

CONTROLO DA COMPACTAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO-ENROCAMENTO DA BARRAGEM DE ODELOUCA

Compaction control of soil-rock mixtures at Odelouca dam

João Bilé Serra*

Laura Caldeira**

Andrea Brito***

RESUMO – A barragem de Odelouca é uma barragem de aterro zonado com 76 m de altura, actualmente em construção no Sul de Portugal. O aterro é constituído por um núcleo argiloso e por maciços estabilizadores de material de alteração de xistos com uma elevada percentagem ponderal de partículas grosseiras. O controlo da compactação tem sido efectuado através de ensaios “in situ” e de ensaios de compactação laboratoriais. São apresentadas algumas conclusões relativas à precisão dos métodos “in situ” baseados em expressões de correcção (Torrey & Donaghe, 1994) do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo dos ensaios Proctor publicadas para as misturas de solo-enrocamento. São propostas novas equações de correcção dos valores de referência do ensaio Proctor para material proveniente da alteração de xistos, calibradas a partir de ensaios de compactação por vibração de amostras de grandes dimensões.

ABSTRACT – Odelouca dam is a zoned earth fill dam with 76 m height presently being constructed at South of Portugal. The embankment material is clayey soil, at the core, and weathered schist with a significant fraction of oversized particles, at the slopes. Compaction control during the construction is performed through in situ tests and laboratory compaction tests. Conclusions are drawn about the accuracy of the in situ methods based on available correction expressions (Torrey & Donaghe, 1994) of maximum unit weight and optimum water content of Proctor test results for soil-rock mixtures. New correction equations for the Proctor reference values for schistose material are presented based on results of vibratory compaction tests of large samples.

1 – INTRODUÇÃO

Na construção de aterros é comum existir a necessidade de controlar a compactação de misturas de solo-enrocamento. O controlo tem por objectivo determinar o peso volúmico seco máximo e o teor em água óptimo da mistura em campo por forma a comparar os resultados com uma condição de referência.

Nesse tipo de controlo a maior dificuldade surge quando os ensaios de referência para o controlo de compactação de solos, como os métodos de Hilf e das famílias de curvas, não são aplicáveis. Estes métodos baseiam-se em resultados de ensaios de compactação normal ou modificada, os quais são aplicáveis apenas a materiais cuja fracção retida no peneiro de 3/4” seja menor ou igual a 30%.

Para contornar este problema têm sido propostos diversos métodos baseados em ensaios de compactação de fracções mais finas ou alteradas.

* Investigador Principal, Departamento de Geotecnia, LNEC. E-mail: biles@lnecc.pt

** Investigadora Principal, Departamento de Geotecnia, LNEC. E-mail: laurac@lnecc.pt

***Bolsista de Iniciação à Investigação Científica, Departamento de Geotecnia, LNEC. E-mail: andreabrito@lnecc.pt

No controlo do peso volúmico seco máximo têm sido, frequentemente, utilizados os métodos de truncagem e o de truncagem com substituição, dada a simplicidade associada à sua execução. A norma ASTM D 4178 (ASTM, 2000), para a avaliação do peso volúmico seco máximo do material integral a partir da fracção fina, fornece uma equação de correcção, denominada de equação de Ziegler. Também é utilizado o “método do peso volúmico seco máximo ajustado” (NAVFAC DM 7.2, 1982). Contudo, a validade desta abordagem depende da percentagem da fracção grosseira presente na mistura.

Para a determinação do valor corrigido do teor em água óptimo da mistura a partir do teor em água da fracção fina é usada uma relação peso-volume integrante da norma ASTM D 4718.

O pressuposto destas equações de correcção é (Torrey & Donaghe, 1994) que “os resultados dos ensaios de compactação realizados nos materiais truncados podem ser directamente relacionados ou, até, tomados como equivalentes aos obtidos com a totalidade do material”. Infelizmente, e de acordo com a pesquisa bibliográfica efectuada por Torrey & Donaghe (1991), esta afirmação não é sempre exacta nem sequer válida para muitos materiais.

Naquela publicação (Torrey & Donaghe, 1994) é proposto um novo método para determinação do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo do material integral com base no conhecimento dos valores homónimos da respectiva fracção fina. Baseia-se na utilização de um coeficiente de interferência no peso volúmico, I_c , e de um factor correctivo do teor em água óptimo, F_{opt} . Para diversas misturas de solo-enrocamento foram propostas e validadas relações bi-logarítmicas entre os I_c e F_{opt} e a fracção ponderal grosseira, P_G . Como facilmente se compreende, as relações mencionadas são específicas dos materiais utilizados por aqueles autores, sendo necessário calibrar relações específicas para cada material de aterro individualizável.

Nesta comunicação descrevem-se os primeiros resultados dum programa de investigação sobre técnicas de controlo de compactação de xistos alterados, provenientes das manchas de empréstimo da barragem de Odelouca. Esta investigação foi motivada pela percepção de que as equações de correcção geralmente utilizadas não seriam válidas nesta obra.

Foram definidos dois objectivos para o programa: (i) a obtenção de fórmulas específicas de correcção através de ensaios de compactação por vibração ou de ensaios de compactação por apiloamento em molde grande; (ii) a aplicação “in situ” de métodos de controlo de compactação baseados no desempenho, nomeadamente, ensaios com o deflectómetro de impacto portátil e ensaios de Análise Espectral de Ondas de Superfície.

Julga-se que, a adopção de fórmulas de correcção específicas e de métodos de controlo de compactação baseados no desempenho, poderão, no futuro, constituir uma via, por um lado efectiva e, por outro, preferencial para o controle de qualidade dos aterros com materiais xistosos em Portugal.

2 – BARRAGEM DE ODELOUCA

A barragem de Odelouca encontra-se actualmente em construção no Sul de Portugal. Trata-se de um aterro zonado com 76 m de altura. O volume armazenado é de 157 hm³, a área inundada é de 7,8 km² e a área da bacia hidrográfica é de 393 km². Apresentam-se na Figura 1 a planta geral da barragem e na Figura 2 o perfil tipo.

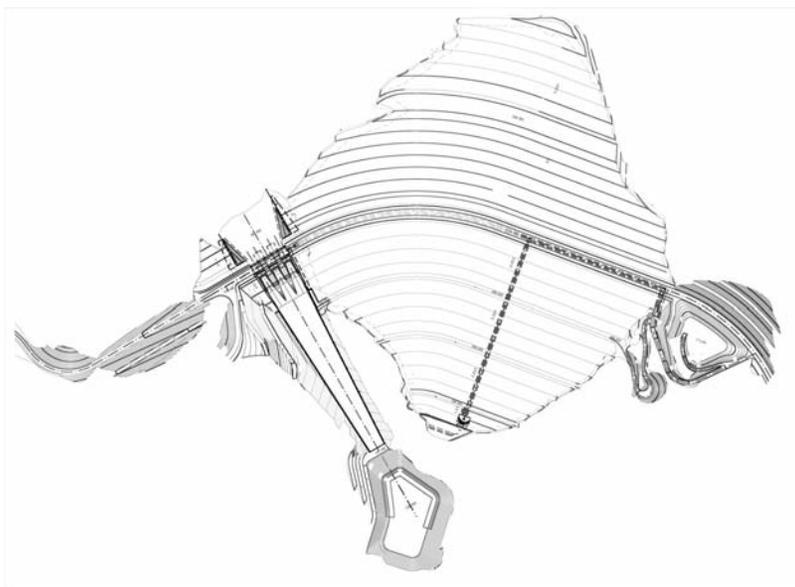


Fig. 1 – Planta de implantação da barragem de Odelouca.

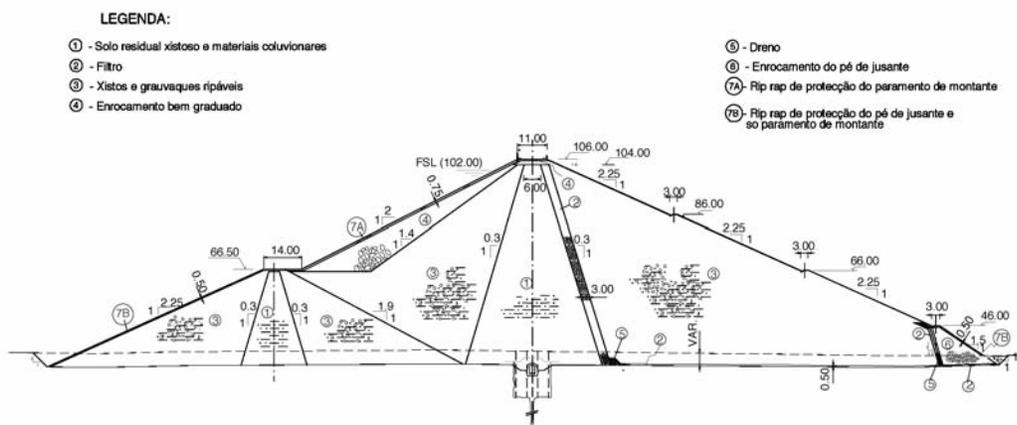


Fig. 2 – Planta de implantação da barragem de Odelouca.

O núcleo da barragem é constituído por uma mistura de coluviões e de solo residual do xisto e os maciços estabilizadores são constituídos por xistos e grauaques ripáveis, com uma grande percentagem de grossos, mesmo após compactação.

As técnicas de compactação do material dos maciços estabilizadores (material n.º 3) foram avaliadas por meio da realização de aterros experimentais durante a construção da ensecadeira, que viria a ser incorporada no corpo da barragem.

Ainda nas manchas de empréstimo, o material foi sujeito a homogeneização e a correção de teor em água. Após um período de repouso, o material foi transportado para o aterro experimental para ser espalhado e compactado.

Com base nos resultados dos aterros experimentais, foi decidido compactar o material em camadas de 0,5 m de espessura, com oito passagens de um cilindro vibrador de pés-de-carneiro. Os resultados dos ensaios de campo de determinação do peso volúmico seco e do teor em água são apresentados de seguida. O peso volúmico foi avaliado por intermédio de ensaios de garrafa de areia, de 12" de diâmetro, ou através de ensaios minimacro, num volume prismático com meio metro de profundidade e de secção quadrada, com 1 m de largura.

3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

3.1 – Ensaio de laboratório

No Quadro 1 apresentam-se as características granulométricas do material n.º 3. A Figura 3 mostra os limites superior e inferior do fuso granulométrico, conforme especificado no projecto da barragem (COBA, 2000).

Quadro 1 – Características granulométricas do material dos maciços estabilizadores (n.º 3).

% de finos	% passada no peneiro #10	% passada no peneiro #4	% passada no peneiro de 3/4"	D_{50} (mm)	D_{100} (mm)
30	10-50	18-62	33-93	2-50	50-400

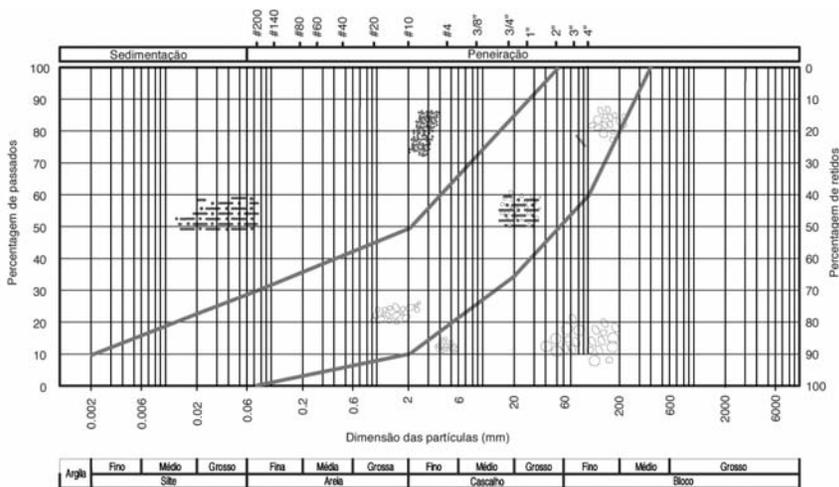


Fig. 3 – Fuso granulométrico dos materiais dos maciços estabilizadores.

A natureza evolutiva do material é evidenciada na Figura 4, em que se representam as curvas granulométricas do material nas manchas de empréstimo e após o espalhamento no aterro (NECSO e Construtora do Tâmega, 2003). São patentes as diferenças entre as curvas granulométricas do material ripado e do material espalhado. As observações de campo mostraram que as alterações da granulometria causadas pela compactação assumiam expressão reduzida.

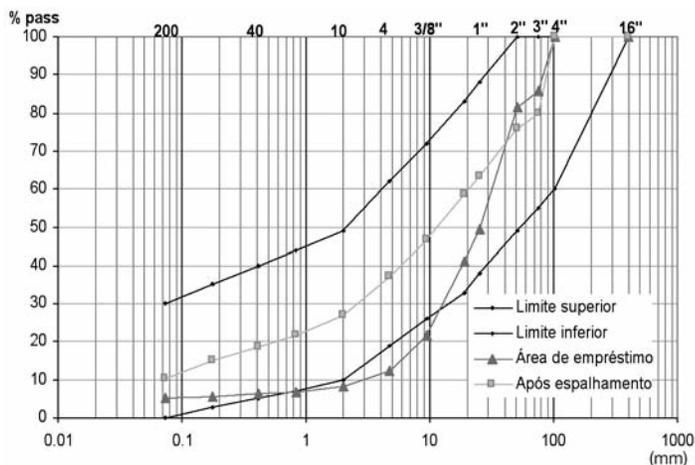


Fig. 4 – Comparação das curvas granulométricas após ripagem na mancha de empréstimo e após espalhamento.

Com o material passado no peneiro de 3/4", foram realizados ensaios de compactação do tipo Proctor, cujos resultados são apresentados na Figura 5. A partir destes resultados foi escolhido um ensaio de referência (n.º 239), a que correspondem os valores $\gamma_{d,max} = 19,2 \text{ kN/m}^3$ e $w_{opt} = 13,4\%$ no óptimo da curva de compactação Proctor.

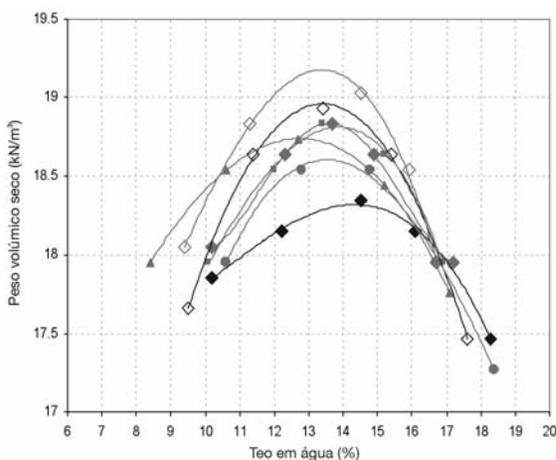


Fig. 5 – Curvas de compactação tipo Proctor de diversas amostras truncadas no peneiro de malha 3/4".

3.2 – Determinação dos valores de referência de campo com base nos resultados da amostra de referência

A conversão dos valores do óptimo da curva de compactação Proctor em valores correspondentes às condições ótimas da compactação de campo foi realizada segundo três métodos distintos como seguidamente se descreve.

Como primeira abordagem (Caldeira e Bilé Serra, 2005) aquela condição de referência de campo foi obtida através da correcção dos resultados dos ensaios de compactação de laboratório do material truncado, representados na Figura 5, correspondendo-lhe o *método 1* e o *método 2*.

O peso volúmico seco máximo do material integral foi estimado através da equação.

$$\gamma_{d,max}^T = \frac{100}{\frac{P_C}{G_M \gamma_w} + \frac{P_F}{\eta \gamma_{d,max}^F}} \quad (1)$$

em que $\gamma_{d,max}^T$ é o peso volúmico seco máximo do material integral, P_C é a percentagem ponderal da fracção grossa, P_F é a percentagem ponderal da fracção fina, G_M é a densidade das partículas constituintes da fracção retida no peneiro #4, η é um coeficiente de correcção definido no Quadro 2, $\gamma_{d,max}^F$ é o peso volúmico seco máximo da fracção fina e γ_w é o peso volúmico da água.

Quadro 2 – Factor de correcção do peso volúmico seco.

P_C	η	P_C	η
<20	1,00	46-50	0,94
21-25	0,99	51-55	0,92
26-30	0,98	56-60	0,89
31-35	0,97	61-65	0,86
36-40	0,96	66-70	0,83
41-45	0,95		

Nesta abordagem para a definição do valor de P_C foram consideradas duas alternativas: no *método 1*, P_C foi tomado igual à percentagem ponderal de grossos na amostra de referência enquanto que no *método 2* foi considerado igual à percentagem ponderal de grossos na amostra colhida no aterro experimental após compactação.

Por sua vez, o teor em água óptimo do material integral, w_{opt}^T , foi determinado pela seguinte equação extraída da norma ASTM D4718 (ASTM, 2000):

$$w_{opt}^T = \frac{w_{opt}^F P_F + w_G P_C}{100} \quad (2)$$

Numa segunda abordagem, foram adoptadas as seguintes equações de Torrey e Donaghe (1994) para correcção dos valores $\gamma_{d,max}^F$ e w_{opt}^F da amostra n.º 239, opção que será identificada na sequência por *método 3*.

$$\gamma_{d,max}^T = 100 \frac{I_C P_C \gamma_{d,max}^F \gamma_w G_M}{\gamma_w P_F + I_C P_C \gamma_{d,max}^T P_C} \quad (3)$$

$$w_{opt}^T = 100 \frac{w_{opt}^F}{P_C F_{opt}} \quad (4)$$

$$\log I_C = 1,614 - 1,025 \log P_C \quad (5)$$

$$\log F_{opt} = 1,812 - 0,730 \log P_C \quad (6)$$

onde I_C é o chamado coeficiente de inferência e F_{opt} o factor correctivo do teor em água óptimo.

A Figura 6 mostra a comparação das condições de campo obtidas através dos diferentes métodos. Como se referiu, a diferença entre os métodos 1 e 2 reside na utilização de diferentes valores de P_C . Na Figura 6 apresentam-se os valores (de referência) corrigidos, $\gamma_{d,max}^T$ e w_{opt}^T , obtidos por aplicação das equações 1 e 2 (ambas correspondendo aos *métodos 1 e 2*) e das equações 3 a 6 (*método 3*) aos resultados de 16 ensaios com garrafa de areia. É ainda representada a curva de compactação Proctor da amostra de referência.

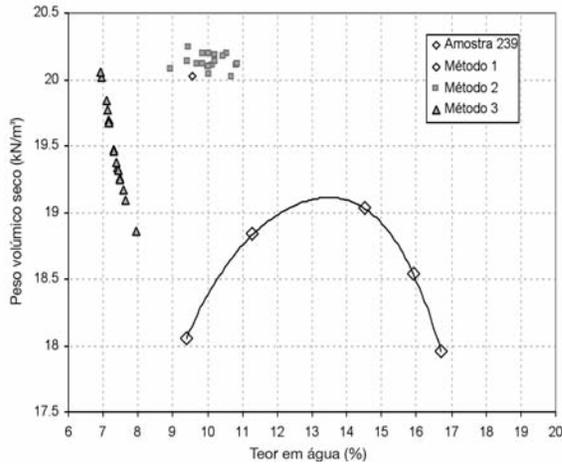


Fig. 6 – Condições de referência obtidas a partir de 16 ensaios com garrafa de areia.

Na Figura 7 apresentam-se, por sua vez, os resultados de controlo da compactação baseados nos pontos de referência de campo anteriormente determinados. É possível constatar que a adopção do valor de P_C da amostra de referência (*método 1*) ou da amostra de campo (*método 2*) introduz diferenças significativas no controlo da compactação. Do ponto de vista do desvio do teor em água Δw , essas diferenças são expressivas quer em termos da média quer em termos do desvio padrão. Por outro lado, no que diz respeito ao grau de compactação GC – definido como o quociente entre o peso volumico seco de campo e $\gamma_{d,max}^T$ – somente a dispersão se apresenta sensível a P_C .

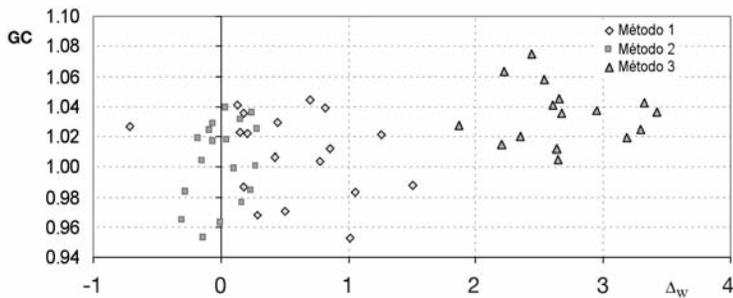


Fig. 7 – Controlo de qualidade de compactação.

4 – ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO POR VIBRAÇÃO

Os resultados obtidos motivaram a definição de um programa de investigação visando a obtenção de fórmulas de correcção do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo, obtido em laboratório sobre a fracção fina, aplicáveis aos materiais xistosos e grauvacóides dos aterros da barragem de Odelouca. Uma vez que estes materiais são bastante frequentes na construção de aterros, tanto na construção de barragens de aterro como na construção de aterros de vias de comunicação, decidiu-se estender a pesquisa até ao estabelecimento de critérios de compactação baseados no desempenho das camadas.

O primeiro passo desse programa de investigação consistiu na obtenção de curvas de referência da compactação de amostras de grandes dimensões truncadas nas duas polegadas e compactadas com um pilão vibrador. Para esse efeito, seguiram-se as especificações referidas na norma BS1377: Part 4 (1990) com pequenas alterações. O diâmetro do molde cilíndrico é 31,1 cm e a altura é 36,7 cm. No que concerne às características do pilão vibrador, a frequência nominal de vibração é de 2850 rpm, o peso estático é 354 N e a força dinâmica em operação é de 2,5 kN. A acção vibratória é aplicada a uma placa cilíndrica em aço com 150 mm de diâmetro colocada entre o pilão vibrador e a camada compactada. Em cada ensaio de compactação são colocadas 3 camadas com cerca de 22 cm de altura.

Decidiu-se vibrar a maioria das camadas durante 6 minutos, o que corresponde a cerca de 90% do assentamento máximo da camada após aplicação da carga vibratória.

Na análise dos resultados dos ensaios de compactação foi adoptada a abordagem de Torrey e Donaghe (1994), conforme mostrado na Figura 8 e no Quadro 3. A Figura 8 mostra os resultados dos ensaios de referência com os materiais passados no peneiro de 3/4". No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos com três amostras.

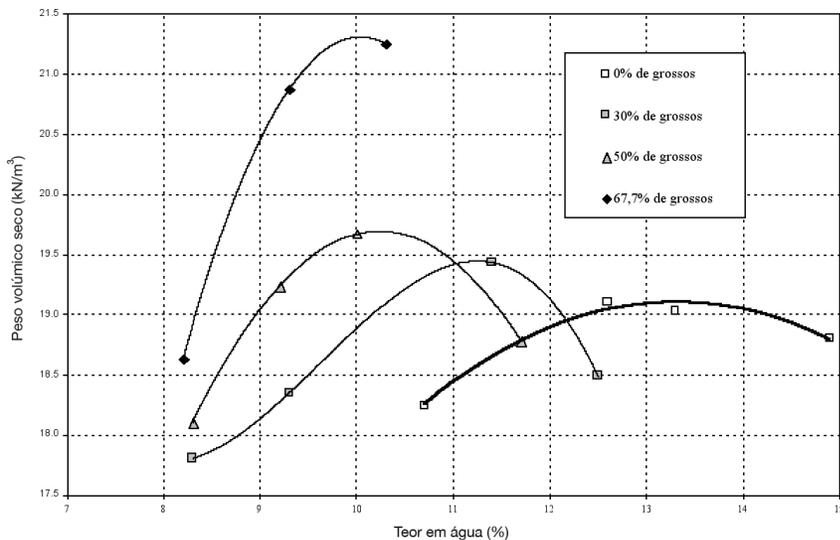


Fig. 8 – Curvas de compactação Proctor do material truncado na dimensão 2'' (P_c igual a 30%, 50% ou 70%) e da fracção fina (P_c igual a 0%).

Quadro 3 – Valores de I_c e de F_{opt} calculados a partir da fracção passada no peneiro de 3/4“.

Ensaio	P_c (%)	G_m	w_{opt}^F (%)	$\gamma_{d;max}^F$ (kN/m ³)	w_{opt}^T (%)	$\gamma_{d;max}^T$ (kN/m ³)	I_c	F_{opt}
1	30	2,39	14,6	18,74	11,4	19,11	1,318	4,269
	50				10,1	19,68	0,757	2,920
	70				10,3	21,25	0,556	2,025
4	40	2,43	13,2		10,8	19,91	0,985	3,056
	50				10,1	19,88	1,359	3,964
5	30				11,1	19,88	1,359	3,964
	60				9,8	20,01	0,590	2,245

Os valores de P_c , os valores determinados do coeficiente de interferência do peso volúmico seco, I_c , e o factor correctivo do teor em água óptimo, F_{opt} , no Quadro 3, foram utilizados (Brito, 2005) para a obtenção das equações de regressão (7) e (8).

$$\log I_c = 1,7398 - 1,0935 \log P_c \quad (7)$$

$$\log F_{opt} = 1,8843 - 0,828 \log P_c \quad (8)$$

Nas Figuras 9 e 10 pode ser observado o bom ajuste obtido pelo método dos mínimos quadrados do logaritmo dos resultados experimentais do coeficiente de interferência do peso volúmico seco e do factor correctivo do teor em água óptimo em função do logaritmo da percentagem de grossos presentes na mistura.

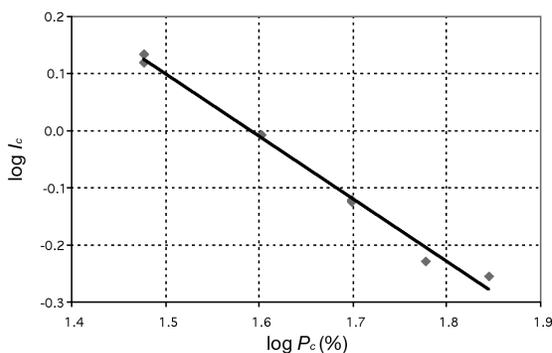


Fig. 9 – Regressão bi-logarítmica de I_c versus P_c

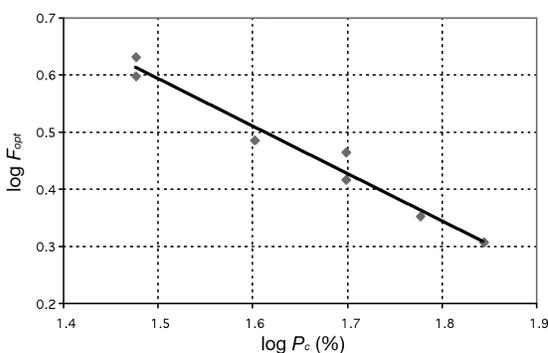


Fig. 10 – Regressão bi-logarítmica de F_{opt} versus P_c

5 – CONCLUSÕES

Foram apresentados alguns resultados preliminares dum projecto de investigação visando o desenvolvimento de critérios de desempenho de controlo de qualidade de materiais de aterro. Os materiais de compactação estudados são xistos alterados e grauvaques para os quais não existiam, ao tempo do início da construção da barragem de Odelouca, até onde o conhecimento dos autores permite saber, equações de correcção do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo de amostras truncadas.

Com base nos resultados de ensaios de vibração com o material integral e em ensaios de compactação de referência com o material truncado, foram deduzidas expressões bi-logarítmicas para os materiais dos aterros da barragem de Odelouca.

Estes são os primeiros resultados de um programa de investigação mais vasto que irá subseqüentemente incluir ensaios de compactação em molde grande com o material integral e ensaios de campo visando a completa definição de métodos de referência de controlo de qualidade tradicionais bem como de métodos baseados no desempenho dos materiais xistosos.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de mencionar que a elaboração do presente artigo foi somente possível com o interesse e o apoio do dono de obra, o Instituto da Água (INAG), o que se agradece bem como a autorização para a sua publicação. Também gostariam de expressar o agradecimento aos técnicos do LNEC, em particular ao Sr. Timóteo Silva, pelo desenvolvimento do trabalho experimental.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04/08, Soil and Rock, Philadelphia, PA, 1994.
- Caldeira, L. e Bilé Serra, J. *Barragem de Odelouca. Interpretação e Análise dos Resultados dos Aterros Experimentais dos Maciços Estabilizadores*. Relatório 420/05 – NBOA/DG, LNEC.
- Brito, A. *Compactação de Aterros de Barragens. Novas Metodologias de Controlo*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2005.
- COBA *Projecto da barragem de Odelouca a montante da Ribeira de Monchique*, Lisboa, 2000.
- NECSO, Construtora do Tâmega – *Empreitada da Construção da barragem de Odelouca. Aterros Experimentais. Vol. I: Aterro Experimental do material 3*, 2003.
- Torrey, V. H. e Donaghe, R.T. *Compaction Characteristics of Earth-Rock Mixtures*. Miscellaneous Paper GL-91-16, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1991.
- Torrey, V. H. e Donaghe, R.T. *Compaction Control of Earth-Rock Mixtures: A New Approach*. Geotechnical Testing Journal, ASTM, VOI.17, No. 3, September 1994, pp. 371-386, 1994.