

ESTUDO EM MODELO GEOMECÂNICO DA ROTURA DE UMA BARRAGEM GRAVIDADE POR DESLIZAMENTO AO LONGO DA FUNDAÇÃO

Gomes, Jorge P.¹; Costa, Carlos A.P.²; Lemos, José V.²; Pina, Carlos A.B.³

¹Assistente de Investigação do LNEC

²Investigador Principal do LNEC

³Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Dimensionamento Experimental e Estudos Especiais do LNEC



RESUMO

Foram desenvolvidos métodos e técnicas experimentais com vista a estudar, numa primeira fase, a rotura de uma barragem gravidade por deslizamento ao longo da fundação. Para levar a efeito este estudo, foram efectuados três modelos físicos do conjunto barragem - fundação utilizando materiais de alto peso específico e baixa resistência, denominados modelos geomecânicos. Foram simuladas diferentes condições: de resistência, através da alteração das propriedades das diaclases da fundação; e de acções, com aplicação da pressão hidrostática no paramento de montante e da subpressão numa junta da fundação. Os resultados experimentais foram comparados com os valores obtidos por um modelo matemático baseado no método dos blocos.

1 - INTRODUÇÃO

A avaliação da segurança à rotura de barragens gravidade é, em geral, condicionada por cenários de deslizamento ao longo de superfícies de descontinuidade existentes no maciço rochoso de fundação [1]. Se o mecanismo de colapso puder envolver o deslizamento ao longo de várias superfícies, terão que ser utilizados modelos matemáticos para avaliar a segurança da estrutura. De forma a verificar a fiabilidade destes modelos, o recurso a métodos experimentais é uma alternativa potente face à reduzida informação existente sobre o comportamento real das obras nestas situações [2].

Modelos físicos executados com materiais de alta densidade e baixa resistência (habitualmente denominados como modelos geomecânicos), representando sistemas descontínuos típicos de maciços de fundação de barragens de betão, são particularmente indicados para este tipo de estudos já que representam adequadamente o peso próprio das estruturas.

Neste artigo apresentam-se os ensaios efectuados em modelos planos, de uma barragem gravidade, para um cenário de rotura por deslizamento ao longo da fundação. Para o efeito, foram executados três modelos distintos, com diferentes possibilidades de deslizamento consoante a

geometria e as características das descontinuidades representadas na fundação. No primeiro modelo [3] foram consideradas apenas 2 descontinuidades na fundação, a que correspondem 2 blocos, tendo-se aumentado este número para 4 e 5 blocos nos modelos II e III respectivamente (fig. 1).

Para cada modelo foram admitidas duas situações de carga, uma primeira aplicando só a pressão hidrostática a montante com níveis sucessivamente crescentes, e uma segunda semelhante em termos de pressão hidrostática no paramento, mas aplicando também a subpressão numa junta horizontal, com o valor correspondente ao nível da água à cota do coroamento.

em cada modelo uma série de descontinuidades. As dimensões características da barragem são, aproximadamente:

- altura acima das fundações 27,0 m
- espessura no coroamento 5,5 m
- espessura na base 24,0 m

Nos modelos, executados à escala 1/100 (fig. 1), reproduziu-se uma secção transversal da barragem correspondente a 10,0 m de largura.

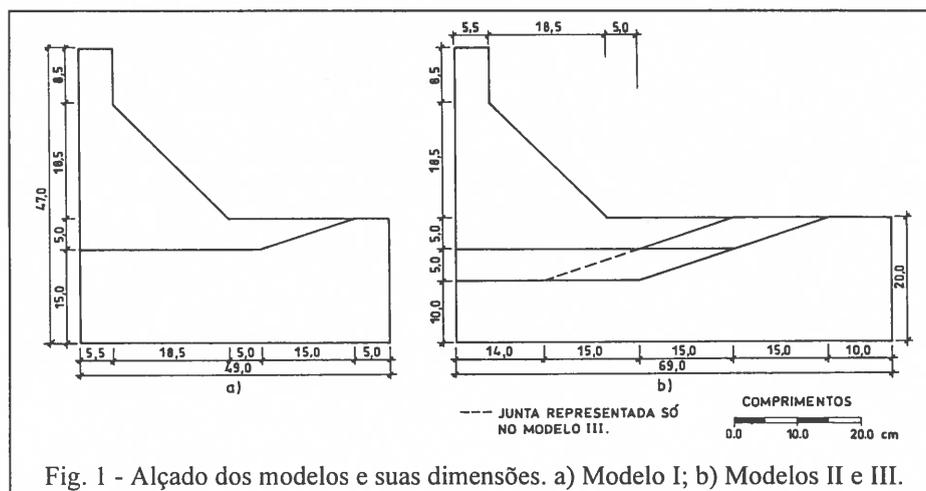


Fig. 1 - Alçado dos modelos e suas dimensões. a) Modelo I; b) Modelos II e III.

Os resultados experimentais são confrontados com os obtidos por via analítica. Para o primeiro modelo as soluções foram obtidas por simples equilíbrio estático de forças: conhecida a resultante das acções aplicadas no modelo e a respectiva linha de acção, foram calculadas as forças exercidas na fundação para que o modelo estivesse em equilíbrio. Para os modelos II e III foi utilizado o programa UDEC [4], baseado no método dos elementos discretos.

2 - MODELO FÍSICO

2.1 - Construção dos modelos

Como foi referido, para o presente estudo foram utilizados três modelos físicos, baseados nas características da barragem gravidade de Corgas [5], e constituídos pela barragem e parte da fundação, na qual foram introduzidas

Os modelos da barragem com a respectiva fundação foram implantados num tanque de betão, no qual foram posteriormente colados blocos de uma mistura de gesso, diatomite e água para confinar a fundação a montante e a jusante (figs. 2, 3 e 4).

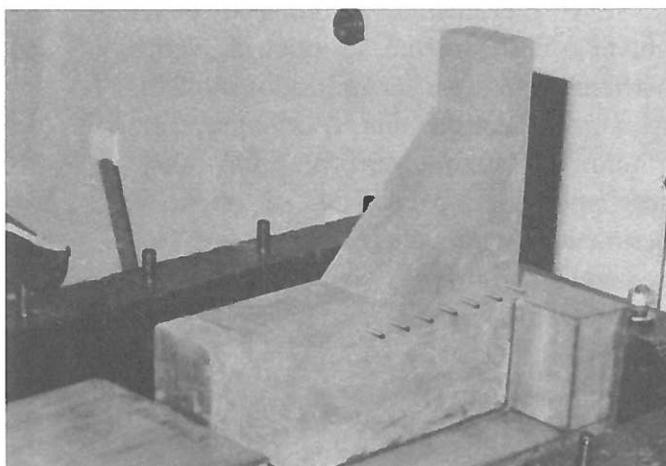


Fig. 2 - Vista do modelo I.

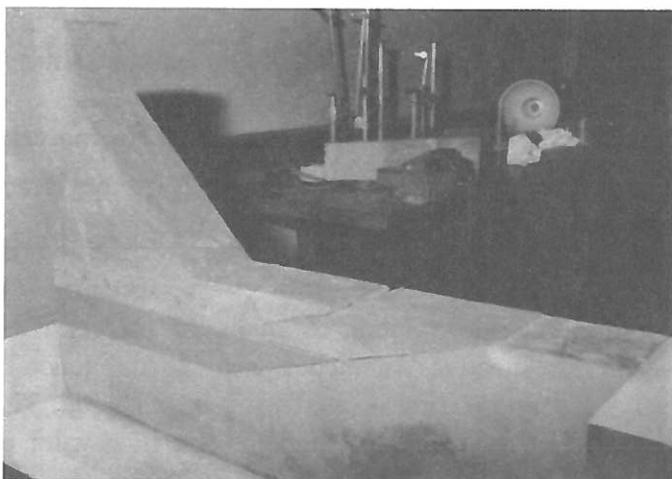


Fig. 3 - Vista do modelo II.

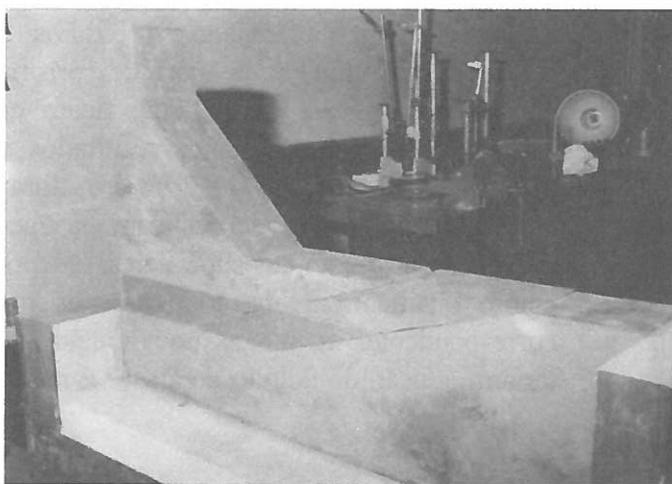


Fig. 4 - Vista do modelo III.

No que se refere ao primeiro modelo, a superfície de menor resistência, aproximadamente horizontal, existente no maciço rochoso a uma profundidade de cerca de 5,0 m, foi representada no modelo por uma junta com a mesma orientação (H1) numa extensão de 29,0 m a partir do paramento de montante. Uma das famílias de diaclases existentes no maciço foi considerada no modelo por uma junta com uma inclinação de aproximadamente 18° (I1), começando no fim da junta horizontal e acabando à superfície do terreno.

No segundo modelo, foram introduzidas mais duas juntas, uma horizontal (H2) e uma inclinada (I2), sendo estas paralelas às já existentes H1 e I1; por outro lado, a junta H1 foi prolongada até à nova junta I2, formando-se assim um conjunto de 4 blocos.

No terceiro modelo ensaiado, prolongou-se a junta I1 até esta intersectar a junta H2, aumentando assim o número de blocos para 5. Neste modelo, utilizaram-se praticamente os mesmos blocos do modelo II, tendo-se substituído apenas o bloco entre as juntas horizontais, H1 e H2, por dois blocos com a mesma geometria exterior do anterior, separados pela junta I1. Na fig. 5 representam-se esquematicamente as juntas reproduzidas nos modelos com a respectiva identificação.

Na construção do modelo foi utilizado um material desenvolvido no LNEC [6]. Foi obtido pela mistura dos seguintes materiais nas proporções ponderais indicadas:

areia de ilmenite	5,880 N
zarcão em pó.....	2,940 N
água.....	1,225 N
gesso	0,735 N

Os modelos foram construídos por blocos, separados pelas juntas existentes na fundação, tendo sido efectuado um molde de madeira para

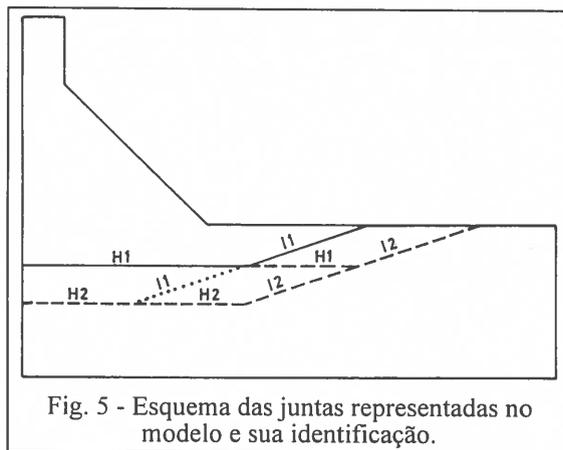


Fig. 5 - Esquema das juntas representadas no modelo e sua identificação.

cada um dos blocos. As paredes dos moldes a que correspondem juntas no modelo foram executadas com material plástico (perspex) para que a respectiva superfície ficasse o mais perfeita possível. Para determinação do ângulo de atrito das juntas e confirmação do peso específico do material do modelo,

foram moldados, juntamente com cada um dos blocos, três prismas ($6 \times 6 \times 18 \text{ cm}^3$) em moldes com características idênticas às dos utilizados na moldagem dos blocos do modelo.

Nesta fase colocaram-se nos diferentes modelos sete tubos de cobre devidamente posicionados (fig. 6), para que, por meio de pesos aplicados nas extremidades de varões de aço inseridos nesses tubos, fosse possível transmitir à fundação as forças correspondentes à acção da subpressão.

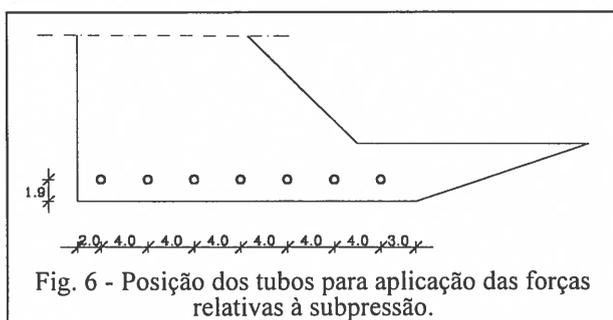


Fig. 6 - Posição dos tubos para aplicação das forças relativas à subpressão.

Nos modelos I e II as superfícies correspondentes às juntas não foram tratadas.

No modelo III, a que corresponde um maior número de blocos, procedeu-se ao tratamento da junta horizontal inferior (H2), numa primeira fase, e depois em conjunto com a junta I2, de modo a reduzir substancialmente o seu ângulo de atrito. Este tratamento consistiu em envernizar as superfícies de contacto com um verniz bastante resistente, tendo-se para o efeito utilizado o verniz que é indicado para o tratamento de madeiras aplicadas

no chão. Com esta técnica conseguiu-se uma redução de cerca de 50% do ângulo de atrito.

2.2 - Propriedades mecânicas do material dos modelos

Para determinação do peso específico do material utilizaram-se os prismas já referidos, sobre os quais foram feitas as respectivas medições e pesagens, tendo-se obtido para o modelo I o valor de $31,8 \text{ kN/m}^3$ e para os modelos II e III o valor de $30,3 \text{ kN/m}^3$.

Com vista a determinar o ângulo de atrito das juntas foram efectuados 4 ensaios de deslizamento com cada par de prismas correspondentes aos blocos que ficam em contacto nos modelos, cujos resultados se apresentam no quadro I. Primeiro, foram efectuados os ensaios de deslizamento, sem qualquer tratamento das superfícies, e depois com o tratamento já referido, para os prismas correspondentes a juntas no modelo que teriam redução do ângulo de atrito. Em cada

Quadro I - Resultados dos ensaios de deslizamento dos prismas

MODELO	JUNTA	TIPO DE SUP.	ÂNGULO DE ATRITO			VALOR MÉDIO DA JUNTA
			MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	
I	H1	SEM TRAT.	31° 37'	33° 14'	32° 30'	34° 8'
			37° 23'	37° 55'	37° 40'	
			35° 56'	36° 18'	35° 44'	
			29° 56'	31° 24'	30° 40'	
II e III	H1	SEM TRAT.	38° 9'	38° 49'	38° 26'	38° 16'
			39° 51'	40° 60'	40° 41'	
			35° 50'	36° 13'	36° 2'	
	H2	SEM TRAT.	38° 11'	38° 58'	38° 35'	38° 53'
			38° 40'	39° 30'	39° 0'	
			38° 48'	39° 30'	39° 5'	
III	H2	COM TRAT.	10° 8'	10° 56'	10° 31'	10° 31'

ensaio, a tensão normal era constante e resultava do peso do prisma superior, e a força tangencial era crescente e materializada pelo peso de grenalha de chumbo que se ia colocando num recipiente até se dar o deslizamento. Para cada par de prismas foram executados quatro ensaios.

Pela simples análise dos resultados verifica-se uma certa dispersão dos mesmos (entre 30° e 40°), pelo que se efectuaram posteriormente mais ensaios de deslizamento utilizando os próprios modelos. Assim, para verificação do ângulo de atrito médio existente em cada junta horizontal dos modelos, fez-se deslocar a parte superior dos modelos sobre essa junta, por aplicação duma força horizontal crescente. Na determinação do ângulo de atrito considerou-se uma tensão normal média correspondente ao peso da parte superior dos modelos. No quadro II são apresentados os resultados destes ensaios.

Quadro II - Resultados dos ensaios de deslizamento dos modelos

MODELO	JUNTA	TIPO DE SUP.	ÂNGULO DE ATRITO		
			MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA
I	H1	SEM TRAT.	31° 19'	33° 38'	31° 58'
II e III	H1	SEM TRAT.	34° 57'	37° 23'	36° 5'
	H2	SEM TRAT.	33° 59'	34° 36'	34° 17'
III	H2	COM TRAT.	20° 48'	22° 9'	21° 30'

Em ensaios realizados anteriormente verificou-se que este material tem uma resistência à compressão média de 3 MPa e um módulo de elasticidade médio de 1600 Mpa.

2.3 - Condições de semelhança

Para o estudo dos mecanismos de rotura dum modelo por deslizamento ao longo de juntas definidas na fundação, interessa apenas a resistência por atrito nas juntas, se não for considerada a hipótese de rotura do material. Assim, para facilitar o manuseamento do modelo, este foi construído com uma mistura cuja resistência e módulo de elasticidade,

atrás referidos, eram superiores ao que satisfariam as condições de semelhança.

Para que se verifiquem as condições de semelhança mecânica em relação às forças envolvidas no ensaio, a escala dos pesos específicos dos líquidos que reproduzem a pressão hidrostática no protótipo e no modelo (γ_p e γ_m) deve ser igual à escala dos pesos específicos dos respectivos materiais (γ'_p e γ'_m):

$$K_\gamma = K_{\gamma'} \text{ ou } \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \frac{\gamma'_p}{\gamma'_m}$$

Sendo

$$\gamma_p = 10 \text{ kN/m}^3, \quad \gamma'_p = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma'_m = 31,8 \text{ kN/m}^3 \text{ (modelo I) e}$$

$$\gamma_m = 30,3 \text{ kN/m}^3 \text{ (modelos II e III)}$$

o peso específico do líquido que deve reproduzir a pressão hidrostática no modelo será de:

$$\gamma_m = \frac{31,8}{24} \times 10 = 13,25 \text{ kN/m}^3 \text{ (modelo I)}$$

$$\gamma_m = \frac{30,3}{24} \times 10 = 12,63 \text{ kN/m}^3 \text{ (modelos II, III)}$$

Em relação ao ângulo de atrito, sendo este uma grandeza adimensional ($K_\phi = 1$), o seu valor no protótipo corresponde ao encontrado para o modelo.

2.4 - Sistema de carga

A pressão hidrostática foi reproduzida por meio de uma solução de cloreto de zinco, com as densidades atrás determinadas, contida num saco de borracha que se adaptava perfeitamente ao paramento de montante e que era suportado por um contramolde de madeira rigidamente ligado ao tanque de betão (fig. 7).

O controlo do nível da solução, no decorrer do ensaio, foi efectuado por visualização num tubo transparente graduado, vertical, que estava ligado ao saco de borracha.

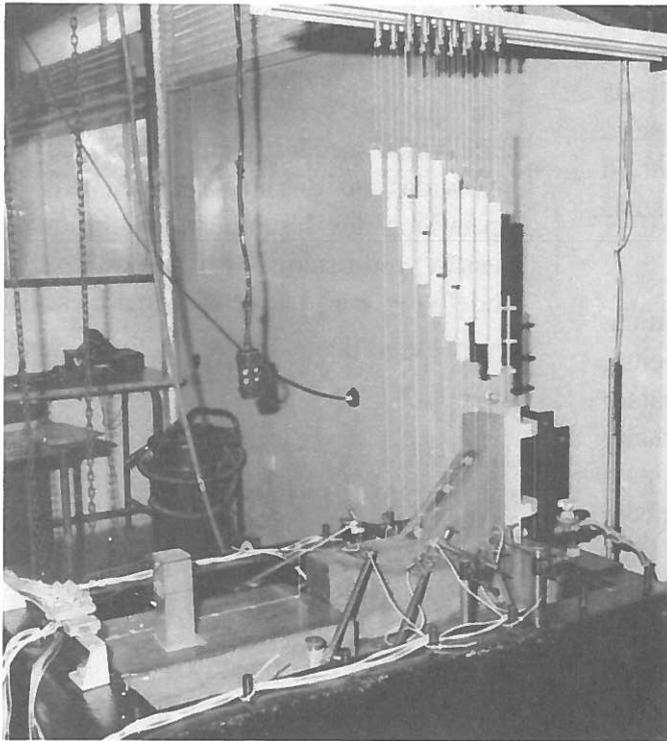


Fig. 7 - Sistema de aplicação da pressão hidrostática e da subpressão.

Como se referiu atrás, a acção da subpressão foi simulada por forças concentradas aplicadas nas extremidades de cada um dos 7 varões que atravessam os modelos por cima da junta H1 (fig. 6). Em cada varão as forças eram materializadas por um par de pesos iguais (um de cada lado da barragem) ligados às suas extremidades por fios de nylon que, para inversão do sentido dessas forças, passavam por roldanas suspensas numa estrutura metálica colocada por cima do modelo (fig. 7). Os pesos eram constituídos por um recipiente metálico no qual era introduzido grenalha de chumbo previamente pesada para prefazer o valor da resultante a aplicar.

Supôs-se que a subpressão na junta horizontal tinha uma distribuição triangular, a montante com o valor da pressão hidrostática e no fim da junta com o valor zero (fig. 8). O valor de cada peso foi determinado considerando, como área de influência de cada varão, o trapézio cujo centro de gravidade se situa no plano vertical que contém o eixo do respectivo varão, segundo o esquema da fig. 8.

3 - ENSAIOS E MEDIÇÕES

A fim de se tentar observar diferentes possibilidades de deslizamento no modelo, reproduziram-se dois cenários possíveis. A rotura por deslizamento foi em todos os casos provocada por uma subida excepcional do nível de água acima da cota do coroamento.

cenário 1 - acção isolada da pressão hidrostática (hipótese de drenagem total da fundação sob a barragem); e

cenário 2 - acção da pressão hidrostática e da subpressão correspondente à água ao nível do coroamento, sendo a subpressão mantida constante ao longo do ensaio (hipótese mais próxima da realidade).

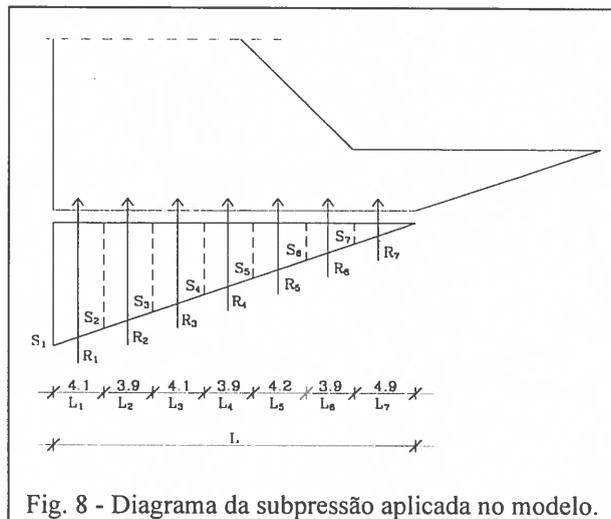
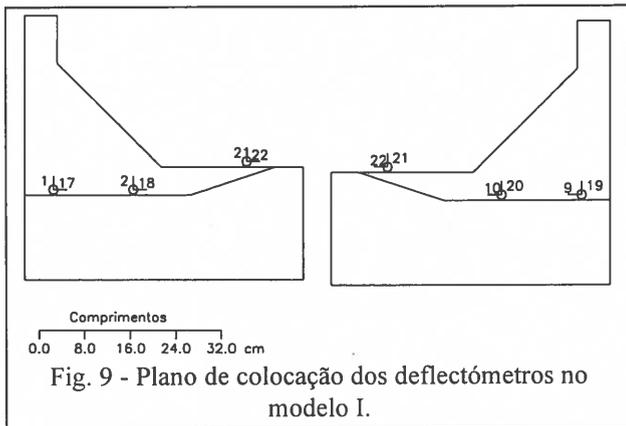
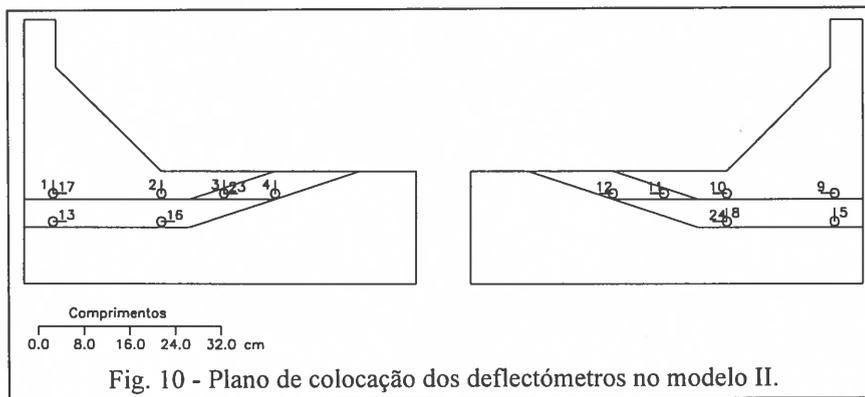


Fig. 8 - Diagrama da subpressão aplicada no modelo.

Em todos os ensaios foram efectuadas leituras de deslocamentos horizontais e verticais em 5 pontos para o modelo I e em 8 pontos para os restantes, conforme os planos de colocação das figs. 9, 10 e 11. Para a medição dos deslocamentos referidos foram utilizados deflectómetros de indução "Peekel" do tipo B60. A comutação e a leitura dos deflectómetros foram feitas por aparelhagem "Peekel" Autolog 2005 e a aquisição e tratamento da informação foram realizados por um microcomputador (fig. 12).



- ensaio 1.2 - aplicação da pressão hidrostática a partir da junta H2;
- ensaio 2.1 - aplicação da pressão hidrostática a partir da junta H1 mais a subpressão na mesma junta; e
- ensaio 2.2 - aplicação da pressão hidrostática a partir da junta H2 mais a subpressão na junta H1.

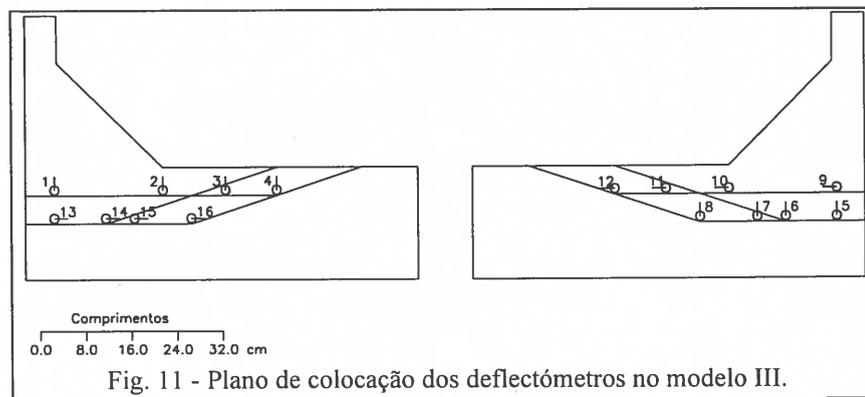


Conforme já foi referido foram considerados diferentes ângulos de atrito nas juntas do modelo III, correspondendo assim a situações de ensaio diferentes, que se passam a enumerar:

situação A - todas as juntas com o mesmo ângulo de atrito correspondendo às superfícies sem tratamento;

situação B - junta H2 com um ângulo de atrito de 20° após tratamento, e as restantes juntas sem alteração; e

situação C - juntas H2 e I2 com um ângulo de atrito de 20° após tratamento, e as restantes juntas sem alteração.



Efectuaram-se leituras de deslocamentos para o nível da água no protótipo à cota do coroamento e para cada incremento de subida da água acima dessa cota.

Os modelos II e III possuem dois níveis de juntas horizontais, tendo sido efectuados ensaios com aplicação da pressão hidrostática a partir da primeira junta e a partir da segunda, pelo que cada um dos dois tipos de cenários referidos anteriormente, se podem dividir em dois tipos de ensaios:

ensaio 1.1 - aplicação da pressão hidrostática a partir da junta H1;

Para o modelo I, foi efectuado só um ensaio de cada tipo e para os restantes, foram efectuadas várias repetições de cada ensaio, a fim de quantificar a dispersão dos resultados nestes ensaios. Como não foram efectuados todos os ensaios, para todas as situações, no Quadro III apresenta-se um resumo dos ensaios efectuados para cada modelo, indicando-se entre parentesis o número de ensaios realizados.

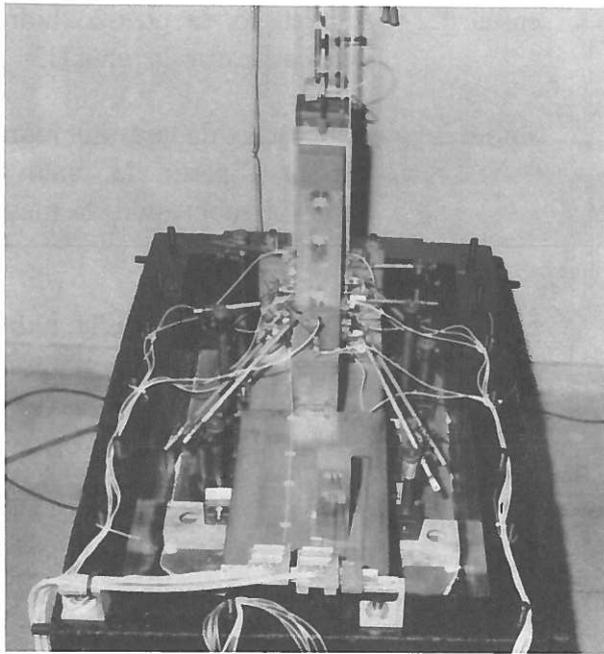


Fig. 12 - Colocação dos deflectómetros.

Quadro III - Ensaios efectuados para cada modelo

MODELO	SITUAÇÃO DE ENSAIO		
	A	B	C
I	1.1 (1) 2.1 (1)		
II	1.1 (3), 1.2 (3) 2.1 (3), 2.2 (3)		
III		1.2 (5) 2.2 (5)	1.2 (3) 2.2 (3)

4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nas figuras 13 a 28 ilustram-se os deslocamentos obtidos num dos ensaios de deslizamento para cada situação, em diagramas que permitem observar a evolução dos deslocamentos no modelo (horizontais e verticais) com o nível de água no protótipo.

Dum modo geral verifica-se que os modelos ao serem solicitados resistem até um determinado valor da carga, atingido o qual, ocorre um deslizamento brusco até a estrutura alcançar um novo estado de equilíbrio para o mesmo nível de cargas, isto é, verificam-se vários patamares de deslizamento.

Uma análise das figuras apresentadas mostra que para o modelo I:

- Quando se considera apenas a acção da pressão hidrostática (ensaio 1.1), o primeiro deslizamento do modelo dá-se para um nível de água no protótipo correspondente à cota 56; cerca da cota 70 observa-se um deslizamento praticamente contínuo do modelo, com os deslocamentos verticais a tomarem valores significativos. O modelo sobe pela junta inclinada, apresentando-se a junta horizontal mais aberta a jusante do que a montante.
- No ensaio 2.1, com o modelo sob a acção da pressão hidrostática e da subpressão, correspondente ao nível de água no coroamento, o deslizamento inicia-se mais cedo cerca da cota 40,

observando-se depois deslizamentos bruscos cerca das cotas 57, 65 e 70, com deslocamentos verticais maiores a jusante do que a montante, tal como no ensaio anterior.

Relativamente ao modelo II:

- No ensaio 1.1 verifica-se que o modelo começa a ter pequenos deslocamentos entre as cotas 40 e 50, tendo depois deslocamentos grandes acima da cota 60, com deslocamentos verticais maiores a jusante do que a montante. O deslizamento é semelhante ao do modelo I dando-se ao longo das juntas H1 e I1, não havendo praticamente movimentos dos blocos inferiores.
- Nos ensaios 1.2 os resultados obtidos são semelhantes ao do ensaio anterior. Alguns pontos de medição de deslocamentos verticais apresentam valores negativos já com algum significado, durante a parte inicial do ensaio, correspondendo ao fecho das juntas. No ensaio 1.1 já se tinha verificado este fenómeno, embora com menor amplitude.

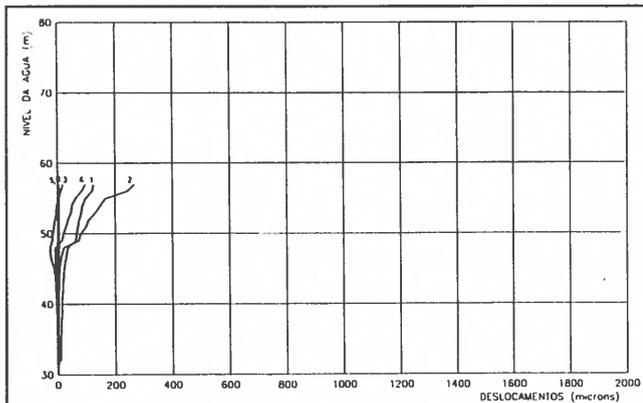


Fig. 21 - Diagramas de nível de água-deslocamentos verticais do modelo II do ensaio 2.1. na situação A.

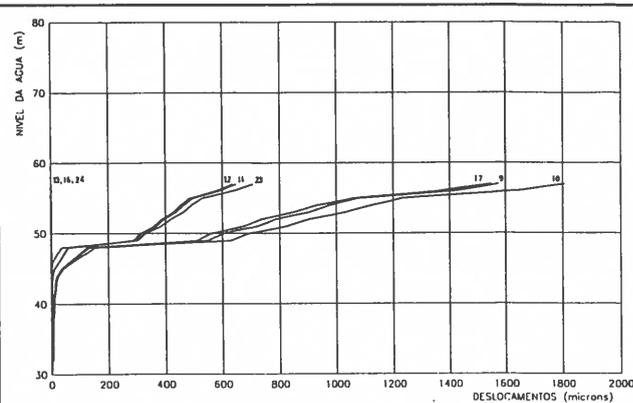


Fig. 22 - Diagramas de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo II do ensaio 2.1. na situação A.

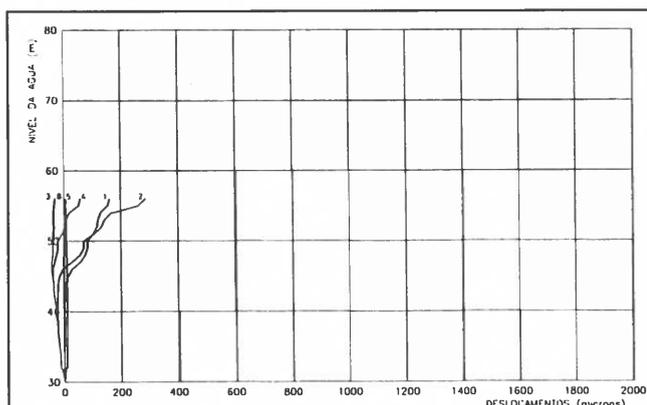


Fig. 23 - Diagramas de nível de água-deslocamentos verticais do modelo II do ensaio 2.2. na situação A.

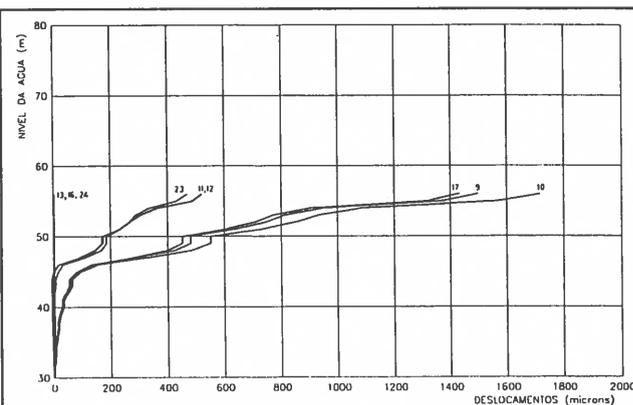


Fig. 24 - Diagramas de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo II do ensaio 2.2. na situação A.

- Nos ensaios 2.1 e 2.2 (com subpressão), verifica-se um comportamento global do modelo semelhante ao observado nos ensaios 1.1 e 1.2, embora o deslizamento se inicie naturalmente para uma cota sensivelmente inferior, cerca da cota 50.

Em relação ao modelo III:

- Nos ensaios 1.2 para a situação B, a rotura é ainda provocada por deslizamento ao longo das juntas H1 e I1 (para uma cota entre 50 e 60), havendo, no entanto deslocamentos horizontais apreciáveis no bloco situado entre as juntas H1 e H2, a que corresponde a deslocação do bloco inferior ao longo da junta H2 (e da I1) devido ao seu menor ângulo de atrito.
- Nos ensaios 2.2 para a situação B, verifica-se uma grande semelhança de comportamento relativamente ao ensaio anterior. A forma de rotura é idêntica à do ensaio anterior, mas para uma cota próxima de 50, sendo de realçar que os deslocamentos horizontais observados na junta H2 são menores do que os atingidos no ensaio anterior (a força horizontal na rotura é inferior).
- Para a situação C, as formas de rotura são diferentes das de todos os ensaios anteriores: verifica-se nos ensaios 1.2 (sem subpressão) deslizamento ao longo das juntas H2 e I2 (aquelas que têm um ângulo de atrito mais baixo), provocando o deslocamento global de todos os blocos. Nota-se também que existe algum deslizamento ao longo da junta H1. Os primeiros deslizamentos verificam-se cerca da cota 35, mas a rotura só se verifica para a cota 45. Nos ensaios 2.2, o modelo começa a deslizar para a cota 33, apresentando depois patamares de deslizamento para as cotas 36 e 40 onde já são atingidos deslocamentos apreciáveis. A existência de sub-pressão faz com que neste ensaio o deslizamento ocorra ao nível da junta H1 e siga ao longo da junta I2, que tem menor resistência que a junta I1.

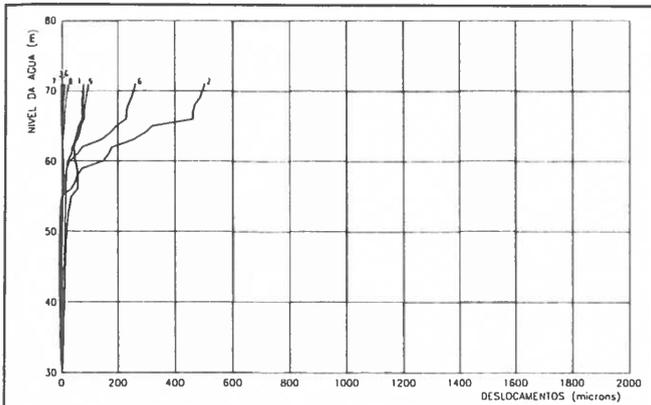


Fig. 25 - Diagramas de nível de água-deslocamentos verticais do modelo III do ensaio 1.2. na situação B.

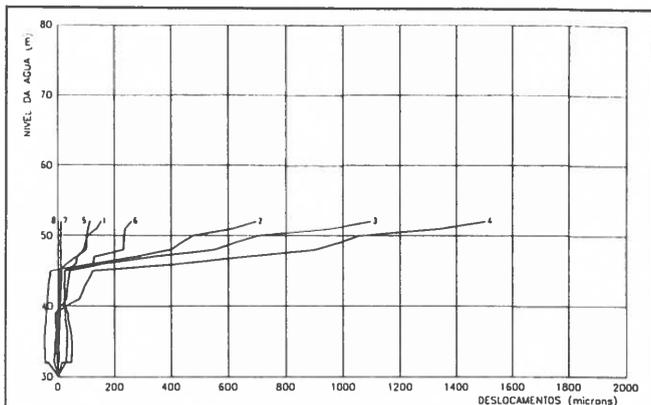


Fig. 29 - Diagrama de nível de água-deslocamentos verticais do modelo III do ensaio 1.2. na situação C.

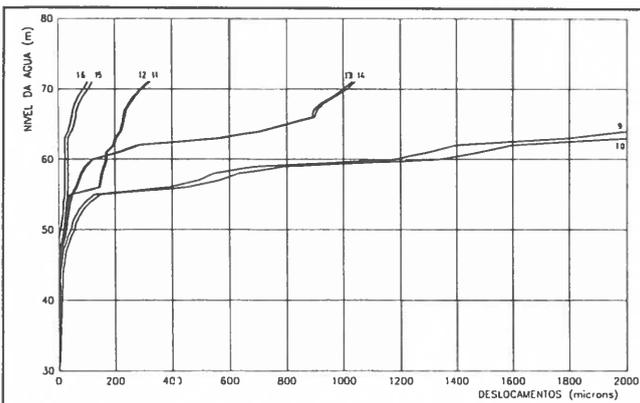


Fig. 26 - Diagramas de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo III do ensaio 1.2. na situação B.

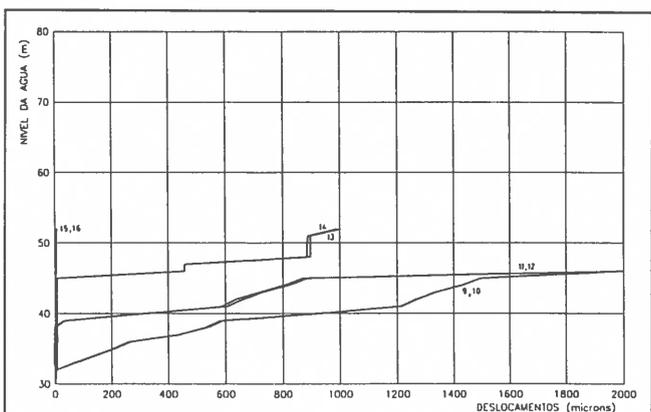


Fig. 30 - Diagrama de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo III do ensaio 1.2. na situação C.

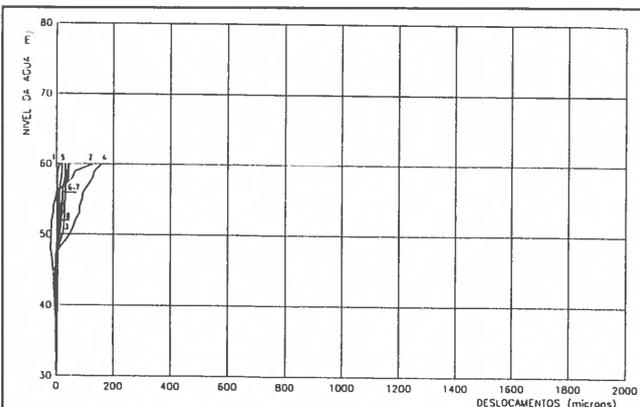


Fig. 27 - Diagramas de nível de água-deslocamentos verticais do modelo III do ensaio 2.2. na situação B.

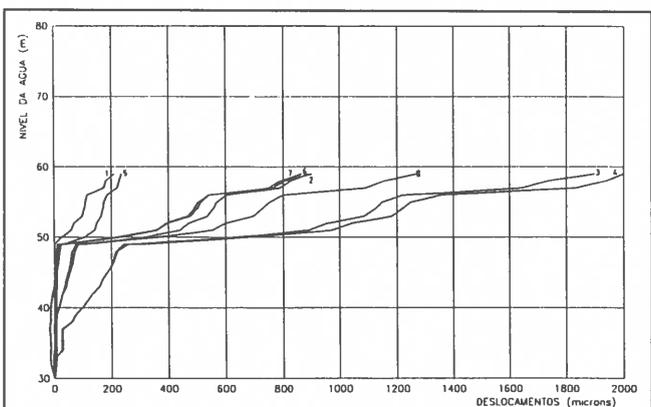


Fig. 31 - Diagramas de nível de água-deslocamentos verticais do modelo III do ensaio 2.2. na situação C.

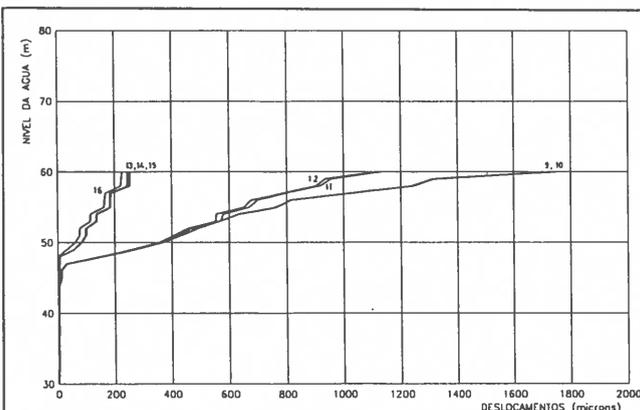


Fig. 28 - Diagrama de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo III do ensaio 2.2. na situação B.

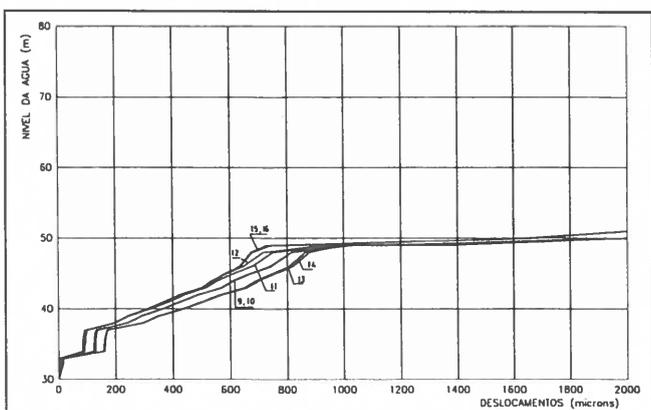


Fig. 32 - Diagramas de nível de água-deslocamentos horizontais do modelo III do ensaio 2.2. na situação C.

Nos ensaios realizados é evidente a grande influência da subpressão no deslizamento dos modelos. Assim, com a consideração da subpressão, para além da redução da carga na rotura, o aparecimento de deslocamentos verticais (que correspondem normalmente a deslocamentos horizontais da ordem de 500 μm no modelo) ocorre para cada vez menores subidas de água acima da cota do coroamento. No quadro IV, são apresentados os valores de cota de água, quando se atinge um deslocamento horizontal de 500 μm no modelo, o qual se adoptou como o valor que corresponde em todos os ensaios a uma situação de rotura.

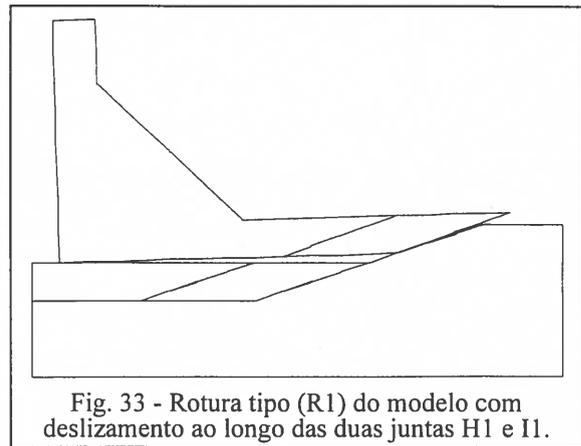


Fig. 33 - Rotura tipo (R1) do modelo com deslizamento ao longo das duas juntas H1 e I1.

Quadro IV - Valores do nível de água de rotura para os modelos ensaiados

Modelo	Ensaio		Nível de Água (m)		Forma de rotura
	Tipo	Situação	Ensaio	Média	
I	1.1	A	70	70	R1
	2.1	A	57	57	R1
II	1.1	A	73, 67 e 68	69	R1
	1.2	A	65, 67 e 67	67	R1
	2.1	A	49, 52 e 52	51	R1
	2.2	A	45, 49 e 50	48	R1
III	1.2	B	59, 57, 52, 54 e 56	56	R1
	2.2	B	44, 50, 52, 54 e 48	50	R1
	1.2	C	54, 43 e 45	47	R2
	2.2	C	43, 38 e 38	40	R3

No que se refere às formas de rotura apresentadas para os modelos, dividem-se em dois tipos:

- R1) deslizamento ao longo da junta horizontal H1 e inclinada I1 (fig. 33);
- R2) deslizamento ao longo da junta horizontal H2 e inclinada I2 (fig. 34); e
- R3) deslizamento ao longo da junta horizontal H1 e inclinada I2 (fig. 35).

5 - MODELO ANALÍTICO

Além dos ensaios efectuados foram executados também análises matemáticas para se interpretarem os resultados dos

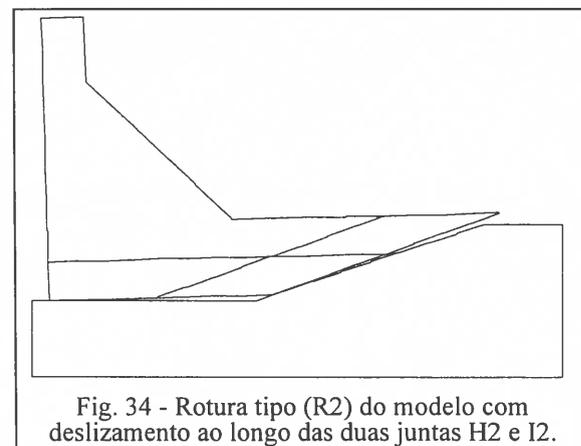


Fig. 34 - Rotura tipo (R2) do modelo com deslizamento ao longo das duas juntas H2 e I2.

cálculos basearam-se unicamente no equilíbrio de forças, conhecida a resultante das forças aplicadas pelo bloco superior ao

bloco inferior do modelo e a sua linha de acção. Esta resultante é devida ao peso próprio, pressão hidrostática e subpressão. Em todo o cálculo efectuado, foi admitido que o modelo só tinha movimentos de corpo rígido, porque o nível de tensões que se atinge durante o ensaio não provoca deformações que tenham influência nos deslocamentos obtidos no modelo.

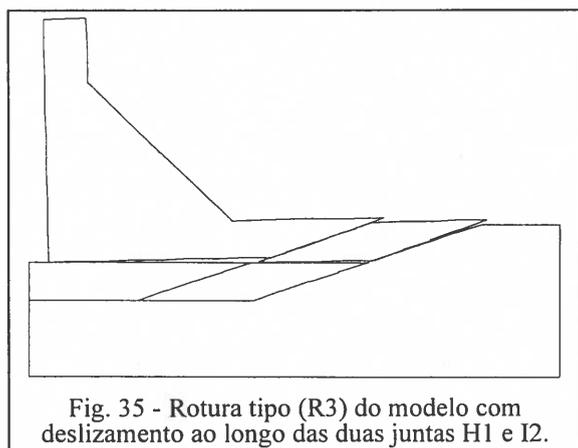


Fig. 35 - Rotura tipo (R3) do modelo com deslizamento ao longo das duas juntas H1 e I2.

Nestes cálculos foram consideradas as duas hipóteses de apoio possíveis da barragem na fundação, que implicam duas diferentes formas de rotura:

Deslizamento ao longo das duas juntas (H1 e I1) (forma de rotura tipo R1).

Este modo de rotura verifica-se no caso de a linha de acção da resultante das forças aplicadas intersectar a junta horizontal (H1). Neste caso, depois de ocorrer um pequeno deslocamento, a barragem passa a estar apoiada somente em dois pontos (fig. 36). Dado que os deslocamentos verticais na fase inicial de rotura são pequenos, foi utilizada a geometria inicial do sistema. Considerando que ambos os pontos se encontram na situação de deslizamento eminente, a orientação das reacções em relação à normal a cada junta fica fixada, obtendo-se a seguinte equação que permite determinar o ângulo de atrito ϕ (considerado igual em ambas as juntas), para o qual se verifica a rotura.

$$(\tan \phi)^2 [-R_{Av} \tan \beta] + (\tan \phi) [R_{Av} + R_{Bv} + H_R \tan \beta] + [-H_R + R_{Bv} \tan \beta] = 0$$

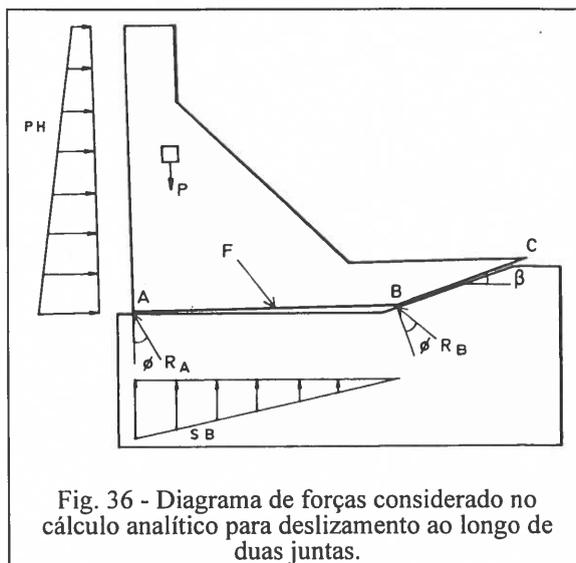


Fig. 36 - Diagrama de forças considerado no cálculo analítico para deslizamento ao longo de duas juntas.

Deslizamento apenas ao longo da junta inclinada (I1), com abertura total da junta H1.

Esta hipótese ocorre quando a linha de acção da resultante das forças intersecta a junta inclinada. Neste caso na situação de escorregamento eminente, após um pequeno deslocamento o modelo fica somente apoiado nesta junta (fig. 37), pelo que só é necessário calcular qual o ângulo que a resultante das acções faz com a normal à junta, sendo este o ângulo de atrito mínimo, para que no modelo não ocorra escorregamento.

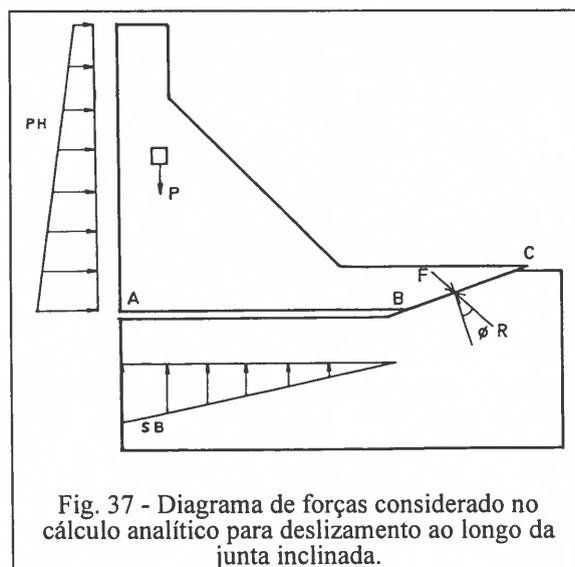


Fig. 37 - Diagrama de forças considerado no cálculo analítico para deslizamento ao longo da junta inclinada.

Os resultados obtidos nesta análise simplificada, mostra que este segundo tipo de rotura só ocorreria se o ângulo de atrito fosse mais elevado do que o que foi utilizado no ensaio. Apresentam-se no quadro V os

valores do nível da água que correspondem à rotura para os ângulos de atrito expectáveis.

Quadro V - Valores do nível de água de rotura para o modelo I, obtidos pelo cálculo analítico

Ensaio	Ângulo de Atrito (°)	Nível de Água (m)	Forma de Rotura
1.1	36,0	68,7	R1
	37,0	70,7	R1
	38,0	72,8	R1
2.1	36,0	48,4	R1
	37,0	49,6	R1
	38,0	50,9	R1

Para os restantes modelos os resultados experimentais foram comparados com o modelo matemático baseado no método dos elementos discretos, em que se utilizou o program UDEC. No quadro VI, são apresentados os valores da cota de água que provocam a rotura da barragem dos modelos II e III, considerando 37,5° para o ângulo de atrito das superfícies não tratadas e 20° quando estas eram envernizadas.

Comparando estes resultados (quadros V e VI) com os valores obtidos experimentalmente que se apresentam no quadro IV, nota-

Quadro VI - Valores do nível de água de rotura para os modelos II e III, obtidos pelo cálculo analítico

Modelo	Ensaio		Nível de Água (m)	Forma de Rotura
	Tipo	Situação		
II	1.1	A	67,0	R1
	1.2	A	67,0	R1
	2.1	A	49,0	R1
	2.2	A	49,0	R1
III	1.2	B	67,0	R1
	2.2	B	49,0	R1
	1.2	C	49,0	R2
	2.2	C		R3

se uma grande concordância dos valores obtidos pelos dois métodos. No entanto,

notam-se diferenças nos resultados experimentais entre os modelos II e III, para situações idênticas, como sejam os resultados do ensaio 1.2 na situação A do modelo II, que deveriam ser muito semelhantes aos do ensaio 1.2 na situação B do modelo III. Podem-se explicar estas diferenças, pelo facto de os ensaios terem sido efectuadas na sequência apresentada no quadro IV, e as superfícies com o decorrer dos ensaios terem vindo a diminuir o seu ângulo de atrito.

As formas de rotura são perfeitamente concordantes nos resultados dos métodos analíticos e experimentais.

6 - CONCLUSÕES

Os resultados experimentais e numéricos obtidos mostram que as barragens gravidade, do tipo da referida neste relatório, têm uma reserva de resistência significativa para um cenário da subida de água, mesmo no caso de existirem descontinuidades muito desfavoráveis no maciço de fundação (horizontais e com ângulos de atrito da ordem de 37°).

Os ensaios realizados demonstraram a exequibilidade e o interesse de utilizar modelos físicos com materiais de alta densidade para o estudo de fundações rochosas, e desta forma programa-se a sua utilização futura no estudo de várias roturas de estruturas mais complexas (como é o caso de barragens abóbada) tanto para acções estáticas como para acções dinâmicas.

Estes ensaios têm um papel importante na validação dos modelos numéricos, que dada a sua versatilidade tenderão a ser cada vez mais utilizados em problemas práticos, mas m que o confronto com os resultados da observação do protótipo nem sempre é possível. Neste

caso, mostraram a fiabilidade de utilização do método dos elementos discretos no estudo de deslizamentos em maciços diaclasados.

7 - BIBLIOGRAFIA

- [1] ROCHA, M. - **Analysis of the foundations of concrete dams.** International Symposium on Rock Mechanics Applied to Dam Foundations. Rio de Janeiro, 1978.
- [2] LEMOS, J.V. - **A comparison of numerical and physical models of a blocky medium.** International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Vienna, 1990.
- [3] COSTA, C.A.P.; GOMES, J.M.P.; LEMOS, J.V.; PINA, C.A.B. - **Estudo em modelo geomecânico da rotura de uma barragem gravidade por deslizamento ao longo da fundação.** Lisboa, 1993.
- [4] UDEC - **Universal Distinct Element Code, User's Manual (Version 1.7).** Itasca Consulting Group, Minneapolis, 1991.
- [5] PINA, C.A.B.; BATISTA, A.L. - **Estudo da barragem de Corgas pelo método dos elementos finitos.** Lisboa, 1990.
- [6] AZEVEDO, M.C.; FERREIRA, M.J.E; COSTA, C.A.P. - **High density and low strength materials for geomechanical models.** International Colloquium on Physical Geomechanical Models. Bergamo, 1979. Memória nº 530 do LNEC.

