

## GEOLOGIA DE ENGENHARIA E BARRAGENS DE ENROCAMENTO

POR

M. O. Q. FERREIRA <sup>(1)</sup>

**RESUMO** — A decisão de construir uma barragem de enrocamento ultrapassa o âmbito da geologia de engenharia, sendo grandemente condicionada pelos aspectos económicos, pois, em muitos locais, é tecnicamente possível construir diferentes tipos de barragens. À medida que pioram as condições de fundação, cresce o papel que a geologia de engenharia tem de desempenhar na selecção do local e no estudo das fundações com vista à escolha do tipo de barragem. As condições hidrogeológicas nas fundações são frequentemente mais condicionantes para a construção das barragens de enrocamento que os problemas de resistência e de deformabilidade. Estas barragens permitem um bom aproveitamento da quase totalidade dos materiais rochosos existentes no local, pois nela podem ser utilizados desde os materiais de elevada resistência e durabilidade até à rocha completamente alterada, quando possui propriedades compatíveis com a sua utilização num núcleo pouco permeável. No que se refere às características dos materiais rochosos a utilizar na construção dos enrocamentos, os resultados dos ensaios de caracterização sobre granitos e metadolomias confirmam que a resistência das rochas cristalinas pouco porosas é grandemente condicionada pelas fissuras, e que a porosidade deve ser utilizada em simultâneo com outros parâmetros que permitam uma melhor aproximação às características de resistência. Na determinação da resistência dos fragmentos rochosos irregulares concluímos ser o ensaio de carga pontual mais conveniente que o ensaio de esmagamento. Para os granitos a diminuição da resistência com a molhagem foi verificada em todas as amostras. Para as metadolomias a molhagem não mostrou fazer variar significativamente a resistência dos fragmentos individuais, verificando-se no entanto o colapso dos enrocamentos sujeitos a tensões, tal como acontece na generalidade das rochas. Nos enrocamentos sujeitos a tensões a molhagem aumenta a fracturação dos elementos, rochosos, resultando maiores assentamentos por colapso e a diminuição do ângulo de atrito. O colapso é mais significativo nos enrocamentos soltos que nos enrocamentos densos. Os problemas de durabilidade dos materiais rochosos são mais importantes nos enrocamentos de protecção que nos

---

<sup>(1)</sup> Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra; 3049 Coimbra Codex, Portugal.

aterros de enrocamento. Na avaliação da durabilidade a utilização de propriedades índice pode, com vantagem, substituir o ataque com agentes agressivos. Na determinação das condições de campo mais adequadas para a colocação e compactação dos materiais de enrocamento verificou-se que a diminuição da espessura das camadas, o aumento da energia de compactação e a molhagem diminuem o índice de vazios, aumentam o peso volúmico e melhoram as características mecânicas dos enrocamentos. A molhagem com volumes de água da ordem dos 10 %, mostrou-se suficiente para proporcionar o colapso e aumentar a eficiência da compactação.

**ABSTRACT — Engineering Geology and rockfill dams.** The decision to construct a rockfill dam is not exclusively an engineering geology attribution, because in many places it is possible to construct several types of dams, being the more economic solution the one choosed. The role of engineering geology grows as the foundation conditions get worst. The hydrogeological conditions in the foundations are frequently more important to the construction of this type of structures than are the problems of strength and deformability. In a rockfill dam it is possible to use most local rock materials because it is possible to use from sound rock to completely weathered rock when it has properties compatibles with their use in a low permeability core. Concerning rock characteristics to use as rockfill construction materials the results, using granites and metadolostones, showed that strength of low porosity crystalline rocks is mainly conditioned by fissures and that porosity must be used with other parameters in order to estimate strength. To obtain the strength of irregular lumps it was concluded that the point load test is more convenient than the crushing test. All granite samples showed a decrease in strength with wetting. Wetting the metadolostones does not appeared to significantly change strength, aldw colapse was observed in rockfills subjected to stresses, as hapans with most rocks. Wetting stressed rockfills increases fracturing of rock particles, allowing greater collapse settlements, and lower friction angle. Collapse is more severe in loose than in dense rockfills. Durability problems of rockfill materials are more important in protection rockfills than in rockfill embankments. The use of index properties can advantageously substitute the attack using aggressive agents. In the study of field conditions more suitable to place and compact rockfill materials it was concluded that using smaller layer height, increasing compaction energy and wetting is going to decrease void ratio, increases unit weight and the mechanical characteristics of rockfills. Sluicing the rockfill with small quantities of water, such as 10 %, is sufficient to allow collapse an increase compaction efficiency.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo PENMAN (1983), de entre os vários tipos de barragens, as de aterro são simultaneamente as mais antigas e as mais nume-

rosas. A sua popularidade reside no facto de serem relativamente baratas, sendo construídas com materiais locais, frequentemente retirados das escavações para as obras anexas como o descarregador de superfície, tomada de água, descarga de fundo e túneis, sendo, sempre que possível, o restante material retirado do interior da albufeira. O contraste paisagístico entre o aterro e o ambiente circundante pode diminuir-se revestindo o paramento de jusante com o mesmo material das imediações ou utilizando uma cobertura vegetal.

Para a construção de barragens de enrocamento é necessário conhecer convenientemente o terreno de fundação, efectuar o projecto com base nas propriedades dos materiais rochosos disponíveis e definir as técnicas construtivas mais adequadas de modo a obterem-se os menores custos compatíveis com a segurança e a eficiência exigidas para a obra. O reconhecimento e prospecção das pedreiras e manchas de empréstimo, o estudo da fundação, a caracterização dos materiais rochosos e a determinação das suas propriedades são tarefas de grande importância onde a geologia de engenharia desempenha papel de relevo. O projecto de barragens de enrocamento pode ser muito diversificado de modo a adequar-se ao tipo e quantidade dos materiais rochosos disponíveis, sendo frequentemente questionado o geólogo no sentido de saber quais os materiais disponíveis e a suas quantidades, propriedades geotécnicas e o comportamento a longo prazo. Para estas questões não existe de um modo geral uma resposta única, sendo necessário analisarem-se as diferentes alternativas de modo a procurar-se a solução mais vantajosa.

No que se refere às características das fundações, tratando-se de estruturas de gravidade, não rígidas, em que as tensões transmitidas são pequenas, é possível aceitar terrenos de fundação com características de deformabilidade e de resistência que não seriam admissíveis noutros tipos de barragens. Frequentemente é o elemento impermeável que vai impor o limite para as deformações, de modo a não sofrer deteriorações que comprometam o seu funcionamento.

## **2. SOBRE O CONCEITO DE ENROCAMENTO**

O conceito de enrocamento tem sofrido modificações ao longo dos tempos, acompanhando a evolução da tecnologia de construção

deste tipo de estruturas (CHARLES, 1973; MARANHA DAS NEVES, 1978; MARANHA DAS NEVES e VEIGA PINTO, 1988). Estes últimos autores consideram um enrocamento como «um meio particulado, drenante, com uma apreciável resistência ao corte, em que as partículas constituem uma estrutura com um fabric dependente em grande parte do grau de imbricamento dessas mesmas partículas o qual, por sua vez, depende fundamentalmente da energia de compactação aplicada na construção...». Os limites das dimensões dos fragmentos constituintes variam frequentemente entre cerca de 2 m até a dimensão de argila. O limite máximo é condicionado por aspectos técnicos e de construção. A percentagem de finos deve ser pequena, geralmente inferior a 10 %, para que não controle o comportamento do material e para que o enrocamento apresente um comportamento drenante. A permeabilidade deve ser superior a  $1 \times 10^{-3}$  cm/s (PENMAN e CHARLES, 1976; PENMAN, 1982).

Segundo WILSON e MARSAL (1979), os enrocamentos compactados são colocados em camadas de espessura geralmente inferior a 2 m, considerando que com espessuras acima dos 3 m a 4 m os enrocamentos já são classificados como enrocamentos lançados. Quanto ao tipo e localização do elemento impermeável as barragens de enrocamento podem possuir cortina a montante, cortina central ou núcleo impermeável. Os materiais que têm sido utilizados nas cortinas impermeáveis vão desde a madeira, que os mineiros usavam nas primitivas barragens de enrocamento, às chapas metálicas, ao betão, ao betão asfáltico e mesmo ao plástico. Para o núcleo usam-se geralmente solos de baixa permeabilidade, essencialmente argilosos.

Os enrocamentos lançados apresentam elevados assentamentos. Inicialmente pensava-se que se poderiam diminuir os assentamentos lavando os finos com jactos de água de modo a permitir um bom contacto entre os grandes blocos de rocha. Este procedimento foi ainda usado na construção da barragem de Paradela (FERNANDES *et al.*, 1958; 1960). O mecanismo referido foi rejeitado por TERZAGHI (1960), que atribuiu a redução dos assentamentos após a construção devido à diminuição da resistência da rocha provocada pela molhagem durante o processo construtivo. À inclusão de finos aumenta o número de pontos de contacto, diminuindo as tensões transmitidas e gerando menores assentamentos.

Para um mesmo material, o fuso granulométrico utilizado varia consoante a função que se pretende o material desempenhe,

pelo que nas modernas barragens de enrocamento se utilizam várias zonas com características granulométricas distintas. Deste modo, procura-se otimizar a relação entre o custo de execução do enrocamento e a segurança da estrutura em função dos materiais disponíveis.

Presentemente, as soluções de enrocamento apresentam-se bastante competitivas relativamente às soluções de betão, pois tendem a resultar em menores custos de construção. No entanto o recente aparecimento das barragens de betão compactado (RCC-Roled Compacted Concrete) veio mostrar que estas podem competir economicamente com as barragens de aterro.

### 3. CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE ENROCAMENTO

A construção da primeira barragem de enrocamento compactado terminou em 1955. Trata-se da barragem de Quoich, na Escócia, com 38 m de altura e possuindo uma cortina de betão a montante (ROBERTS, 1958). A partir do final da década de 60, os enrocamentos compactados divulgaram-se progressivamente, para o que contribuiu, para além da utilização de granulometrias extensas e da colocação em camadas com espessura menor que 2 m, a compactação com cilindros vibradores de pesos estáticos superiores a 10 toneladas, o aperfeiçoamento de potentes máquinas de carregamento e transporte e os desenvolvimentos científicos no estudo e previsão do comportamento dos enrocamentos. Também na mesma época começaram a surgir os primeiros laboratórios de ensaios de materiais de enrocamento. Estes avanços científicos e técnicos contribuíram decisivamente para a construção económica e segura dos aterros de enrocamento, proporcionando-lhes a boa aceitação que actualmente disfrutam.

Em Portugal, a utilização de enrocamentos iniciou-se a partir de 1945 (barragens de Vale do Gaio e Pego do Altar). A partir de 1955, construiu-se a barragem de Paradela com 110 m de altura acima do leito do rio e, alguns anos mais tarde (1964), a barragem de Vilar com uma tecnologia semelhante à de Paradela. As barragens referidas foram construídas com enrocamentos lançados. No que se refere ao perfil tipo das barragens de Pego do Altar e de Paradela, à data da sua construção tratava-se das soluções, no seu tipo, mais altas a nível mundial.

No nosso País a investigação aplicada aos materiais de enrocamento começou a desenvolver-se no Laboratório Nacional de Engenharia Civil a partir de 1976, tendo-se aplicado à construção da barragem do Beliche (VEIGA PINTO, 1983).

Presentemente encontra-se em construção a barragem do Lagoacho na Serra da Estrela, em que se utilizam materiais graníticos, estando em fase de conclusão as barragens de S. Domingos junto a Peniche, em que se utilizam calcários, e a barragem da Apartadura próximo de Marvão, em que se utilizam metadolomias do Devónico.

Portugal apresenta grande potencial para a construção de barragens de enrocamento devido à abundância de afloramentos rochosos em todo o território, sendo ainda numerosos os locais em que é possível a construção de barragens.

Os acidentes em barragens de enrocamento têm sido reduzidos. Das 14500 grandes barragens de todos os tipos construídas até 1975, foram registados 1105 acidentes, dos quais 96 foram em barragens de enrocamento (ICOLD, 1979). A maioria destes acidentes ocorreu em barragens construídas anteriormente a 1960. Como se verifica na Fig. 1 cerca de 32 % dos acidentes foram devidos a causas em que a geologia de engenharia tem um papel activo no estudo e caracterização. O maior número de deteriorações foi na fundação, devendo-se a problemas relacionados com a erosão interna e a percolação.

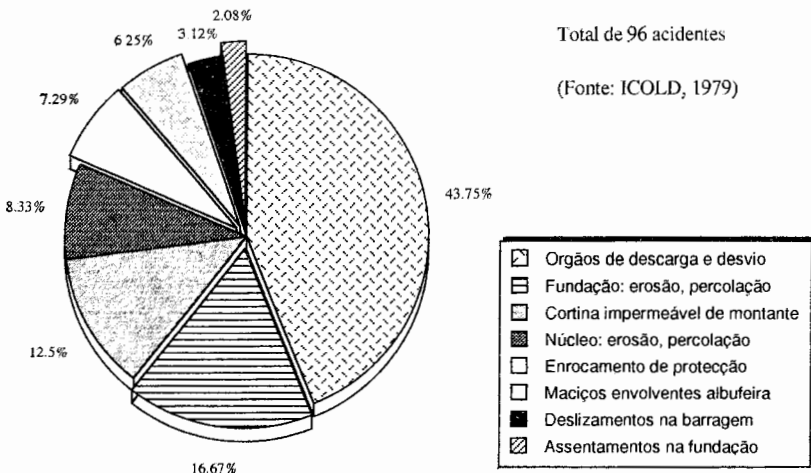


Fig. 1 — Acidentes registados em barragens de enrocamento.

Tabela 1 — (Continuação).

Fase	Operações a efectuar	Elementos
PROJECTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Ensaios de pedreira.</li> <li>. Aterros experimentais (para determinar as propriedades dos enrocamentos e optimização das técnicas construtivas).</li> <li>. Caracterização física e mecânica pormenorizada dos materiais rochosos.</li> <li>. Ensaios laboratoriais sobre amostras granulares para a determinação da deformabilidade e da resistência ao corte (DU50, T30).</li> <li>. Elaboração das especificações de construção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Granulometria.</li> <li>. Eficiência de compactação.</li> <li>. Propriedades índice.</li> <li>. Ensaios macro (granulometria, pesos volúmicos e índice de vazios).</li> <li>. Ensaios DU50 e T30.</li> </ul>
CONSTRUÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Controlo das técnicas construtivas dos aterros de enrocamento e realização de ensaios macro.</li> <li>. Controlo das características dos materiais utilizados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Controlo de construção.</li> </ul>
OBSERVAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Observação e interpretação do comportamento do aterro.</li> <li>. Observação do comportamento dos materiais e da sua durabilidade.</li> <li>. Tomada de eventuais medidas correctivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Assentamentos e movimentos do enrocamento.</li> <li>. Observação das deteriorações.</li> </ul>

#### 4. CONDIÇÕES LOCAIS E FUNDAÇÕES

Durante o nosso trabalho tomámos contacto directo com cinco locais de barragens (Fig. 2). Quatro dos locais, Lagoacho, Paradela, Midões e Castelo de Paiva, situam-se em áreas graníticas; o local da barragem da Apartadura situa-se numa área de rochas xistosas com afloramentos de rochas carbonatadas e rochas graníticas nas proximidades. No que se refere às fundações, nos quatro primeiros locais, são constituídas por granito, enquanto que na Apartadura é consti-

É também de realçar a necessidade de avaliar correctamente o comportamento dos enrocamentos de protecção em que os problemas de durabilidade são de grande importância. Os problemas de deformabilidade da fundação são pouco significativos.

Para cada obra, os estudos a efectuar até a escolha definitiva do tipo de estrutura vão essencialmente depender das condições locais (NEIVA, 1957; 1982; OLIVEIRA, 1979; CFGB, 1982; GTAEAA, 1982; PIRCHER, 1982; RAMPON, 1986).

A metodologia de estudo e as técnicas de reconhecimento são, na sua generalidade, comuns a outros tipos de barragens. O programa de estudo distingue-se dos utilizados para as barragens de betão pela menor extensão de que geralmente se reveste o reconhecimento das fundações, dispensando de um modo geral os ensaios de caracterização mecânica destas.

As características particulares das barragens de enrocamento exigem metodologias próprias para o estudo de vários aspectos específicos pelo que apresentamos na Tabela 1 uma síntese das operações a efectuar para o estudo dos aterros de enrocamento.

No âmbito do estudo das barragens de enrocamento podemos privilegiar dois aspectos principais. Um relacionado com o estudo das condições locais e as fundações e o outro versando a caracterização dos materiais de enrocamento.

**Tabela 1** — Síntese das operações a efectuar para o estudo dos aterros de enrocamento.

Fase	Operações a efectuar	Elementos
ESTUDO PRE- LIMINAR e ANTE- PROJECTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Prospeção dos materiais possíveis de utilizar.</li> <li>. Reconhecimento do local da pedreira.</li> <li>. Recolha de amostras para caracterização expedita e ensaios de propriedades índice (porosidade, esmagamento, carga pontual, compressão uniaxial, expansibilidade, durabilidade).</li> <li>. Avaliação das quantidades utilizáveis e das características dos materiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Mapas, fotografia aérea, cartografia, trabalhos de prospeção.</li> <li>. Propriedades índice.</li> </ul>



tuída por xistos. Se nos granitos a heterogeneidade da alteração é a principal condicionante geológica, nos xistos é a anisotropia do maciço que maior importância apresenta.

Na Tabela 2 apresentamos alguns aspectos que consideramos de interesse para cada um dos locais referidos, bem como algumas considerações sobre as condições locais.

De entre os locais estudados é em Castelo de Paiva que a alteração e a fracturação da fundação exibem maior intensidade e heterogeneidade (Fig. 3). As condições locais adaptam-se claramente à escolha de uma solução de enrocamento ou terra-enrocamento devido à abundância destes materiais no/e junto ao local. Consideramos no entanto ser necessário prosseguir o reconhecimento e prospecção da fundação de modo a recolher mais elementos sobre a alteração, a fracturação e a percolação tendo em atenção o tipo de barragem e as soluções construtivas a adoptar.

Em Midões a distribuição da alteração é muito variável encontrando-se a margem esquerda mais intensamente alterada (Fig. 4). Para a construção de uma barragem mista de terra-enrocamento, existem no local e nas suas proximidades materiais naturais adequados à sua execução.

A construção de uma barragem de terra-enrocamento permitirá a utilização de todas as gamas de alteração dos granitos, desde rocha sã até os solos residuais, possibilitando o aproveitamento de todos os materiais escavados. A distribuição irregular da alteração e a sua heterogeneidade serão um factor desfavorável a considerar pois a existência de materiais com resistência muito diferentes, distribuídos irregularmente, vai dificultar a extracção dos materiais com características específicas. O granito são ou pouco alterado poderá ser principalmente utilizado nos enrocamentos de montante.

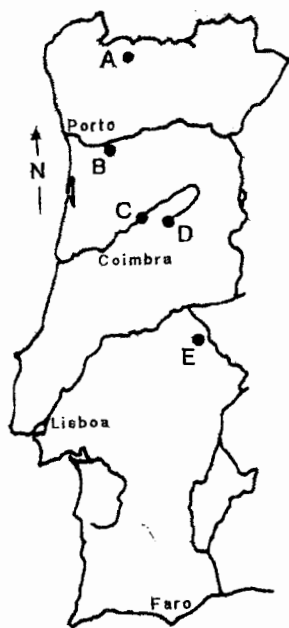


Fig. 2 — Locais estudados. A — Paradela; B — Castelo de Paiva; C — Midões; D — Lagoaço; E — Aparatadura.

**Tabela 2** — Síntese de algumas características referentes às barragens estudadas.

Local	Lagoacho	Paradela	Midões	Castelo de Paiva	Apartadura
Condições da Fundação	Granito porfiróide de grão grosseiro pouco alterado. Na portela uma zona aluvionar espessa.	Granito porfiróide de grão grosseiro muito alterado e tectonizado.	Granito porfiróide de grão grosseiro mais alterado na margem esquerda.	Granito porfiróide de grão grosseiro muito alterado e tectonizado.	Xistos argilosos e gresosos pouco tectonizados e mais alterados na margem direita.
Relação Corda — Altura	$\frac{240 \text{ m}}{36 \text{ m}} = 6,7$	$\frac{560 \text{ m}}{112 \text{ m}} = 5,0$	—	—	$\frac{291 \text{ m}}{46,5 \text{ m}} = 6,3$
Tipo de barragem	Enrocamento compactado com cortina de betão armado a montante	Enrocamento lançado com cortina de betão armado a montante.	(Enrocamento compactado com núcleo impermeável de solos residuais graníticos) ?	(Enrocamento compactado com núcleo impermeável ou cortina a montante) ?	Enrocamento compactado com cortina de betão asfáltico a montante.
Materiais de construção	Granito porfiróide de grão grosseiro.	Granito porfiróide de grão grosseiro.	(Enrocamentos: granito porfiróide grosseiro; Núcleo: solo residual granítico) ?	(Granito porfiróide de grão grosseiro) ?	Metadolomia.
Distância à pedreira	200 m	4500 m	(200 m do local possível).	(300 m do local possível).	2000 m

**Tabela 2** — (Continuação).

Local	Lagoacho	Paradela	Midões	Castelo de Paiva	Apartadura
Status	Em construção (1990 a .....).	Construída (1955 a 1958).	Por construir.	Por construir.	Em construção (1988 a .....).
Observações	Razões de natureza ambiental e paisagística motivaram a escolha da solução de enrocamento.	As deficientes condições de fundação estiveram na origem da escolha de uma solução de enrocamento.	Uma solução de de aterro é a mais aconselhável, podendo, com um projecto mais exigente, construir-se uma barragem rígida.	As deficientes condições de fundação aconselham a escolha de uma solução de aterro.	A solução de enrocamento mostrou ser a mais adequada devido à existência de rocha de boa qualidade próxima da barragem.

O granito mais alterado poderá ser usado nos enrocamentos de jusante, em condições de colocação e compactação que, tal como para os restantes materiais, serão aprofundadas durante a realização de aterros experimentais. Os solos residuais possibilitarão a construção do núcleo terroso, que constituirá o órgão impermeável. Os granitos extremamente alterados poderão ser utilizados na construção de filtros espessos, proporcionando uma transição gradual entre os materiais do núcleo terroso e os enrocamentos.

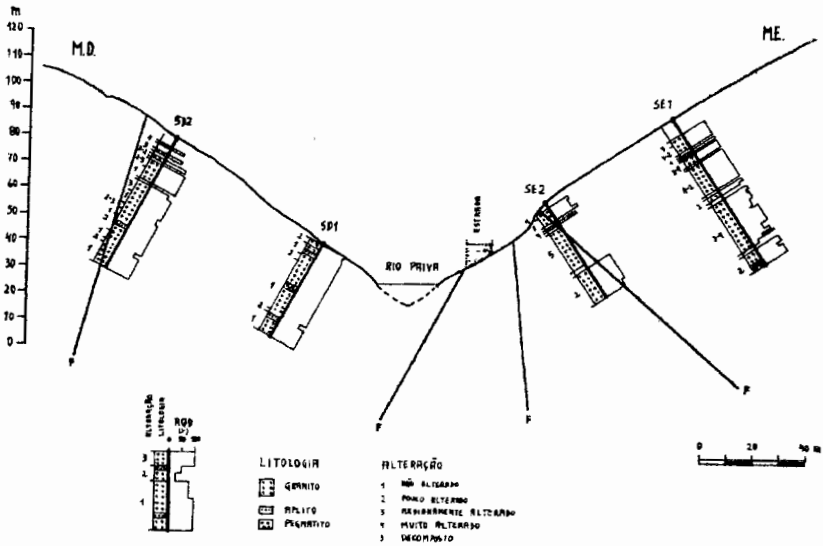


Fig. 3 — Corte geológico interpretativo segundo o alinhamento das sondagens no local da barragem de Castelo de Paiva.

Para os outros locais, cujas barragens já se encontram construídas, poderão obter-se mais informações, por exemplo, em QUINTA FERREIRA (1990-b).

## 5. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DOS ENROCAMENTOS

Na caracterização laboratorial dos enrocamentos procuram-se determinar as características das rochas com importância para o comportamento do enrocamento. Para este efeito realizam-se ensaios sobre provetes de modo a avaliar o comportamento do material rochoso e executam-se ensaios sobre os materiais granulares.

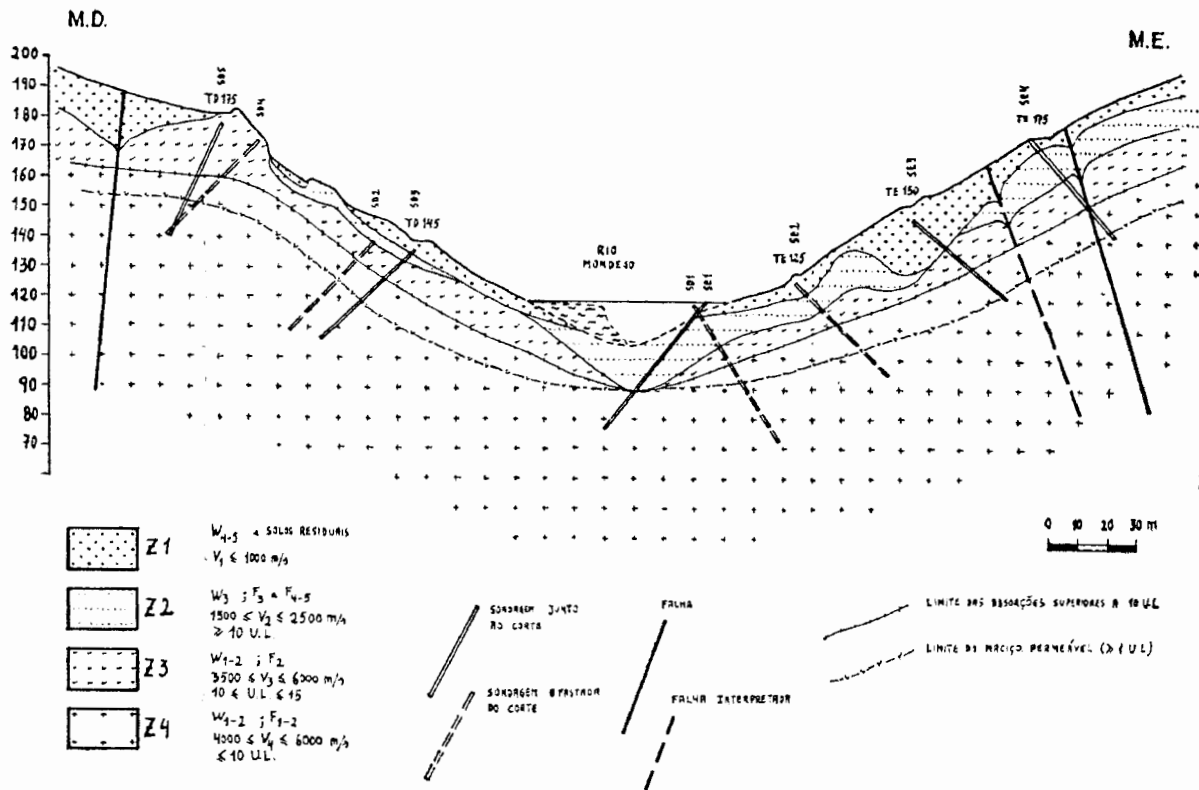


Fig. 4 — Zonamento geotécnico da fundação da barragem de Midões segundo o alinhamento médio das sondagens.

## 5.1. Caracterização dos materiais rochosos

Nos granitos a variação da resistência em função da porosidade mostra que esta não é um bom indicador para estimar a resistência (QUINTA FERREIRA, 1990-a). O aumento da alteração faz crescer a porosidade de poro, diminuindo a importância relativa das fissuras. As fissuras influenciam as propriedades mecânicas, sendo responsáveis pela diminuição da resistência, da velocidade de propagação das ondas elásticas, dos pesos volúmicos e pelo aumento da permeabilidade. A quantificação da fissuração pode ser efectuada por um índice determinado indirectamente a partir da velocidade de propagação das ondas elásticas, como o índice de qualidade (TOURENÇ e FOURMAINTRAUX, 1974) ou o índice de fissuração (Delgado Rodrigues 1982), que verificámos serem correlacionáveis entre si (QUINTA FERREIRA, 1990-b, 1991).

Na resistência à compressão uniaxial das rochas graníticas, o início da cedência ocorre para um valor da carga que, proporcionalmente à tensão de rotura, é menor nas amostras mais alteradas (QUINTA FERREIRA e VEIGA PINTO, 1988). Estas acumulam menos energia, pois a partir de níveis de tensão baixos geram-se fracturas axiais que dissipam essa energia, evidenciando um comportamento mais dúctil. As amostras resistentes acumulam energia que tendem a libertar de um modo violento quando é atingida a tensão de rotura. Este mecanismo faz, num enrocamento de rochas de elevada resistência, que a rotura de um fragmento e a deformação associada aconteçam bruscamente, enquanto que nos enrocamentos de materiais mais alterados há uma fase de fluência, tanto maior quanto menor é a resistência da rocha, transformando a rotura num processo mais extenso e sem variações bruscas.

Para as rochas carbonatadas (Fig. 5) o comportamento é diferente consoante se trata de rochas cristalinas, essencialmente fissuradas, ou de rochas microcristalinas, essencialmente porosas. No primeiro caso, de um modo semelhante ao referido para os granitos, a porosidade não é muito útil na estimativa da resistência por esta depender essencialmente da fissuração da rocha. Por outro lado as rochas carbonatadas porosas apresentam um comportamento aproximadamente linear entre a porosidade e a resistência (Fig. 5). O traço desenhado na figura procura separar o campo das rochas carbonatadas essencialmente fissurado do campo das rochas carbonatadas essencialmente porosas.

Na determinação da resistência, utilizando provetes de forma regular, é necessário recorrer a equipamento de corte apropriado e uma preparação cuidada das amostras. Este procedimento implica custos elevados, adequando-se mais a fins de investigação do que à aplicação prática aos enrocamentos. A utilização de fragmentos irregulares na determinação da resistência permite obter custos bastante menores e ensaiar fragmentos com formas semelhantes às utilizadas nos enrocamentos.

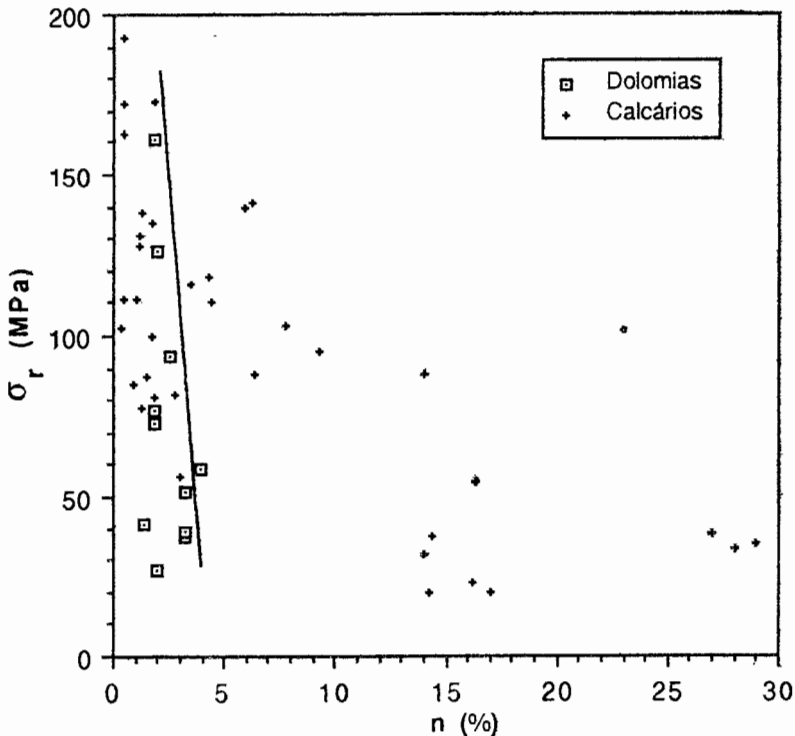


Fig. 5 — Rochas carbonatadas: variação da resistência à compressão uniaxial com a porosidade (os dados sobre os calcários foram extraídos de Delgado Rodrigues, 1986).

Na determinação da resistência dos fragmentos irregulares dos enrocamentos, o ensaio mais divulgado é o ensaio de esmagamento (MARSAL, 1969). Procurando substituir este ensaio por outro mais fácil de realizar e com condições de execução melhor definidas concluímos ser o ensaio de carga pontual o mais conveniente,

podendo mesmo ser facilmente executado no campo. Como se observa na Fig. 6 os resultados do ensaio de carga pontual mostram estar relacionados com os do ensaio de esmagamento, o que se deve ao modo semelhante como se aplica a carga e se processa a rotura nos dois ensaios (QUINTA FERREIRA *et al.*, 1990). No entanto, no ensaio de carga pontual a superfície de aplicação da carga pelas ponteiros é aproximadamente constante durante o ensaio, enquanto que no ensaio de esmagamento a área de contacto dos fragmentos com a placa tende a aumentar com o esmagamento progressivo dos pontos mais salientes e para as amostras menos resistentes.

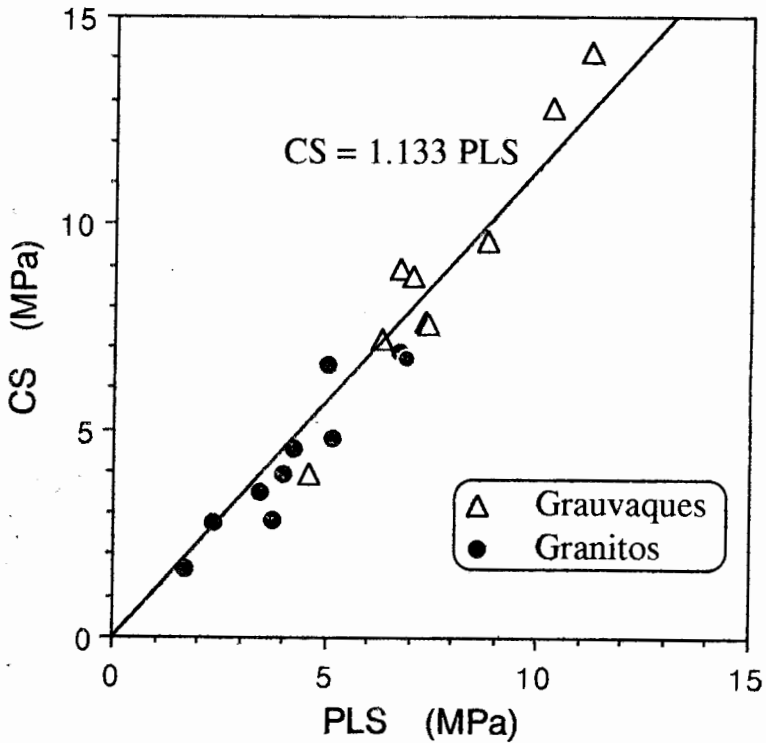


Fig. 6 — Relação entre o ensaio de carga pontual (PLS) e o ensaio de esmagamento (CS) (QUINTA FERREIRA *et al.*, 1990).

Para o ensaio de carga pontual consideramos ser PLS (= carga aplicada / área da superfície de rotura), tal como é definido por GUIFU e HONG (1986), melhor parâmetro que  $I_s(50)$  para quantificar a resistência por caracterizar efectivamente a superfície que



sofreu rotura. Além disso o cálculo de PLS é mais fácil do que  $Is(50)$  não necessitando de qualquer factor de correcção.

A influência da água na resistência dos fragmentos rochosos é um dos aspectos de interesse no estudo dos materiais de enrocamento. De um modo geral as rochas quando sujeitas a molhagem tendem a sofrer diminuição de resistência como se observa na Fig. 7 para os granitos.

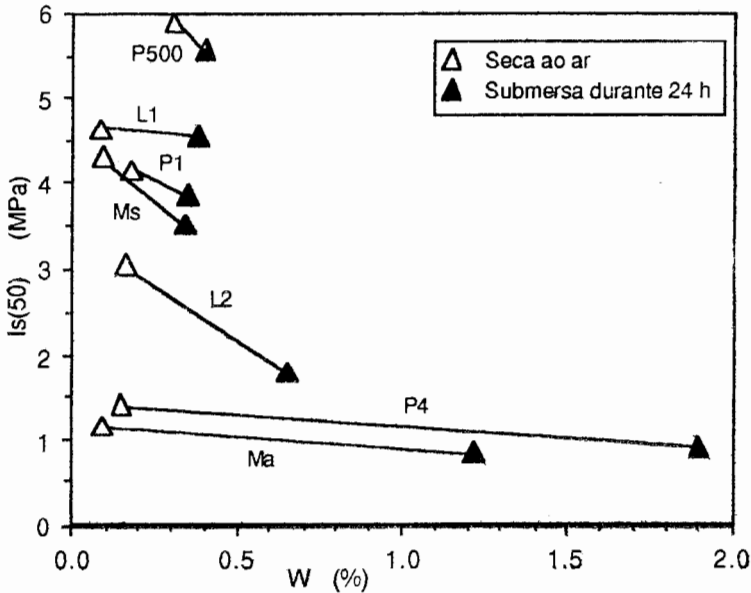


Fig. 7 — Variação de  $Is(50)$  com o teor em água para algumas amostras de granitos.

Para as metadolomias a molhagem não mostrou fazer variar significativamente a resistência dos fragmentos rochosos individuais como se verificou no ensaio de esmagamento e no ensaio de carga pontual (Fig. 8). No entanto os ensaios em câmaras de grande dimensão mostram que estes materiais sofrem colapso quando sujeitos a molhagem (Fig. 10). Este assunto é tratado com mais pormenor posteriormente neste trabalho.

A qualidade exigida para os materiais de enrocamento é muito variável. Admitem-se quase todos os tipos de materiais nos aterros de enrocamento enquanto que para os enrocamentos de protecção é necessário possuírem boas características de resistência e de

durabilidade de modo a que não ocorram deteriorações susceptíveis de porem em risco a estrutura que se pretendia proteger.

Na avaliação da durabilidade são utilizados diversos procedimentos que vão desde as especificações das características de resistência até os ensaios de ataque por agentes agressivos. Outros procedimentos, utilizando propriedades índice, podem com vantagem quantificar a durabilidade dos materiais, permitindo seleccionar de entre os disponíveis, aqueles que são mais adequados. Neste último caso é necessário que as propriedades índice consideradas traduzam, ainda que de um modo indirecto, os mecanismos com maior importância na degradação das rochas. Com esta finalidade consideramos promissor a utilização do índice de durabilidade IRD proposto por DELGADO RODRIGUES e JEREMIAS (1990) para o escalonamento da durabilidade e mesmo no estabelecimento de critérios

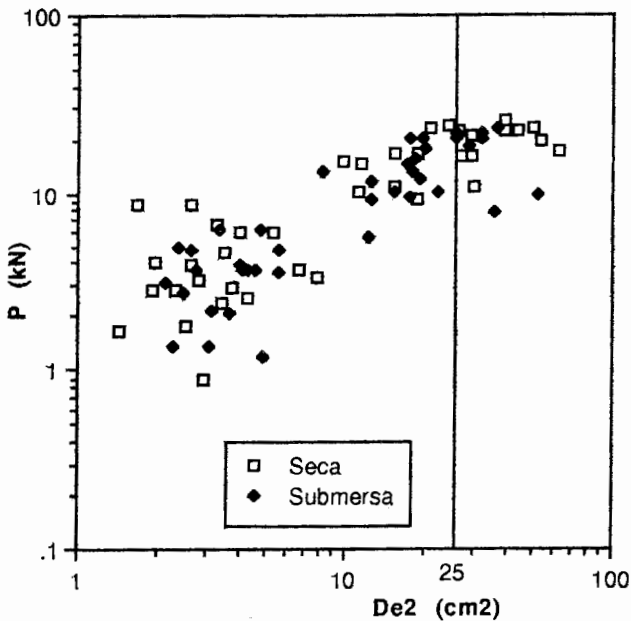


Fig. 8 — Resultados do ensaio de carga pontual sobre as metadolomias do enrocamento da Apartadura, secas ao ar e após submersão.

de aceitação dos materiais rochosos, para o que se poderão estabelecer classes com base no valor de IRD, tal como se sugere em QUINTA FERREIRA (1991).

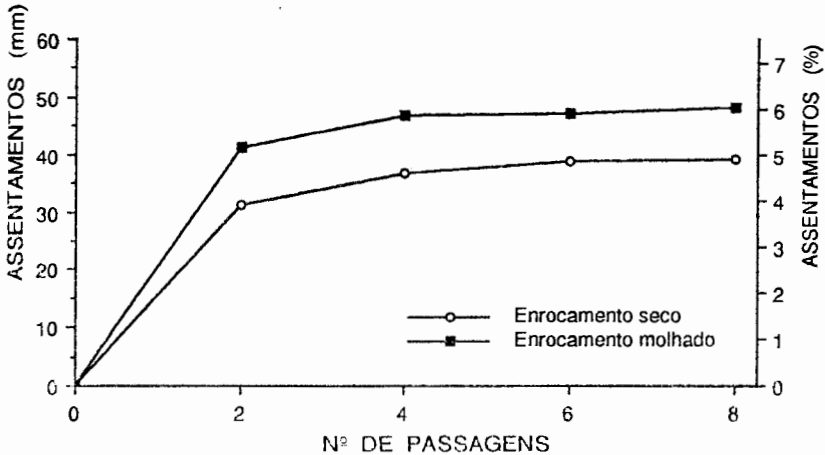
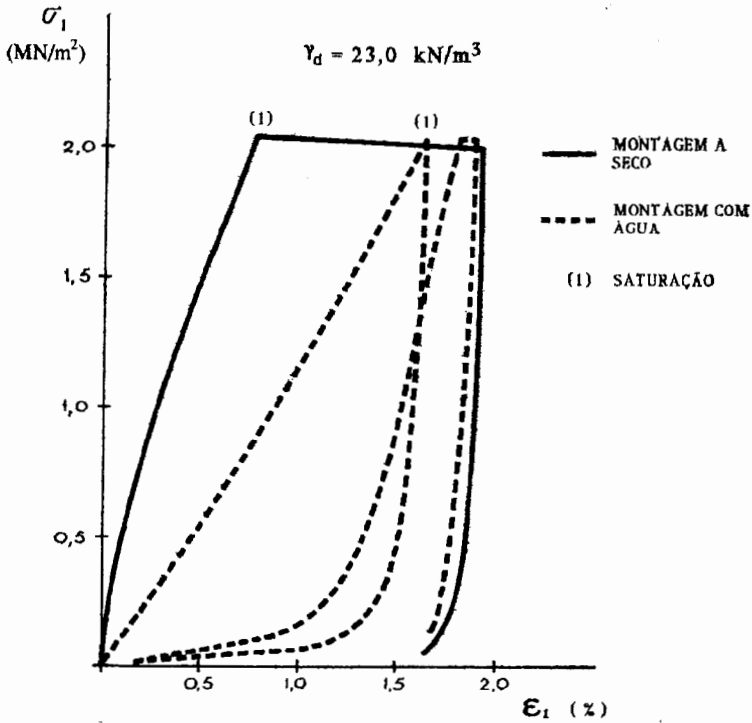


Fig. 10 — Influência da água nos assentamentos dos aterros graníticos (material 3C) da Barragem do Lagoacho.

## 5.2. Estudo dos enrocamentos

O estudo dos enrocamentos é geralmente efectuado recorrendo a ensaios de compressão unidimensional, que permitem conhecer a deformabilidade, e de ensaios de compressão triaxial que procuram caracterizar a resistência ao corte dos enrocamentos. Os ensaios são geralmente executados sobre granulometrias modeladas a partir das curvas granulométricas de campo.

Nos enrocamentos, a diminuição da resistência devido à molhagem aumenta a fracturação dos elementos rochosos, resultando maiores assentamentos por colapso e a diminuição do ângulo de atrito (Tabela 3). Este fenómeno é de um modo geral rápido, e mais significativo nos enrocamentos soltos que nos enrocamentos densos, como verificámos para os materiais da barragem de Paradelá (QUINTA FERREIRA *et al.*, 1987; VEIGA PINTO *et al.*, 1988). A diminuição do índice de vazios inicial nos enrocamentos permite diminuir a sua deformabilidade.

**Tabela 3** — Variação do ângulo de atrito devido à submersão para diferentes estados de compacidade do enrocamento de Paradelá (QUINTA FERREIRA *et al.*, 1987).

Material	Condições de ensaio	$\sigma_3 = 700 \text{ kN/m}^2$	
		$I_D = 70 \%$	$I_D = 97 \%$
Granito	seco	37,0°	39,3°
	submerso	35,7°	36,4°

$I_D$  — Densidade relativa;

$\sigma_3$  — Tensão principal mínima.

A resistência ao corte dos enrocamentos diminui com o aumento do estado de tensão aplicado. Para um mesmo tipo de material com estados de compacidade diferentes, o material mais denso apresenta maior resistência ao corte (Tabela 3).

Como já referimos, para as metadolomias a molhagem não mostrou diminuir a resistência dos fragmentos rochosos individualmente. Por outro lado, no ensaio de compressão unidimensional, montado a seco e submerso quando sujeito a uma tensão de 2 MPa, verificou-se um aumento da deformação axial de 1,25 % (Fig. 9 e Tabela 4). Este resultado mostra a necessidade de proceder à

molhagem do enrocamento durante a colocação, pois poderiam ocorrer assentamentos por colapso durante a vida da barragem, quando as cargas são mais elevadas, caso o enrocamento fosse inicialmente colocado a seco e sofresse molhagem.

**Tabela 4** — Resultados dos ensaios de compressão unidimensional sobre as metadolomias da Apartadura (VEIGA PINTO e ANA QUINTELA, 1989).

Material	Condições de ensaio	$I_D$ (%)	$E_{oed}$ [ $\sigma_1 = 1$ ] (MPa)	$\Delta\epsilon_{a_{sub}}$ (%)	$\epsilon_{a_{per}}$ (%)
Metadolomia	seco	100%	360	1,25	1,6
	húmido	100%	190	—	$\approx 0$

$I_D$  — Densidade relativa;

$E_{oed}$  — Módulo edométrico secante para  $\sigma_1 = 1$  MPa;

$\Delta\epsilon_{a_{sub}}$  — Aumento da deformação axial devido à submersão;

$\epsilon_{a_{per}}$  — Deformação axial permanente após descarga.

## 6. COLOCAÇÃO E COMPACTAÇÃO DOS ENROCAMENTOS

Na determinação das condições de campo mais adequadas para a colocação e compactação dos materiais de enrocamento utilizam-se aterros experimentais, fazendo variar a espessura das camadas, a energia de compactação e o teor em água.

Após a colocação, o material é espalhado em camadas cuja espessura, para rochas sãs e de granulometria grosseira, pode atingir valores de 2 m, enquanto que para rochas de menor resistência pode atingir 1 m. O material deve ser colocado com a técnica que geralmente se designa de «deposição em cordão», sendo depositado sobre a camada, a cerca de 5 metros da frente, e empurrado para a frente em avanço. Este procedimento permite a colocação dos elementos maiores na base da camada, pelo que o aplanamento da superfície é mais fácil, melhorando as condições para a circulação do cilindro vibrador. Segundo MARANHA DAS NEVES e VEIGA PINTO (1988), a segregação resultante não apresenta qualquer efeito negativo no comportamento estrutural do enrocamento.

A rega dos materiais é prática corrente durante a fase de construção, tendo como finalidade aumentar os assentamentos. Utilizam-se frequentemente volumes de água que variam entre 10 % e 30 % do volume do material a compactar. ROMANA (1990) refere que a adição de 10 % de água é suficiente o que está de acordo com COOKE e SHERARD (1987). PENMAN (1983) sugere mesmo que bastará um teor em água entre 6 e 10 %, dependendo do tipo de enrocamento. A molhagem diminui a resistência dos materiais de enrocamento, pelo que é conveniente a sua execução nas barragens com grande altura e em especial nas zonas sujeitas às maiores tensões. Após a regularização da superfície das faixas, colocam-se placas para a medição topográfica dos assentamentos provocados pela compactação. Os pontos de medição são fixos, sendo distribuídos segundo uma malha regular. Segundo JUSTO (1990), o valor médio dos assentamentos dá uma ideia média da variação na densidade. Para um dado cilindro vibrador e uma espessura de camada pode-se determinar o número de passagens a partir da qual não há melhoria na compactação.

A influência da água na compactação dos enrocamentos foi também analisada no início da construção dos aterros experimentais da barragem do Lagoacho. Aqui utilizou-se um volume de água de aproximadamente 10 %. A Fig. 10 apresenta os assentamentos obtidos para o enrocamento tipo 3C, seco e molhado, em função do número de passagens do cilindro vibrador. No enrocamento molhado, após oito passagens do cilindro vibrador, os assentamentos foram 23 % superiores aos observados no enrocamento seco, o que é muito inferior aos 85 % apresentados por ROMANA (1990). Esta diferença deve-se, em nosso entender, a duas razões principais. A primeira é que os materiais ensaiados na barragem de Huesna são xistos siliciosos com intercalações de argilas, com resistência muito inferior aos materiais graníticos do enrocamento do Lagoacho. A diminuição de resistência das rochas devido à molhagem é proporcionalmente maior nas amostras menos resistentes, permitindo maiores assentamentos. A segunda razão, apenas respeitante aos materiais do Lagoacho, é que o teor médio em água dos enrocamentos considerados como secos é de 2,2 %, enquanto que para os enrocamentos molhados esse valor passou para cerca de 2,9 %. Sabendo-se que a diminuição da resistência das rochas parcialmente saturadas, em relação ao estado seco, é muito maior para baixos teores em água do que próximo da satu-

ração total, facilmente entendemos que os 2,2 % de água terão diminuído a resistência do granito e que o aumento de 0,7 % de água por molhagem ainda proporcionou o incremento de 23 % nos assentamentos.

Na Tabela 5 apresentamos alguns resultados obtidos nos aterros experimentais da barragem do Lagoacho.

Para um mesmo número de passagens, o aumento da espessura das camadas faz diminuir o peso volúmico aparente seco e aumentar o índice de vazios em resultado da diminuição da eficiência da compactação. O aumento da espessura da camada distribui a energia aplicada, pelo que a compactação é menos eficiente em particular na base.

Dentro de cada faixa, o aumento do número de passagens do cilindro vibrador nem sempre faz aumentar o peso volúmico, como seria de esperar, devido à heterogeneidade da granulometria que é expressa pela variação do coeficiente de uniformidade. O aumento do número de passagens permite acumular até certo nível as deformações sofridas.

**Tabela 5** — Alguns resultados dos ensaios nos aterros experimentais do Lagoacho com materiais graníticos.

Material	Altura da camada (m)	Número de passagens	Cu	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e
3C	0,8	0	135	—	—
		4	290	22,4	0,17
		6	150	22,7	0,15
		8	750	22,8	0,15
3D	1,0	0	103	—	—
		4	143	21,0	0,23
		6	63	21,5	0,20
		8	160	22,5	0,15

Cu — Coeficiente de Uniformidade;

$\gamma_d$  — Peso volúmico aparente seco;

e — Índice de vazios.

Os pesos volúnicos aparentes obtidos são de um modo geral elevados, variando entre 21 e 23 kN/m<sup>3</sup> para os enrocamentos graníticos do Lagoacho e entre 20 e 25 kN/m<sup>3</sup> para os enrocamentos

de metadolomias da Apartadura. Os menores valores tendem a ocorrer para os materiais de maiores dimensões e nas camadas mais espessas. A percentagem de finos ( $\emptyset \leq 0,074$  mm) é de um modo geral inferior a 4 % para o Lagoacho e inferior a 9 % para a Apartadura.

Os resultados dos aterros experimentais da barragem de Sallente (SERRANO, 1982) reforçam o anteriormente apresentado, pois, como refere este autor, as camadas contendo mais finos apresentaram menores assentamentos durante a compactação. Na barragem da Foz do Areia (PINTO *et al.*, 1982), apesar do enrocamento ter sido compactado com 4 passagens do cilindro vibrador de 10 toneladas e de se ter molhado com 25 % da água, a utilização uma granulometria pouco extensa, com um coeficiente de uniformidade inferior a 10, fez com que a deformabilidade fosse muito elevada e os assentamentos fossem 5 a 6 vezes superiores aos observados noutras barragens.

## 7. CONCLUSÕES

A geologia de engenharia tem um vasto leque de assuntos em que pode intervir para o projecto e construção de barragens de enrocamento, indo desde a selecção do local da barragem e o estudo das fundações até à caracterização dos materiais rochosos a utilizar nos enrocamentos e à interpretação do comportamento da estrutura.

Em termos de segurança as barragens de enrocamento têm mostrado ser estruturas fiáveis. Os principais problemas encontrados estão relacionados com a erosão e percolação na fundação ou no núcleo impermeável, e ainda devido a deteriorações da cortina impermeável ou nos enrocamentos de protecção. As condições hidrogeológicas na fundação são frequentemente mais condicionantes para a construção das barragens de enrocamento que os problemas de resistência e de deformabilidade.

Os resultados dos ensaios sobre granitos e metadolomias confirmam que a resistência das rochas cristalinas pouco porosas é grandemente condicionada pelas fissuras e que a porosidade deve ser utilizada em simultâneo com outros parâmetros que permitam uma melhor aproximação às características de resistência.

Na determinação da resistência dos fragmentos rochosos irregulares concluímos ser o ensaio de carga pontual mais conveniente



que o ensaio de esmagamento. Da análise comparativa entre os dois ensaios destacamos que os resultados do ensaio de esmagamento e de carga pontual estão relacionados, podendo o ensaio de carga pontual substituir com vantagem o ensaio de resistência ao esmagamento, pois está melhor definido e é mais fácil de executar.

A determinação das características dos enrocamentos através da realização de ensaios permite desde a simples extrapolação das propriedades dos enrocamentos baseados em propriedades índice até à execução de ensaios em câmaras de grande diâmetro em que são obtidos os parâmetros mecânicos do enrocamento.

Na determinação das condições de campo mais adequadas para a colocação e compactação dos enrocamentos, apresenta grande interesse a realização dos aterros experimentais. As propriedades das rochas utilizadas e as condições de construção dos aterros de enrocamento são as principais condicionantes do comportamento futuro da estrutura de enrocamento.

Os resultados mostram que a diminuição da espessura das camadas, o aumento da energia de compactação, a utilização de granulometrias extensas e a molhagem diminuem o índice de vazios, aumentam o peso volúmico e melhoram as características mecânicas. Mesmo quando os efeitos da água não se fazem sentir significativamente ao nível do fragmento rochoso individual, os seus efeitos cumulativos são visíveis quando o enrocamento está sujeito a tensões elevadas. A adição de cerca de 10 % de água mostrou ser suficiente para proporcionar o colapso dos enrocamentos e aumentar a eficiência da compactação.

*Agradecimento* — O autor agradece ao Prof. Dr. João Cotelto Neiva a orientação durante os trabalhos conducentes ao presente artigo. Ao Eng. António Veiga Pinto agradece a supervisão dos estágios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Agradece nomeadamente ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e à Electricidade de Portugal as condições proporcionadas para a concretização do trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

CFGB (1982) — La reconnaissance de sites de barrages; Difficultés rencontrées. Por um grupo de trabalho do Comité Francês das Grandes Barragens, Proc. 14<sup>th</sup> Cong. ICOLD, Q.53, R.55, pp. 877-897, Rio de Janeiro.

- CHARLES, J. A. (1973) — Correlation between laboratory behaviour of rockfill and field performance with particular reference to Scammonden dam. Tese de Ph. D., Imperial College of Science and Technology, Londres.
- COOKE, J. B. e SHERARD, J. L. (1987) — Concrete-face rockfill dam. II Design. *Journal of Geot. Eng.*, ASCE, N.º 10, Oct., pp. 1113-1132.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1982) — Laboratory study of thermally-fissured rocks. 4<sup>th</sup> Int. Cong. on Deterioration and Preservation of Stone Objects, Louisville. Memória do LNEC N.º 583.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1986) — Contribuição para o estudo das rochas carbonatadas e para a sua classificação geotécnica. Relatório do LNEC, 45 pp., Lisboa.
- DELGADO RODRIGUES, J. e JEREMIAS, F. T. (1990) — Assessment of rock durability through index properties. Proc. 6<sup>th</sup> Int. Cong. of the IAEG, Vol. 4, pp. 3055-3060, Amsterdam.
- FERNANDES, L. G.; OLIVEIRA, E. e PORTO, N. V. (1958) — Rockfill dams: The Paradela concrete face dam. *Jour. of the Power Division*, Vol. 84, N.º PO4, pp. 1747-1 a 27, A.S.C.E.
- (1960) — A barragem de Paradela, 1.<sup>a</sup> Jorn. Luso-Brasileiras de Eng. Civil, LNEC, Lisboa.
- GUIFU, X. e HONG, L. (1986) — On the statistical analysis of data and strength expression in the rock point load tests. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Cong. of the IAEG, 1.5.7, pp. 383-394, Buenos Aires.
- ICOLD (1979) — Deterioration cases collected and their preliminary assessment. Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs, 2 Vol.
- JUSTO, J. L. (1990) — Test fills and in situ tests. NATO ASI in Advances in Rockfill Structures, LNEC, Lisbon, 18-29 June. Editado por Maranhã das Neves, Kluwer Academic Publishers, cap. 7, pp. 153-193.
- MARANHã DAS NEVES, E. (1978) — Os aterros de enrocamento. Tendências actuais e seu reflexo em Portugal. Seminário N.º 235 — Enrocamentos, 15 pp., LNEC, ou Geotecnia N.º 26 (1979), Lisboa.
- e VEIGA PINTO, A. (1988) — Enrocamento compactado: Um novo material de construção. *Revista da Ordem dos Engenheiros*, Ano II, N.º 18, pp. 47-53.
- MARSAL, R. J. (1969) — Particle breakage in coarse granular soils. Proc. 7<sup>th</sup> ICSMFE, Specialty Session N.º 13, pp. 155-165.
- NEIVA, J. M. C. (1957) — Geologia aplicada. *Memórias e Notícias*, Publ. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade de Coimbra, N.º 44, 24 pp.
- (1982) — Geologia de barragens. *Geonovas*, N.º 4, pp. 3-12.
- OLIVEIRA, R. (1979) — Engineering geological problems related to the study, design and construction of dams. Proc. Int. Symp. on Engineering Geological Problems in Hydrotechnical Construction, Panel Report, Theme 1, Tbilisi (USSR). In *Bulletin of the IAEG*, N.º 20, pp. 4-7; Memória N.º 529, LNEC, Lisboa.
- PENMAN, A. M. (1982) — Materials and construction methods for embankment dams and cofferdams. Proc. 14<sup>th</sup> ICOLD, Q. 35, G. R., pp. 1105-1228, Rio de Janeiro.

- PENMAN, A. M. (1983) — Materials for embankment dams. *Water Power & Dam Construction*, January, pp. 15-19.
- e CHARLES, J. A. (1976) — The quality and suitability of rockfill used in dam construction. Transactions of 12<sup>th</sup> ICOLD, Vol. 1, pp. 533-556, México.
- PINTO, N. S., MATERON, B. e MARQUES, P. L. (1982) — Design and performance of Foz do Areia concrete membrane as related to basalt properties. Proc. 14<sup>th</sup> ICOLD, Q.35, R.51, pp. 873-906, Rio de Janeiro.
- PIRCHER, W. (1982) — Influence of geology and geotechnics on the design of dams. Proc. 14<sup>th</sup> Int. Cong. ICOLD, Q.53, G.R., pp. 1019-1114, Rio de Janeiro.
- QUINTA FERREIRA, M. (1990 a) — Geoquímica da alteração e propriedades de granitos com utilização em enrocamentos. *Memórias e Notícias*, Publ. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade de Coimbra, N.º 109, pp. 1-33, Coimbra.
- (1990 b) — Aplicação da geologia de engenharia ao estudo de barragens de enrocamento. Dissertação de doutoramento apresentada na Universidade de Coimbra, 322 pp., Coimbra.
- (1991) — Caracterização expedita de rochas graníticas, 4.º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 1, pp. 231-241, Lisboa, 2 a 4 de Outubro.
- e VEIGA PINTO, A. (1988) — Estudo da resistência à compressão simples de granitos numa prensa rígida. Geotecnia N.º 54, pp. 27-39.
- ; ANA QUINTELA e VEIGA PINTO, A. (1987) — Barragem de Paradela. Estudo dos enrocamentos e análise do comportamento estrutural. Relatório 230/87-NF/NP do LNEC, Outubro de 1987, Lisboa.
- ; DELGADO RODRIGUES, J.; VEIGA PINTO, A. e JEREMIAS, F. T. (1990) — Evaluation of strength of irregular rock lumps for characterization of rockfills. Proc. 6<sup>th</sup> Int. Cong. of the IAEG, Vol. 4, pp. 3119-3124, Amsterdão.
- RAMPON, A. (1986) — Géologie et barrages: Programme d'étude, commentaires, petits barrages. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Cong. IAEG, 4.1.18, pp. 1197-1205, Buenos Aires.
- ROBERTS, C. M. (1958) — The Quoich rockfill dam. Proc. 6<sup>th</sup> ICOLD, Vol. 3, pp. 101-121.
- ROMANA, M. (1990) — Rockfill compaction tests at the Huesna Dam (Spain). NATO ASI in Advances in Rockfill Structures, LNEC, Lisbon, 18-29 June, 22 pp.
- SERRANO, M. (1982) — Investigation on construction materials for the Sallente dam. Proc. 14<sup>th</sup> Cong. ICOLD, Q.55, R.56, pp. 1007-1026, Rio de Janeiro.
- TERZAGHI, K. (1960) — Discussion, Salt Springs and Lower Bear River dams. Trans ASCE, Vl. 125, parte 2, pp. 139-159.
- TOURENQ. C. e FOURMAINTRAUX, D. (1974) — L'indice de qualité des roches, quelques applications. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Cong. IAEG, IV-20.1-8, S. Paulo.
- VEIGA PINTO, A. (1983) — Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento. Tese para especialista do LNEC, 157 pp., Lisboa.
- e ANA QUINTELA (1989) — Barragem da Apartadura — Aterros expe-

- rimentais e ensaios laboratoriais. Relatório 99/89-NF do LNEC, Maio de 1989, Lisboa.
- e QUINTA FERREIRA, M. (1989) — Especificação de construção dos enrocamentos — Barragem da Apartadura. Filme em vídeo com a duração de 20 minutos, 3.º Encontro Nacional de Geotecnia, Porto.
- e ANA QUINTELA (1988) — Estudo do enrocamento e análise do comportamento estrutural da barragem de Paradela. *Geotecnia* N.º 52, pp. 3-23.
- WILSON, S. D. e MARSAL, R. J. (1979) — Current trends in design and construction of embankment dams. ASCE.