

# CONTROLO DA COMPACTAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO-ENROCAMENTO DA BARRAGEM DE ODELOUCA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE VIBRAÇÃO

Compaction control of soil-rock mixtures at Odelouca dam by vibratory compaction tests

Laura Caldeira\*

Andrea Brito\*\*

**RESUMO** – A barragem de aterro de Odelouca, em construção no Algarve e com uma altura de 76 m, é constituída por um núcleo central argiloso e por maciços estabilizadores compostos por misturas de solo-enrocamento, provenientes da alteração de xistos e de grauvaques. Para o controlo da execução dos maciços estabilizadores, sobre amostras de granulometria grosseira foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais de compactação por vibração, de modo a permitir estimar os valores de referência do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo dos materiais aplicados. No presente artigo apresentam-se os resultados obtidos nestes ensaios e efectua-se a aplicação prática de uma metodologia desenvolvida, em 1994, por Torrey e Donaghe, para a extrapolação das propriedades de controlo de granulometrias integrais, com fracção grosseira presente, com base em resultados de ensaios de Proctor comuns, realizados sobre a fracção passada no peneiro p". As análises efectuadas permitiram adicionalmente a proposta de uma nova metodologia, baseada em parâmetros diferentes dos propostos pelos referidos autores.

**ABSTRACT** – Odelouca dam is a zoned earth fill dam, with 76 m height, presently being constructed in Algarve. The embankment material is clayey soil, at the core, and weathered schist with a significant fraction of oversized particles, at the slopes. For the execution control of the downstream and upstream zones, a series of vibratory compaction tests on coarse samples was performed to estimate reference values for the maximum dry density and optimum water content of these materials. The present article presents the results of these tests. Following the methodology, developed in 1994, by Torrey & Donaghe, a set of correction equations of the Proctor reference values (obtained on a partial finer fraction passing in the p" sieve) for the extrapolation of the control properties of integral material for schistose material is presented. Additionally a new methodology based in different parameters is proposed.

## 1 – INTRODUÇÃO

Na construção de aterros, o recurso a materiais não tradicionais, nomeadamente, aos do tipo mistura de solo-enrocamento, motivado por razões económicas e ambientais, tem levantado algumas questões.

Geralmente, este material resulta do desmonte de maciços rochosos, sem recurso a explosivos, podendo incluir blocos rochosos com alguma dimensão (cerca de 0,5 m ou, por vezes, de dimensão superior).

---

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

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

As normas da Junta Autónoma das Estradas (*JAÉ*, 1998) consideram como misturas de solo-enrocamento os materiais, de granulometria contínua, que obedecem às seguintes condições granulométricas:

- material retido no peneiro de 19 mm (3/4" da série *ASTM*) compreendido entre 30% e 70%;
- material passado no peneiro 0,074 mm (n.º 200 da série *ASTM*) compreendido entre 12% e 40%;
- dimensão máxima das partículas ( $D_{máx}$ ) não superior a 2/3 da espessura da camada depois de compactada e a 0,40 m.

As Normas de Projecto de Barragens (*NPB*, 1993) distinguem os solos dos enrocamentos, referindo na fronteira os, assim designados, materiais de transição.

De acordo com o mesmo documento, os solos exibem granulometrias mais ou menos extensas, com larga predominância de elementos com dimensões inferiores a 2 - 6 mm, admitindo-se a presença de elementos mais grosseiros, desde que não formem uma estrutura.

Os enrocamentos apresentam, em regra, dimensões com uma larga gama de variação, sendo o limite superior fixado por aspectos técnicos construtivos e podendo o limite inferior atingir a dimensão argila, devendo exibir permeabilidade superior a  $10^{-5}$  m/s.

Os materiais de transição entre os solos e os enrocamentos, ou seja, as misturas de solo-enrocamento, caracterizam-se pelo facto de a percentagem de elementos grosseiros, embora suficiente para criar uma estrutura, não determinar por si só o comportamento tensão-deformação do aterro, já que a parte fina desempenha igualmente um papel influente.

Deste modo, estas normas não especificam um fuso granulométrico admitido para este tipo de materiais, referenciando apenas a alteração do seu comportamento em termos de tensão-deformação relativamente ao comportamento característico de ambas as fracções presentes (solo e enrocamento).

Recentemente, sobretudo na engenharia rodoviária, tem-se vindo a conferir particular atenção às misturas de solo-enrocamento pelo facto de diversos aterros, construídos com este tipo de materiais, terem apresentado um deficiente comportamento, impondo, em muitos casos, a aplicação de medidas correctivas. Tratam-se, frequentemente, de materiais evolutivos, com uma fracção grosseira friável, que, ao longo do processo construtivo e da fase de serviço, sofrem uma alteração da sua natureza e da sua composição granulométrica.

Por outro lado, o controlo de aterros de barragens constituídos por misturas de solo-enrocamento é, ainda, um tema que requer investigação, dada a necessidade de extrapolação dos resultados correntes, obtidos com granulometrias truncadas, para as condições de execução dos aterros.

Efectivamente, existe uma grande dificuldade na caracterização correcta deste tipo de materiais. Por um lado, exibem uma percentagem de materiais de enrocamento, os quais são geralmente, avaliados, no decurso da sua colocação, com apenas um parâmetro – o índice de vazios. Por outro lado, exibem uma percentagem de solo, que é caracterizado por dois parâmetros – o índice de vazios e o teor em água. Quando se tratam as misturas de solo-enrocamento surgem dúvidas, uma vez que o seu comportamento depende da percentagem relativa dos seus constituintes, aproximando-se de um solo, quando a fracção fina é elevada e os grossos se encontram nela disseminados, ou de um enrocamento, sempre que as partículas mais grossas contactam entre si e os finos ocupam os vazios por elas deixados. É, assim, necessário considerar nestas misturas um parâmetro adicional – a percentagem de grossos (percentagem de material retido no peneiro  $p''$  da série *ASTM*).

A “*United States Committee on Large Dams*”, *USCOLD* (1988), refere que tem sido reconhecido, pela maioria dos engenheiros geotécnicos, que a inclusão de partículas de maiores dimensões, como enrocamentos, em solos granulares mais finos pode alterar consideravelmente as propriedades mecânicas dos materiais, dependendo, entre outras coisas, da quantidade relativa de solo e de enrocamento presentes na mistura.

Para além da problemática da estimativa correcta do comportamento mecânico destes materiais com base em propriedades índice, persiste a possibilidade do aterro exibir um comportamento bastante heterogéneo.

Relativamente aos enrocamentos, um estudo laboratorial efectuado por Veiga Pinto (1983) revela que os parâmetros que influenciam o seu comportamento mecânico são, por ordem crescente, a resistência dos fragmentos rochosos, o índice de vazios e o estado de tensão. Segundo o mesmo autor, o índice de vazios é um parâmetro que tem cada vez menos influência, dadas as técnicas actuais de compactação, mediante o recurso a potentes cilindros vibradores, que permitem obter estados de máxima compacidade. O estado de tensão é dependente da altura do aterro. Assim, em obras devidamente compactadas, o comportamento do material é, sobretudo, condicionado pela resistência dos fragmentos rochosos.

Para o controlo de execução de aterros com misturas de solo-enrocamento, a prática habitual recorre à aplicação de fórmulas correctivas aos resultados de ensaios de Proctor normal, de modo a terem em conta a influência da fracção grosseira nas propriedades de referência do controlo da compactação (teor em água óptimo e peso volúmico seco máximo). Corroborando os resultados apresentados por Veiga Pinto para os enrocamentos, estudos anteriores, realizados sobre este tipo de materiais, mostraram a existência de uma forte dependência entre as fórmulas de extrapolação e o tipo de materiais que constituem os aterros.

Assim, após uma síntese de estudos anteriores efectuados sobre a compactação de misturas de solo-enrocamento e tendo por base os maciços estabilizadores da barragem de Odelouca, constituídos por xistos e grauvaques ripáveis, apresentam-se no presente artigo um conjunto de resultados de ensaios laboratoriais de vibração, executados para a dedução de expressões correctivas a aplicar no controlo da execução de aterros com este tipo de materiais.

## **2 – ESTUDOS ANTERIORES SOBRE A COMPACTAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO-ENROCAMENTO**

Em geral, na construção de aterros com misturas de solo-enrocamento são adoptados procedimentos mistos: técnicas construtivas empregues na construção de aterros com enrocamentos (como a deposição em cordão e a utilização de cilindros vibradores com carga estática por unidade de geratriz vibrante superior a 4,5 kN/m (*JAE*, 1998)) e técnicas de controlo geralmente utilizadas no controlo de aterros de solos, recorrendo-se complementarmente a algumas correcções devidamente estabelecidas. De forma a reduzir a energia de compactação absorvida no processo pelas partículas de maiores dimensões, a dimensão máxima está, em geral, limitada a dois terços da espessura da camada (Winter e Suhardi, 1993).

O processo de desmonte, de transporte, de colocação e de compactação destes materiais provoca, na maioria dos casos, uma evolução da granulometria, que se traduz por um aumento da percentagem de finos. Deste modo, seria expectável que os materiais resultantes deste processo fossem caracterizados por uma granulometria extensa, uma compacidade elevada e uma boa resistência

mecânica. Contudo, tal nem sempre se verifica, devido à ocorrência de alterações significativas das suas propriedades físicas e mecânicas, induzidas pelo processo construtivo, pelas condições atmosféricas (ciclos de molhagem e de secagem) e pelas acções mecânicas impostas.

Um estudo efectuado pelo *USCOLD* (1988), permitiu verificar que, para misturas com solos não coesivos (areia ou cascalho), presentes numa proporção de cerca de 20 a 50% do peso total, ocorre uma melhoria das condições de compactação da mistura, relativamente ao material de enrocamento, com a consequente melhoria das suas características mecânicas, o que permitiu fundamentar e aceitar a utilização deste tipo de misturas na constituição dos maciços estabilizadores de barragens. Complementarmente, em misturas de solos siltosos ou argilosos, os mesmos autores aconselham a realização de estudos mais aprofundados para determinação das propriedades mecânicas do material resultante, com vista à sua aplicação em maciços de barragens.

Um estudo de Winter e Suhardi, efectuado em 1993 (citado por Trenter, 2001), recomenda a adopção de procedimentos para o controlo da compactação diferenciados em função da fracção de grossos existente na mistura. Assim, para materiais com uma percentagem inferior a cerca de 45 a 50% de partículas de grandes dimensões (maiores que 20 mm), de acordo com os mesmos autores, as propriedades da matriz (isto é, do material fino na mistura) controlam as propriedades do aterro, podendo o seu controlo ser realizado através de ensaios com granulometrias truncadas (por eliminação das partículas mais grosseiras). Quando a proporção de blocos for superior a 45 a 50% da massa total, os resultados dos ensaios para a determinação das características físico-mecânicas com granulometrias truncadas deixam de ser representativos, sendo necessário proceder à execução de ensaios laboratoriais de grande escala, com equipamento adequado, e de ensaios “in situ”. Estes trabalhos permitiram ainda concluir da necessidade, para assegurar um nível de compactação adequado, de equipamentos mais pesados, de um maior número de passagens ou de espessuras de camadas inferiores em misturas relativamente ao corrente na compactação de solos finos ou de misturas dominadas pela matriz fina.

No âmbito do protocolo estabelecido entre a *JAE* e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*), foram efectuados ensaios laboratoriais, de compressão unidimensional, e de campo, de carga com placa, sobre os aterros da Via Longitudinal do Algarve (*VLA*), para a determinação das características mecânicas das misturas de solo-enrocamento, com vista à aferição das técnicas construtivas utilizadas.

As formações presentes na maioria do traçado eram carbonatadas, constituídas por calcários e calcários margosos, tendo sido também identificadas formações carbónicas formadas por xistos e grauvaques. Os materiais resultantes consistiam, assim, em materiais de média a elevada resistência (calcários e grauvaques) e outros de baixa resistência (margas e xistos).

Os resultados do estudo (*JAE/LNEC*, 1994) e a análise dos resultados dos ensaios realizados permitiu verificar que a percentagem de grossos influenciava os valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo da amostra integral, dificultando, em laboratório, a determinação dos valores de referência para comparação com os determinados em campo.

Os mesmos autores constataram também a influência da fracção mais fina no comportamento tensão-deformação das misturas de solo-enrocamento, dependendo este das seguintes características dos materiais:

- o tipo (com propriedades físico-mecânicas distintas);
- a heterogeneidade;
- a natureza evolutiva;
- a susceptibilidade ao colapso por molhagem;

- a expansibilidade;
- e a fluência;

e das seguintes condições de colocação em obra:

- a técnica de espalhamento;
- a quantidade de água presente;
- as condições atmosféricas;
- e a metodologia de compactação.

Houston e Walsh (1993) referem que, para se ter em conta o efeito do material grosso no controlo, podem ser adoptadas diferentes metodologias:

- realização, com a totalidade do material, de ensaios de grande dimensão para a determinação dos valores do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo da mistura – *método 1*;
- realização de ensaios de compactação em moldes de menores dimensões utilizando o método de truncagem e de substituição (“scalp-and-replace”, muito utilizado pelo Corps of Engineers), que consiste em retirar a fracção grossa (retida no peneiro  $p$ ) e substituí-la por uma fracção de igual peso de material fino (passado no peneiro “\_” mas retido no peneiro  $n$ .º 4) – *método 2*;
- realização de ensaios de compactação em molde de 6”, com material passado no peneiro de 19 mm ( $p$ ), e em que o material retido nesse peneiro é eliminado – *método 3*; este procedimento só é válido se a percentagem retida no peneiro de  $p$  for inferior a 10% (ASTM D698, 2000);
- realização de ensaios de compactação com material de dimensões inferiores ao peneiro  $n$ .º 4 para determinação do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo para essa fracção, e correcção desses resultados através de expressões apropriadas, tendo em conta as percentagens relativas da fracção grossa e da fina (através da Norma ASTM D4718 (2001), da Especificação T224 ou da Especificação 5515-89 do USBR, 1989) – *método 4*.

O *método 1* é o mais moroso e dispendioso, sendo, portanto, raramente utilizado. Os *métodos 2 e 4* são bastante empregados para misturas contendo entre 10 e 60% de grossos. O *método 3* é apenas aplicável a misturas com reduzidas quantidades de grossos, cujo comportamento é nitidamente controlado pela respectiva matriz fina.

Um estudo efectuado, em 1975, por Donaghe e Townsend (referido por LNEC, 1987), concluiu que o *método 2*, de remoção e de substituição da fracção grossa, influencia as características de compactação, pelo que devem ser sempre adoptadas correcções adequadas, para terem em conta que o peso volúmico seco máximo da amostra truncada diminui e o teor em água óptimo aumenta relativamente a uma amostra integral.

Houston e Walsh (1993) apresentam um quadro onde resumem as equações de correcção mais usadas para o cálculo do peso volúmico seco máximo da amostra integral (ver Quadro 1). O factor correctivo  $r_A$ , na segunda fórmula da AASHTO (“Association of State Highway and Transportation Officials”), ou o factor correctivo  $r_u$ , da fórmula do USBR (“United States Department of Interior. Bureau of Reclamation”), servem para compensar o facto das partículas grossas interferirem entre si, impedindo que o material mais fino, existente no seu seio, seja inteiramente compactado. Este factor correctivo pode também ser descrito como grau de compactação da fracção fina, conforme especificado na norma USBR 5515-89. Esta norma apresenta curvas de  $r_u$ , em função da percentagem da fracção grossa para diferentes tipos de misturas (limpas, argilosas e siltosas), advertindo, no entanto, para sua utilização apenas quando

não existe melhor informação disponível. O seu valor varia entre 1,0, para pequenas percentagens de grossos, decrescendo rapidamente quando a mesma percentagem excede 30%. Em misturas argilosas, com reduzida percentagem de grossos, o seu valor pode ser ligeiramente superior a 1,00.

Na fórmula da *ASTM* não existe este factor correctivo, sendo, contudo, a sua validade limitada a percentagens de grossos inferiores a 40%.

Os estudos de *JAELNEC* (1994) sugerem a utilização do método de truncagem e de substituição (“scalp-and-replace”) e a correcção dos valores obtidos nos ensaios,  $w_{opt}^F$  e  $\gamma_{d\max}^F$ , com vista ao cálculo do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo da amostra total, em função da percentagem de grossos (retidos no peneiro n.º 4 ou no peneiro p” da série *ASTM*),  $P_C$ .

**Quadro 1** – Equações de correcção dos resultados do material integral  
(adaptado de Houston e Walsh, 1993).

Designação da equação	Referência	Equação	Observações
AASHTO - 1	AASHTO T224 (1982)	$\gamma_{d\max}^T = (1 - P_C)\gamma_{d\max}^F + 0,9P_C\gamma_w G_M$	$\gamma_{d\max}^F$ determinado através do método A ou B da norma AASHTO T99 ou T180.
AASHTO - 2	AASHTO T224 (1982)	$\gamma_{d\max}^T = \frac{\gamma_w}{\frac{P_C}{G_M} + \gamma_w \frac{1 - P_C}{r_A \gamma_{d\max}^F}}$	$\gamma_{d\max}^F$ determinado através do método A ou B da norma AASHTO T99 ou T180. O factor de correlação $r_A$ depende do tipo de rocha.
ASTM	ASTM D4718 (2001)	$\gamma_{d\max}^T = \frac{\gamma_w}{\frac{P_C}{G_M} + \gamma_w \frac{1 - P_C}{\gamma_{d\max}^F}}$	$\gamma_{d\max}^F$ determinado através da norma ASTM D698 ou D1557.
USBR	USBR 5515-89 (1990)	$\gamma_{d\max}^T = \frac{\gamma_w}{\frac{P_C}{G_M} + \gamma_w \frac{1 - P_C}{r_u \gamma_{d\max}^F}}$	$\gamma_{d\max}^F$ determinado através do método 5500-89 do USBR. O factor correctivo $r_u$ depende da rocha e da composição dos finos.

$\gamma_{d\max}^T$  – Peso volúmico seco máximo do material integral;

$\gamma_{d\max}^F$  – Peso volúmico seco máximo da fracção fina;

$G_M$  – Densidade das partículas sólidas constituintes da fracção grossa (retida no peneiro nº4);

$P_C$  – Percentagem ponderal da fracção grossa (retidos no peneiro n.º 4 ou no peneiro p”);

$r_A$  – Factor correctivo para ter conta o efeito das partículas de grandes dimensões na equação da AASHTO;

$r_u$  – Factor correctivo para ter conta o efeito das partículas de grandes dimensões na equação da USBR;

$\gamma_w$  – Peso volúmico da água.

*JAELNEC* (1994) refere ainda que, relativamente aos métodos 2 e 4, o peneiro p” não é o mais indicado para se proceder à separação da fracção grossa, uma vez que esta poderá atingir percentagens muito elevadas.

Para a correcção do peso volúmico seco máximo, os mesmos autores sugerem a aplicação da seguinte equação:

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

em que  $\gamma_{d\text{máx}}^F$  é o peso volúmico seco máximo do material integral,  $\gamma_d^C$  o peso volúmico seco da fracção grossa,  $P_F$  a percentagem ponderal da fracção fina e  $\eta$  um coeficiente de correcção, dado por

$$\eta = -5 \times 10^{-5} P_C^2 + 0,0013 P_C + 0,9958 \quad (2)$$

Para a correcção do teor em água é, sistematicamente, adoptada a seguinte relação ponderal:

$$w_{opt}^T = \frac{P_F w_F + P_C w_C}{100} \quad (3)$$

em que  $\gamma_{opt}^T$  representa o teor em água óptimo do material integral,  $w_C$  o teor em água da fracção grossa e  $w_F$  o teor em água da fracção fina. Correntemente admite-se para teor em água da fracção fina o valor correspondente ao óptimo do ensaio de Proctor normal. No entanto, Torrey e Donaghe (1991) mostraram que esta aproximação poderá conduzir a um erro significativo.

Torrey e Donaghe (1994) introduziram um novo método baseado em resultados de ensaios por eles efectuados, o qual foi devidamente calibrado a partir de dados até então publicados para misturas de solo-enrocamento. Foram realizados ensaios de compactação, com a energia normal, em diferentes moldes e sobre materiais constituídos por cascalho, por areia e por siltes não plásticos ou por argilas altamente plásticas. Os diâmetros dos moldes e as dimensões máximas das partículas adoptadas são apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2** – Diâmetros dos moldes e dimensões máximas dos materiais dos ensaios de compactação normal realizados por Torrey e Donaghe (1994).

Diâmetro do molde (mm)	Dimensão máxima (mm)
457 (18")	76,2 (3")
305 (12")	50,8 (2")
152 (6")	19,1 (p") 4,76 (peneiro n.º 4)
102 (4")	4,76 (peneiro n.º 4)

Verificou-se que os resultados obtidos com os materiais truncados ao peneiro n.º 4 e ao peneiro p" eram equivalentes e independentes do molde utilizado.

Com vista ao tratamento dos restantes resultados, foram definidas duas grandezas adicionais:

– o coeficiente de interferência do peso volúmico seco,  $I_C$ , dado por:

$$I_C = \frac{100 F_F}{P_G G_M} \quad (4)$$

onde  $F_F$  representa o grau de compactação da fracção fina (definida como a fracção que passa no peneiro p" ou no peneiro n.º 4), dado por  $F_F = \gamma_d^F / \gamma_{d\text{máx}}^F$ ,  $P_G$  a percentagem ponderal da fracção retida no peneiro n.º 4 e  $G_M$  a densidade das partículas constituintes da fracção retida no peneiro n.º 4;

– o factor correctivo do teor em água óptimo,  $F_{opt}$ , avaliado por

$$F_{opt} = \frac{100 w_{opt}^F}{P_G w_{opt}^T} \quad (5)$$

onde  $\gamma_{opt}^F$  representa o teor em água óptimo obtido num ensaio Proctor do material passado no peneiro 3/4" ou no peneiro n.º 4,  $w_{opt}^T$  o teor em água óptimo obtido num ensaio de compactação do material integral e  $P_G$  a percentagem ponderal da fracção grossa.

Para o cálculo de  $F_F$  recorreram à seguinte expressão de correcção do peso volúmico seco máximo da amostra integral:

$$\gamma_{d\ máx}^T = \frac{100F_F\gamma_{d\ máx}^F G_M\gamma_w}{F_F\gamma_{d\ máx}^F P_C + G_M\gamma_w P_F} \quad (6)$$

pelo que

$$F_F = \frac{\gamma_{d\ máx}^T G_M\gamma_w P_F}{100\gamma_{d\ máx}^F G_M\gamma_w - \gamma_{d\ máx}^T \gamma_{d\ máx}^F P_C} \quad (7)$$

Os valores de  $I_C$  e de  $F_{opt}$ , calculados para cada ensaio, foram representados em função da percentagem de grossos (fracção retida no peneiro n.º 4),  $P_G$ , o que permitiu verificar a respectiva independência do tipo de finos presentes (siltosos ou argilosos) e propor as seguintes correlações, deduzidas para as misturas com solos argilosos:

$$\log I_C = 1,614 - 1,025 \log P_G, \quad P_G \leq 0,50 \quad (8)$$

$$I_C = 1,406 - 0,0132 P_G, \quad 0,50 \leq P_G \leq 0,70 \quad (9)$$

$$\log F_{opt} = 1,812 - 0,730 \log P_G \quad (10)$$

De acordo com os citados autores, a expressão (8) seria válida para percentagens de grossos até 50% (para percentagens superiores a relação mostrou-se não linear), a expressão (9) era aproximada e conservativa para percentagens de grossos entre 50 e 70% e a expressão (10) mantinha-se válida para todos os ensaios realizados.

Relações lineares do mesmo tipo foram igualmente obtidas a partir de dados de misturas de solo-enrocamento publicados por outros investigadores (Garga e Madureira, 1985; Donaghe e Townsend, 1975; USBR, 1963 e Gorden *et al.*, 1964), variando, no entanto, as constantes, especialmente na relação entre o factor correctivo do teor em água óptimo e a percentagem de grossos (expressão (10)).

No controlo da compactação das barragens de aterro recorre-se, geralmente, ao método das famílias de curvas, estando associada a cada família uma curva de compactação característica do material, determinada, em geral, com o material passado no peneiro n.º 4 ou no peneiro p". A metodologia de Torrey e Donaghe (1994) é directamente aplicável aos resultados de cada família de curvas, mediante a avaliação prévia de expressões idênticas às (8) a (10) devidamente estabelecidas para o material utilizado na construção das barragens.

Com base nos resultados de ensaios de Proctor normal, o valor do peso volúmico seco máximo do material integral, dado o valor de  $I_C$ , é calculado através de

$$\gamma_{d\ máx}^T = \frac{100I_C P_G \gamma_{d\ máx}^F G_M \gamma_w}{I_C \gamma_{d\ máx}^F P_G^2 + \gamma_w P_F} \quad (11)$$

e o valor do teor em água óptimo do material integral, dado  $F_{opt}$ , avaliado através de

$$w_{opt}^T = \frac{100w_{opt}^F}{P_G F_{opt}} \quad (12)$$

Para além dos métodos atrás referidos, que recorrem a propriedades físicas, existem, na bibliografia da especialidade, outros métodos de controlo destes materiais baseados em características de deformabilidade.

Por exemplo, Maranha das Neves e Veiga Pinto (1983) fazem referência ao método utilizado no controlo dos aterros de misturas de solo-enrocamento da Barragem de Meimoa, que consistiu na realização de ensaios de compressão unidimensional sobre amostras com diâmetro igual a 230 mm. Foram efectuados ensaios para dois pesos volúmicos secos diferentes (aproximadamente iguais a 20 e 21,5 kN/m<sup>3</sup>), três valores de teor em água (variáveis entre 4 e 11%) e várias percentagens de grossos na mistura. Pretendia-se com estes ensaios controlar os módulos edométricos do material, para que estes se situassem no intervalo de 30 a 40 MPa, de modo a que não ocorresse grande contraste de rigidez entre o material do núcleo e o do maciço estabilizador de jusante. Os ensaios realizados permitiram aos autores estabelecerem correlações que respeitassem o critério estabelecido. Na Figura 1 apresentam-se esses resultados.

### 3 – DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DE ODELOUCA E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS ESTUDADOS

A barragem de Odelouca está implantada na ribeira de Odelouca, principal afluente do Rio Arade, cerca de 1 km a montante da confluência das ribeiras de Odelouca e de Monchique, imediatamente a jusante de um meandro apertado da ribeira de Odelouca. O vale é assimétrico e apresenta forte inclinação, em particular no encontro esquerdo (COBA, 2000).

A bacia hidrográfica da ribeira, com 393 km<sup>2</sup> na secção de implantação da barragem, desenvolve-se em plena serra algarvia e apresenta uma forma alongada. A sua altitude máxima e média é, respectivamente, 570 m e 196 m. Desde a nascente até à secção da barragem, a ribeira de Odelouca tem uma extensão de cerca de 61 km, orientação E-W e um declive médio da ordem dos 0,8%. Na secção da barragem, o escoamento anual médio é de 122,2 hm<sup>3</sup>/ano.

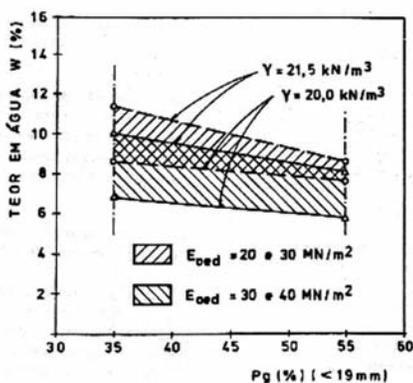


Fig. 1 – Correlações entre o teor em água, o peso volúmico seco, a percentagem de grossos e o módulo edométrico dos materiais de solo-enrocamento da barragem de Meimoa (JAE/LNEC, 1994).

A morfologia da albufeira é muito vigorosa, sendo frequentes os depósitos de vertente no sopé e ao longo das encostas e em zonas mais suaves, geralmente com fragmentos de rocha em matriz siltosa e argilosa. Os solos são, em geral, pouco espessos nos cumes e nas vertentes, aumentando um pouco de espessura nas zonas mais suaves e ao longo dos vales.

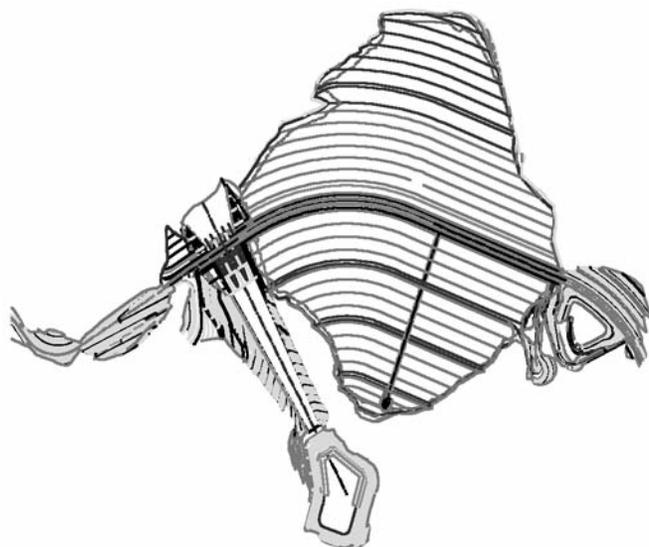
No local da barragem e na área interessada pela albufeira ocorrem essencialmente xistos e filádios finos argilosos e grafitosos e metagrés grauvacóides, dispostos em séries alternantes atribuídas ao Carbónico Marinho, designadas, geralmente, como Grupo do Flysch do Baixo Alentejo, parte integrante da zona Sul Portuguesa, um dos domínios paleogeográficos do Maciço Hespérico. Os terrenos desta zona pertencem à formação de Brejeira, que constitui uma importante sequência turbidítica, em que se observa uma progressiva abundância dos xistos e dos filádios à medida que se caminha para sul, em detrimento dos metagrés e dos grauvaques.

A construção da barragem de Odelouca criará uma albufeira com uma área aproximada de 7,8 km<sup>2</sup> e um volume total de 157 hm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento, à cota 102,00, o que permitirá a regularização de parte significativa das aflúncias da ribeira de Odelouca.

A maior parte dos volumes, assim regularizados, serão destinados ao abastecimento público através do novo Sistema Multimunicipal de Abastecimento do Barlavento Algarvio, já em exploração. Apenas uma pequena parte será destinada ao regadio no vale a jusante da barragem, sendo ainda reservada uma dotação da capacidade de regularização da albufeira para manutenção de caudais ecológicos a jusante da barragem.

A barragem tem o coroamento à cota 106,00 e uma altura máxima acima da fundação de 76 m. O coroamento, com 11 m de largura, tem um desenvolvimento de cerca de 415 m, apresentando dois trechos rectilíneos ligados por um trecho curvo na margem direita (Figura 2).

O perfil tipo adoptado (Figura 3), em terra zonado, utiliza essencialmente os materiais disponíveis nas manchas de empréstimo, minimizando, assim, os impactes negativos associados à exploração de áreas de empréstimo e de pedreiras fora da albufeira. O maciço estabilizador de montante incorpora a ensecadeira da barragem com coroamento à cota 66,50, formando uma banquetta exterior com 14 m de largura.



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

As funções de estanqueidade são, no essencial, conferidas por um núcleo central, com taludes inclinados a 1:0,3 (V:H), constituído por coluviões e solo residual do xisto. Os maciços estabilizadores da ensecadeira, a zona interna do maciço estabilizador de montante e o maciço estabilizador de jusante serão constituídos, no essencial, por xistos e grauvaques ripáveis, a explorar sob a franja superior mais alterada. A zona externa do maciço estabilizador de montante, que se desenvolve acima da cota 65,50, deverá ser constituída por enrocamento de granulometria extensa. A separação entre o núcleo e o maciço estabilizador de jusante será assegurada por um filtro, com 3 m de largura, que se prolongará como tapete drenante, de 0,5 m de espessura, sob o maciço estabilizador de jusante. Na Figura 4 representam-se os fusos granulométricos dos materiais propostos para cada zona da barragem.

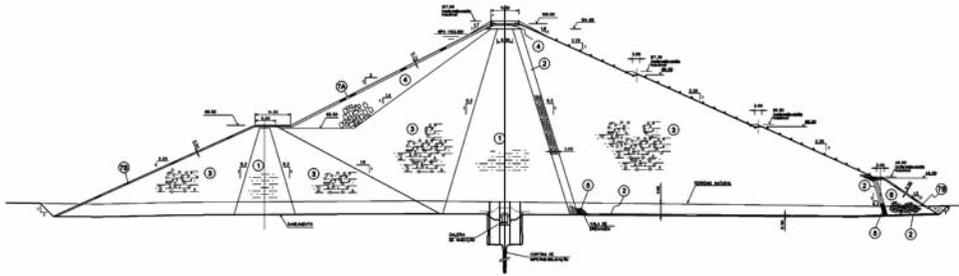


Fig. 3 – Perfil tipo da barragem de Odelouca.

O caudal percolado através do núcleo e parte do caudal proveniente da fundação serão recolhidos numa vala drenante localizada imediatamente a jusante do núcleo, no contacto com a fundação. Esta vala terá uma saída para o exterior na zona central do vale, materializada pelo seu prolongamento no sentido do pé de jusante. A totalidade do caudal que acederá a este tapete será depois recolhida na galeria transversal de drenagem ou no poço de bombagem.

No que se refere à geometria exterior da obra, o talude de montante será inclinado a 1:2,25 (V:H), abaixo da banquetta à cota 66,50, e a 1:2 (V:H), acima dessa banquetta. A jusante, o talude será inclinado a 1:2,25 (V:H), acima do coroamento do pé em enrocamento à cota 46,00, e a 1:1,5 (V:H), abaixo desse banquetta. Neste talude existirão outras duas banquettas, às cotas 86,00 e 66,00, todas com 3 m de largura.

LEGENDA:

- ① - Solo residual do xisto e materiais coluvionares
- ② - Filtro
- ③ - Xisto e grauvaque ripáveis
- ④ - Enrocamento de granulometria extensa
- ⑤ - Dreno
- ⑥ - Enrocamento do pé de jusante
- ⑦A - Enrocamento de protecção do paramento de montante acima da cota 66,50
- ⑦B - Enrocamento de protecção do paramento de montante abaixo da cota 66,50

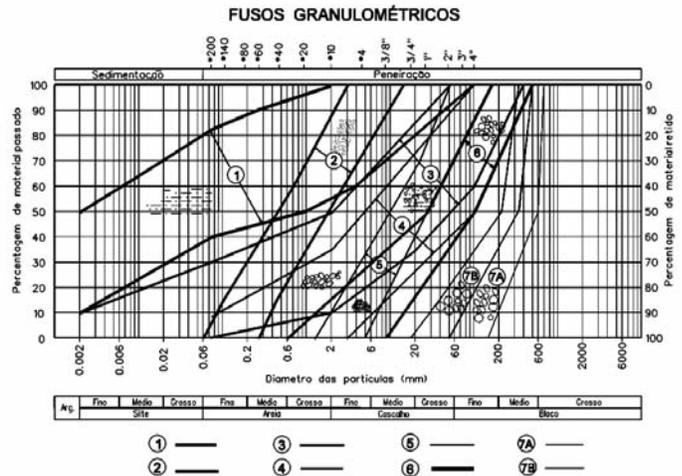


Fig. 4 – Fusos granulométricos dos materiais da barragem de Odelouca.

O fuso granulométrico dos materiais dos maciços estabilizadores foi definido tendo em conta a granulometria das amostras mais grosseiras de solo residual dos xistos e as curvas granulométricas obtidas para o xisto e o grauvaque ripáveis. O fuso definido para este material é sensivelmente paralelo ao fuso estabelecido para os materiais do núcleo, mas contendo menos finos e mais elementos grosseiros, por forma a garantir uma maior resistência mecânica.

No Quadro 3 apresentam-se os limites inferiores e superiores da percentagem do material passado nos peneiros n.ºs 4 e 10 e no peneiro p”, bem como os das dimensões médias e máximas das partículas constituintes. Complementarmente, a percentagem de finos, após compactação, deverá exceder 30%.

**Quadro 3** – Definição do fuso granulométrico do material dos maciços estabilizadores.

% de finos	% passada no peneiro n.º 10	% passada no peneiro n.º 4	% passada no peneiro p”	$D_{50}$ (mm)	$D_{100}$ (mm)
30	10-50	18-62	33-93	2-50	50-400

## **4 – ESTABELECIMENTO DE FÓRMULAS CORRECTIVAS PARA O CONTROLE DA COMPACTAÇÃO DOS MACIÇOS ESTABILIZADORES DA BARRAGEM DE ODELOUCA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE VIBRAÇÃO**

### **4.1 – Considerações Gerais**

Face a dificuldades detectadas durante a construção dos aterros experimentais da barragem de Odelouca, foi proposto pelo *LNEC* (2003) um programa de ensaios de laboratório, que visava o estabelecimento de fórmulas de correcção dos resultados de compactação obtidos com granulometrias truncadas para dedução dos parâmetros correspondentes às amostras integrais, de acordo com a metodologia proposta por Torrey e Donaghe (1994).

Admitia-se que as expressões deduzidas por estes autores para misturas de cascalho, areia e siltes ou argilas, não seriam directamente aplicáveis, devido ao facto dos maciços serem constituídos por materiais evolutivos, provenientes da alteração de xistos e de grauvaques (Brito, 2005).

Face ao processo de compactação utilizado em obra (por aplicação de cilindro vibrador) e à disponibilidade de equipamentos do *LNEC*, foi prevista a realização de ensaios de compactação por vibração de amostras integrais e a sua comparação com os ensaios de Proctor convencionais.

O *LNEC* dispõe de uma vasta experiência da aplicação de vibração na reconstituição e preparação de provetes para a realização de ensaios de compressão triaxial de materiais de enrocamento, pelo que se procurou adoptar idênticos procedimentos na determinação das curvas de compactação das misturas de solo-enrocamento. Por outro lado, esta metodologia tem sido aplicada no controlo da compactação de materiais de camadas de pavimento, não sendo contudo habitual no controlo de aterros de barragens.

Nos itens que se seguem descrevem-se os ensaios e analisam-se os resultados obtidos.

### **4.2 – Técnicas de Ensaio e Resultados Obtidos**

Após o desmonte e a homogeneização prévia de material para a realização dos aterros experimentais e a partir de diferentes pilhas, foram colhidas diferentes amostras, aqui identificadas pela

designação de *lote*. Os ensaios de vibração foram realizados sobre os materiais dos lotes 1, 4 e 5, cujas curvas granulométricas integrais e truncadas ao peneiro p” se encontram representadas na Figura 5, conjuntamente com os limites do fuso granulométrico admitido no Projecto Base. Da observação desta figura ressalta que os lotes ensaiados exibem granulometrias muito semelhantes.

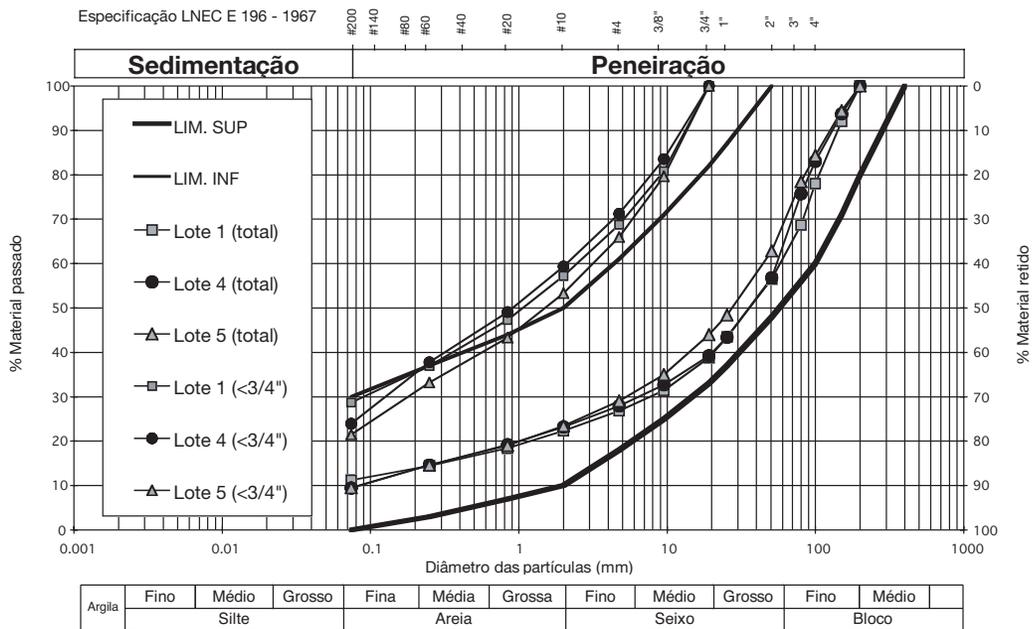


Fig. 5 – Curvas granulométricas integrais e truncadas ao peneiro p” das amostras dos ensaios de vibração.

Para a avaliação das características da fracção grossa, com base numa inspecção visual, foram seleccionados quatro conjuntos de blocos (aqui designados por *A*, *B*, *C* e *D*), e determinados os respectivos valores da massa volúmica, da porosidade e do teor em água máximo (absorção), cujos resultados se apresentam no Quadro 4. Os provetes foram previamente secos a  $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante um período superior a 72 horas. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento *LERO PE-01*, baseado na *NP-EN 1936*.

A análise deste quadro permite concluir que os valores da porosidade e da absorção dos blocos *B* e *D* são muito próximos (com valores médios de massa volúmica aparente, de porosidade e de absorção, respectivamente, iguais a  $2533 \text{ kg/m}^3$ , a 8,2% e a 3,3%). Os blocos *A* apresentam valores médios iguais a  $2472 \text{ kg/m}^3$  para a massa volúmica aparente, a 10,4% para a porosidade e a 4,3% para a absorção. Por fim, os blocos *C* apresentam os valores mais elevados de porosidade (18,3%, em média) e de absorção (8,5%, em média) e o valor mais reduzido de massa volúmica aparente ( $2150 \text{ kg/m}^3$ ).

Os ensaios de vibração foram realizados com base em especificações, devidamente adaptadas, que constam da parte 4 da norma BS1377 de 1990, intitulada “*British Standard Methods of test for Soils for Civil Engineering Purposes: Part 4. Compaction-related test: 1990*”, BS1377 (1990).

A referida norma utiliza o seguinte equipamento:

- molde metálico cilíndrico (molde *CBR*), com um diâmetro interior de  $152 \pm 0,5 \text{ mm}$  e uma altura de  $127 \pm 1,0 \text{ mm}$ ;

- pilão vibrador, com uma frequência de 25 a 45 Hz;
- placa acoplada ao vibrador, com um diâmetro de  $145 \pm 2$  mm e uma massa inferior a 3 kg;
- defletómetro com precisão mínima de 0,5 mm;
- e cronómetro.

Esta norma especifica que os ensaios de vibração são utilizados para solos granulares com menos de 30% de material retido no peneiro P<sup>75</sup>, o qual pode incluir algumas partículas com dimensões superiores a 37,5 mm.

De acordo com a mesma norma, previamente à realização dos ensaios, deve ser investigada a adequação do pilão vibrador, mediante a sua aplicação a uma areia graduada (de Leighton Buzzard), devidamente humedecida (de modo a aumentar o seu teor em água em cerca de 2,5%). O vibrador é considerado adequado quando o peso volúmico seco da areia exceder, após vibração,  $17,07 \text{ kN/m}^3$ .

Os materiais deverão ser colocados no interior do molde em 3 camadas, com cerca de 1/3 da altura do molde. Cada camada deve ser vibrada, durante cerca de  $60 \pm 2$  s, e exercida uma força total, incluindo o peso do pilão, entre 300 e 400 N.

O molde cilíndrico disponível no *LNEC* (Figuras 6 e 7), com um diâmetro interior de 310 mm e uma altura de 300 mm, é seccionado segundo um plano longitudinal, dispõe de nervuras de rigidez, que permitem a ligação das partes constituintes, e é assente numa base metálica, de forma a ser facilmente removível e transportável.

**Quadro 4** – Massas volúmicas, porosidade e teor em água máximo da fracção grossa.

Provete	Massa volúmica real (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Teor em água máximo (%)
A1	2720	2560	2620	5,9	2,3
A2	2790	2480	2590	11,3	4,6
A3	2750	2460	2570	10,5	4,3
A4*	2800	2250	2450	19,7	8,7
A5	2780	2390	2530	13,9	5,8
B1	2760	2540	2620	7,8	3,1
B2	2740	2630	2670	4,1	1,6
B3	2780	2480	2580	10,7	4,3
B4	2770	2560	2630	7,7	3,0
B5	2760	2460	2570	11,0	4,5
C1	2640	2200	2370	16,6	7,5
C2	2630	2190	2360	16,6	7,6
C3	2630	2060	2270	21,6	10,5
D1	2740	2570	2640	6,1	2,4
D2	2770	2490	2590	10,1	4,1

\* Provete com várias fragmentações no decurso das determinações.



**Fig. 6** – Molde e compactador mecânico



**Fig. 7** – Molde cilíndrico

Para a compactação foi usado um pilão (cujas características se apresentam no Quadro 5) acoplado a uma placa de aço, com 300 mm de diâmetro, 20 mm de espessura e 100 N de peso (ver Fig. 6). A frequência do pilão de vibração respeita as condições impostas pela *BS1377*. A folga disponível entre o molde e a placa de aço é de cerca de 10 mm (proporcionalmente inferior à da *BS1377*). A força total exercida, incluindo o peso do pilão e o peso da placa, atinge 2954 N.

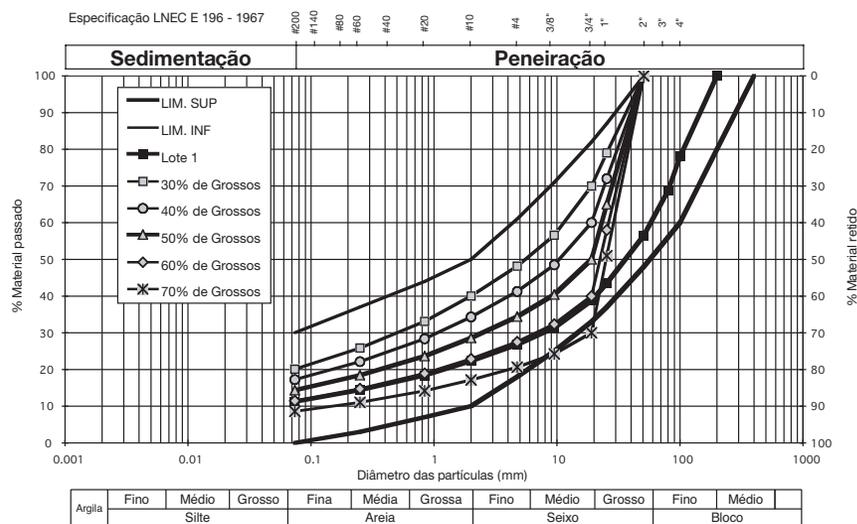
**Quadro 5** – Características do pilão vibrador (Odubanjo, 1968, referido por Veiga Pinto, 1983).

Fabricante	A. B. Vibro Verken, Suécia
Frequência nominal de vibração	43 Hz
Peso estático	354 N
Força dinâmica em operação	2,5 kN
Diâmetro da placa da base	150 mm

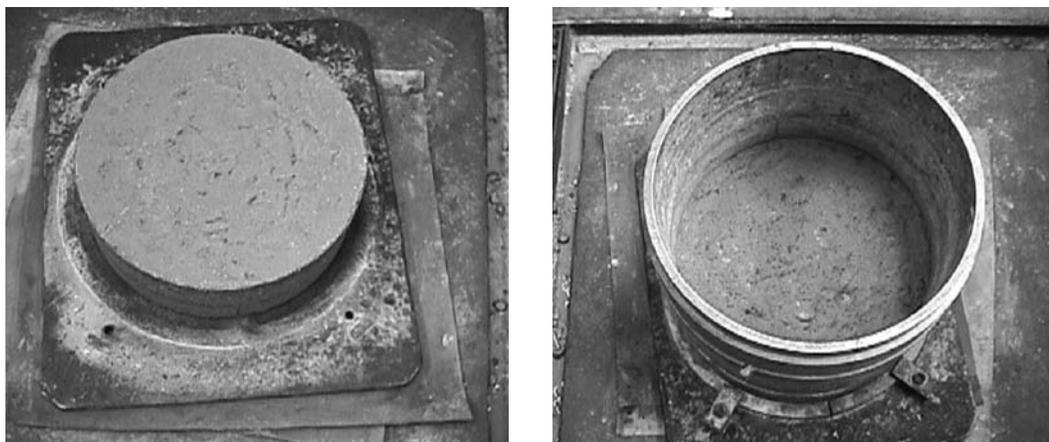
Em face do diâmetro do molde ( $\phi=300$  mm), a dimensão máxima das partículas da mistura foi limitada a 2" ( $\phi \approx 6D_{\max}$ ) e foram realizados ensaios com percentagens variáveis da fracção grossa (material retido no peneiro de  $\mathcal{P}$ ) presente na mistura (Figura 8). Para a determinação de cada ponto da curva de compactação, os materiais foram colocados em 2 camadas, cada uma com cerca de 52 mm de altura (após compactação), sobre uma camada de base previamente compactada, conforme se pode observar na Figura 9.

Estudos anteriores, efectuados por Veiga Pinto (1983), mostraram que se obtém o assentamento máximo por aplicação da carga vibratória com uma duração entre 9 e 12 minutos e que cerca de 90% deste assentamento é atingido com cerca de 6 minutos de actuação da carga.

Não havendo experiência prévia acerca do tempo de vibração a aplicar para os materiais em estudo, optou-se pela medição da variação da altura em função do tempo de vibração, em cada uma



**Fig. 8** – Curvas granulométricas, truncadas ao peneiro 2”, das amostras do lote 1, ensaiadas com percentagens variáveis da fracção grossa (retido no peneiro p”)

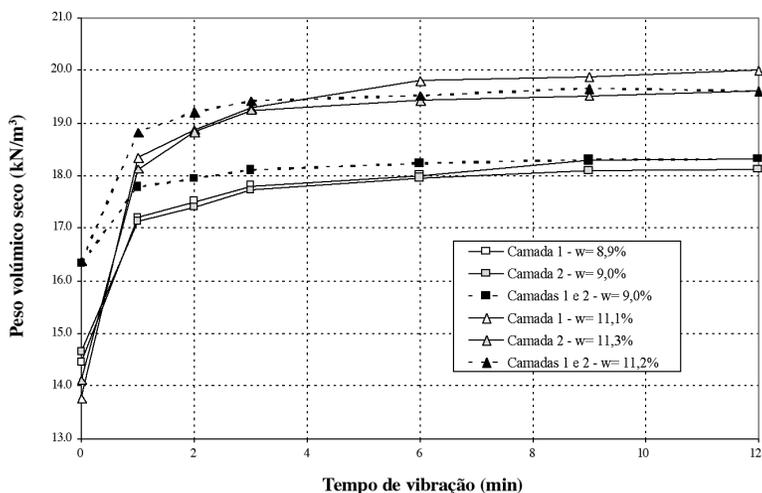


**Fig. 9** – Camada de base do molde.

das camadas e para o conjunto das duas camadas, e, com base nesta, a variação do peso volúmico seco correspondente. Na Figura 10 apresenta-se a evolução do peso volúmico seco com o tempo de vibração, para cada uma das camadas e para o conjunto das duas camadas, para dois valores do teor em água (9,0 e 11,2%), obtida para uma mistura do lote 5 com 30% de grossos. Na interpretação dos resultados admitiu-se que:

- a deformação da camada de base era desprezável, pelo que a variação da altura do solo, com apenas uma camada, era devida apenas à compactação desta camada (interpretação referenciada na legenda da Figura 10 como *camada 1*);
- na compactação da segunda camada, a espessura da camada inferior se manteve inalterada (interpretação referenciada como *camada 2*);

– os deslocamentos registados no topo da 2ª camada foram considerados como afectos a toda a espessura de solo a compactar (interpretação referenciada como *camadas 1 e 2*), hipótese geralmente admitida na interpretação dos ensaios de compactação.



**Fig. 10** – Evolução do peso volúmico seco com o tempo de vibração, para valores do teor em água de cerca 9,0 e 11,2%, nas camadas 1, 2 e conjuntamente 1 e 2, para as amostras do lote 5 com 30% de grossos

A análise da Figura 10 permite verificar que, para um tempo de vibração não inferior a cerca de 6 minutos, os resultados não são, em termos práticos afectados pelo método seleccionado para a sua interpretação, pelo que seguidamente os resultados serão obtidos mediante a consideração conjunta das camadas 1 e 2.

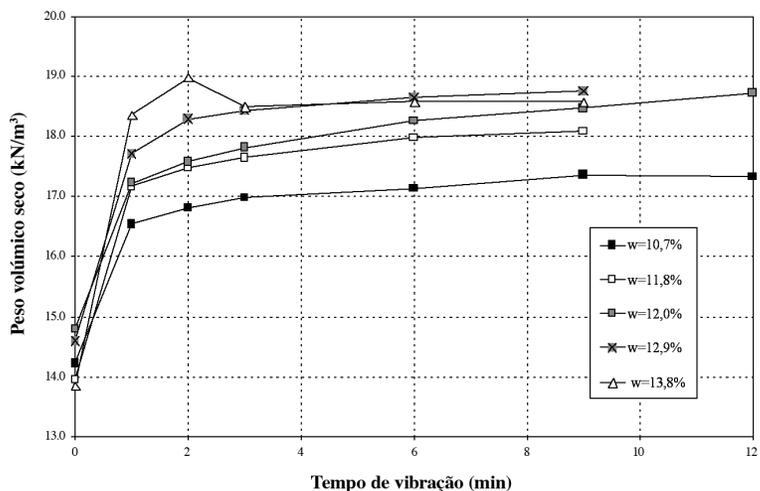
Para validar o recurso aos ensaios de vibração para o estudo da compactação, numa primeira fase, procurou-se comparar os resultados obtidos através deste procedimento com os ensaios de Proctor convencionais. Assim, realizaram-se ensaios de vibração com o material passado no peneiro P<sup>20</sup>, cuja evolução do peso volúmico com o tempo de vibração é apresentada na Figura 11, tendo-se verificado as seguintes ocorrências:

- para valores elevados do teor em água, e para elevados tempos de vibração, ocorria sistematicamente refluimento dos materiais finos (Figura 12), pelo que o ensaio perdia validade, sendo interrompido de imediato;
- para o maior valor do teor em água ensaiado (de 13,8%), após cerca de 2 minutos de vibração, registou-se um empolamento (a altura das camadas aumentou), possivelmente devido à ocorrência de alguma tendência para a segregação do material; consequentemente produziu-se uma diminuição do respectivo peso volúmico seco;
- nos restantes ensaios, independentemente do teor em água de colocação, todos os materiais ensaiados atingiram praticamente o seu peso volúmico seco máximo ao fim de 9 minutos de vibração.

Os resultados obtidos em função do tempo de vibração são, na Figura 13, comparados com a curva de compactação obtida no ensaio de Proctor normal. A análise desta figura permite concluir:

- do lado seco da curva de compactação e para desvios do teor em água superiores a 1%, não é possível atingir, pelo processo de vibração, pesos volúmicos secos comparáveis aos obtidos pelo processo de apiloamento, independentemente do tempo de vibração;

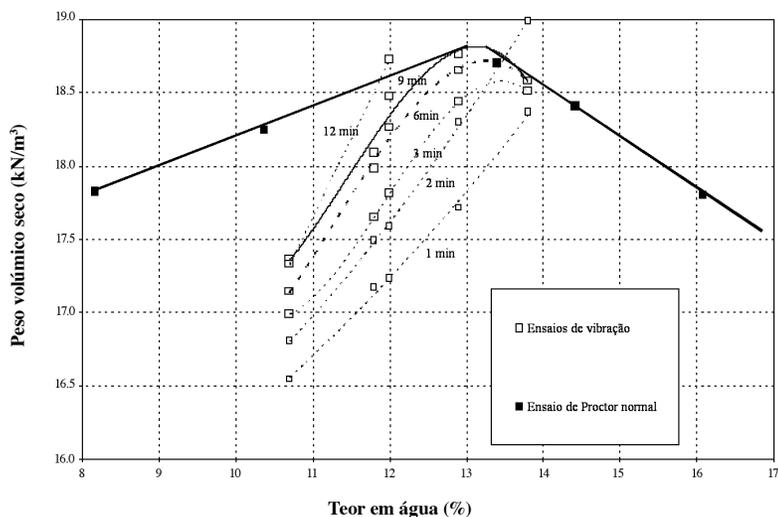
- do lado húmido, para elevados desvios do teor em água, o processo de vibração tem que ser interrompido após algum tempo de vibração, devido à ocorrência de refluxo;
- para pequenos desvios do teor em água do lado húmido, produz-se alguma segregação dos materiais, atingindo-se o peso volúmico seco máximo após apenas cerca de 2 minutos de vibração;
- as curvas de compactação obtidas por vibração são lineares para tempos de vibração inferiores a 3 minutos e têm andamento não linear, apresentando máximos, após 3 minutos de vibração;
- os valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo obtidos por vibração após 9 minutos e por apiloamento são praticamente coincidentes, podendo concluir-se que, neste instante, as energias aplicadas são equivalentes;
- para tempos de vibração inferiores, nomeadamente para 6 minutos, o peso volúmico seco máximo é ligeiramente inferior, mantendo-se, em termos práticos, o valor do teor em água óptimo;
- a curva de compactação obtida por apiloamento apresenta uma forma muito mais achatada do que a obtida, ao fim de 9 minutos, por vibração, pelo que a identificação do ponto óptimo é facilitada através dos procedimentos de vibração.



**Fig. 11** – Evolução do peso volúmico seco com o tempo de vibração para as amostras do lote 5 com 0% de grossos.



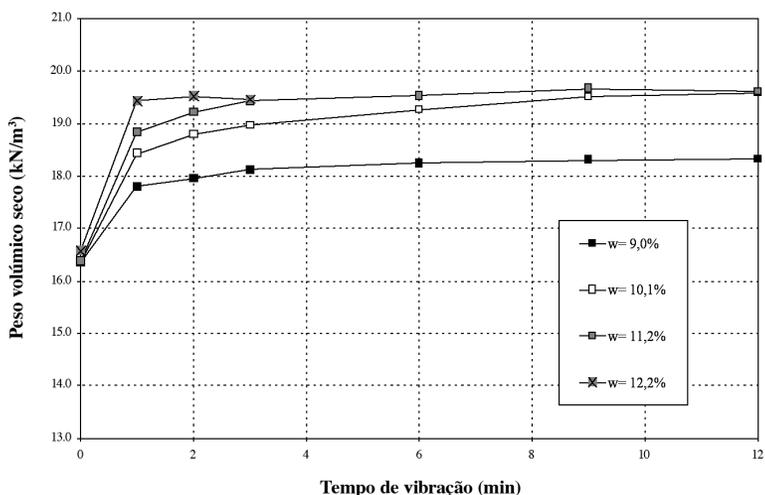
**Fig. 12** – Refluxo dos finos.



**Fig. 13** – Comparação das curvas de compactação obtidas por vibração (em função do tempo de vibração) com a curva de compactação do ensaio Proctor normal.

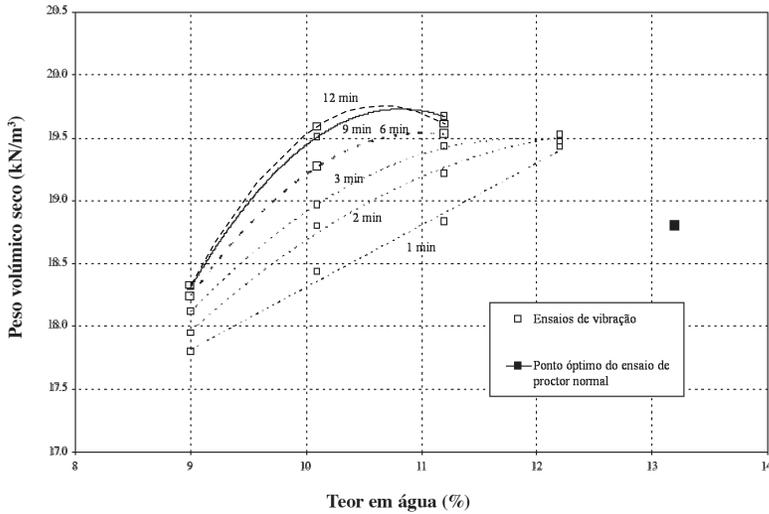
Seguidamente, realizaram-se ensaios de compactação por vibração com diferentes percentagens da fração grossa (entre 30% e 67,7%), utilizando os lotes disponíveis.

Na Figura14 apresenta-se, a título de exemplo, a evolução do peso volúmico seco com o tempo de vibração para uma mistura do lote 5 com 30% de elementos grossos, sendo o comportamento, no essencial, semelhante ao descrito para a fração fina, designadamente no que se refere à ocorrência de refluimento para elevados teores em água e à compactação ser praticamente total após 9 minutos de vibração. No entanto, com o aumento da percentagem de elementos grossos, verifica-se que desaparece a tendência, anteriormente relatada, para o empolamento dos materiais, dado que a segregação dos finos, presentes em menores quantidades, não parece ser suficiente para produzir o aumento do volume da amostra.

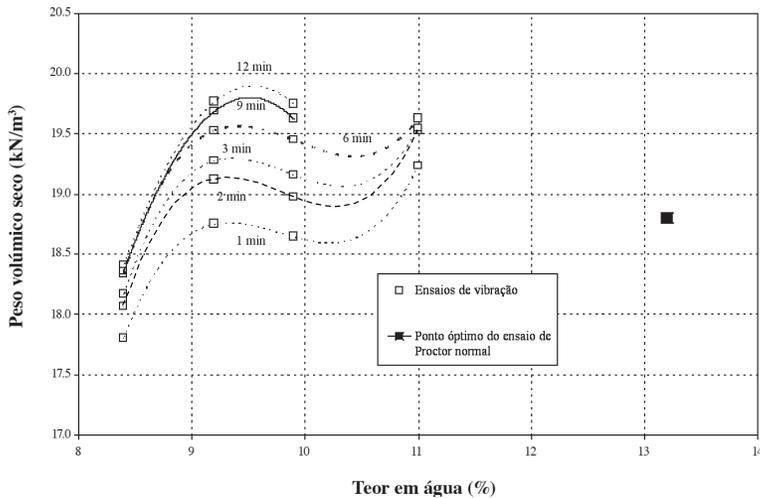


**Fig. 14** – Evolução do peso volúmico seco com o tempo de vibração para as amostras do lote 5 com 30% de grossos.

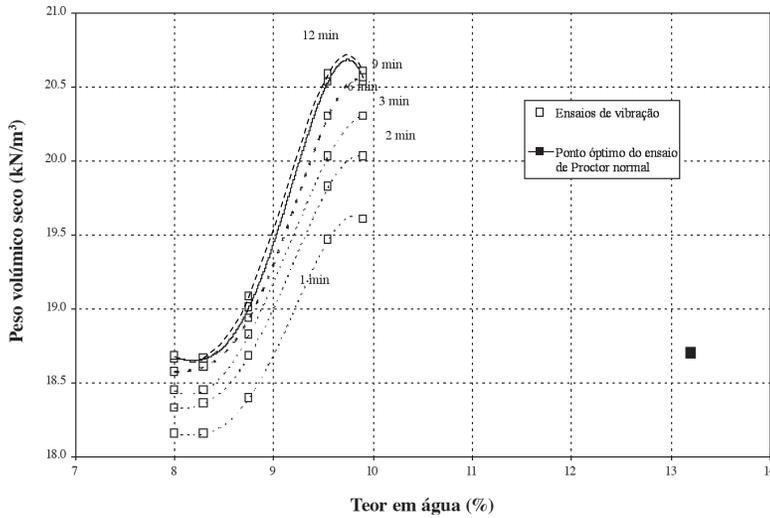
Nas Figuras 15, 16, 17 e 18 representam-se conjuntamente as curvas de compactação para diferentes tempos de vibração obtidas para as amostras do lote 5, respectivamente, com 30%, 40%, 50% e 60% de fração grossa. Nestas figuras inclui-se o ponto óptimo do ensaio de Proctor normal, com coordenadas iguais a  $w_{opt} = 13,2\%$  e  $\gamma_{d\ max} = 18,73\ kN/m^3$ .



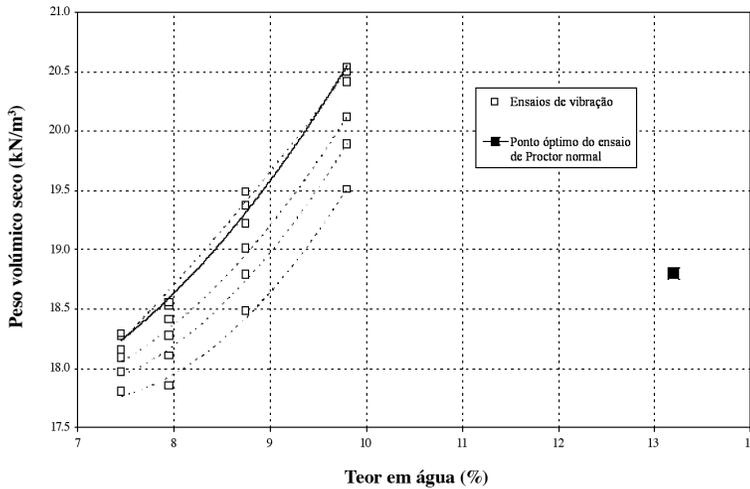
**Fig. 15** – Representação conjunta das curvas de compactação obtidas por vibração (em função do tempo de vibração) com 30% de grossos e do ponto óptimo do ensaio de Proctor normal.



**Fig. 16** – Representação conjunta das curvas de compactação obtidas por vibração (em função do tempo de vibração) com 40% de grossos e do ponto óptimo do ensaio de Proctor normal.



**Fig. 17** – Representação conjunta das curvas de compactação obtidas por vibração (em função do tempo de vibração) com 50% de grossos e do ponto óptimo do ensaio de Proctor normal.



**Fig. 18** – Representação conjunta das curvas de compactação obtidas por vibração (em função do tempo de vibração) com 60% de grossos e do ponto óptimo do ensaio de Proctor normal.

A observação destas figuras permite tecer algumas considerações:

- para 30% de grossos (Figura 15) as curvas de compactação, inicialmente lineares, evoluem para a forma característica dos solos finos, apresentando apenas um valor máximo, aqui considerado o ponto óptimo da mistura;
- para 40% de grossos e para tempos de vibração até 6 minutos (Figura 16), a curva de compactação apresenta uma inversão de curvatura, registando-se numa primeira fase um aumento do peso volúmico seco com o teor em água, depois uma ligeira diminuição, seguida, finalmente, por um novo aumento; para vibrações com duração superior a 6 minutos e para teores

em água elevados verificou-se a ocorrência de refluimento, pelo que o ensaio foi interrompido; o ponto óptimo foi associado ao valor máximo absoluto (com curvatura negativa);

- um andamento semelhante, com variação de curvatura, foi encontrado para as curvas de compactação relativas a misturas com 50% de grossos (Figura 17); contudo, as curvas apresentam valores praticamente constantes para teores em água inferiores a 8,3%, subindo depois e atingindo o valor máximo para valores dos teores em água próximos de 10%; este último foi tomado como ponto óptimo da mistura;
- para 60% de grossos (Figura 18) não foi possível determinar um máximo relativo, uma vez que para teores em água superiores aos ensaiados se verificava sistematicamente, logo a partir das fases iniciais da vibração, a ocorrência de segregação e de refluimento; as curvas de compactação obtidas são, assim, monotonicamente crescentes.

Na Figura 19 apresentam-se algumas fotografias da mistura composta por 60% de grossos para o ponto com 8,8% de teor em água, após a realização da vibração.



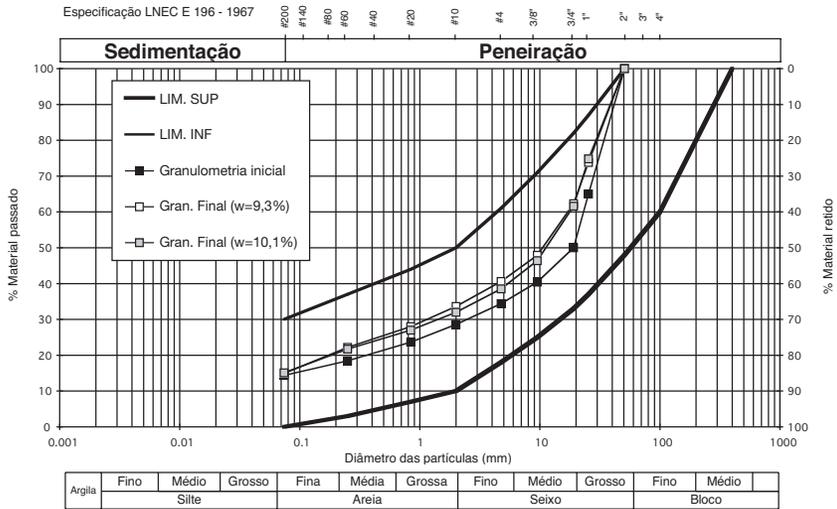
**Fig. 19** – Provete com 60% de grossos e um teor em água de 8,8%.

Uma explicação plausível para a variação do andamento das curvas de compactação em função da percentagem de grossos será a evolução granulométrica da fracção grossa do material, devido ao efeito combinado do teor em água e do processo de compactação.

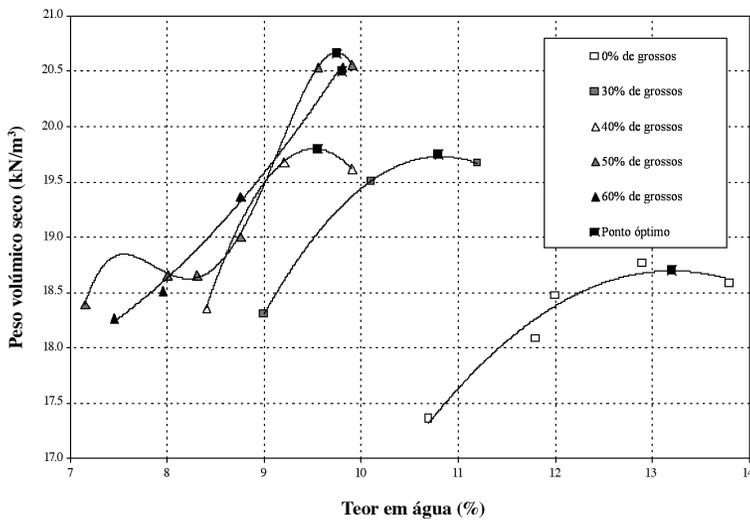
Para o tipo de material ensaiado (proveniente da alteração de xistos e de grauvaques), verifica-se que as partículas grossas apresentam sensibilidade à água, sendo na sua presença mais facilmente fracturáveis, pelo que o material objecto de compactação apresentará características diferenciadas quando ensaiado com pequenas quantidades de água ou com quantidades superiores.

Na Figura 20 apresentam-se as curvas granulométricas da mistura do lote 4 com 50% de grossos, antes da compactação e após compactação, com teores em água de 9,3% e de 10,1%. A sua análise permite verificar que as partículas com dimensões entre 3/4" (19,1 mm) e 2" (50,8 mm), inicialmente presentes numa percentagem de cerca de 50%, após compactação reduziram a sua percentagem para cerca de 38%, tendo-se fraccionado, maioritariamente, em partículas com dimensões compreendidas entre 4,75 mm (peneiro n.º 4) e 19,1 mm (p").

Na Figura 21 representam-se as curvas de compactação obtidas, após 9 minutos de vibração, para os materiais do lote 5, com diferentes percentagens de grossos. Estão também aí assinalados os pontos óptimos considerados na interpretação dos ensaios que se segue. Dado o andamento sempre monotonicamente crescente da curva definida para a percentagem de 60% de grossos, como aproximação, foi adoptado, como ponto óptimo, a determinação com o teor em água mais elevado.



**Fig. 20** – Curvas granulométricas da mistura do lote 4 com 50 % de grossos antes e após compactação com teores em água de 9,3 e 10,1%.



**Fig. 21** – Representação conjunta das curvas de compactação do lote 5, após 9 minutos de vibração, e dos respectivos pontos óptimos.

Nas Figuras 22 e 23 representam-se as curvas de compactação obtidas, após 9 minutos de vibração, para os materiais dos restantes lotes (lotes 1 e 4) e para diversas percentagens de grossos, sendo igualmente especificados os pontos óptimos assumidos.

### 4.3 – Análise dos Resultados

Na análise dos resultados dos ensaios de vibração foi adoptada a abordagem proposta por Torrey e Donaghe (1994), tendo sido avaliados os valores do coeficiente de interferência do peso volumétrico seco,  $I_C$  – com base na determinação prévia do grau de compactação da fracção fina,  $F_F$

(por aplicação da equação (7)), e na aplicação da equação (4) – e no factor correctivo do teor em água óptimo,  $F_{opt}$ , calculado por recurso à equação (5).

No Quadro 6 apresentam-se os resultados obtidos, em termos de peso volúmico seco máximo ( $\gamma_{d\max}^T$ ) e de teor em água óptimo ( $w_{opt}^T$ ) do material integral. Para cada lote, são também aí transcritos os valores de referência dos ensaios de Proctor normal ( $\gamma_{d\max}^F$  e  $w_{opt}^F$ ) e os valores calculados de  $F_F$  de  $I_C$  e de  $F_{opt}$ , admitindo para a densidade das partículas da fracção retida no peneiro n.º 4 o valor médio da densidade dos blocos ensaiados (ver Quadro 4,  $G_M = 2,43$ ).

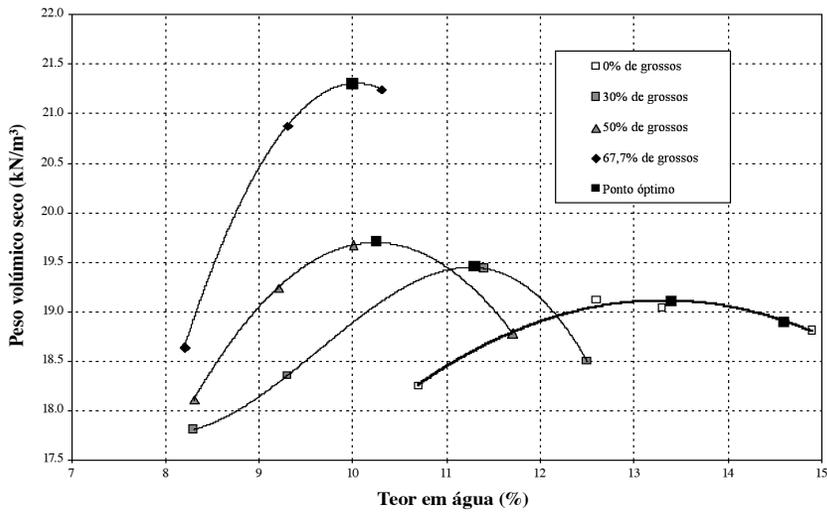


Fig. 22 – Representação conjunta das curvas de compactação do lote 1, após 9 minutos de vibração, e dos respectivos pontos óptimos.

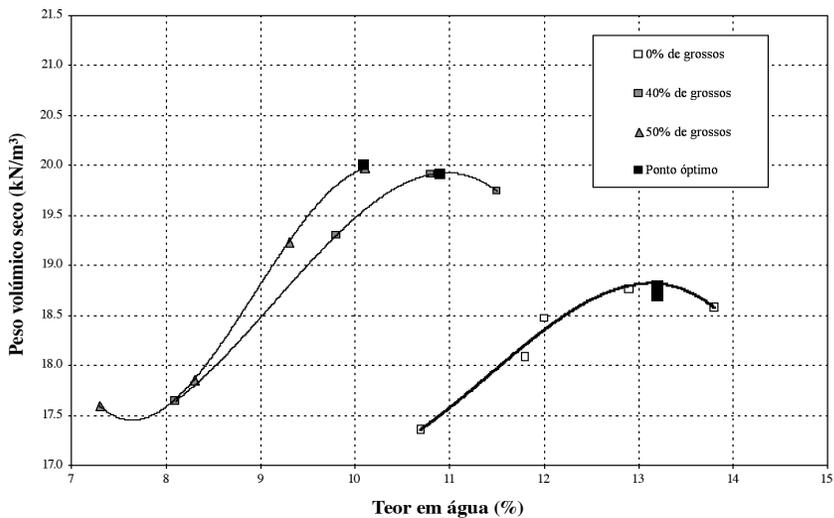


Fig. 23 – Representação conjunta das curvas de compactação do lote 4, obtidas após 9 minutos de vibração, e dos respectivos pontos óptimos.

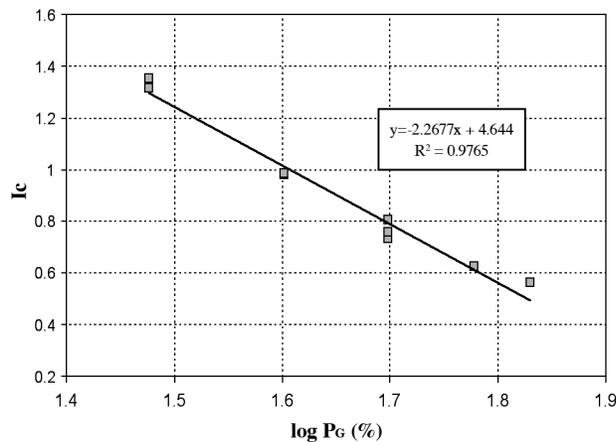
A análise deste quadro permite confirmar que, nas misturas de solo-enrocamento, no ponto óptimo, os finos apresentam um grau de compactação inferior a 100%, tendendo, como seria de esperar, a ser tanto menor quanto maior for a fracção grossa presente. Nos ensaios realizados, o grau de compactação dos finos oscilou entre 89% (no lote 1, com 50% de grossos) e 98% (no lote 5, com 30% de grossos).

**Quadro 6** – Determinação de  $F_F$ , de  $I_C$  e de  $F_{opt}$

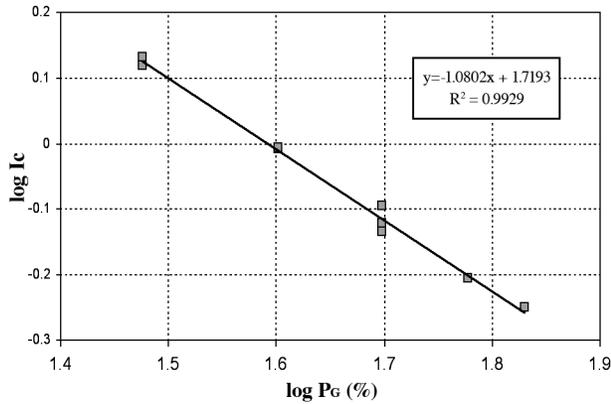
Lote	Ensaio de Proctor de referência	$P_G$ (%)	$w_{opt}^T$ (%)	$\gamma_{d\max}^T$ (kN/m <sup>3</sup> )	$F_F$	$I_C$	$F_{opt}$
1	$\gamma_{d\max}^T = 18,9 \text{ kN} / \text{m}^3$ $w_{opt}^F = 14,6\%$	30	11,3	19,4	0,955	1,310	4,307
		50	10,2	19,7	0,889	0,732	2,849
		67,7	10,0	21,3	0,922	0,561	2,157
4	$\gamma_{d\max}^F = 18,8 \text{ kN} / \text{m}^3$ $w_{opt}^F = 13,5\%$	40	10,8	19,9	0,954	0,982	3,125
		50	10,1	20,0	0,916	0,754	2,673
5	$\gamma_{d\max}^F = 18,7 \text{ kN} / \text{m}^3$ $w_{opt}^F = 13,5\%$	30	10,8	19,8	0,984	1,350	4,120
		40	9,6	19,8	0,951	0,979	3,495
		50	9,7	20,7	0,974	0,802	2,738
		60	9,8	20,5	0,906	0,621	2,270

A partir dos valores calculados, procedeu-se à representação gráfica dos valores de  $I_C$  (Figura 24) e do seu logaritmo (Figura 25) em função do logaritmo da percentagem dos grossos. Como se pode verificar, a correlação relativamente aos dados dos ensaios é superior quando se adopta uma relação bilogarítmica, pelo que é adoptada a seguinte relação entre as variáveis:

$$\log I_C = 1,7193 - 1,0802 \log P_G (\%) \quad (R^2 = 0,9929) \quad (13)$$



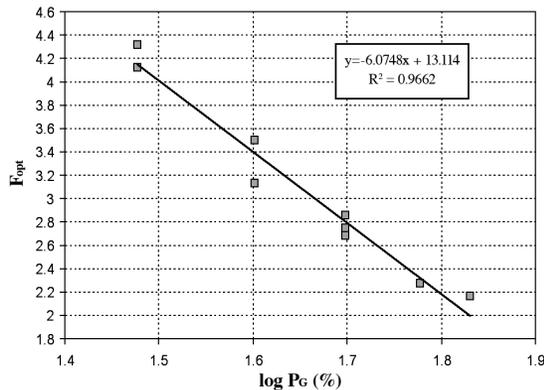
**Fig. 24** – Correlação semi-logarítmica entre  $I_C$  e  $P_G$



**Fig. 25** – Correlação bilogarítmica entre  $I_C$  e  $P_G$

Procedendo do mesmo modo relativamente a  $F_{opt}$  (Figura 26 e Figura 27), verifica-se que a correlação para a expressão bilogarítmica é superior, não atingindo, no entanto, o valor do coeficiente  $R^2$  encontrado para  $I_C$ . A equação de cálculo interpolada é a seguinte:

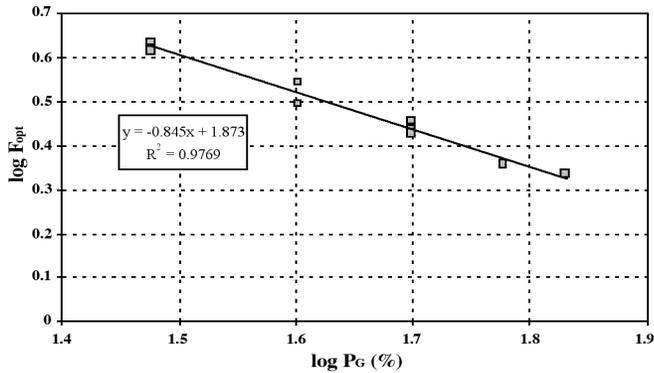
$$\log F_{opt} = 1,873 - 0,845 \log P_G (\%) \quad (R^2 = 0,9769) \quad (14)$$



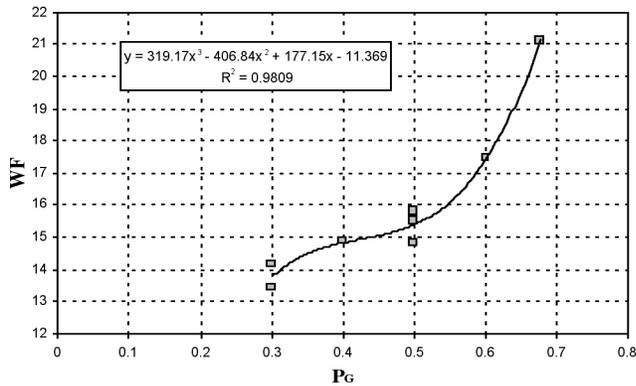
**Fig. 26** – Correlação semi-logarítmica entre  $F_{opt}$  e  $P_G$

No decurso da realização dos ensaios foram efectuadas algumas determinações dos teores em água de cada uma das fracções presentes, as quais evidenciaram uma muito pequena oscilação do teor em água da fracção grossa relativamente ao seu valor médio (igual a cerca de 4,7%). Esta variação mostrou-se praticamente independente do teor em água do material integral.

Para tentar melhorar a correlação entre os resultados experimentais e a expressão de interpolação, considerou-se pertinente testar uma nova metodologia, a qual admite que o teor em água da fracção grossa se mantém constante e, com base no teor em água óptimo da amostra integral, avalia o teor em água dos finos por aplicação da equação (3). Na Figura 28 representam-se os resultados obtidos, bem como a respectiva curva de interpolação, a qual melhora um pouco o valor do coeficiente  $R^2$ .



**Fig. 27** – Correlação bilogarítmica entre  $F_{opt}$  e  $P_G$



**Fig. 28** – Correlação entre o  $w_F$  e  $P_G$

Foi determinada a seguinte expressão:

$$w_F = 319,17 P_G^3 - 406,84 P_G^2 + 177,15 P_G - 11,369 \quad (R^2 = 0,9809) \quad (15)$$

Nas Figuras 29 e 30 comparam-se as fórmulas de Torrey e Danaghe (1994) com as relações deduzidas a partir dos ensaios de vibração realizados. Na Figura 29 comparam-se, em coordenadas bilogarítmicas, a expressão (8), válida para percentagens de grossos inferiores a 50%, com a expressão (13) agora deduzida. A Figura 30 apresenta, em coordenadas semi-logarítmicas, a comparação das expressões (8) e (9), aplicáveis para percentagens de grossos até 70%, com a expressão (13). Verifica-se que a diferença das expressões é tanto maior quanto menor for a percentagem de grossos e que os valores obtidos são superiores aos calculados pela expressão dos referidos autores.

Como anteriormente se referiu, os ensaios de vibração foram realizados com percentagens de grossos compreendidas entre 30 e 67,6%. No sentido de validar as suas condições de aplicação, representam-se nas Figuras 31 e 32, respectivamente, os valores do grau de compactação da fracção fina,  $F_f$  (calculados por aplicação da equação (4) e admitindo  $G_M = 2,43$ ) e do peso volúmico seco máximo do material integral,  $\gamma_{d\max}^F$ , em função da percentagem de grossos.

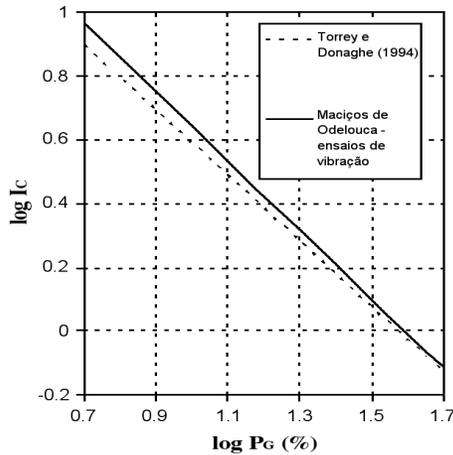


Fig. 29 – Representação conjunta das expressões (8) e (13).

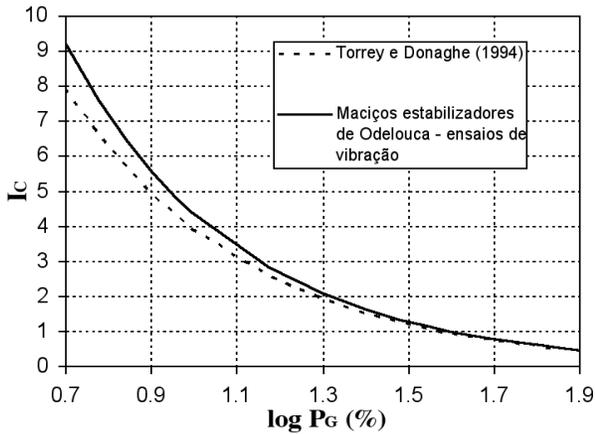


Fig. 30 – Representação conjunta das expressões (8), (9) e (13).

A sua análise permite apurar que a expressão (13) apresenta valores do grau de compactação superiores a 100% para percentagens de grossos inferiores a 20%, o que não parece ter qualquer contrapartida real. Para estas percentagens de fracção grossa, verifica-se que o peso volúmico seco máximo do material integral é praticamente igual ao peso volúmico seco máximo da fracção fina. No restante domínio a curva obtida tem um andamento muito regular e sempre excedendo os valores deduzidos com base nas expressões (8) e (9).

Em termos de peso volúmico seco máximo da amostra integral (Figura 32), recorrendo às expressões (8) e (9), para percentagens de grossos inferiores a 30% obtêm-se pesos volúmicos secos máximos da amostra integral inferiores ao relativo ao ensaio de Proctor normal, o que não é confirmado experimentalmente. Os valores obtidos com a expressão (13), agora deduzida, são sempre superiores ao peso volúmico máximo seco da fracção fina, obtido no ensaio de Proctor normal. A curva é decrescente, até percentagens de 20% de elementos grossos, e crescente, no restante domínio. Estes resultados são o reflexo do efeito conjunto do adensamento da fracção fina, expresso por  $F_F$ , e da presença, no interior da matriz fina, de partículas grosseiras de densidade superior.

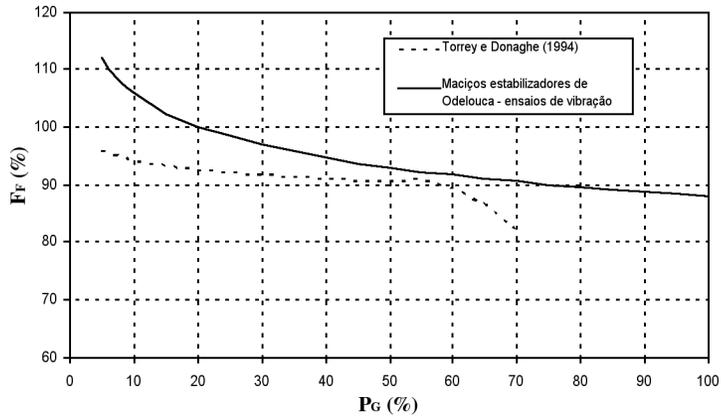


Fig. 31 – Grau de compactação da fracção fina em função da percentagem de grossos.

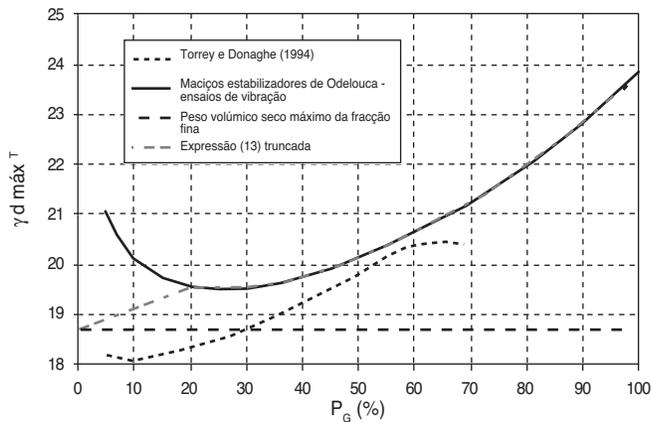


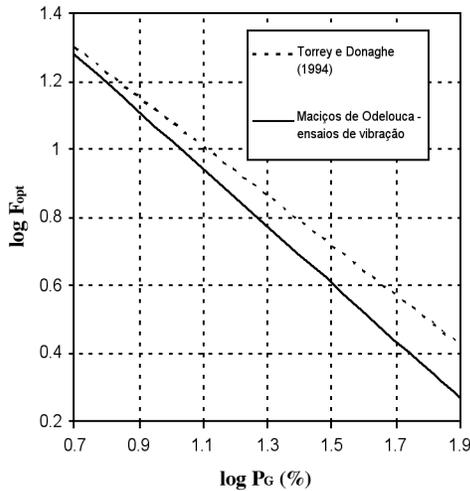
Fig. 32 – Peso volúmico seco máximo do material integral em função da percentagem de grossos.

De forma a ter em conta as objecções anteriores e conferir consistência às correcções apresentadas, sugere-se que a aplicação da expressão (13) seja limitada a percentagens de grossos superiores a 20%. Para percentagens inferiores propõe-se a adopção de um valor de  $F_F$  constante e igual a 100% (ver recta a traço ponto na Figura 32).

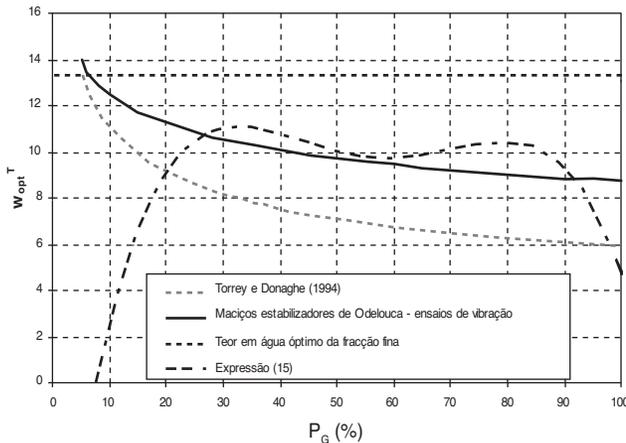
Na Figura 33 comparam-se, em coordenadas bilogarítmicas, a fórmula (10) de Torrey e Donaghe (1994) com a relação (14) deduzida a partir dos ensaios de vibração realizados. A diferença das expressões é tanto maior quanto maior a percentagem de grossos. Os valores agora obtidos para  $F_{opt}$  são inferiores aos calculados pela expressão dos citados autores.

Complementarmente, a partir de  $F_{opt}$  – dado pelas expressões (10) e (14) – e por aplicação da equação (5) (com  $w_{opt}^T$  igual a 13,35%), e de  $w_F$  – dado pela expressão (15) – e por aplicação da equação (3) (com  $w_C$  igual a 4,7%), foram calculados os valores do teor em água óptimo da amostra integral,  $w_{opt}^T$ , em função da percentagem de grossos, que se representam na Figura 34.

Os resultados calculados a partir das equações (10) e (14) mostram que o teor em água óptimo da amostra integral é sempre monotonicamente decrescente com a percentagem de grossos, sendo



**Fig. 33** – Representação conjunta das expressões (10) e (14).



**Fig. 34** – Teor em água óptimo do material integral em função da percentagem de grossos.

os valores obtidos para os maciços de Odelouca (expressão (14)) sempre superiores aos deduzidos por Torrey e Donaghe (equação (10)). Ambas as expressões apresentam valores excessivos e superiores ao teor em água óptimo do ensaio de Proctor normal para percentagens de grossos reduzidas. Por outro lado, para elevadas percentagens de grossos, tendem assintoticamente para teores em água (de 5,9% a expressão (10) e de 8,8% a expressão (14)) bem superiores aos obtidos para a fracção grossa (cerca de 4,7% em média). Assim, sugere-se que o campo de aplicação destas expressões seja limitado inferiormente a 10% de grossos e superiormente a percentagens de 70%.

A expressão alternativa (15) apresenta um andamento muito diferente das restantes, especialmente para percentagens de grossos extremas (muito reduzidas ou muito elevadas). Salienta-se que a sua dedução baseou-se em ensaios sobre misturas com percentagens de grossos compreendidas entre 30 e 66,7% (limite inferior do fuso granulométrico dos maciços de Odelouca). Comparando-a com as anteriores, verifica-se que terá algum significado a partir dos 25% até cerca de 65% de grossos, não parecendo credível o seu andamento para percentagens superiores, onde a curva evolui, primeiramente, de um modo ascendente, descendendo rapidamente até ao teor em água dos grossos.

Da análise efectuada recomenda-se para o controlo da compactação dos maciços estabilizadores de Odelouca, a utilização da expressão (14) a partir de percentagens de grossos de cerca de 10%, ou, em alternativa, a expressão (15), com correlação superior, desde que as percentagens de grossos estejam compreendidas entre 25 e 65%.

#### 4 – CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados obtidos com ensaios de vibração realizados em misturas de solo-enrocamento, provenientes da alteração de xistos e grauvaques, constituintes dos maciços estabilizadores da barragem de Odelouca, para os quais não existiam equações de correcção do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo.

Os resultados dos ensaios de vibração permitiram evidenciar os seguintes aspectos:

- todos os materiais ensaiados atingiram praticamente o seu peso volúmico seco máximo ao fim de 9 minutos de vibração, independentemente do teor em água de colocação;
- do lado seco da curva de compactação e para desvios do teor em água superiores a 1%, não é possível atingir, pelo processo de vibração, pesos volúmicos secos comparáveis aos obtidos pelo processo de apiloamento, independentemente do tempo de vibração;
- do lado húmido, para elevados desvios do teor em água, o processo de vibração tem que ser interrompido após algum tempo, devido à ocorrência de refluxo;
- em ensaios efectuados apenas sobre a fracção fina (0% de grossos), os valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo obtidos por vibração após 9 minutos e por apiloamento são praticamente coincidentes, podendo concluir-se que as energias aplicadas são equivalentes;
- a curva de compactação obtida por apiloamento apresenta uma forma muito mais achatada do que a de vibração, pelo que a identificação do ponto óptimo é facilitada através dos procedimentos de vibração.
- para pequenas percentagens de grossos, as curvas de compactação, inicialmente lineares, evoluem para a forma característica dos solos finos, apresentando apenas um valor máximo;
- para percentagens de grossos mais elevadas, as curvas de compactação apresentam uma inversão de curvatura, registando-se numa primeira fase um aumento do peso volúmico seco com o teor em água, depois um ligeira diminuição seguida, finalmente, por um novo aumento; tal poderá ser induzido pela evolução granulométrica da fracção grossa do material, devido ao efeito combinado do teor em água e do processo de compactação.

A análise dos resultados obtidos com o material integral e em ensaios de compactação Proctor com o material truncado, permitiu deduzir expressões bi-logarítmicas para a correcção dos valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água óptimo para os materiais dos aterros, baseadas numa metodologia desenvolvida por Donaghe e Torrey (1994). Para a correcção do teor em água óptimo foi ainda aplicada uma nova metodologia que caracteriza esta grandeza com base no teor em água da fracção fina.

A comparação das expressões obtidas com as encontradas por Torrey e Donaghe (1994) mostrou a consistência das primeiras relativamente aos materiais em estudo e permitiu aferir os respectivos campos de validade.

## 5 – AGRADECIMENTOS

As autoras gostariam de agradecer a contribuição do dono de obra, o Instituto da Água (INAG), para o presente trabalho, designadamente, a disponibilidade dos materiais para a realização dos ensaios. Também gostariam de expressar o agradecimento aos técnicos do LNEC, em particular ao Sr. Timóteo Silva, pelo desenvolvimento do trabalho experimental.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHTO T224. Correction for Coarse Particle in the soil compaction test. Association of State Highway and Transportation Officials, 1982.

ASTM – D698-00a. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*. American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 2000.

ASTM – D4718-87. *Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles*. American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 2001.

Brito, A. *Compactação de Aterros de Barragens. Novas Metodologias de Controlo*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.

BS 1377: Part 4. *Soils for Civil Engineering Purposes. Compaction-Related Tests*. BSI 1990.

COBA, *Barragem de Odelouca a Montante da Ribeira de Monchique*. Projecto Base. 2000.

Donaghe, R. T.; Townsend, F.C. *Compaction Characteristics of Earth-Rock Mixtures, Report 2, Blended Material*. Miscellaneous Paper S-73-25, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1975.

Garga, V. K. and Madureira, C.J. *Compaction Characteristics of River Terrace Gravel*. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. Vol.111, No. 8, ASCE, New York, pp. 987-1007, 1985.

Gorden, B. B.; Hammond, W.D. and Miller, R.K. *Effect of Rock Content on Compaction of Characteristics of Clayey Gravel*. Compaction of Soils. ASTM STP 377. ASTM, Philadelphia, pp.31-46, 1964.

Houston, S. L.; Walsh, K. D. *Comparison of Rock Correction Methods For Compaction of Clayey Soils*. Journal of Geot. Eng., Vol.119, N°4, 763-778, April, 1993.

JAE. *Normas da Junta Autónoma de Estradas*. Lisboa, 1998.

JAE/LNEC. *Controlo de Construção e Caracterização Físico-Mecânica de Aterros de Mistura de Solo-Enrocamento*. Proc. 056/1/11505 . Fevereiro de 1994.

LNEC, *Aterros com Misturas de Solos e Enrocamentos. O Caso Particular dos Xistos Alterados Existentes em Portugal*, Setembro de 1987.

LNEC, *Barragem de Odelouca. Metodologia para a Execução e Controlo dos Aterros Experimentais do Material 3*, Relatório 75/2003, NBOA, Proc. 502/1/15343, LNEC, Lisboa, 2003.

Maranha das Neves, E.; Veiga Pinto, A. *Compaction Control and Random Fill Materials*. 8<sup>th</sup> Europ. Conf. on SMFE, Helsínquia, vol. 1, pp. 55-58, 1983.

- Normas de Projecto de Barragens. Portaria n°846/93, DR 213/93, série I-B de 1993-09-10. Portugal. 1993.
- NP – EN 1936 – *Métodos de Ensaios para Pedra Natural. Determinação das Massas Volúmicas Real e Aparente e das Porosidades Total e Aberta*, 1936.
- Odubanjo, Y. *A Study of Laboratory Compaction Test Using a Swedish Vibratory Apparatus*. Road Research Lab. Report LR 129. London, pp. 1-19, 1968.
- 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, Vol.17, No. 3, September 1994, pp. 371-386, 1994.
- Trenter, N. A. *Earthworks: a guide*. Thomas Telford Publishing, 2001.
- U.S. Bureau of Reclamation. *Research on Compaction Control Testing for Gravelly Soils*. Soils Engineering Report, No. EM-662, Office of Chief Engineer, Denver, Co, 1963.
- USBR 5515-89. *Procedure for Performing Laboratory Compaction of Soils Containing Gravel*. U.S. Dept. of the Interior. Bureau of Reclamation. Denver. Colo, 1989.
- USCOLD, *Construction Testing of Embankment Materials Containing Large Particles*. U.S: Committee on Large Dams., April 1988.
- Veiga Pinto, A. *Previsão do Comportamento Estrutural de Barragens de Enrocamento*. LNEC, Lisboa, 1983.
- Winter, M.G.; Suhardi, *The Effect of Stone Content on the Determination of Acceptability for Earthworking*. Proc. Conf. Engineered Fills. University of Newcastle upon Tyne. 312-319. 1993.