

ESTUDO DO ENROCAMENTO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DE PARADELA*

Study of the rockfill and analysis of the structural behaviour of Paradela dam

por

A. VEIGA PINTO**

M. QUINTA FERREIRA***

ANA QUINTELA****

RESUMO — A inexistência em Portugal de barragens de enrocamento com cortina a montante, cujo material de aterro é construído por meio de camadas de reduzida espessura e compactado com cilindros vibradores, motivou a realização do estudo apresentado nesta comunicação sobre os materiais do enrocamento da barragem de Paradela. Estudaram-se as características de resistência e de durabilidade dos materiais rochosos graníticos empregues no enrocamento. Através da modelação em laboratório da granulometria do material do aterro por meio de curvas aproximadamente paralelas às do protótipo, determinaram-se as características tensão-deformação do enrocamento. O material foi ensaiado em dois estados de compactidade distintos, um idêntico ao do enrocamento lançado da barragem e o outro num estado denso, semelhante ao que se obteria caso o enrocamento fosse construído com as técnicas actualmente recomendadas. Os resultados dos cálculos tensão-deformação, utilizando o método dos elementos finitos, permitiram concluir que os deslocamentos seriam cerca de quatro vezes menores que os observados se o enrocamento fosse construído com as actuais técnicas.

SYNOPSIS — In Portugal there are no rockfill dams with upstream concrete face constructed with the new techniques using thin layers densely compacted with vibrating rollers. This reason led us to study the Paradela rockfill dam in order to know the resistance and durability of the granite rock material. Modelling the granulometry by means of curves approximately parallel to those of the prototype, led to obtain the stress-strain characteristics of the embankment. The material was tested in two different compaction states, one similar to the existing in the embankment and the other, in a dense state similar to the one that would be obtained if the rockfill was built with the modern techniques of construction. The results of the computations, performed using the finite element method (FEM) showed that the measured settlement of the embankment is about four times greater than the settlement that would be obtained if the embankment was built with the new techniques using thin layers compacted with vibrating rollers.

* Trabalho recebido em Setembro de 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Investigador Auxiliar do LNEC.

*** Geólogo, Assistente da Univ. Coimbra, Bolseiro do INIC.

**** Engenheira Civil, Bolseira do LNEC.

1 — INTRODUÇÃO

Portugal foi um dos países pioneiros na construção de barragens de enrocamento ao construir a barragem de Paradela com uma altura de 110 m acima do leito do rio. À data da sua construção (1958), tratava-se da barragem de enrocamento com cortina a montante, mais alta a nível mundial. A obra foi construída com um enrocamento lançado, sendo a estanquidade garantida por uma cortina de betão armado a montante, assente sobre um enrocamento arrumado (Fernandes *et al.*, 1959).

A referida técnica construtiva de aterros de enrocamento conduzia a uma estrutura pouco compacta e de elevada deformabilidade. Desse modo, quando da aplicação das cargas resultantes do primeiro enchimento, verificaram-se apreciáveis deslocamentos da cortina ao acompanhar a deformação do enrocamento subjacente à mesma. Estes deslocamentos foram responsáveis por deteriorações ocorridas nas juntas entre as lajes de betão armado com importantes infiltrações através da cortina. O deficiente comportamento deste órgão impermeabilizante foi ainda realçado pelo facto de a cortina não ter sido construída após a total conclusão do aterro e, ainda, devido aos apreciáveis assentamentos de fluência que se processaram ao longo do tempo.

Estes factos originaram sucessivas reparações da cortina a fim de reduzir as perdas de água da albufeira, embora se deva referir que este tipo de deteriorações não conduz a uma perda significativa da segurança à rotura da estrutura, já que os caudais se escoam facilmente através do material devido à elevada permeabilidade do enrocamento.

Da análise do comportamento da estrutura, os projectistas (Fernandes *et al.*, 1960) concluíram da necessidade de, em obras do mesmo tipo e construídas subsequentemente, se efectuarem ensaios de caracterização das propriedades dos materiais de enrocamento, de modo a prever com maior fiabilidade os deslocamentos da cortina.

Verificou-se, no entanto, a partir da década de 60 um avanço significativo nas técnicas construtivas de barragens de enrocamento, nomeadamente pelo recurso à utilização de cilindros vibradores. Também na mesma época começaram a surgir os primeiros laboratórios de ensaio de materiais de enrocamento. A conjugação destes factores possibilitou projectar e construir obras deste tipo com uma melhoria significativa do seu comportamento estrutural.

Assim, a partir da década de 70, foram as barragens de enrocamento com cortina a montante as que tiveram maior aceitação, como o comprovam os registos das barragens construídas.

No entanto não se verificou este panorama em Portugal, apenas tendo sido construída a barragem de Vilar em meados da década de 60, com tecnologia idêntica à de Paradela mas de altura muito menor.

Consciente desta lacuna na engenharia de barragens, o LNEC começou a desenvolver, a partir de 1976, intensa investigação aplicada ao domínio dos materiais de enrocamento, nomeadamente pelo projecto e construção de equipamento de ensaio de elevada dimensão (Veiga Pinto, 1983).

Na sequência dos trabalhos que têm sido desenvolvidos e pelas razões já apontadas pareceu adequado efectuar um estudo sobre o comportamento estrutural da barragem de Paradela, nomeadamente efectuando uma exaustiva caracterização das propriedades dos materiais de enrocamento empregues na construção do aterro.

2 — OS MATERIAIS DO ENROCAMENTO

O enrocamento da barragem de Paradela foi construído com rocha granítica extraída de uma pedreira afastada cerca de 2 km da barragem (Fig. 1). Estes materiais, bem como os granitos do local de fundação da barragem, pertencem a uma mancha de granitos

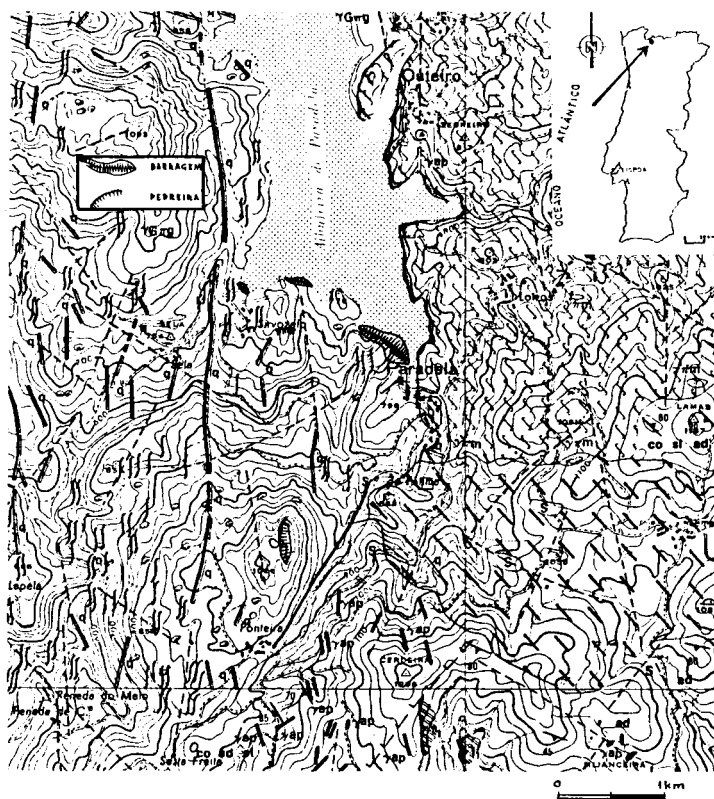


Fig. 1 — Enquadramento geológico do local da barragem de Paradela. (Extracto da Carta Geológica 1:50 000, folha 6-A (1982))

hercínicos, pós-tectónicos. Trata-se de granitos porfiróides de grão grosseiro, com tonalidade por vezes rosada, possuindo localmente afloramentos de granito vermelho. Ao microscópio verificou-se que a rocha é constituída principalmente por quartzo, plagioclase (oligoclase), feldspato potássico (microclina) e biotite. Apresenta textura porfiróide, hipidiomórfica-granular, possuindo por vezes aspectos cataclásticos. Como minerais acessórios encontram-se o zircão, a apatite, a clorite e o epidoto.

Na pedreira, as rochas com tonalidade vermelha tendem a localizar-se próximo das descontinuidades. Com o aumento da tonalidade vermelha observa-se maior quantidade de inclusões ferruginosas e a tendência para diminuir a percentagem de quartzo.

Mesmo nas amostras que visualmente se apresentavam mais sãs, verificou-se pela observação microscópica que a parte central dos cristais de plagioclase se encontrava alterada para sericite. Com o prosseguimento da alteração verifica-se que toda a massa dos cristais de plagioclase é afectada, enquanto os feldspatos potássicos sofrem caulínização. As biotites sofrem cloritização progressiva, aparecendo simultaneamente uma mancha de oxidação à sua volta. O epidoto aparece como produto da alteração mas, devido à sua grande facilidade de mobilização, encontra-se principalmente nas superfícies dos panos de descontinuidade do maciço. À medida que a rocha sofre alteração crescente aumenta a sua porosidade.

3 — ENSAIOS REALIZADOS SOBRE PROVETES ROCHOSOS

3.1 — Caracterização da resistência

A determinação da resistência dos fragmentos rochosos utilizados no enrocamento foi cuidadosamente estudada, para o que foram realizados diversos tipos de ensaio.

Com o ensaio de resistência ao esmagamento (Marsal, 1969) determinou-se a relação entre o tamanho das partículas e a sua resistência. Na Fig. 2 apresentam-se os resultados obtidos para o granito são e alterado. Para as duas amostras conduziu-se o ensaio sobre as partículas secas ao ar e após submersão durante 24 h, que se passam a designar respectivamente por secas e saturadas, embora se deva referir que com aquele procedimento não se obtinha uma total saturação dos fragmentos rochosos. Observa-se uma diminuição significativa da resistência devido à saturação das amostras, que é mais evidente no granito alterado. Para as mesmas condições de ensaio verifica-se que a resistência da rocha diminui com o avanço da alteração.

No ensaio de resistência ao esmagamento colocam-se três partículas sensivelmente do mesmo tamanho entre duas placas de aço. Aplicam-se forças crescentes através de uma das placas até que a secção mais frágil de uma das três partículas sofra rotura. Se se admitir que a partícula é representada por uma esfera com diâmetro igual à dimensão média (d_m), pode-se calcular a tensão fictícia (σ) correspondente ao quociente entre a resistência ao esmagamento, P_a , da partícula pela secção da esfera.

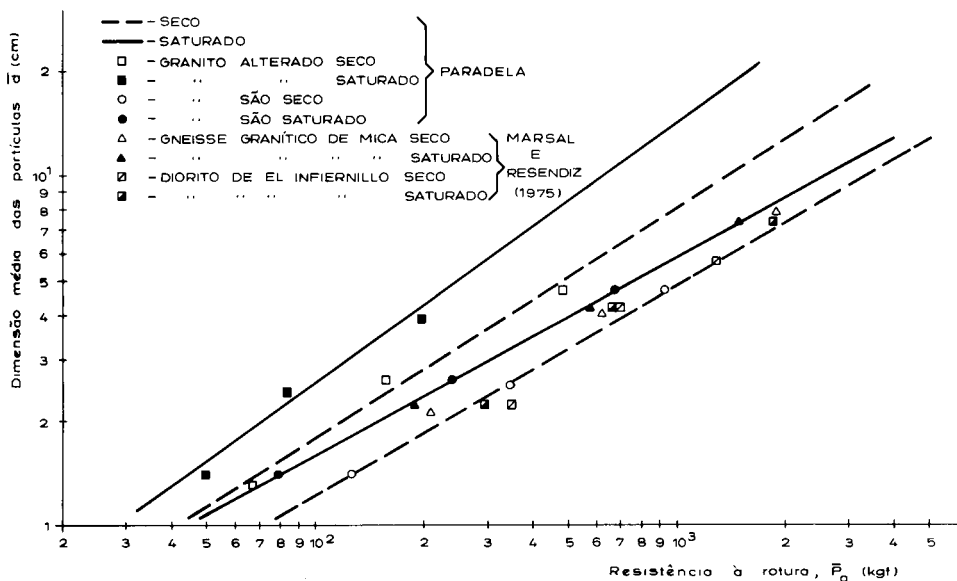


Fig. 2 — Resistência ao esmagamento, versus dimensões das partículas

No ensaio de carga pontual é usado um procedimento semelhante. Neste caso a carga é transmitida por duas ponteiros cónicos, sendo o resultado do ensaio apresentado para um diâmetro equivalente de um cilindro com 50 mm de diâmetro, I_s (50).

Na Fig. 3 mostra-se a relação obtida entre I_s (50) e a tensão de rotura calculada com base no ensaio de resistência ao esmagamento para partículas com 50 mm de diâmetro (σ_{50}). Verifica-se uma boa concordância entre estes dois parâmetros, à excepção de uma amostra que não foi utilizada nos cálculos da recta de correlação, pois afasta-se significativamente dos restantes valores. Trata-se de uma amostra muito heterogênea, pelo que se admite que as fracções utilizadas nos dois ensaios não apresentam mesma resistência, provavelmente devido a possuírem diferentes estados de alteração.

Dos resultados dos ensaios de carga pontual, verificou-se que nos granitos a resistência após saturação é de cerca de 90% da resistência da amostra seca, enquanto nos granitos alterados é de aproximadamente 70%.

O ensaio de compressão simples é correntemente empregue na determinação da resistência da rocha. Na Fig. 4 encontram-se projectados os valores da resistência à compressão simples em função da porosidade dos provetes, observando-se a diminuição da resistência com o aumento da porosidade. Nos granitos são, com menos de 1% de porosidade, a resistência à rotura varia entre 100 e 130 MN/m², enquanto nos granitos alterados, com porosidade entre 3 e 5%, a resistência à rotura varia entre 25 e 50 MN/m².

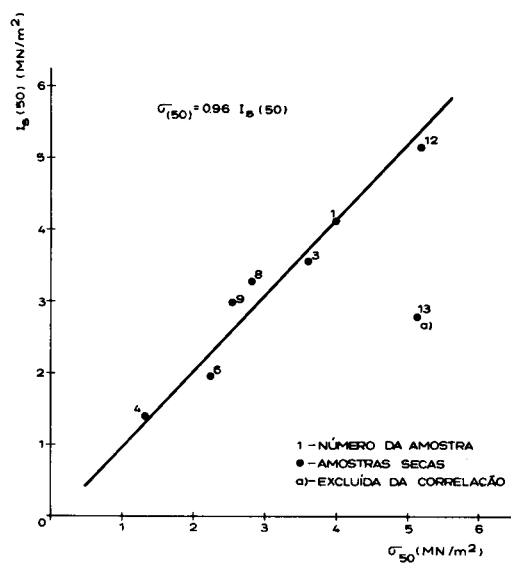


Fig. 3 — Relação entre o ensaio de carga pontual e a tensão de rotura calculada a partir do ensaio de resistência ao esmagamento

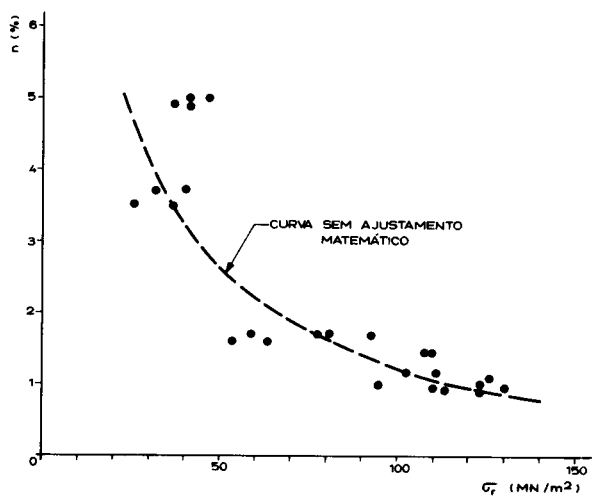


Fig. 4 — Compressão simples. Variação da resistência à rotura com a porosidade

Na Fig. 5 apresenta-se a relação entre os valores médios da resistência à rotura do ensaio de compressão simples e os resultados do ensaio de carga pontual. Verifica-se que os valores obtidos no ensaio de compressão simples são cerca de 24 vezes superiores aos obtidos no ensaio de carga pontual.

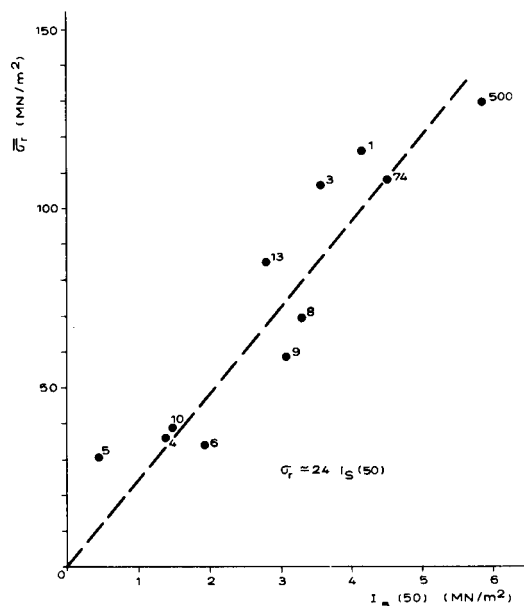


Fig. 5 — Relação entre a resistência à compressão simples e a carga pontual

3.2 — Caracterização da fragmentação e desgaste

Autores, como Marsal e Resendiz (1975) e Veiga Pinto (1983), verificaram que a fracturação dos fragmentos rochosos tem uma influência notável no comportamento reológico dos materiais de enrocamento. Para além da resistência das partículas, a granulometria do meio granular e o estado de tensão a que os materiais de enrocamento estão sujeitos condicionam o processo de fragmentação.

O ensaio de Los Angeles é muito utilizado na caracterização dos materiais de enrocamento (Wilson e Marsal, 1979), utilizando-se no entanto outros ensaios com idêntica finalidade. Em Delgado Rodrigues *et al.* (1982) e Veiga Pinto *et al.* (1986) relacionam-se os resultados dos ensaios de desgaste em meio húmido ("slake durability test" na literatura inglesa) com as propriedades mecânicas do enrocamento. Neste trabalho, além dos ensaios de Los Angeles e de desgaste em meio húmido, efectuou-se ainda o ensaio de fragmentação dinâmica sobre amostras constituídas por partículas com dimensão entre 10 e 20 mm.

Na Fig. 6 apresenta-se a relação obtida entre os resultados do ensaio de fragmentação dinâmica e as perdas no ensaio de desgaste em meio húmido. Considera-se que os materiais usados no enrocamento de Paradela apresentam perdas no ensaio de desgaste em meio húmido entre 0,5 e 1,5%, com uma média de 1%, enquanto para a fragmentação dinâmica poderão variar entre 30 e 35%.

O ensaio de Los Angeles foi executado com material que se considerou ser representativo do utilizado na determinação das características tensão-deformação do enrocamento, isto é, constituído essencialmente por partículas sãs e algumas alteradas. Utilizou-se a granulometria *F* tendo-se obtido uma perda de 38%, que se considera elevada.

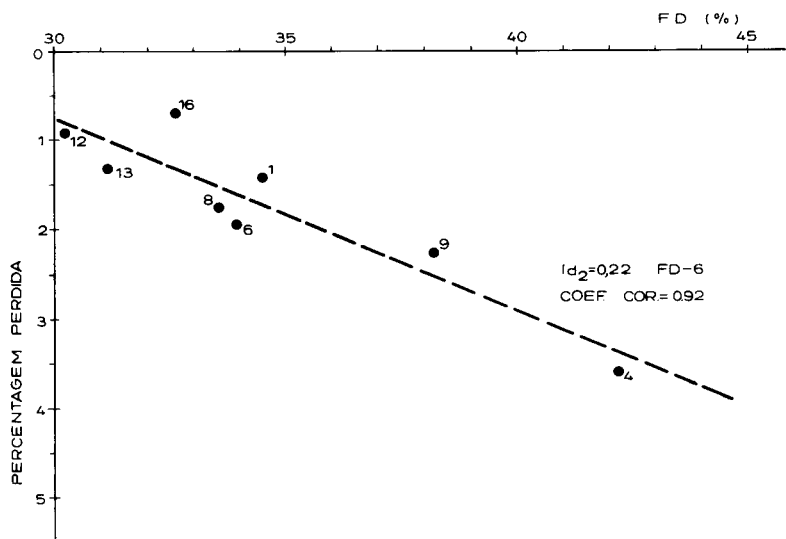


Fig. 6 — Perda no ensaio de desgaste em meio húmido (2.º ciclo) versus fragmentação dinâmica

3.3 — Caracterização da durabilidade

Procurou-se também determinar as características de durabilidade dos materiais empregues no enrocamento, para o que se realizaram alguns ensaios de previsão de comportamento. A perda de massa devida ao ataque pelo sulfato de magnésio foi de 1%, enquanto que devido ao ataque pela água oxigenada foi de 3,5%. O aumento de desgaste após o ataque com o etileno-glicol foi de 0% para o granito são e de 20% para o granito muito alterado. Destes últimos resultados parece poder concluir-se que não existem minerais argilosos expansivos na rocha sã, e que mesmo na rocha muito alterada os seus efeitos não são significativos. Com base nos resultados obtidos e nas observações de campo conclui-se que os materiais graníticos empregues no enrocamento apresentam boa durabilidade.

4 — PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS GRANULARES

O enrocamento da barragem de Paradela é constituído por fragmentos de rocha granítica cuja dimensão varia desde a de blocos muito grossos com uma dimensão máxima de cerca de 2 m até partículas de dimensão cascalho. Por uma questão de efeito de escala (Veiga Pinto, 1982), e tendo em conta que a menor dimensão da câmara triaxial utilizada é de 0,30 m, considerou-se que a máxima dimensão das partículas não deveria exceder 0,05 m. A curva granulométrica adoptada para a amostra laboratorial é aproximadamente paralela à curva granulométrica que Maranha das Neves (1980) admite ser representativa do material de enrocamento do protótipo. Os índices de vazios máximo e mínimo obtidos com o material ensaiado no laboratório apresentam-se no Quadro 1.

Quadro 1

Estados de compacidade mínimo e máximo do enrocamento

γ_{dg} (kN/m ³)	γ_{dmin} (kN/m ³)	e_{max}	γ_{dmax} (kN/m ³)	e_{min}
25,7	14,5	0,78	20,1	0,28

γ_{dg} — Peso volúmico aparente seco dos fragmentos rochosos,
 $\gamma_{dmin}, \gamma_{dmax}$ — Pesos volúnicos aparentes secos mínimo e máximo da amostra laboratorial,
 e_{min}, e_{max} — Índices de vazios mínimo e máximo da amostra laboratorial.

O ângulo de talude natural do enrocamento, medido no paramento de jusante da barragem, é de 37 graus. Por sua vez, o ângulo de talude natural da amostra laboratorial com a granulometria modelada é aproximadamente idêntico e de valor igual a 35 graus.

Os materiais do enrocamento da barragem de Paradela possuem valores de absorção que variam entre 0,3 e 1,4% com uma média de 0,5%. A resistência ao esmagamento das partículas com diâmetro nominal (d_n) de 5 cm varia entre 7 e 10 kN. O coeficiente de uniformidade da curva granulométrica média é igual a 5. Entrando com estes valores no Quadro 2, adaptado de Wilson e Marsal (1979), pode-se classificar o enrocamento como sendo do tipo 2U, ou seja um enrocamento uniforme com partículas de média resistência.

Quadro 2
Classificação dos enrocamentos

Material	P_a para $d_n=5\text{ cm}$ (kN)	Absorção de água (%)	Desgaste ensaio de Los Angeles (%)	Granulometria	C_u	Tipo de enrocamento
Partículas de elevada resistência	> 10	1-2,5	10-15	Uniforme	1-5	1 U
				Bem graduada	> 15	1 BG
Partículas de média resistência	5-10	1-2,5	15-25	Uniforme	1-5	2 U
				Bem graduada	> 15	2 BG
Partículas de baixa resistência	< 5	2,5-15	> 25	Uniforme	1-5	3 U
				Bem graduada	> 15	3 BG

5 — CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO ENROCAMENTO

Na determinação das características mecânicas, nomeadamente a resistência ao corte e a deformabilidade, ensaiaram-se amostras em dois estados de compacidade bastante distintos. Num deles tentou-se reproduzir as condições do material do protótipo e no

outro um estado de compacidade bastante denso, tal como se obtém com as actuais técnicas de compactação com cilindros vibradores. As densidades relativas (I_D) utilizadas na preparação das amostras foram respectivamente de 70% e de 97%. Para o estado mais solto apontou-se inicialmente um valor de $I_D=60\%$, o qual foi abandonado pois nestas condições o reduzido imbricamento entre partículas esteve na origem do desmoronamento da amostra laboratorial não permitindo a sua montagem.

Os ensaios de compressão triaxial foram conduzidos na modalidade multifásica, tendo-se efectuado a consolidação e corte das amostras com tensões de confinamento sucessivas de 100, 300 e 700 kN/m². Estes ensaios são do tipo consolidado-drenado. Na Fig. 7 apresentam-se as relações tensão-deformação de dois ensaios multifásicos. No material mais denso verifica-se um maior decréscimo do ângulo de atrito interno com o aumento da tensão de confinamento (Fig. 8). As duas amostras ensaiadas apresentam diminuição sensível do ângulo de atrito interno e colapso, isto é variação volumétrica, quando da sua submersão. Como seria de esperar a amostra mais densa apresentou um comportamento mais dilatante (Fig. 7).

Para os ensaios conduzidos na câmara unidimensional foram preparadas amostras com densidades relativas iguais às adoptadas nos ensaios de compressão triaxial. Na Fig. 9 apresentam-se os gráficos da tensão instalada nas duas amostras ensaiadas em função da deformação axial. O módulo edométrico obtido para o material mais solto é de 72 MN/m² passando para 208 MN/m² no material mais denso, considerando uma tensão principal máxima de cerca de 2 MN/m². A tensão de pré-compressão aumenta também para o estado mais denso. Verificou-se também que a água vai originar um assentamento significativo, por colapso, do material do enrocamento.

Pela análise dos dois tipos de ensaios realizados, compressão triaxial e compressão unidimensional, verifica-se que as amostras mais soltas sofrem maior colapso, isto é deformações volumétricas, devido à presença da água.

6 — CÁLCULOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Pretendeu-se comparar as deformações observadas após o primeiro enchimento da barragem com as deformações obtidas pela sua simulação utilizando o método dos elementos finitos. As leis constitutivas utilizadas são do tipo elasticidade variável (Veiga Pinto, 1983), tendo-se optado por um modelo hiperbólico cujos parâmetros reológicos foram obtidos a partir dos resultados de ensaios de compressão triaxial. Simulou-se o primeiro enchimento da barragem após se ter modelado a sua construção por fases, admitindo que a densidade relativa do enrocamento era de 70%. Simulou-se também a construção e o primeiro enchimento da barragem se esta fosse construída pelos mesmos materiais num estado mais denso ($I_D=97\%$), correspondendo ao que se obtém com a aplicação das técnicas de construção e compactação com cilindros vibradores, que presentemente se recomendam.

..... CONFINAMENTO DE 100 kN/m²

--- " " 300 "

— " " 700 "

a) SUBMERSÃO DA AMOSTRA

b) ALÍVIO DE $\sigma_1 - \sigma_3$

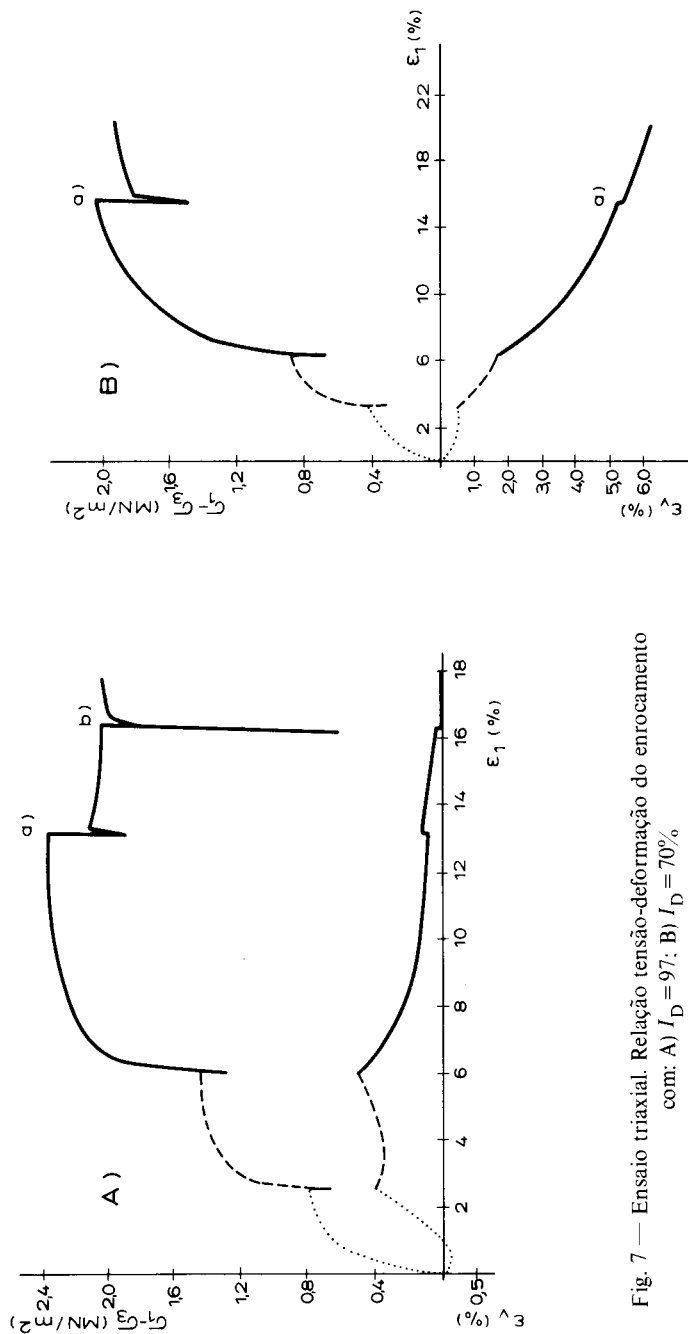


Fig. 7 — Ensaio triaxial. Relação tensão-deformação do enrocamento com: A) I_D = 97; B) I_D = 70%

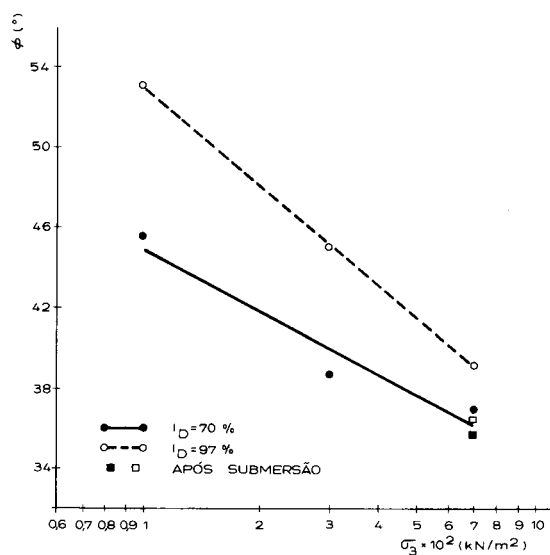


Fig. 8 — Influência da tensão principal mínima e da densidade relativa na variação do ângulo de atrito interno

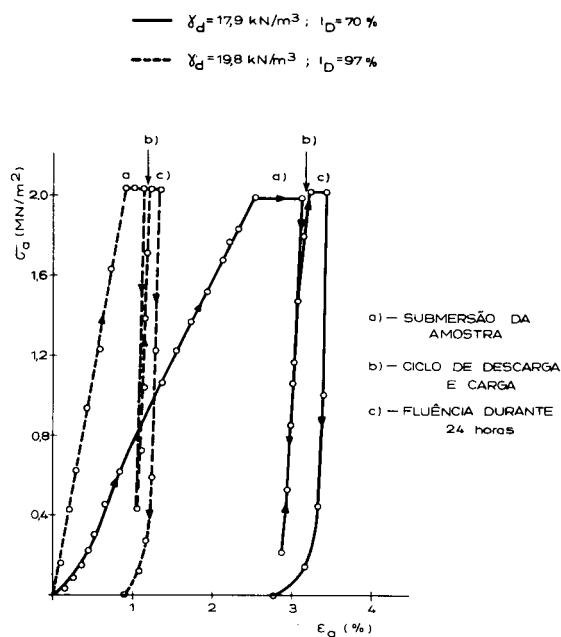


Fig. 9 — Ensaio de compressão unidimensional DU 50. Relação tensão-deformação para diferentes estados de compacidade

Como se tinham realizado ensaios multifásicos foi necessário extrapolar o início das curvas tensão-deformação para as tensões de confinamento de 300 e 700 kN/m² (Fig. 10) de modo a determinar os parâmetros a utilizar no cálculo. No entanto, esta técnica mostrou-se algo subjectiva, tendo-se concluído que os ensaios triaxiais multifásicos não são adequados para a determinação dos parâmetros do modelo hiperbólico.

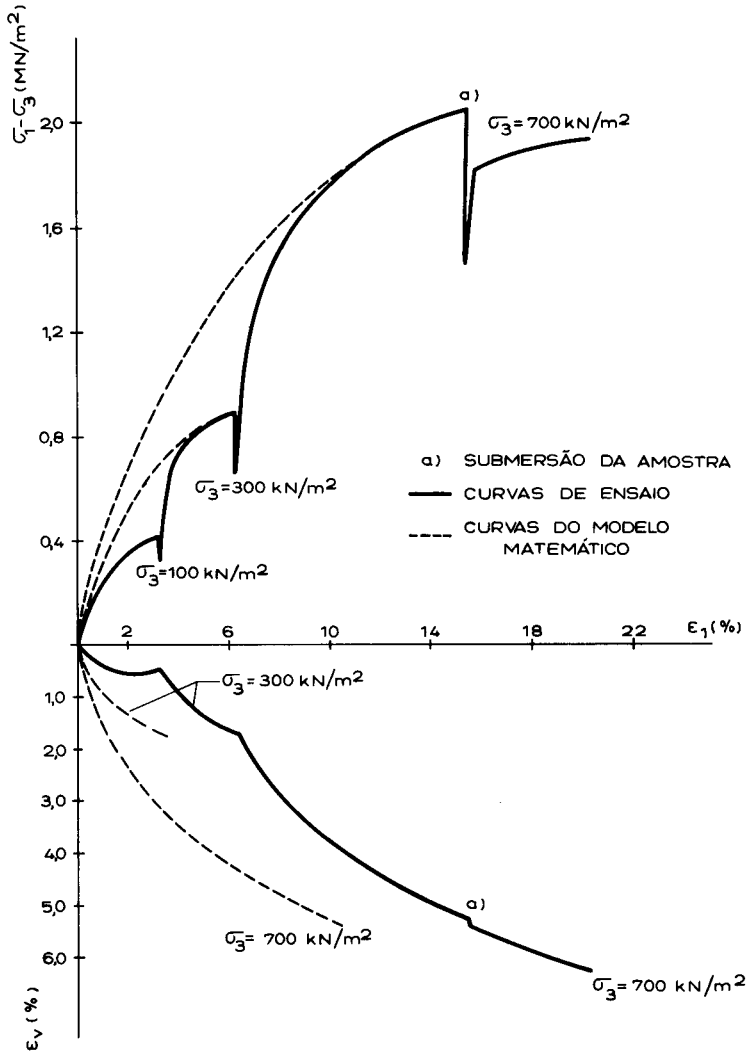


Fig. 10 — Extrapolação do início das curvas tensão-deformação

Na análise da construção, consideraram-se quatro fases, tendo-se verificado uma assimetria nos deslocamentos e nas tensões, embora o perfil transversal da barragem seja simétrico (Fig. 11). Tendo-se simulado também a construção com camadas horizontais, ou seja numa única fase e onze camadas de construção, obtiveram-se deformações aproximadamente simétricas em relação ao eixo central da barragem (Fig. 12).

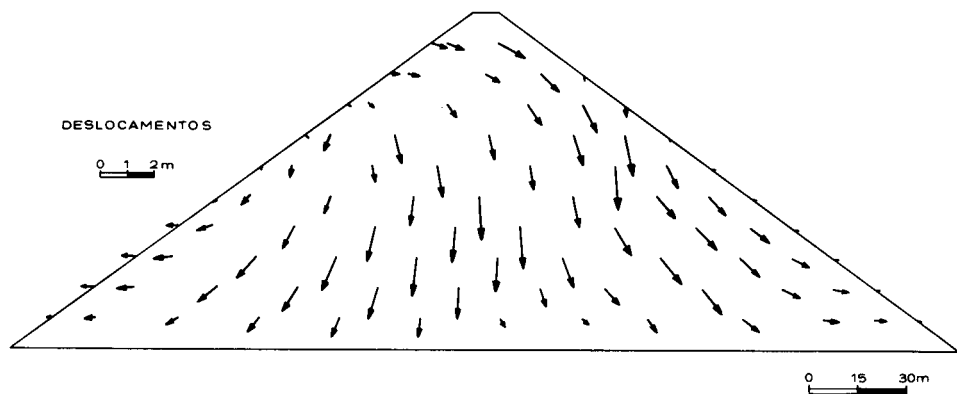


Fig. 11 — Simulação da construção por fases. $I_D = 70\%$

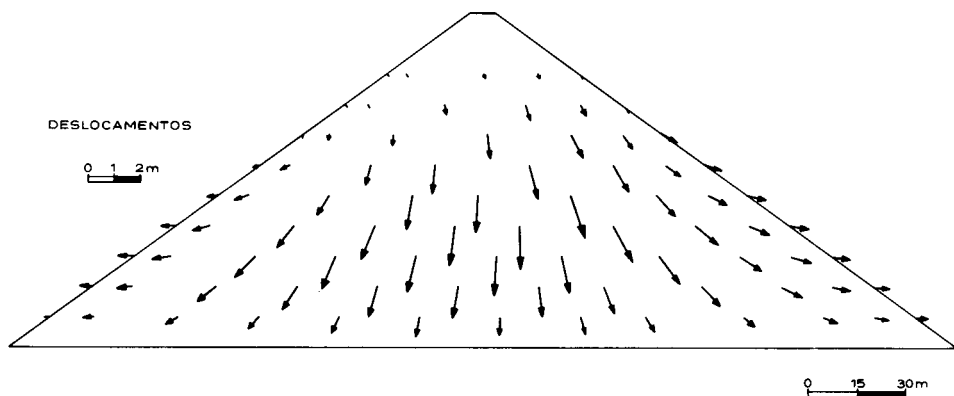


Fig. 12 — Simulação da construção por camadas horizontais. $I_D = 70\%$

Efectuaram-se três cálculos distintos visando comparar os deslocamentos observados devidos ao primeiro enchimento com os deslocamentos obtidos através dos cálculos tensão-deformação. No primeiro cálculo pretendeu-se reproduzir as condições reais, pelo que se considerou o material no seu estado mais solto e a construção por fases. Calculou-se o enchimento até à cota 106 materializado por uma carga triangular distribuída, perpendicular ao paramento de montante, correspondente à pressão hidrostática. Consideraram-se onze patamares de enchimento, dez de 10 m e um de 6 m. O deslocamento máximo obtido foi de 0,75 m, estando a correspondente Çeformada da cortina de betão representada na Fig. 13. Apresenta-se na mesma figura a deformada observada, podendo-se concluir que os deslocamentos obtidos através da simulação são mais reduzidos do que os observados em cerca de 30%.

Como já se mencionou atrás, ao iniciar os ensaios pretendeu-se obter para o estado mais solto uma densidade relativa de 60%, o que não foi viável por não ser possível montar o provete nessas condições dado o seu desmoronamento devido ao reduzido imbricamento entre as partículas. Pensa-se pois que, eventualmente, o ensaio tenha sido realizado com um provete em que o material se encontrava num estado mais denso do que o da barragem, conduzindo a uma rigidez superior à do protótipo e, conseqüentemente, a menores deformações. Deve-se ainda acrescentar que os deslocamentos observados englobam uma parcela significativa devida à fluência, a qual não foi contemplada nos cálculos.

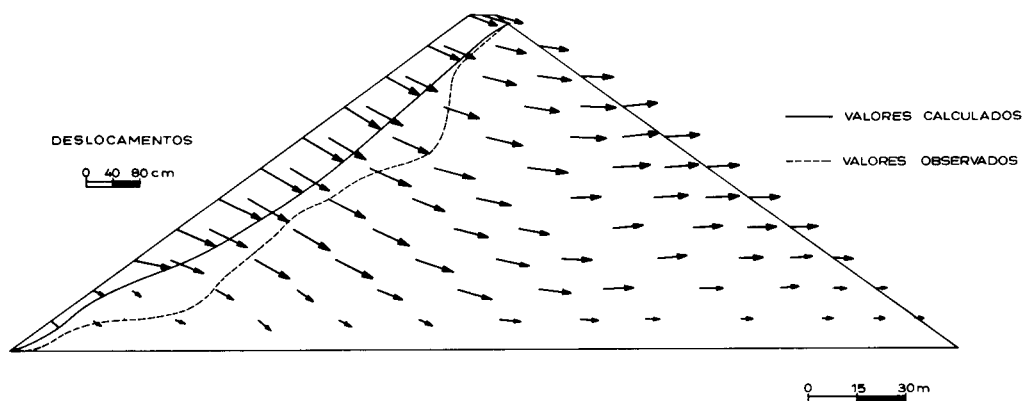


Fig. 13 — Primeiro enchimento. Valores calculados e valores observados

Num cálculo semelhante efectuado com material diferente, proveniente das minas da Panasqueira, tinha-se obtido um deslocamento máximo da ordem de 1 m (Veiga Pinto e Ana Quintela, 1987). Comparando as curvas tensão-deformação de ambos os materiais (Fig. 14) observa-se que as diferenças em termos de resistência ao corte ($\sigma_1 - \sigma_3$) não são

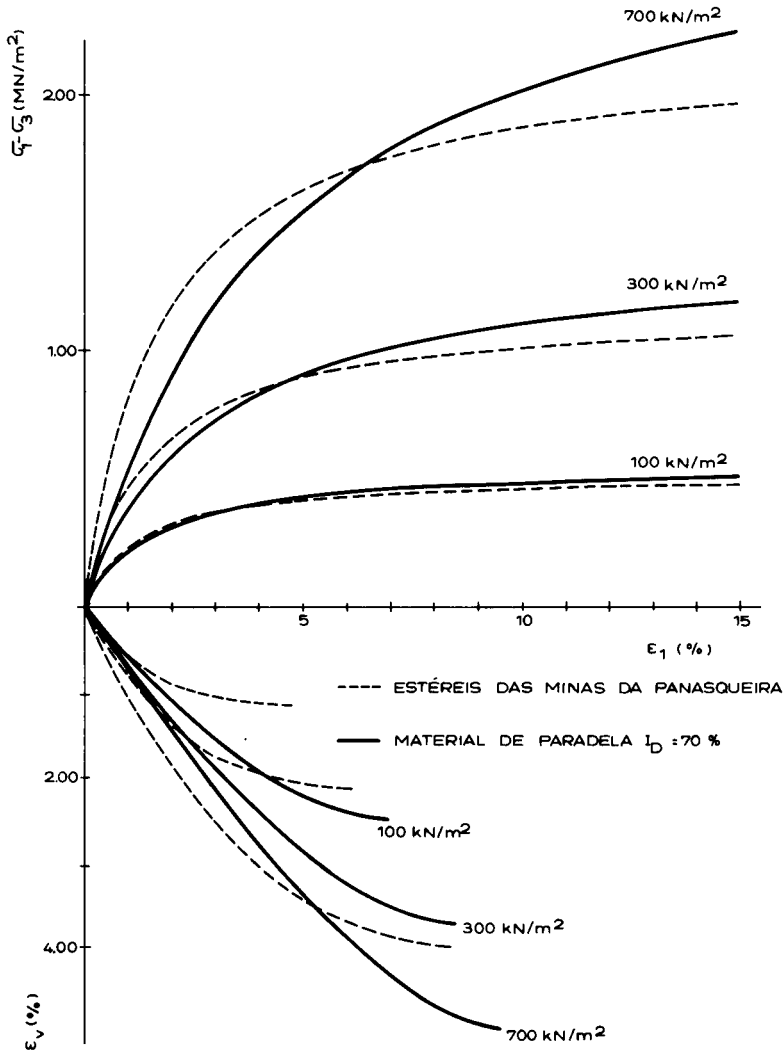


Fig. 14 — Comparação das curvas tensão-deformação dos materiais de Paradelá (1) e das Minas da Panasqueira (2)

significativas, não se podendo afirmar o mesmo quanto às deformações volumétricas. Enquanto que a partir de um dado valor da tensão deviatórica a extensão axial do enrocamento de Paradela é superior à que apresentam os estêreis das minas da Panasqueira, as extensões volumétricas deste último material são sempre superiores. Conclui-se pois que não são só os parâmetros referentes ao módulo de elasticidade que influenciam os deslocamentos. O coeficiente de Poisson, descrito pelos parâmetros G , F e d , obtidos a partir das extensões volumétricas, tem grande influência nos deslocamentos horizontais e mesmo nos assentamentos calculados.

No segundo cálculo efectuado, utilizaram-se os parâmetros hiperbólicos respeitantes ao material no seu estado mais denso ($I_D=97\%$). Analisou-se a construção por fases e a mesma simulação de cargas. Obteve-se um deslocamento máximo no paramento de montante de 0,21 m, valor mais de três vezes inferior ao obtido para o mesmo material menos compactado ($I_D=70\%$). Pretendeu-se por meio deste cálculo demonstrar a importância da utilização das novas técnicas de colocação do material (deposição em cordão) e da sua compactação com cilindros vibradores.

Num terceiro cálculo simulou-se a construção da barragem com as técnicas actualmente recomendadas. Considerou-se o material no estado mais denso ($I_D=97\%$), representado pelos respectivos parâmetros reológicos e a construção numa única fase, com onze camadas horizontais. Para a análise das deformações devidas ao enchimento, consideraram-se os mesmos onze estágios. O deslocamento máximo devido ao enchimento na cortina de montante é de 0,19 m (Fig. 15), valor inferior em cerca de 10% ao obtido quando a construção é feita por fases. Pode pois confirmar-se para Paradela que as técnicas utilizadas hoje em dia conduzem a menores deformabilidades dos aterros de

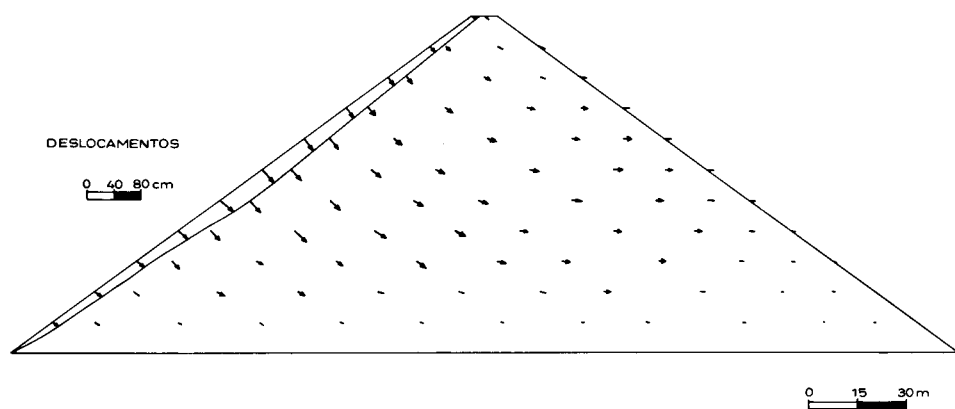


Fig. 15 — Primeiro enchimento da barragem construída com o material no estado mais denso

enrocamento. Estas técnicas referem-se ao modo de colocação e compactação do material, bem como ao faseamento construtivo. Enquanto que, se a construção se processar por fases distintas, com zonas do aterro a alturas muito diferentes, se obtêm deformações superiores e assimétricas, a construção por camadas horizontais com fases de geometria pouco contrastante conduz a uma maior uniformidade dos deslocamentos.

7 — CONCLUSÕES

A barragem de Paradela constituiu um marco importante na história de construção de barragens de enrocamento com cortina a montante. À data da sua construção era a barragem daquele tipo mais alta a nível mundial.

No entanto as técnicas então disponíveis de construção de aterros de enrocamento conduziam a estruturas muito deformáveis. Além disso esta deformabilidade aumenta exponencialmente com a altura do aterro, pelo que se verificaram acentuados deslocamentos da cortina ao acompanhar as deformações do material subjacente. Este facto conduziu a fissurações e infiltrações importantes através das juntas de ligação das lajes de betão.

Atendendo ao deficiente comportamento da barragem os projectistas indicaram desde logo a necessidade de, em futuras estruturas similares, se caracterizar o comportamento físico-mecânico dos materiais de enrocamento, de modo a realizar dimensionamentos da cortina mais fiáveis.

No prosseguimento dos trabalhos de investigação aplicada, só recentemente se dotou o LNEC com equipamento de ensaio de materiais de enrocamento e se conduziram os primeiros estudos de comportamento reológico destes materiais. Do exposto pareceu interessante determinar em laboratório as características físicas e mecânicas dos materiais do enrocamento e analisar o comportamento estrutural da barragem de Paradela. Por um lado poder-se-ia verificar os avanços introduzidos com as novas "ferramentas" de ensaio e de cálculo na análise do comportamento estrutural de barragens daquele tipo, e por outro lado confirmar que se se tivesse adoptado as actuais técnicas construtivas se conseguiria minorar as deformações e subsequentes deteriorações da barragem.

As principais conclusões deste estudo são expostas em seguida:

- 1 — Os materiais do enrocamento da barragem de Paradela são constituídos por blocos graníticos relativamente sãos, de média a elevada resistência e elevada durabilidade. Em reduzida quantidade ocorrem blocos de tonalidade avermelhada e de material mais alterado.

- 2 — O material mais alterado apresenta menor resistência, maior porosidade e um mais acentuado decréscimo da resistência quando em presença da água. No ensaio de carga pontual obteve-se um decréscimo da resistência para cerca de 90% após a submersão durante 24 h do material são seco ao ar, aumentando esse decréscimo no material alterado para aproximadamente 70%.
- 3 — Verificaram-se boas correlações entre os resultados dos ensaios de resistência (compressão simples, resistência ao esmagamento e carga pontual) dos fragmentos rochosos.
- 4 — As várias correlações estabelecidas a partir dos resultados dos ensaios de propriedades índice dos fragmentos rochosos mostraram que os mesmos são complementares, permitindo qualquer deles obter informações acerca da qualidade do material.
- 5 — Os ensaios de caracterização mecânica de compressão triaxial e de compressão unidimensional foram conduzidos com amostras possuindo densidades relativas de 70%, condição próxima da de construção do material da barragem de Paradela, e de 97% valor alcançado com as actuais técnicas construtivas de aterro de enrocamento. As amostras mais densas conduziram a maior resistência ao corte, menor deformabilidade, maiores dilatações e tensões de pré-compressão e menores deformações volumétricas devidas ao colapso.
- 6 — Os módulos edométricos do aterro no estado mais denso são cerca de três vezes superiores aos do material menos compactado.
- 7 — Os parâmetros do modelo hiperbólico foram determinados dos ensaios de compressão triaxial multifásicos, os quais, no entanto, não se mostraram muito adequados para esse fim. As dificuldades são sobretudo sentidas na caracterização dos parâmetros respeitantes ao coeficiente de Poisson.
- 8 — Na simulação das condições de construção da barragem (construção do aterro por fases e material pouco adensado) obtiveram-se deslocamentos para a cortina cerca de 30% inferiores aos observados. O material estava, no entanto, ligeiramente mais adensado do que o das condições de campo, assim como os valores observados englobam deformações de fluência não contempladas nos cálculos tensão-deformação.
- 9 — Nos cálculos efectuados com o material no estado mais denso, correspondente ao obtido pelas actuais técnicas construtivas, obtiveram-se deslocamentos para a cortina cerca de quatro vezes inferiores aos observados.
- 10 — Na simulação da construção do aterro por fases, isto é, considerando a construção diferenciada de zonas distintas do aterro com dezenas de metros de altura obtiveram-se maiores deslocamentos do que os que se obteriam não faseando a construção.

AGRADECIMENTOS

À Electricidade de Portugal agradece-se a possibilidade de estudar um tema que proporcionou um trabalho aliciente.

O Lic. Mário Quinta Ferreira agradece ao Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra os meios para a realização dos trabalhos de campo e ensaios de laboratório efectuados nesta instituição. Expressa o seu reconhecimento ao Prof. Coteló Neiva pela supervisão dos seus trabalhos. Agradece ao Instituto Nacional de Investigação Científica a bolsa de estudo concedida para a obtenção do doutoramento no País e que foi fundamental para a sua contribuição nesta comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DELGADO RODRIGUES, J., VEIGA PINTO, A., MARANHA DAS NEVES, E. (1982) — *Rock index properties for the prediction of rockfill behaviour*. Proc. 4th Int. Cong. IAEG, New Delhi.
- FERNANDES, L. G., OLIVEIRA, E., PORTO, N. V., WEYERMANN, W. J. (1958) — *The Paradela concrete face rockfill dam*. Symp. on Rock-Fill Dams, A.S.C.E., Portland, U.S.A.
- FERNANDES, L. G., OLIVEIRA, E., PORTO, N. V. (1960) — *A barragem de Paradela*. 1.^{as} Jorn. Luso-Brasileiras de Eng. Civil. LNEC, Lisboa.
- MARANHA DAS NEVES, E. (1980) — *Dimensionamento de barragens de aterro de enrocamento*. "Geotecnia" n.º 28, pp. 3-49.
- MARSAL, R. J. (1969) — *Particle breakage in coarse granular soils*. Proc. 7th ICSMFE, Specialty Session No. 13, pp. 155-165. México.
- MARSAL, R. J. e RESENDIZ, D. (1975) — *Presas de tierra y enrocamiento*. Limusa S.A., México.
- VEIGA PINTO, A. (1982) — *Modelação de enrocamentos*. Dissertação de Mestrado. Univ. Nova de Lisboa.
- VEIGA PINTO, A. (1983) — *Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento*. Tese para especialista do LNEC. Lisboa.
- VEIGA PINTO, A. e ANA QUINTELA (1987) — *Análise de novas tecnologias de construção de barragens de enrocamento*. Conferência Ibero-Americana Sobre Aproveitamentos Hidráulicos. Vol. 1, pp. B. 43-52. Lisboa.
- VEIGA PINTO, A., DELGADO RODRIGUES, J., MARANHA DAS NEVES, E. (1986) — *Some improvements in the characterization of basalts and limestones for rockfill structures*. 5th Int. Cong. IAEG, vol. 2, pp. 1469-1475. Buenos Aires.
- WILSON, S. D. e MARSAL, R. J. (1979) — *Current trends in design and construction of embankment dams*. A.S.C.E.