

INFILTRAÇÕES E SUB-PRESSÕES NO CONTROLO DE SEGURANÇA DAS BARRAGENS ABÓBADA DO VAROSA E DA BOUÇÃ*

Seepage and uplift in the safety control of Varosa and Bouçã arch dams

Grupo de Trabalho do Comité Nacional Português**

RESUMO — É posto em evidência o interesse das medidas de caudais de drenagem e de sub-pressões na fundação de barragens arco, em relação com o controlo de segurança destas estruturas, assim como do complemento destas medidas por análise da água e das matérias sólidas recolhidas nos drenos e, ainda, por medidas de deslocamentos e de deformações. São dados exemplos para os casos das barragens do Varosa e da Bouçã, que ilustram a utilidade de tais medidas; são indicados trabalhos de reparação adoptados para estas barragens

SYNOPSIS — The interest of seepage and uplift measurements at the foundation of arch dams, as regards the safety control of these structures, is highlighted as well as that of supplementing these measurements by analysis of water and solid matter collected in drains and by displacement and strain measurements. Examples are given for the cases of Varosa and Bouçã dams, which illustrate the usefulness of the above measurements; repairing works adopted for these dams are indicated.

* Comunicação apresentada ao XV Congresso da ICOLD, Lausanne, 1985.

** Membros do Grupo de Trabalho: LNEC — J.O.Pedro, C.A. Florentino, A. Mascarenhas e A. Silva Gomes; da EDP — A.C. Sousa, L. Braga da Cruz, G. Maria Moura e A. Barbosa.

1 – INTRODUÇÃO

O controlo de segurança de barragens arco requiere inspecções periódicas e a observação de algumas variáveis relacionadas com as principais solicitações (nomeadamente as devidas ao peso próprio, pressão hidrostática, temperatura e tremores de terra), propriedades estruturais (geométricas, mecânicas, hidráulicas e térmicas) e respostas estruturais (forças e deformações induzidas por acções, deslocamentos, deformações, movimentos de juntas e tensões).

As variáveis de controlo são escolhidas de modo a permitirem a detecção dos principais cenários de risco. Entre estes, são críticos para as barragens arco os cenários associados com acções da água e com as propriedades estruturais da fundação; e, para o controlo de tais cenários são variáveis úteis as infiltrações e as sub-pressões, assim como os deslocamentos e tensões.

O controlo de segurança da maior parte das barragens Portuguesas é feito pela Autoridade, Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamento Hidráulicos em cooperação com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e, no que respeita aos projectos hidroeléctricos, com a Electricidade de Portugal, EDP.

Quarenta barragens de betão, metade das quais dos tipos arco ou abóbadas múltiplas, têm estado sob observação nos últimos quarenta anos [1]. Têm sido feitas periodicamente medidas de infiltrações e de sub-pressões que têm fornecido informações úteis para o controlo de segurança dessas estruturas. O interesse destas medidas é exemplificado nesta comunicação para os casos das barragens arco do Varosa e da Bouçã.

2 – BARRAGEM DO VAROSA

2.1 — A barragem do Varosa é uma abóbada de 75 m de altura, no rio Varosa que é um afluente da margem esquerda do rio Douro; a relação corda-altura é de cerca de 2,5, os arcos são definidos por curvas parabólicas e as espessuras variam entre 3,5 m no coroamento e 12 m na base da consola central; os blocos da margem direita suportam um descarregador de superfície. O nível de retenção é à cota (264,00) [2] (Fig. 1).

O maciço de fundação é um granito e pode ser dividido em 3 zonas com diferentes discontinuidades, nomeadamente a margem esquerda, o fundo do vale mais a parte inferior da margem direita e a parte superior da margem direita.

A deformabilidade das 3 zonas é semelhante e cerca de 2 vezes a do betão. É elevada a tensão de rotura da fundação mas é pequena a resistência ao deslizamento sobre diaclases [3]. A partir da galeria de drenagem foram realizadas uma cortina de injecções de cerca de 45 m de profundidade e um sistema de drenagem.

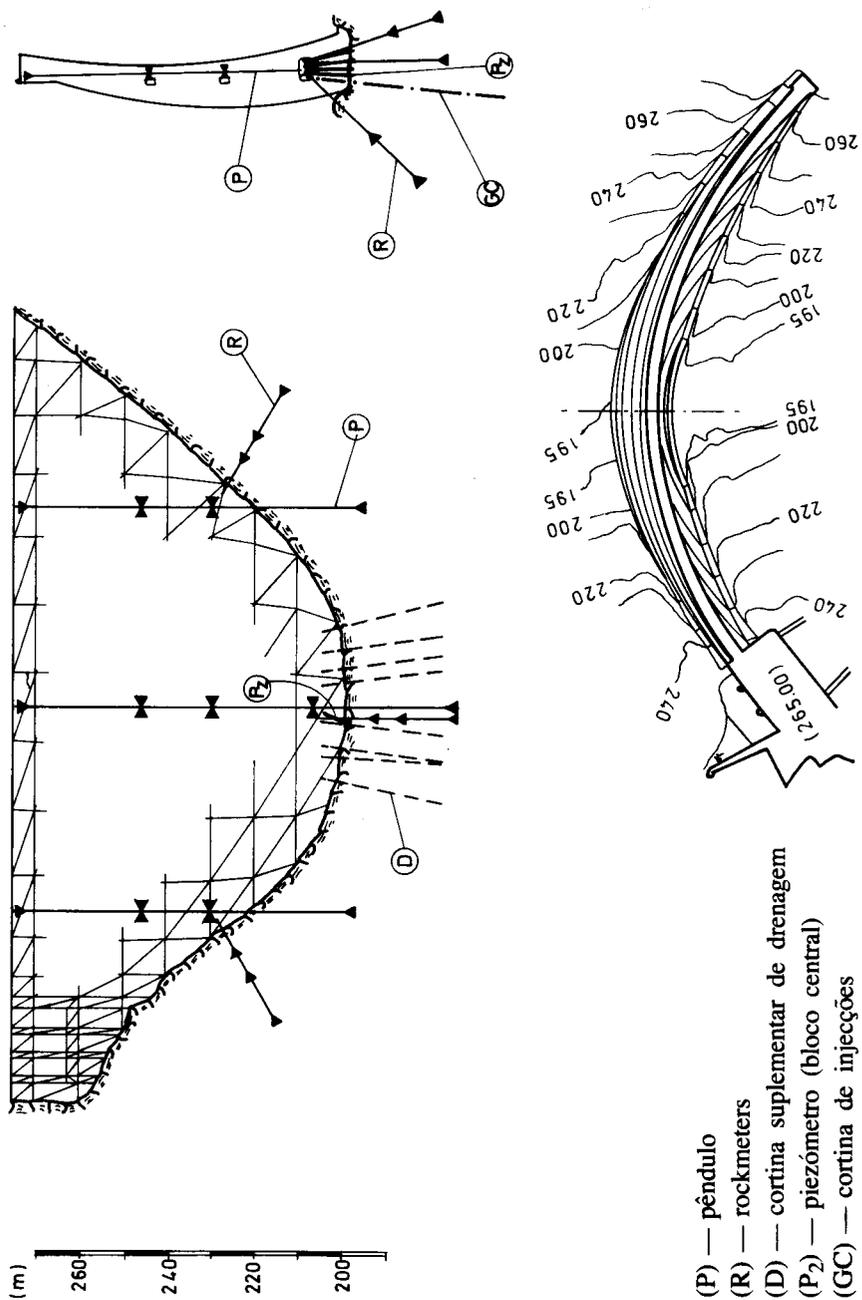


Fig. 1 — Barragem do Varosa.
Métodos dos elementos finitos e observação da fundação.

O projecto da barragem foi baseado na análise de modelos de casca pelo método de «trial-load» e pela análise de modelos reduzidos em gesso-diatomite [2], [4].

A instrumentação da barragem e da fundação inclui fios de prumo direitos e invertidos, extensómetros eléctricos, medidores de juntas, termómetros de resistência, rockmeters (extensómetros de fundação) e piezómetros [5].

2.2 — A observação da barragem principiou durante o período de construção. Ao longo do período inicial de exploração, foram comparados os resultados da observação com os valores previstos pelos modelos usados no projecto da barragem, com uma aceitável concordância, em geral, nomeadamente para os deslocamentos da barragem [6]. Contudo, em Dezembro 1977, com o nível da água na albufeira à cota (263,70), foram medidas subpressões, próximas da carga total, nos blocos centrais de maior altura e em diferentes pontos ao longo da espessura. Foram então perfurados drenos adicionais na base destes blocos (fig. 1); as subpressões foram reduzidas, mas observou-se um elevado valor do caudal drenado (quando comparado com o caudal ao longo da fundação das margens), variando ao longo do ano com o nível da água e a temperatura, com valores máximos no Inverno.

Em Abril de 1983, com o nível de água da albufeira à cota (263,80), foram detectadas sub-pressões da mesma ordem de grandeza que as observadas em Dezembro de 1977 e, ainda, um aumento do caudal drenado, novamente na base dos blocos centrais. Por outro lado, os deslocamentos na base destes blocos, medidos pelos rockmeters e pêndulos invertidos, acumulados durante 7 anos de exploração normal, indicaram valores normais para as componentes horizontais mas valores anormalmente elevados para as componentes verticais [7].

Foram tomadas medidas imediatas, entre as quais a limitação do máximo nível de exploração à cota (260,00) e a implementação de um programa intensivo de observações. Testes de permeabilidade a diferentes profundidades levados a efeito nos blocos centrais indicaram que a principal entrada de água ocorria particularmente no maciço rochoso próximo da base dos blocos (a profundidades entre 3 a 5 m).

2.3. — Foi feita sobre modelos de casca [8], [9], [10] a interpretação dos deslocamentos e das deformações observadas na barragem, nomeadamente dos deslocamentos radiais em 3 consolas e das tensões na consola central, para o peso próprio, pressão hidrostática e temperatura sazonal, ao longo do período normal de exploração; a análise destes modelos foi feita por métodos de interpretação quantitativa [7] e dos elementos finitos [8], [9]. Estas análises mostram excelente concordância entre os deslocamentos e tensões previstos pelos modelos e os observados na barragem e

permitem as seguintes conclusões: os modelos de casca que foram desenvolvidos representam adequadamente o comportamento da barragem e este comportamento não foi significativamente afectado pelos distúrbios ocorridos na fundação.

A análise dos citados modelos por elementos finitos foi feita para fundamentar a decisão de limitar o nível máximo de exploração à cota (260,00), já referido em 2.2, e para definir uma limitação mais restritiva do máximo nível de enchimento à cota correspondente à crista do descarregador (para o qual não ocorrem tensões de tracção nos blocos centrais). A evolução dos caudais drenados e das sub-pressões depois da primeira limitação do nível da água e a realização da análise de estabilidade da barragem e da fundação provaram que era desnecessária a segunda limitação do nível de água.

A análise de estabilidade do maciço de fundação foi feita para cenários de rotura de cunhas definidas pelas diaclases das principais famílias detectadas em cada zona da fundação, como referido em 2.1. Foram usadas duas aproximações: a primeira foi a clássica aproximação de considerar o equilíbrio de cunhas rígidas sob a pressão da água, peso próprio da rocha e forças aplicadas pela barragem na superfícies portantes [11]; e a segunda foi a análise sob as mesmas acções, para um dos modelos de casca acima indicados, apoiado numa junta ideal, de comportamento não-linear, definido por características (deformabilidade, inclinação e resistências à tracção e corte) variando ao longo das superfícies de apoio e assumindo valores extremos desfavoráveis, de acordo com os resultados dos ensaios «in-situ» da fundação [12]. Ambas as aproximações mostraram que as condições de estabilidade do conjunto eram satisfeitas com factores de segurança convencionais, desde que as resistências ao corte sejam mobilizadas nas duas faces das cunhas. Contudo, a segunda aproximação indica que roturas locais podem ocorrer na base dos blocos centrais, originando a rotura da cortina de injeções e deslocamentos permanentes da mesma ordem de grandeza dos observados[12].

2.4 — Para reparar a cortina de injeções na base dos blocos centrais foi considerada uma cortina elástica de resina acrílica, expansiva em presença da água. Para conter a resina num volume limitado de massa rochosa, será inicialmente feita uma pequena cortina de injeção de 15 m de profundidade, a montante da cortina principal. A pré-cortina será feita com a albufeira vazia enquanto que as injeções de resina serão realizadas com a albufeira cheia.

Para aumentar as condições de estabilidade das margens (de acordo com a análise de estabilidade, as resistências ao corte nas duas faces das cunhas devem ser mobilizadas) foram consideradas injeções de baixa pressão e pré-esforçadas as diaclases abertas. Contudo, foi inicialmente feita uma consolidação prévia por colocação de betão e pregagens nas margens.

Foi também considerado o reforço do sistema de observação da barragem e da sua fundação (apesar da eficiência mostrada pelo sistema em serviço), nomeadamente mediante a medida de deslocamentos por métodos geodésicos.

3 – BARRAGEM DA BOUÇÃ

3.1 — A barragem da Bouçã é um arco delgado de 70 m de altura, construída em 1955 num afluente da margem direita do rio Tejo; a relação corda-altura é de cerca de 3, os arcos são definidos por curvas circulares e as espessuras variam de 2 m no arco do coroamento a 8 m na base da consola central; um descarregador de superfície está localizado na parte central do arco do coroamento [13].

A barragem é suportada na fundação por intermédio de encontros artificiais e um sôco de geometria variável. A rocha de fundação é xisto na margem direita e granito no fundo do vale e margem esquerda. Ambos os tipos de rocha são bastante alterados e apresentam um grande número de descontinuidades [14].

A instrumentação da barragem inclui um sistema de medidas de deslocamentos por métodos geodésicos, medidores de juntas, extensómetros, termómetros e piezómetros [15].

Em diferentes comunicações [15], [16], [17], [10] foram apresentados resultados anteriores da observação da barragem e nenhum problema especial foi detectado. Contudo, a inspecção da barragem e da fundação em 1976 revelou a existência de algumas fissuras horizontais no paramento de jusante da barragem, e tal foi confirmado por uma segunda inspecção de pormenor feita recentemente.

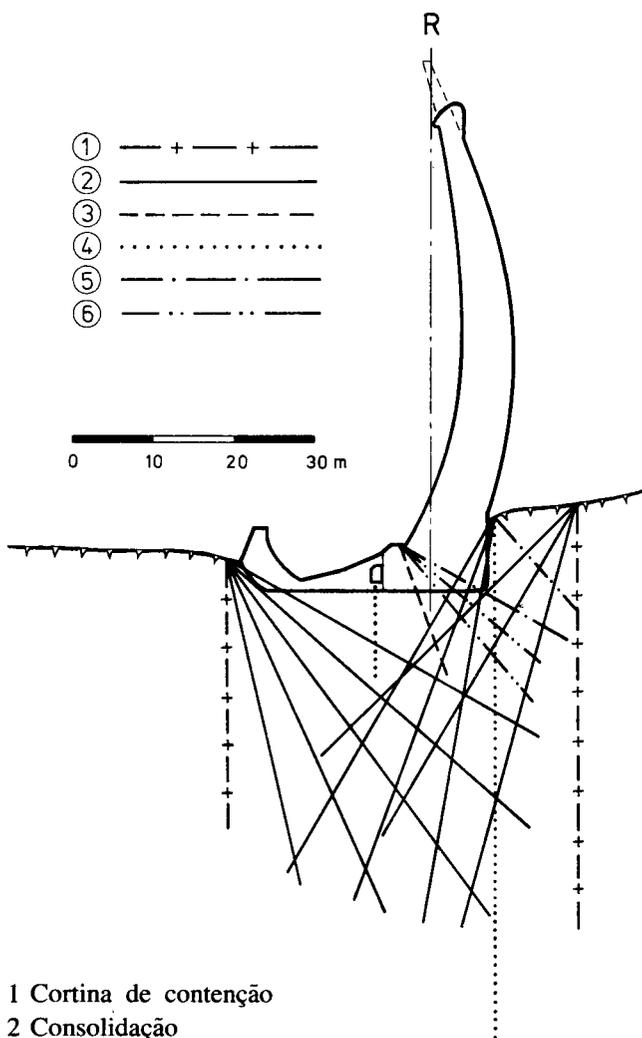
Nos últimos anos tem sido implementado um programa de observação mais intensivo, confirmando o comportamento normal da barragem; contudo, no que respeita à fundação, foram detectados grandes caudais drenados e as análises químicas e de difracção por raios X dos materiais sólidos encontrados na água retirada por amostragem dos furos abertos para instalação de rockmeters e piezómetros, chamaram a atenção para possíveis processos de deslavamento.

A interpretação dos resultados da observação da barragem e a determinação das condições de segurança foram realizadas primeiramente por uma análise pelo método de «trial-load» num modelo de casca e por análise de modelos reduzidos [16] e, mais recentemente, pela análise por elementos finitos de um modelo de casca [9], [17], [18]. Foram também feitas análises de interpretação quantitativa, tendo sido obtida uma boa concordância entre deslocamentos e tensões calculados e observados na barragem, para variações de pressão hidrostática e térmicas [10], [18].

Assim o comportamento da barragem pode ser considerado normal, quando comparado com as previsões dos modelos.

3.2 — Considerando o comportamento normal da barragem, as fendas observadas no paramento de jusante não mostram ter uma influência importante nas condições de estabilidade da barragem e, por isso, os trabalhos de reparação não são, de momento, considerados essenciais.

Contudo, os factos acima referidos em relação à fundação apontam para a necessidade de trabalhos de reparação e reforço [19]. Estes trabalhos consistirão essencialmente na melhoria das propriedades da fundação a fim de limitar o caudal drenado e parar o possível processo de deslavamento (Fig. 2).



- 1 Cortina de contenção
- 2 Consolidação
- 3 Injecção do contacto betão-rocha
- 4 Cortina de estanqueidade
- 5 Injecção complementar de estanqueidade
- 6 Reforço da cortina complementar de estanqueidade
- R Cilindro de referência

Fig. 2 – Barragem da Bouçã.
 Reparação e reforço da fundação (em projecto).

Estão projectados os seguintes trabalhos [19]: execução das cortinas de montante e de jusante para limitar a zona a tratar; consolidação do maciço rochoso para preenchimento das diaclases abertas antes e depois da lavagem; execução da cortina final de estanqueidade e das cortinas de drenagem; e injeção da superfície de contacto com resina acrílica. Estes trabalhos serão iniciados em 1986.

4 – CONCLUSÕES

Podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- Roturas ao longo de diaclases do maciço de fundação, perto da superfície de contacto barragem-fundação, são importantes cenários dizendo respeito à segurança das barragens arco. Para estes cenários são essenciais as acções hidrostáticas mas também tem influência o peso próprio e as acções térmicas, nomeadamente na base dos blocos centrais.
- Para controlar os cenários acima indicados são variáveis convenientes as medidas de caudais drenados e de sub-pressões. Elas dão informação sobre as propriedades hidráulicas e mecânicas da fundação e sobre a eficiência do tratamento por injeções e, ainda, sobre a drenagem. Informações importantes são também obtidas a partir das análises químicas e difractométricas (por raios X) da água e das matérias sólidas colhidas nos drenos. Contudo, o controlo do comportamento hidráulico da fundação de uma barragem arco deve ser complementado pela informação sobre o seu comportamento mecânico, nomeadamente por medidas de deslocamentos e de deformações.
- Os exemplos das barragens do Varosa e da Bouçã demonstram o interesse do controlo das propriedades hidráulicas das fundações das barragens arco. Aquela barragem é uma construção moderna e esta é uma velha barragem de trinta anos; em ambos os casos os resultados da observação de estruturas mostram padrões normais quando comparados com resultados dos modelos, não obstante os distúrbios na fundação que tornam necessários os trabalhos de reparação, como foi revelado pelo comportamento hidráulico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) – PEDRO, J. O.; FLORENTINO, C. A.; GOMES, A. F. S. (1979) — *Métodos de observação para controlo de segurança e deterioração de barragens de betão*. 3.º Congresso da ICOLD, Q 49, New Delli.
- (2) – CHENOP (1969) — *Projecto de ampliação do aproveitamento hidroeléctrico do Varosa* (relatório interno).
- (3) – LNEC (1971) — *Estudo das fundações da barragem do Varosa* (relatório interno), Lisboa.
- (4) – LNEC (1971) — *Estudo experimental da barragem do Varosa* (relatório interno), Lisboa.
- (5) – LNEC (1971) — *Plano de observação da barragem do Varosa* (relatório interno), Lisboa.
- (6) – SILVA GOMES, A. F. (1981) — *Automatização das actividades de observação de barragens e análise quantitativa dos resultados* (relatório interno) LNEC, Lisboa.
- (7) – SILVA GOMES, A. F.; SILVA MATOS, D. (1985) — *Análise quantitativa de resultados de observação de barragens. Estado actual, aplicações e perspectivas*. Q 56, 15º Congresso da ICOLD, Lausanne.
- (8) – PEDRO, J. O.; SILVA GOMES, A. F.; CÂMARA, R. C. (1984) — *Determinação de tensões em barragens de betão. O exemplo da barragem do Varosa*. Conferência Internacional sobre Segurança de Barragens, Coimbra.
- (9) – SOUSA, C. (1983) — *Barragem do Varosa* (relatório interno), EDP.
- (10) – PEDRO, J. O. (1977) — *Dimensionamento das barragens abóbada pelo método dos elementos finitos*. LNEC, Comunicação técnica n.º 479, Lisboa.
- (11) – ROCHA, M. (1978) — *Análise e projecto de fundações de barragens de betão*. Simpósio Internacional de Mecânica das Rochas, Relato Geral, Rio de Janeiro.
- (12) – LNEC (1978) — *Barragem do Varosa. Estudo das condições de estabilidade pelo método dos elementos finitos* (relatório interno), Lisboa.
- (13) – XEREZ, A. C. (1975) — *Experiência portuguesa em barragens arco galgáveis*. Proc. ASCE, Junho.
- (14) – LNEC (1975) — *Determinação das propriedades mecânicas do terreno de fundação da barragem da Bouçã* (relatório interno), Lisboa.
- (15) – LNEC (1963) — *Observação de barragem da Bouçã* (relatório interno), Lisboa.
- (16) – ROCHA M.; SERAFIM J. L.; SILVEIRA, A. F.; MATOS, M. E. C. (1958) — *Testes em modelo e observação da barragem da Bouçã*. 6.º Congresso da ICOLD, New York.
- (17) – SILVEIRA, A. F.; FLORENTINO, C. A.; FREITAS C. S. (1977) — *A experiência do LNEC no campo da observação de barragens de betão e de ensaios «in situ»*. Simpósio Internacional de Ensaios «in situ» de estruturas de betão, RILEM, Budapeste.
- (18) – EDP (1984) — *Barragem da Bouçã. Análise do seu comportamento estrutural* (relatório interno), Porto.
- (19) – EDP (1984) — *Barragem da Bouçã. Projecto de reparação* (relatório interno), Porto.