9,7^\circ$. De acordo com as relações de Skempton (função da percentagem de argila) e de Kanji (função do índice de plasticidade) seriam de esperar ângulos de atrito residuais mais elevados entre 15 e 18° . Os valores obtidos nestes ensaios são anormalmente baixos traduzindo um comportamento muito desfavorável, com uma quebra de resistência muito elevada quando o solo é sujeito a grandes deformações. Este facto poderá ser, em parte, explicado devido à dimensão relativamente reduzida da caixa de corte o que conduz, no decurso do ensaio, a uma redução muito acentuada da área de contacto da amostra à medida que se processam os deslocamentos. Os ensaios triaxiais foram do tipo consolidado não drenado, com saturação prévia por contrapressão e com leitura das pressões intersticiais ao longo da fase de corte. As amostras de margas foram também previamente desagregadas em laboratório, sendo os provetes posteriormente moldados com as características de compactação obtidas nos ensaios de compactação pesada. No Quadro 5 apresentam-se os valores dos parâmetros de resistência ao corte para o critério de rotura com base na relação $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{máx}$.

Quadro 5 - Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais

Poço-Amostra	Prof. (m)	Litologia	Resistência ao corte	
			$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{máx}$	
			c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
PC2-AR3	2,8	J_c^3	6,9	31,4
PC4-AR1	2,3	J_c^3	5,8	31,9

Em face dos resultados obtidos nos ensaios considerou-se ajustado adoptar $c' = 0$ e $\phi' = 30^\circ$ como parâmetros de resistência máxima em termos de tensões efectivas representativos das margas compactadas a utilizar nos aterros. Para as margas “in situ” que irão servir de fundação aos aterros, onde não se conseguiram colher amostras para se determinarem as respectivas características de resistência mecânica, admite-se que apresentarão parâmetros de resistência superiores aos obtidos nos ensaios efectuados. Assim sendo, considerou-se ajustado adoptar, para as margas que irão servir de fundação aos aterros, $c' = 25$ KPa e $\phi' = 30^\circ$ como parâmetros de resistência máxima em termos de tensões efectivas. Estes valores foram tomados do lado conservativo, para terem em atenção alguma degradação das características mecânicas destes materiais ao longo do tempo.

4. ATERROS ESPECIAIS

Tendo em conta os condicionalismos em termos de disponibilidade de materiais para a execução dos aterros, bem como das suas características, admitiu-se que seria ajustado optar pela execução de aterros zonados [3]. Considerou-se que os solos a aplicar na execução do núcleo e das abas destes aterros deveriam ser preferencialmente os provenientes da escavação das margas mais alteradas e desagregadas ocorrentes em linha, depois de serem previamente desagregadas e fragmentadas quer nas zonas de empréstimo, quer nos depósitos realizados com essa finalidade, antes de serem colocadas nos aterros. A zona interior dos aterros foi executada com solos não tratados, enquanto as faixas laterais com uma largura de 5 m, foram realizadas com solos tratados com adição de cal. Com esta solução procurou-se impedir o acesso de água às margas não tratadas que constituem o corpo dos aterros, já que se trata de um dos principais problemas que têm contribuído para o mau comportamento deste tipo de aterros [5]. Inferiormente, foi executado um maciço de enrocamento no pé do talude, na zona central de maior altura, o qual, para além de funcionar como um elemento de drenagem, contribui também para a estabilidade

do aterro, quer devido ao seu encastramento na fundação, quer devido às suas características mecânicas. Atendendo às características dos solos a utilizar na execução dos aterros, à sua altura e às condições de fundação foram adoptadas inclinações suaves para os taludes da ordem de 1V/2H (Figura 4).



Figura 4 - Fases de execução do aterro localizado entre os kms 2+925 e 3+225 do trecho 1

Com esta inclinação procurou-se garantir a estabilidade global dos aterros, assim como uma adequada integração paisagística da obra, facilitando a fixação de um recobrimento vegetal. Dada a extensão dos taludes foi executado um nível de banquetas localizado 8 m abaixo do topo do pavimento. Estas banquetas foram impermeabilizadas através de uma laje de betão. O sistema de drenagem implementado compreende a drenagem da zona de fundação, da plataforma e dos taludes. Ao longo da zona de fundação, onde interessava fundamentalmente impedir o acesso de água ao contacto do terreno de fundação com o aterro para se evitar a degradação das características mecânicas das margas, o sistema de drenagem compreendeu a execução de uma rede principal de valas drenantes transversais e longitudinais, ligadas entre si ou às passagens hidráulicas, com drenagem no sentido do pé do talude. A este sistema principal foram ligados sempre que necessário, sistemas secundários de drenagem e de captação de pequenas nascentes de água localizadas, que foram sendo detectadas ao nível da fundação durante a fase de execução dos aterros (Figura 5). A opção por um sistema constituído por valas, em vez de um tapete drenante contínuo ao longo de toda a superfície de fundação, resultou do facto de se procurar diminuir as áreas de contacto dos terrenos de fundação e dos aterros com o sistema de drenagem, para assim se reduzir ao mínimo as zonas a serem sujeitas a fenómenos de saturação e amolecimento. Após a abertura das valas foi colocada de imediato uma geomembrana para impermeabilização. Sobre a geomembrana foi aplicado um geotêxtil sobre o qual assentou a brita.

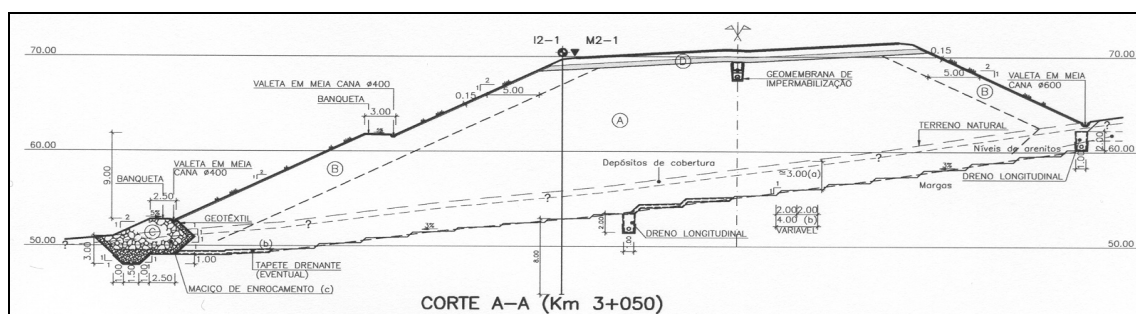


Figura 5 – Perfil tipo dos aterros especiais

Ao nível da plataforma e dos taludes, a drenagem é constituída por valetas na plataforma e nas banquetas, colectores de queda e respectivas caixas de ligação e de dissipação de energia. Todos os sistemas de drenagem quer longitudinais, quer transversais, foram convenientemente impermeabilizados na base por meio de uma geomembrana em polietileno de baixa densidade ou em PVC. Para evitar quer o ravinamento provocado pela escorrência das águas superficiais,

quer os acessos de água ao corpo dos aterros, todos os taludes foram revestidos e protegidos com uma cobertura vegetal. Por outro lado, a natureza do tratamento dos solos exteriores do aterro com cal teve por objectivo tornar os materiais de aterro menos sensíveis à presença de água.

Relativamente às condições de execução destes aterros há a referir que estes solos, como são evolutivos, têm sido muito pouco utilizados em Portugal sendo, por isso, bastante reduzida a experiência acerca do seu comportamento na execução deste tipo de obras. A utilização destes solos nos aterros requereu, por isso, durante a fase de obra, cuidados especiais na sua exploração e colocação. Ao nível da fundação houve uma preocupação muito grande em sanear totalmente o horizonte superior constituído pelas margas amareladas mais alteradas e desagregadas, tendo todos os aterros ficado assentes sobre as margas acinzentadas compactas e rijas. Após este saneamento, foram executados os sistemas de drenagem principais e os sistemas de drenagem secundários constituídos por valas transversais e pequenos tapetes drenantes, sempre que foram encontrados níveis de arenitos intercalados nas margas com ou sem evidências de água. Esta preocupação deveu-se ao facto de se procurar impedir eventuais acessos de águas, através da fundação, ao corpo dos aterros de margas não tratadas, uma vez que os níveis de arenitos são geralmente potenciadores do aparecimento de águas. Após a conclusão dos sistemas de drenagem da fundação, foram imediatamente executados os aterros de modo a que toda a superfície de fundação ficasse o menor tempo possível exposta, por forma a evitar a degradação das características resistentes das margas. Durante esta fase e após terem sido efectuados os aterros experimentais, para determinar a eficiência da compactação em função do teor em água, bem como o número de passagens, a espessura das camadas e o tipo de equipamento de compactação mais adequado à desagregação das margas, procurou-se que os solos a colocar nos aterros viessem o mais possível fragmentados e desagregados dos locais de exploração ou das zonas onde se encontravam acumulados em depósito, de modo a que durante a fase de espalhamento e após a compactação se obtivesse uma granulometria com menos de 15% de material com dimensão superior ao peneiro 3/4" e uma compactação relativa de pelo menos 95% do ensaio de compactação pesada. Este controle obrigou à realização de um número muito significativo de ensaios de compactação pesada, sempre que o material apresentava características diferentes ou provinha de locais diferentes e ao controle, também muito rigoroso, de todas as camadas colocadas em aterro através da realização de um ensaio com garrafa de areia por cada 500 m³ de solo compactado com um mínimo de um ensaio por cada camada executada e uma granulometria por cada 1 000 m³ de solo compactado com um mínimo de uma análise granulométrica por cada duas camadas executadas. A compactação das margas foi feita sempre do lado húmido entre $w_{\text{ópt} +1}$ e o $w_{\text{ópt} +2}$, tendo-se para tal, efectuado um controle do teor em água através de ensaios com gama densímetro. O controle da homogeneização entre as margas e cal, foi realizado através de inspecção visual e de ensaios de laboratório que permitiram também controlar o aumento do ganho de resistência desta mistura (Figura 6).



Figura 6 - Fases de colocação e mistura das margas tratadas com cal

5. ESCAVAÇÕES

Relativamente à execução das escavações neste tipo de formações, a respectiva estabilidade depende essencialmente da altura, da extensão e espessura dos depósitos superficiais (que podem, em alguns casos, corresponder a acumulações resultantes de antigos escorregamentos), da atitude das camadas das formações jurássicas em relação à orientação do traçado e da presença de níveis de água suspensos nestas unidades. A franja de alteração destas formações leva geralmente a que seja apenas necessária a realização de pequenos cortes para que se possam originar superfícies de instabilização. Tendo em atenção todos estes aspectos e também os referentes às características e natureza destas formações, considerou-se ajustado prever taludes relativamente suaves com inclinação máxima de 1V/2H, dispendo de banquetas com afastamento máximo de 8 m em altura e largura de 3 m. Para além da geometria adoptada para estes taludes, foram ainda ponderados os aspectos de comportamento associados ao carácter evolutivo e expansivo das margas, o que levou a que se fosse adoptada uma protecção superficial para os taludes constituída por 10 cm de terra vegetal sobre a qual foi assente um revestimento constituído por um tapete de “Enkamat S” ou similar, com cerca de 20 mm de espessura, fixado às margas através de grampos. Sobre este tapete foi colocada uma outra camada de 3 cm de terra vegetal, sobre a qual foi executada a hidrossementeira. As banquetas foram impermeabilizadas para evitarem os acessos de água às margas, através de um revestimento superficial constituído por uma laje de betão. Com esta medida procurou-se diminuir as infiltrações de água ao maciço através das banquetas, melhorando significativamente a estabilidade dos taludes. O sistema de drenagem compreendeu a execução de valetas na crista dos taludes e nas banquetas, colectores de queda e respectivas caixas de ligação e de dissipação de energia. Durante as escavações, sempre que foram detectadas afluições de água na superfície dos taludes executaram-se esporões e máscaras drenantes, que foram ligados às valetas ou a drenos longitudinais dispostos ao longo das banquetas e da plataforma da estrada (Figura 7).

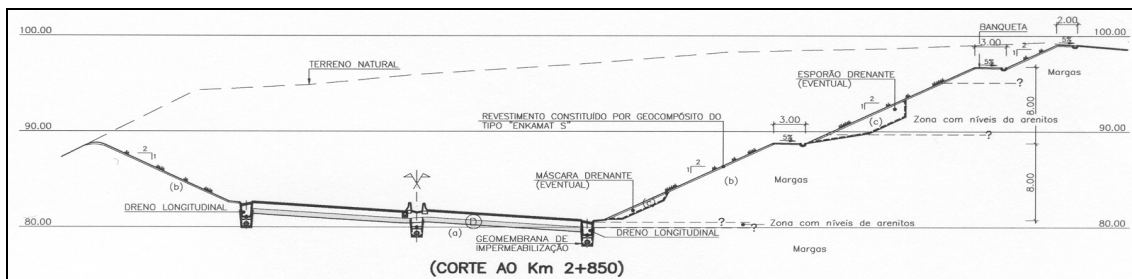


Figura 7 – Perfil tipo das escavações

Esta medida foi determinante para o bom comportamento dos taludes que se encontram executados no trecho 1. Outra das preocupações que se teve durante a execução destes taludes, foi a de procurar que o tempo de exposição das margas aos agentes atmosféricos, fosse a menor possível, no sentido de se evitar a degradação das suas características mecânicas. Houve, por isso que proceder à colocação, tão rápida quanto possível, do revestimento preconizado.

6. CONCLUSÕES

A ocorrência de formações margosas jurássicas evolutivas de fraca qualidade levantou dificuldades particulares e requereu cuidados especiais na execução das terraplenagens. A rápida degradação das características mecânicas das margas quando expostas aos agentes atmosféricos que se traduz numa perda de resistência, num aumento da fendilhação e na sua

parcial desagregação, podendo a curto prazo potenciar a ocorrência de instabilização, levaram a que se tivessem de tomar cuidados adicionais no dimensionamento das obras.

A obrigatoriedade de se proceder à reutilização dos terrenos margosos provenientes das escavações em linha, devido à falta de outros tipos de terrenos com melhores características, levou a que fosse feita uma caracterização geotécnica pormenorizada, tendo-se optado por seguir também as prescrições do Guide Technique des Terrassements Routiers de 1992 da LCPC/SETRA, que faz recomendações relativamente à utilização destes materiais. Dos resultados nos ensaios de laboratório realizados, concluiu-se que as margas apresentavam elevada degradabilidade, principalmente quando saturadas, originando a sua desintegração solos com elevada percentagem de finos e média plasticidade do tipo A-6 e A-7-6 da classificação AASHTO, CL da classificação unificada e A₂ e A₃ da classificação LCPC/SETRA. Correspondem a materiais de difícil reutilização nos aterros, relativamente aos quais há ainda uma reduzida experiência no que respeita ao respectivo comportamento em obra, pelo que a sua utilização requereu cuidados adicionais na sua exploração e colocação.

Na fase de construção dos aterros considerou-se que se deveria rejeitar a compactação no lado seco, prever a protecção dos taludes com o objectivo de evitar os acessos de água ao corpo do aterro através da construção de uma franja tratada com cal, efectuar um controlo rigoroso da compactação e em particular da fragmentação dos blocos, prever a adopção de taludes com inclinações suaves (no máximo de 1V/2H) e a execução de sistemas drenantes ao nível da fundação de forma a evitar a entrada ou ascensão das águas por capilaridade nos núcleos de margas não tratadas. No caso das escavações, os objectivos definidos foram no sentido da adopção de taludes com inclinações suaves (no máximo de 1V/2H), de prever a captação e a drenagem de todas as aflúncias de água à superfície dos taludes para se evitarem instabilizações e de se protegerem de imediato todos os taludes de escavação com o revestimento adoptado para que estes estivessem o menor tempo possível expostos aos agentes atmosféricos, diminuindo assim grandemente a possibilidade das margas se desagregarem e de se desintegrarem. O acompanhamento que foi realizado durante a fase de obra, revelou-se essencial para a implementação destas medidas, tendo sido possível melhorar significativamente o desenvolvimento das técnicas construtivas. No caso dos aterros, uma das medidas fundamentais foi no sentido de proporcionar ao máximo a fragmentação dos elementos de maiores dimensões, o que teve reflexos claramente positivos no comportamento destes aterros.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos à Brisa – Auto-Estradas de Portugal, S.A., pela autorização e facilidades concedidas.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira S. *et al.* (2006). *Obras geotécnicas no nó de interligação das auto-estradas A10/A1 no Carregado*
- [2] Serviços Geológicos de Portugal. Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000, folha 30-D (Alenquer)
- [3] Cenorplan (2003-2004). *A10-Auto-estrada Bucelas/Carregado/A13. Sublanço Arruda dos Vinhos/Carregado (A1). Trechos 1 e 2. Projecto de Execução*
- [4] Blondeau. F. e Josseume, H. (1976). *Mesure de la résistance au cisaillement résiduel en laboratoire*. Bulletin du Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Numéro spécial II
- [5] C. Mieussens (1997). *Les remblais en marne. Etudes, pathologie et techniques de réparations*