

**OPTIMIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS PARA A
CONSTRUÇÃO DE UM TRECHO EM ATERRO COM FINOS DE PEDREIRAS
DE GRANITO**

**OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIVE PROCEDURES FOR THE
CONSTRUCTION OF A TRIAL EMBANKMENT WITH GRANITE QUARRY
FINES**

Frias, Alexandra, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil / Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, afrias@lnec.pt*

Roque, António José, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, aroque@lnec.pt*

Caldeira, Laura, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*

Almeida, Isabel Moitinho, *Centro e Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, imalmeida@fc.ul.pt*

Januário, Pedro, *Mota-Engil, Porto, Portugal, pjanuario@mota-engil.pt*

Coelho, Mónica, *Mota-Engil, Porto, Portugal, monica.coelho@mota-engil.pt*

Santos, Jorge, *Mota-Engil, Gaia, Portugal, jrsantos@mota-engil.pt*

RESUMO

Os finos de duas pedreiras de granito têm vindo a ser estudados no âmbito de um Protocolo celebrado entre o LNEC e o Grupo Mota-Engil, na perspectiva da sua reciclagem como material de construção de obras geotécnicas. Na primeira fase do programa de investigação procedeu-se à caracterização laboratorial exaustiva destes materiais. Na segunda fase está prevista a sua aplicação num trecho em aterro de uma via rodoviária. Atendendo a que se tratam de materiais em relação aos quais não existe experiência da sua reciclagem na aplicação prevista, considerou-se pertinente proceder, numa fase intermédia, à construção de aterros experimentais tendo em vista a optimização dos procedimentos construtivos a adoptar na construção do trecho em aterro. Na presente comunicação apresentam-se a metodologia aplicada e os resultados obtidos no programa de optimização dos procedimentos construtivos dos aterros experimentais.

ABSTRACT

The fines of two quarry fines have been studied in the scope of a Protocol celebrated between LNEC and Mota-Engil Company, in the perspective of its recycling as a construction material in geotechnical works. In the first phase of the research program an exhaustive laboratorial characterization of these materials took place. In the second phase it is previewed its application in a roadway embankment. Since they are materials for which there is no experience of its recycling in the previewed application, it was considered pertinent to proceed, in an intermediary phase, to the construction of trial embankments, with the objective of optimizing the constructive procedures to adopt in the construction of the embankment. The current communication presents the applied methodology and the results obtained in the optimization program of the constructive procedures of trial embankments.

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos com propriedades de natureza ambiental que os permitam classificar na categoria dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes e com propriedades de natureza

mecânica que possam garantir o desempenho requerido para as obras nas solicitações previstas, podem ser materiais alternativos aos naturais nas obras de engenharia civil, em geral, e nas obras geotécnicas, em particular. Contudo, por se tratarem de materiais que só recentemente começaram a ser estudados e aplicados em geotecnia, as especificações técnicas utilizadas, quase sempre de natureza empírica e desenvolvidas para os materiais naturais, não os contemplam. É importante, por isso, que no estudo dos resíduos, estes sejam submetidos a ensaios laboratoriais diversos, em particular de caracterização mecânica, nas condições de estado representativas das previstas *in situ*, visando uma avaliação global do desempenho dos mesmos nas possíveis aplicações, e que, preferencialmente, sejam aplicados em trechos experimentais com vista a avaliar as suas condições de aplicação, traficabilidade e comportamento *in situ*.

Considerando esta problemática, e no contexto de um Protocolo celebrado entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e o Grupo Mota-Engil (Roque et al., 2008), procedeu-se, numa primeira fase, à caracterização laboratorial exaustiva dos finos da Pedreira da Bouça do Menino, em Cervães (CRV), e da Pedreira do Moinho de Vento, em Famalicão (FAM). Os resultados desta fase inicial foram apresentados em Frias et al. (2008, 2009) e numa outra comunicação a este congresso (Frias et al., 2010). Numa segunda fase, está prevista a aplicação destes materiais na construção de um trecho em aterro de uma via rodoviária, com o objectivo de calibrar os resultados obtidos em laboratório e avaliar o comportamento dos finos das pedreiras em obra. Atendendo a que se tratam de materiais em relação aos quais não existe experiência na aplicação prevista e se desconhece o seu comportamento em obra, entendeu-se que seria vantajoso interpor, entre o estudo laboratorial e a construção do trecho em aterro, uma fase intermédia que permitisse otimizar os procedimentos construtivos a adoptar na construção do trecho em aterro.

Na presente comunicação apresenta-se a metodologia aplicada no programa de optimização dos procedimentos construtivos em camadas de aterros experimentais construídas com os finos de CRV, designadamente a descrição dos métodos utilizados no controlo da qualidade de construção e na avaliação da deformabilidade, e os principais resultados obtidos.

2. METODOLOGIA DE ESTUDO

O programa experimental para a optimização dos procedimentos construtivos a aplicar na construção de um trecho em aterro num troço de uma via rodoviária considerou as várias actividades a desenvolver, tendo-se iniciado pela selecção da área disponível na pedreira de CRV, pela delimitação dos trabalhos preparatórios e pela escolha dos equipamentos a utilizar.

Os trabalhos preliminares incluíram a preparação dos materiais a utilizar na construção das camadas dos aterros experimentais e do terreno na área seleccionada. Os trabalhos de preparação dos finos de CRV compreenderam: o seu transporte do local de depósito para a proximidade da área de construção dos aterros; a formação de pilhas de material, em volume suficiente para a execução das camadas dos aterros; a homogeneização do material nas pilhas; e a sua caracterização laboratorial, tendo-se determinado as propriedades índice e os parâmetros de compactação. Paralelamente, procedeu-se ao saneamento do terreno da fundação dos aterros e ao seu nivelamento.

De modo a se conhecerem as condições que possibilitam obter o melhor desempenho mecânico dos finos de CRV, com a maior rentabilidade, procedeu-se à construção de três aterros experimentais, com os teores em água, w , seguintes: teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo, $w_{opt-2\%}$; teor em água óptimo, w_{opt} ; e teor em água 2% superior ao teor em água óptimo, $w_{opt+2\%}$. Em cada aterro foram construídas três camadas contíguas, cada uma com 7 m de largura

e com as espessuras seguintes: 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m. Na base das camadas dos aterros experimentais construíram-se, de baixo para cima, uma camada em *tout-venant*, que desempenha a função de camada de fundação, com a espessura de 0,30 m, e uma camada com material idêntico ao utilizado na construção das camadas dos aterros, e que desempenha a função de camada de base. A espessura desta camada é idêntica à da camada dos aterros que a sobrepõe. A camada de base foi construída com o objectivo de impedir que a camada de fundação fosse solicitada pelos ensaios de caracterização mecânica das camadas dos aterros.

Para avaliar a qualidade de construção das camadas dos aterros experimentais, procedeu-se à determinação dos parâmetros de estado do material (teor em água, w e peso volúmico seco, γ_d) após duas passagens simples (ou seja, uma dupla) do cilindro. O número de passagens do cilindro por camada foi definido com base no valor mínimo definido para o grau de compactação, GC , relativamente ao ensaio Proctor modificado (PM). O GC corresponde à relação percentual entre o valor de γ_d *in situ* e o valor de γ_{dmax} do ensaio PM. Depois de atingido o GC requerido em cada camada, realizaram-se ensaios para a sua caracterização mecânica (deformabilidade).

Com vista à avaliação do comportamento das camadas em condições adversas, designadamente no que se refere à ocorrência de fenómenos de colapso, procedeu-se, por último, à rega das mesmas até se observar a formação de uma lâmina de água. Após um período de 13 a 15 horas, iniciou-se a caracterização de cada camada, de acordo com malha previamente definida, com determinação: do valor de w a três profundidades distintas, do valor de γ_d e do módulo de deformabilidade, E , com o objectivo de se avaliar a variação destes parâmetros em relação à camada não regada.

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Não obstante a exaustiva caracterização laboratorial previamente efectuada aos finos de CRV, cujos principais resultados foram apresentados em Frias et al. (2008, 2009) e numa outra comunicação ao congresso (Frias et al., 2010), procedeu-se à caracterização laboratorial do material, recolhendo-se para o efeito três amostras na pilha previamente formada e devidamente homogeneizada. O programa experimental adoptado incluiu a realização de ensaios para a determinação do valor de w natural, da densidade das partículas sólidas, G_s , da composição granulométrica e dos parâmetros de compactação (w , γ_d) pelos ensaios tipo Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM). O Quadro 1 mostra a média dos resultados obtidos para cada parâmetro.

Quadro 1 – Principais Características Físicas dos Finos de CRV Acumulados em Pilha

Propriedades físicas		Valor	
Teor em água natural (NP EN 1097-5)	w (%)	24,1	
Densidade das partículas sólidas (NP-83)	G_s	2,67	
Composição granulométrica (LNEC E 196)	Seixo fino (2 mm – 5 mm) (%)	2,5	
	Areia (2 mm - 0,06 mm) (%)	43,0	
	Silte (0,06 mm - 0,002 mm) (%)	49,1	
	Argila ($\leq 0,002$ mm) (%)	5,4	
Parâmetros de compactação (LNEC E 197)	Proctor normal (PN)	w_{opt} (%)	19,0
		γ_{dmax} (kN/m ³)	15,3
	Proctor modificado (PM)	w_{opt} (%)	14,1
		γ_{dmax} (kN/m ³)	18,0

γ_{dmax} = Peso volúmico seco máximo; w_{opt} = Teor em água óptimo Proctor normal; w_{opt} = Teor em água óptimo Proctor modificado.

De notar que, relativamente aos resultados obtidos na caracterização laboratorial da fase inicial, a principal diferença observada é a presença de elementos de dimensão superior a 2 mm,

pertencentes à classe dos seixos finos. Esta situação sugere a existência de alguma contaminação do material em depósito, dado que, nas amostras colhidas directamente do tubo de descarga para a fase inicial da caracterização laboratorial, as partículas de maiores dimensões pertenciam à classe das areias, sendo as dimensões inferiores a 1 mm. De referir também a existência de diferenças ao nível dos parâmetros de compactação, designadamente nos correspondentes ao ensaio PN.

Na compactação das camadas dos aterros experimentais começou por se considerarem como valores de referência os obtidos no ensaio PM (Quadro 1). Contudo, no decurso dos trabalhos, verificou-se que existiam diferenças, por vezes significativas, entre estes valores e os obtidos em ensaios de controlo sobre amostras recolhidas na pilha. Pelo facto, optou-se por se realizarem regularmente ensaios PM e adoptar os novos parâmetros de compactação obtidos como valores de referência para a compactação das camadas.

O espalhamento do material para a construção das camadas foi realizado com recurso a um camião e a pá carregadora, modelo CAT 938 G da *Caterpillar* e a compactação dos materiais foi efectuada com recurso a um cilindro auto-vibrador, modelo CAT CS683E (19 toneladas, t), também da *Caterpillar*.

O controlo da qualidade de construção das camadas foi realizado mediante a execução de ensaios que permitiram determinar os valores dos seguintes parâmetros de estado do material: w e γ_d . Para a determinação de γ_d efectuaram-se ensaios com: a) garrafa de areia (GA), com garrafa de 8'', de acordo com a especificação LNEC E 205:1967; e b) gamadensímetro, ou aparelho nuclear, modelo *Troxler 3430 Surface Moisture-Density Gauge* da *Troxler Electronic Laboratories, Inc.*, calibrado e utilizado segundo o procedimento descrito na norma ASTM D 6938-08^a. Na determinação de w realizaram-se ensaios: a) pela NP EN 1097-5; b) com o gamadensímetro acima mencionado; e c) com o *Speedy* (AASHTO T 217). Nos ensaios pela NP EN 1097-5 e com o *Speedy* utilizou-se parte do material colhido no ensaio de GA. A realização dos ensaios com o *Speedy* tiveram por objectivo a obtenção de valores imediatos, pertinentes para o avanço dos trabalhos.

Para a determinação do módulo de deformabilidade equivalente, EV , das camadas dos aterros experimentais foram realizados os ensaios seguintes: a) ensaio de carga estática com placa (ECP), segundo a norma DIN 18134; b) ensaio de carga dinâmica com placa através de deflectómetro de impacto ligeiro da *Carl Bro Pavement Consultants*, com o nome comercial de Prima 100 e comumente designado por deflectómetro de impacto portátil (DIP); e c) ensaio de carga dinâmica com equipamento electro-mecânico portátil, conhecido por *Soil Stiffness Gauge* (SSG), ou por *Geogauge*, modelo H-4140, da *Humboldt Mfg. Co.*, de acordo com a norma ASTM D 6758-02.

As três camadas de cada aterro experimental foram regadas no mínimo 2 e no máximo 3 vezes, com formação em cada uma destas regas de uma lâmina de água, com camião-cisterna com bomba e auto-tanque. De modo a possibilitar a avaliação de possíveis assentamentos ou empolamentos dos materiais compactados, procedeu-se à cravação de estacas metálicas em cada camada dos aterros experimentais. As estacas, alinhadas em três perfis transversais às camadas (3 estacas por perfil), equidistantes entre si, foram cravadas até se atingir a camada de fundação.

4. CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

O processo construtivo dos aterros experimentais iniciou-se com a execução da camada de fundação em *tout-venant*, de cerca de: 50 m de comprimento, 21 m de largura e 0,30 m de espessura. Sobre a camada de fundação, procedeu-se à construção da camada de base, de menor comprimento e largura que a camada de fundação, com material idêntico ao utilizado na

construção das camadas dos aterros experimentais. A camada de base foi compactada com passagens duplas do cilindro até se atingirem valores de GC adequados ($GC \geq 90\%$).

Sobre a camada de base construíram-se as três camadas de cada aterro experimental, com a geometria esquematizada na planta e no corte transversal da Figura 1. Cada aterro experimental foi construído com teores em água $w_{opt-2\%}$, w_{opt} e $w_{opt+2\%}$.

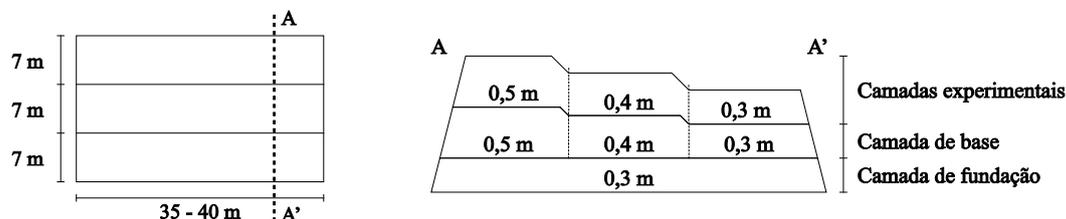


Figura 1 – Vista das Camadas dos Aterros Experimentais (sem escala) em Planta (esquerda) e em Corte Transversal (direita)

A construção das camadas iniciou-se com a marcação da altura pretendida, tendo-se utilizado estacas cravadas na camada de base. Seguiu-se a formação de pequenas pilhas do material ao longo das três faixas a compactar e o seu espalhamento e nivelamento. Por fim, procedeu-se à compactação de cada camada com duas passagens simples do cilindro e ao correspondente controlo da qualidade de construção com a realização dos ensaios oportunamente referidos. As camadas foram compactadas com 8 ou 10 passagens do cilindro, consoante a evolução do GC .

A principal dificuldade na construção das camadas deveu-se ao elevado teor em água natural dos finos de CRV na pilha, mesmo após os procedimentos de mistura sucessiva para homogeneização e arejamento. O procedimento adoptado para solucionar este problema consistiu em espalhar o material sobre a camada de base e deixar arejar. Contudo, observou-se que o próprio espalhamento do material com a pá carregadora era responsável, em algum grau, pela compactação dos materiais, dificultando a sua secagem, pelo que foi necessário recorrer por diversas vezes, no início da construção das camadas, a tractores com grades de dentes para escarificar o material.

Depois de ensaiadas, as três camadas de cada aterro experimental foram removidas para permitir a construção de novas camadas.

5. CONTROLO DA QUALIDADE DE CONSTRUÇÃO

Nos três aterros experimentais, construídos com $w_{opt-2\%}$, w_{opt} e $w_{opt+2\%}$, procedeu-se ao controlo da qualidade de construção das camadas, mediante análise da evolução do valor de GC com o número de passagens do cilindro. O critério estabelecido para o número mínimo de passagens simples do cilindro foi verificar-se que não ocorria aumento do valor de GC . Conforme previsto no planeamento do programa experimental, os ensaios de controlo de qualidade da construção foram realizados em acordo com uma malha previamente definida. Assim, os ensaios foram realizados ao longo da zona central de cada camada, aos perfis transversais seguintes: 10 m, 20 m e 30 m. Em cada uma das três áreas seleccionadas, e a cada duas passagens simples do cilindro, foram executados os seguintes ensaios:

- Ensaio GA: um ensaio por área seleccionada;
- Teor em água pela NP EN 1097-5: uma determinação por cada GA;
- Gamadensímetro: três determinações por cada GA;
- Speedy*: uma determinação de w por cada GA.

Considerou-se pertinente a utilização dos dois últimos ensaios, enquanto ensaios mais expeditos e económicos, numa perspectiva de aferir valores e eventualmente substituir o primeiro, mais demorado e dispendioso, na caracterização do trecho em aterro a construir em via rodoviária. Nesta comunicação apenas se apresentam os resultados obtidos com o ensaio GA, num total de cerca de 150 determinações, no conjunto dos aterros experimentais construídos.

A Figura 2 ilustra a evolução dos parâmetros de estado dos materiais nos três aterros experimentais ($w_{opt-2\%}$, w_{opt} e $w_{opt+2\%}$). Os parâmetros de estado (w e GC) representados para cada camada constituem valores médios, obtidos por determinação da média dos resultados nos locais dos três ensaios GA.

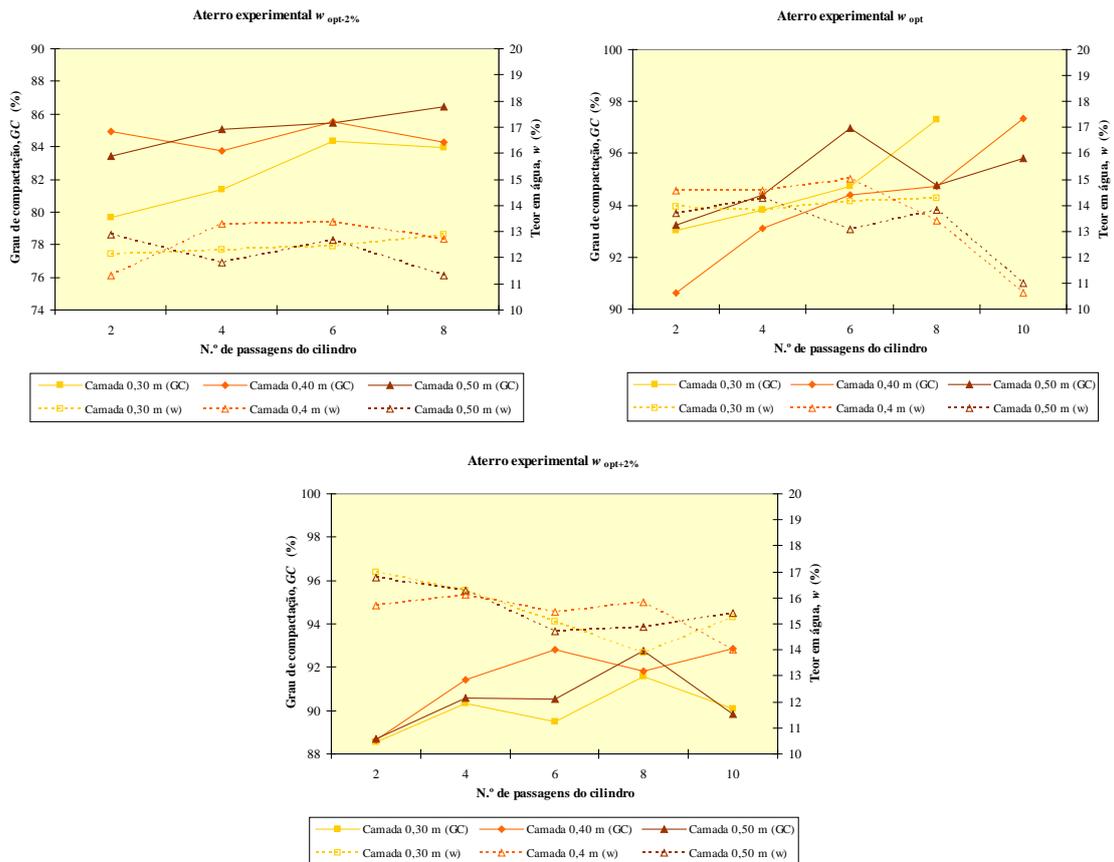


Figura 2 – Evolução dos Valores de w e de GC em Função do Número de Passagens do Cilindro nos Três Aterros Experimentais

O aterro experimental em que se obtiveram os valores máximos de GC foi o correspondente ao w_{opt} , com valores finais de GC entre os 94,9% e os 99,5%. As camadas de 0,30 m e de 0,40 m apresentaram um valor médio final de GC de 97,3% e a camada de 0,50 m um valor médio final de GC de 95,8%. Verifica-se que a camada experimental de 0,30 m mantém o valor de w pretendido, ou seja aproximadamente igual ao valor de w_{opt} de referência do PM, até ao final das passagens do cilindro, ao contrário das outras duas camadas, em que este parâmetro decresce significativamente nas duas últimas passagens do cilindro, tomando valores entre 2,2 a 2,6% inferiores ao valor de w_{opt} de referência do PM. Esta diferença de comportamento estará relacionada com a paragem dos trabalhos entre as 8 e as 10 passagens do cilindro, por um período de cerca de 48 horas, coincidente com o fim-de-semana.

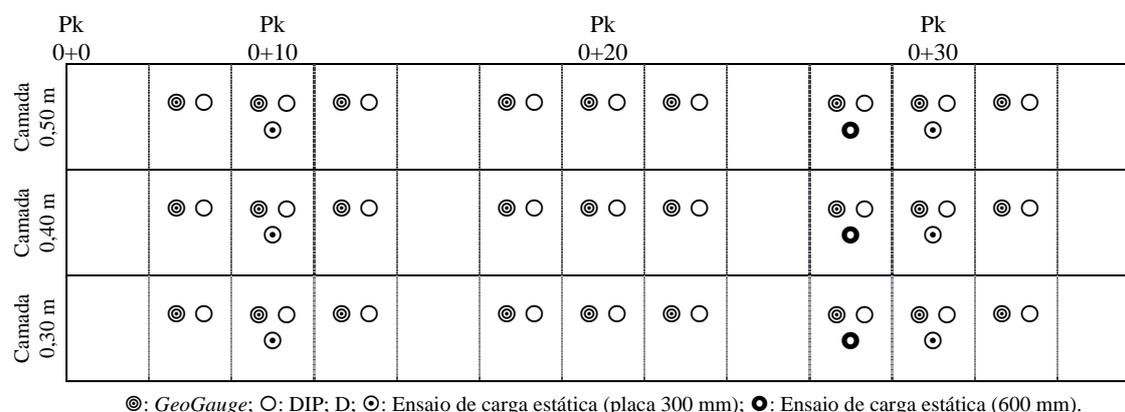
De acordo com a especificação LNEC E 242, para o tipo de materiais em estudo, os valores mínimos de *GC* a respeitar na execução de aterros e da camada do leito de pavimento de vias rodoviárias, são 90% e de 95%, respectivamente. Assim, conclui-se que os finos de CRV são adequados:

- a) à construção de aterros estruturais e da camada de leito de pavimento de vias rodoviárias quando compactados com w_{opt} , em condições idênticas às ensaiadas no que se refere à espessura da camada e ao número de passagens do cilindro;
- b) à construção de aterros estruturais, quando compactados com $w_{opt+2\%}$ e 8 passagens simples do cilindro, no caso da camada de 0,30 m, 4 a 10 passagens simples, no caso da camada de 0,40 m, e 4 a 8 passagens simples, no caso da camada de 0,50 m.

6. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

A avaliação do comportamento mecânico dos aterros experimentais compreendeu a determinação do módulo de deformabilidade equivalente, *EV*, das camadas, a partir de: a) ensaios de carga estática com placa (ECP) de 300 mm e de 600 mm de diâmetro; b) ensaios de carga dinâmica com deflectómetro de impacto portátil (DIP); e c) ensaios de carga dinâmica com *Geogauge*. A localização destes ensaios nas camadas é apresentada na Figura 3, em malha previamente definida. Nesta comunicação apenas se apresentam os resultados dos ensaios ECP.

No Quadro 2 apresentam-se os valores de *EV* obtidos no segundo ciclo dos ensaios ECP, EV_2 , realizados com placas de 300 mm ($EV_{2(300\text{ mm})}$) e de 600 mm ($EV_{2(600\text{ mm})}$) de diâmetro, nas proximidades do Pk 0+30.



⊙: *GeoGauge*; ○: DIP; D; ⊖: Ensaio de carga estática (placa 300 mm); ⊕: Ensaio de carga estática (600 mm).

Figura 3 – Esquema de Localização dos Ensaios de Caracterização Mecânica das Camadas dos Aterros Experimentais

Quadro 2 – Valores de EV_2 das Camadas dos Aterros Experimentais

Parâmetro	Unidade	Aterro								
		$w_{opt-2\%}$			w_{opt}			$w_{opt+2\%}$		
		Camada			Camada			Camada		
		0,30 m	0,40 m	0,50 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m
$EV_{2(300\text{ mm})}$	MPa	50	65	67	87	143	– ^(a)	75	63	63
$EV_{2(600\text{ mm})}$	MPa	55	56	54	79	112	– ^(a)	60	62	54

^(a) Não foram realizados ensaios de ECP antes da rega da camada.

A análise dos valores de EV_2 permite concluir que o melhor comportamento mecânico das camadas dos aterros experimentais foi obtido com os finos de CRV compactados com w_{opt} . Estes valores são coerentes com os valores obtidos para *GC*. Nos solos naturais a rigidez

máxima, e conseqüentemente o valor de EV máximo, obtém-se normalmente em camadas construídas com teores em água inferiores ao w_{opt} , razão pela qual estes materiais são habitualmente compactados com $w_{opt-2\%}$ nas camadas constitutivas das vias rodoviárias.

Relativamente aos aterros $w_{opt-2\%}$ e $w_{opt+2\%}$ não se observam diferenças significativas entre os valores de EV_2 , destacando-se apenas o valor de $EV_{2(300\text{ mm})}$ (75 MPa), na camada 0,30 m, do aterro $w_{opt+2\%}$.

Considerando os valores obtidos para EV_2 em cada aterro experimental, não se observa qualquer relação com as espessuras das camadas ensaiadas, sendo que seria de esperar que com o aumento da espessura da camada diminuísse o valor de EV_2 . Aparentemente, haverá outros factores com maior influência no valor de EV_2 do que a espessura das camadas ensaiadas.

De um modo geral, verifica-se que o valor de EV_2 diminuiu com o aumento do diâmetro da placa.

Considerando o *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional* das Estradas de Portugal (EP) (ex-Junta Autónoma de Estradas, JAE, 1995), os finos de CRV pertencem à classe de terrenos de fundação S_2 , que podem ser utilizados como material de fundação de pavimento pertencente à classe do tipo F_1 (aplicabilidade às classes de tráfego T_5 e T_6), para a qual são admitidos valores de EV de 30 a 50 MPa. Nesta situação não é necessário complementar a fundação do pavimento com camadas superiores, isto é, com camada de leito de pavimento. No caso da construção da fundação de pavimentos pertencentes às classes F_2 ou F_3 com os finos da pedra estudada, já devem ser complementadas com uma camada de leito de pavimento construída com materiais e espessuras definidas no documento.

Os valores de EV_2 obtidos nas camadas dos aterros experimentais são superiores aos recomendados no *Guide Technique "Recommendation pour les Terrassements Routiers"* (RTR) (LCPC/SETRA, 2000) para a camada de fundação da camada de leito de pavimento, que são da ordem de 15 a 35 MPa, indicando ser viável a utilização dos finos de CRV para a construção de aterros estruturais.

7. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CAMADAS APÓS A REGA

Após a campanha de ensaios que permitiu estudar o comportamento mecânico das camadas de cada aterro experimental, procedeu-se à avaliação das características das camadas após a rega. Nesta comunicação não se apresentam os resultados de w obtidos às três profundidades em cada uma das camadas, ao longo de dois perfis longitudinais.

Os ensaios para avaliação da influência da rega nas características de compactação e de deformabilidade das camadas dos aterros experimentais foram executados nas proximidades dos locais mostrados na Figura 3, com a particularidade de se ter realizado apenas um ensaio ECP com placa de 300 mm de diâmetro por camada (proximidades do Pk 0+30).

Os valores de w e GC obtidos pelo ensaio GA depois da molhagem (pós-rega) são apresentados na Figura 4, em conjunto com os valores obtidos para os mesmos parâmetros antes da fase de molhagem (pré-rega), para facilitar a comparação. Os valores indicados resultam da determinação da média dos três valores obtidos em cada área de ensaio.

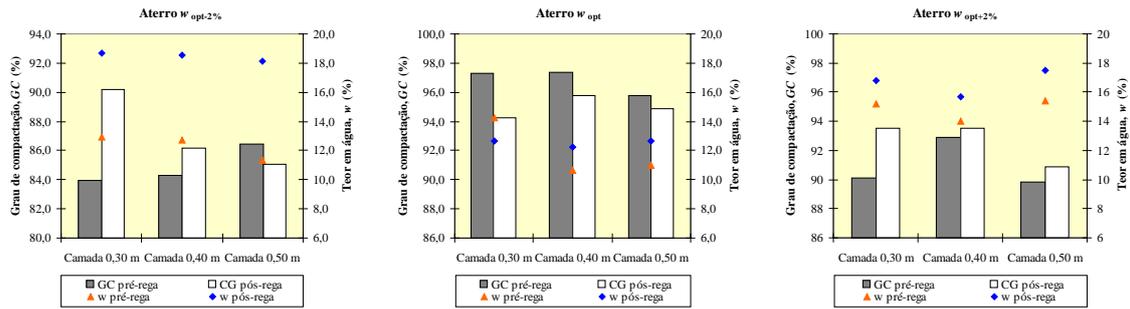


Figura 4 – Comparação entre os Valores de w e de GC Antes e Depois da Rega das Camadas dos Aterros Experimentais

Verifica-se que, comparativamente com o valor de GC antes da rega, o valor de GC após a rega diminuiu em todas as camadas do aterro w_{opt} e na camada 0,50 m do aterro $w_{opt-2\%}$, e aumentou nas restantes. Conclui-se, portanto, que nas condições desfavoráveis ensaiadas não houve diminuição significativa do GC .

Em relação ao valor de w , o seu valor aumentou em todas as camadas após a rega, tendo este aumento sido mais significativo no aterro $w_{opt-2\%}$. A exceção a este comportamento geral ocorreu na camada 0,30 m do aterro w_{opt} , onde o valor de w após a rega foi inferior ao seu valor antes da rega.

No Quadro 3 apresentam-se os valores obtidos para EV_2 , com placas de 300 e 600 mm de diâmetro, nas camadas dos três aterros experimentais, e na Figura 5 comparam-se os valores de EV_2 (300 mm) e EV_2 (600 mm) obtidos antes (pré-rega) e depois (pós-rega) da molhagem das camadas.

Quadro 3 – Valores de EV_2 Depois da Rega das Camadas dos Aterros Experimentais

Parâmetro	Unidade	Aterro									
		$w_{opt-2\%}$			w_{opt}			$w_{opt+2\%}$			
		Camada			Camada			Camada			
		0,30 m	0,40 m	0,50 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
EV_2 (300 mm)	MPa		52	48	46	69	82	74	114	75	66
EV_2 (600 mm)	MPa		46	47	43	64	68	69	59	56	48

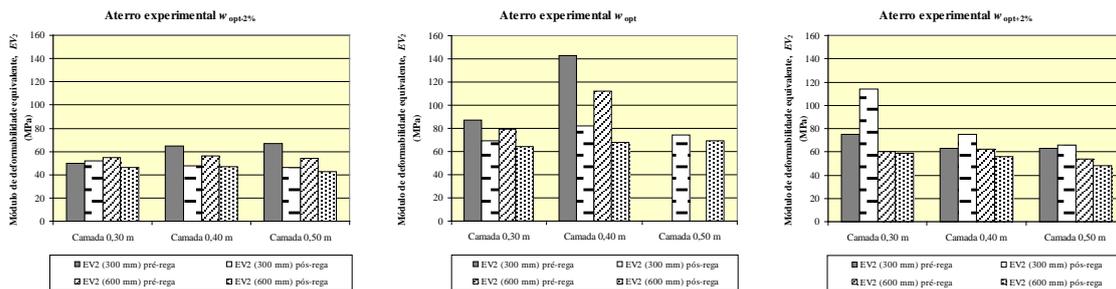


Figura 5 – Comparação entre os Valores de EV_2 (300 mm) e de EV_2 (600 mm) Antes e Depois da Rega das Camadas dos Aterros Experimentais

Comparando os valores de EV_2 obtidos antes e depois da rega das camadas, conclui-se que, de um modo geral, os valores se mantêm após a rega das camadas. As duas exceções são: a) a diminuição significativa de EV_2 na camada 0,40 m, compactada com w_{opt} ; e b) o aumento significativo do valor de EV_2 (300 mm) na camada 0,30 m do aterro $w_{opt+2\%}$.

Por imposições climatéricas, não foi possível apurar quaisquer dados relativos ao ECP para a camada 0,50 m do aterro w_{opt} , antes da fase de molhagem. Contudo, considerando o comportamento observado nas camadas 0,30 m e 0,40 m ensaiadas antes e depois da rega, é de esperar o mesmo comportamento na camada 0,50 m.

De referir, por último, que a observação das marcas nas 27 estacas previamente cravadas nas camadas dos aterros experimentais não mostrou ter havido colapso do material compactado.

8. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado, realizado no âmbito de um programa de investigação, pretende contribuir para a valorização dos resíduos em geral e dos finos de pedreiras em particular, através da sua utilização em infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas, em substituição dos materiais naturais não renováveis tradicionalmente aplicados.

Com o objectivo de se optimizarem os procedimentos construtivos de um trecho em aterro numa via rodoviária, procedeu-se à construção de três camadas, com a espessura de 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m, em três aterros experimentais. Em cada um destes aterros, os finos de uma das pedreiras de granito estudadas no Protocolo celebrado entre o LNEC e o Grupo Mota-Engil, a Pedreira de Cervães, foram compactados com um dos teores em água seguintes: $w_{opt-2\%}$, w_{opt} e $w_{opt+2\%}$.

De acordo com a especificação LNEC E 242, que especifica os valores mínimos de grau de compactação (GC) a respeitar na execução de aterros e de camada de leito de pavimento de vias rodoviárias, os materiais estudados afiguram-se adequados: a) à construção de aterros estruturais e da camada de leito de pavimento de vias rodoviárias quando compactados com w_{opt} , em condições idênticas às ensaiadas no que se refere à espessura da camada e ao número de passagens do cilindro; b) à construção de aterros estruturais quando compactados com $w_{opt+2\%}$ e 8 passagens simples do cilindro, no caso da camada de 0,30 m, 4 a 10 passagens, no caso da camada de 0,40 m, e 4 a 8 passagens simples, no caso da camada de 0,50 m.

Dado os maiores valores de GC e de EV_2 terem sido registados nas camadas do aterro experimental construídas com w_{opt} , é recomendável que no trecho em aterro a construir na via rodoviária as camadas sejam aplicadas em condições de humidade idênticas. É ainda de admitir que, numa perspectiva de rentabilização dos trabalhos em obra, e sem que com isso prejudique o seu comportamento estrutural, as camadas sejam compactadas com a espessura de 0,50 m.

De referir, por último, que em condições desfavoráveis, derivadas da rega das camadas até à formação de lâmina de água, não foi observado o colapso dos materiais aplicados.

AGRADECIMENTOS

Os autores pretendem manifestar o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio financeiro concedido ao estudo, através da atribuição de uma Bolsa de Doutoramento (SFRH/BD/12578/2003), com o co-financiamento do POCI 2010 e do FSE.

REFERÊNCIAS

Frias, A., Roque, A. J., Almeida, I. M., Caldeira, L., Andrade, R. e Santos, J. (2008). Caracterização laboratorial de finos de pedreiras de granito visando a sua aplicação em

- obras geotécnicas no âmbito do Protocolo LNEC/Mota-Engil. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, pp. 269-276.
- Frias, A., Roque, A. J., Almeida, I. M., Caldeira, L., Januário, P. e Santos, J. (2009). Características mecânicas de finos de pedreiras de granito: avaliação da aplicabilidade em obras geotécnicas. *Actas do Seminário sobre valorização de resíduos em obras geotécnicas. Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector*, Aveiro, Portugal.
- Frias, A., Roque, A. J., Caldeira, L., Almeida, I. M., Januário, P., Coelho, M. e Santos, J. (2010). Optimização de procedimentos construtivos para a construção de um trecho experimental em aterro com finos de pedreiras de granito. *Actas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia*, Guimarães, Portugal.
- JAE (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas, Almada, Portugal.
- LCPC/SETRA (2000). *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme. Fascicule I – Principes Ggénéraux. Guide Technique*, França, 98 p.
- Roque, A. J., Andrade, R., Frias, A., Caldeira, L., Vieira, A., Almeida, I. M. e Fortunato, E. (2008). Protocolo LNEC/Mota-Engil para uma gestão sustentável dos finos de pedra gerados na produção de agregados. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, pp. 261-268.

