

# PROPRIEDADES ÍNDICE DAS ROCHAS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ENROCAMENTOS\*

Rock index properties for prediction of rockfill behaviour

por

J. DELGADO RODRIGUES\*\*

A. VEIGA PINTO\*\*\*

E. MARANHA DAS NEVES\*\*\*\*

**RESUMO** — Em cerca de dois terços do território português ocorrem materiais rochosos o que justifica uma profunda preocupação na investigação das propriedades geotécnicas destes materiais. Rochas graníticas, gnaisses, xistos, filádios, margas, calcários e outros tipos litológicos muito diversificados apenas podem ser estudados com metodologias apropriadas a cada caso específico.

Os autores apresentam alguns aspectos da filosofia usualmente seguida nos estudos de materiais para construção de aterros e de obras de protecção. A previsão do comportamento de obras de engenharia é um objectivo da investigação que se espera vir a alcançar num futuro próximo pelo recurso ao conhecimento das propriedades índice críticas que estejam estreitamente ligadas ao referido comportamento.

São apresentados e discutidos alguns resultados de campo e de laboratório obtidos para diferentes tipos litológicos.

**SYNOPSIS** — In about two thirds of the Portuguese territory rock materials are outcropping justifying a deep concern in the research of the engineering geological properties of such materials. Granitic rocks, gneisses, schists, slates, marls, limestones and other very diversified lithotypes can only be dealt with by methodologies appropriate for each specific case.

The authors present a few aspects on the philosophy usually followed in the studies of materials for fill construction and for protection works. Prediction of the behaviour of engineering works is an objective of the research which is expected to be feasible in a near future by resorting to the knowledge of the critical index properties that are closely linked with the behaviour referred to.

Some laboratory and field results obtained for diversified rock types are presented and discussed.

---

\* Comunicação apresentada no IV<sup>th</sup> International Congress on Engineering Geology, New Delhi, Dez. 1982.

\*\* Geólogo, Investigador Principal do Núcleo de Prospecção do LNEC.

\*\*\* Engenheiro Civil, Investigador Auxiliar do Núcleo de Fundações do LNEC.

\*\*\*\* Engenheiro Civil, Investigador Coordenador e Chefe do Departamento de Geotecnia do LNEC.

## 1. – INTRODUÇÃO

Há importantes obras de engenharia onde os enrocamentos são correntemente utilizados como é por exemplo o caso de barragens, molhes portuários (quebra-mares), diques de protecção contra cheias, auto-estradas e aeroportos. Nestas estruturas os materiais rochosos podem ter duas funções principais:

- a) constituem a parte principal da própria estrutura;
- b) protegem a estrutura ou elementos estruturais contra certas acções externas indesejáveis.

É óbvio que a necessidade de saber compreender as características mecânicas dos elementos rochosos e a sua evolução com o tempo, é diferente nos dois tipos de aplicações atrás referidas.

Numa primeira aproximação e quando comparados com outros materiais do domínio da mecânica dos solos, os maciços de enrocamento têm resistências ao corte e permeabilidades elevadas e deformabilidades médias a reduzidas. Podem por vezes exibir apreciáveis modificações com o tempo com incidência no comportamento de importantes obras de engenharia.

O estudo das características mecânicas depende principalmente de alguns factores específicos tais como o papel que se espera venha a ser desempenhado pelo material (nível e tipo de solicitação) peculiaridades da matriz granular (dimensão e forma dos elementos, índice de vazios, estrutura, etc.). O comportamento do enrocamento tem certos aspectos fora de comum relativamente a outros materiais geotécnicos naturais usados na construção tais como a deformabilidade crescente face à aplicação de tensões normais sucessivamente crescentes, variação granulométrica com o tempo, etc.

Em termos latos, quanto mais resistentes ao esmagamento são os elementos rochosos melhor será o comportamento mecânico do enrocamento. E porque a caracterização mecânica laboratorial dos aterros de enrocamento é lenta e muito cara dadas as dimensões das amostras, pareceu importante desenvolver critérios de avaliação da qualidade dos materiais rochosos, tendo em atenção os diferentes tipos litológicos e graus de alterabilidade.

A evolução com o tempo de importantes propriedades, tais como a relação tensão-deformação (muito importante em aterros de enrocamento já que são o constituinte fundamental da estrutura) e a evolução da granulometria (decisiva no comportamento do enrocamento usado para protecção de algumas estruturas), pode ser prevista, para um dado tipo de rocha, estudando a sua alterabilidade e identificando e caracterizando os agentes de meteorização.

Podem sumariar-se estas considerações dizendo que a natureza dos ensaios a executar com os fragmentos da rocha é definida de acordo com a função do enrocamento, litologia respectiva e prováveis agentes meteorizadores. As correlações

Enrocamento de protecção: durabilidade ↔ alterabilidade

Estrutura de enrocamento: deformabilidade ↔ grau de alteração

devem ser analisadas em cada caso específico.

De acordo com o plano de acção descrita, o LNEC tem vindo a realizar ensaios de caracterização em materiais rochosos a empregar em algumas obras tais como os usados no revestimento do paramento de diques de protecção contra cheias (calcários), no revestimento de descarregadores para protecção contra acção erosiva do transporte sólido (granitos), em material para rip-rap (vários tipos litológicos) em aterros de barragens (xistos, grauvaques e calcários) e para protecção de obras marítimas (rochas de vários tipos).

Após observação do comportamento do enrocamento dum ponto de vista da engenharia analisa-se e critica-se uma previsão inicial do comportamento baseado na metodologia proposta.

A experiência permitirá no futuro a introdução de correcções no que diz respeito ao tipo de ensaio e melhorar a interpretação dos resultados.

Neste trabalho apresentam-se dois exemplos através dos quais se pretende salientar a utilidade do plano de pesquisa que, com generalidade, acaba de se descrever. No primeiro caso o enrocamento constitui a parte principal da estrutura duma barragem de aterro e, no segundo, o enrocamento é usado como material de protecção.

## 2. – ESTUDO DE MATERIAIS PARA ENROCAMENTO

O estudo dum enrocamento tem início na própria pedra de onde vai ser extraído o material.

A composição litológica, os aspectos tectónicos e o tipo de alteração têm grande importância na qualidade do material disponível, nas condições de exploração e no comportamento dos elementos rochosos durante a vida da estrutura por eles constituída ou que eles protegem. É assim necessário levar a cabo um reconhecimento geológico adequado na zona dos eventuais empréstimos e desenvolver estudos *in situ* complementados por ensaios laboratoriais com os materiais rochosos.

É convicção dos autores que tanto os estudos laboratoriais como os estudos de campo devem sofrer adaptações em cada caso específico, particularmente no que diz respeito à litologia das formações rochosas em causa. Concretizando um pouco mais, dir-se-á que os programas de estudo para rochas ígneas, como os granitos, devem ser diferentes dos gabros ou basaltos, ambos diferentes, por sua vez, dos mais adequados a rochas sedimentares, tais como os calcários ou os arenitos.

No presente trabalho só se fará referência à caracterização laboratorial dos materiais rochosos não se abordando assim o reconhecimento e caracterização *in situ*.

Um aspecto de primordial importância é compreender as modificações que ocorrem quando um elemento rochoso é extraído duma pedreira e colocado num aterro de enrocamento. É evidente que há uma perturbação do «equilíbrio» em que a rocha se encontrava sofrendo o elemento certas modificações conducentes à obtenção dum novo estado de «equilíbrio» de acordo com as condições prevalecentes no aterro.

Um dos parâmetros que maior modificação sofre é a tensão confinante, mas outrotanto não deixa de acontecer com as condições de temperatura, estado de tensão, fluidos intersticiais e regime de escoamento. A exposição aos agentes de meteorização é também diferente o que dá origem a novos mecanismos de alteração, tais como a cristalização de sais em certas condições dos enrocamentos de protecção, variações periódicas do teor em água, etc.

A taxa de progressão da alteração é frequentemente aumentada pela diminuição e pela exposição a novas condições, sendo então uma importante tarefa no estudo dos enrocamentos a previsão do comportamento dos elementos rochosos.

Há uma diferença fundamental entre as situações em que os elementos rochosos são utilizados como constituintes da própria estrutura e aquelas em que os referidos elementos rochosos têm funções de protecção como é o caso do rip-rap ou do uso nos revestimentos de quebra-mares ou outras estruturas de protecção costeira.

Em consequência da experiência do LNEC no estudo de enrocamentos, este trabalho apresenta os principais aspectos dos métodos geralmente utilizados na caracterização das pedras para uso na construção de enrocamentos e alguns casos de obra com intervenção do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Para uma melhor clarificação daqueles métodos faz-se referência a diferentes tipos petrográficos.

Dada a generalidade com que ocorrem no território português apresentam-se quatro tipos litológicos, variando desde as rochas ígneas (granitos, gabros) às metamórficas (rochas xistosas) e sedimentares (calcários e rochas afins).

#### a) Rochas ígneas ácidas

Rochas como os granitos, sienitos, e granodioritos são exemplos de rochas ígneas ácidas que se caracterizam pela presença de quartzo, feldspato e minerais ferro-magnesianos.

Quando sãs, estas rochas são um material de construção excelente. Comportamentos diferenciados dos seus minerais constituintes, no que respeita às acções térmicas e mecânicas, dão origem a microfissuração e, consequentemente, à ocorrência duma maior permeabilidade matricial com ocorrência frequente de diferentes estados de alteração no interior do mesmo maciço rochoso.

O comportamento destes materiais é dependente do estado de alteração e assim a fissuração e a ocorrência (ou ausência) de minerais argilosos são os principais factores de que vai depender o seu futuro comportamento.

A porosidade, a permeabilidade da rocha, a velocidade dos ultrassons, a resistência à compressão simples, a resistência à abrasão, a composição mineralógica e a textura são os parâmetros de maior significado para a caracterização destes materiais.

Após a caracterização laboratorial é necessário saber quais os materiais que são adequados para o fim em vista. São por isso necessários resultados padrão mas, infelizmente, não se encontram na bibliografia da especialidade.

Além disso e em virtude da frequente ocorrência na mesma pedreira de variações graduais entre o material muito são e o extremamente alterado, são necessários critérios simples, a usar durante a exploração da pedreira, de modo a separar os materiais não aceitáveis. É frequente o recurso ao critério visual mas seria conveniente aprofundar o sistema segundo uma via quantificadora, como um parâmetro de resistência (ensaio de carga pontual, por exemplo), absorção de água e/ou velocidade dos ultrassons.

Por outro lado a previsão do comportamento de rochas graníticas necessita de informações provenientes de ensaios de laboratório normalmente de natureza complementar. Uma decisão final apenas pode ser tomada após julgamento sobre o conjunto de resultados e tomando em linha de conta os aspectos petrográficos da rocha e as condições de ambiente locais. Ensaio de durabilidade (sulfato de magnésio, água oxigenada), expansão por embebição e porosidade podem ser muito úteis neste julgamento.

#### *b) Rochas ígneas básicas*

Basaltos gabros e doleritos são exemplos destas rochas que são isentas de quartzo e possuem feldspatos cálcicos ou cálcio-sódicos e minerais ferromagnesianos.

Uma das suas características mais notórias é a grande diferença de comportamento entre rochas sãs e alteradas (mesmo que ligeiramente). De facto, quando sãs estas rochas são muito resistentes e estáveis e exibem, em geral, muito baixas porosidades e permeabilidades, significando que a sua fissuração é incipiente, mas quando alteradas, elas são das mais perigosas. Isto é uma consequência da ocorrência generalizada de minerais argilosos (muito frequentemente de variedades expansivas) resultantes da alteração dos minerais ferromagnesianos. Quando as condições do ambiente são substancialmente modificadas, o que acontece durante a extracção, a expansão dos minerais argilosos dá origem à degradação rápida da rocha que pode atingir a ruína completa.

Para o estudo destas rochas é importante a detecção de minerais argilosos e a avaliação da sua importância no interior da rocha. Estudos ao microscópio e aos Raios X podem ser efectuados para detecção e identificação dos minerais argilosos, enquanto que o ataque pela água oxigenada e o tratamento com etileno-glicol podem ser referidos entre os mais adequados para evidenciar a importância destes minerais no interior da rocha (Delgado Rodrigues, 1976).

Resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons são parâmetros adequados para caracterização do estado de alteração, sendo a porosidade igualmente útil.

### c) Rochas xistosas

Sob esta designação são consideradas as rochas com foliação vincada e que foram sujeitas a diferentes graus de metamorfismo. Filádios e xistos são frequentes no território português e a eles podem ser associados os grauvaques pela estreita relação na origem e evolução e pela sua ocorrência em sequências interestratificadas.

A foliação é responsável pelo aparecimento de forte anisotropia nas características mecânicas destas rochas. A composição mineralógica é variada mas frequentemente com minerais micáceos, quartzo e feldspatos.

Mesmo em rochas sãs as superfícies de foliação frequentemente exibem baixa coesão, razão pela qual estas rochas se dividem em folhas tão características.

Variações periódicas no teor em água e a libertação de tensões quando expostas aceleram a taxa de degradação.

Quando alteradas estas rochas ficam «apodrecidas» e podem ser usadas nas estruturas de terra tradicionais. Tal tem sido o caso em Portugal onde algumas barragens são construídas com este tipo de material.

O comportamento de tais rochas é muito dependente das condições da sua utilização. Tem sido provado por ensaios de laboratório que elas podem ser utilizadas como enrocamentos desde que não sejam colocadas nas zonas de protecção dos taludes. De facto, a rápida degradação por libertação de tensões e esfoliação devida a variações do teor em água não os recomendam como materiais de protecção.

Em Portugal, onde existem grandes manchas de rochas xistosas, os enrocamentos de protecção (*rip-rap*) têm sido construídos à custa dos grauvaques interestratificados, habitualmente com maior resistência à alteração. Este é o caso da barragem da Meimosa onde os xistos são usados para o aterro e os grauvaques para os enrocamentos de protecção (*rip-rap*).

A sua caracterização está longe de ser simples, principalmente devido à anisotropia muito vincada.

A filosofia de estudo deste caso particular tem como objectivo principal a caracterização da foliação, particularmente devido à facilidade com que estas rochas se dividem ao longo dela. Dado que os mecanismos de alteração de natureza física são as causas principais de degradação, têm sido usados alguns testes de simulação para a sua avaliação.

Ensaio de envelhecimento acelerado com ciclos de embebição e secagem, habitualmente diferenciãem bem as rochas esfoliáveis das não esfoliáveis. Dado que este

método requer muitos ciclos para obter essa distinção, o que consome muito tempo de ensaio, esta via pode ser substituída por um tratamento de esfoliação extremamente severo. Este método, proposto por Struillou (1969), consiste na saturação da rocha seguida de aquecimento brusco em estufa a 700°C durante 15 minutos. As rochas com foliação muito marcada, e baixa coesão nas superfícies de foliação, dividem-se drasticamente durante este tratamento.

Como a caracterização do estado de alteração é uma tarefa muito difícil, não é viável recomendar, de forma categórica, ensaios específicos para esse fim. A porosidade, que caracteriza o material como um todo, pode ultrapassar as limitações introduzidas pela anisotropia. Resistência e propriedades relacionadas devem ser cuidadosamente analisadas nunca esquecendo a peculiaridade que é a presença de uma forte foliação.

#### d) Rochas calcárias

Embora por vezes muito puras, constituídas quase a 100% por carbonato de cálcio, as rochas carbonatadas apresentam, frequentemente, certa quantidade de impurezas de natureza argilosa, de quartzo, óxidos de ferro, etc. Dolomitos e calcários dolomíticos são também habitualmente estudados sob a designação de calcários.

Quando estão presentes minerais argilosos a sua influência é decisiva nas propriedades destas rochas, bem como no seu comportamento no que diz respeito à resistência à alteração. Abaixamento da resistência, diferença de resistência entre condição saturada e seca, expansibilidade e degradação rápida devida a variações do teor em água estão associados com a presença de minerais argilosos no interior da rocha. Quando estes minerais estão presentes para além de uma certa percentagem, as rochas não são adequadas para certos usos tais como para enrocamentos de protecção. O quartzo é um mineral quase inerte, é muito menos importante e é mesmo benéfico até certa percentagem porque aumenta a resistência mecânica e o desgaste.

Em calcários puros a porosidade total e a porometria são de importância relevante, tendo a textura dos cristais incidência também significativa.

Para a caracterização destas rochas tem sido considerado que o teor em minerais argilosos e a porosidade são os principais parâmetros necessários, sendo também recomendados um parâmetro de resistência e outro relativo ao desgaste por abrasão.

### 3. – ALGUNS CASOS DE APLICAÇÃO DE ENROCAMENTOS COMO ELEMENTOS ESTRUTURAIS OU EM OBRAS DE PROTECÇÃO

Neste capítulo referem-se alguns casos em que a metodologia exposta foi aplicada ou em que se prevê a sua aplicação.

#### 3.1 – *Enrocamento como elemento estrutural*

A ocorrência de materiais de baixa resistência é muito frequente (o argilito, por exemplo, é a rocha sedimentar mais comum, ocorrendo em cerca de 50% dos afloramentos rochosos superficiais (Abeysekera, et al., 1979) e é natural a utilização de grandes quantidades destes materiais na construção de aterros.

No entanto, a sua aplicação não tem sido tão largamente defendida como seria de esperar, porque é muito frequente exigir materiais de enrocamento de elevada resistência sem que esta solução seja justificada em termos técnicos e económicos. Desse modo, é necessário ultrapassar esta tendência e levar a cabo estudos que permitam relacionar o comportamento mecânico com propriedades índice, e analisar os benefícios económicos resultantes da aplicação de materiais de enrocamento de baixa resistência. O principal objectivo desta alínea, é mostrar a aplicação de ensaios expeditos na previsão do comportamento mecânico, o qual depende de um elevado número de factores.

Em grandes áreas de Portugal ocorrem formações xistosas interestratificadas com grauvaques, o que conduziu a uma elevada experiência na sua utilização em barragens de terra. Do ponto de vista da granulometria o material é seleccionado de modo a ter finos (com dimensão inferior a 0,074 mm) em elevada quantidade, reflectindo-se nas propriedades geológicas dos materiais (e obviamente na permeabilidade). Consequentemente a inclinação dos paramentos é suave<sup>(1)</sup>.

A possibilidade de utilizar esse tipo de material como enrocamento (com reduzida percentagem de finos) nos maciços estabilizadores foi sempre preterida devido à ideia generalizada que os enrocamentos têm de ser constituídos por elementos rochosos são e de elevada resistência. De modo a rebater esta questão, realizou-se no LNEC um elevado número de ensaios tendentes a justificar os benefícios económicos que poderão resultar da utilização de enrocamentos xistosos como material de construção, sem comprometer a segurança das barragens. Na análise dos estudos teóricos e experimentais obtiveram-se interessantes correlações entre propriedades índice e propriedades

---

<sup>(1)</sup> Na década de 50 outro facto contribuiu para optar por inclinações suaves: o receio do enfraquecimento das propriedades mecânicas com o envelhecimento. Posterior investigação, acerca da alterabilidade dos materiais, teve uma acentuada importância na análise correcta do problema.



mecânicas que serão apresentadas no próximo parágrafo. Pretende-se aprofundar este estudo com outros tipos de enrocamento (os de maior utilização em Portugal), de modo a obter correlações representativas entre propriedades índice e(ou) propriedades mecânicas da rocha determinadas a partir de ensaios expeditos, e o comportamento mecânico previsto para o enrocamento, tendo em conta a sua aplicação. Obviamente, a observação do comportamento dos materiais nos aterros ou como elementos de protecção tem uma importância relevante neste estudo.

### 3.1.1. — O caso da barragem de Beliche

Esta barragem, em construção neste momento no Sul de Portugal, tem um perfil zonado, sendo os maciços estabilizadores constituídos por enrocamentos de xisto e grauvaque. São utilizados fundamentalmente dois materiais distintos: um composto por xistos e grauvaques alterados (obtidos por meio de um «ripper») que se designa por A (alterado) e o segundo é um grauvaque são (extraído de uma pedra) que se designa por S (são).

As características daqueles materiais de enrocamento foram determinadas em laboratório (ensaios triaxiais e de compressão unidimensional) bem como as propriedades físicas e mecânicas dos respectivos elementos rochosos. No Quadro 1 apresentam-se algumas das propriedades índice dos fragmentos rochosos dos referidos materiais (no material alterado o xisto e o grauvaque ocorrem em partes sensivelmente iguais).

A diferença entre o material são e alterado é bastante acentuada. O material S, por exemplo, tem uma resistência ao esmagamento três vezes superior à do material A. O efeito da água é muito pronunciado em ambos os materiais S e A.

QUADRO 1

Rocha	n (%)	Slake (%)				P <sub>as</sub> (kN)	P <sub>ah</sub> (kN)	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
		1.º ciclo		2.º ciclo				
		Húmido	Seco	Húmido	Seco			
<b>A</b> xisto e grauvaque (alterado)	6,1-18,9	2,23-3,53	0,60-0,70	1,11-1,13	0,36-0,47	2,5-5,8	1,4-2,9	26,7-27,9
<b>S</b> Grauvaque (são)	1,9-4,8	0,93	0,31	0,38	0,21	12,0	7,1	27,2-27,8

n - Porosidade

P<sub>as</sub> - Resistência ao esmagamento média com material seco e  $\bar{D} = 50$  mm (Marsal, 1973)

P<sub>ah</sub> - Idem. Material submerso em água durante 24 horas

γ<sub>s</sub> - Peso volúmico real das partículas

Para estudar a influência da resistência dos elementos rochosos nas características tensão-deformação dos materiais de enrocamento é necessário realizar ensaios laboratoriais com amostras em que todos os outros factores sejam iguais. Os provetes laboratoriais foram construídos com curvas granulométricas homotéticas das de campo, com coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) diferentes para os materiais S e A e respectivamente iguais a 10 e 2,5.

Como todos os provetes foram compactados com densidades relativas ( $D_r$ ) iguais a 100%, deve considerar-se a possibilidade das amostras de material são (S) e alterado (A) não apresentarem o mesmo índice de vazios. No entanto, as diferenças do comportamento mecânico foram tão acentuadas que a eventual influência do índice de vazios deverá ser excedida pelos pronunciados feitos da resistência dos elementos rochosos.

Na Fig. 1 apresentam-se relações tensão-deformação, obtidas de ensaios triaxiais, de amostras submersas de enrocamento são e alterado. Como se pode ver, é bastante pronunciado o decréscimo da resistência ao corte com o aumento do estado de alteração.<sup>(1)</sup>

Realizaram-se ainda ensaios com amostras secas e nas Figs. 2 e 3 apresentam-se as correlações obtidas entre as propriedades físicas e mecânicas de fragmentos rochosos com as características de resistência ao corte para ambas as amostras secas e submersas dos materiais de enrocamento S e A e para diferentes tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ).

No enrocamento alterado (A) o comportamento mecânico é apreciavelmente influenciado pela tensão de confinamento (as maiores tensões de confinamento conduziram a elevadas extensões axiais na rotura). Deve-se, no entanto, sublinhar, com mais realce, o facto do módulo de elasticidade inicial decrescer com o aumento de  $\sigma_3$  já que é uma situação pouco comum. Acrescenta-se ainda que no material alterado as deformações volumétricas são aproximadamente duplas das do material são.

Das curvas granulométricas dos provetes antes e após a realização dos ensaios triaxiais determinaram-se os valores do parâmetro  $B$  (grau de fracturação) (Marsal, 1973) os quais se referem na Fig. 1. O valor de  $B$  é 3 a 6 vezes superior no material alterado. Na Fig. 4 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão unidimensional conduzidos em amostras cilíndricas com 500 mm de diâmetro. Como se pode ver, o efeito da água é muito mais pronunciado no caso do enrocamento alterado (A). Tomando como referência a curva tensão-deformação do material são (S) é interessante notar o deslocamento das outras curvas (no sentido de maiores deformabilidades) que é consequência de um aumento da fracturação dos fragmentos rochosos.

---

(1) Outros ensaios mostraram que o grauque alterado tem um comportamento mecânico aproximado ao obtido com a mistura de xisto e grauque alterados.

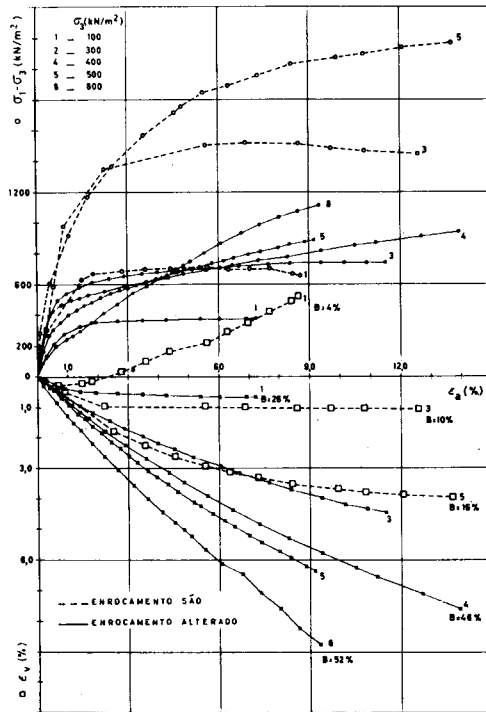


Fig. 1 — Ensaio triaxiais. Amostras submersas

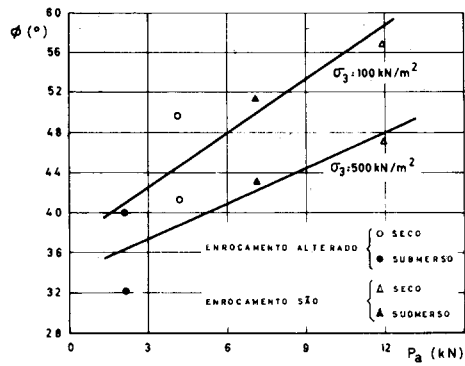


Fig. 2 — Correlação entre o ângulo de atrito interno e a resistência ao esmagamento das partículas.

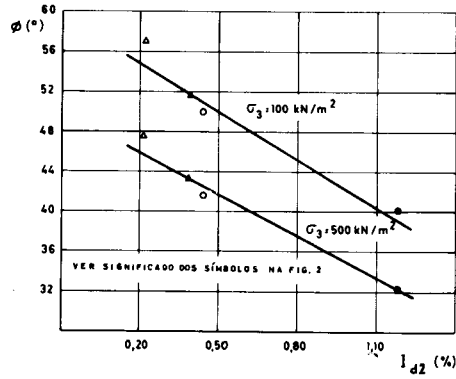


Fig. 3 — Correlação entre o ângulo de atrito interno e o parâmetro do 2.º ciclo do ensaio de desgaste ( $I_{d2}$ )

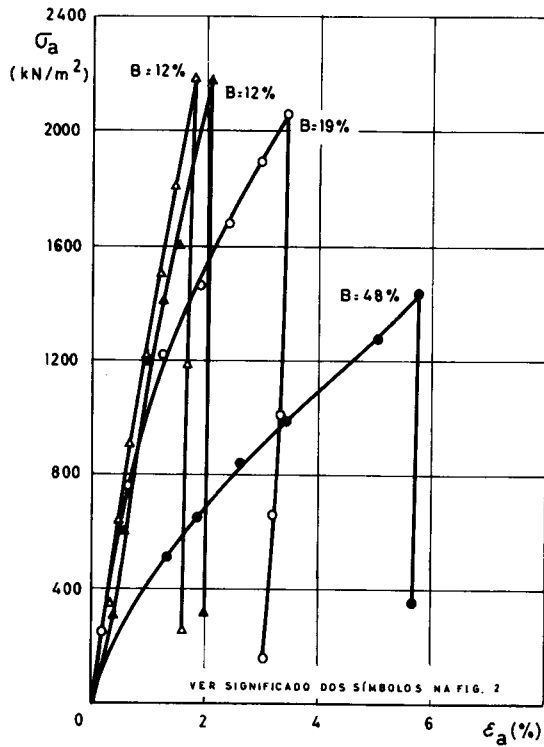


Fig. 4 — Ensaio de compressão unidimensional

Nas Figs. 5 e 6 referem-se as correlações entre os módulos edométricos secantes das amostras da Fig. 4 (para  $\sigma_a = 1400 \text{ kN/m}^2$ ) com a resistência ao esmagamento média ( $P_a$ ) e os resultados do 2.º ciclo do ensaio de desgaste.

Os resultados obtidos permitem concluir que, para estes materiais, as características de deformabilidade dos enrocamentos podem ser aproximadamente previstas a partir das propriedades índice dos fragmentos rochosos.

Este é um método bastante prático e promissor para inferir acerca das características de deformabilidade dos enrocamentos. Deve, no entanto, realizar-se um maior número de ensaios deste tipo e efectuar interpretações idênticas para outros materiais de modo a obter conclusões mais gerais.

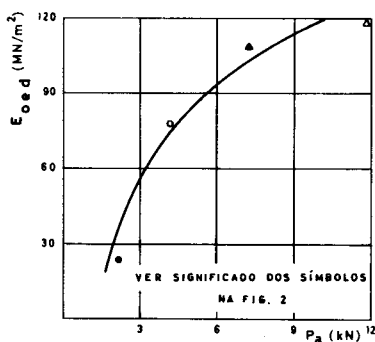


Fig. 5 — Correlação entre módulos edométricos e resistência ao esmagamento das partículas

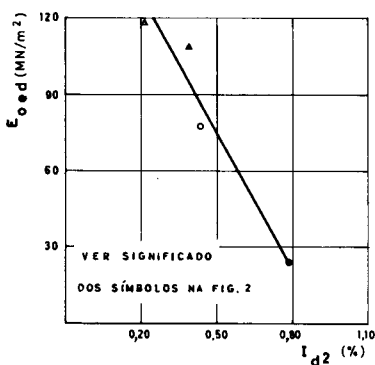


Fig. 6 — Correlação entre módulos edométricos e valores de  $I_{d2}$  do ensaio de desgaste

### 3.2 – Enrocamentos como obras de protecção

Os enrocamentos são usados como obras de protecção nos taludes de montante de barragens de terra e de enrocamento, nos taludes marginais de rios e em obras de defesa costeira tais como molhes, quebra-mares, etc.

Como materiais de protecção as pedras devem conservar a sua integridade durante o tempo de vida da obra resistindo, mesmo, a acções de agentes de alteração tais como temperatura, solicitações mecânicas, soluções salinas, etc. A alterabilidade assume aqui um papel relevante no estabelecimento da adequação da rocha para a finalidade da obra. Esta é uma diferença importante em relação aos enrocamentos como estruturas onde a alterabilidade joga um papel menos significativo.

O tipo de obra, o tipo de rocha, e as condições do ambiente local devem ser analisadas conjuntamente para o estabelecimento do programa de ensaios e na apreciação dos resultados com eles obtidos.

#### 3.2.1 — Protecção da barragem de Meimoa

A barragem do Meimoa é uma estrutura de aterro (com cerca de 52 m de altura) em construção na parte central de Portugal. Localizada numa região xistosa a barragem levantou alguns problemas no que diz respeito à protecção do seu talude de montante. A primeira hipótese considerada previa que a mancha de empréstimo pudesse ser uma pedreira de granito situada a cerca de 15 km do local da obra.

Imediatamente antes do início da construção o empreiteiro da obra propôs o uso de grauvaques ocorrentes nas imediações, o que foi aceite. O estudo desta alternativa foi efectuado pelos autores usando a metodologia aqui apresentada.

Os grauvaques ocorrem na zona do reservatório intercalados nos xistos que serão usados na principal estrutura de enrocamento pelo que a sua extracção será em benefício da capacidade de armazenamento da albufeira.

O estudo dos grauvaques procurou determinar as suas características actuais e, também, prever o seu comportamento futuro.

As suas características são as seguintes:

- Porosidade: 0,65-0,69%
- Massa volúmica aparente: 27,7-28,0 kN/m<sup>3</sup>
- Velocidade de propagação de ultrassons: 4930-5330 m/s
- Resistência à compressão simples: 138-205 MPa
- Los Angeles: 18-19%

Este conjunto de resultados mostra claramente que os grauvaques são muito resistentes, o que está de acordo com o aspecto fresco destas rochas na pedreira.

No que diz respeito à alterabilidade e à previsão do comportamento futuro como enrocamento de protecção alguns outros ensaios foram executados. O ensaio de esfoliação mostrou que os grauvaques também apresentam uma anisotropia importante embora em menor grau que as rochas xistosas.

A expansão por embebição da ordem de  $8 \times 10^{-5}$  e a perda no ensaio de água oxigenada perto de 0,0% sugerem a ausência de minerais argilosos no interior da rocha e portanto uma boa durabilidade.

No ensaio de alteração com o sulfato de magnésio (ASTM C-88) os grauvaques exibem elevada resistência como o mostram claramente as perdas entre 0,2 e 0,5%.

Com base neste conjunto de resultados os grauvaques foram considerados suficientemente bons para protecção do talude de montante da barragem.

### 3.2.2 – Enrocamentos marítimos de protecção

#### a) Rochas graníticas

Além dos problemas comuns aos enrocamentos normais, os enrocamentos marítimos são confrontados com duas condições peculiares: a exposição à agitação marítima e o contacto com água do mar com concentrações de sais muito grandes.

A dinâmica do mar é tão importante que o dimensionamento correcto do tamanho dos blocos é decisivo para o bom comportamento do enrocamento e ultrapassa em importância o papel da alterabilidade da rocha. Este parâmetro só deve ser considerado quando se verifique que o projecto do tamanho dos blocos está de acordo com as condições de agitação. A nossa experiência com enrocamentos marítimos de protecção mostra que podem existir enrocamentos de rochas graníticas muito alteradas (p. ex. com velocidades de propagação de ultrassons de cerca de 1650 m/s e resistência à compressão simples de 29 MPa) que exibem comportamento satisfatório em ambiente calmo no interior do porto de Leixões porque os blocos foram sobredimensionados, enquanto que, noutras situações, tal como nos quebra-mares de Espinho, ocorreu a completa ruína com granitos sãos e muito resistentes (velocidades de propagação de ultrassons de 4570 m/s e resistência à compressão simples de 160 MPa) porque os blocos estavam claramente subdimensionados para as condições de agitação do local.

Mesmo assumindo um dimensionamento correcto do tamanho dos blocos é difícil e até ao momento inviável, apontar valores quantitativos para os materiais aceitáveis. A combinação da resistência e da energia da agitação é certamente importante sendo admissível usar granitos moderadamente alterados e pouco resistentes em condições muito especiais como foi demonstrado acima. Esta é uma característica muito específica das rochas graníticas a qual é inaceitável, por exemplo, nas rochas básicas devido à ocorrência frequente, nestas rochas, de minerais expansivos que podem sofrer degradação severa mesmo em ambientes de fraca agitação.

## b) Rochas ígneas básicas

Tal como mencionado anteriormente, a previsão do comportamento de rochas ígneas básicas necessita de resultados provenientes de ensaios de resistência (compressão, abrasão), mas são particularmente importantes os ensaios de alterabilidade porque são frequentes as ocorrências de elevadas velocidades de alteração neste tipo de rochas como consequência da presença de minerais argilosos.

O estudo dum material deste tipo foi apresentado em trabalho anterior (Oliveira, R., Delgado Rodrigues, J. e Coelho, A. G., 1978) do qual se extraem alguns valores para ilustrar as ideias fundamentais então assumidas.

Essa rocha é de natureza gabro-diorítica e tem sido usada como material para construção do molhe grande do porto de Sines (Portugal).

Velocidades de propagação de ultrassons superiores a 6000 m/s, resistências à compressão simples acima de 160 MPa, porosidades entre 0,00 e 0,15% e desgaste no ensaio de Los Angeles de 11% demonstram o excelente estado actual da rocha.

Por outro lado, perdas no ensaio de ataque com sulfato de magnésio entre 0,3 e 1,4%, perda no ataque pela água oxigenada abaixo de 0,3%, nula expansão por embebição e insensibilidade ao tratamento com etileno-glicol, demonstram que os minerais argilosos expansivos no interior da rocha (argilas de tipo montmorilonítico) não são suficientes para produzir mau comportamento deste material rochoso. Por isso a rocha tem sido aceite para a construção dos molhes.

Tanto quanto têm permitido algumas observações o comportamento do material rochoso tem sido satisfatório.

## c) Calcários e rochas afins

Os calcários e rochas afins (calcários magnesianos, calcários argilosos) têm sido usados extensivamente em Portugal como enrocamentos de protecção.

A experiência obtida com este tipo de rochas mostra que o seu comportamento em enrocamentos de protecção está estreitamente ligado à sua porosidade e ao teor em minerais argilosos, sendo ambos parâmetros decisivos para a sua caracterização adequada. A resistência à abrasão e um parâmetro de resistência mecânica são também importantes para uma boa caracterização do seu estado inicial.

A observação de enrocamentos já construídos em Aveiro, Costa Nova e Figueira da Foz, alguns com comportamentos satisfatórios, outros não satisfatórios, sugere, como primeira aproximação, que um bom comportamento está habitualmente associado a porosidades inferiores a 10% e a teores em minerais argilosos abaixo de 10 ou mesmo de 5%.

Até ao momento não foram estudadas as rochas dolomíticas no que diz respeito ao seu uso em enrocamentos de protecção.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEYSEKERA, R.; LOWELL, C. and WOOD, L., 1979 — *Strength testing of compacted shale*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 2, March-Dec., 1979.
- DELGADO RODRIGUES, J., 1976 — *Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay*. Proc. 2nd Int. Symp. on the Deterioration of Building Stones. Athens, 1976.
- MARSAL, R. and RESENDIZ, D., 1975 — *Presas de tierra y enrocamiento*. Editorial Limusa. México, 1975.
- OLIVEIRA, R.; DELGADO RODRIGUES, J. and COELHO, A., 1978 — *Engineering geological studies for the Sines harbour (Portugal)*. 3rd Int. Cong. of IAEG. Madrid, Sept., 1978.
- STRUILLOU, R., 1969 — *Prévision de l'altérabilité des matériaux en fonction de leurs caractéristiques propres et de leurs utilisations*. Colloque de Géotechnique. Toulouse, Mars, 1969.