

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE FINOS DE PEDREIRAS DE GRANITO:  
AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE EM OBRAS GEOTÉCNICAS**

**Mechanical properties of granite quarry fines: evaluation of their reuse 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*

Almeida, Isabel Moitinho

*Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, imalmeida@fc.ul.pt*

Caldeira, Laura

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

Januário, Pedro

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

Santos, Jorge

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

**Resumo:** O Laboratório Nacional de Engenharia Civil e a Mota-Engil celebraram um Protocolo que visa a valorização de finos provenientes dos agregados explorados pela Mota-Engil em duas pedreiras de granito, no norte do país. O principal objectivo do Protocolo é promover a valorização destes materiais em obras geotécnicas e, assim, contribuir para a implementação do princípio da construção sustentável no país. Neste trabalho, indicam-se alguns dos resultados obtidos no âmbito da primeira fase do programa de investigação, que visou a caracterização laboratorial exaustiva dos finos (propriedades químicas clássicas e geoambientais, mineralógicas, físicas, hidráulicas e mecânicas), privilegiando-se a apresentação e a discussão dos obtidos na caracterização mecânica, em particular, os relativos à deformabilidade e à resistência mecânica.

**Abstract:** The National Laboratory of Civil Engineering and Mota-Engil celebrated a Protocol, which aims to valorise the fines originated from the aggregates explored by Mota-Engil in two granite quarries, in the north of Portugal. The main goal of the Protocol is to promote the valorization of these materials in geotechnical engineering, and therefore, contribute to the implementation of the principle of sustainable construction in the country. In this study, some of the results obtained in the scope of the first phase of the investigation program, which aimed the exhaustive laboratorial characterization of the fines (classical chemical properties and geoenvironmental, mineralogical, physical, hydraulic and mechanical) are indicated. The presentation and discussion of the mechanical characterization is privileged, in particular, the results related to deformability and mechanical resistance.

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito de um Protocolo celebrado entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Mota-Engil (Roque et al., 2008), no qual também participa a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), encontra-se em curso um programa de investigação para a valorização dos finos de pedreiras da Mota-Engil, na perspectiva da sua aplicação como material de construção em obras geotécnicas. Os materiais em estudo provêm de duas pedreiras de granito situadas no norte do País e seleccionadas pela Mota-Engil: Pedreira do Moinho de Vento, em Vila Nova de Famalicão (FAM), e Pedreira da Bouça do Menino, em Cervães, Barcelos (CRV).

Em cada uma das pedreiras foi colhida uma amostra representativa dos finos produzidos durante o processo de britagem e lavagem de agregados e areias. No âmbito deste programa de investigação, procedeu-se, numa primeira fase, à caracterização laboratorial exaustiva dos finos de ambas as pedreiras. Foram estudadas as suas propriedades químicas clássicas e geoambientais, mineralógicas, físicas, hidráulicas e mecânicas, com o objectivo de avaliar as propriedades que possam determinar a aplicação e o comportamento destes materiais em obra. Numa segunda fase do programa, está prevista a construção de um aterro estrutural definitivo, com o objectivo de calibrar os resultados obtidos em laboratório e avaliar o desempenho dos finos das pedreiras em obra. Neste contexto, considerou-se pertinente a realização de uma etapa intermédia, para construção de aterros experimentais com os finos de cada uma das pedreiras, visando a optimização dos procedimentos construtivos a adoptar na construção do aterro definitivo, atendendo a que se tratam de materiais em relação aos quais existe pouca experiência. Os trabalhos relativos aos trechos experimentais com os finos da Pedreira Bouça do Menino (Cervães) já foram finalizados.

Nesta comunicação, procede-se a uma descrição dos materiais em estudo e da metodologia aplicada e a uma breve caracterização dos finos de pedreira, com base nas suas principais propriedades geoambientais, químicas e físicas, obtidas no âmbito da primeira fase do Protocolo LNEC/Mota-Engil. Segue-se uma apresentação e discussão do comportamento mecânico dos materiais, tendo como base os resultados dos ensaios de consolidação em edómetro e de resistência ao corte directo.

## 2 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1 Amostragem e preparação das amostras

A amostragem dos finos nas duas pedreiras teve lugar em Dezembro de 2006. Pelo facto do método de processamento dos finos ser diferente (Roque et al., 2008), foi necessário proceder a amostragens com técnicas distintas em cada uma das pedreiras. Na Pedreira do Moinho de Vento (FAM), o *cake* (Figura 1-a.1), designação atribuída aos finos de pedreira depois de prensados e desidratados num filtro-prensa, foi directamente amostrado com a pá de uma retro-escavadora (Figura 1-a.2). Na Pedreira da Bouça do Menino (CRV) foi necessário proceder à construção de uma estrutura em madeira, aberta, revestida

interiormente por um geotêxtil de modo a impedir perdas, para recolher directamente as lamas provenientes de um tanque-reservatório (Figura 1-b). As amostras recolhidas em cada pedreira, cada uma com cerca de quatro toneladas, foram devidamente acondicionadas em contentores de plástico e transportadas para o laboratório.



Figura 1 – Amostragem nas duas pedreiras de granito: a.1) *cake* da Pedreira do Moinho de Vento (Famalicão) e a.2) amostragem em pá de retro-escavadora na mesma pedreira; b) recolha de finos na Pedreira da Bouça do Menino (Cervães).

De acordo com os critérios definidos pelo LNEC e pela Mota-Engil para a preparação das amostras, procedeu-se inicialmente à secagem das mesmas ao ar e, seguidamente, à sua desagregação com maços de borracha. O material, depois de desagregado, foi peneirado, homogeneizado e devidamente acondicionado em sacos.

## 2.2 Ensaios laboratoriais

O programa experimental compreendeu a realização de ensaios de caracterização química clássica e geoambiental, mineralógica, física, hidráulica e mecânica dos finos das duas pedreiras. À excepção da caracterização química clássica e geoambiental, efectuada no Centro para a Valorização de Resíduos (CVR), em Guimarães, todos os restantes ensaios foram realizados nos laboratórios do LNEC, da Mota-Engil e da FCUL.

Não obstante o propósito do presente trabalho ser a apresentação das características mecânicas dos finos de pedreira e a sua discussão na perspectiva de serem utilizados em obras geotécnicas, também se apresentam alguns resultados relativos à sua caracterização geoambiental, química e física, na medida em que são importantes para o conhecimento das condições de natureza e de estado dos materiais em estudo.

A caracterização geoambiental dos finos das pedreiras compreendeu a realização de ensaios para determinação da composição química dos respectivos eluatos, na perspectiva da avaliação do seu potencial poluente. Esta caracterização foi realizada de acordo com os critérios e processos de admissão de resíduos em aterro previstos na legislação em vigor (Decisão do Conselho 2003/33/CE – Critérios e processos de admissão de resíduos em aterros). Para além desta análise, também se procedeu à determinação da composição química ambiental dos finos conforme previsto no Decreto-Lei n.º152/2002 (Deposição de resíduos em aterros), de 23 de Maio.

A caracterização química incluiu ensaios de caracterização química clássicos (determinação da composição química clássica, pH dos finos, condutividade eléctrica da suspensão dos finos e teor em matéria orgânica dos finos) e de caracterização segundo a Norma Portuguesa NP EN 1744-1:2000 para agregados (resultados que não se apresentam neste trabalho).

Visando a caracterização física dos finos de pedreira, realizaram-se ensaios de identificação (teor em água natural, limites de Atterberg, densidade das partículas sólidas e análise granulométrica), ensaios de compactação pelo método Proctor normal e pelo método Proctor modificado, ensaios de expansibilidade, ensaios para a determinação do teor em finos (azul de metileno e equivalente de areia), ensaios para a determinação da massa volúmica e da absorção de água de agregados e ensaios para a determinação da massa volúmica do fíler.

A caracterização mecânica compreendeu a avaliação da deformabilidade e da resistência ao corte destes materiais. Para tal, foram realizados ensaios de compressão unidimensional em edómetro, ensaios de corte directo (em caixa de corte) e ensaios de corte em compressão triaxial. Neste trabalho apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão unidimensional em edómetro e dos ensaios de corte directo (em caixa de corte).

Os ensaios de consolidação em edómetro foram realizados, por adaptação do procedimento preconizado na norma ASTM D 2435-04, sobre provetes de finos de FAM e de CRV, compactados segundo o método Proctor normal e o método Proctor modificado, com dois teores em água de compactação, equivalentes ao teor em água inferior ao óptimo em 2%,  $w_{opt-2\%}$ , e ao teor em água óptimo,  $w_{opt}$ . Para cada energia de compactação e para cada teor em água foram preparados dois provetes, num total de 16 provetes (oito por pedreira), a que foram aplicadas, respectivamente, as tensões verticais iniciais de cerca de 25 kPa ou 50 kPa, para avaliação do potencial de expansão ou de colapso unidimensional dos finos das pedreiras, em presença de água, quando sujeitos a essas tensões (Frias et al, 2008).

A avaliação dos parâmetros de resistência ao corte dos finos das duas pedreiras, através de ensaios de corte directo em caixa de corte, foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3080-04, sobre provetes de finos de FAM e de CRV, compactados segundo o método Proctor normal e o método Proctor modificado, com dois teores em água de compactação,  $w_{opt-2\%}$  e  $w_{opt}$ . Para cada energia de compactação e para cada teor em água foram preparados quatro provetes, num total de 32 provetes (16 por pedreira), a cada um dos quais foi aplicada uma tensão vertical de cerca de 25, 50, 100 ou 200 kPa.

De referir que, dada a inexistência de procedimentos específicos para a caracterização de materiais não tradicionais, como é o caso dos finos de pedreira, as suas propriedades foram determinadas a partir dos procedimentos desenvolvidos para os materiais granulares naturais. Neste contexto, e dado que o material em estudo se trata de um subproduto da britagem e lavagem de agregados e areias, recorreu-se às normas europeias existentes para a caracterização de agregados e, no caso de estas não existirem, às normas para solos portuguesas e da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e às especificações do LNEC.

### 3 RESULTADOS

Esta secção inicia-se com a caracterização dos finos de pedreira com base nas suas principais propriedades geoambientais, químicas e físicas, seguindo-se uma apresentação pormenorizada das suas características mecânicas.

#### 3.1 Características geoambientais

Os resultados da análise geoambiental são apresentados nos Quadros 1 e 2, que discriminam, para cada um dos parâmetros indicados no Decreto-Lei n.º 152/2002 (no caso da composição química ambiental dos finos das pedreiras) e na Decisão do Conselho 2003/33/CE (no caso da composição química ambiental dos eluatos), os valores doseados nas duas amostras de finos analisadas (FAM e CRV).

Quadro 1 – Composição química ambiental dos finos das pedreiras

Parâmetro	Método <sup>(a)</sup>	Símbolo	Unidade	Valor	
				FAM	CRV
Perda a 105°C	M.I., Gravimetria	P <sub>105°C</sub>	%	4	10,3
Perda a 500°C - 105°C	M.I., Gravimetria	P <sub>500-105°C</sub>	%	0,3	0,5
Ponto de inflamação	Tag	PtI	°C	>55	>55
Substâncias lipofílicas	DIN 38409-H17	SL	%	<0,01	<0,01
COV	GC – FID	COV (h)	%	<0,000001	<0,000001
COV (nh)	GC – FID	COV (nh)	%	0,000059	0,000024
Arsénio	M.I.; FRX	As	mg/kg	<40	<20
Cádmio	M.I.; FRX	Cd	mg/kg	<10	<9
Chumbo	M.I.; FRX	Pb	mg/kg	<48	148
Cobre	M.I.; FRX	Cu	mg/kg	29	86
Crómio	M.I.; FRX	Cr	mg/kg	<29	79
Mercúrio	M.I.; FRX	Hg	mg/kg	<19	<18
Níquel	M.I.; FRX	Ni	mg/kg	<100	<94
Zinco	M.I.; FRX	Zn	mg/kg	236	234
Carb. Org. Total	EAM	COT	mg/kg	200	140
BTEX	GC – FID	BTEX	mg/kg	<0,1	<0,1
PCB	GC – FID	PCB	mg/kg	<0,1	<0,1
Óleo mineral (C10 a C40)	GC – FID	O <sub>C10 a C40</sub>	mg/kg	32	17
HAP	GC – FID	HAP	mg/kg	<0,1	<0,1

<sup>(a)</sup> M.I. = Método interno; DIN = Deutsch Institut für Normung; GC – FID = Cromatografia gasosa com detecção de ionização de chama; FRX = Fluorescência de Raios-X; EAM = Espectrofotometria de Absorção Molecular. Nota: O símbolo < (menor) representa o limite de quantificação para o parâmetro pelo método analítico indicado; o símbolo > (maior) indica que o valor doseado é superior ao valor mínimo especificado na legislação portuguesa para todas as classes de aterros.

Quadro 2 – Composição química ambiental dos eluatos dos finos das pedreiras

Parâmetro <sup>(a)</sup>	Método	Símbolo	Unidade	Valor	
				FAM	CRV
pH a 25°C	NP 411	pH <sub>25°C</sub>	—	7,9	6,8
CE a 25°C (mS/cm)	NP EN 27888	CE <sub>25°C</sub>	mS/cm	0,2	0,1
Antimónio	EAA	Sb	mg/kg	<0,01	<0,01
Arsénio	EAA	As	mg/kg	<0,02	<0,02
Bário	M.I.; EAA	Ba	mg/kg	<1,8	<1,8
Cádmio	EAA	Cd	mg/kg	0,0027	0,0009
Chumbo	EAA	Pb	mg/kg	<0,0025	<0,0025
Cobre	M.I.; EAA	Cu	mg/kg	<0,25	<0,25
Crómio total	M.I.; EAA	Cr	mg/kg	<0,5	<0,5
Mercurio	EAA	Hg	mg/kg	<0,01	<0,01
Molibdénio	EAA	Mo	mg/kg	<0,0005	0,0009
Níquel	M.I.; EAA	Ni	mg/kg	<0,4	<0,4
Selénio	EAA	Se	mg/kg	<0,0025	<0,0025
Zinco	M.I.; EAA	Zn	mg/kg	<0,08	1,1
Cloreto	SMEWW 4500 Cl-B	Cl	mg/kg	49	<10
Fluoreto	Electrometria com ISE	F	mg/kg	0,21	0,67
Sulfatos	LAE; EAM	SO <sub>4</sub>	mg/kg	160	242
Índice de Fenol	EAM	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	mg/kg	<0,05	0,93
C. Orgânico Dissolvido	M.I.; TC – IC	COD	mg/kg	54	13
Sól. Dissolvidos Totais	SMEWW 2540 B	SDT	mg/kg	1440	20

<sup>(a)</sup> EAA = Espectrometria de Absorção Atómica; M.I. = Método interno; SMEWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; LAE = L'Analyse de L'Eaux, Rodier; EAM = Espectrofotometria de Absorção Molecular; TC = Carbono Total; IC = Carbono Inorgânico.

Nota: O símbolo < (menor) representa o limite de quantificação para o parâmetro pelo método analítico indicado.

Verifica-se que os finos das pedreiras obedecem a todos os requisitos especificados na legislação portuguesa e comunitária para resíduos admitidos em aterros para resíduos inertes, pelo que não se prevê que os materiais ensaiados possam constituir uma fonte de poluição importante para os solos, águas superficiais e águas subterrâneas.

### 3.2 Características químicas

A caracterização química clássica dos finos das duas pedreiras, efectuada por fluorescência de raios-X, FRX, evidenciou que as duas amostras possuem uma composição química muito semelhante, verificando-se que o silício (SiO<sub>2</sub>) e o alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) são os elementos predominantes em ambas, representando cerca de 80% da composição química das amostras (FAM: SiO<sub>2</sub> = 58,9%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 20,2%; CRV: SiO<sub>2</sub> = 60,5%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 21,7%).

Para além destes, também o ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e o potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ocorrem em teores significativos, mas em quantidades muito inferiores, perfazendo cerca de 10% da composição química das amostras (FAM:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6,01\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 4,89\%$ ; CRV:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,55\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 4,92\%$ ).

Relativamente ao pH dos materiais em estudo (LNEC E 203), verificou-se que os finos de FAM, com um pH de 8,00, apresentam características subalcalinas, enquanto que os finos de CRV, com um pH de 5,85, apresentam um carácter subácido, de acordo com a escala de Pralongo (Botelho da Costa, 1995). A condutividade eléctrica, *CE*, determinada por adaptação do procedimento norte-americano recomendado em *Missouri Agricultural Experiment Station* (1998) é muito próxima nas duas amostras, sendo de 0,602 mS/cm na solução dos finos de FAM e de 0,741 mS/cm para os finos de CRV. De acordo com o procedimento consultado, os finos das pedreiras apresentam um valor de *CE* muito baixo, tratando-se por isso de materiais não salinos. Os valores obtidos para o teor em matéria orgânica, pela especificação EP S.9-53 (ex-JAE), foram de 1,9% para FAM e de 0,1% para CRV.

### 3.3 Características físicas

No Quadro 3 apresenta-se um resumo das principais características físicas determinadas para os finos das duas pedreiras.

As propriedades físicas obtidas nas duas amostras indicam que CRV é *não plástica*<sup>1</sup>, contrariamente a FAM que, com um  $I_p = 14\%$ , apresenta uma *plasticidade média*, segundo Burmister (Braja, 1998).

Considerando a classificação triangular dos solos, apresentada na Especificação LNEC E 219:1968, os finos de FAM são classificados como materiais *silto-arenosos*, enquanto que os finos de CRV constituem, do ponto de vista textural, uma *areia siltosa*. De acordo com a Classificação Unificada de Solos (ASTM D 2487), os finos de FAM e CRV constituem materiais do tipo *ML*, cuja designação do grupo é *silte inorgânico*. Utilizando a Classificação para Fins Rodoviários da Especificação LNEC E 240:1970, baseada na classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), os finos de FAM são classificados como materiais pertencentes ao grupo “A-7”, subgrupo “A-7-6”, em que os “tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais” são os *solos argilosos*. No caso dos finos de CRV, os valores obtidos nos ensaios de identificação permitem classificá-los como materiais pertencentes ao grupo “A-4”, dos *solos siltosos*.

---

<sup>1</sup> Considerou-se oportuno que, na descrição das características geotécnicas dos finos das pedreiras, se utilizassem as designações em itálico, na medida em que se utilizaram os métodos e as classificações da Mecânica dos Solos, desenvolvidos para materiais granulares naturais, em resultado da ausência de métodos e classificações específicos para a caracterização geotécnica de materiais do tipo dos estudados.

Quadro 3 – Caracterização física dos finos das pedreiras

Parâmetro <sup>(a)</sup>		Método	Valor	
			FAM	CRV
Teor em água natural, $w$ (%)		NP EN 1097-5	34,6	25,2
Limites de Atterberg	Limite de liquidez, $w_L$ (%)		41	N.P.
	Limite de plasticidade, $w_P$ (%)	NP-143	27	N.P.
	Limite de retracção, $w_S$ (%)		27	N.P.
	Índice de plasticidade, $I_P$ (%)	$I_P = w_L - w_P$	14	N.P.
Densidade das partículas sólidas, $G_s$ (-)		NP-83	2,76	2,72
Composição granulométrica	Fracção arenosa (0,06 – 2,00 mm) (%)		22	54
	Fracção silteosa (0,002 – 0,06 mm) (%)	LNEC E 196	61	41
	Fracção argilosa (< 0,002 mm) (%)		17	5
Compactação Proctor normal	Peso volúmico aparente seco máximo, $\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )		15,4	13,3
	Teor em água óptimo, $w_{opt}$ (%)	LNEC E 197	19,9	17,9
Compactação Proctor modificado	Peso volúmico aparente seco máximo, $\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )		17,3	17,2
		Teor em água óptimo, $w_{om}$ (%)	15,0	13,6
Expansibilidade, $E$ (%)		LNEC E 200	11,7	6,7
Teor em finos	Equivalente de areia, $SE$ (%)	NP EN 933-8	N.E.	9
	Valor de azul (0/2 mm), $MB$ (0/2 mm)(g/kg)	NP EN 933-9	29,7	3,9
	Valor de azul (0/0,125 mm), $MB_F$ (0/0,125 mm)(g/kg)	NP EN 933-9	26,8	5,0
Massa volúmica e absorção de água da fracção 0,063/4 mm	$\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> )		2,62	2,80
	$\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6	2,61	2,77
	$\rho_{ssd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )		2,61	2,78
	$w_{A24}$ (%)		0,20	0,40
Massa volúmica do fíler, $\rho_f$ (Mg/m <sup>3</sup> )		NP EN 1097-7	2,65	2,71

Nota: % = g/100g; g/kg = gramas de corante por quilograma da fracção 0/2 mm ou da fracção 0,125 mm do agregado;  $\rho_a$  = Massa volúmica do material impermeável das partículas;  $\rho_{rd}$  = Massa volúmica das partículas secas em estufa;  $\rho_{ssd}$  = Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca;  $w_{A24}$  = Absorção de água (em % da massa seca) após a imersão durante 24h; 1 Mg = 1000 kg; N.P. = Não Plástico; N.E. = Não Exequível.

### 3.4 Características mecânicas

Visando a caracterização mecânica destes materiais relativamente à deformabilidade e à resistência ao corte, realizaram-se ensaios de consolidação em edómetro e ensaios de corte directo (em caixa de corte). Nas secções seguintes apresentam-se os resultados obtidos.

### 3.4.1 Deformabilidade

Na Figura 2 apresenta-se, a título exemplificativo, a evolução do índice de vazios de quatro provetes compactados com o teor em água óptimo do Proctor normal,  $w_{opn}$ , dos finos de FAM (Figura 2-a) e de CRV (Figura 2-b) em função do logaritmo da tensão vertical aplicada. Nos Quadros 4 e 5 indicam-se os valores obtidos para o índice de compressibilidade ( $C_c$ ), o índice de recompressibilidade ( $C_r$ ) e o coeficiente de consolidação ( $C_v$ ) médio, para os 16 provetes ensaiados.

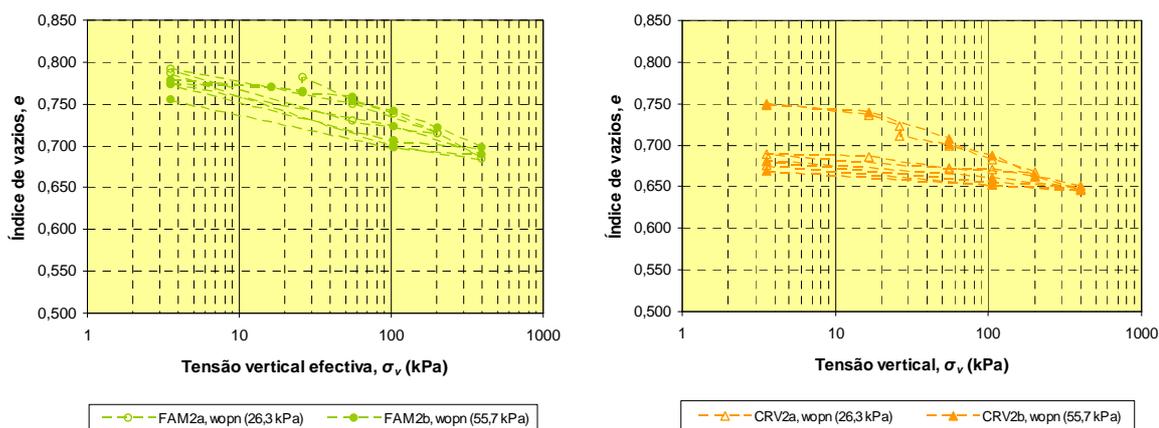


Figura 2 – Evolução do índice de vazios dos provetes  $w_{opn}$  dos finos de FAM e de CRV em função do logaritmo da tensão vertical.

Quadro 4 – Índices de compressibilidade e de recompressibilidade e coeficiente de consolidação dos provetes Proctor normal e Proctor modificado dos finos de FAM

Índice	Unidade	Provetes							
		FAM1 <sup>(a)</sup>		FAM2 <sup>(a)</sup>		FAM3 <sup>(b)</sup>		FAM4 <sup>(b)</sup>	
		$(w_{opn-2\%})$		$(w_{opn})$		$(w_{opn-2\%})$		$(w_{opn})$	
		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
$C_v^{(c)}$	m <sup>2</sup> /s	$1,23 \times 10^{-7}$	$4,26 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-7}$	$1,93 \times 10^{-7}$	$1,80 \times 10^{-7}$	$7,50 \times 10^{-7}$	$5,15 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-7}$

<sup>(a)</sup> Provetes Proctor normal. <sup>(b)</sup> Provetes Proctor modificado. <sup>(c)</sup> Valor médio, obtido por cálculo da média dos valores de coeficiente de consolidação determinados em cada incremento de tensão vertical para o provete. Nota: A designação final de “a” e “b” em cada par de provetes de um mesmo teor em água indica a diferente tensão vertical aplicada ao provete durante a fase de embebição do ensaio de avaliação do potencial de expansão ou de colapso unidimensional, isto é, provete a:  $\sigma_v = 25$  kPa (valor aproximado); provete b:  $\sigma_v = 50$  kPa (valor aproximado).

Quadro 5 – Índices de compressibilidade e de recompressibilidade e coeficiente de consolidação dos provetes Proctor normal e Proctor modificado dos finos de CRV

Índice	Unidade	Provetes							
		CRV1 <sup>(a)</sup>		CRV2 <sup>(a)</sup>		CRV3 <sup>(b)</sup>		CRV4 <sup>(b)</sup>	
		$(w_{opn-2\%})$		$(w_{opn})$		$(w_{opn-2\%})$		$(w_{opn})$	
		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
$C_v^{(c)}$	m <sup>2</sup> /s	$8,77 \times 10^{-6}$	$8,85 \times 10^{-6}$	$4,17 \times 10^{-6}$	$7,38 \times 10^{-6}$	$4,03 \times 10^{-7}$	$2,79 \times 10^{-7}$	$2,44 \times 10^{-7}$	$2,90 \times 10^{-7}$

<sup>(a)</sup> Provetes Proctor normal. <sup>(b)</sup> Provetes Proctor modificado. <sup>(c)</sup> Valor médio, obtido por cálculo da média dos valores de coeficiente de consolidação determinados em cada incremento de tensão vertical para o provete. Nota: A designação final de “a” e “b” em cada par de provetes de um mesmo teor em água indica a diferente tensão vertical aplicada ao provete durante a fase de embebição do ensaio de avaliação do potencial de expansão ou de colapso unidimensional, isto é, provete a:  $\sigma_v = 25$  kPa (valor aproximado); provete b:  $\sigma_v = 50$  kPa (valor aproximado).

### 3.4.2 Resistência ao corte

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se, a título ilustrativo, a evolução da tensão de corte com o deslocamento horizontal nos provetes compactados com o teor em água óptimo do Proctor modificado,  $w_{opm}$ , dos finos de FAM e de CRV, respectivamente. Os Quadros 6 e 7 indicam os valores obtidos para o ângulo de atrito interno de pico e para a coesão, em tensões efectivas, dos 32 provetes ensaiados, respectivamente, dos finos das pedreiras de FAM e de CRV.

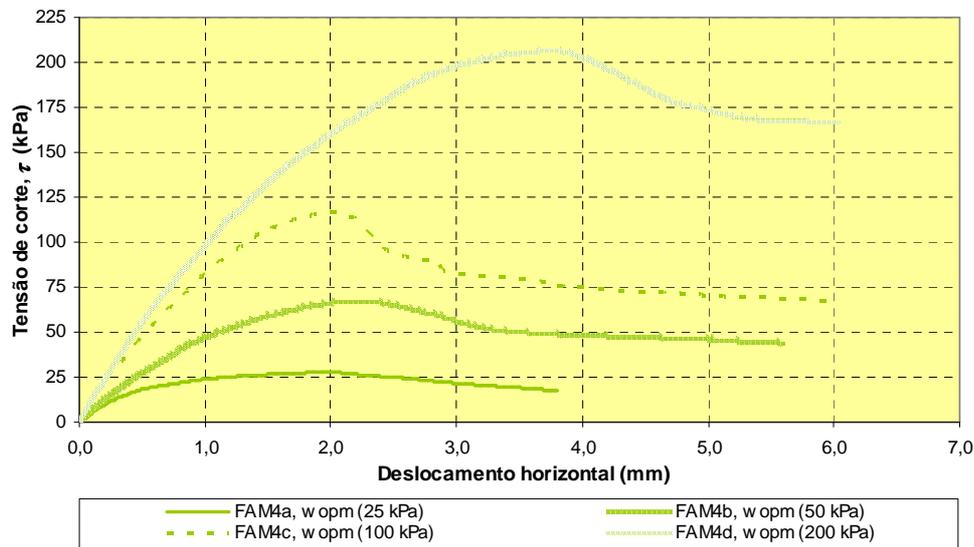


Figura 3 – Evolução da tensão de corte com o deslocamento horizontal nos provetes  $w_{opm}$  dos finos de FAM.

Quadro 6 – Resultados dos ensaios de corte directo dos provetes Proctor normal e modificado, com teor em água  $w_{opt-2\%}$  e  $w_{opt}$ , dos finos de FAM

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Provetes <sup>(a)</sup>			
			FAM1	FAM2	FAM3	FAM4
			( $w_{opt-2\%}$ )	( $w_{opt}$ )	( $w_{opt-2\%}$ )	( $w_{opt}$ )
Ângulo de atrito interno de pico em tensões efectivas <sup>(b)</sup>	$\varphi'_p$	°	34,6	31,3	40,3	44,8
Coesão em tensões efectivas <sup>(b)</sup>	$c'$	kPa	24,5	6,5	16,7	11,2

<sup>(a)</sup> Cada provete apresentado representa um conjunto de 4 provetes sujeitos a tensão vertical de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa ou 200 kPa. <sup>(b)</sup> Ensaio consolidado drenado (CD), portanto, em condições de drenagem, pelo que os parâmetros intrínsecos determinados são em termos de tensões efectivas.

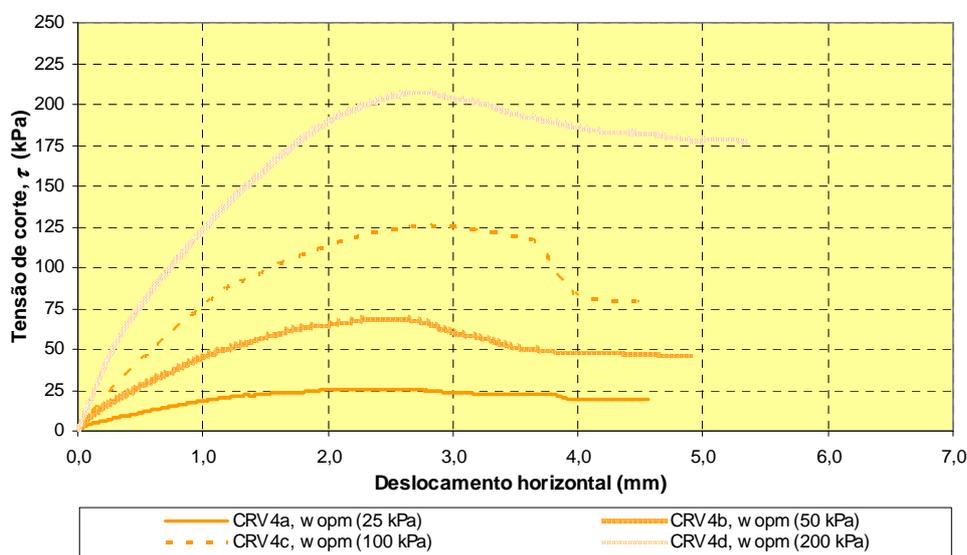


Figura 4 – Evolução da tensão de corte com o deslocamento horizontal nos provetes  $w_{opt}$  dos finos de CRV.

Quadro 7 – Resultados dos ensaios de corte directo dos provetes Proctor normal e modificado, com teor em água  $w_{opt-2\%}$  e  $w_{opt}$ , dos finos de CRV

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Provetes <sup>(a)</sup>			
			CRV1	CRV2	CRV3	CRV4
			( $w_{opt-2\%}$ )	( $w_{opt}$ )	( $w_{opt-2\%}$ )	( $w_{opt}$ )
Ângulo de atrito interno de pico em tensões efectivas <sup>(b)</sup>	$\varphi'_p$	°	41,5	46,3	48,2	45,1
Coesão em tensões efectivas <sup>(b)</sup>	$c'$	kPa	12,3	0	0	13,0

<sup>(a)</sup> Cada provete apresentado representa um conjunto de 4 provetes sujeitos a tensão vertical de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa ou 200 kPa. <sup>(b)</sup> Ensaio consolidado drenado (CD), portanto, em condições de drenagem, pelo que os parâmetros intrínsecos determinados são em termos de tensões efectivas.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Da análise dos Quadros 4 e 5, relativos aos parâmetros de deformabilidade, verifica-se que os valores dos índices  $C_c$  e  $C_r$  são relativamente baixos, variando respectivamente entre 0,0139 e 0,0402 e entre 0,0007 e 0,0226, evidenciando tratarem-se de materiais adequados para a construção de aterros.

Comparativamente com os finos de FAM, os finos de CRV apresentam menores índices de  $C_c$  e  $C_r$ , sobretudo no que respeita a  $C_r$ .

Realça-se igualmente que, de um modo geral, os valores de  $C_c$  são mais elevados nos provetes Proctor normal, 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 Proctor normal do que nos provetes Proctor modificado, enquanto que nos finos de CRV não se observa qualquer relação entre  $C_r$  e a energia de compactação.

No que respeita à média dos valores determinados para  $C_v$  nos finos de FAM, verifica-se que varia entre  $1,23 \times 10^{-7}$  e  $4,26 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, nos provetes Proctor normal, e entre  $1,80 \times 10^{-7}$  e  $7,50 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, nos provetes Proctor modificado. Considerando os provetes Proctor normal e Proctor modificado de CRV, observa-se que a média dos valores de  $C_v$  varia entre  $4,17 \times 10^{-6}$  e  $8,85 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s e entre  $2,44 \times 10^{-7}$  e  $4,03 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, respectivamente. Ambos os finos de pedra estudados apresentam, portanto, coeficientes de consolidação relativamente baixos.

Analisando os parâmetros de resistência obtidos para os finos de FAM, verifica-se que os valores do ângulo de atrito interno de pico, em tensões efectivas,  $\phi_p'$ , oscilam entre 31,3° e 44,8°, sendo que os valores mais elevados foram obtidos, como era previsível, nos provetes Proctor modificado. No que respeita a uma eventual influência do teor em água no comportamento dos provetes, observa-se que nos provetes Proctor normal, os maiores valores de  $\phi_p'$  foram obtidos nos provetes  $w_{opt-2\%}$ . Nos provetes Proctor modificado não foi possível retirar qualquer conclusão a este nível. A coesão, em tensões efectivas,  $c'$ , nos finos de FAM oscila entre 6,5 kPa e 24,5 kPa. Verifica-se que para os provetes compactados com a mesma energia de compactação, o aumento do teor em água conduz a uma diminuição da coesão.

No que respeita aos parâmetros de resistência determinados para os finos de CRV, observa-se que os valores do  $\phi_p'$  variam entre 41,5° e 48,2°. Não é clara a existência de uma relação entre a energia de compactação utilizada na preparação dos provetes e o valor de  $\phi_p'$ . O mesmo se aplica para o teor em água de compactação. Relativamente a  $c'$ , os dois valores obtidos diferentes de zero foram de igual ordem de grandeza (12,3 kPa e 13,0 kPa).

Comparando os parâmetros de resistência determinados nos provetes das duas amostras de finos, verifica-se que os finos de CRV apresentam valores de  $\phi_p'$  superiores aos dos finos de FAM. Esta diferença é maior entre os provetes  $w_{opt}$ .

Constata-se que, de um modo geral, a coesão em tensões efectivas é superior nos finos de FAM, sendo excepção o provete  $w_{opm}$  Proctor modificado, onde esta grandeza é mais elevada em CRV.

## 5 CONCLUSÕES

Este projecto pretende contribuir para a valorização de finos de pedreiras através da sua utilização em infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas, em substituição dos materiais naturais tradicionalmente aplicados.

Considerando que se tratam de materiais inertes, com baixo potencial poluente, não se prevê que a construção de obras geotécnicas com finos de pedreiras de características idênticas às dos finos estudados possam contribuir para a degradação da qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas.

A caracterização mecânica destes materiais revelou baixa compressibilidade (índices de compressibilidade,  $C_c$ , entre 0,0139 e 0,0402) e satisfatória resistência ao corte (valores de ângulo de atrito interno em tensões efectivas,  $\varphi'$ , entre 31,3° e 48,2°), perspectivando a sua adequação para a construção de obras geotécnicas, designadamente aterros estruturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Botelho da Costa (1995). *Caracterização e constituição do solo*. 5ª edição, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 527 p.
- Braja, M. Das (1998). *Principles of Geotechnical Engineering*, 4th ed., PWS, Boston, USA, 712 p.
- Frias, A., Roque, A.J., Almeida, I.M., Caldeira, L., Andrade, R. & Santos, J. (2008). “Caracterização laboratorial de finos de pedreiras de granito visando a sua aplicação em obras geotécnicas no âmbito do Protocolo NEC/Mota-Engil”, Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, pp. 269-276.
- Missouri Agricultural Experiment Station (1998). *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region*. North Central Regional Research Publication n.º 221 (Revised), 73 p.
- Roque, A.J., Andrade, R., Frias, A., Caldeira, C., Vieira, A., Almeida, I.M. & 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, pp. 261-268.

## AGRADECIMENTOS

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