

EXTENSÕES E TENSÕES OBSERVADAS EM BARRAGENS DE BETÃO

M^a Luísa Braga Farinha ⁽¹⁾ e C. A. B. Pina ⁽²⁾

⁽¹⁾ Assistente de Investigação – LNEC, Lisboa

⁽²⁾ Investigador Coordenador – LNEC, Lisboa



RESUMO

Neste trabalho descrevem-se as técnicas de análise das tensões determinadas em barragens de betão, particularmente quando obtidas de forma indirecta, a partir das observações em extensómetros embebidos. Em seguida, apresenta-se uma análise do campo de tensões instalado numa grande barragem portuguesa, tendo em consideração as características visco-elásticas do betão. As análises que se apresentam são feitas com base num método visco-elástico de interpretação quantitativa e os resultados obtidos apresentam, em regra, uma boa concordância com as observações efectuadas e com os resultados de um modelo matemático da estrutura.

1. INTRODUÇÃO

O controlo de segurança estrutural das barragens de betão é normalmente feito, na fase de exploração normal das obras, através da análise de um conjunto de grandezas de fácil medição, como os deslocamentos, os movimentos diferenciais entre juntas, os caudais drenados e as subpressões. As tensões e, particularmente, as extensões observadas nos numerosos grupos de extensómetros usualmente instalados nas barragens de betão não são utilizadas de forma sistemática nos estudos correntes de análise do comportamento destas obras. No entanto, a verificação da segurança estrutural é fundamentalmente um problema de análise de tensões. Por outro lado, a análise da evolução ao longo do tempo das tensões instaladas permite a detecção atempada de processos de

deterioração local e do início do desenvolvimento de processos de rotura global.

A determinação de tensões num número suficientemente elevado de pontos, para que se possa ter uma ideia do campo de tensões instalado, levanta uma série de problemas: o carácter tensorial das tensões implica a sua medição em várias direcções, a aparelhagem específica disponível para medição de tensões é cara e de difícil colocação e, por fim, a utilização de extensómetros apresenta várias dificuldades na medição, análise e transformação em tensões dos valores medidos que diminuem a confiança que se tem nas grandezas obtidas.

Nesta comunicação descrevem-se as técnicas de análise das tensões determinadas

em barragens de betão, particularmente quando obtidas de forma indirecta, a partir das observações em extensómetros embebidos.

2. OBSERVAÇÃO DE EXTENSÕES E TENSÕES EM BARRAGENS DE BETÃO

A determinação de tensões nas barragens de betão portuguesas tem sido normalmente feita de forma indirecta, a partir da medição de extensões em grupos de extensómetros embebidos. Em algumas barragens, completa-se a informação fornecida pelas leituras efectuadas nos extensómetros com a fornecida por tensómetros embebidos no interior do betão, isolados ou em grupo, e normalmente colocados na vizinhança de grupos de extensómetros. As leituras destes aparelhos são feitas regularmente, mas a sua análise nem sempre é feita de um modo sistemático.

Os extensómetros mais usados nas barragens portuguesas são os extensómetros eléctricos do tipo Carlson, colocados durante a construção, envolvidos por betão crivado, obtido do betão da barragem, designado por betão integral, retirando os agregados de dimensão superior a 38mm.

Atendendo ao facto de a tensão ser uma grandeza tensorial e tridimensional é necessário, para ser possível a sua determinação a partir das extensões medidas, colocar os extensómetros em grupos. Junto dos paramentos, o estado de tensão pode ser considerado quase plano, com duas das tensões principais num plano paralelo ao paramento e a outra muito pequena ou igual a zero. É usual colocar, nestas zonas, grupos de cinco extensómetros instalados segundo direcções convergentes, um normal ao paramento e os restantes quatro dispostos num plano paralelo ao paramento, embora um estado de tensão plano possa ser bem determinado pelo conhecimento das extensões segundo apenas três direcções não colineares. No interior das obras, em que o estado de

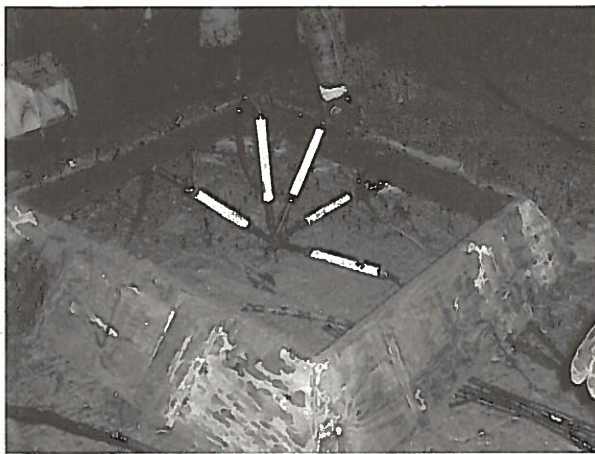
tensão é claramente tridimensional, embora sejam apenas necessários seis aparelhos para o caracterizar, é usual colocar grupos de nove, segundo as três faces de um tetraedro trirectângulo. Os extensómetros superabundantes permitem que, por um lado, mesmo que avarie um dos extensómetros, o grupo continue operacional e, por outro, a correcção de erros de leitura a partir da verificação do primeiro invariante do estado de deformação num ponto.

Para a determinação do estado de tensão, as extensões devidas a variações autógenas de volume, a variações de temperatura que não induzem tensões e a variações higrométricas, têm de ser descontadas às extensões medidas. Assim, junto de cada grupo de extensómetros, designados por extensómetros activos, é instalado um extensómetro, chamado extensómetro corrector, envolvido por betão da mesma amassadura do envolvimento do grupo de extensómetros, e colocado dentro de um balde de parede dupla de modo a permanecer isolado do campo de tensões da estrutura. Desta forma, a extensão a considerar em cada direcção é a observada no respectivo extensómetro activo diminuída da extensão observada no extensómetro corrector [Castro, A. T. 1988; 1998].

Na figura 1 apresenta-se uma fotografia da fase de betonagem da zona envolvente de um grupo de cinco extensómetros e outra do respectivo dispositivo corrector.

Para calcular as tensões a partir das extensões observadas é necessário conhecer a reologia do betão crivado que envolve os extensómetros [Ramos, J. M.; Pinho, J. S. et al 1988] pelo que esses betões são submetidos a um conjunto de ensaios para determinação da sua deformabilidade.

De modo a evitar as dificuldades envolvidas pela determinação indirecta de tensões, nomeadamente a necessidade de caracterizar a deformabilidade do betão, têm sido colocados em algumas barragens,



(a)



(b)

Fig. 1 - Fase de betonagem da zona envolvente de um grupo de cinco extensómetros (a) e respectivo dispositivo corrector (b).

dispositivos específicos dotados de resistências eléctricas ou de cordas vibrantes denominados tensómetros, os quais, embebidos no betão segundo direcções adequadas, permitem determinar completamente o estado de tensão no ponto em que estão instalados [Castro, A. T. 1998]. O tensómetro mais usado nas barragens portuguesas é o tensómetro do tipo Carlson (Fig. 2), que permite determinar a tensão na direcção em que está instalado.

Os tensómetros não funcionam quando são sujeitos a tensões de tracção, apesar de permitirem a observação de descompressões, sendo por isso necessário ter o cuidado de os instalar apenas em zonas e segundo direcções que se saiba estarem sempre sujeitas a estados de tensão de compressão. A colocação dos tensómetros exige cuidados especiais pois a base dos aparelhos tem de ser colada numa superfície de betão, cuja orientação, designadamente no caso de grupos de aparelhos para determinação do estado de tensão, pode tornar particularmente difícil a sua fixação [Castro, A. T. 1998]. Atendendo aos inconvenientes referidos e ao elevado preço deste tipo de aparelhos é colocado um número reduzido de tensómetros, em regra apenas nos pontos em que se espera que as tensões atinjam os seus valores máximos e, em geral, como já foi referido, na vizinhança de grupos de extensómetros.

Nas barragens mais antigas, em que não foi prevista a utilização de aparelhagem

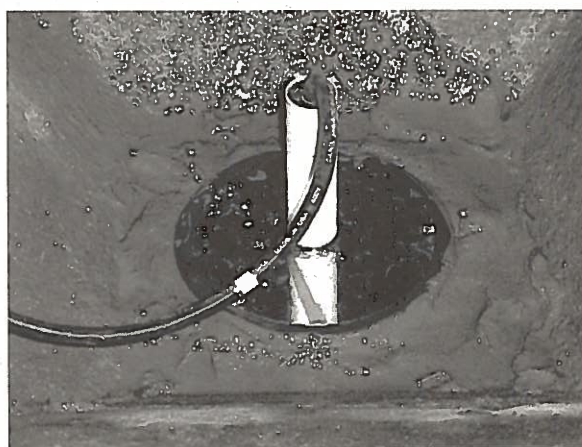


Fig. 2 - Colocação de um tensómetro com o disco horizontal para medição de tensões de compressão segundo a direcção vertical.

embebida mas se considera necessária a determinação de tensões e da sua evolução ao longo do tempo, tem-se recorrido a métodos de compensação ou libertação de tensões, similares aos desenvolvidos originalmente pelo LNEC para determinação das tensões residuais em maciços rochosos. Também é possível recorrer a estes ensaios em zonas da estrutura que não são suficientemente cobertas pela aparelhagem embebida existente. As aplicações mais frequentes foram feitas por adaptação do método SFJ (small flat jack), conhecido por ensaio de almofadas pequenas ou de macacos planos, que permite a determinação directa de tensões em pontos da imediata vizinhança de superfícies acessíveis (paramentos e faces de galerias de visita) [Florentino, C.A.;

Graça, J. C.; Paupério, A. 1986]. De referir ainda o ensaio STT (stress tensor tube), conhecido por ensaio do tubo sensível, que permite a medição de tensões em pontos interiores da barragem.

3 DEFORMABILIDADE DO BETÃO DE BARRAGENS

3.1 Modelo reológico do betão de barragens

O betão em massa usado na construção de barragens está sujeito a condições termo-higrométricas e a campos de tensões-deformações específicos, dependendo, a conversão em tensões das extensões observadas, do conhecimento da reologia do betão crivado que envolve os aparelhos. Durante o primeiro enchimento e ao longo do período de exploração normal o betão do núcleo das obras é submetido a temperaturas moderadas e a tensões de tracção e de compressão inferiores, em regra, ao seu limite de elasticidade, e pode ser considerado higrometricamente isolado.

As tensões relativamente baixas a que o betão está submetido permitem admitir que o seu comportamento é linear. As condições de isolamento higrométrico levam a que a fluência de secagem seja desprezável. Este facto, associado à idade média "avançada" do betão à data do primeiro enchimento, leva a que a recuperação de fluência possa ser praticamente total. Por outro lado, o isolamento higrométrico e o excesso de água na composição, adequado a uma boa trabalhabilidade, garantem a existência de humidade suficiente para manter o processo de hidratação do cimento durante décadas. Assim, a relação tensões-deformações do betão de barragens é bem caracterizada por um modelo viscoelástico linear que considere a maturação do betão [Ramos, J. M.; Pinho, J. S. 1982; Ramos, J. M. 1994].

Nas condições referidas nos parágrafos anteriores pode considerar-se válido o princípio da sobreposição dos efeitos.

3.2 Expressões da fluência mais usadas na reologia de barragens

Os resultados de um numeroso conjunto de ensaios de fluência efectuados sobre provetes cilíndricos em que se variaram as características do betão, a idade de aplicação da carga, a tensão aplicada e a humidade relativa das atmosferas de ensaio permitiram concluir que um quarto da fluência a 20 anos se dá nas duas primeiras semanas de carga, cerca de metade nos primeiros 2 ou 3 meses e cerca de três quartos no primeiro ano, desenvolvendo-se a restante parcela muito lentamente com o tempo [Pinho, J. S. 1989].

Desde que houve conhecimento da evolução destas deformações surgiram diversas representações analíticas para tentar reproduzi-la. De entre as expressões que já foram apresentadas tem especial importância, no estudo da reologia do betão de barragens, a expressão logarítmica proposta pelo U. S. Bureau of Reclamation, em 1956:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + F(t_0) \log_e [(t - t_0) + 1] \quad (3.1)$$

em que:

$(t - t_0)$ é o tempo sob carga (em dias);

$E(t_0)$ é o módulo de elasticidade do betão no instante de aplicação da carga;

$F(t_0)$ é um parâmetro, obtido experimentalmente, função da idade de aplicação da carga.

Nesta expressão da fluência as parcelas de deformação instantânea $1/E(t_0)$ (inverso do módulo de elasticidade na idade de carga) e de deformação de fluência $\epsilon^f(t, t_0)$ (também designada por fluência específica) são consideradas separadamente, sendo esta última parcela uma função linear do logaritmo do tempo sob carga, ou mais correctamente, do $\log_e [(t - t_0) + 1]$. O valor de $F(t_0)$ deve ser obtido a partir de ensaios experimentais para cada tipo de

betão e idade de aplicação da carga e, teoricamente, mantém-se constante durante todo o período em carga [Pinho, J. S. 1989].

Vários estudos de caracterização da deformabilidade do betão das barragens portuguesas, realizados no LNEC, permitiram concluir que a forma logarítmica da função de fluência é a que melhor ajusta o conjunto de dados disponível e que os valores de $F(t_0)$ para as diferentes idades de aplicação da carga são bem representados por [Pinho, J. S. 1989]:

$$F(t_0) = A (t_0 + 1)^B \quad (3.2)$$

em que A e B são constantes obtidas por ajuste aos valores de $F(t_0)$ determinados para cada idade.

A expressão apresentada, que depende apenas do módulo de elasticidade à idade de carga $E(t_0)$ e dos parâmetros A e B a ajustar experimentalmente, permite facilmente comparar a deformabilidade diferida de diferentes betões pois, qualquer que seja o período sob carga, a fluência é directamente proporcional ao valor de $F(t_0)$. No entanto, apesar de ser a expressão que melhor caracteriza as deformações de fluência observadas no betão das barragens portuguesas, a sua utilização não é frequente pois a sua obtenção exige a realização de ensaios de fluência, que, além de serem dispendiosos e demorados, requerem equipamentos e meios que não são de utilização corrente.

O facto de a realização de ensaios de fluência ser dispendiosa e demorada levou a que, a partir da década de 70, se procurassem critérios gerais para a previsão da fluência, a partir dos diferentes factores conhecidos, sem ser necessária a realização, em cada caso, de ensaios específicos.

O modelo de previsão de Bazant e Panulla (BaP) [Bazant, Z. P.; Panulla, L. 1978] foi utilizado com bons resultados em diversos trabalhos efectuados no LNEC, relativos à previsão da fluência do betão de

diversas barragens, tendo os valores previstos sido comparados, em alguns casos, com os determinados em ensaios específicos. Esta formulação considera funções independentes e aditivas para a fluência básica e para a fluência de secagem e permite considerar a evolução do módulo de elasticidade e a composição do betão.

A parcela da função de fluência do modelo BaP correspondente à fluência básica, a que tem interesse para o estudo das deformações diferidas do betão de barragens, tem a forma de um produto, no qual uma função da idade à altura de aplicação da carga multiplica uma função do tempo sob carga:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} (1 + \phi_1 (t_0^{-m} + \beta) (t - t_0)^n) \quad (3.3)$$

sendo E_0 um módulo de elasticidade fictício, representando $1/E_0$ a assíntota para que tende a deformação instantânea para valores de $(t - t_0)$ muito pequenos, quando t_0 tende para infinito. Os parâmetros ϕ_1 , m , β e n são adimensionais, dependendo das características do betão. Na ausência de resultados de ensaios de fluência, os seus valores podem ser estimados através de relações empíricas, em função do valor médio da tensão de rotura em compressão aos 28 dias de idade, f_{cm28} (em MPa) determinada sobre provetes cilíndricos padrão ($\phi=15\text{cm}$; $h=30\text{cm}$).

O módulo de elasticidade pode ser calculado considerando, na expressão da lei de fluência básica, um tempo sob carga $(t - t_0) = 0,1$ dias [Bazant, Z. P.; Osman, E. 1976; Bazant, Z. P.; Panulla, L. 1978], obtendo-se,

$$E(t_0) = \frac{E_0}{1 + \phi_1 (t_0^{-m} + \beta) 0,1^n} \quad (3.4)$$

3.3 Ensaio para a caracterização da deformabilidade do betão de barragens

A caracterização da deformabilidade do betão de barragens é feita a partir de ensaios laboratoriais e "in situ", realizados com esse objectivo específico, sobre provetes de betão crivado e de betão integral moldados durante a construção das obras e, ainda, a partir dos próprios resultados da observação das estruturas.

Os ensaios laboratoriais são efectuados sobre provetes de forma e dimensões diversas e consistem na determinação da relação tensões-deformações até à rotura, do módulo de elasticidade, da tensão de rotura e da função de fluência.

Os ensaios "in situ" são realizados em equipamentos específicos, as células de fluência, colocados durante a construção das obras, que permitem a determinação do módulo de elasticidade e da função de fluência. Estes dispositivos, tal como os dispositivos compensadores dos extenso-

metros embebidos, permitem isolar do campo de tensões da estrutura provetes cilíndricos de betão da obra que, no entanto, se mantêm sujeitos às mesmas variações termo-higrométricas do meio envolvente. Têm na base uma almofada de aço, ligada a um tubo de cobre acessível do exterior, que permite a aplicação de pressão na base do cilindro [Pinho, J. S. 1989]. No eixo dos cilindros de betão está embebido um extensómetro que permite a medição dos valores das extensões sofridas pelos provetes. Assim, fazendo variar rapidamente a pressão, é possível, através da calibração da almofada e da medição das extensões sofridas pelo cilindro, determinar o módulo de elasticidade do betão. Por outro lado, mantendo a carga constante, é possível determinar, para qualquer idade do betão, as extensões de fluência. Na figura 3 apresenta-se uma fotografia da colocação de um conjunto de três células de fluência e respectivos dispositivos correctores na barragem do Alto Lindoso.



Fig. 3 – Colocação de um conjunto de células de fluência e respectivos dispositivos correctores na barragem do Alto Lindoso.

4. MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

As principais acções a ter em conta na análise dos resultados da observação de barragens de betão em fase de exploração

normal são as variações do nível da água na albufeira e da temperatura ambiente. Uma vez que actuam simultaneamente, os efeitos mais representativos do comportamento estrutural observados em cada época, nomeadamente os deslocamentos, as

extensões e as tensões, são o resultado dessa acção conjunta. Assim, é essencial, para a interpretação do comportamento das obras, separar as parcelas dos efeitos observados correspondentes a cada uma das solicitações. Esta separação pode ser facilmente obtida quando se verifica a variação predominante de uma das solicitações, entre duas épocas suficientemente próximas para que os efeitos do tempo possam ser desprezados. De uma forma sistemática, esta separação pode ser feita recorrendo a métodos de separação de efeitos, também designados por métodos de interpretação quantitativa que, a partir da consideração simultânea de um grande número de observações, procuram estabelecer correlações entre os efeitos observados na estrutura e a evolução das principais acções, com base no princípio da sobreposição dos efeitos.

Os métodos de interpretação quantitativa são hoje correntemente utilizados na análise dos deslocamentos observados. A utilização destes métodos na interpretação de extensões e de tensões é muito menos frequente pois o carácter tensorial destas grandezas obriga, em regra, ao conhecimento e à análise simultânea dos valores observados em várias direcções.

4.1 Métodos elásticos

Nos métodos de interpretação quantitativa elásticos, estatísticos ou determinísticos, os diferentes efeitos associados a uma dada época de observação i , num determinado ponto, estão relacionados por uma expressão do tipo

$$\begin{aligned} U_i(h_i, \theta_i, t_i) &= \\ &= U_h(h_i) + U_\theta(\theta_i) + U_t(t_i) + k + r_i = \\ &= \sum_{i=1}^l a_i f_i(h) + \sum_{j=1}^m b_j g_j(\theta) + \\ &+ \sum_{k=1}^n c_k p_k(t) + k + r_i \end{aligned} \quad (4.1)$$

em que $U_i(h_i, \theta_i, t_i)$ é a grandeza observada na época i , que depende da pressão hidrostática, da temperatura e do

instante em que se realiza a observação, e $U_h(h)$, $U_\theta(\theta)$ e $U_t(t)$ representam, respectivamente, as parcelas daquela grandeza, consideradas independentes, correspondentes ao efeito elástico das variações do nível da água na albufeira, ao efeito elástico das variações térmicas e ao "efeito do tempo" com origem no início do período em estudo. Cada uma destas parcelas pode ser aproximada por somatórios de funções do nível, da temperatura e do tempo, prefixadas, f_i , g_j e p_k , e dependentes dos coeficientes a_i , b_j e c_k , a determinar. Na separação de efeitos é necessário considerar a constante k que se deve ao facto de à época de referência das observações não corresponderem valores nulos dos diferentes efeitos. O resíduo r_i representa o desvio entre o valor observado na época i e o valor obtido pelo modelo de interpretação quantitativa, representando assim os erros de observação e de adequação do próprio modelo.

Os coeficientes a_i , b_j e c_k são determinados através da resolução de um sistema de n equações, em que n é o número de observações seleccionadas para a análise, por exemplo, pelo critério de Gauss de minimização da soma dos quadrados dos resíduos r_i .

4.2 Métodos não-elásticos

Nos métodos elásticos admite-se que os "efeitos do tempo" não dependem da história de variação das solicitações principais. No entanto, em condições de exploração normal e desde que não ocorram situações susceptíveis de alterar significativamente o comportamento estrutural das obras, uma grande parte dos "efeitos do tempo" pode ser justificada pelo comportamento reológico do betão, que, como já se referiu, é bem caracterizado por um modelo viscoelástico linear que considere a maturação, sendo assim dependente da evolução das principais solicitações, normalmente bem conhecidas. De modo a ter em conta esta dependência

têm sido apresentados alguns métodos de interpretação quantitativa, adequados ao estudo do comportamento de barragens, que a consideram explicitamente [Doboz, W. 1982; Ramos, J. M. 1985; Oliveira, S. B. 2000].

5. ANÁLISE DE EXTENSÕES E DE TENSÕES OBSERVADAS NA BARRAGEM DO ALTO LINDOSO

5.1 Características gerais da barragem e evolução das acções

A barragem do Alto Lindoso situa-se no norte do território continental português, cerca de trezentos metros a jusante da confluência do rio Lima com o rio Castro Laboreiro, que define parte da fronteira com Espanha em grande parte do seu troço de jusante. A barragem (Fig. 4), do tipo abóbada de dupla curvatura, descarrega os impulsos directamente sobre a fundação, sem recurso a encontros artificiais ou soco. A abóbada é praticamente simétrica e tem 110m de altura máxima, 297m de

desenvolvimento à cota do coroamento e espessura variando, na consola central, entre 4m no coroamento e 21m na base. O coroamento da barragem situa-se à cota 339m.

A barragem cria uma albufeira com a capacidade útil de $350 \times 10^6 \text{m}^3$ no nível de pleno armazenamento (NPA). O maciço de fundação em que se apoia a barragem é granítico, de boa qualidade, apresentando, no entanto, alguma heterogeneidade. As betonagens do corpo da barragem foram efectuadas entre Abril de 1987 e Julho de 1990. Na construção do corpo da barragem foram utilizados diferentes tipos de betão, tendo a composição dominante uma dosagem de ligante de 150kg/m^3 . Os agregados utilizados no betão são de natureza granítica. A injeção das juntas de contracção foi realizada entre Março e Maio de 1991. O primeiro enchimento da albufeira iniciou-se em 6 de Janeiro de 1992, com o nível da água na albufeira à cota 234,0m, tendo-se atingido o NPA, à cota 338,0m, no dia 28 de Abril de 1994.

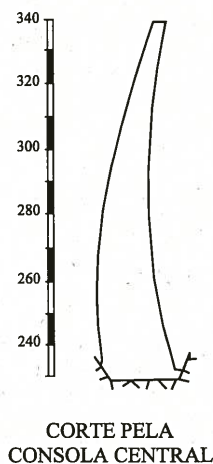
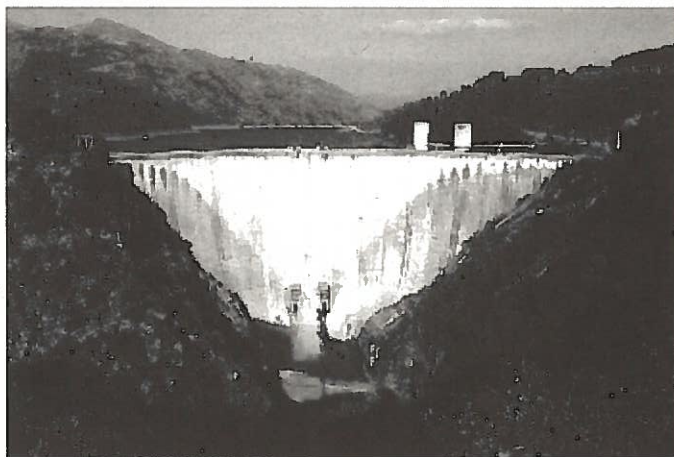


Fig. 4 – Barragem do Alto Lindoso. Vista de jusante e corte pela consola central.

Na figura 5 apresenta-se a evolução do nível da água na albufeira e da temperatura média mensal do ar no local da barragem desde o início do primeiro enchimento, em 6 de Janeiro de 1992, até ao final de Junho de 1999. O valor médio da temperatura média do ar no local da barragem é de cerca de 15°C sendo de 12°C a amplitude média

anual, com temperatura mínima em meados de Fevereiro e máxima em meados de Agosto.

Para apoio à interpretação do comportamento estrutural da barragem, durante as fases de primeiro enchimento e de serviço, foi desenvolvido um modelo de

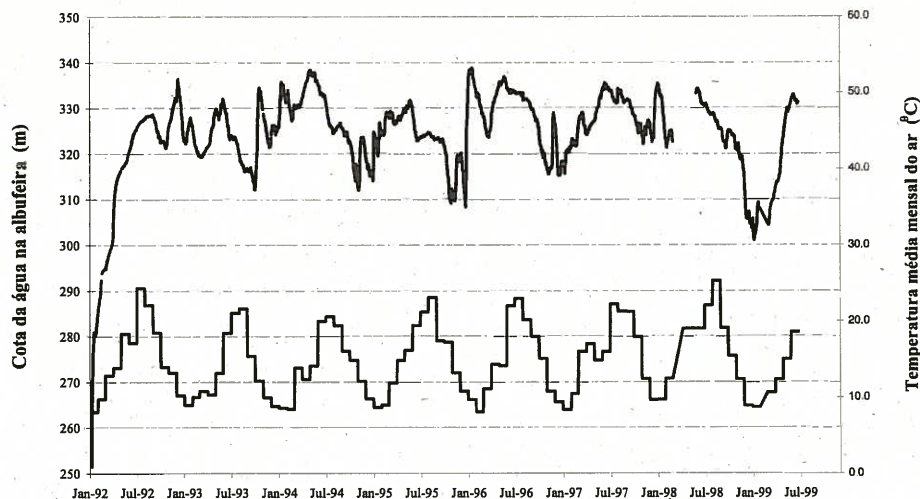


Fig. 5 - Barragem do Alto Lindoso. Evolução do nível da água na albufera e da temperatura média mensal do ar no local da barragem

casca espessa, analisado pelo método dos elementos finitos, em que a barragem é representada por um conjunto de blocos contínuos e homogêneos separados por superfícies de descontinuidade, que simulam as juntas de contracção [Batista, A. L. 1998].

5.2 Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais

A caracterização das propriedades mecânicas do betão foi feita a partir de ensaios laboratoriais e "in situ", para o betão crivado que envolve a aparelhagem embebida e para o betão integral da estrutura. Para a determinação "in situ" do módulo de elasticidade instantâneo e da função de fluência de betões integrais e crivados, foram colocados seis grupos de células de fluência (CF1 a CF6), embebidos no núcleo da obra, cada um composto por uma célula preenchida com betão integral, uma célula preenchida com betão crivado pelo peneiro de 75mm, uma célula preenchida com betão crivado pelo peneiro de 38mm, e respectivos dispositivos correctores.

Os resultados dos ensaios laboratoriais e "in situ" para caracterização das propriedades reológicas do betão foram sistematicamente comparados com os resultados dos ensaios correntes realizados em obra para controlo da qualidade do

betão (Quadro 1) [Ramos, J. M.; Batista, A. L.; Castro, A. T. 1992].

A caracterização das propriedades mecânicas do maciço de fundação iniciou-se na fase de anteprojecto da obra com a realização de ensaios de compressão simples sobre amostras de sondagens. Após a construção da obra realizaram-se ensaios geofísicos de medição da velocidade de propagação de ondas longitudinais na fundação da barragem. Estes ensaios foram efectuados antes e após o tratamento da fundação, tendo-se verificado, após o tratamento e confirmando a eficácia deste, um aumento das velocidades de propagação das ondas. A partir dos resultados dos ensaios realizados após o tratamento da fundação estimaram-se, para o módulo de elasticidade, os valores de 40GPa na zona do fundo do vale, 30GPa em toda a margem esquerda e, na margem direita, de 30GPa na zona dos rins e de 15GPa na zona acima dos rins.

5.3 Observação das respostas da estrutura

O sistema de observação instalado na barragem do Alto Lindoso para a medição da resposta da estrutura permite a determinação de deslocamentos, movimentos diferenciais entre blocos, extensões e tensões no betão, caudais drenados e infiltrados, subpressões e pressões nos poros do betão.

Quadro 1 - Módulos de elasticidade e resistência à rotura em compressão do betão dominante na barragem do Alto Lindoso (valores médios).

		Idade do betão à data do ensaio (dias)			
		28	90	365	≅ 1000
Módulo elasticidade (GPa)	Ensaio Laboratoriais	19	28	30	-
	Ensaio CRI. "in situ" INT.	19 ⁽¹⁾ 20 ⁽¹⁾	26 ⁽¹⁾ 24 ⁽¹⁾	- -	32 ⁽²⁾ 31 ⁽²⁾
Tensão de rotura (MPa)	Ensaio Laboratoriais	17	24	28	-

(1) - 1 ensaio

(2) - média de 5 ensaios

Por serem as grandezas relevantes para este trabalho indicam-se na figura 6 as posições dos fios de prumo e das bases de coordenómetro, dos grupos de exten-

sómetros e dos pares de tensómetros. Na mesma figura indica-se ainda a posição de cada uma das células de fluência.

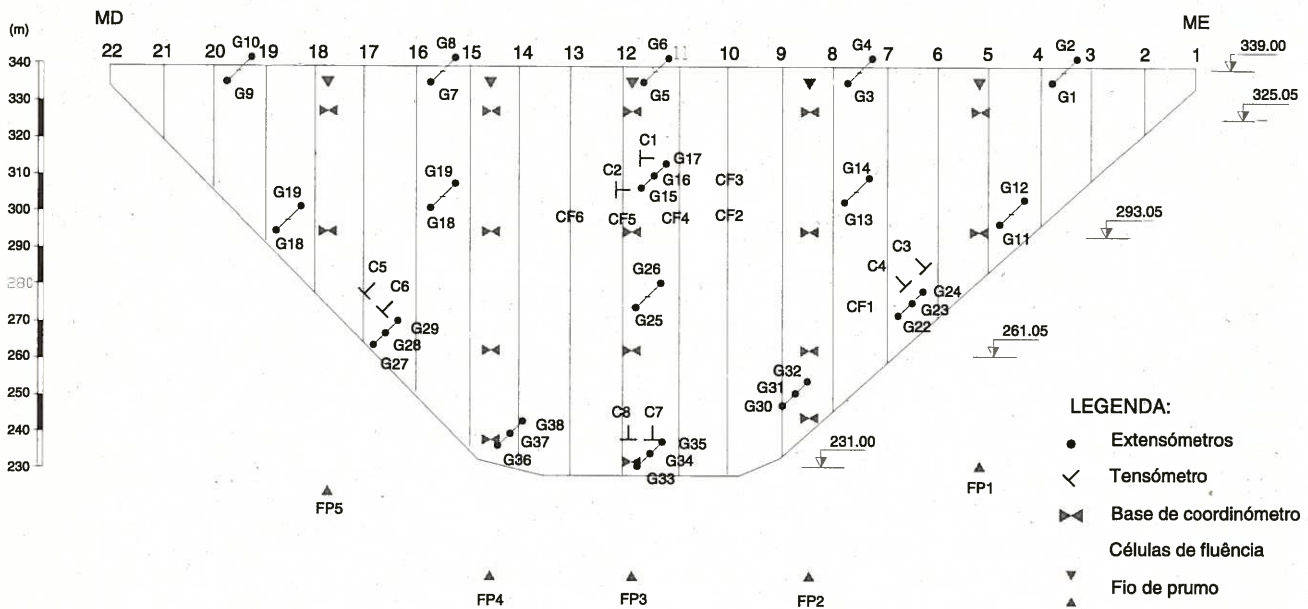


Fig. 6 - Barragem do Alto Lindoso. Esquema do sistema de fios de prumo e localização aproximada dos grupos de extensómetros, dos pares de tensómetros e das células de fluência.

5.4 Deformabilidade do betão

O conhecimento das características visco-elásticas do betão, em particular do betão crivado que envolve os extensómetros e os tensómetros, é indispensável para a transformação em tensões das extensões observadas. Assim, foi feito o estudo da deformabilidade do betão da barragem do Alto Lindoso a partir das leituras efectuadas nas células de fluência preenchidas com betão integral e com betão crivado pelo peneiro de 38mm. As leituras analisadas

referem-se a um período de oito a nove anos, compreendido entre as datas de colocação de cada uma das células, de 1 de Junho de 1988 a 12 de Julho de 1989, e o final de Abril de 1997.

Os parâmetros das expressões logarítmicas da fluência, que, como já foi referido, são as que melhor ajustam o conjunto de dados disponível relativo à deformabilidade do betão das barragens portuguesas, foram determinados recorrendo exclusivamente aos resultados dos

ensaios, de cargas rápidas e de cargas permanentes, realizados nas células de fluência (expressões (5.1) e (5.2)).

betão integral

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + 1,1932 (t_0 + 1)^{-0,3001} \ln(t - t_0 + 1)$$

(10⁻² / GPa)
(5.1)

betão crivado

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + 2,0644 (t_0 + 1)^{-0,3186} \ln(t - t_0 + 1)$$

(10⁻² / GPa)
(5.2)

Atendendo às dificuldades habitualmente envolvidas na determinação directa das funções de fluência foi também feita a sua previsão expedita, a partir de resultados de ensaios laboratoriais rápidos conjugados com elementos respeitantes à composição do betão dominante na barragem, aplicando a formulação empírica desenvolvida por Bazant e Panulla. As funções de fluência previstas são assim,

betão integral

$$J(t, t_0) = \frac{1}{31,4} + \frac{2,54}{31,4} (t_0^{-0,72} + 0,05) (t - t_0)^{0,102}$$

(/ GPa)
(5.3)

betão crivado

$$J(t, t_0) = \frac{1}{34,2} + \frac{3,99}{34,2} (t_0^{-0,81} + 0,05) (t - t_0)^{0,116}$$

(/ GPa)
(5.4)

Na figura 7 apresenta-se uma comparação das expressões da função de fluência determinadas. Na mesma figura apresenta-se ainda a função de fluência do betão integral utilizada em trabalhos anteriores de análise de comportamento da barragem, prevista recorrendo ao modelo de BaP, tendo apenas disponíveis os resultados dos ensaios realizados até ao início do primeiro enchimento da albufeira [Baptista, A. L. 1998]. As curvas são apresentadas

para uma idade de carga de 1000 dias, que corresponde, aproximadamente, ao tempo que decorre entre a data média do período construtivo e o início do primeiro enchimento.

A análise da figura permite verificar que, neste caso, a deformabilidade do betão crivado é significativamente superior à do betão integral. Verifica-se ainda que as expressões logarítmicas da fluência conduzem a valores mais elevados das deformações diferidas do que as estimadas recorrendo ao modelo de previsão de BaP, embora para o betão integral este último modelo conduza a deformações totais um pouco superiores. A deformação de fluência do betão integral e do betão crivado, ao fim de 10 anos de carga corresponde, no caso das expressões logarítmicas da fluência, a cerca de 41 e 67% da deformação elástica, respectivamente. No caso das funções estimadas recorrendo ao modelo de previsão de BaP, as deformações diferidas correspondem, no betão integral e ao fim de 10 anos de carga, a cerca de 33% da deformação elástica e, no betão crivado, a 55%. A comparação da curva da função de fluência utilizada em trabalhos anteriores com a curva prevista para o betão integral permite concluir que a informação complementar veio confirmar a função de fluência estimada inicialmente.

De referir que os resultados apresentados mostram que o betão da barragem do Alto Lindoso apresenta deformações de fluência pequenas quando comparadas com as deformações de fluência observadas em betões de outras barragens portuguesas.

5.6 Análise de extensões observadas

As leituras efectuadas em cada grupo de extensómetros são, em cada campanha, verificadas e compatibilizadas, isto é, são comparadas as somas das extensões dadas por extensómetros perpendiculares e são distribuídos, pelos valores das extensões reais, os erros de carácter aleatório que ocorrem na leitura dos aparelhos. Uma vez verificada a compatibilidade é necessário

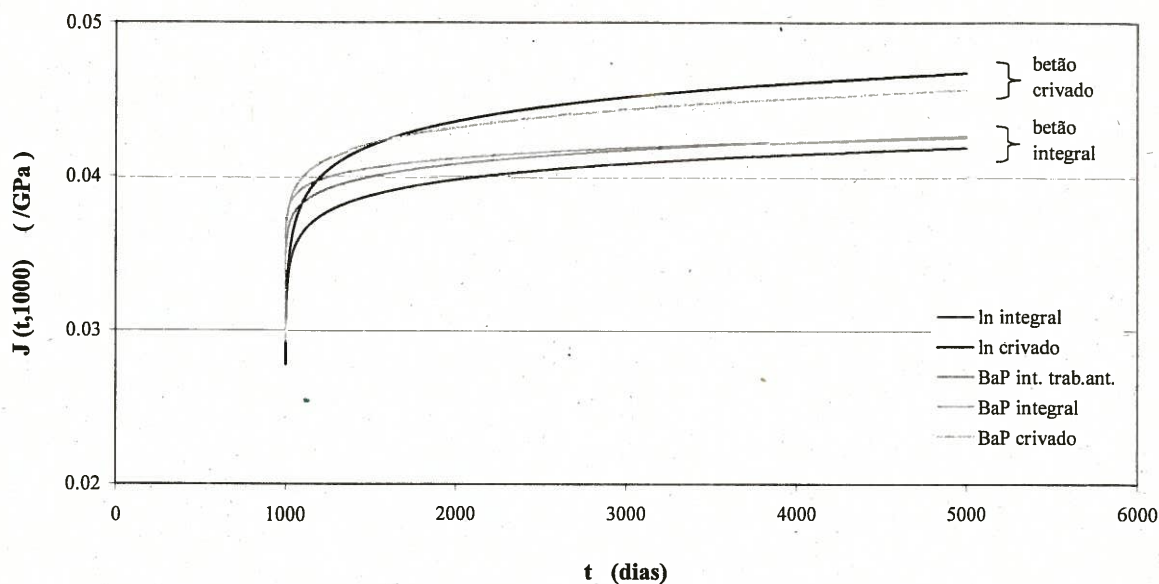


Fig. 7 - Fluência do betão integral e do betão crivado para a idade de carga (t_0) de 1000 dias. Expressões logarítmicas determinadas experimentalmente (ln) e estimadas recorrendo ao modelo de previsão de Bazant e Panulla (BaP).

retirar a cada uma das extensões determinadas as variações de comprimento devidas a variações autogéneas de volume, a variações de temperatura que não induzem tensões e a variações higrométricas, obtendo-se assim as extensões devidas a tensões, designadas por extensões corrigidas. Para isso utilizam-se, como já foi referido, as leituras efectuadas nos extensómetros correctores.

As extensões corrigidas determinadas a partir dos valores observados nos grupos de extensómetros unidireccionais, instalados próximo do coroamento a cerca de 1m dos paramentos, foram analisadas recorrendo aos métodos de interpretação quantitativa. Nos estudos efectuados procurou-se determinar as funções mais adequadas à representação de cada um dos efeitos tendo sido considerada a expressão:

$$\begin{aligned} \varepsilon(h, \theta, t) = & a_1 h^6 + a_2 h^5 + \\ & + b_1 \cos\left(\frac{2\pi s}{365}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi s}{365}\right) + \\ & + c T + d_1 t^2 + d_2 t + \\ & + k + r \end{aligned} \quad (5.5)$$

Nesta expressão ε representa a extensão corrigida determinada em cada grupo de extensómetros unidireccionais, h é a altura da água na albufeira, s é o número de dias decorridos desde o início do ano até à data da observação, T é a temperatura observada em cada um dos extensómetros e t é o número de dias decorridos desde o início do período em análise até à data da observação. Os coeficientes a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c , d_1 e d_2 são, como já foi referido, determinados através da resolução de um sistema de n equações, em que n é o número de observações seleccionadas para a análise, pelo critério de Gauss de minimização da soma dos quadrados dos resíduos r .

De referir que as extensões, ao contrário dos deslocamentos, são grandezas muito influenciadas por efeitos locais, em particular pelas variações de temperatura que se verificam nos pontos de medição. Deste modo, na expressão do efeito térmico sobre as extensões considerou-se, para além do termo sinusoidal que traduz as variações anuais de temperatura, um termo $c(T)$ em que T é a temperatura observada em cada extensómetro. Para a consideração dos efeitos do tempo, após diversas tentativas

em que se consideraram diferentes expressões polinomiais e expressões logarítmicas, optou-se por considerar um polinómio do segundo grau.

Os resultados da interpretação quantitativa foram comparados com os resultados do modelo matemático e com variações observadas entre épocas em que se admite que um dos efeitos (efeito do nível, da temperatura ou do tempo) é preponderante (Fig. 8, 9 e 10).

No primeiro período considerado (Fig. 8), em que ocorreu uma subida do nível de 22,9m, verifica-se que as extensões de compressão, observadas a montante e a jusante, são muito próximas das obtidas com o modelo de interpretação quantitativa. As extensões calculadas com o modelo matemático, apesar de apresentarem o mesmo andamento das extensões observadas, são maiores em valor absoluto, verificando-se as maiores diferenças nos pontos mais próximos dos encontros. Nos pontos situados na consola central os valores das extensões calculadas são cerca de 25% superiores aos valores observados.

Estes resultados devem-se ao facto de se ter utilizado um modelo matemático com um módulo de elasticidade médio, para o betão, contínuo, ajustando os deslocamentos observados. Desta forma as extensões observadas nas zonas contínuas serão inferiores à média que tem em conta as deformações localizadas nas juntas.

No período compreendido entre 5.2.1996 e 5.8.1996 (Fig. 9), em que ocorre uma subida da temperatura correspondente ao valor da amplitude da onda térmica anual, observa-se um aumento das extensões variável entre cerca de 65×10^{-6} , junto aos encontros, e 157×10^{-6} , a jusante, no ponto situado na consola central. Os resultados da interpretação quantitativa e do modelo matemático são próximos dos valores observados, verificando-se as maiores diferenças junto à margem esquerda (o parâmetro do modelo matemático determinante, neste caso, é o coeficiente de dilatação linear).

As variações de extensão observadas entre duas épocas afastadas de cinco anos (Fig. 10) são muito reduzidas.

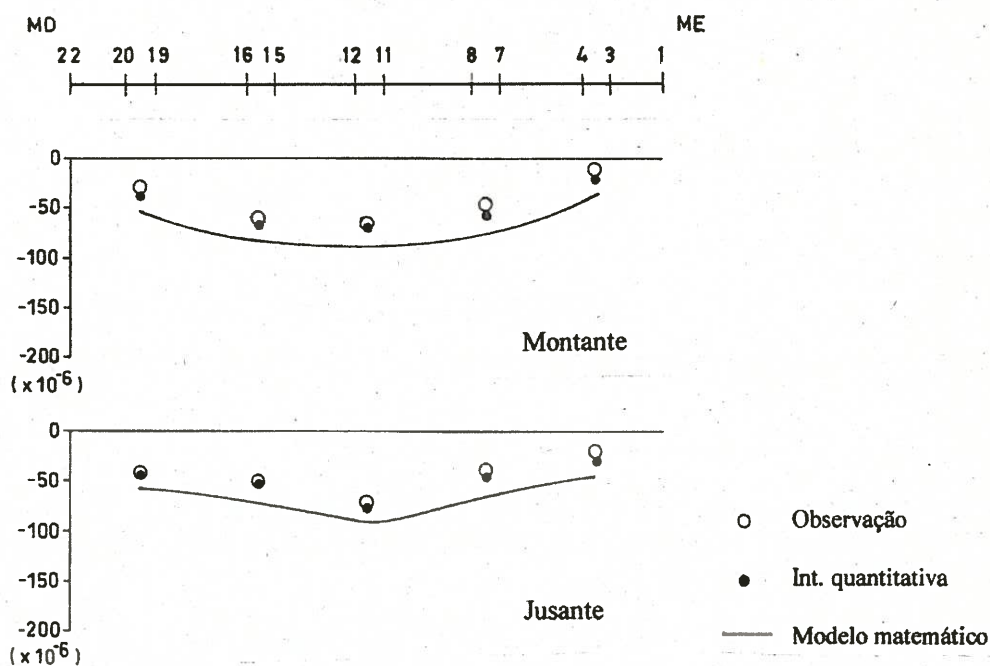


Fig. 8 - Barragem do Alto Lindoso. Comparação das extensões observadas nos extensómetros unidireccionais (instalados à cota 336,0m) entre 12.12.1995 e 8.1.1996 com os resultados da interpretação quantitativa e do modelo matemático.

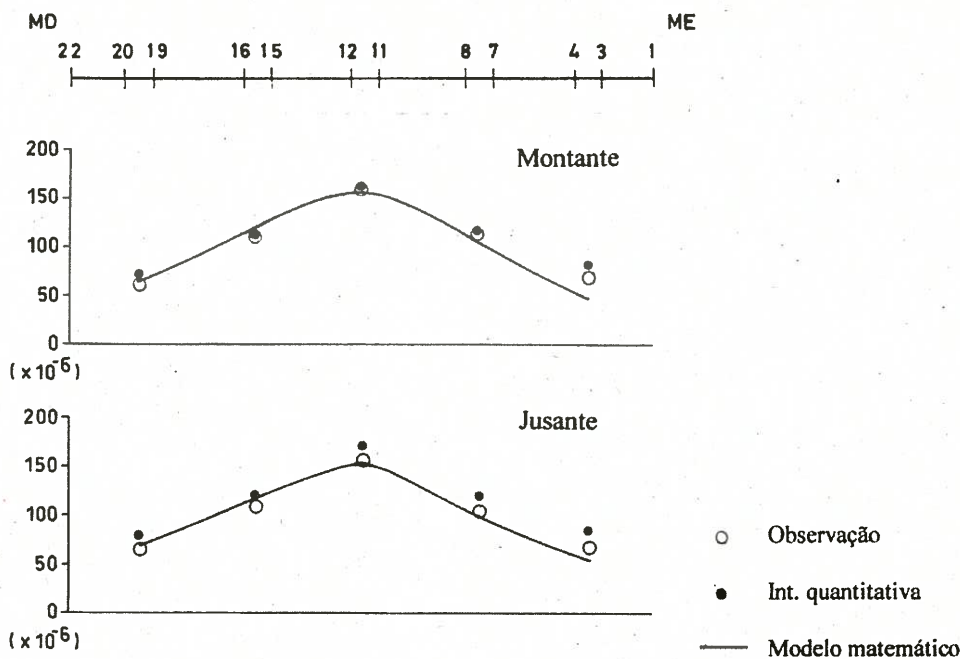


Fig. 9 - Barragem do Alto Lindoso. Comparação das extensões observadas nos extensómetros unidireccionais (instalados à cota 336,0m) entre 5.2.1996 e 5.8.1996 com os resultados da interpretação quantitativa e do modelo matemático.

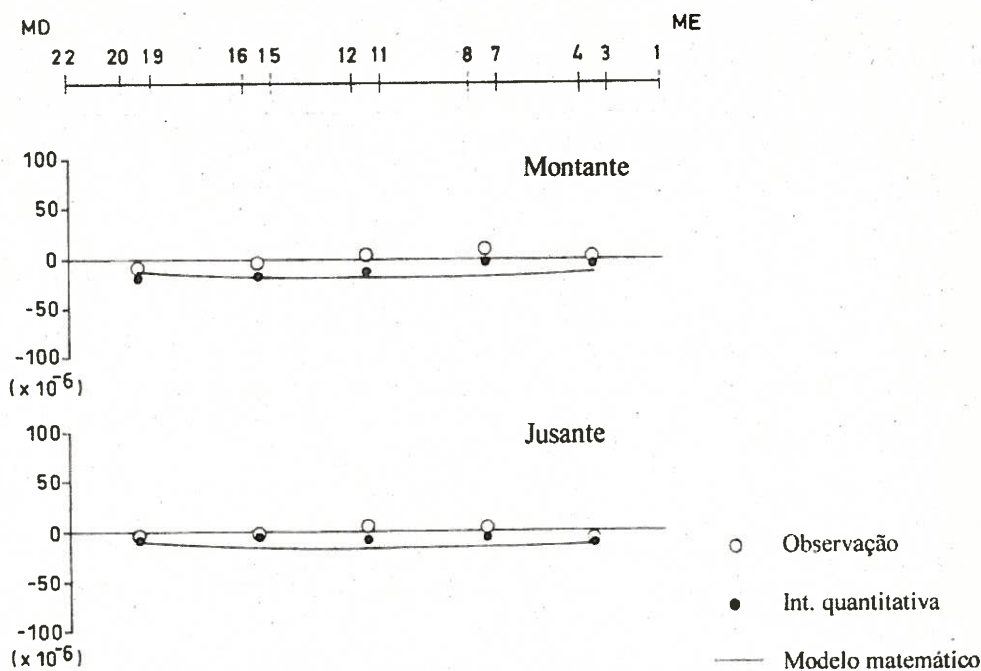


Fig. 10 - Barragem do Alto Lindoso. Comparação das extensões observadas nos extensómetros unidireccionais (instalados à cota 336,0m) entre 15.2.1993 e 16.2.1998 com os resultados da interpretação quantitativa e do modelo matemático.

No estudo efectuado foram também determinadas as extensões principais observadas, entre as duas épocas em que a subida do nível da água na albufeira é a solicitação predominante, nos pontos em que se localizam os grupos de

extensómetros unidireccionais e bidimensionais, a cerca de 1m dos paramentos. Estes valores foram comparados com as correspondentes extensões principais calculadas com o modelo matemático da estrutura (Fig. 11). No período considerado

observaram-se extensões máximas de compressão na zona central do paramento de montante, aproximadamente segundo os arcos, entre a cota 310,0m e o coroamento, e no paramento de jusante na zona da inserção dos rins e normalmente a esta, em ambas as margens, aproximadamente entre as cotas 265m e 300m. O valor da máxima extensão de compressão observada é de 98×10^{-6} . A montante, na inserção da abóbada na fundação, observam-se extensões de tracção, com o valor máximo de 58×10^{-6} na direcção vertical, junto à base da consola central. A jusante observa-se um estado generalizado de extensões de compressão. Com excepção dos pontos situados a montante, próximo da inserção da abóbada na fundação, as extensões principais calculadas são muito próximas das extensões principais observadas. Estes resultados podem indiciar a existência de fissuração a montante junto à inserção que, conseqüentemente, elimina as extensões e tensões de tracção nas zonas contínuas.

5.7 Análise de tensões observadas

Os valores das tensões observadas em tensómetros, instalados a 1m do paramento de jusante junto à inserção da barragem na fundação, foram, recorrendo ao método do módulo de elasticidade efectivo, comparados com os valores das tensões na direcção dos tensómetros, determinadas indirectamente, a partir das extensões observadas em grupos de extensómetros localizados nas proximidades dos tensómetros. O método do módulo de elasticidade efectivo pretende relacionar a tensão actuante num dado momento com a extensão lida nesse momento. À relação existente entre os respectivos valores dá-se o nome de módulo de elasticidade efectivo, evidentemente variável ao longo do tempo. Assim, as extensões na direcção dos tensómetros foram, em cada época de leitura t , multiplicadas pelo valor de $1/J(t, t_0)$, sendo $J(t, t_0)$ a função de fluência do betão crivado. O valor de t_0 foi

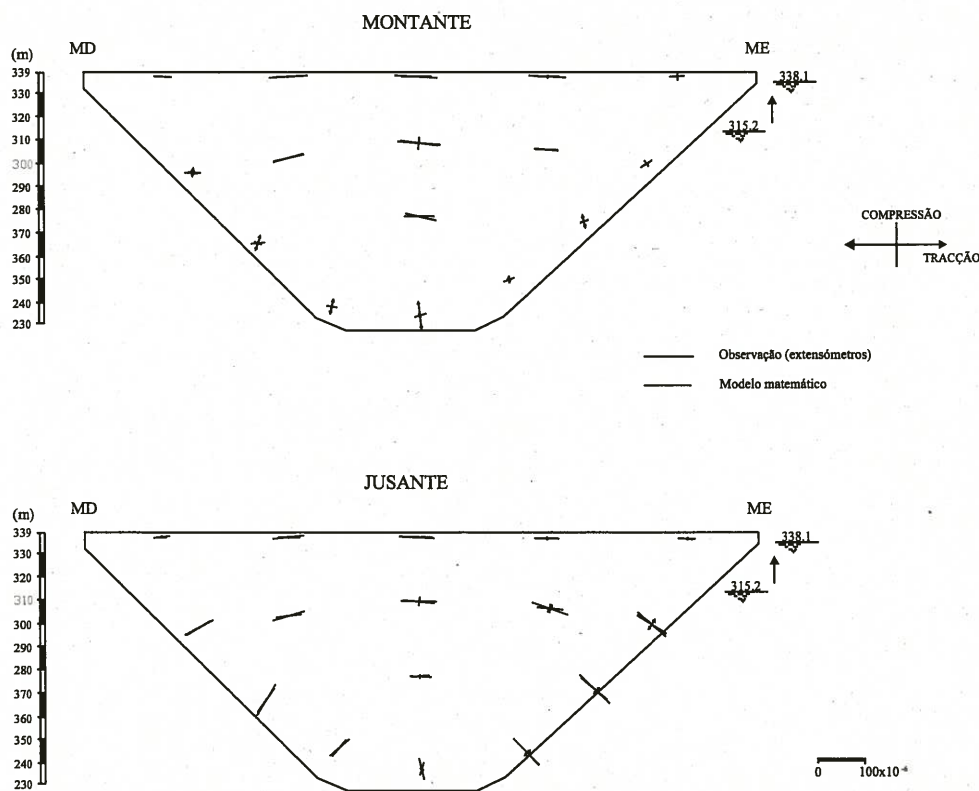


Fig. 11 - Barragem do Alto Lindoso. Extensões principais observadas e calculadas em pontos a 1m dos paramentos entre 12.12.1995 e 8.1.1996.

definido atendendo às datas de colocação de cada tensómetro e correspondente grupo de extensómetros e considerando, de um modo simplificado, que o betão é posto em carga na data de início do primeiro enchimento.

Na figura 12 apresenta-se, como exemplo, um gráfico de comparação entre as tensões medidas num tensómetro e as tensões determinadas recorrendo ao método do módulo de elasticidade efectivo a partir da extensão na direcção do tensómetro, observada no grupo de extensómetros mais próximo do tensómetro. A análise da figura revela que, apesar de o andamento dos gráficos ser semelhante, se verificam diferenças acentuadas na amplitude das ondas obtidas, devidas, provavelmente, às diferenças de temperatura que se verificam no tensómetro e no grupo de extensómetros. No entanto, pode considerar-se que a comparação é boa, já que se obtiveram valores da mesma ordem de grandeza. O conhecimento da ordem de grandeza das tensões instaladas é da maior importância para a avaliação da segurança das obras.

As tensões principais determinadas em pontos a 1m dos paramentos, obtidas de

forma indirecta, a partir das extensões observadas em cada grupo de extensómetros, entre duas épocas em que a subida do nível da água na albufeira é a solicitação preponderante, foram comparadas com as correspondentes tensões principais calculadas recorrendo ao modelo matemático da estrutura (Fig 13). O valor do módulo de elasticidade considerado no cálculo das tensões foi determinado recorrendo à função de fluência do betão crivado, admitindo que o tempo sob carga é definido pela data média do período em análise. O valor obtido foi de 22,9GPa.

Os campos de tensões que se apresentam, a montante e a jusante, estão directamente relacionados com os campos de extensões apresentados na figura 11. As compressões máximas situam-se na zona central do paramento de montante, aproximadamente segundo os arcos, entre a cota 310,0 e o coroamento, e no paramento de jusante na zona de inserção dos rins e normalmente a esta, em ambas as margens, aproximadamente entre as cotas 265,0m e 300,0m. O valor da compressão máxima

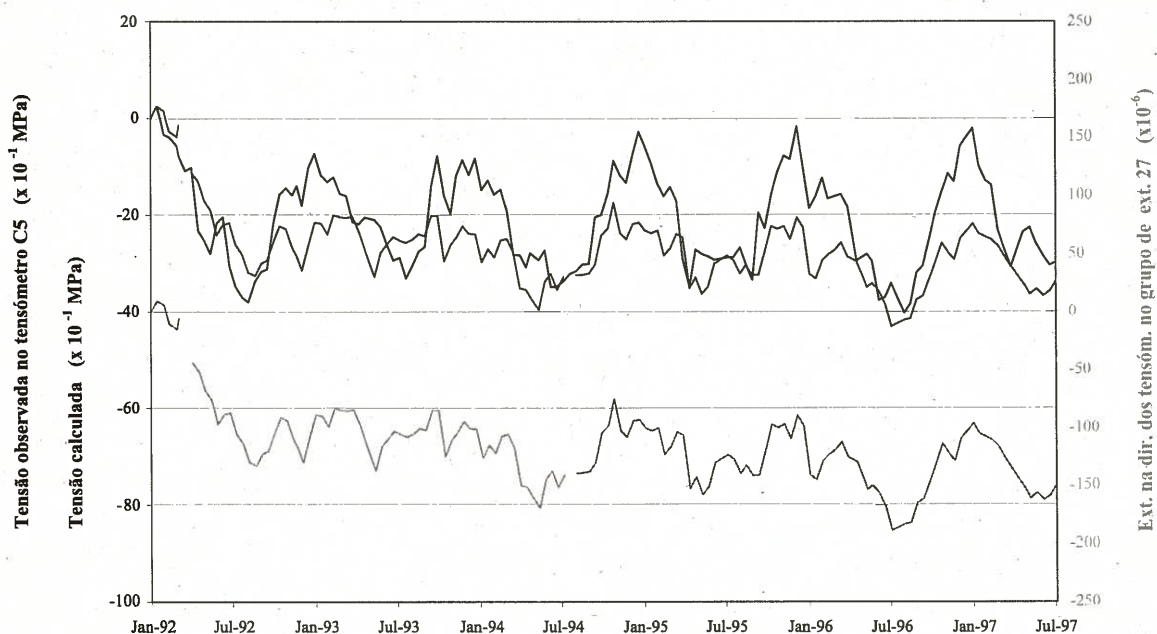


Fig. 12 - Barragem do Alto Lindoso. Comparação das tensões observadas no tensómetro C5 com as tensões, na direcção do tensómetro, calculadas a partir das extensões medidas no grupo de extensómetros n.º 27.

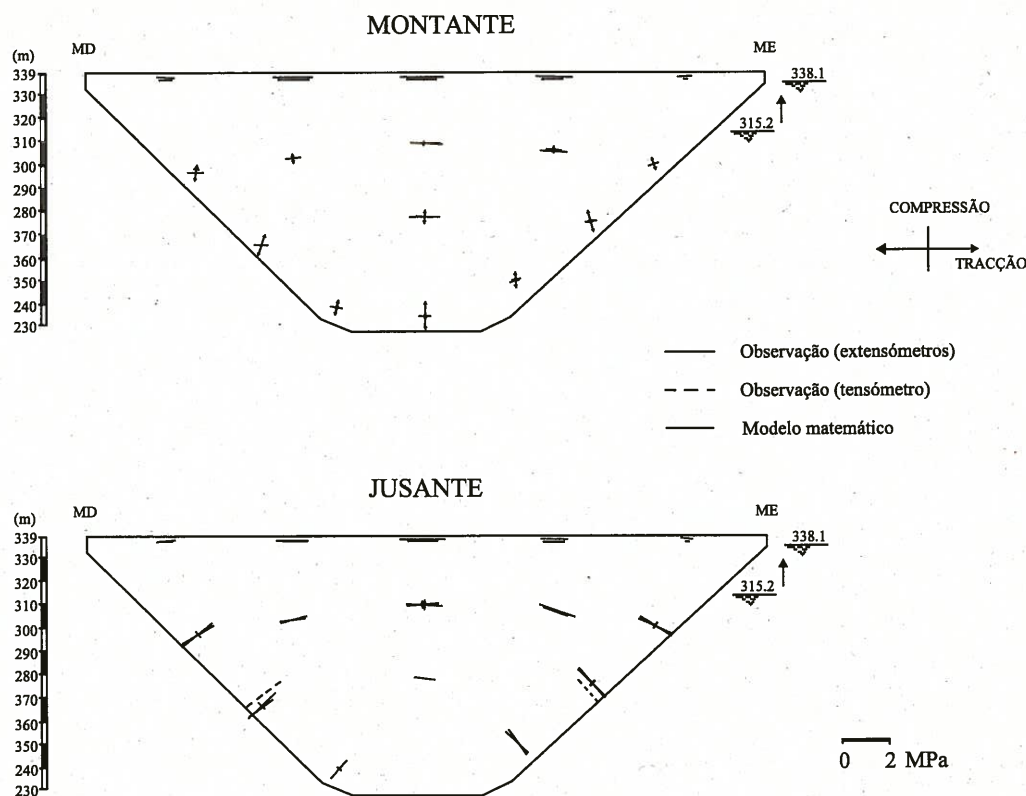


Fig. 13 - Barragem do Alto Lindoso. Tensões principais observadas e calculadas em pontos a 1m dos paramentos entre 12.12.1995 e 8.1.1996.

observada é de 1,87MPa. Nos tensómetros instalados na zona de inserção dos rins, a 1m do paramento de jusante, observam-se tensões de compressão muito próximas das determinadas a partir das extensões medidas. A montante, na inserção da abóbada na fundação, observam-se tensões de tracção, com o valor máximo de 1,38MPa na direcção vertical, junto à base da consola central. A jusante observa-se um estado generalizado de compressão. Com excepção dos pontos situados a montante, próximo da inserção da abóbada na fundação, as tensões principais calculadas são muito próximas das tensões principais observadas.

6. CONCLUSÕES

O conhecimento do campo de tensões instalado numa barragem de betão constitui a melhor forma de avaliar a segurança da estrutura. Neste trabalho, apresentam-se os principais temas relacionados com a

obtenção das tensões instaladas em barragens de betão, dando-se especial destaque à sua determinação de forma indirecta, a partir das extensões observadas nos numerosos grupos de extensómetros usualmente instalados nestas obras.

A análise das extensões observadas inclui a interpretação quantitativa dos valores medidos nos extensómetros e a determinação da variação do campo de extensões instalado entre épocas recorrendo aos valores medidos em grupos de extensómetros. Nestes estudos de interpretação quantitativa e atendendo à influência que a temperatura tem na análise de grandezas locais, de que são exemplo as extensões e as tensões, procurou-se discutir qual a melhor forma de separar a parcela dos efeitos devida às variações térmicas. Na análise das tensões observadas procurou-se comparar as tensões medidas nos tensómetros, instalados em pontos da estrutura em que as tensões atingem os valores máximos, com os valores

determinados recorrendo às extensões medidas em grupos de extensómetros situados na proximidade. As análises efectuadas foram também apoiadas pelos resultados obtidos com um modelo matemático da estrutura, analisado pelo método dos elementos finitos.

O estudo de aplicação que se apresenta revelou as grandes dificuldades inerentes ao tratamento da enorme quantidade de informação fornecida pelas células de fluência e pelos grupos de extensómetros instalados na estrutura.

Para uma correcta determinação do campo de tensões instalado em barragens de betão, particularmente quando obtido de forma indirecta a partir das extensões observadas em grupos de extensómetros, considera-se necessário investir, mais aprofundadamente, nos ensaios e métodos de caracterização da deformabilidade do betão de barragens. Os estudos de interpretação quantitativa de extensões permitem facilitar a análise destas grandezas de forma sistemática. As análises realizadas sobre os valores observados em extensómetros unidireccionais mostraram as dificuldades da sua realização e apontam vias para a superação destas. De forma a obter expressões gerais, devidamente testadas, a utilizar neste tipo de análise, deve-se procurar fazer a sua aplicação a outras barragens. Por fim, propõe-se a adaptação do programa de cálculo automático desenvolvido à análise de grandezas tensoriais, de acordo com um método recentemente apresentado [Oliveira 2000] particularmente adequado à determinação e análise de tensões a partir das extensões observadas nos grupos de extensómetros.

REFERÊNCIAS

- Batista, A. L. (1998) - "*Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada*". Tese de doutoramento. IST. Lisboa.
- Bazant, Z. P.; Osman, E. (1976) - "*Double power law for basic creep of concrete*". Material and Structures, nº 19.
- Bazant, Z. P.; Panulla, L. (1978) - "*Simplified prediction of concrete creep and shrinkage from strength and mix*". Structural Engineering Report, nº 78 - 10/640S, Department of Civil Engineering, Technological Institute, Northwestern University, Evanston.
- Castro, A. T. (1988) - "*Determinação de estados de tensão tridimensionais com extensómetros embebidos*". Relatório 221/88-NO. LNEC. Lisboa.
- Castro, A. T. (1998) - "*Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão*". Tese de doutoramento. IST. Lisboa.
- Doboz, W. (1982) - "*Model estimating displacement of a dam point as a function of loading and temperature history*". XIV Congresso das Grandes Barragens. R.35, Q.52, ICOLD. Rio de Janeiro.
- Farinha, M. L. B. (2000) - "*Extensões e tensões observadas em barragens de betão*". Tese de mestrado. IST. Lisboa.
- Florentino, C. A. (1966) - "*Medição de tensões em barragens de betão*". Tese para especialista. LNEC. Lisboa.
- Florentino, C. A.; Graça, J. C.; Paupério, A. (1986) - "*Determinação de tensões em barragens de betão*". 1º Encontro Nacional sobre Análise Experimental de tensões (APAET). LNEC. Lisboa.
- Oliveira, S. B.; Ramos, J. M.; Florentino, C. A. (1998) - "*Determinação e análise de tensões a partir das extensões observadas em barragens de betão*". Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. LNEC. Lisboa.
- Oliveira, S. B. (2000) - "*Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano*". Tese de doutoramento. FEUP. Porto.
- Pinho, J. S. (1989) - "*Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens*". Tese de Especialista. LNEC. Lisboa.
- Ramos, J. M.; Pinho, J. S. (1982) - "*Deformabilidade do betão de*

- barragens*". Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. LNEC. Lisboa.
- Ramos, J. M. (1985) - "*Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens*". Tese de Especialista. LNEC. Lisboa.
- Ramos, J. M.; Pinho, J. S.; Portugal, A. C.; Castro, A. T. (1988) - "*Analysis of stresses observed in dams considering concrete viscoelastic behaviour*". Memória nº 727. LNEC. Lisboa.
- Ramos, J. M.; Batista, A. L.; Castro, A. T. (1992) - "*Observação da barragem do Alto Lindoso durante o primeiro enchimento da albufeira. Parecer relativo ao comportamento observado até ao primeiro patamar (nível da água à cota 318,0m)*". Relatório 208/92 - NO. LNEC. Lisboa.
- Ramos, J. M. (1994) - "*Fiabilidade e monitoramento de barragens de betão*". Programa de investigação. LNEC. Lisboa.

