

**CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE FINOS DE PEDREIRAS DE GRANITO:
PERSPECTIVAS DE VALORIZAÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS**

**GEOTECHNICAL PROPERTIES OF GRANITE QUARRY FINES:
VALORISATION PERSPECTIVES IN GEOTECHNICAL WORKS**

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

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

RESUMO

Os finos de duas pedreiras de granito, situadas na região Norte de Portugal, têm vindo a ser objecto de um programa de investigação na perspectiva da sua valorização como material de construção de obras geotécnicas. Este programa, que se insere no quadro de um Protocolo celebrado entre o LNEC e o Grupo Mota-Engil, no qual participa a FCUL, compreendeu a realização de um vasto conjunto de ensaios laboratoriais para determinação das propriedades geoambientais e geotécnicas destes finos. Na presente comunicação analisam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização hidráulica e mecânica, realizados com objectivo de avaliar as propriedades determinantes para avaliação da viabilidade técnica da aplicação destes materiais em infra-estruturas de transportes e em obras geotécnicas.

ABSTRACT

The fines of two granite quarries, located in the Northern region of Portugal, have been object of a research program aiming its valorisation as a construction material in geotechnical works. This program, inserted in a Protocol signed by LNEC and Mota-Engil Company, in which FCUL participates, comprehended the realization of a vast number of laboratorial tests to determine the geoenvironmental and geotechnical properties of these quarry fines. The present communication analyses the results of the hydraulic and mechanical characterization tests, performed with the objective of evaluating the determinant properties for evaluation of the technical viability of applying these materials in transport infrastructures and geotechnical works.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, as políticas ambientais privilegiam a prevenção, a reutilização e a valorização dos resíduos em detrimento da sua eliminação em aterro. As vantagens decorrentes da implementação destes procedimentos são tanto ambientais como económicas, nomeadamente: a) o prolongamento do tempo de vida útil dos aterros de resíduos; b) a preservação dos recursos naturais não renováveis; c) a diminuição da emissão de CO₂ para a atmosfera; e d) a possibilidade de construir as obras com custos mais baixos.

A aplicação de resíduos em obras geotécnicas é uma das várias possibilidades de valorização destes materiais na indústria da construção, com vantagens importantes, resultantes destas obras consumirem, normalmente, grandes volumes de material e dispensarem tratamentos mais ou menos onerosos da matéria-prima, contrariamente ao que acontece noutras aplicações industriais.

Neste contexto, foi estabelecido um Protocolo (Roque et al., 2008) entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Grupo Mota-Engil (Grupo ME) que visa identificar soluções para a valorização dos finos resultantes da produção de agregados e de areias, contribuindo para a implementação do princípio da construção sustentável. O programa experimental, em que também participa a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), tem como objectivo o estudo dos finos de duas pedreiras de granito exploradas e seleccionadas pelo Grupo ME no Norte do país: Pedreira do Moinho de Vento, em Vila Nova de Famalicão (FAM), e Pedreira da Bouça do Menino, em Cervães, Barcelos (CRV). A descrição das características geológicas regionais e locais destas pedreiras e dos respectivos processos de produção dos finos foram descritos em Roque et al. (2008).

O programa laboratorial adoptado, descrito com pormenor em Frias et al. (2008), visou o estudo exaustivo dos finos das duas pedreiras na vertente geoambiental e geotécnica, tendo-se realizado ensaios de caracterização química clássica e geoambiental, mineralógica, física, hidráulica e mecânica, com o objectivo de avaliar a sua adequabilidade para a construção de infra-estruturas de transporte e de obras geotécnicas, designadamente, em camadas de confinamento basal e de cobertura final de aterros de resíduos, no confinamento de áreas contaminadas e em aterros estruturais.

Nesta comunicação apresentam-se e analisam-se os resultados laboratoriais obtidos na caracterização hidráulica e mecânica (deformabilidade e resistência ao corte) destes materiais, obtidos no decurso da primeira fase do programa experimental. Na segunda fase será construído um trecho em aterro numa infra-estrutura rodoviária, com o objectivo de calibrar os resultados obtidos em laboratório e avaliar o respectivo desempenho em obra. Numa segunda comunicação submetida a este congresso (Frias et al., 2010), descreve-se a metodologia aplicada e discutem-se os resultados obtidos em camadas de aterros experimentais, construídas para se optimizarem os procedimentos construtivos de um trecho em aterro, numa via rodoviária.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Características dos Finos de Pedreira

Os procedimentos de amostragem dos finos nas duas pedreiras e de preparação das respectivas amostras para a realização dos ensaios laboratoriais foram apresentados em Frias et al. (2008). De acordo com os mesmos autores, estes materiais apresentam: a) teor em água natural elevado; b) densidade das partículas sólidas de ordem de grandeza semelhante à da maioria dos solos naturais; c) granulometria fina; e d) características não plásticas, no caso de CRV, e $I_p = 13$, no caso de FAM. O Quadro 1 resume as principais características físicas dos materiais em estudo.

Considerando a Classificação Unificada dos Solos da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 2487-00), os finos de ambas as pedreiras são classificados como ML: siltes inorgânicos arenosos ou com areia. A aplicação da Classificação para Fins Rodoviários da especificação LNEC E 240, baseada na classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), aos finos de FAM, mostra que estes pertencem ao grupo A-6 dos solos argilosos. De acordo com a mesma classificação, os finos de CRV pertencem ao grupo A-4 dos solos siltosos.

Quadro 1 – Principais Características Físicas dos Finos das Pedreiras

Propriedades físicas		Pedreira	
		FAM	CRV
Teor em água natural (NP EN 1097-5)	w (%)	34,6	25,2
Densidade das partículas sólidas (NP-83)	G_s	2,66	2,73
Limite de liquidez	w_L (%)	39	N.P.
Índice de plasticidade	I_p (%)	13	N.P.
Composição granulométrica (LNEC E 196)	Areia (2 mm - 0,06 mm) (%)	18	49
	Silte (0,06 mm - 0,002 mm) (%)	67	46
	Argila ($\leq 0,002$ mm) (%)	15	5
Parâmetros de compactação (LNEC E 197)	Proctor normal (PN)	γ_{dmax} (kN/m ³)	15,4
		w_{opt} (%)	13,3
	Proctor modificado (PM)	γ_{dmax} (kN/m ³)	19,9
		w_{opt} (%)	17,9
	Proctor modificado (PM)	γ_{dmax} (kN/m ³)	17,3
		w_{opt} (%)	13,6

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

A caracterização geoambiental destes materiais, realizada na perspectiva da avaliação da sua perigosidade para o meio ambiente e para a saúde pública, indicou que se tratam de materiais inertes (Frias et al., 2008), quer ao nível do resíduo, quer ao nível do respectivo eluato, portanto com baixo potencial poluente. Assim, não se prevê que a construção de obras geotécnicas com finos de pedreiras com as características das dos finos estudados possa contribuir para a degradação da qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas.

Os finos das duas pedreiras apresentam composição mineralógica semelhante, com quartzo, feldspato e mica como minerais predominantes, excepto no que diz respeito à presença da esmectite, cuja proporção é relativamente elevada na fracção argilosa dos finos de FAM e fraca na fracção argilosa dos finos de CRV (Frias et al., 2008).

2.2. Métodos de Ensaio

2.2.1. Permeabilidade

O desempenho hidráulico dos finos das pedreiras foi avaliado com base na condutividade hidráulica, k , determinada através da realização de ensaios de permeabilidade, em permeâmetros de parede rígida. Na realização dos ensaios foram adoptadas a norma ASTM D 5856-95 (2002) e as metodologias propostas por Roque (2001).

Foram preparados dois conjuntos de provetes, cada um com quatro teores em água: a) teor em água 2% inferior ao óptimo, $w_{opt-2\%}$; b) teor em água óptimo, w_{opt} ; c) teor em água 2% superior ao óptimo, $w_{opt+2\%}$; e d) teor em água 4% superior ao óptimo, $w_{opt+4\%}$. Um dos conjuntos foi compactado com energia equivalente à do ensaio Proctor normal (PN) e o outro com energia equivalente à do ensaio Proctor modificado (PM), perfazendo um total de 16 provetes. Com este conjunto de provetes pretendeu-se avaliar a influência do teor em água e da energia de compactação no valor de k dos finos das pedreiras.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com água desmineralizada e percolação no sentido descendente, por esta simular melhor as condições de infiltração reais na grande maioria das obras geotécnicas em que estes materiais podem vir a ser aplicados, como sejam, por exemplo, os aterros estruturais de infra-estruturas de transporte e as camadas de confinamento basal e de cobertura final de aterros de resíduos. Os ensaios de permeabilidade realizaram-se a carga hidráulica constante, com quatro patamares diferentes, de modo a avaliar k para diferentes gradientes hidráulicos, i . Os ensaios iniciaram-se sempre com o patamar de menor carga hidráulica. Os finos de FAM, de

permeabilidade inferior aos dos de CRV, foram sujeitos a uma carga hidráulica máxima de 2,00 m ($i = 40$), enquanto que nos de CRV a carga hidráulica máxima foi de 1,00 m ($i = 20$).

2.2.2. Consolidação

O estudo da deformabilidade incluiu a realização de ensaios de consolidação em edómetro, para determinação dos principais parâmetros de compressibilidade dos finos das pedreiras. Na fase inicial dos ensaios foram adoptados os procedimentos necessários para se proceder à avaliação do potencial de expansão ou de colapso unidimensional dos materiais, tendo em vista antecipar a sua sensibilidade à água e o seu comportamento volumétrico em obra. Os respectivos procedimentos de ensaio foram adaptados dos previstos nas normas ASTM D 2435-04 e ASTM D 4546-03.

Os ensaios foram realizados sobre provetes preparados com finos de FAM e de CRV, com os teores em água $w_{opt-2\%}$ e w_{opt} e compactação com a energia PN e PM. Para cada teor em água e para cada energia de compactação foram ensaiados dois provetes, num total de oito por pedreira, a que foram inicialmente aplicadas, respectivamente, tensões verticais de cerca de 25 e de 50 kPa.

O plano de carregamento incluiu duas fases. Inicialmente, cada provete foi submetido a uma tensão vertical, σ_v , de cerca de 25 ou de 50 kPa e a inundação, com o objectivo de se avaliar o comportamento volumétrico dos finos. Somente após a avaliação do potencial expansivo ou de colapso unidimensional, se iniciou o ensaio de consolidação propriamente dito. Nesta segunda fase de carregamento, a tensão vertical efectiva máxima de consolidação atingiu 399,1 kPa. No decurso do ensaio, procedeu-se à realização de um ciclo de descarga-recarga, para se avaliarem as características de expansão e de recompressão dos materiais.

2.2.3. Corte em Compressão Triaxial

A resistência mecânica dos finos das pedreiras foi determinada a partir da realização de ensaios de corte directo (em caixa de corte) e de ensaios de corte em compressão triaxial, ambos consolidados drenados. Nesta comunicação apenas se apresentam os resultados relativos a estes últimos. Os resultados obtidos nos ensaios de corte directo foram apresentados em Frias et al. (2009).

Os ensaios de corte em compressão triaxial realizaram-se segundo procedimento interno do LNEC, adaptado da norma BS 1377: Part 8:1990, da *British Standards Institution*, em duas etapas principais: a) saturação (com aplicação de contra-pressão) e consolidação; e b) corte dos provetes. A tensão deviatória foi aplicada numa prensa com capacidade para 50 kN, a uma taxa de deformação de 0,01 mm/min. Os ensaios terminaram quando a deformação axial imposta foi da ordem dos 20%.

O programa experimental incluiu a realização de ensaios sobre provetes preparados a partir dos finos de FAM e de CRV, com os teores em água $w_{opt-2\%}$ e w_{opt} e compactação com a energia PN e PM. Para cada teor em água e para cada energia de compactação foram preparados quatro provetes, num total de 16 por pedreira, a que foram aplicadas, respectivamente, as tensões efectivas de consolidação de 25, 50, 100 e 200 kPa. A execução deste conjunto de ensaios visou, para além da determinação das características intrínsecas de resistência ao corte, a avaliação da eventual influência do teor em água e da energia de compactação na resistência mecânica dos finos.

3. RESULTADOS

3.1. Condutividade Hidráulica

A variação de k em função do tempo de ensaio nos provetes compactados com energia PN e PM dos finos de FAM está representada na Figura 1. No Quadro 2 são apresentadas, para todos os provetes, as médias dos valores de k determinados depois de atingida a estabilização do caudal.

A Figura 2 e o Quadro 3 dizem respeito aos provetes PN e PM de CRV. Nas figuras e nos quadros, w_{opn} diz respeito ao teor em água dos provetes compactados pelo método PN e w_{opm} ao teor em água dos provetes compactados pelo método PM. Na Figura 3 é apresentada a variação do valor de k dos provetes PN e PM dos finos de FAM e de CRV em função do valor do w .

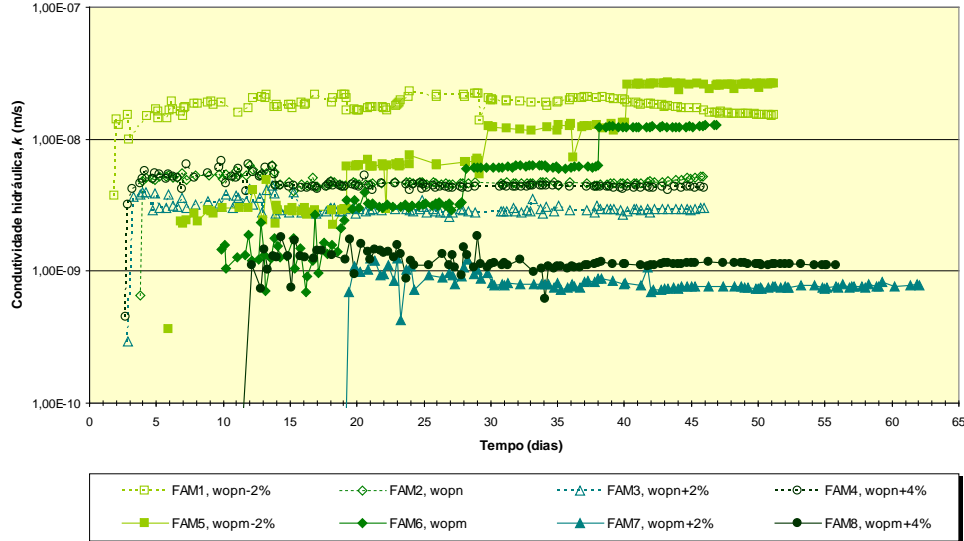


Figura 1 – Variação do Valor da Condutividade Hidráulica dos Provetes Proctor Normal e Modificado de FAM em Função do Tempo.

Quadro 2 – Condutividade Hidráulica dos Provetes Proctor Normal e Modificado de FAM

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Provetes			
			FAM1 ($w_{opn-2\%}$)	FAM2 (w_{opn})	FAM3 ($w_{opn+2\%}$)	FAM4 ($w_{opn+4\%}$)
Condutividade hidráulica (20°C)	k	m/s	17×10^{-9}	$4,8 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$4,3 \times 10^{-9}$
			Provetes			
			FAM5 ($w_{opm-2\%}$)	FAM6 (w_{opm})	FAM7 ($w_{opm+2\%}$)	FAM8 ($w_{opm+4\%}$)
Condutividade hidráulica (20°C)	k	m/s	26×10^{-9}	12×10^{-9}	$0,8 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$

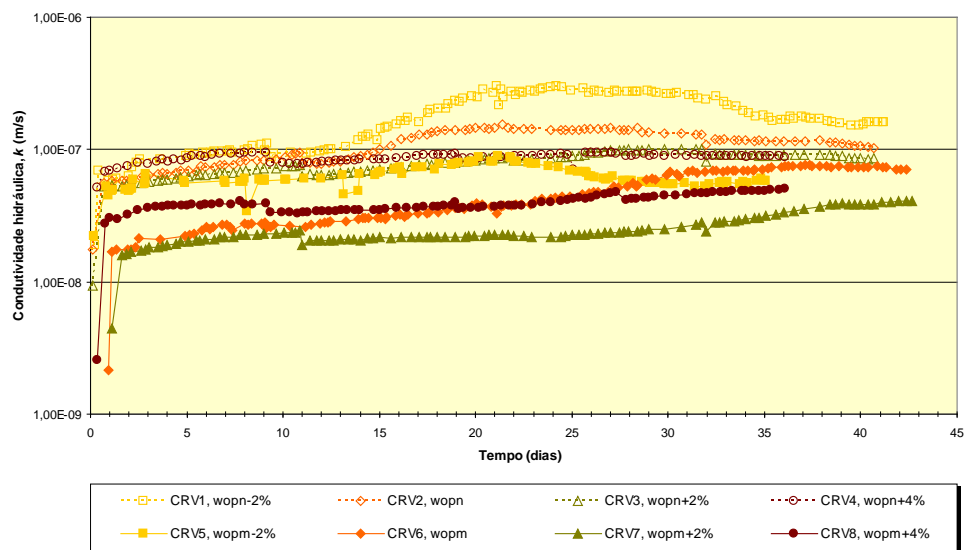


Figura 2 – Variação do Valor da Condutividade Hidráulica dos Provetes Proctor Normal e Modificado de CRV em Função do Tempo.

Quadro 3 – Condutividade Hidráulica dos Provetes Proctor Normal e Modificado de CRV

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Provetes			
			CRV1 ($w_{opn-2\%}$)	CRV2 (w_{opn})	CRV3 ($w_{opn+2\%}$)	CRV4 ($w_{opn+4\%}$)
Condutividade hidráulica (20°C)	k	m/s	18×10^{-8}	11×10^{-8}	$8,9 \times 10^{-8}$	$9,0 \times 10^{-8}$

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Provetes			
			CRV5 ($w_{opn-2\%}$)	CRV6 (w_{opn})	CRV7 ($w_{opn+2\%}$)	CRV8 ($w_{opn+4\%}$)
Condutividade hidráulica (20°C)	k	m/s	$5,7 \times 10^{-8}$	$7,2 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$

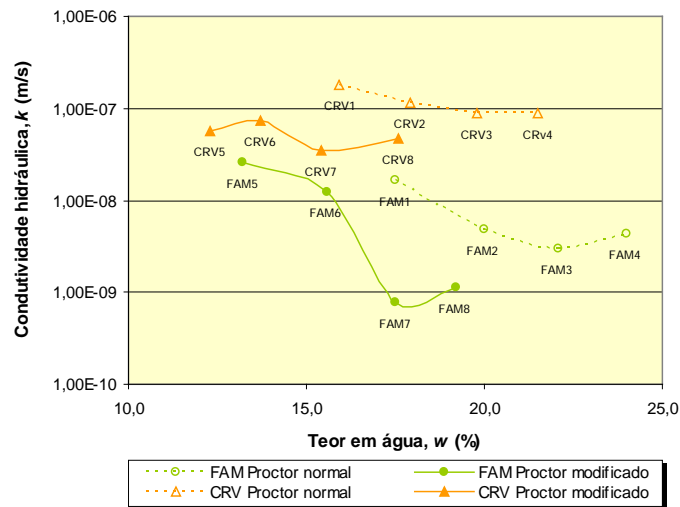


Figura 3 – Variação do Valor da Condutividade Hidráulica dos Provetes Proctor Normal e Modificado de FAM e de CRV em Função do Valor do Teor em Água.

3.2. Deformabilidade

Os ensaios de avaliação do potencial de expansão ou de colapso unidimensional revelaram que os finos das pedreiras em estudo não apresentam variações volumétricas significativas quando sujeitos a inundação, razão pela qual se entendeu não ser relevante a apresentação dos resultados obtidos. A expansão máxima, inferior a 0,4%, foi observada em dois provetes e o colapso, de valor máximo igual a 0,7%, nos restantes 14 provetes.

Relativamente aos resultados obtidos na fase de consolidação do ensaio edométrico, apresenta-se na Figura 4, a título exemplificativo, a evolução do índice de vazios, e , em função do logaritmo de σ_v aplicado em dois provetes dos finos de FAM (Figura 4a) e em dois provetes dos finos de CRV (Figura 4b), compactados com o teor em água óptimo do PN, w_{opn} . Nos Quadros 4 e 5 indicam-se os valores obtidos para o índice de compressão (C_c) e o índice de recompressão (C_r) nos 16 provetes ensaiados.

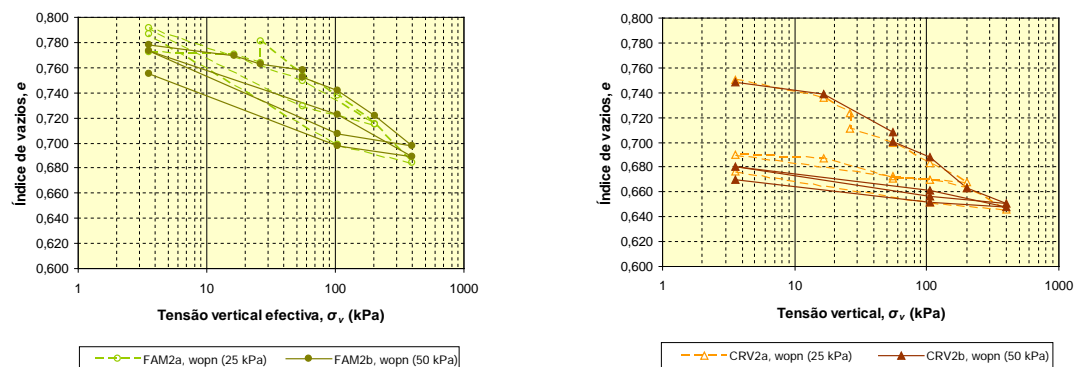


Figura 4 – Evolução do Valor do Índice de Vazios dos Provetes w_{opn} de FAM e de CRV em Função do Logaritmo da Tensão Vertical.

Quadro 4 – Índices de Compressão e de Recompressão dos Provetes Proctor Normal e Modificado de FAM

		Provetes							
Índice	Unidade	FAM1 ($w_{opn-2\%}$)		FAM2 (w_{opn})		FAM3 ($w_{opn-2\%}$)		FAM4 (w_{opn})	
		FAM1a	FAM1b	FAM2a	FAM2b	FAM3a	FAM3b	FAM4a	FAM4b
C_c	–	0,0395	0,0365	0,0402	0,0335	0,0333	0,0232	0,0277	0,0246
C_r	–	0,0131	0,0136	0,0226	0,0145	0,0121	0,0116	0,0138	0,0121

“a” e “b” em FAM e em CRV indicam que a tensão vertical aplicada ao provete durante a fase de embebição foi de 25 kPa e de 50 kPa (valores aproximados), respectivamente.

Quadro 5 – Índices de Compressão e de Recompressão dos Provetes Proctor Normal e Modificado de CRV

		Provetes							
Índice	Unidade	CRV1 ($w_{opn-2\%}$)		CRV2 (w_{opn})		CRV3 ($w_{opn-2\%}$)		CRV4 (w_{opn})	
		CRV1a	CRV1b	CRV2a	CRV2b	CRV3a	CRV3b	CRV4a	CRV4b
C_c	–	0,0315	0,0195	0,0249	0,0302	0,0179	0,0231	0,0192	0,0139
C_r	–	0,0007	0,0049	0,0066	0,0048	0,0056	0,0046	0,0043	0,0069

“a” e “b” em FAM e em CRV indicam que a tensão vertical aplicada ao provete durante a fase de embebição foi de 25 kPa e de 50 kPa (valores aproximados), respectivamente.

3.3. Resistência ao Corte

Nesta comunicação apenas se mostram os resultados dos ensaios realizados sobre séries de três provetes compactados com energia equivalente à do ensaio PN. Nos Quadros 6 e 7 resumem-se os resultados obtidos nos provetes dos finos de FAM e de CRV, respectivamente, em termos dos parâmetros resistentes determinados com base nos ensaios de corte em compressão triaxial.

Quadro 6 – Resultados dos Ensaios de Corte em Compressão Triaxial dos Provetes Proctor Normal de FAM

Parâmetro	Unidade	Provete	
		FAM1 ($w_{opn-2\%}$)	FAM2 (w_{opn})
Ângulo de atrito interno em tensões efectivas, φ' ^(a)	°	31,9	32,2

^(a) Valor de pico. No cálculo de φ' de FAM1 e FAM2 foram utilizados provetes sujeitos às seguintes tensões de confinamento, σ_3' : 25 kPa (FAM1a, FAM2a), 50 kPa (FAM1b, FAM2b) e 100 kPa (FAM1c, FAM2c).

Quadro 7 – Resultados dos Ensaios de Corte em Compressão Triaxial dos Provetes Proctor Normal de CRV

Parâmetro	Unidade	Provete	
		CRV1 ($w_{\text{opn-2\%}}$)	CRV2 (w_{opn})
Ângulo de atrito interno em tensões efectivas, φ' ^(a)	°	38,3	34,2

^(a) Valor de pico. No cálculo de φ' de CRV1 foram utilizados provetes sujeitos às seguintes tensões de confinamento, σ_3' : 25 kPa (CRV1a), 50 kPa (CRV1b) e 100 kPa (CRV1c). No cálculo de φ' de CRV2 foram utilizados provetes sujeitos às seguintes tensões de confinamento, σ_3' : 50 kPa (CRV2b), 100 kPa (CRV2c) e 200 kPa (CRV1d).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A caracterização hidráulica revela que os finos das pedreiras estudados apresentam valores de k muito baixos, sendo os de FAM os menos permeáveis.

Os valores de k dos provetes PN dos finos de FAM foram da ordem de 4×10^{-9} m/s, com excepção do provete FAM1, $w_{\text{opn-2\%}}$, em que o valor obtido foi de cerca de $1,7 \times 10^{-8}$ m/s. Nos provetes PM não se verifica a mesma uniformidade de valores para os diferentes teores em água de compactação, mas o comportamento é idêntico, isto é, o valor de k diminui de $w_{\text{opn-2\%}}$ para $w_{\text{opn+2\%}}$ e aumenta de $w_{\text{opn+2\%}}$ para $w_{\text{opn+4\%}}$. Com efeito, para ambas as energias de compactação, o valor de k diminui com o aumento do teor em água de compactação, mas os valores mais baixos foram obtidos nos provetes $w_{\text{opn+2\%}}$ e $w_{\text{opn+2\%}}$.

O mesmo comportamento foi observado nos provetes de CRV, embora a diminuição de k com o aumento do teor em água seja menos significativa do que em FAM. À semelhança do observado em FAM, também não há diminuição do valor de k nos provetes de CRV compactados com teores em água superiores a $w_{\text{opn+2\%}}$ e $w_{\text{opn+2\%}}$. No que respeita aos valores de k obtidos nos provetes pertencentes a cada uma das energias de compactação, verifica-se haver uniformidade, com os provetes PN a apresentarem valores de k da ordem de 1×10^{-7} m/s e os provetes PM de cerca de 5×10^{-8} m/s.

De um modo geral, considerando os finos das duas pedreiras, observa-se que os valores de k dos provetes PM foram sempre mais baixos que os valores de k dos provetes PN, independentemente do teor em água de compactação. Considerando os valores mais baixos de k nos provetes PM e PN dos finos das duas pedreiras, obtidos nos provetes $w_{\text{opn+2\%}}$ (FAM7 e CRV7) e $w_{\text{opn+2\%}}$ (FAM3 e CRV3), respectivamente, conclui-se que, com a compactação pesada, o valor de k diminui cerca de 4 vezes em FAM e 2,5 vezes em CRV, relativamente à compactação leve.

Independentemente do teor em água e da energia de compactação utilizados na preparação dos provetes de cada amostra de finos das pedreiras, é possível concluir que, de um modo geral, os finos de FAM e de CRV apresentam valores de k da ordem de grandeza típica dos solos sedimentares argilosos (10^{-8} a 10^{-10} m/s) e dos solos sedimentares siltosos (10^{-6} a 10^{-8} m/s), considerando a tabela “valores típicos de coeficientes de permeabilidade de solos de origem sedimentar” indicada por Matos Fernandes (2006). Assim, pode concluir-se que os finos de FAM apresentam um coeficiente de permeabilidade muito baixo, enquanto que os finos de CRV evidenciam um coeficiente de permeabilidade baixo, se considerados os provetes CRV1 e CRV2, a muito baixo, quando considerados os restantes seis provetes, de acordo com a “classificação dos solos quanto à permeabilidade” proposta por Terzaghi & Peck.

O baixo valor de k dos materiais ensaiados perspectiva a sua aplicação em aterros de resíduos e no confinamento de áreas contaminadas. De acordo com a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10/08/2009), os aterros devem obedecer a requisitos mínimos, nomeadamente

no que respeita à k da camada de confinamento basal, que tem que ser inferior ou igual a 1×10^{-9} m/s, em aterros de resíduos não perigosos e perigosos, e inferior ou igual a 1×10^{-7} m/s em aterros de resíduos inertes. Comparando os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade com estes requisitos mínimos, conclui-se que os finos de FAM são adequados para a construção da camada de confinamento basal dos aterros de resíduos inertes. O mesmo se verifica para os finos de CRV compactados pelo método PM com teor em água superior a w_{opn} . Considerando o caso dos aterros de resíduos não perigosos e resíduos perigosos, apenas os finos de FAM com $w_{opm+2\%}$ se afiguram adequados para a construção da camada de confinamento basal. Relativamente à construção da camada mineral impermeável da cobertura final, admite-se, atendendo ao baixo valor de k obtido com os finos das duas pedreiras, a possibilidade de aplicar estes materiais na sua construção, dado que na legislação em vigor não existem requisitos mínimos para o valor de k .

Atendendo aos valores de k obtidos e aos habitualmente exigidos nas obras geoambientais com funções de confinamento hidráulico, foi estudada a diminuição na permeabilidade dos finos das pedreiras depois de tratados com pequenas percentagens de bentonite (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos). Os resultados obtidos são apresentados em Guerra et al. (2010).

O estudo do comportamento volumétrico face a variações do teor em água revelou que os finos das pedreiras em estudo não tendem a sofrer assentamentos nem empolamentos significativos quando sujeitos a inundação. Relativamente aos parâmetros de deformabilidade obtidos, verifica-se que os valores dos índices C_c (0,0139 a 0,0402) e C_r (0,0007 e 0,0226) são relativamente baixos, pelo que se admite a possibilidade de valorizar estes materiais na construção de aterros estruturais. Os resultados já obtidos no campo, em camadas de aterro experimentais construídas com os finos de CRV, comprovaram a adequabilidade dos materiais. Os resultados deste estudo são apresentados em Frias et al. (2010).

Comparativamente com os finos de FAM, os finos de CRV apresentam menores índices de C_c e C_r , sobretudo no que respeita a C_r . De notar que, de um modo geral, os valores de C_c são mais elevados nos provetes PN, quer de FAM, quer de CRV. Relativamente a C_r , verificou-se que nos finos de FAM os valores deste parâmetro foram sempre maiores nos provetes PN do que nos provetes PM, enquanto nos finos de CRV não se observa qualquer relação entre C_r e a energia de compactação.

Analisando os valores obtidos para os parâmetros de resistência dos provetes PN dos finos de FAM e de CRV, observa-se que os valores de ângulo de atrito interno em tensões efectivas são elevados, variando entre 31,9° e 38,3°, intervalo de valores da ordem de grandeza dos materiais granulares naturais, como as areias.

5. CONCLUSÕES

O programa de investigação desenvolvido no âmbito do Protocolo LNEC/Grupo ME 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.

A caracterização hidráulica destes materiais revelou que, apesar de apresentarem k muito baixa, inferior a $2,6 \times 10^{-8}$ m/s, nos finos de FAM, e a $1,8 \times 10^{-7}$ m/s, nos finos de CRV, apenas nos finos de FAM com $w_{opm+2\%}$, o valor obtido para k satisfaz os requisitos mínimos ($k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s) exigidos pela legislação em vigor para a sua utilização na construção da camada de confinamento basal de aterros de resíduos não perigosos e perigosos. No caso dos aterros de resíduos inertes, como o valor de k exigido pela legislação é de grandeza inferior ou

igual a $1,0 \times 10^{-7}$ m/s, os valores de k obtidos com os finos de FAM mostram a viabilidade da sua aplicação para os teores em água e energias de compactação estudadas. O mesmo se verifica para os finos de CRV compactados com a energia do Proctor modificado e quando compactados com teor em água superior ao teor em água ótimo com a energia do Proctor normal. Relativamente à construção da camada mineral impermeável da cobertura final dos aterros de resíduos, admite-se, atendendo ao baixo valor de k obtido com os finos das duas pedreiras, a possibilidade de aplicar estes materiais na sua construção, dado que na legislação em vigor não existem requisitos mínimos para o valor de k .

Por outro lado, a caracterização mecânica dos finos das pedreiras revelou que estes apresentam baixa compressibilidade (C_c , entre 0,0139 e 0,0402) e razoável resistência ao corte (ângulo de atrito interno em tensões efectivas, ϕ' , entre 31,9° e 38,3°), perspectivando a sua adequação para a construção de aterros estruturais de infra-estruturas de transporte e de obras geotécnicas.

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 geotécnica. 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.
- Guerra, J., Roque, A. J., Almeida, I. M. e Frias, A. (2010). Avaliação da aplicabilidade de finos de pedreiras de granito tratados com bentonite em obras geoambientais com funções de confinamento hidráulico. *Actas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia*, Guimarães, Portugal.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais*, Vol. I, 1ª edição, FEUP, Porto, Portugal, 451 p.
- Roque, A. J. (2001). *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les Centres de Stockage de Déchets. Application aux sols fins portugais*. Thèse de Doctorat Génie Civil – Sols, INSA de Lyon, 697 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 pedreira gerados na produção de agregados. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, pp. 261-268.