

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE FINOS DE PEDREIRAS DE GRANITO TRATADOS COM BENTONITE EM OBRAS GEOAMBIENTAIS COM FUNÇÕES DE CONFINAMENTO HIDRÁULICO

EVALUATION OF THE APPLICABILITY OF THIN GRANITE QUARRY TREATED WITH BENTONITE IN GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING WITH HYDRAULIC CONTAINMENT FUNCTIONS

Guerra, João, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil / Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, joaoguerra7@gmail.com*

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*

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

RESUMO

No âmbito de um Protocolo celebrado entre LNEC e o Grupo Mota-Engil foi concebido e implementado um programa de investigação, no qual também participa a FCUL, que tem por objectivo a valorização dos finos de duas pedreiras de granito em infraestruturas de transportes e em obras geotécnicas. Os resultados já obtidos mostraram que a condutividade hidráulica, k , dos finos das duas pedreiras estudadas era baixa, mas não o suficiente para viabilizar a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais onde o requisito mínimo requerido é $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Nesta comunicação apresenta-se o melhoramento do desempenho hidráulico dos finos das pedreiras, tratados com pequenas percentagens de bentonite (2%, 4% e 6%), tendo em vista a valorização destas misturas em obras geotécnicas com funções ambientais.

ABSTRACT

An ongoing investigation, under a Protocol established between the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC) and Mota-Engil Company, in which the Faculty of Science, University of Lisbon (FCUL) also participates, intend the valorization of two granite quarries fines with the objective of their application as building materials in geotechnical works. The results obtained showed that the hydraulic conductivity, k , of the materials of the two quarries is not low enough for application as hydraulic barriers in geotechnical works with environmental functions, where the minimum required for $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. The present work presents the improvement of the hydraulic behavior of the fine granite quarries treated with small percentages of bentonite (2%, 4%, and 6%) and evaluate the feasibility of using these mixtures in geotechnical works with environmental functions.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa de materiais adequados para a construção de barreiras de confinamento hidráulico em aterros de resíduos e em áreas contaminadas, designadamente o desempenho hidráulico destes aos lixiviados, tem merecido o interesse de um grande número de autores,

nomeadamente: Aubertin et al. (1996), Roque (2001), Sällfors e Öberg-Högsta (2002) e Adu-Wusu e Yanful (2006), no caso dos solos finos, e Sivapullaiah et al. (2000), Abichou et al. (2004), Lukiantchuki (2007), Gueddouda et al. (2008) e Eid et al. (2009), no caso das misturas solo-bentonite. As misturas de solos naturais, habitualmente de granulometria grosseira, com fracas percentagens de bentonite, sódica ou cálcica, têm sido uma alternativa nos locais em que não existem manchas de empréstimo com solos naturais adequados à construção de camadas de confinamento hidráulico de muito baixa permeabilidade.

Com base nos conhecimentos adquiridos nos estudos do desempenho hidráulico das misturas solos naturais-bentonite, por um lado, e atendendo às actuais políticas de gestão de resíduos, que dão preferência à valorização destes em detrimento da sua eliminação em aterro, por outro, procedeu-se ao estudo da condutividade hidráulica, k , de misturas de finos de pedra com bentonite. A valorização dos finos de pedreiras trará importantes vantagens económicas e ambientais e contribuirá para a implementação de políticas de construção sustentáveis.

O estudo efectuado enquadra-se no Protocolo celebrado, em 2006, entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Grupo Mota-Engil (Grupo ME), que tem por principal objectivo a valorização dos finos gerados durante o processo de produção de inertes (agregados e areias) nos Centros Industriais (pedreiras) do Grupo ME, em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. O Grupo ME explora seis pedreiras de granito no norte do País, com instalações para lavagem dos inertes e consequente geração de finos, produzindo um total de 63 000 toneladas por ano (t/a) (Roque et al., 2008). O programa experimental do Protocolo, em curso, envolve o estudo dos finos da Pedreira do Moinho de Vento, em Vila Nova de Famalicão (FML) e da Pedreira da Bouça do Menino, em Cervães, Barcelos (CRV). No seu conjunto esta pedreiras produzem cerca de 25 000 t/a de finos (Roque et al., 2008). Os resultados já obtidos por Frias et al. (2008), no âmbito deste Protocolo, mostraram que a permeabilidade dos finos das pedreiras FML e CRV não é suficientemente baixa para serem aplicados na construção de barreiras hidráulicas de algumas obras geotécnicas com funções ambientais, como é o caso das camadas de confinamento basal dos aterros de resíduos não perigosos e perigosos, onde a legislação exige valores de $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

Na presente comunicação apresentam-se os resultados do estudo do desempenho hidráulico de misturas dos finos das duas pedreiras de granito com pequenas percentagens de bentonite sódica natural (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos), compactadas com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo Proctor normal ($w_{opt-2\%}$) e Proctor modificado ($w_{opt-2\%}$). Pretendeu-se verificar se o valor de k destas misturas era suficientemente baixo para viabilizar a sua utilização no confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais que exigissem valores de $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. A utilização de pequenas percentagens de bentonite nas misturas e de teores em água $w_{opt-2\%}$ e $w_{opt-2\%}$ justificam-se pelo custo da bentonite, que deve ser optimizado e pela maior dificuldade de compactar as misturas quando aumenta a percentagem de bentonite e os teores em água de compactação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os materiais utilizados no estudo foram os finos das pedreiras de granito de FML e de CRV, exploradas pelo Grupo ME no norte do país para a produção de agregados e de areias e uma bentonite sódica natural.

Os procedimentos de amostragem dos finos nas duas pedreiras e de preparação das respectivas amostras foram descritos por Frias et al. (2008). No mesmo trabalho, estes autores apresentaram as características geotécnicas destes materiais. O Quadro 1 mostra apenas as propriedades índice dos finos das pedreiras e a sua classificação tendo por base: a classificação triangular para solos, da especificação LNEC E 219; a Classificação Unificada dos Solos (USCS), da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 2487); e a Classificação para Fins Rodoviários da especificação LNEC E 240, baseada na classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Do ponto de vista da composição mineralógica, os finos das pedreiras são semelhantes. Em ambos, os minerais predominantes são o quartzo, os feldspatos e as micas. A excepção é o teor em esmectite, cuja proporção é relativamente elevada na fracção argilosa dos finos de FML e fraca na fracção argilosa dos finos de CRV (Frias et al., 2008).

Quadro 1 – Propriedades Índice e Classificação dos Finos das Pedreiras (adaptado de Frias et al., 2008)

Propriedades índice e Classificação		Pedreira	
		FML	CRV
Composição granulométrica (LNEC E 196)	Areia (2 mm - 0,06 mm) (%)	18	49
	Silte (0,06 mm - 0,02 mm) (%)	67	46
	Argila ($\leq 0,002$ mm) (%)	15	5
Limites de consistência (NP 143)	w_L (%)	41	N.P.
	w_P (%)	27	N.P.
	I_P (%)	14	N.P.
Classificação Triangular (LNEC E 219)		Silte-Arenoso	Areia-Siltosa
Classificação USCS		ML - Siltes Inorgânicos	
Classificação AASHTO		A-6 Solos Argilosos	A-4 Solos Siltosos

N.P. – Não plástico

Por se tratarem de resíduos, foi igualmente avaliado o potencial poluente dos finos das duas pedreiras. De acordo com Frias et al. (2008), trata-se de materiais que pertencem à categoria dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, satisfazendo, por isso, os requisitos exigidos pela entidade reguladora nacional para o sector para a utilização destes materiais em obra, por se entender que não representam um risco para o meio ambiente e para a saúde pública.

A bentonite sódica natural utilizada é comercializada em pó, com a designação de “Pilogel”, pela firma A. Agostinho, Químicos e Minerais Unipessoal, Lda e provém originariamente de Madrás e Bujarat, na Índia. O Quadro 2 mostra algumas das características desta bentonite.

Quadro 2 – Características da Bentonite Sódica Natural (adaptado de Serra et al., 2007)

Propriedades	Valor	
Diâmetro das partículas*	0,3 μ m a 200 μ m	
Composição mineralógica*	90% de esmectite	
Limites de consistência (LNEC NP 143)	w_L (%)	500
	w_P (%)	62
	I_P (%)	438

* - Procedimento interno LNEC

As misturas finos-bentonite utilizadas no estudo foram compostas pelos finos das pedreiras de FML e de CRV e pela bentonite sódica natural, adicionada nas percentagens de 2%, 4% e 6%, do peso dos finos secos. Na preparação das misturas finos-bentonite foram adoptados os procedimentos seguintes: 1) secagem dos finos das pedreiras na estufa, a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, durante pelo menos 48 horas; 2) adição da bentonite aos finos na percentagem pretendida; e 3) mistura manual das duas componentes até obtenção de uma mistura homogénea.

2.2. Métodos de Ensaio

No estudo das propriedades índice das misturas finos-bentonite realizaram-se os ensaios seguintes: análise granulométrica completa (especificação LNEC E 196) e limites de consistência (NP 143). Para a determinação das características de compactação das misturas finos-bentonite foram utilizados os métodos Proctor normal e Proctor modificado (especificação LNEC E 197).

Os ensaios de permeabilidade para a determinação da condutividade hidráulica, k , foram realizados em permeâmetros de parede rígida, adoptando a norma ASTM D 5856 e as metodologias propostas por Roque (2001).

Os provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, num total de 12, foram preparados a partir da mistura dos finos de FML e de CRV com as diferentes percentagens de bentonite (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos), e teores em água 2% inferior ao teor em água óptimo Proctor normal ($w_{opt-2\%}$) e ao teor em água óptimo Proctor modificado ($w_{optm-2\%}$).

Na compactação dos provetes, substituiu-se o molde pequeno e a alonga do ensaio Proctor, respectivamente, por um anel em aço inoxidável, com altura de 50 mm e uma alonga adaptada ao anel, com altura de 125 mm. A moldagem do provete directamente no anel visou garantir a estanqueidade entre o provete e o anel e, assim, impedir percolações preferenciais ao longo desta descontinuidade, nos ensaios. Em resultado da substituição do molde pequeno pelo anel, a massa de material necessária à preparação de cada provete foi cerca de um terço da massa que é necessária para cada ponto da curva Proctor. Após a compactação das misturas, removeu-se o material excedente de dentro da alonga, até se verificarem as condições necessárias para a sua extracção sem se haver o risco da danificação do provete. Todo o material exterior ao anel foi cuidadosamente rasado, obtendo-se assim o provete para a realização do ensaio de permeabilidade. O material excedente foi pesado e seco a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, para a determinação do teor em água. Antes de proceder à montagem dos provetes nos permeâmetros, era colocado um papel de filtro de protecção às duas pedras porosas do permeâmetro, para se evitar a sua colmatação pelos finos da mistura.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com água desmineralizada (condutividade eléctrica inferior a $1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$) e percolação no sentido descendente, por esta simular melhor as condições reais na grande maioria das obras geotécnicas com funções ambientais em que estes materiais podem vir a ser aplicados, como sejam, por exemplo, as camadas de confinamento basal e de cobertura final dos aterros de resíduos. Os ensaios foram realizados a carga hidráulica constante, com quatro patamares diferentes (20, 50, 100 e 200 cm), por forma a avaliar-se o valor de k das misturas com diferentes gradientes hidráulicos, i . O critério adoptado para passar de um patamar de carga hidráulica a outro foi a estabilização do valor de k . No início do ensaio era aplicado o patamar de menor carga hidráulica (20 cm), para que o provete pudesse saturar lentamente e, assim, minimizar-se a formação de percursos de percolação preferenciais através do provete.

3. RESULTADOS

3.1. Propriedades Índice

Os resultados da análise granulométrica das misturas dos finos de FML e CRV com as diferentes percentagens de bentonite são apresentadas no Quadro 3. A aplicação da classificação triangular para solos da especificação LNEC E 219 mostra que as misturas dos finos de FML e de CRV com a bentonite continuam a pertencer à mesma categoria de solos dos finos das duas pedreiras, respectivamente, materiais silto-arenosos e areno-siltosos. A excepção é a mistura dos finos de FML com 2% de bentonite, que passa a ser classificada como silte-argiloso.

Os limites de consistência obtidos para as misturas dos finos de FML e de CRV com as diferentes percentagens de bentonite são apresentados no Quadro 3. Os resultados obtidos mostram que o aumento da percentagem de bentonite nas misturas não alterou significativamente os valores dos limites de consistência, com excepção do limite de liquidez, w_L , das misturas dos finos de CRV com 4% e 6% de bentonite, que passam de não plásticas para 29 e 31, respectivamente.

No Quadro 3 são apresentadas as classificações das misturas tendo por base a Classificação Unificada dos Solos e a Classificação para Fins Rodoviários. Relativamente aos finos das pedreiras, não houve alterações na classificação das misturas pela Classificação Unificada dos Solos. Pela Classificação para Fins Rodoviários houve alteração apenas nas misturas dos finos de FML com a bentonite: os finos de FML pertencem ao grupo A-6, Solos argilosos, e as misturas ao grupo A-7-5, Solos argilosos.

Quadro 3 – Propriedades Índice e Classificação das Misturas

Propriedades índice		FML+%bentonite			CRV+%bentonite		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
Composição granulométrica (LNEC E 196)	Areia (2 mm - 0,06 mm) (%)	20	24	22	60	55	60
	Silte (0,06 mm - 0,02 mm) (%)	59	58	59	33	35	30
	Argila ($\leq 0,002$ mm) (%)	21	18	19	7	10	10
Limites de consistência (NP 143)	w_L (%)	45	46	49	N.P.	29	31
	w_P (%)	27	28	27	N.P.	N.P.	N.P.
	I_P (%)	17	18	22	N.P.	N.P.	N.P.
Classificação Triangular (LNEC E 219)		Silte-Argiloso	Silte-Arenoso		Areia-Siltosa		
Classificação USCS		ML Siltos Inorgânicos					
Classificação AASHTO		A-7-5 Solos Argilosos			A-4 Solos Siltosos		

N.P. – Não plástico

3.2. Curvas de Compactação

As curvas de compactação obtidas para as misturas dos finos das pedreiras de FML e de CRV com as três percentagens de bentonite, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, são apresentadas na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente. Nas duas figuras foram igualmente representadas as curvas de compactação dos finos das pedreiras obtidas por Frias et al. (2008).

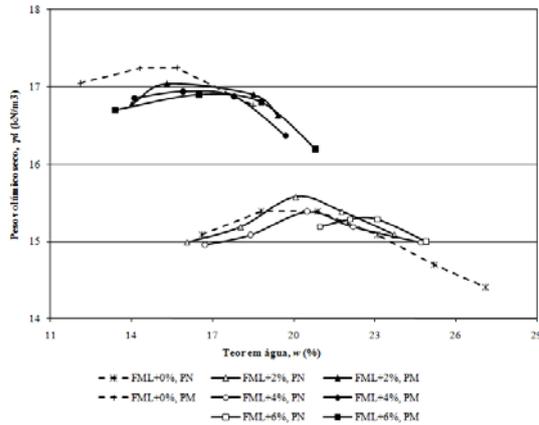


Figura 1 - Curvas de Compactação dos Finos FML+% Bentonite e dos Finos de FML, pelos Métodos Proctor Normal (PN) e Proctor Modificado (PM)

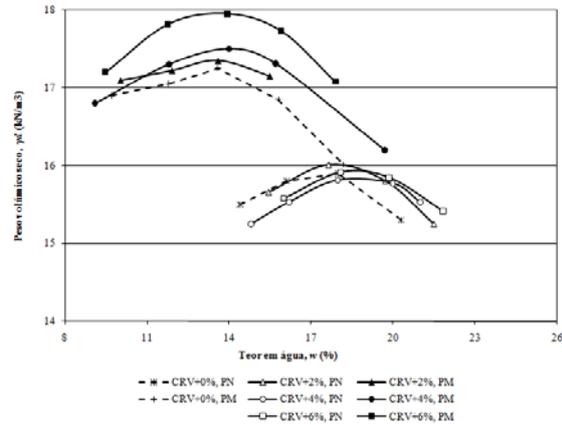


Figura 2 - Curvas de Compactação dos Finos CRV+% Bentonite e dos Finos de CRV, pelos Métodos Proctor Normal (PN) e Proctor Modificado (PM)

O Quadro 4 apresenta os valores obtidos nos ensaios Proctor normal e Proctor modificado para o peso volúmico seco máximo, γ_{dmax} , e para o teor em água óptimo Proctor normal, w_{optn} , e o teor em água óptimo Proctor modificado, w_{optm} , das misturas finos-bentonite e finos das pedreiras.

Os resultados obtidos mostram que os valores de γ_{dmax} das misturas praticamente não variaram com o aumento da percentagem de bentonite. Relativamente aos valores de w_{optn} e w_{optm} , as alterações mais importantes tiveram lugar quando a percentagem de bentonite passou de 4% para 6% na mistura com os finos de FML, compactada pelo método Proctor normal e de 2% para 4% na mistura com os finos de CRV, igualmente compactada pelo método Proctor normal.

Quadro 4 – Parâmetros de Compactação das Misturas Finos-Bentonite e dos Finos das Pedreiras, pelos Métodos Proctor Normal e Proctor Modificado

Parâmetro		FML + %bentonite				CRV + %bentonite			
		0%	2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%
Proctor normal	γ_{dmax} (kN/m ³)	15,4	15,6	15,4	15,3	15,9	16,0	15,9	15,9
	w_{optn} (%)	19,9	20,2	20,5	22,6	17,8	17,8	18,8	18,6
Proctor modificado	γ_{dmax} (kN/m ³)	17,3	17,1	17,0	16,9	17,2	17,3	17,5	18,0
	w_{optm} (%)	15,2	16,6	16,5	16,9	13,6	13,8	13,8	13,6

3.3. Condutividade Hidráulica

Na Figura 3 e na Figura 4 apresentam-se a variação do valor de k em função do tempo de ensaio, t , nos provetes compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, das misturas finos FML-bentonite e finos CRV-bentonite, respectivamente.

Nas misturas dos finos de FML com a bentonite, compactadas pelo Proctor normal, o valor de k foi mais estável durante o ensaio de permeabilidade, do que nas misturas compactadas pelo Proctor modificado, onde se registaram variações significativas nos primeiros 30 dias. Contrariamente ao observado nestes provetes, nos de CRV, o valor de k manteve-se aproximadamente uniforme durante os ensaios. Nas misturas dos finos de CRV com a bentonite, compactadas pelo Proctor normal, a estabilidade do valor de k ao longo do ensaio foi idêntica à observada nos respectivos provetes de FML.

Como evidenciam as curvas apresentadas, todos os ensaios de permeabilidade terminaram em condições de estabilização da condutividade hidráulica. As cinéticas de k em função de t obtidas nos provetes ensaiados, também permitem concluir que, em cada ensaio, o valor de k final não foi significativamente diferente do valor de k inicial.

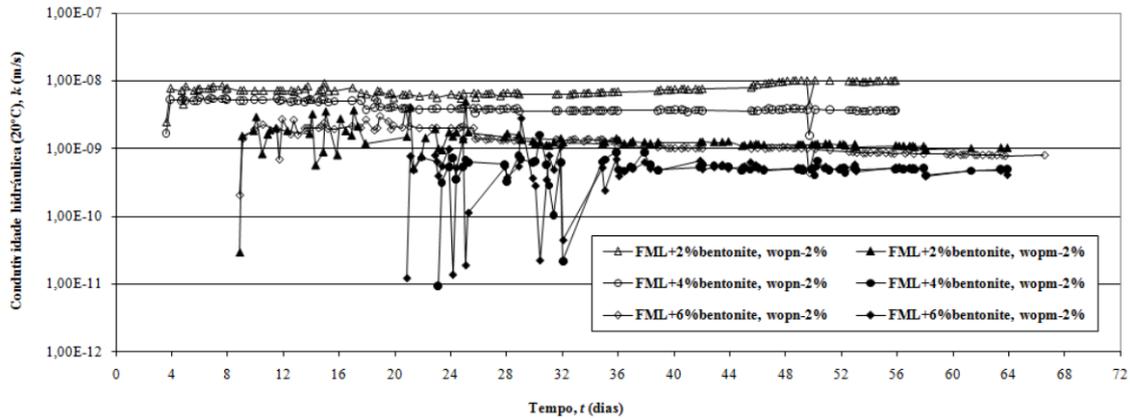


Figura 3 – Variação de k em Função do Tempo t , das Misturas FML+% Bentonite, pelos Métodos Proctor Normal e Modificado

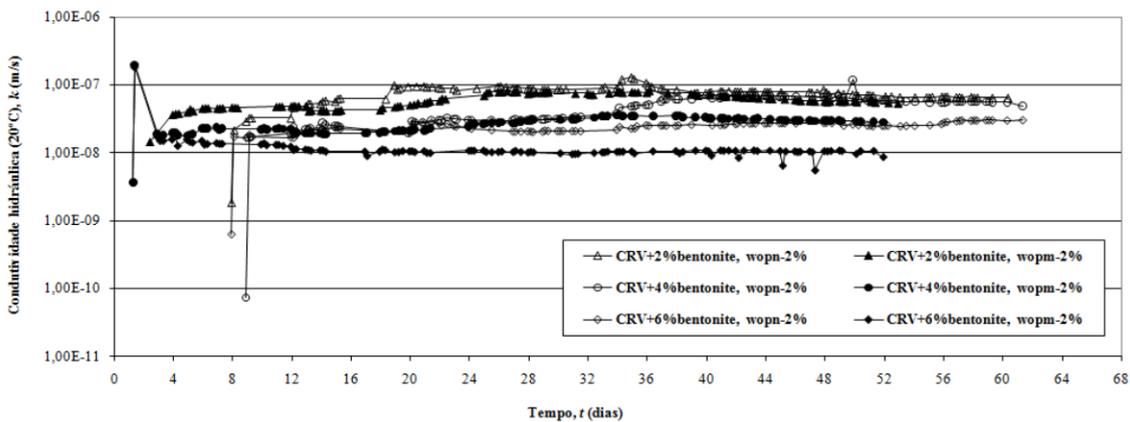


Figura 4 – Variação de k em Função do Tempo t , das Misturas CRV+% Bentonite, pelos Métodos Proctor Normal e Modificado

No Quadro 5 são apresentados os valores de k para os provetes das misturas compactadas pelo Proctor normal e pelo Proctor modificado, que correspondem à média dos valores de k depois de se atingir a sua estabilização. A título informativo, no quadro também se indica a duração total de cada ensaio, que foi de cerca de 1,5 a 2 meses.

Quadro 5 – Condutividade Hidráulica dos Provetes das Misturas dos Finos de FML e de CRV com a Bentonite, Compactadas pelos Métodos Proctor Normal (PN) e Proctor Modificado (PM)

Parâmetro		FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
PN	$w_{opt-2\%}$ (%)	18,2	18,5	20,6	15,8	16,8	16,6
	Tempo, t (dias)	52	52	58	52	52	53
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$9,2 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-9}$	$0,85 \times 10^{-9}$	$69,0 \times 10^{-9}$	$59,0 \times 10^{-9}$	$27,0 \times 10^{-9}$
PM	$w_{opt-2\%}$ (%)	14,6	14,5	14,9	11,8	11,8	11,6
	Tempo, t (dias)	55	41	43	51	51	51
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$1,1 \times 10^{-9}$	$0,49 \times 10^{-9}$	$0,48 \times 10^{-9}$	$61,0 \times 10^{-9}$	$31,0 \times 10^{-9}$	$10,0 \times 10^{-9}$

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O aumento da percentagem de bentonite nas misturas de 2% para 6%, não produziu alterações significativas nas suas composições granulométricas, nem se pode concluir sobre qualquer tendência face aos resultados obtidos (Quadro 3). Comparando estes resultados com os apresentados no Quadro 1 para os finos de FML e de CRV, verifica-se que houve um aumento da percentagem da fracção arenosa e da fracção argilosa e uma diminuição da fracção siltosa. Se o aumento da percentagem da fracção argilosa com a adição da bentonite era expectável, já o mesmo não se poderá dizer em relação ao aumento da percentagem da fracção arenosa. Uma explicação possível para este aumento, é as tomas utilizadas nas análises granulométricas não terem sido exactamente iguais, em resultado de dificuldades de homogeneização e quartearmento da amostra total de FML e da de CRV.

Os resultados obtidos para os limites de consistência mostram, conforme referido anteriormente, que o aumento da percentagem de bentonite nas misturas não alterou significativamente os valores dos limites de consistência. Comparativamente com os limites de consistência dos finos de FML e de CRV apresentados no Quadro 1, observa-se que as misturas dos finos de CRV com a bentonite continuam a ser não plásticas, enquanto que o índice de plasticidade, I_p , das misturas dos finos de FML com 2% e 4% de bentonite aumentou cerca de 1,3 vezes e com 6%, cerca de 1,5 vezes.

As curvas de compactação obtidas para as misturas finos de pedra-bentonite, mostraram, por um lado, que o teor em água óptimo de compactação foi mais sensível ao aumento da percentagem de bentonite nas misturas do que γ_{dmax} , que praticamente não variou e, por outro, que as alterações mais importantes ao teor em água óptimo ocorrerem com a energia de compactação Proctor normal. Comparando os valores dos parâmetros de compactação das misturas com os dos finos, verifica-se que praticamente não variaram. Ainda que pouco significativas, as maiores alterações ocorrem no valor de γ_{dmax} da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite, compactada pelo método Proctor modificado e nos valores de w_{opt} e w_{optm} da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite.

Tal como referido, o presente estudo pretende avaliar a influência da adição de pequenas percentagens de bentonite no valor de k dos finos das pedreiras de granito que estão a ser estudados no LNEC, no âmbito do Protocolo estabelecido com o Grupo ME, com o objectivo de viabilizar a sua valorização em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com

funções ambientais. A necessidade deste estudo advém dos finos das duas pedreiras apresentarem valores de k superiores ao valor mínimo habitualmente exigido pelos regulamentos, ou seja, $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, para as aplicações indicadas, como sejam, por exemplo, as barreiras de confinamento basal dos aterros de resíduos não perigosos e perigosos (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto).

Na análise da influência da adição de bentonite no valor de k dos finos das pedreiras, os valores de k obtidos neste trabalho com as misturas finos-bentonite foram comparados (Figura 5) com os valores de k dos finos das mesmas pedreiras apresentados por Frias et al. (2008). Verifica-se que a maior influência no valor de k resultante do tratamento dos finos das pedreiras com a bentonite, ocorreu nos finos de FML. Com efeito, nestes, o valor de k diminuiu cerca de 19 vezes, do provete compactado pelo Proctor normal sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite e cerca de 53 vezes do provete compactado pelo Proctor modificado sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite. Nos finos de CRV a diminuição foi de apenas 6,7 e 5,7 vezes, respectivamente.

No caso dos finos da pedreira de FML, observa-se que o valor de k é inferior ou igual a 1×10^{-9} m/s: (a) nos provetes compactados pelo método Proctor normal com 6% de bentonite; e (b) nos provetes compactados pelo método Proctor modificado a partir de 2% de bentonite. Nos finos da pedreira de CRV será necessário adicionar uma percentagem de bentonite superior a 6% para se obter um valor de k inferior ou igual a 1×10^{-9} m/s e, dessa forma, viabilizar a valorização destes resíduos em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais, em que aquele requisito seja exigido. Sällfors e Öberg-Högsta (2002) referem que a percentagem de bentonite adicionada nas misturas é habitualmente inferior a 14%, quer por razões económicas (custo da bentonite), quer por razões de engenharia (percentagens elevadas de bentonite tornam as misturas mais plásticas e mais difíceis de compactar).

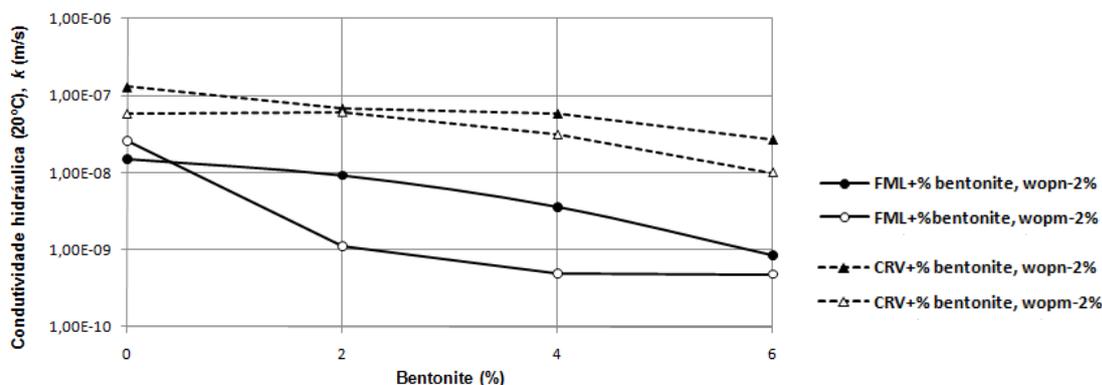


Figura 5 – Condutividade Hidráulica dos Finos das Pedreiras e das Misturas Finos-Bentonite, em Função da Percentagem de Bentonite.

5. CONCLUSÕES

No âmbito do Protocolo celebrado entre o LNEC e o Grupo ME para a valorização dos finos gerados durante o processo de produção dos agregados e das areias nos Centros Industriais daquela Empresa, em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, os resultados obtidos mostraram que a permeabilidade daqueles materiais não era suficientemente baixa para a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico de algumas obras geotécnicas com funções ambientais, como é, por exemplo, o caso das camadas de confinamento basal dos aterros de resíduos não perigosos e perigosos, onde a legislação exige $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

Nesta comunicação apresenta-se o estudo da influência da adição de pequenas percentagens de bentonite no valor de k dos finos de duas pedreiras, tendo em vista a avaliação da viabilidade de valorizar os finos das pedreiras em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais.

As misturas finos-bentonite com maior diminuição de k relativamente aos finos das pedreiras sem bentonite foram as misturas preparadas com os finos da pedreira de Famalicão (FML). O valor de k das misturas dos finos de FML com 6% de bentonite relativamente ao valor de k dos finos sem adição de bentonite diminuiu cerca de 19 vezes, nos provetes compactados pelo Proctor normal e cerca de 53 vezes, nos provetes compactados pelo Proctor modificado. Nos finos da pedreira de Cervães (CRV) a redução foi apenas de 6,7 e 5,7 vezes, respectivamente. No caso dos finos da pedreira de FML observa-se que o valor de k é inferior ou igual a 1×10^{-9} m/s, nos provetes compactados pelo método Proctor normal com 6% de bentonite e nos provetes compactados pelo método Proctor modificado a partir de 2% de bentonite. Com os finos da pedreira de CRV será necessário adicionar uma percentagem de bentonite superior a 6% para viabilizar a valorização destes resíduos em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais, em que seja requerido um valor de $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

REFERÊNCIAS

- Abichou, T., Benson, C. H. e Edil, T. B. (2004). Network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 41, pp. 698-712.
- Adu-Wusu, C. e Yanful, E. K. (2006). Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 43, pp. 1-18.
- Aubertin, M., Bussière, B. e Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 33, pp. 470-482.
- Eid, M. T., Abdelrahman, M. T. e Abdel-Aal, F. M. B. (2008). Sand bentonite mixture as a secondary liners in landfills. *Proceedings of 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt*. Vol. 1, pp. 225-228.
- 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.
- Gueddouda, M.K., Lamara, Md., Aboubaker, N. e Taibi, S. (2008). Hydraulic Conductivity and Shear Strength of Dune Sand-Bentonite Mixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 13, Bund. H.
- Lukiantchuki, J.A. (2007). *Influência do Teor de Bentonite na Condutividade Hidráulica e na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso utilizado como Barreira Impermeabilizante*. Tese de Mestrado em Geotecnia, São Carlos, S.P. Brasil, 124 p.
- Sällfors, G. e Öberg-Högsta, A. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 20, pp. 65-80.
- Roque, A. J. (2001). *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barriers d'étancheite Minerals Presents dans les Centres de Stockage de Dechets. Application aux sols fins portugais*. Thèse de Doctorat Génie Civil – Sols, INSA, 697 p.
- Roque, A. J., Andrade, R., Caldeira, L., Frias, 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.
- Serra, J. B., Amade, K. e Galhano, A. C. (2007). Caracterização experimental de uma bentonite sódica industrial. Relatório 408/2007-DG/NT, LNEC, Lisboa, Portugal, 50 p.
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A. e Stalin, V. K. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 37, pp. 406-413.