

CONTROLO DE COMPACTAÇÃO DE ATERROS DE BARRAGENS CONSTITUÍDAS POR MATERIAIS NATURAIS TOT*

Compaction control of random fill dam materials

por

E. MARANHA DAS NEVES**

e

A. VEIGA PINTO***

RESUMO – Presentemente o controlo de compactação é, na generalidade, uma técnica não controversa. No entanto com alguns materiais naturais TOT (mistura de enrocamentos com areias e argilas) é não só difícil especificar como medir quando se trata do controlo.

Neste trabalho apresenta-se uma proposta susceptível de contornar tais dificuldades a qual se baseia numa relação entre o peso volúmico, o teor em água, a percentagem de grossos e a deformabilidade. Recorre-se a ensaios do tipo edométrico de grandes dimensões e exemplifica-se com a aplicação ao controlo de construção do maciço estabilizador duma barragem.

SYNOPSIS – The embankment construction control is nowadays a well established technique. Nevertheless, with some random natural materials (mixture of rockfill type elements with sand and clay) it is difficult to make specifications and measurements for control purposes.

Proposals for the solution of this problem are presented in this paper, which are based on a relationship between the unit weight, the water content, the coarse fraction and the deformability. Large one-dimensional compression tests are used and the method is exemplified with an instance of application to the downstream shell of an embankment dam.

1 – INTRODUÇÃO

O controlo da construção dos aterros das barragens é um factor fundamental para se cumprirem as especificações do projecto. É desejável que essas especificações derivem duma análise estrutural, pelo que é fundamental que o controlo incida sobre aquelas propriedades (parâmetros) que mais condicionam o comportamento estrutural pretendido.

* Trabalho baseado numa comunicação apresentada na 8.ª Conferência Europeia de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Helsínquia, 1983.

** Investigador Coordenador do LNEC. Professor Auxiliar Convidado da UNL.

*** Investigador Auxiliar do LNEC. Mestre em Mecânica dos Solos (UNL).

Como é sabido o controlo dos solos argilosos sem elementos grossos está de há muito perfeitamente estabelecido*.

Quanto aos solos coerentes provenientes de manchas de empréstimo, de granulometria extensa, com abundância de elementos grossos (retidos no peneiro n.º 4) que podem atingir dimensões da ordem dos 20 cm, trata-se de um tipo de material hoje em dia de uso corrente em Portugal, facto que se fica a dever à larga utilização dos xistos alterados na construção de barragens de terra. Através da caracterização geotécnica dos xistos alterados, antes e após compactação, e da observação das barragens construídas com esses solos, desempenhou o LNEC um papel decisivo na radicação do seu emprego generalizado bem como das inerentes técnicas construtivas.

No que diz respeito aos materiais rochosos de grandes dimensões e com elevado grau de uniformidade, provenientes de pedreiras quase sempre com um certo processamento (enrocamento segundo a definição tradicional) o controlo da compactação, se bem que trabalhoso, também não levanta problemas.

No entanto aterros de barragens com outras características granulométricas podem levantar problemas relativamente à forma mais adequada de os controlar. É o caso dos materiais de granulometria variável, mas em que dominam os elementos grossos (da ordem da dezena de centímetros), provenientes ou não de pedreiras, geralmente com granulometria integral. Aplicam-se-lhe frequentemente as designações «tout-venant» e «random». Na bibliografia portuguesa designa-se por TOT (todos os tamanhos).

Praticamente não existe experiência com estes materiais sendo pois de interesse o seu estudo, bem como das respectivas aplicações e técnicas construtivas pois se prevê um largo campo de aplicação, tanto no domínio das barragens de aterro de enrocamento como nos aterros viários. No presente artigo foca-se, em particular, o controlo da compactação (ou da construção) dos aterros de barragens com materiais desta natureza.

2 – POSIÇÃO DO PROBLEMA NO QUE DIZ RESPEITO AOS MATERIAIS TOT.

Acontece que o controlo através da compactação relativa e da diferença entre o teor em água óptimo e o teor em água de compactação em aterros constituídos por uma mistura de materiais extremamente grosseiros (cascalho, blocos de enrocamento) e materiais finos, predominantemente argilosos, põe sempre problemas de difícil resolução. Ora é precisamente este o tipo de material referido em último lugar na introdução.

* O mesmo não se pode dizer dos aterros arenosos face às conhecidas dificuldades com a precisão na determinação do peso volumétrico aparente «in situ». Por esse motivo o LNEC tem vindo a experimentar algumas técnicas indirectas muito recentes tais como o Comprimeter (Eggestad, 1974) e um pequeno penetrómetro dinâmico (PCA) especialmente projectado e construído para esse fim. Estes dispositivos em conjunto com os procedimentos clássicos, têm sido utilizados no controlo de compactação de grandes volumes de aterro arenosos (hidráulicos e compactados tradicionalmente) dos diques de protecção contra as cheias na região do Baixo Mondego.

Na verdade a ocorrência de percentagens de material grosseiro muito elevadas implica a utilização de moldes de compactação com volumes apreciáveis quando se pretende efectuar ensaios do tipo Proctor. Deste modo é necessário empregar elevadas energias de compactação o que, na prática, se torna extremamente difícil de executar, principalmente em termos de operações muito repetidas como é o caso das de um controlo.

A situação em termos relativos pode descrever-se melhor se se tiver presente a Fig. 1.

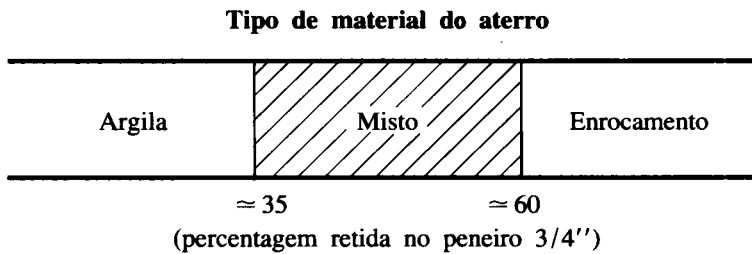


Fig. 1 – *Esquemática do ponto de vista granulométrico tendo em vista o controlo construtivo dos aterros das barragens.*

Os materiais particulados com cerca de 35% de retidos no peneiro 3/4'' cabem nos tipos designados por argilosos e arenosos e já descritos em que, com as ressalvas apontadas para os arenosos, se usam os procedimentos habituais no controlo. Quando os retidos ultrapassam cerca dos 60% trata-se então de enrocamentos. Neste caso os métodos de controlo acompanharam o desenvolvimento relativamente recente na técnica da construção deste tipo de aterros (granulometria caracterizada por maiores coeficientes de uniformidade, menores diâmetros máximos, e compactação por camadas recorrendo a potentes cilindros vibradores) consistindo na realização de determinações periódicas do peso volúmico aparente seco recorrendo à técnica do anel de aço e do plástico à qual interessa volumes apreciáveis de material (Maranha das Neves, 1980). De qualquer forma e muito embora de uso relativamente recente, tal procedimento não põe já qualquer dificuldade especial*

* O aspecto mais importante é o critério para a fixação do peso volúmico aparente seco adequado. Os estudos sobre barragens de enrocamento que se inserem neste programa de investigação permitiram desenvolver no LNEC uma metodologia susceptível de atingir aquele objectivo em cada caso específico (Veiga Pinto, 1983). Os ensaios laboratoriais com enrocamentos desempenham um papel importante nessa metodologia.

Contudo para as misturas de solos tais como as apresentadas por exemplo na Fig. 2, sucede que o controlo normal levanta dificuldades devidas ao facto de não ser representativo e a medição do índice de vazios da fracção grosseira, ao contrário do que sucede com os enrocamentos, ser insuficiente, já que não «domina» o comportamento mecânico global do material. Assim, para um dado índice de vazios da fracção grossa, há que determinar qual o mais adequado teor em água da fracção mais fina.

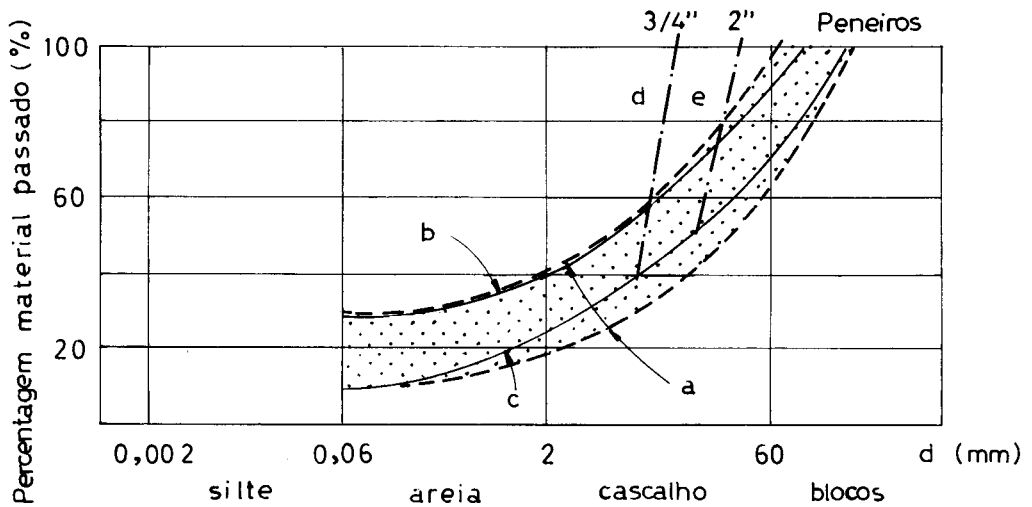


Fig. 2 – Xistos dos aterros da zona de jusante da barragem da Meimoa. Granulometrias dos materiais «in situ» e para ensaio laboratorial.

- a) fuso granulométrico dos materiais «in situ»
- b) curva granulométrica A
- c) curva granulométrica B
- d) material usado no ensaio de compactação
- e) material usado no ensaio de compressão I-D.

Como já se referiu que no controlo habitual se fazem determinações directas de certos parâmetros com a finalidade de conhecer indirectamente as características mecânicas (resistência ao corte e deformabilidade) e de permeabilidade dos aterros. Sucede que com solos coesivos finos com considerável percentagem de grossos se recomenda valores menores que os normalmente prescritos para a compactação relativa dos finos (USBR, 1974).

Se o aterro de mistura de materiais se destinar às zonas de estabilização da barragem o problema em causa é fundamentalmente o do seu comportamento mecânico.

No que diz respeito à resistência ao corte, verifica-se que a ocorrência de certas condições no que diz respeito ao tráfego dos pesados equipamentos de compactação desempenharão eficientemente o papel dum ensaio com vista à determinação de valores adequados dessa resistência por parte dos aterros compactados (Mello, 1982).

Pensa-se pois que com a determinação do teor em água dos finos e do peso volúmico aparente seco «in situ» será possível controlar a deformabilidade dos aterros.

Frise-se desde já que este modo de proceder está intimamente ligado às metodologias de dimensionamento de barragens de aterro que privilegiam a análise estrutural, desempenhando as deformabilidades das diferentes zonas e em detrimento da resistência ao corte, um papel determinante nessa análise.

Seguidamente expõe-se o procedimento a seguir no caso do controlo dos tipos de materiais a que se tem vindo a fazer referência.

3 – MÉTODO PROPOSTO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para melhor exemplificar a metodologia proposta dar-se-á como exemplo o caso da barragem da Meimoa (Fig. 3) onde o maciço estabilizador a jusante do filtro

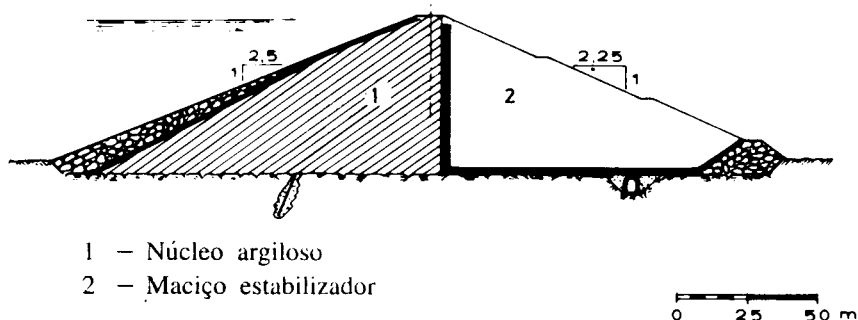


Fig. 3 – *Perfil transversal tipo da barragem de Meimoa*

chaminé tem as características granulométricas indicadas na Fig. 2. Para se estabelecerem os parâmetros de controlo há que ter em atenção que a deformabilidade daquela zona da barragem deve ser o menos contrastante possível com a zona impermeável adjacente de montante (como é óbvio, visto que se trata de zonas com funções diferentes – a barragem é zonada – as deformabilidades não podem ser iguais).



Fig. 4 — Pormenor da câmara de compressão unidimensional D50

Conhecida a deformabilidade da zona de montante vai-se estudar as características do material de jusante de molde a propor um critério de construção que permita obter o aterro com deformabilidade próxima do valor conhecido da zona dos materiais argilosos de montante.

Com essa finalidade estudou-se em laboratório uma granulometria representativa do aterro em estudo. No exemplo da Meimoa prepararam-se os materiais representados por A e B na Fig. 2 e que pretendem representar o fuso granulométrico designado por a).

Para estudar a influência da granulometria, do teor em água dos finos e do peso volúmico aparente seco na deformabilidade, propõe-se o recurso ao ensaio de compressão 1-D (deformação uni-dimensional). Na verdade, está demonstrado que este ensaio, quer pelas trajectórias de tensões quer pela trajectória de extensões que impõe, é um dos que melhor simula o comportamento real dos aterros (Doležalová e Hoření, 1982). Pode empregar-se a câmara D 50 (0,5m de diâmetro, Fig. 4) que permite o estudo de enrocamentos modelados com elementos com 10cm de diâmetro máximo. Este facto é importante porque os aterros em causa são constituídos por misturas de materiais em que os mais grossos são precisamente enrocamentos. No caso da barragem da Meimoa usou-se a câmara D 23 de modo que a modelação do material natural é efectuada de molde a limitar o máximo diâmetro das partículas a 2''*.

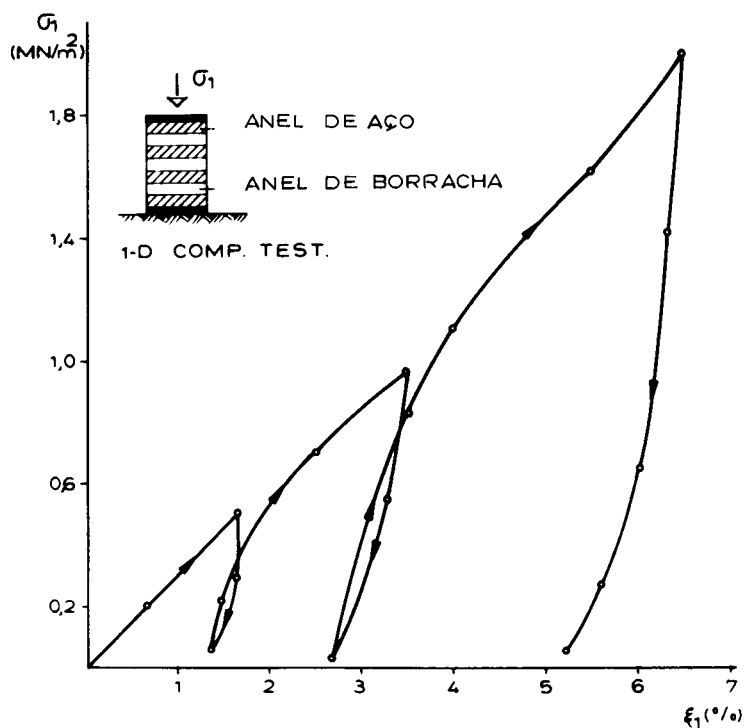


Fig. 5 – Ensaio de compressão 1-D. Material B,
 $\gamma_d = 2,01 \text{ tf/m}^3$ e $w = 8\%$.

* As câmaras de compressão D 50 e D 23, concebidas no LNEC (Maranha das Neves e Veiga Pinto, 1977 e Veiga Pinto, 1983) permitem a realização do ensaio de compressão com extensão radial nula, sem mobilização de tensões tangenciais entre o material e a parede lateral da câmara. Pode ainda medir-se a tensão lateral e conhecer assim o valor de K_0 .

Seguidamente foram efectuados ensaios de compressão 1-D usando para a granulometria (ou granulometrias) em estudo diferentes pesos volúmcos aparentes secos iniciais e diferentes teores em água. Como termo de referência para a compactidade inicial devem utilizar-se os resultados dos ensaios de compactação e das determinações «in situ» após a actuação do equipamento de compactação. Relativamente ao exemplo que se apresenta procurou-se um módulo de deformabilidade (E_{oed}) 30 a 50% superior ao da zona de montante.

Para cada um dos materiais A e B (Fig. 2) foram ensaiados provetes com dois pesos volúmcos aparentes secos (γ_d igual a 2,0 e 2,15 tf/m^3) e três teores em água (w entre 4 e 11%). A Fig. 5 descreve os resultados de um dos ensaios.

A variação de E_{oed} (secante) em cada ensaio é a diferença entre o módulo secante para a tensão axial (σ_1) de 4 kgf/cm^2 e 10 kgf/cm^2 , valores que se relacionam com a altura da barragem.

Como na parte inferior do núcleo (zona de montante) o E_{oed} é de cerca de 30 MN/m^2 (deduzido de ensaios de corte em compressão triaxial) seria então conveniente que o E_{oed} do maciço estabilizador (zona de jusante) se situasse entre os 30 e os 40 MN/m^2 .

Como se pode verificar na Fig. 6 é possível quantificar os parâmetros de controlo

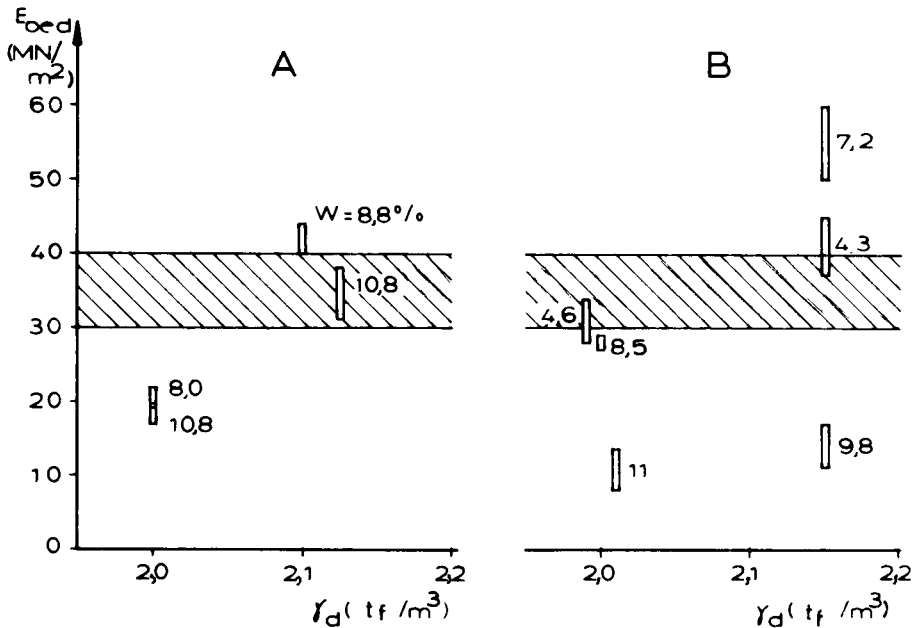


Fig. 6 - Correlação, nos ensaios de compressão 1-D, entre o módulo edométrico (E_{oed}), o teor em água (w) e o peso volúmcico aparente seco (γ_d).

(ainda que seja evidente a necessidade de realizar mais ensaios). De facto, o campo de variação admitido para γ_d é compatível com a energia de compactação do equipamento de construção e, consequentemente, com a resistência ao corte necessária (mais de 80% dos valores de γ_d ficam compreendidos entre os 2,0 e 2,15 tf/m³).

Com os resultados destes ensaios é possível especificar a deformabilidade desejada usando teores em água adequados, teores esses que dependerão da percentagem de grossos. Para melhor compreensão do procedimento proposto apresentam-se os resultados obtidos com a barragem da Meimoa. Na Fig. 7 o quadrilátero representa graficamente os critérios a que se chegou após a realização dos ensaios de deformabilidade referidos. Os pontos traduzem os resultados dos ensaios de controlo de compactação. O peso volúmico total aparente seco do material compactado, γ_d , deve situar-se entre 2,0 e 2,15 tf/m³.

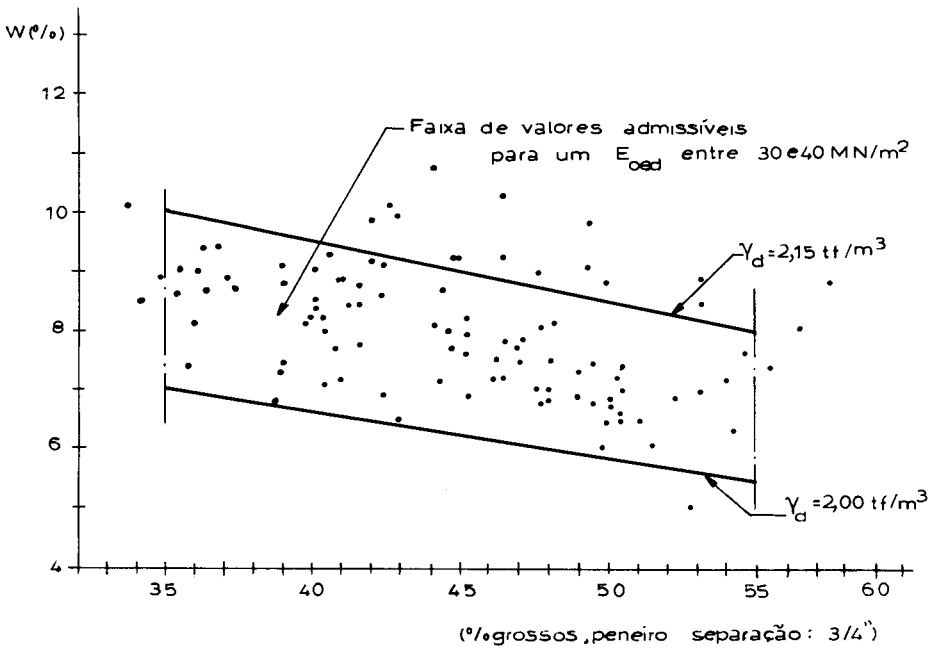


Fig. 7 – Especificações para o controlo de compactação da mistura de materiais usados na zona de jusante da barragem da Meimoa. Resultados obtidos.

A metodologia de controlo proposta deve ser estudada e aprofundada em outros casos e com base em estudos laboratoriais com câmaras de maiores dimensões.

Outro aspecto importante é o de ter em atenção não só o módulo de deformabilidade para uma gama reduzida de tensões de confinamento mas para uma gama mais alargada, correspondente por exemplo a barragens com uma altura apreciável. Nesse caso haverá que ter em atenção não só o valor inicial E_{oed} , como a sua evolução com o aumento da tensão confinante.

Na Fig. 8 exemplifica-se mais uma vez com a barragem de Meimoa. Nas zonas mais altas do núcleo a deformabilidade é maior pelo que as especificações de controlo devem reflectir esse facto. Deste modo na Fig. 8 apresenta-se, conjuntamente com a especificação da Fig. 7, uma outra correspondente a um E_{oed} inferior (20 a 30 MN/m²).

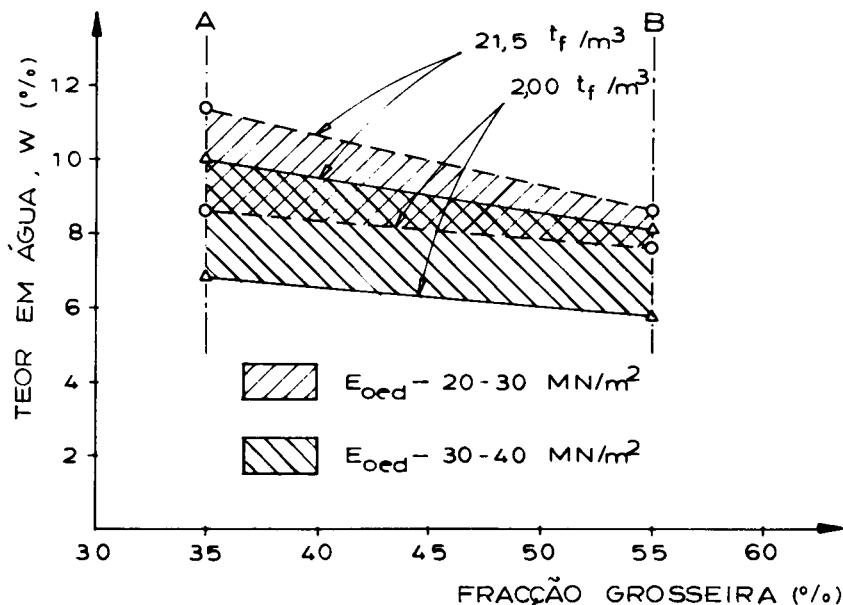


Fig. 8 – Especificações para o controlo de compactação em função da altura do aterro.

4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE CONTROLO PROPOSTO E A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERMEABILIDADE.

Como já se fez referência anteriormente a resistência ao corte não se revela, do ponto de vista em causa, tão importante como a deformabilidade. De acordo com V. de Mello (op. cit.) os equipamentos de terraplanagem modernos e pesados e os de compactação excluem a necessidade de investigar a resistência ao corte (em carregamento rápido, correspondente à fase de construção) dos materiais dos aterros. Na verdade o tráfego impõe uma condição de capacidade de carga correspondente ao ensaio de carga com placa superficial que, na maioria das situações modernas serve de pré-ensaio da adequação da resistência ao corte do solo compactado. Pode ainda acrescentar-se o facto estatístico que é o da extremamente reduzida incidência de escorregamentos nos taludes das barragens (Maranha das Neves, op. cit.).

De qualquer forma o problema poderá ser analisado numa forma semelhante à proposta para a deformabilidade mas recorrendo agora a ensaio de corte em compressão triaxial e utilizando a câmara T 30 (30 cm de diâmetro, o que permite modelar misturas de solos em que os elementos grossos podem ter um diâmetro máximo de 6 cm). Trata-se numa investigação necessária e complementar mas prevê-se que não terá grande repercussão na aplicação prática.

Quanto à permeabilidade, os materiais com as características dos TOT têm sido usados preferencialmente como maciços estabilizadores donde o problema da permeabilidade só surgir da necessidade de, eventualmente, ser necessário garantir uma permeabilidade relativamente elevada, isto é, assegurar um comportamento drenado em todas as fases críticas da estabilidade da obra.

Sucede que tal problema não se levanta normalmente para as características granulométricas deste tipo de material*, pelo que o seu estudo não é tão importante. De aplicação reduzida mas por vezes muito útil é um tipo de aterro muito pouco deformável e de baixa permeabilidade (10^{-7} a 10^{-8} cm/s). Um material com estas características pode conseguir-se com uma mistura de enrocamento e argila em proporções tais que o enrocamento forma um «esqueleto» sólido de grande rigidez e a argila preenche os vazios desse esqueleto de molde a conferir-lhe a requerida impermeabilidade. Mas trata-se de soluções estruturais em que os elementos que usam este tipo de material têm um volume reduzido.

* Exceptua-se o caso das solicitações sísmicas.

5 – CONCLUSÕES

São as seguintes as principais conclusões:

- a) o controlo de compactação de aterros de barragens de materiais TOT (finos argilosos) não pode efectuar-se pelos métodos convencionais;
- b) a «resposta» adequada do material à acção do equipamento de compactação pode interpretar-se como um ensaio positivo no que concerne à resistência ao corte mínima desejável;
- c) o controlo de compactação pode assim basear-se apenas na verificação da existência duma dada deformabilidade;
- d) as especificações, para obter essa deformabilidade em função dos valores medidos do teor de água, podem obter-se dos resultados de ensaios de compressão 1-D. Para a gama dos pesos volúmicos aparente secos obtidos por uma compactação adequada, aqueles valores limite do teor em água são uma função da percentagem de grossos;
- e) como a rigidez dos núcleos depende da sua altura é fácil adoptar as especificações a esse factor;
- f) como exemplo, o método proposto é aplicado ao controlo da construção do maciço estabilizador (jusante) da barragem da Meimoa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOLEŽALOVÁ, M. e A. HOŘENÍ (1982) – «Strain Paths in Rockfill Dams». Measurements, Constitutive Laws, FEM Calculations» Proc. of the Fourth Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, Canada, May-June, vol. 2.
- EGGESTAD, A. (1974) – «A New Method for Compaction Control of Sand» Géotechnique, vol. 24, n.º 2, June, pp. 141-153.
- MARANHA DAS NEVES, E. (1980) – «Notas Sobre o Dimensionamento de Barragens de Aterro de Enrocamento» Geotecnia 28, Lisboa, pp. 3-49.
- MARANHA DAS NEVES, E. e VEIGA PINTO, A. (1977) – «Enrocamentos. Actualização de Conhecimentos, Estudos Experimentais e Aplicações em Barragens e Vias de Comunicação» LNEC, Julho, Lisboa.
- MARANHA DAS NEVES, E. e VEIGA PINTO, A. (1983) – «Compaction Control of Random Fill Materials» Eight European Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Helsinki, vol. 1, pp. 55-58.
- MELLO, V. de (1982) – «Comportamento de Materiais Compactados à Luz da Experiência de Grandes Barragens» Geotecnia 34, Lisboa, pp. 3-43.
- VEIGA PINTO, A. (1983) – «Previsão do Comportamento Estrutural de Barragens de Enrocamento» Tese para obtenção do grau de Especialista, LNEC, Lisboa.
- USBR (1974) – «Earth Manual», 2.ª ed., Washington.