

# BARRAGEM ABÓBADA SOBRE UMA FALHA ACTIVA — ESTUDO EM MODELO DE DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS ESPECIAIS

Arch dam on active fault — Model analysis of special construction arrangements

por  
JOSÉ OLIVEIRA PEDRO\*  
MARIA CRUZ AZEVEDO\*\*

RESUMO — Nesta comunicação apresentam-se os estudos em modelo relativos a uma barragem abóbada com disposições construtivas especiais, com vista a possibilitar a sua construção sobre uma grande falha, ao longo da qual não é de excluir a possibilidade de ocorrerem grandes deslocamentos.

Além das juntas de contracção habituais, a barragem disporá duma junta perimetral entre a abóbada e o pulvino, duma junta horizontal plana que separa a abóbada em duas partes, e de juntas verticais na parte inferior da barragem.

Os estudos em modelo efectuados permitiram avaliar as condições de funcionalidade e de segurança da barragem para movimentos relativos das duas margens, ao longo da falha.

SYNOPSIS — This paper presents the model analysis carried out to study construction arrangements adopted for an arch dam to be built on an active fault, where the occurrence of large displacements cannot be excluded.

Besides the usual contraction joints, the dam will be provided with a perimetral joint between the arch and the pulvino, a plane horizontal joint that separates the arch into two parts, and vertical joints in the lower part of the dam.

The model analyses make it possible to evaluate the fault movements that the dam will be able to withstand, for serviceability and rupture conditions.

## 1 — INTRODUÇÃO

A implantação de uma grande barragem requer a realização de estudos detalhados do local, especialmente dos pontos de vista tectónico, sísmológico e geotécnico. Devido à natureza dos maciços rochosos e ao grande número de variáveis a ter em conta na escolha do local de implantação das obras, a fundação destas é frequentemente atravessada por superfícies de descontinuidade de diferentes dimensões; assim, em alguns casos, devem ser previstos cenários de movimento, nomeadamente ao longo das maiores falhas.

---

\* Engenheiro Civil, Chefe do Departamento de Barragens do LNEC.

\*\* Engenheira Civil, Chefe do Núcleo de Dimensionamento Experimental do LNEC.

As soluções em barragens abóbada não têm sido consideradas apropriadas, quando o risco associado a movimentos relativos da fundação é elevado; no entanto, estas estruturas, quando nelas se incorporam disposições construtivas especiais com vista à resposta a esses cenários de movimento, podem também constituir soluções apropriadas. É esta a principal conclusão dum estudo recentemente realizado (Gilg *et al.*, 1987; LNEC, 1986), no qual foi estudada uma barragem abóbada capaz de se adaptar a grandes deslocamentos relativos das margens, sem perda da sua bem conhecida aptidão para satisfazer os cenários habituais de projecto.

Obviamente, uma correcta avaliação da capacidade de tais barragens abóbada só poderá ser feita depois da sua construção e da observação do seu comportamento. Entretanto, a utilização de modelos especialmente projectados para o efeito também pode dar contributos importantes para essa avaliação; por isso, o desenvolvimento destes modelos pouco comuns é de grande interesse. O objectivo desta comunicação é dar a conhecer os principais aspectos dos modelos especialmente desenvolvidos para dimensionamento de uma barragem abóbada do tipo referido (Gilg *et al.*, 1987; LNEC, 1986).

## 2 — PROJECTO DA BARRAGEM

Os principais aspectos do projecto da barragem, que foi efectuado por Stucky Ingénieurs-Conseils S.A., Lausanne, e Electrowatt Engineering Services Ltd., Zurich, como membros de ASAG (Arakhthos Swiss-Anglo-German Consulting Engineers), foram apresentados em publicação anterior (Gilg *et al.*, 1987).

A barragem está localizada num estreitamento do vale, num maciço calcário cujos estratos são aproximadamente perpendiculares ao rio e mergulham para montante com um ângulo de cerca de 50°. De acordo com os estudos do local, existe uma grande falha no fundo do vale, com um ângulo em planta de cerca de 17° (Fig. 1) e na qual não é de excluir a possibilidade de movimentos, em qualquer direcção, desde alguns centímetros até alguns decímetros. Foi decidido no projecto não colocar no corpo da barragem órgãos hidráulicos importantes, tais como descargas de fundo e descarregadores.

A barragem, do tipo abóbada de dupla curvatura, tem como principais dimensões: altura máxima acima da fundação, 185 metros; relação corda/altura, cerca de 2,4; espessura de 12 metros no coroamento e espessura máxima na superfície de fundação de 38 metros. A estrutura é constituída por blocos, separados por juntas de contracção verticais, como é habitual nestas obras, e além disso provida com um sistema de juntas especiais como segue (Fig. 1):

- 1) uma junta horizontal plana, que separa os dois terços superiores mais esbeltos da abóbada, do terço inferior;
- 2) uma junta perimetral curva, que separa a parte superior da abóbada do pulvino, localizado entre esta junta e o maciço de fundação; e
- 3) nove juntas verticais planas, na parte inferior da barragem, uma delas coincidente com o plano da falha, as duas adjacentes paralelas a ela e as restantes com inclinações variáveis até aos encontros.

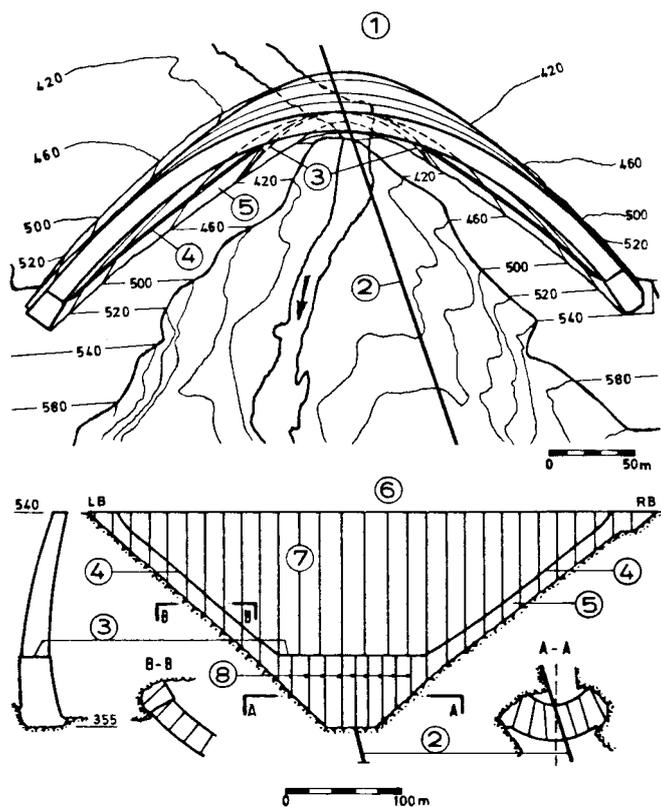


Fig. 1 — Planta e alçado da barragem: (1) planta; (2) falha; (3) junta horizontal; (4) junta perimetral; (5) pulvino; (6) alçado; (7) juntas de contracção; (8) juntas verticais

Estas juntas especiais têm por fim permitir, no caso dum movimento relativo das margens, que a parte superior da barragem rode em relação ao pulvino como uma estrutura monolítica, enquanto a parte inferior se adapta aos deslocamentos impostos com movimentos diferenciais entre blocos.

### 3 — ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO

#### 3.1 — Construção do modelo reduzido

Foi construído no LNEC (LNEC, 1986) um modelo reduzido à escala 1:250, representando a abóbada, o pulvino e o maciço rochoso circundante, bem como as juntas especiais, algumas das juntas de contracção e a falha, na fundação. A fundação do modelo representa uma zona

do maciço com as seguintes dimensões, em metros: 600 através do vale, 350 ao longo dele e 75 abaixo da zona mais baixa da superfície da fundação.

No modelo, o material utilizado para a construção da abóbada e do pulvino foi uma argamassa de cimento e areia, com um módulo de elasticidade de 5500 MPa, enquanto que para o material da rocha de fundação foi utilizada uma argamassa de cimento e pedra-pomes, com um módulo de elasticidade de 1900 MPa. A relação entre os módulos de elasticidade dos materiais da fundação e da abóbada foi portanto aproximadamente 0,3, tal como no protótipo. Os citados valores do módulo de elasticidade referem-se a tensões a cerca de 40% das resistências à compressão das argamassas da barragem e da fundação (3,9 e 1,3 MPa, respectivamente).

O modelo foi moldado por fases, utilizando moldes feitos duma mistura de gesso, água e fibras vegetais; para o fabrico destes moldes, foi necessário previamente construir um modelo de gesso-diatomite à mesma escala 1:250.

A fundação foi moldada segundo as quatro fases seguintes: margem direita, até ao nível do leito do rio; margem esquerda, até ao mesmo nível; margem direita, até ao nível do coroamento da barragem; e margem esquerda, até a este mesmo nível. A falha foi considerada plana, vertical, com uma direcção em planta de cerca de 17° em relação à secção transversal no fecho da barragem e preenchida com um material plástico de 5 mm de espessura.

A construção do modelo prosseguiu com a moldagem da barragem segundo as quatro fases seguintes: a parte inferior da barragem, até ao nível da junta horizontal plana; o pulvino, em ambas as margens; a abóbada, até meia altura entre o coroamento e a junta horizontal plana; e finalmente a abóbada, até ao coroamento.

Tanto a parte inferior como a superior da barragem foram moldadas por blocos alternados, definidos pelas juntas referidas acima (foram representadas sete juntas na parte inferior e dez na parte superior), com um intervalo mínimo de quatro dias entre blocos adjacentes. As juntas especiais (horizontal, perimetral e verticais) foram supostas sem coesão; por esta razão, para construir estas juntas no modelo, as suas superfícies foram pintadas, primeiro com goma-laca diluída em álcool e, depois de secas, com vaselina previamente liquefeita por aquecimento, procedimento que conduziu a juntas com coesão nula e ângulo de atrito interno de 32°.

A Fig. 2 mostra o modelo depois de completada a terceira fase da moldagem da barragem, sendo visíveis as juntas verticais na parte inferior, algumas juntas na parte superior e o tratamento da junta perimetral (ver tons diferentes).

### 3.2 — Sistemas de carga

O ensaio teve como principal finalidade avaliar as condições de funcionalidade e de segurança da barragem em carga, para deslocamentos ao longo da falha de uma margem em relação à outra (de alguns centímetros para a funcionalidade e de alguns decímetros, para a segurança, respectivamente). Dos vários possíveis movimentos foi considerado um deslocamento horizon-

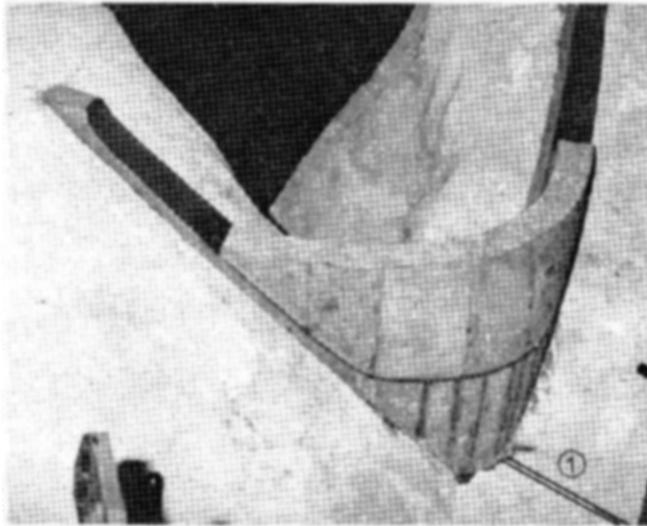


Fig. 2 — Vista do modelo da barragem durante a construção: (1) falha

tal da margem esquerda em relação à margem direita, no sentido de montante. Assim, foram necessários dois sistemas de carga: um, para reproduzir o peso próprio do betão e a pressão da água (albufeira cheia); e, o outro, para impor, passo a passo, os deslocamentos horizontais acima referidos.

O peso próprio do betão e a pressão da água foram discretizados em 40 forças (34 na parte superior e 6 na inferior), cada uma delas representativa da resultante de ambas as acções associadas aos elementos de área em que foi dividido o paramento de montante. Como as forças representativas do peso próprio são também aplicadas no paramento de montante do modelo, a posição da resultante é ligeiramente deslocada, de modo a compensar a excentricidade de aplicação do peso próprio.

Para aplicação das forças representativas do peso próprio e das pressões da água, foi utilizado um sistema de carga, já existente no LNEC, para ensaio de barragens até à rotura (Rocha e Serafim, 1958; Rocha, 1965; Rocha *et al.*, 1969; Azevedo *et al.*, 1979). Neste sistema, macacos hidráulicos de secções apropriadas (alimentados à mesma pressão de óleo) aplicam as forças resultantes correspondentes sobre placas de aço apoiadas em peças de madeira, as quais, pela interposição de membranas de borracha, se adaptavam perfeitamente ao paramento do modelo. Estes dispositivos foram colocados de modo a serem possíveis os movimentos entre blocos separados por juntas.

Apesar das disposições adoptadas e da experiência adquirida com a utilização do referido sistema de carga (Rocha e Serafim, 1958; Rocha, 1965; Rocha *et al.*, 1969; Azevedo *et al.*, 1979), a distribuição de tensões inicial por ele aplicada difere dos padrões habituais, tendo sido

as diferenças principais atribuídas à existência das juntas especiais. Todavia, não se considera ser este facto relevante para o objectivo do presente ensaio, dado que as forças resultantes são correctamente aplicadas e, além disso, as tensões iniciais são muito pequenas quando comparadas com as induzidas pelos movimentos da falha.

O segundo sistema de carga para imposição dos deslocamentos da margem esquerda do modelo, especialmente projectado para este ensaio, consiste principalmente numa placa móvel guiada por quatro patins em forma de V (cobertos com teflon) e accionada por um fuso montado num redutor de engrenagens com a relação 70:1. Assim, um deslocamento de 0,01 milímetros da placa móvel corresponde aproximadamente a 60° de rotação do volante montado no veio de entrada do redutor.

### 3.3 — Instrumentação

Os pontos sobre a superfície do modelo, onde se mediram extensões, deslocamentos e movimentos de juntas, foram seleccionados tendo em consideração os resultados de uma análise preliminar por elementos finitos.

As extensões foram medidas nos paramentos de montante e de jusante do modelo por meio de 137 extensómetros eléctricos de resistência do tipo Shinkoh S116 e S108, tendo sido estes últimos usados em zonas com espaço muito limitado; os deslocamentos horizontais foram medidos em 22 pontos do paramento de jusante do modelo por meio de coordenómetros bidimensionais; os deslocamentos verticais e os deslocamentos horizontais relativos dos bordos das juntas foram medidos por 12 deflectómetros de indução Peekel do tipo B60; e o movimento da falha foi medido por meio de 3 deflectómetros de indução do mesmo tipo, ligados à aparelhagem Peekel, e um outro também de indução ligado a um voltímetro digital.

Toda a instrumentação foi ligada a um sistema de aquisição de dados, constituído principalmente por aparelhagem de leitura e comutação Peekel com capacidade para 200 canais (ligados ao computador e ao sistema de processamento por meio duma interface que aumenta a velocidade de leitura dos canais). O sistema de processamento assentava num computador gráfico Tektronix, tendo como periféricos uma unidade de disquetes, um «hard-copy» e uma impressora. A Fig. 3 mostra uma vista geral do modelo e do sistema de aquisição e processamento dos dados.

### 3.4 — Procedimento e resultados principais do ensaio

Na realização do ensaio foram consideradas diversas fases, tendo sido, em cada uma delas, efectuadas todas as medições por meio dos instrumentos de medida ligados aos 200 canais da aparelhagem Peekel. As fases consideradas foram: situação inicial, sem acções; aplicação do peso próprio e da pressão hidrostática; aplicação de deslocamentos passo a passo, com valor



Fig. 3 — Vista geral do modelo e do sistema de aquisição e processamento dos dados

crescente, movendo para montante a margem esquerda, horizontalmente ao longo da falha (até serem atingidos grandes deslocamentos); análise simplificada da resposta do modelo às acções aplicadas através dos dados recolhidos; inversão do sentido dos deslocamentos da falha até repor a margem esquerda na sua posição inicial; descarga do peso próprio e da pressão hidrostática; e situação final, 5 minutos após a fase anterior.

Embora se tenham atingido grandes deslocamentos relativos das duas margens (valores superiores a 1 metro à escala da barragem) não se verificou o colapso do modelo.

A Fig. 4 mostra os deslocamentos horizontais dos arcos para diferentes passos do ensaio, podendo observar-se que:

- 1) o campo de deslocamentos é aproximadamente paralelo à direcção da falha;
- 2) a parte inferior da barragem (abaixo da junta horizontal plana) comporta-se diferentemente da parte superior, em especial na margem direita, onde se observa um importante deslizamento ao longo da junta horizontal;
- 3) na parte inferior da barragem, apesar da existência de várias juntas verticais, verifica-se apenas um deslizamento ao longo da junta vertical correspondente à falha, movendo-se todos os blocos da margem esquerda praticamente como um todo e sofrendo os da margem direita somente pequenos deslocamentos; e
- 4) na parte superior da barragem observam-se um comportamento contínuo à flexão, com rotação global dos arcos segundo um eixo vertical, e deformações aproximadamente anti-simétricas para um e outro lado do fecho dos arcos, tendo ocorrido provavelmente a abertura da junta A-A' (Fig. 4).

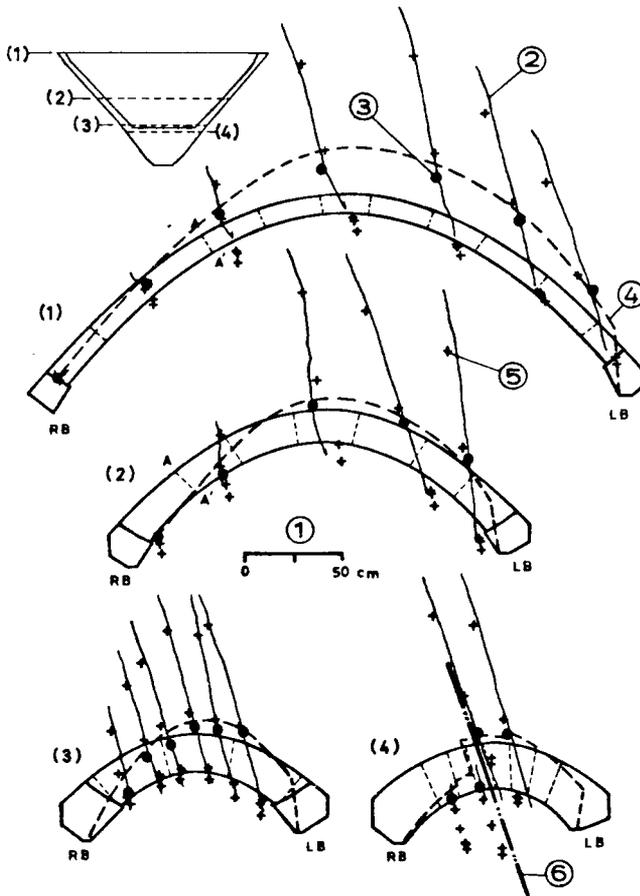


Fig. 4 — Deslocamentos horizontais de quatro arcos: (1) escala dos deslocamentos; (2) ensaio em modelo (carga); (3) ensaio em modelo (carga a 0,40 m); (4) elementos finitos (carga a 0,40 m); (5) ensaio em modelo (descarga); (6) localização da falha

As tensões principais nos paramentos da barragem foram calculadas para os sucessivos deslocamentos da falha a partir das extensões medidas no modelo (Figs. 5 e 6). Estas tensões, na parte superior da barragem, mostram o comportamento anti-simétrico à flexão atrás referido, nomeadamente na margem esquerda com compressão a jusante e tracção a montante e inversamente na margem direita.

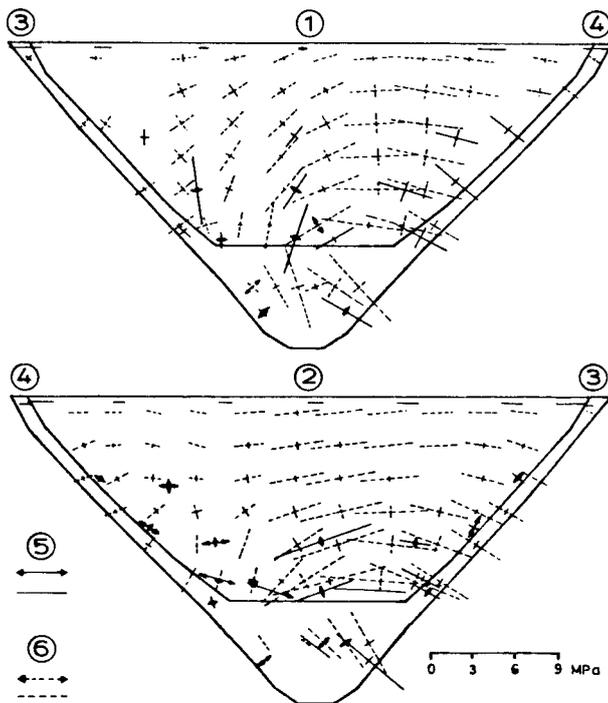


Fig. 5 — Tensões principais devidas ao peso próprio do betão, à pressão da água e ao deslocamento da falha de 0,10 m: (1) paramento de montante; (2) paramento de jusante; (3) margem esquerda; (4) margem direita; (5) tracção, compressão (ensaio em modelo); (6) tracção, compressão (elementos finitos)

#### 4 — ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Para apoiar a instrumentação e a interpretação dos resultados do ensaio do modelo reduzido utilizou-se um modelo de elementos finitos de casca previamente desenvolvido no LNEC (Pedro, 1973; Pedro e Pina, 1985). Este modelo, depois de ajustados os seus resultados com os do ensaio do modelo reduzido, tornou-se uma excelente ferramenta para analisar as influências de diversos parâmetros no comportamento da barragem, tais como: as distribuições das tensões iniciais devidas ao peso próprio do betão, à pressão da água e, eventualmente, a outras acções; a presença e as características geométricas e mecânicas das juntas especiais; e, ainda, outros possíveis movimentos da falha.

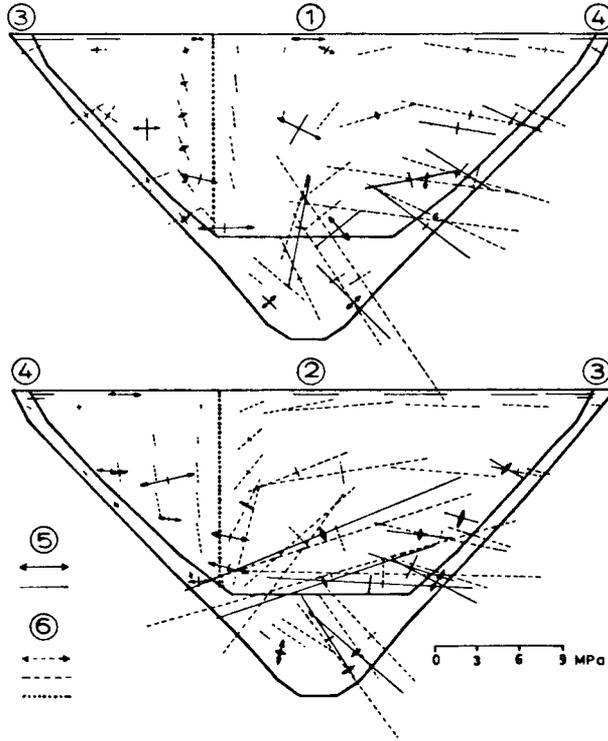


Fig. 6 — Tensões principais devidas ao peso próprio do betão, à pressão da água e ao deslocamento da falha de 0,40 m: (1) paramento de montante; (2) paramento de jusante; (3) margem esquerda; (4) margem direita; (5) tracção, compressão (ensaio em modelo); (6) tracção, compressão, junta aberta (elementos finitos)

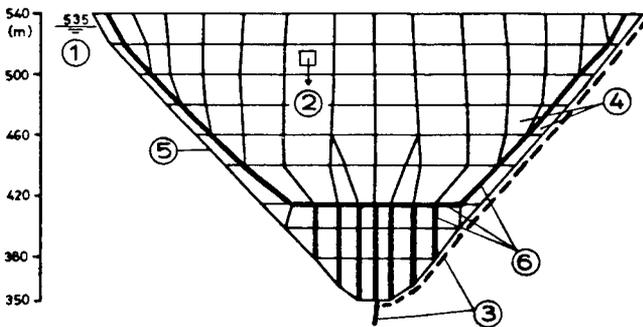


Fig. 7 — Divisão em elementos finitos: (1) pressão da água ( $\gamma_0 = 10 \text{ kN/m}^3$ ); (2) peso próprio do betão ( $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ ); (3) falha e fundação móveis; (4) elementos contínuos de betão ( $E = 30 \text{ GPa}$ ;  $\mu = 0,2$ ;  $S_c = 30 \text{ MPa}$ ;  $S_t = 3 \text{ MPa}$ ); (5) fundação elástica ( $E_f = 10 \text{ GPa}$ ;  $V_f = 0,2$ ); (6) elemento de junta ( $K_n = 1 \text{ GPa/m}$ ;  $K_t = 0,4 \text{ GPa/m}$ ;  $C = 0$ ;  $\phi = 32^\circ$ )

As principais hipóteses do modelo de elementos finitos estão resumidas na Fig. 7. Como se pode ver, utilizaram-se dois tipos diferentes de elementos finitos:

- 1) elementos de casca, contínuos e com comportamento elastoplástico (definido pelo critério de Coulomb para resistências à compressão e à tracção de 30 e 3 MPa, respectivamente); e
- 2) elementos de junta (para as juntas especiais) com comportamento elastoplástico (definido pelo critério de Coulomb para coesão nula e ângulo de atrito interno de  $32^\circ$ ).

As juntas especiais curvas (juntas perimetrais) foram aproximadas por elementos de junta planos com dois valores diferentes para o ângulo de atrito interno, consoante os movimentos se faziam para montante ou para jusante (conforme os ângulos entre a junta curva, junto a cada paramento, e o elemento de junta plano).

As Figs. 4 a 6 mostram que existe uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos e pelo modelo reduzido. Na Fig. 4 estão representados os deslocamentos de alguns arcos para o deslocamento da falha de 0,4 m e, nas Figs. 5 e 6, estão representadas as tensões principais nos paramentos da barragem para deslocamentos da falha de 0,1 e 0,4 m. Pode no entanto observar-se nas Figs. 5 e 6 que tensões de tracção superiores a 3 MPa subsistem nos paramentos da barragem segundo os resultados do modelo reduzido, enquanto se dissipam por fendilhação na análise por elementos finitos. De facto, verificou-se (LNEC, 1986) que a película de cola utilizada na colagem dos extensómetros eléctricos na superfície do modelo aumentava a resistência à tracção do material do modelo (0,5 MPa).

## 5 — CONCLUSÕES

O estudo efectuado aponta para as conclusões gerais seguintes:

- 1) é possível dimensionar barragens abóbada com juntas especiais que praticamente não funcionam para as condições normais de exploração, mas que, em situações excepcionais de grandes movimentos relativos das margens, conferem à estrutura extraordinária capacidade de adaptação;
- 2) dispõe-se no LNEC de modelos físicos e matemáticos recentemente desenvolvidos que permitem analisar o comportamento daquelas estruturas.

No caso particular da barragem abóbada referida nesta comunicação, verifica-se que:

- 1) para deslocamentos da falha até 0,1 m, as tensões mantêm-se dentro dos limites geralmente aceites no projecto destas estruturas para cenários de utilização (condições normais), não ocorrendo outros danos que não sejam pequenos movimentos das juntas especiais, e;
- 2) para deslocamentos da falha da ordem de grandeza de meio a um metro, embora ocorram nas juntas especiais grandes movimentos e roturas localizadas significativas, não se deu o colapso da estrutura.

No que respeita aos modelos e métodos de análise estrutural verifica-se que:

- 1) a fiabilidade e a capacidade dos métodos de análise melhoram consideravelmente com a utilização combinada de métodos experimentais e matemáticos;
- 2) a fiabilidade dos modelos só poderá, de facto, ser avaliada pela experiência futura, mas deve observar-se que os modelos utilizados têm conduzido a bons resultados para estudo de outras estruturas e de outros cenários.

## 6 — NOTA FINAL

A presente publicação é a versão portuguesa do trabalho «Arch dam on active fault. Model analysis of special construction arrangements», apresentado pelos autores no 16.º Congresso da Comissão Internacional das Grandes Barragens (San Francisco, USA, 1988).

Os autores agradecem à PPC (Public Power Corporation of Greece) e à ASAG (Arakhthos Swiss-Anglo-German Consulting Engineers) terem permitido a publicação dos resultados apresentados. Manifestam também o seu reconhecimento à equipa de investigadores do LNEC envolvida neste estudo, especialmente ao Eng.º M. J. Esteves Ferreira. Agradecem ainda ao Eng.º Carlos A. Pereira da Costa a colaboração prestada na elaboração da presente versão.

## BIBLIOGRAFIA

- GILG, B.; INDERMAUR, W.; MATTHEY, F.; PEDRO, J. O.; AZEVEDO, M. C.; FERREIRA, M. J. E. — *Special design of Steno arch dam in Greece in relation with possible fault movements*. Int. Symp. Earthquake & Dams, Beijing, 1987.
- LNEC — *Steno/Kalaritikos HEP. Special model tests for Steno Arch Dam*. Lisbon, July and October 1986.
- ROCHA, M.; SERAFIM, J. L. — *The problem of the safety of arch dams. Rupture studies on models*. Proc. ICOLD, New York, 1958.
- ROCHA, M. — *Structural model techniques. Some recent developments*. «Stress Analysis», Mc Graw Hill, 1965.
- ROCHA, M.; SILVEIRA, A. F.; AZEVEDO, M. C.; FERREIRA, M. J. E. — *The use of model tests in the determination of safety factor in arch dams*. «Water Power», Vol. 21, N.º 12, 1969.
- AZEVEDO, M. C.; FERREIRA, M. J. E.; COSTA, C. P. — *Influence of the spillways on the safety of arch dams*. Proc. ICOLD, New Delhi, 1979.
- PEDRO, J. O. — *Finite element stress analysis of plates, shells and massive structures*. CEB International Course on Structural Concrete, LNEC, Lisbon, 1973.
- PEDRO, J. O.; PINA, C. A. — *Finite element analysis of arch dams up to failure*. «Finite Element in Computation Mechanics», Bombay, 1985.