Manuel Rocha Armando Palma Carlos José Folque Virgílio Penalva Esteves

EXPERIÊNCIA PORTUGUESA SOBRE O CONTROLE DA COMPACTAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

1 — Introdução

Nos últimos cinco anos construiram-se em Portugal quatro barragens de terra: Campilhas, Silves, Maranhão e Montargil. Indicam-se na fig. 1 as suas características principais. As alturas variam de 35 a 50 metros, e os volumes de 600.000 a 900.000 metros cúbicos.

Excepto para a barragem de Campilhas, cuja impermeabilização é conseguida à custa de uma cortina central de betão armado, as outras barragens são de perfis zonados,



Durante os períodos de estudo e construção das barragens, foram efectuados estudos experimentais em laboratório e no local da obra com os seguintes objectivos:

- a) Determinação das características de corte, permeabilidade e compressibilidade dos solos a usar na construção das barragens.
- b) Controle da execução dos trabalhos.

c) Observação das barragens no sentido lato da palavra, que inclui a observação de assentamentos e deslocamentos e a determinação das resistências ao corte, compressibilidade e permeabilidade em amostras intactas.

Os estudos mencionados em c) completados pela interpretação e comparação entre os valores observados e os previstos, particularmente no que se refere a assentamentos, constituirão o assunto de uma publicação em preparação.

isto é, contendo um núcleo de solo de baixa permabilidade e maciços exteriores cuja principal função é a de fornecer estabilidade ao conjunto.

Do ponto de vista dos solos usados na construção, a situação em relação a cada barragem resume-se no Quadro I.

Foi usado o mesmo processo de construção tanto para os solos do núcleo e maciços exteriores das barragens de Montargil e Campilhas como para os xistos alterados empregados nos maciços das barragens de Silves e Maranhão. Em regra, a remoção e transporte do material foi efectuada por meio de «motor-scrapers». Quando as condições não permitiam o seu emprego, usaram-se escavadoras em Montargil para a remoção da terra que era transportada em camiões de 14 toneladas. O espalhamento era completado por grades de discos acompanhando a rega que, apesar de se desejar a colocação do solo no lado seco, era quase sempre necessária (fig. 2). A compactação foi efectuada por meio de cilindros de pés de carneiro de 12 toneladas.



Fig. 2

QUADRO I

BARRAGEM		SOLO	CLASSIFICAÇÃO (1)		
Camp	bilhas	Solos aluviais derivados de xistos	SC-CL: Areias argilosas com argilas de média plasticidade		
	Núcleo	Idem	Idem		
Silves	Maciço de montante	Xistos alterados. A alteração não era em regra muito acentuada, e o processo de transporte e compactação do material contribuía de maneira considerável para a sua ulterior desintegração			
	Maciço de jusante	Material idêntico ao usado no maciço de mon- tante e ainda um pequeno volume de areias aluviais provenientes do saneamento do leito do rio	-		
Mara	nhão	Quer no maciço de montante quer no de jusante e ainda no núcleo os solos usados são do tipo dos da barragem de Silves			
	Núcleo	Solos aluviais derivados de diorites	SC-CL: Areias argilosas com argilas de média plasticidade		
ontargil	Maciço de montante	Idem	SC: Areias argilosas		
M	Maciço de jusante Idêntico ao maciço de montante e ainda um pequeno volume proveniente do saneamento do leito do rio		SC: Areias argilosas		

(1) Unified classification - Bureau of Reclamation e U.S. Corps of Engineers

2 - Controle da colocação de solos em obra

Relativamente aos solos usados nas barragens de Campilhas e Montargil e no núcleo das barragens de Silves e Maranhão os critérios de controle basearam-se na especificação de se obter uma prévia percentagem do peso especifico considerado como máximo para o equipamento de compactação disponível. Pequenos aterros experimentais construídos no início das obras tornaram possível constatar que o ensaio Proctor traduzia satisfatoriamente as condições de compactação realizadas pelo equipamento previsto.

Como regra, especificou-se a obtenção de compactações relativas de 98% em relação ao máximo Proctor, e variando os teores de humidade entre o óptimo Proctor e -2%.

Consequentemente o controle focou as seguintes determinações:

 Peso específico e teor de humidade de colocação dos solos — uma verificação por cada 1 000 metros cúbicos.
Determinação das curvas de compactação dos solos usados na construção — uma determinação por cada 5 000 metros cúbicos, ou sempre que a direcção da obra verificava que mudavam as características do solo proveniente das áreas de empréstimo.

Relativamente aos xistos usados na construção dos maciços exteriores das barragens de Silves e Maranhão a sua granulometria final (fig. 3), mesmo depois da considerável desintegração causada pelos equipamentos de transporte, espalhamento e compactação, levaram à conclusão de que não era prático o controle por meio de ensaios de compactação do tipo Proctor. Isto por causa da elevada percentagem de elementos grossos que, a fim de evitar efeitos de arco, levariam ao emprego de moldes de grandes dimensões, tornando os ensaios difíceis e morosos.



Por esta razão, o controle dos aterros construídos com xistos alterados foi realizado tomando como referência os aterros experimentais efectuados no princípio da obra (*).

^(*) ROCHA, M., J. FOLQUE e G. DE CASTRO — Compactação em barragens de terra — Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Publicação n.º 59) — Lisboa, 1954.

As características de corte, compressibilidade e permeabilidade determinaram-se em ensaios «in situ» e sobre amostras intactas retiradas dos aterros experimentais, sendo os projectos das barragens reajustados em face destes resultados. Ao mesmo tempo determinaram-se as curvas estatísticas de distribuição dos pesos específicos e teores de humidade.

O controle da construção dos aterros consistiu na determinação dos pesos específicos e teores de humidade, ajustando-se a rega e a energia de compactação (número de passagens dos cilindros) a fim de se obterem valores cuja distribuição fosse semelhante às curvas correspondentes dos aterros experimentais. Optou-se por este método de controle em vez da fixação de um valor do peso específico a ser obtido, em virtude das grandes dispersões que esta grandeza apresentava de ponto para ponto.

Pelo exposto, conclui-se que foram usados métodos de controle totalmente diferentes consoante se tratasse de aterros de solos predominantemente finos ou de aterros construidos com xistos, nos quais existia uma grande percentagem de material maior que 5 mm.

Serão analisados separadamente os dois tipos de controle usado.

2.1. — Controle de compactação de aterros construídos com solos finos — O controle dos pesos específicos obtidos nos aterros foi efectuado, como se disse, com frequência de uma verificação por cada 1 000 metros cúbicos de solo posto em obra. Os ensaios foram efectuados pelo método da garrafa de areia, fazendo uma cova no aterro com cerca de 1 000 centímetros cúbicos, pesando o material removido e preenchendo a cova com areia seca. Cada determinação é a média de quatro ensaios.

Para controlar os teores de humidade de colocação usou-se o método do carboneto de cálcio. Ao mesmo tempo tiravam-se amostras que eram conduzidas a um pequeno laboratório de campo onde se fazia uma mais exacta determinação do teor de humidade, W, secando-as numa estufa a $105 \pm 1^{\circ}$ C. Estes valores usavam-se para calcular os pesos específicos aparentes secos, γ .

Por cada 5 000 metros cúbicos de solo ou mais frequentemente se as suas características variavam, determinavam-se as curvas de compatação seguindo o ensaio Proctor.

Além destes ensaios, as características de compactação eram ainda controladas por outra via: por cada 5 000 metros cúbicos extraía-se uma amostra intacta cravando no aterro moldes cilíndricos com 35 centimetros de diâmetro e 27 centímetros de altura. Estas amostras destinavam-se a ensaios de corte que serão discutidos adiante e nas quais se determinavam ainda o teor de humidade e o peso específico aparente seco.

Depois da desagregação das amostras determinava-se a percentagem de finos (>5 mm) e o seu teor de humidade, W_{f} . Para cada amostra determinava-se ainda a curva de compactação (Proctor).

Com estes elementos é possível calcular o peso específico aparente seco dos finos, γ_f , a compactação relativa, $(\gamma_f / \gamma_{PROCT.})$ e o desvio em relação ao óptimo, do teor de humidade, $W_f - W_{PROCT.}$.

2.1.1. — Pesos especificos aparentes secos — A fig. 4 mostra a distribuição dos pesos especificos aparentes secos dos finos, relativamente a 192 amostras do núcleo da barragem de Montargil. O desvio padrão (*) é de cerca de 5% o que corresponde a uma elevada dispersão. Na verdade, deve notar-se que os pesos específicos observados variam entre 1,4 e 1,8 limites estes bastante apertados. A alta dispersão é fàcilmente explicada se atendermos a que nas con-



dições presentes nos aterros de uma barragem de terra há o efeito não só das variações na compactação mas também da variação da qualidade dos solos.

O aspecto geral do problema é semelhante para as outras barragens, como se verifica no quadro II. Unicamente a dispersão é em geral maior, correspondendo a uma maior variedade de solos.

QUADRO II

Pesos específicos aparentes secos

	Barragens	N.ª de	Yt (g.	Yf (g. cm-*)		
		ensaios	valor médio	desvio padrão		
Car	npilhas	50	1,77	0,12		
Silv	es-núcleo	50	1,80	0,12		
Ma	ranhão-núcleo	50	1,70	0,08		
-	Núcleo	192	1,60	0,07		
Aontargi	Maciço de montante	144	1,70	0,13		
W	Maciço de jusante	144	1,66	0,13		

(*) Desvio padrão de uma série de números é a raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios desses números em relação ao seu valor médio.





2.1.2. — Compactação relativa — A análise dos resultados dos ensaios de controle mostra que os valores obtidospara a compactação relativa $\gamma_f / \gamma_{PROCT.}$, apresentam uma curva estatística de distribuição que é ligeiramente assimétrica. Isto pode inferir-se da fig. 5*a*) na qual se apresentam as curvas de distribuição e das frequências acumuladas para cem amostras do núcleo da barragem do Maranhão. O desvio padrão da compactação relativa é de 3%.

O aspecto geral do problema é idêntico para Campilhas e para os núcleos das barragens de Silves e Montargil, como se pode verificar no quadro III, onde se indicam os parâmetros das curvas de distribuição das compactações relativas.

QUADRO III

Desvios do	teor de	humidade	em	relação	ao	óptimo	Proctor
------------	---------	----------	----	---------	----	--------	---------

	Barragens		$100 \times \frac{\Upsilon f}{\Upsilon PROCT.} \%$		
		cusatos	valor médio	desvio padrão	
Can	npilhas	50	99	4	
Silve	es-núcleo	50	94	3	
Mar	ranhão-núcleo	50	101	3	
-	Núcleo	43	96	4	
Aontargi	Maciço de montante	52	92	7	
N	Maciço de jusante	44	92	8	

6

2.1.3. — Desvios do teor de humidade em relação ao óptimo Proctor — Na fig. 5 b) apresentam-se as curvas de distribuição e de frequências acumuladas dos teores de humidade, para a barragem do Maranhão. É interessante notar que não é difícil obter uma razoável aproximação dos teores de humidade em relação ao valor pretendido, pois o desvio padrão é de 2%, o que significa que cerca de 70% do solo colocado em obra apresenta teores de humidade que diferem do valor médio em menos de duas unidades. Isto é uma consequência da alta sensibilidade do solo usado perante a água, o que torna fácil a verificação de excessos ou insuficiências de água no solo colocado na barragem.

O quadro IV resume os resultados para as várias barragens.

QUADRO	IV
Compactações	relativas

		N.º de	$w_j - w_j$	
Darragens		ensaios	valor médio	desvio padrão
Can	npilhas	50	0,5	1
Silv	es-núcleo	50	-2	2
Ma	ranhão-núcleo	50	- 3	2
1	Núcleo	43	-4	3
Montarg	Maciço de montante	52	- 3	3
V	Maciço de jusante	44	-3	3

2.2. — Controle da compactação dos aterros construidos com xistos alterados — Como se disse, este controle efectuou-se tomando como referência aterros experimentais construidos com solos considerados representativos dos usados na barragem. Como é óbvio, empregou-se o mesmo equipamento e os mesmos métodos de construção que na barragem.

As propriedades de corte foram determinadas em ensaios de corte conduzidos sobre amostras intactas, cilíndricas, de 35 centímetros de diâmetro e 27 centímetros de altura, colhidas por cravação dos moldes nos aterros experimentais. Este ensaio, usado posteriormente para o controle de qualidade dos maciços construídos com solos finos, será descrito com maior detalhe no parágrafo seguinte.

Efectuaram-se ainda, em laboratório, alguns ensaios de compressão triaxial sobre amostras de 25 centímetros de diâmetro e 60 centimetros de altura, colhidas pelo mesmo processo nos aterros experimentais. Nos mesmos aterros, determinaram-se ainda as características de permeabilidade por meio de ensaios de injecção de água.



As fig. 6 e 7 mostram as curvas de distribuição e das frequências acumuladas do peso específico aparente seco relativamente aos maciços exteriores da barragem de Silves. Cada curva diz respeito aos valores obtidos em 50 amostras. As determinações efectuaram-se segundo o exposto em 2.1, unicamente com a diferença de que as covas tinham 5 000 centímetros cúbicos.

Indicam-se ainda nas mesmas figuras as curvas cumulativas dos pesos especificos aparentes secos determinados no aterro experimental para os materiais dos maciços de montante e jusante. O exame das figuras mostra uma notável concordância entre as curvas cumulativas do maciço de jusante e do aterro experimental. Quanto ao maciço de montante nota-se que o material apresenta pesos específicos aparentes secos mais elevados que os do aterro experimental. As circunstâncias em que os trabalhos decorreram explicam fácilmente este facto. Com efeito, o maciço de jusante foi construido com o mesmo grau de controle e rigor que os aplicados no aterro experimental, mas em relação ao maciço de montante, tendo em atenção a incerteza de um tipo de controle ainda sem precedentes, as exigências em relação à compactação efectuada foram mais rigorosas. Este facto resultou num acentuado desvio da distribuição dos pesos específicos aparentes secos para o lado dos valores mais altos.

A fim de avaliar a praticabilidade e validade de um tipo de controle estatístico, o presente relatório faz a seguinte contribuição:

— Provou-se no caso presente, que foi possível verificar, por meio de um pequeno aterro de 5 000 metros cúbicos, a variação das características de um solo de uma dada área de empréstimo da qual posteriormente foram extraídos 500 000 metros cúbicos de material; isto é evidenciado pela boa concordância das curvas cumulativas apresentadas na fig. 6 (maciço de jusante).

 Provou-se ainda que as curvas estatísticas são sensíveis às condições de compactação, pois um aumento do rigor

da execução conduziu a um apreciável deslocamento da curva referente ao maciço de montante.

Por estas conclusões parece possível decidir acerca do controle da execução de um aterro na base de uma recepção estatística. Será possível calcular o número de ensaios necessários para dicidir a aceitação ou rejeição de uma camada, em função da média dos pesos específicos observados nessa camada, e a probabilidade de aceitações ou rejeições indevidas.

3 — Verificação das características de corte, compressibilidade e permeabilidade por meio de amostras intactas

Os resultados completos dos ensaios de corte, compressibilidade e permeabilidade serão indicados e interpretados num trabalho em preparação, relativo à observação de barragens de terra. Mas com o fim de basear as conclusões deste estudo, alguns desses resultados serão fornecidos a seguir. Por eles será possível apreciar as consequências do controle da compactação nas características mecânicas.

3.1. - Ensaios de corte - Para o estudo das características de corte dos aterros construídos com solos contendo elevadas percentagens de materiais grossos, construiu-se um aparelho de corte para ensaiar grandes amostras; é formado por duas meias caixas cilíndricas e um sistema de carga, como se indica na fig. 8. As duas meias caixas são ligadas por um anel de protecção constituindo um molde cilindrico que para a obtenção de amostras é cravado no aterro. As duas meias caixas tem um espaço de 4 centímetros entre elas a fim de permitir a livre determinação de superficies de corte contendo os elementos grossos. Devido à lentidão com que as amostras saturadas consolidam, a condução de ensaios drenados com este equipamento é algo morosa e consequentemente unicamente usada para o estudo das propriedades de corte do aterro experimental. Mesmo para o estudo das propriedades de corte sobre amostras não saturadas, os ensaios drenados são morosos e portanto incompatíveis com o crescimento da construção. Por isso a determinação mais precisa destas características era efectuada por meio de ensaios de compressão triaxial, descritos mais adiante.

Com o aparelho de corte mencionado procurava-se sistemàticamente, por meio de ensaios não drenados, avaliar a dispersão das características dos solos usados na obra. Por cada 5 000 metros cúbicos de aterro, extraiam-se dum mesmo local quatro amostras que eram submetidas a ensaios de corte, conduzidos com tensões normais de 0,75 1,5 2 e 4 4 kg cm⁻². A fig. 9 mostra a distribuição das resistências ao corte durante o controle do núcleo da barragem de Montargil. Os resultados apresentados referem-se a 48 amostras submetidas ao corte sob uma tensão normal de 2 kg cm⁻². O valor médio da resistência ao corte é de 1,4 kg cm⁻² e o desvio padrão é 0,2 kg cm⁻². O aspecto geral é idêntico para as outras barragens como se verifica no quadro V onde se indicam alguns dos resultados obtidos. Apresentam-se ùnicamente os resultados correspondentes a uma das ten-

Fig. 8

sões normais, visto que este ensaio visava ùnicamente uma comparação das propriedades mecânicas. Os valores da resistência ao corte referentes à barragem de Montargil reduzem-se em cerca de 0,2 kg cm⁻² para a tensão normal de 1,5 kg cm⁻², considerada nas outras barragens.

Note-se em particular o facto de os valores médios das resistências ao corte, para a tensão normal de 1,5 kg cm⁻², variarem de 1,2 a 1,7 kg cm⁻². Esta pequena variabilidade merece ser notada se se tiver em atenção que as áreas de empréstimo não eram particularmente homogéneas e que os materiais, derivados de diferentes rochas originais, correspondiam a formações de sedimentação continental.

Esta relativa uniformidade das resistências ao corte deve resultar do processo de compactação por meio de cilindros de pés de carneiro, que compactam o solo até uma quase uniforme resistência relacionada com a pressão de contacto dos pés do cilindro.

São ainda de notar os pequenos valores dos desvios padrões e a sua pequena variação de obra para obra apesar da heterogeneidade dos aterros.

3.2. - Ensaios de compressão triaxial - Por cada 2 000 metros cúbicos de aterros retiravam-se cinco amostras intactas de um mesmo local por cravação de moldes, com 10 centímetros de diâmetro e 18 centímetros de altura. Estas amostras foram submetidas a ensaios de compressão triaxial, adensados, não drenados e com medida de pressões neutras. A apresentação de todos os resultados e descrição das técnicas usadas e respectiva aparelhagem serão mencionadas no já citado trabalho em preparação. No presente relatório indicar-se-ão apenas alguns resultados, referidos a ensaios sobre amostras saturadas, com o fim de avaliar a sua dispersão. Uma amostra considerava-se saturada quando, sob a acção dum gradiante hidráulico 20, se estabelecia um regime permanente de movimento da água devido a percolação. Portanto não era propositadamente conseguida a saturação das amostras. O que se pretendia era obter situações que reproduzissem as mais desfavoráveis condições normais, pois na prática os gradiantes hidráulicos são consideràvelmente menores.

QUADRO V

Resistência ao corte

	Barragens	N.º de	Tensão normal (kg. cm ⁻²) 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 2,0 2,0	Resistência ao corte (kg. cm ⁻³)		
	Landere	ensaios		valor médio	desvio padrão	
	Maciço de montante	22	1,5	1,6	0,3	
Silves	Maciço de jusante	18	1,5	1,6	0,4	
	Núcleo	20	1,5	1,4	0,2	
0	Maciço de montante	15	1,5	1,7	0,4	
laranhão	Maciço de jusante	15	1,5	1,6	0,4	
4	Núcleo	20	1,5	1,3	0,3	
-	Maciço de montante	36	2,0	1,6	0,3	
Iontargil	Maciço de jusante	36	2,0	1,4	0,4	
A	Núcleo	48	2,0	1,4	0,3	

Para uma tensão de adensamento de 1 kg cm⁻² as tensões totais principais máximas de rotura, σ_1 , distribuem-se, para o núcleo da barragem de Montargil, como se indica na fig. 10, onde se apresentam os resultados correspondentes a 16 amostras ensaiadas. O valor médio é de 3,02 kg cm⁻² e o desvio padrão é 0,27 kg cm⁻².

Em relação aos maciços de jusante e montante, os resultados obtidos sobre 17 amostras são:

Valor médio	3,36 kg cm ⁻²
Desvio padrão	0,35 kg cm ⁻²

Ť

O desvio padrão relativo é da ordem de 10%, portanto ainda menor que o obtido nos ensaios de corte directo (3.1). A diminuição da dispersão dos valores da resistência ao corte deve-se certamente à saturação das amostras ensaiadas no aparelho de compressão triaxial. Em ensaios sobre amostras preparadas por meio de compactação Proctor, em prévios estudos laboratoriais, obtiveram-se os resultados indicados no quadro VI. Estes resultados correspondem a ensaios de compressão triaxial, adensados e drenados. Os tipos I, II e III representam os tipos principais de solo identificado na prospecção das áreas de empréstimo da barragem de Montargil. O solo do tipo I foi usado no núcleo e os outros dois tipos nos maciços exteriores.

QUADRO VI

Ensaios	de	compressão	triaxial	(estudos	prévios)

1

Tipo	N.º de ensaios	Volume disponí- vel na área de empréstimo (m ³)	Coesão (kg. cm ⁻²)	Ângulo de atrito interno (graus)	$\sigma_1 \text{ para } \sigma_2 = 1 \text{ kg. cm}^{-1}$
I	3	180 000	0,30	15	2,60
п	10	600 000	0,25	20	2,80
ш	3	600 000	0,10	28	2,80

A comparação entre os valores deste quadro com os obtidos nos ensaios de controle indica que a média da resistência ao corte conseguida nos aterros é cerca de 0,5 kg cm⁻² maior do que a prevista nos prévios ensaios laboratoriais. Este facto deve-se provàvelmente à ausência de elementos grossos nas amostras ensaiadas em laboratório.

3.3. — Compressibilidade e permeabilidade — Por cada 5 000 metros cúbicos de aterros retirava-se uma amostra intacta por cravação de um molde cilíndrico com 30 centímetros de diâmetro. Conduziam-se ensaios de permeabilidade e compressibilidade nas amostras (com 8 centímetros de altura) ainda nos moldes cilíndricos. Antes da saturação das amostras determinavam-se as suas propriedades de compressibilidade para vários intervalos de carga. Eram então saturadas pelo processo já descrito e determinavam-se as suas características de compressibilidade, adensamento e permeabilidade. Media-se a permeabilidade pela corrente de percolação para um gradiante hidráulico de cerca de 20.

Para um aumento de tensão de 2 kg cm⁻² sobre uma tensão de 4 kg cm⁻², os coeficientes de compressibilidade para amostras não saturadas distribuem-se como se indica na fig. 11, em que se apresentam os resultados de 35 ensaios sobre amostras retiradas do núcleo da barragem de Montargil. O valor médio é de 0,011 kg⁻¹ cm² e o desvio padrão 0,008 kg⁻¹ cm².

Da mesma maneira, os valores obtidos sobre 40 amostras dos maciços de montante e jusante são:

valor médio	0,006	kg ⁻¹	cm ²	
desvio padrão	0,004	kg-1	cm^2	

Para um aumento de tensão de 2 kg cm⁻² sobre uma tensão de 4 kg cm⁻², os coeficientes de compressibilidade para 35 amostras saturadas, do núcleo da barragem de Montargil, distribuem-se como se indica na fig. 12. O valor médio é de 0,010 kg⁻¹ cm² e o desvio padrão 0,004 kg⁻¹ cm². Para os maciços de montante e jusante, obtiveram-se

Para os maciços de montante e jusante, obtiveram-se os seguintes valores, referentes a 38 amostras:

valor médio	0,007	kg ⁻¹	cm^2
desvio padrão	0,004	kg ⁻¹	cm^2

Note-se que a dispersão do coeficiente de compressibilidade é maior para amostras não saturadas.

A determinação experimental do coeficiente de permeabilidade conduziu, para o núcleo da barragem de Montargil, aos resultados traduzidos na fig. 13, correspondentes a 27 amostras. Pode dizer-se que todos os valores são inferiores a 10⁻⁷ cm.s⁻¹, ficando entre este valor e 10⁻⁹ cm.s⁻¹.

Para 22 amostras do maciço de montante obtiveram-se valores entre 9×10^{-7} e 2×10^{-8} cm.s⁻¹, e para 24 amostras do maciço de jusante os limites determinados são 10^{-6} e 10^{-8} cm.s⁻¹.

Por conseguinte os coeficientes de permeabilidade, dentro da dispersão que estes valores usualmente apresentam, não exibem uma larga variação.

Em estudos laboratoriais efectuados durante o projecto da barragem, obtiveram-se os valores dos coeficientes de permeabilidade que constam do quadro VII.

QUADRO VII

Coeficiente d	le	permeabilidade	(estudos	prévios)
---------------	----	----------------	----------	----------

Tipo	N.º de ensaios	Volume disponível na área de empréstimo (m³)	Coeficiente de permeabilidade (cm.s ⁻¹)			
1	10	180 000	8×10^{-9} a 3×10^{-9}			
п	10	600 000	2×10^{-8} a 5×10^{-9}			
ш	10	200 000	1×10^{-7} a 3×10^{-8}			

Pode concluir-se que os valores obtidos na obra concordam bem com os previstos os quais no entanto, apresentam dispersões mais pequenas.

4 — Síntese dos resultados e conclusões

Nas barragens referidas no presente relatório seguiu-se a prática habitual de construção. Isto é, efectuou-se o controle das características de compactação e humidade a fim de se obter certas características mecânicas do solo colocado nos aterros.

O critério de controle da execução dos trabalhos consistiu por conseguinte na determinação das compactações relativas e dos desvios dos teores de humidade em relação ao óptimo. Ao mesmo tempo, conduziam-se ensaios em amostras intactas, para verificação das características mecânicas conseguidas: resistência ao corte, compressibilidade e permeabilidade.

O quadro VIII resume, em relação ao núcleo da barragem de Montargil, os resultados apresentados, de maneira a tornar possível considerar por um lado os valores médios e dispersões da compactação relativa e desvio da humidade, e por outro lado os valores médios e dispersões das características mecânicas obtidas.

Compactação relativa $\gamma_I / \gamma_{PROCT.}$ (%)		Desvio da humidade W _f — W _{PROCT} , %		Resistência ao corte (tensão normal: 1,5) (kg. cm ²)		Ensaio triaxial σ_t $(\sigma_s = \sigma_s = 1)$ (kg. cm ⁻²)		Coeficiente de compressibilidade (saturado) (kg.** cm²)	
м	8	М	8	м	δ	М	8	М	δ
96	4	-4	3	1,4	0,3	3,2	0,27	0,010	0,004

QUADRO VIII

M — valor médio

 δ — desvio padrão

Note-se que as dispersões das características mecânicas indicadas no quadro VIII resultam da variação das condições de compactação e humidificação (por outras palavras, da irregularidade das condições de execução) e da variabilidade das características dos materiais usados.

A fim de formar uma ideia, em relação ao solo usado no núcleo da barragem de Montargil, da dispersão que pode ser atribuída à variação das condições de compactação e humidificação, conduziram-se ensaios em laboratório usando um solo homogéneo da mesma origem para todos os especimens, variando a compactação relativa e o teor de humidade de especimen para especimen. Os resultados obtidos apresentam-se na fig. 14.

Esta figura mostra a variação da tensão total principal máxima, σ_1 , obtida em ensaios de compressão triaxial, adensados e não drenados, quando se varia a compactação relativa mantendo-se constante o teor de humidade.

A fim de prever, da fig. 14, a influência das condições de compactação na dispersão da resistência, é necessário ter em consideração que $\gamma_I/\gamma_{PROCT.}$, e W não assumem na obra qualquer valor arbitrário. Assim, considerando constante a energia de compactação, isto é, um certo número de passagens do cilindro, aquelas variáveis relacionam-se com a curva de Proctor. A esta corresponde a curva *AB* da fig. 14. Se *AB* fosse realmente respeitada a dispersão da resistência seria necessàriamente maior que a observada. A menor dispersão verificada deve atribuir-se ao facto de que na prática a compactação é continuada até que os pés do cilindro de pés de carneiro não se enterrem no solo. Isto tende a desenvolver uma resistência correspondente à pressão de contacto dos pés do cilindro.

Podem indicar-se as seguintes conclusões gerais:

 1.º) Em relação ao uso de materiais residuais grossos na construção de barragens de terra, foi possível, com base em aterros experimentais, controlar eficientemente a construção.

2.º) Depois de colocados em obra, os solos usados apresentavam características mecânicas que, especialmente em relação às resistências ao corte, aparentavam relativamente fracas dispersões.

3.º) Os métodos de controle adoptados asseguraram fàcilmente nos aterros resistências ao corte maiores do que as previstas em prévios estudos laboratoriais.

4.º) Os coeficientes de permeabilidade dos aterros são da mesma ordem de grandeza dos previstos nos estudos laboratoriais e apresentam dispersões não muito altas.

> MANUEL ROCHA Director Interino do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ARMANDO PALMA CARLOS Director dos Serviços de Aproveitamentos da Direcção Geral dos Serviços Hidráulicos

José Folque

Chefe da Secção de Fundações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

VIRGÍLIO PENALVA ESTEVES Engenheiro do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

