



## **Barragens de concreto em abóbada com dupla curvatura.**

Na década de 60, época do projeto e da construção da barragem do FUNIL no Rio de Janeiro, foram publicados vários artigos na revista ESTRUTURA pelos projetistas da obra.

Essa barragem do Funil é de concreto em abóbada com dupla curvatura.

O projeto foi feito por engenheiros portugueses, Manuel Rocha e Laginha Serafim, do LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Não havia computador disponível, nem elementos finitos que pudessem ser usados.

Foram feitos modelos reduzidos, e as medições serviram de base para o projeto.

Portugal tem construído, desde 1950, muitas barragens de concreto em abóbada, a última em 2004.

Com o atual fácil acesso aos computadores e aos elementos finitos, a elaboração dos projetos avançou muito.

Os modelos reduzidos também continuam sendo muito usados.

Esses modelos reduzidos de hoje dispõem de novos materiais, de técnicas poderosas de aquisição de dados, de sensores em fibras óticas etc...

Com a atual tecnologia avançada do concreto, a construção produz concretos com baixo calor de hidratação, o que reduz os riscos de fissuração nas barragens.

Portugal continua na vanguarda dessas técnicas aplicadas às barragens em abóbadas com dupla curvatura.

Algumas recentes teses de pesquisa sobre esse tema estão citadas no texto, mostrando o atual estágio do desenvolvimento em Portugal.

...

A Barragem de Alqueva ( 520 megawatts) é a maior [barragem](#) da Europa Ocidental. Sua operação teve início em 2004.

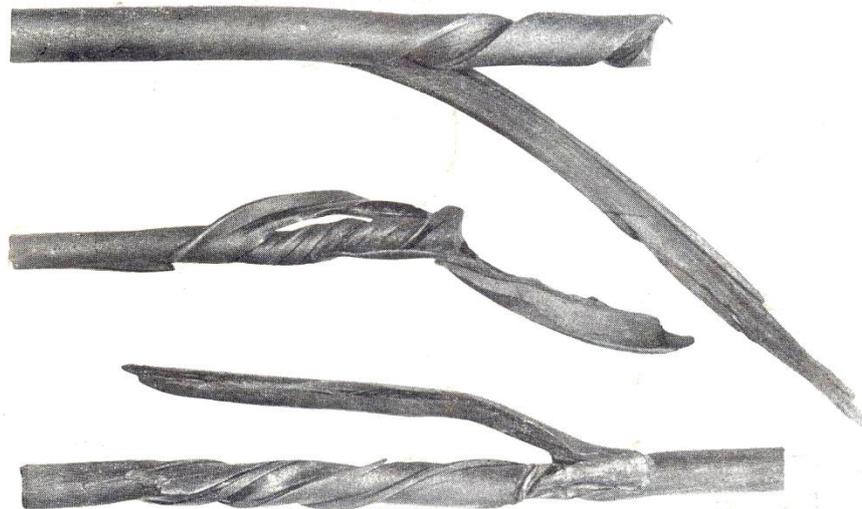
Ver, a seguir, nos artigos publicados na revista ESTRUTURA, os conceitos usados na década de 60 no projeto da barragem do Funil / RJ.

Foram adicionadas algumas fotos para ilustrar o texto.

# ESTRUTURA

REVISTA TÉCNICA

DAS CONSTRUÇÕES



«A conclusão a que se chega é que a torção e o estiramento a frio dos vergalhões de aço doce revelou-se como um recurso para a seleção de vergalhões sãos, concorrendo assim para maior segurança das armaduras e, portanto, das construções em concreto armado.» (Do relatório do I.N.T., 542/54, Divisão de Indústrias Metalúrgicas, R-71/54).

CASCAS  
CÁLCULO DE PONTES  
AÇOS TORÇIDOS CA-T40 E CA-T50  
BARRAGENS ABÓBODA

1960

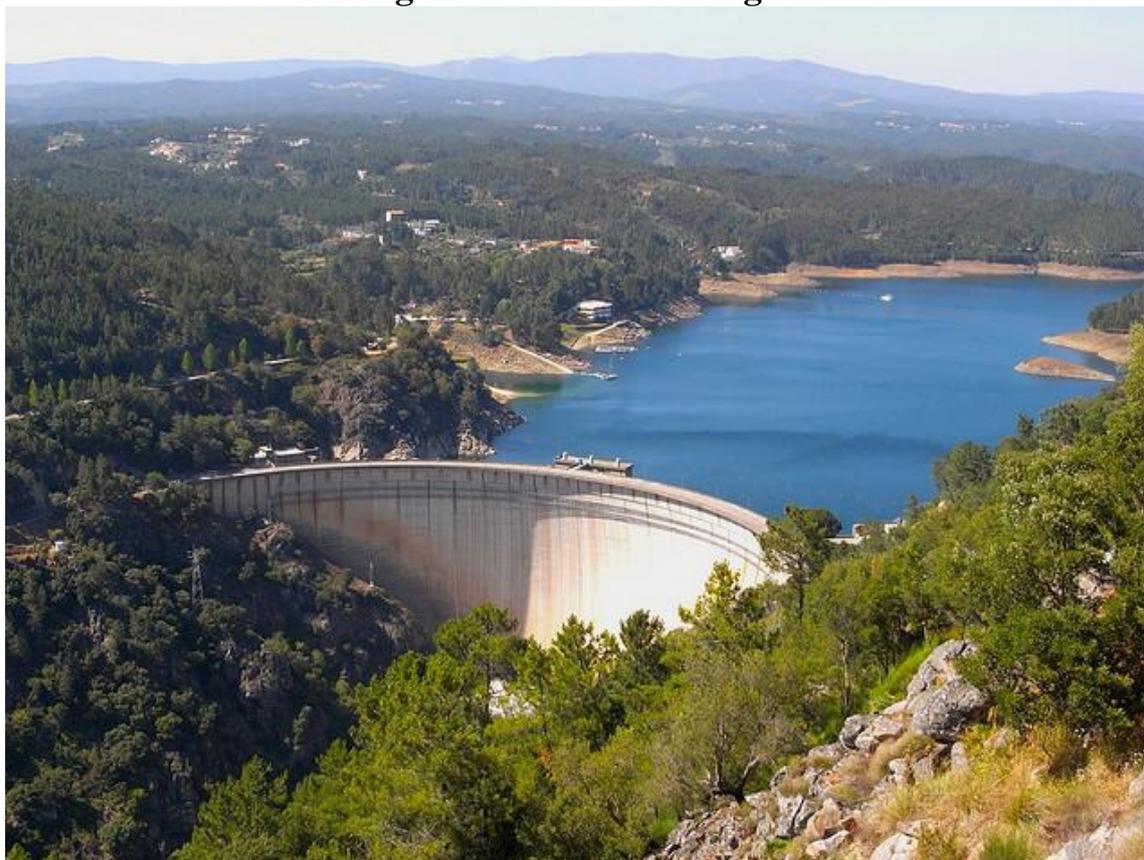
24

- Revista editada pelo Prof. Aderson Moreira da Rocha
- Prof. Manuel Rocha – Modelos Reduzidos de Barragens de Concreto  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa

*(Incluimos várias fotos para ilustrar o texto.)*

# Barragens em abóbadas de concreto

## Barragem de Cabril / Portugal - 1954



A barragem de Cabril foi uma das primeiras barragens de abóbada a ser construída em Portugal. O projeto foi feito com base em resultados de modelos reduzidos experimentais. Foi inaugurada em 1954.

Devido à característica de sua topografia, Portugal se tornou um grande construtor de barragens de abóbada. O LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa criou um núcleo de elaboração de modelos reduzidos.

Segundo Pedro Filipe Queiroz Sarmiento :

Tipo	Nome	Rio	Ano de conclusão	Altura (m)	Definição geométrica	Volume de betão ( $10^3 [m^3]$ )	Volume da albufeira ( $10^6 [m^3]$ )
Abóbada de dupla curvatura	Salamonde	Cávado	1953	75	AC	93	63
	Covão do Meio	Loriga	1953	25	AC	9	1,4
	Cabril	Zêzere	1954	136	A3C	360	719
	Bouçã	Zêzere	1955	65	AC	70	49
	Cançada	Cávado	1955	76	AC	90	152,7
	Bravura	Odeóxere	1958	41	A3C	19	35
	Picote	Douro	1958	100	AC	205	63,8
	Alto Rabagão	Rabagão	1964	94	AP	1117	569
	Vilarinho Furnas	Homem	1972	94	AP	294	118
	Varosa	Varosa	1976	76	AP	81	14,5
	Fronhas	Alva	1984	62	AP	103	89
	Funcho	Arade	1991	49	A3C	61	43,4
	Alto Lindoso	Lima	1992	110	AP	309	347,8
	Caldeirão	Caldeirão	1993	39	AP	26	5,5
	Alqueva	Guadiana	2002	96	AP	687	4150

## Barragens em abóbadas de concreto

### Barragem do Funil - 1969 - RJ / Brasil -216 MW



#### Obra projetada com apoio em modelos reduzidos 1969

[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistema-furnas/usina\\_hidr\\_funil.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistema-furnas/usina_hidr_funil.asp)

A Usina Hidrelétrica de Funil é diferente das demais usinas de FURNAS. Com uma abóbada de concreto, com dupla curvatura, ela foi construída no rio Paraíba do Sul, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro. Sua operação teve início em 1969.



#### Foto Google 2012

O projeto foi feito pelo Eng. Joaquim Laginha Serafim, engenheiro da firma COBA e do LNEC. Também foi feito modelo reduzido : *Estudo experimental da barragem do Salto Funil e estudo em modelo reduzido dos órgãos hidráulicos do aproveitamento do Salto Funil.*

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa -1962-18 p. - Memória. 183 - Cota: APP-342|AHSTP

# DETERMINAÇÃO DE TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA DE BARRAGENS ABÓBODA POR MEIO DE MODELOS\*

MANUEL ROCHA \*\* e

J. LAGINHA SERAFIM \*\*\*

## 1 — INTRODUÇÃO

Uma das principais conclusões geralmente extraídas da observação de barragens de betão é a de que a variação das condições térmicas constitui um fator de primordial importância no seu comportamento.

De fato, são medidas, freqüentemente junto aos paramentos das barragens espessas, extensões muito elevadas devido à temperatura, e têm-se observado grandes deslocamentos em barragens-abóbada delgadas ocasionados pelas variações anuais, e mesmo diárias, das condições climáticas. Também são freqüentemente encontradas fendas nos blocos das barragens, as quais somente podem ser atribuídas às variações de temperatura no betão, devidas ou à perda do calor de hidratação ou às grandes variações da temperatura exterior. Deve notar-se que, nas zonas do paramento de jusante onde aparecem pequenas tensões de tração devidas à pressão hidrostática, é muito freqüente observarem-se infiltrações através de fissuras nas juntas entre blocos. Muito provavelmente tais fissuras são originadas pelas tensões devidas à retração e temperatura na superfície do betão, após a retirada dos moldes.

Certos tipos de barragens, tais como as de abóbadas múltiplas muito delgadas, têm apresentado infiltrações inconvenientes através de pequenas fendas, que podem ser explicadas pelos efeitos da temperatura, a qual

tem, geralmente, uma distribuição muito complicada.

Contudo, o progresso na análise das tensões de origem térmica em barragens não tem sido importante. Isto deve-se, em primeiro lugar, ao fato das condições térmicas numa barragem serem muito complexas, e, em segundo, à circunstância da determinação analítica das tensões elásticas de origem térmica num sólido, mesmo para casos de variações simples de temperatura, constituir um problema difícil.

A previsão de temperaturas durante a construção (de acôrdo com as várias técnicas de dissipação do calor de hidratação) e depois da barragem concluída (determinação das temperaturas no betão devidas a condições exteriores simplificadas) merece grande atenção nos E.U.A.<sup>1</sup> e na Europa<sup>2</sup>, mas poucos autores têm conseguido deduzir os valores das tensões daí resultantes.

Geralmente as barragens gravidade de betão<sup>3</sup> e de contrafortes não são calculadas para as variações de temperatura. Zienkiewicz<sup>4</sup> usou, porém, métodos de relaxação para a determinação das tensões térmicas em estruturas maciças de betão para casos particulares de variações de temperatura, mas o método não foi ainda usado no estudo das variações periódicas da temperatura exterior. Também foram apresentadas em 1945, por Arredi<sup>5</sup>, soluções analíticas de problemas simplificados de tensões de origem térmica

\* — Baseado na tradução de um trabalho apresentado como comunicação ao VI Congresso das Grandes Barragens, Nova York, Setembro, 1958.

\*\* — Diretor interino do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

\*\*\* — Chefe da Seccção de Barragens.

em barragens de gravidade. Em conclusão, pode dizer-se que, nestas estruturas, as tensões devidas à temperatura são desprezadas no cálculo ou consideradas como um fator secundário.

Na parte que se refere às barragens abóbada, os problemas das tensões de origem térmica são bastante mais complexos. Neste caso tem sido sempre considerado aconselhável calcular os arcos para variações de temperatura, quer de um determinado valor<sup>6</sup> quer de um valor dependente da espessura dos arcos<sup>7</sup>. Mas é evidente que um tal método despreza tensões importantes, devidas à não uniformidade da temperatura ao longo da espessura da barragem. Durante a última década os métodos de cálculo têm sido aperfeiçoados, pois os arcos passaram a considerar-se submetidos a variações de temperatura não lineares. Contudo, nestes métodos, apenas são considerados os arcos, e as condições exteriores são muito simplificadas. **Uma referência especial deve ser aqui feita ao trabalho dos autores italianos, especialmente Arredi<sup>8</sup>, que apresentou fórmulas simples para a determinação da distribuição de temperaturas em barragens abóbada submetidas a variações sinusoidais de temperatura nos paramentos, variações essas consideradas constantes de encontro a encontro. Esse autor indicou ainda um método simples de cálculo das tensões daí resultantes.**

No cálculo de barragens portuguesas, Serafim e Silveira consideraram não só a evolução anual da temperatura média diária do ar e da água a vários níveis<sup>9</sup> (projeto da barragem do Cabril) mas também os efeitos das variações de temperatura de período de 15 dias e diário, bem como uma elevação de temperatura de jusante devida à radiação solar<sup>10</sup> (projeto de barragem do Alvito). As distribuições de temperatura através da espessura da barragem, ao longo do ano, foram consideradas, no cálculo "trial load" simplificado, as mais desfavoráveis. No cálculo dos deslocamentos radiais consideraram-se os movimentos dos arcos e das consolas devidos a variações de temperatura e calcularam-se as tensões elásticas de origem térmica totais. As diferenças entre os diagramas

reais e os diagramas lineares equivalentes exprimiram o desenvolvimento de tensões proporcionais e essas diferenças.

Além da crítica que pode ser feita ao uso do método do "trial load" simplificado na determinação de tensões devidas a variações de temperatura, é de notar que será muito difícil analisar uma barragem considerando condições térmicas variáveis ao longo do desenvolvimento dos arcos e que não é possível ter em consideração as distribuições complexas de temperaturas e tensões junto à fundação e ao coroamento.

Resumindo, pode dizer-se que o cálculo de tensões de origem térmica em barragens de betão está ainda muito longe de conduzir a resultados suficientemente exatos, sendo isto devido a três razões principais: (i) a determinação analítica da distribuição real de temperaturas numa barragem é um problema muito complexo e, na realidade, não se verificam as hipóteses das variações da temperatura exterior serem uniformes ou de se manterem as mesmas condições de uma e outra margem; (ii) os estados de tensão devidos a variações não uniformes de temperatura, quer ao longo da barragem quer na sua espessura, são muito complexos, especialmente próximo das fundações; mesmo os métodos analíticos mais aperfeiçoados, como o "trial-load", não podem determiná-los com rigor, pois têm que supor uma distribuição linear de tensões ao longo da espessura e também porque os deslocamentos verticais não são tomados em consideração; (iii) as propriedades mecânicas do betão dependem da temperatura e é possível que se dê uma certa relaxação de tensões com o aumento de temperatura do betão; deve dizer-se, contudo, que medições de extensões de fluência em prismas de betão em massa, carregados aos 8 dias e mantidos a 20°C e a 45°C, levadas a cabo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (L.N.E.C.), não mostraram nenhum aumento importante da fluência, nem abaixamento substancial do módulo de elasticidade com um aumento tão grande de temperatura. Os resultados não são ainda definitivos, estando em curso ensaios suplementares.

Um outro problema deve aqui ser mencionado: qual poderá ser o efeito das tensões de origem térmica localizadas, nas condições de rotura de uma grande estrutura de betão? Um vasto programa de investigação da influência das tensões de origem térmica na rotura do betão está também a ser conduzido no L.N.E.C.

As dificuldades acima citadas levaram o L.N.E.C. a estudar a técnica da determinação de tais tensões em barragens de betão por meio de modelos. Efetivamente, quando os problemas de fronteiras (resolução de equação diferenciais para dadas condições aos limites) são muito complexos, a maneira adequada de os resolver é usar modelos ou analogias.

Até aqui as investigações encontram-se ainda na primeira fase: estão em construção modelos apropriados; foram encomendados aparelhos registradores e está a ser ensaiado o sistema para aplicação de variações de temperatura. Considerou-se contudo que valia a pena incluir nesta publicação os princípios que estão a ser seguidos nas investigações, o programa das mesmas, as técnicas usadas e o progresso já obtido no estudo de permenores.

## 2 — VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EM BARRAGENS

Como é bem conhecido, durante a construção duma barragem, podem ocorrer elevações importantes de temperatura do betão. Têm-se feito progressos no projeto, na betonagem, no arrefecimento prévio e posterior do betão, no fechamento das juntas e no uso de cimentos especiais de modo a eliminar, ou reduzir ao mínimo, os efeitos dessa elevação de temperatura e conseqüente arrefecimento dos blocos. A par disto, a plasticidade do betão jovem evita o desenvolvimento das tensões iniciais devidas à temperatura não é considerado na fase atual dos estudos de modelos.

A distribuição de temperaturas numa barragem, depois do calor de hidratação do ci-

mento estar completamente dissipado, depende do tipo e configuração da barragem, do clima local, das características térmicas da fundação, da orientação e exposição da barragem ao sol, da cota da água armazenada e da distribuição de temperaturas na albufeira. Estas condições podem variar muito de um caso para outro. Por exemplo, a distribuição de temperaturas numa barragem de contrafortes é muito mais complexa do que numa barragem gravidade. Nas regiões árticas a amplitude anual das variações da temperatura média diária é muito maior do que nas regiões subtropicais, enquanto que sucede o contrário em relação às variações diárias de temperatura. Uma barragem com a albufeira sempre cheia tem um comportamento diferente do de uma barragem para amortecimento de cheias. Duas barragens iguais na mesma região, uma com o paramento de jusante virado a Norte e a outra a Sul, apresentarão diferentes temperaturas, etc.. Deve contudo acrescentar-se que há um outro fenómeno, associado às variações de temperatura, que tem também ação importante nas tensões superficiais: é o da secagem e conseqüente retração do betão junto das faces. Os seus efeitos não podem ser facilmente separados, pois ambos dependem das condições climáticas e de exposição.

Com o fim de analisar as tensões devidas às temperaturas, as condições ambientes de uma barragem podem ser separadas como segue:

a) *No paramento de jusante* (acima do nível de água a jusante ou de construções tais como centrais) e *no de montante, acima do nível de água na albufeira:*

1. Evolução anual da temperatura média diária do ar: igual para tóda a superfície da barragem. Tal evolução pode ser considerada como uma senoide de amplitude igual à variação mais desfavorável observada no local durante muitos anos.

2. Evolução da temperatura média diária do ar num período de 15 dias, verificada no nosso clima. Pode também ser considerada como variação sinusoidal de dada amplitude,

“Barragens de Concreto em Abóbadas” continua sendo uma tema atual em Portugal, como se pode observar nas duas teses apresentadas a seguir.



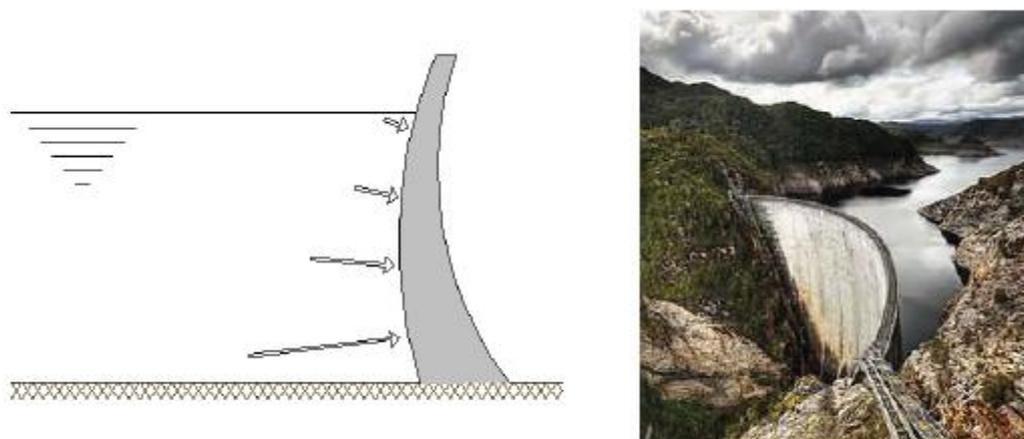
## ESCOLHA DE FORMAS DE BARRAGENS ABÓBADA

José Alberto Garcia Meliço

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia

Monte da Caparica

2010



**Figura 1.3** – Barragens abóbada: perfil esquemático e barragem de Gordon (Austrália, 1962) (fonte: [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org)).

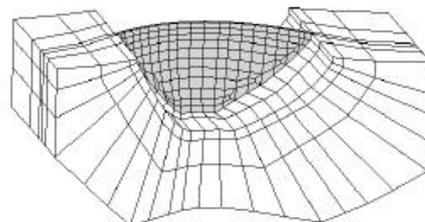
*“As barragens abóbada são aquelas em que a forma é determinante para resistir à pressão da água, funcionando a estrutura como arco, sendo as forças transferidas para os apoios, o que requer a existência de maciços rochosos de boa qualidade. Estas barragens são as mais esbeltas e as que mobilizam menos quantidade de betão na sua construção. Quando a barragem tem curvatura apenas em planta, é chamada de abóbada cilíndrica. Quando a barragem é curva na vertical e na horizontal, é designada por abóbada de dupla curvatura (Figura 1.3). As barragens em abóbada têm formas mais complexas que as barragens gravidade, sendo mais exigente o seu projecto e a sua construção”*



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil



## Utilização de modelos de elementos finitos tridimensionais no cálculo estrutural de barragens de betão

PEDRO FILIPE QUEIROZ SARMENTO

(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o ISEL e o LNEC

Dezembro de 2010

*“As barragens em abóbada são estruturas de betão em massa com curvatura em planta e em altura, com a convexidade voltada para montante, por forma a que para as acções principais (peso próprio, pressão hidrostática e variações térmicas) não ocorram tensões de tracção significativas: desta forma tira-se partido do facto da resistência do betão à compressão ser substancialmente superior à sua resistência à tracção. Devido ao efeito de arco, o peso próprio e o impulso hidrostático são transmitidos para as encostas através de um campo de tensões caracterizado por tensões de compressão aproximadamente perpendiculares às encostas.*

*Existem barragens de curvatura simples (apenas em planta) e de dupla curvatura (em planta e em altura); nestas obras a espessura é, em geral, reduzida podendo contudo classificar-se como esbeltas, pouco espessas ou espessas. Estas barragens podem atingir alturas bastante elevadas, sendo aconselhada a sua escolha para regiões com vales acentuados em maciços rochosos de boa qualidade (maciço de fundação com elevada resistência).”*

continuação....

determinada pela análise das temperaturas observadas.

3. Evolução diária da temperatura do ar, que também pode ser representada aproximadamente por uma sinusóide. A amplitude a considerar será a máxima amplitude observada.

4. Efeitos da radiação solar, dependentes das condições de exposição dos paramentos da barragem ao sol, e ainda dos seguintes fatores — vento, chuva, humidade e evaporação. Estes fenômenos são responsáveis pelas condições não uniformes ao longo dos paramentos das barragens, isto é, pela assimetria verificada no seu comportamento térmico. Quando interessarem os efeitos da radiação solar, eles podem ser perfeitamente determinados<sup>12</sup> em cada ponto dos paramentos da barragem, entrando com a latitude do lugar, a orientação dos paramentos e a sua côr, bem como com a intensidade da radiação solar. O efeito da radiação num ponto pode, em primeira aproximação, ser traduzido como um incremento da sua temperatura.

A variação da temperatura num ponto da barragem pode, por conseguinte, ser definida como uma variação anual sinusoidal, mais uma variação diária sinusoidal, mais o acréscimo de temperatura devido à radiação. Como a amplitude da última sinusóide é variável no ano, deve-se escolher a combinação possível, mais desfavorável, das amplitudes diárias e anual.

b) No paramento de montante abaixo do nível da água na albufeira, o qual pode variar ao longo do ano e ser previsto de acôrdo com a utilização da água:

1. Temperatura constante inferior à temperatura média anual do ar, decrescendo o seu valor com a profundidade segundo uma dada lei baseada na observação de temperaturas em albufeiras similares.

2. Uma variação sinusoidal da temperatura, desfasada da temperatura anual do ar, dependendo a amplitude e a diferença de fase da profundidade da água na albufeira.

### 3 — ENSAIOS EM MODELOS PARA A DETERMINAÇÃO DE TENSÕES DE ORIGEM TÉRMICA.

Os bons resultados já alcançados na análise experimental de barragens por meio de modelos submetidos à pressão hidrostática, pêso próprio e outras cargas e, por outro lado, os recentes aperfeiçoamentos das técnicas de determinação experimental de tensões de origem térmica<sup>13</sup>, mostram a possibilidade de estender a análise experimental das barragens de betão às solicitações térmicas. Por um vasto inquérito acêrca dêste problema, soube-se que estão a ser usados com sucesso, nos E.U.A. (Baldwin SR-4, tipo EBD) e na Suécia (Instituto de Investigações na Aeronáutica da Suécia — Departamento de Física), extensômetros elétricos especiais autocompensados para serem aplicados em metais.

As condições térmicas nos paramentos das barragens também são agora melhor conhecidas graças à observação, e podem ser definidas como se indica no art. 2. Contudo, a reprodução simultânea de tôdas essas complexas condições num modelo é realmente muito difícil e, por isso, elas têm de ser estudadas em separado. Admitindo o comportamento elástico da barragem, o princípio da sobreposição de efeitos, quer para fenômenos térmicos quer elásticos, permite que se somem as temperaturas das tensões em qualquer ponto.

As primeiras pesquisas em modelos, a levar a cabo, dirão respeito às seguintes condições:

1. Variação sinusoidal de temperatura correspondendo à onda anual de temperatura no protótipo, com a mesma amplitude para todo o paramento de montante e com uma amplitude decrescendo com a profundidade, para a parte do paramento de montante em contato com a água.

2. Variação sinusoidal de temperatura correspondente à onda diária atuando apenas no paramento de jusante, no coroamento da barragem e no paramento de montante que não esteja em contato com a água.

3. Aquecimento assimétrico do paramento de jusante e do coroamento da barragem correspondente à radiação solar a que a barragem está exposta.

No art. 6 ver-se-á como estas condições de temperatura serão impostas aos modelos nesta primeira fase dos trabalhos.

Também se pretende considerar outros casos de variação de temperatura quando a montagem para os ensaios em modelo estiver concluída, sendo então as temperaturas observadas comparadas com as obtidas por cálculos.

#### 4 — LEIS DE SEMELHANÇA

Supondo que as barragens são sólidos homogêneos e isotrópos, quer do ponto de vista elástico quer do ponto de vista térmico, devem respeitar-se as seguintes condições:

a) O modelo deve ser uma reprodução fiel do protótipo a uma certa escala. Todos os pormenores devem ser reproduzidos, sobretudo junto dos pontos em que se efetuam medições.

b) O material do modelo deve ser homogêneo e isotrópico do ponto de vista elástico e térmico.

c) O material do modelo deve ser elástico e o seu módulo de elasticidade ( $E_m$ ) não deve variar com a temperatura, o tempo e a tensão. O coeficiente de Poisson do material do modelo deve ser igual ao do betão.

d) O coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha_m$ ) e a difusibilidade térmica ( $h^2_m$ ) do material do modelo não devem variar com a temperatura.

e) As fundações devem ser reproduzidas com uma profundidade conveniente de maneira a que, no modelo, estas funcionem aproximadamente como um sólido infinito.

f) O material que reproduz a fundação deve possuir propriedades elásticas e térmicas tais que as relações com as propriedades do material do modelo da barragem sejam iguais às do protótipo.

g) As temperaturas exteriores no modelo ( $T_m$ ) e no protótipo ( $T_p$ ) devem ser

homólogas em cada instante. As temperaturas no interior resultarão então homólogas por virtude da semelhança.

Uma vez satisfeitas as condições acima mencionadas, é fácil obter, por exemplo pela análise dimensional, as relações de semelhança entre as tensões  $\sigma$ , extensões  $\epsilon$ , deslocamentos  $\delta$  e tempo  $t$  no modelo (m) e no protótipo (p), se as escalas dos vários parâmetros de que dependem, forem conhecidas<sup>14</sup>. Essas relações de semelhança são as seguintes:

$$\sigma_m = \frac{1}{\omega \mu \chi} \sigma_p,$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{\omega \chi} \epsilon_p,$$

$$\delta_m = \frac{1}{\omega \chi \lambda} \delta_p,$$

$$t_m = \frac{\psi}{\lambda^2} t_p,$$

onde

$$\frac{1}{\psi} = \frac{h^2_m}{h^2_p} \text{ é a escala das difusibilidades,}$$

$\frac{1}{\chi} = \frac{\alpha_m}{\alpha_p}$  é a escala dos coeficientes de dilatação térmica,

$\frac{1}{\mu} = \frac{E_m}{E_p}$  é a escala dos módulos de elasticidade,

$$\frac{1}{\omega} = \frac{T_m}{T_p} \text{ é a escala das temperaturas,}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{a_m}{a_p} \text{ é a escala das dimensões.}$$

A escala dos tempos que torna válida a condição g) é basilar para a semelhança das tensões, pois que esta exige que as temperaturas em todos os pontos do modelo sejam, em cada instante, proporcionais às do protótipo. A fixação da escala dos tempos é também muito importante, não só para o projeto do sistema de carga do modelo mas também para atender às características mais convenientes da aparelhagem de medida.

## 5 — MATERIAIS E ESCALAS DOS MODELOS.

Como as medições a efetuar nos modelos são as de temperaturas, extensões e deslocamentos, as escalas e materiais escolhidos devem permitir efetuá-las com a necessária precisão. É importante notar que o material do modelo pode ter qualquer módulo de elasticidade, porque as quantidades atrás referidas são independentes desse parâmetro.

No que diz respeito à escala de temperaturas, esta deve ser fixada tendo em conta que as variações de temperatura nos modelos devem ser suficientemente grandes de modo a serem medidas com a desejada precisão. Por outro lado, tais variações não podem exceder um certo limite, dentro do qual as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais permanecem aproximadamente constantes.

A escala dos coeficientes de dilatação térmica deve ser suficientemente grande, de modo que a escala das extensões  $\frac{\alpha_m}{\alpha_p} \cdot \frac{T_m}{T_p}$  permita que as extensões desenvolvidas nos modelos possam ser medidas com precisão suficiente.

Em face dos vários inconvenientes inerentes à construção de grandes modelos — como o tempo necessário, o espaço requerido e o custo do modelo<sup>14</sup> — tiveram de ser escolhidas escalas menores que 1/100. Para escalas inferiores a 1/500 as dificuldades em obter medidas de precisão, em encontrar extensômetros adequados e em obter as variações de temperatura exterior, seriam enormes.

Foram considerados, para a construção de modelos, três grupos de materiais, cujas propriedades estão indicadas no Quadro I.

a) *Metais* — (Ferro fundido, alumínio, bronze, latão e cobre) — Têm características elásticas e térmicas bem conhecidas que não variam praticamente com a temperatura e, para tensões baixas, não apresentam fluência apreciável. O seu coeficiente de Poisson não é muito diferente do de betão. A aplicação dos extensômetros é muito fácil e as medições de tensões de origem térmica são

muito facilitadas com o uso de extensômetros especiais autocompensados para os alongamentos térmicos. A moldagem dos modelos não é difícil; por isso, considerando os vários fatores previamente discutidos, concluiu-se que o bronze podia ser um material muito conveniente para certos tipos de determinações, por modelos, de tensões de origem térmica. Os metais têm, contudo, uma difusibilidade muito elevada e, por consequência, a onda anual tem que ser reproduzida por um período muito curto, podendo dizer-se que é quase impossível estudar os efeitos das variações diárias de temperatura com modelos metálicos (Quadro II). Além disso, tornam-se necessárias grandes amplitudes das variações de temperatura para obter medidas seguras de extensões.

b) *Plásticos* (“alkathène” [polietileno], “palatal” ou “marco” [poliester], e “perpex” ou “lucite” [acrílico]) — Não são materiais perfeitamente elásticos, e a sua elasticidade e viscosidade variam com a temperatura e o tempo de carga. O seu elevado coeficiente de Poisson, próximo de 0,5, constitui um outro grande inconveniente. A aplicação de extensômetros vulgares é fácil, exceto nos polietilenos, mas para os plásticos não se fabricam extensômetros especiais autocompensados para a temperatura. A construção de modelos não é difícil. Como a difusibilidade dos plásticos tem valores baixos, podem ser usadas escalas pequenas, como 1/200 a 1/400, sem que os períodos das variações de temperatura sejam demasiado curtos, como pode ser verificado no Quadro II. Dado que o seu coeficiente de dilatação térmica é muito elevado, os plásticos apresentam uma outra vantagem: requerem apenas amplitudes muito pequenas de variação de temperatura.

c) *Gesso e misturas de gesso e diatomite* — As suas propriedades elásticas e mecânicas variam muito com a temperatura, pois se verificam modificações importantes na estrutura interna, devidas aos movimentos das moléculas de água. Este movimento da água é também muito inconveniente para a “estabilidade” dos extensômetros aplicados sobre estes materiais. Ainda que tendo algumas propriedades adequadas, estes materiais

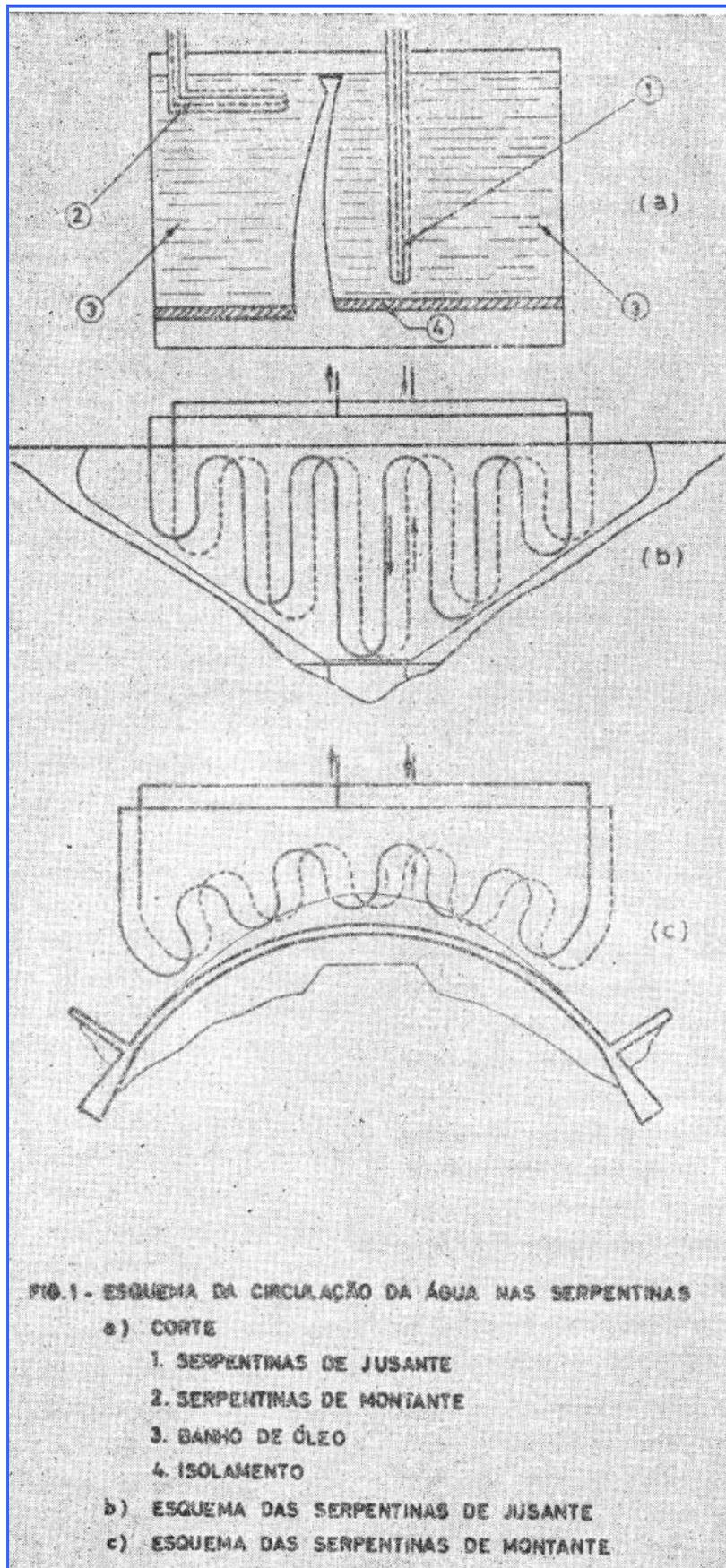


Fig. 1

não podem ser usados devido àqueles inconvenientes.

d) *Microbetão ou argamassa* — Os betões ou argamassas idosos e secos não apresentam, com a temperatura modificações importantes das suas propriedades elásticas. Os fenômenos anelásticos podem ser muito diminutos se se usarem composições adequadas. Note-se porém que, em todo o caso, êstes fenômenos são semelhantes aos do betão dos protótipos. O coeficiente de Poisson é o mesmo do do betão. As propriedades térmicas não variam apreciavelmente com a temperatura. Se os betões ou as argamassas forem convenientemente secos em estufa algum tempo depois da moldagem dos modelos, os extensômetros vulgares também os extensômetros especiais auto-compensados poderão provavelmente fornecer resultados seguros; no entanto esta questão está ainda em estudo. A construção dos modelos não é difícil, necessitando-se todavia de moldes perfeitos para obter, desde logo, as formas definitivas. A escala do tempo para os modelos construídos em escalas inferiores a 1/200 (Quadro II) é pequena, mesmo para a variação anual, especialmente porque são necessárias grandes amplitudes das variações de temperatura em consequência do baixo coeficiente de dilatação térmica dêstes materiais.

## 6 — SISTEMAS PARA APLICAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TEMPERATURAS

Um dos mais delicados problemas a resolver é o de encontrar um sistema adequado que provoque nos diversos pontos dos paramentos dos modelos variações de temperatura de um dado período, amplitude, distribuição e diferença de fase.

O Quadro II mostra que, mesmo para os plásticos, a onda diária de temperatura tem que ser reproduzida nos modelos por variações de temperatura de um período muito curto. Por isso e até porque parece ser a mais importante, foi decidido empreender os primeiros estudos em modelo para a variação anual de temperatura.

Ao considerar a variação anual de temperatura do paramento de jusante, convém

reproduzir simultaneamente a variação anual da temperatura do paramento de montante, que é igual à temperatura da água da albufera aos vários níveis. Para simplificar, supõe-se no primeiro estudo sempre a água no nível máximo.

E' importante acentuar que o sistema de imposição de variações de temperatura ao modelo deve trabalhar em condições tais que a temperatura média em todo o sistema seja sensivelmente igual à temperatura ambiente, isto é, a temperatura média do modelo deve ser, quanto possível, igual à temperatura da sala onde os ensaios sejam realizados.

Estão sendo estudados dois sistemas diferentes para imposição de variações de temperatura, sôbre os modelos:

a) Aquecimento e arrefecimento dos paramentos do modelo por meio de banhos de óleo com um sistema de serpentinas onde pode circular água quente e fria.

b) Aquecimento dos paramentos por irradiação, utilizando lâmpadas especiais de infra-vermelhos, e arrefecimento das faces por meio de jatos de ar sêco arrefecido.

Foi decidido começar o estudo do sistema de banhos de óleo, considerado mais fácil de realizar.

A existência de um modelo da barragem do Cabril, em alkathène" à escala 1/400, facilitou o início dos ensaios, tendo para êle sido projetado, de acôrdo com o desenho da fig. 1, um sistema de serpentinas. No banho do paramento de jusante, foram montadas, aproximadamente paralelas ao paramento da barragem, duas serpentinas (tubos de cobre com 2 mm de diâmetro) nas quais a água circula em direções opostas. Isto permitiu a produção de condições uniformes, de uma à outra margem. No paramento de montante foram colocadas, horizontalmente e um pouco abaixo da crista da barragem, duas serpentinas em tubos de cobre do mesmo diâmetro. Nos banhos, que cobriam completamente a barragem, como está indicado na fig. 1, foi usado óleo de transformador, de boas propriedades isolantes. A superfície da fundação do modelo da barragem foi isolada tèrmicamente a fim de se impor em apenas

variações de temperatura no corpo da barragem. Foram colocados pares termo-elétricos em vários pontos dos paramentos do modelo, a vários níveis.

A água quente ou fria pode ser bombada através dos tubos. A fig. 2 mostra o modelo nos primeiros ensaios. \*

Ao projetar o sistema de serpentinas para aplicação das variações de temperatura, deve-se ter em conta o seguinte:

1. A importante convexão que se produz no banho torna necessário forçar a baixar o óleo quente que sobe à superfície.

2. Para períodos curtos do ciclo de temperaturas é necessário, a fim de conseguir uma conveniente amplitude de temperaturas nos paramentos, que as serpentinas tenham um elevado coeficiente de trocas de calor. Também o volume de óleo no sistema deve ser tão pequeno quanto possível, de modo que a sua temperatura possa variar rapidamente.

3. Deve ser armazenado um grande volume de água quente e fria de maneira a manter a água de circulação a uma temperatura constante.

4. Deve ser colocada, no fundo do banho de óleo de montante, outra serpentina, além das previstas, na qual circule água fria, de modo a tornar a distribuição de temperaturas no paramento de montante semelhante à distribuição de temperaturas no protótipo.

O sistema em que se utilizam lâmpadas de infra-vermelhos está sendo projetado. Para aquecer a superfície do modelo estão a ser consideradas lâmpadas tubulares de infra-vermelhos, com um elevado poder calorífico. Como se disse, o arrefecimento será obtido com uma corrente de ar frio.

## 7 — TÉCNICAS DE MEDIDA

As temperaturas nos modelos, tanto nos paramentos como no interior, estão a ser medidas com pares termoelétricos de cobre-constantan, usando-se fios de diâmetro muito pequeno (0,2 mm). Contudo está também a ser considerada a possibilidade de se utilizarem termômetros de resistência com enrola-

mentos muito pequenos, tal como estão a ser fabricados na Suécia (Instituto de Investigação na Aeronáutica). Serão usados aparelhos de registro para um certo número de leituras com ambos os tipos de instrumentos; êles permitem registros contínuos ou separados em intervalos regulares.

A medição de temperaturas não apresenta nenhuma dificuldade especial. Os instrumentos devem ser fixados aos paramentos e a sua superfície deve ser pintada da mesma cor do modelo, de maneira a evitar perturbações devidas a diferenças na radiação. A colocação de pares termoelétricos ou de termômetros de resistência, especialmente nos pontos do interior do modelo, deve ser feita de maneira a evitar condução de calor, até ao ponto sob medida, através dos fios condutores, o que alteraria as temperaturas a medir. Nos primeiros ensaios já efetuados, as leituras dos pares termoelétricos foram feitas por meio de potenciômetros de precisão. A comutação de um par para outro foi feita manualmente.

A medição, nos modelos, das tensões devidas a variações de temperatura é muito mais difícil que a das temperaturas. Em virtude de não ser possível medir atualmente, tensões em modelos pequenos, serão medidas extensões. Isto exige que os materiais do modelo apresentem características elásticas constantes. Não são, pois, aconselháveis os materiais apresentando fluência ou variação instantânea do seu módulo de elasticidade com a temperatura.

Os extensômetros elétricos vulgares apresentam geralmente uma grande variação da resistência com a temperatura, inconveniente que pode ser eliminado mediante o uso de dois métodos. No primeiro, um extensômetro igual, montado num provete de material igual ao do modelo (extensômetros compensadores) e mantido próximo do ponto em observação do modelo de maneira a ter sempre uma temperatura igual à do extensômetro ativo, servirá de quarto braço da ponte de Wheatstone. Assim se compensaria não só a variação de resistência do fio do extensômetro com a temperatura, mas também a li-

\* A fig. 2 é apresentada na página 118 dêste número.

QUADRO I

CARACTERÍSTICAS DE VÁRIOS MATERIAIS

MATERIAIS	Características mecânicas		Características térmicas (c.g.s.)			
	$E$ (kg cm <sup>-2</sup> )	$\nu$	Condutibilidade térmica $k$	Calor específico $c$	Difusibilidade térmica $h^2$	Coef. de dilatação /°C
Aço.....	$2.100 \times 10^3$	0,3	0,108	0,11	0,126	$12 \times 10^{-6}*$
Ferro fundido.....	$1.000 \times 10^3$	0,25	0,112	0,11	0,134	$11 \times 10^{-6}$
Alumínio.....	$720 \times 10^3$	0,3	0,485	0,21	0,860	$25 \times 10^{-6}*$
Bronze (90/10).....	$1.200 \times 10^3$	0,3	0,222	0,09	0,280	$18 \times 10^{-6}$
Latão (60/40).....	$850 \times 10^3$	0,3	0,084	0,09	0,110	$19 \times 10^{-6}*$
Cobre.....	$1.300 \times 10^3$	0,3	0,927	0,09	1,140	$16 \times 10^{-6}*$
Alkathene.....	$2 \times 10^3$	0,44	0,0007	0,55	0,00137	$160 \times 10^{-6}$
Perspex.....	$28 \times 10^3$	0,36	0,0005	0,35	0,00119	$71 \text{ a } 80 \times 10^{-6}*$
Celuloide.....	$18 \times 10^3$	0,40	0,0004	0,36	0,00074	$140 \times 10^{-6}$
Marco.....	$36 \times 10^3$	0,40	0,0005	0,55	0,00075	$60 \times 10^{-6}$
Micro-betão.....	$250 \times 10^3$	0,2	0,0058	0,22	0,0107	$10 \text{ a } 12 \times 10^{-6}*$

\* Valores determinados no L.N.E.C.

vre dilatação do material do modelo. Este método não é considerado digno de confiança, pois é muito difícil satisfazer a condição de iguais temperaturas no ponto em observação e no provete onde o extensômetro compensador está montado, porque a temperatura varia com o tempo. Um outro método consistirá em calibrar primeiro os extensômetros montados em provetes livres do material do modelo, mantendo um a temperatura constante e submetendo o outro a ciclos de temperatura. Os ensaios serão depois levados a cabo usando, como extensômetro compensador, um extensômetro mantido sempre à mesma temperatura no ponto onde o extensômetro ativo está montado e introduzindo a correção indicada pelo ensaio de calibração. Quer dizer, a extensão será igual a:

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' \quad (1)$$

onde

$\epsilon'$  — é a extensão medida

$\epsilon''$  —  $k(T - T_0)$ ,

$k$  — a constante obtida no ensaio de calibração

$T$  — a temperatura no ponto sob medida,

$T_0$  — a temperatura do extensômetro de referência (constante).

As tensões serão então calculadas a partir das extensões  $\epsilon$  entrando com os valores das constantes elásticas  $E$  e  $\nu$ .

Da expressão (1) é fácil ver que podem existir grandes erros quando  $\epsilon'$  é aproximadamente igual a  $\epsilon''$ , especialmente se o erro na medida das temperaturas é grande.

Nos ensaios descritos no próximo artigo pode ver-se que as diferenças entre extensômetros normais SR-4, tipos A-1 e A-5 não excedem  $2 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{C}$  de variação de temperatura. Quer dizer que aqueles extensômetros podem ser usados para medições das extensões devidas a temperaturas, se outros problemas não surgirem. Um desses problemas pode ser a confiança na colagem destes extensômetros quando a temperatura sobe. Realmente, já foi constatado que uma grande desvantagem dos modelos em "alkathène" reside no fato da colagem, neste material, dos extensômetros normais não subsistir, quando a temperatura sobe.

O uso de extensômetros especiais, compensados para temperaturas, em medidas de tensões de origem térmica tem grandes vantagens sobre os extensômetros vulgares. Os extensômetros especiais com compensação de temperatura anulam automaticamente a livre dilatação de origem térmica do corpo em estudo, medindo apenas a fração da extensão devida à tensão, isto é, na equação (1)  $\epsilon''$  é igual a zero. Os extensômetros especiais compensados Baldwin são fabricados para serem usados em metais com o seguinte coeficiente de dilatação linear:  $23,2 \times 10^{-6}$ ,  $11,7 \times 10^{-6}$ ,  $9,0 \times 10^{-6}$  e  $0,5 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{C}$ .

Quando o valor do coeficiente de dilatação linear do material em que as tensões de origem térmica são medidas é diferente daquele para o qual o extensômetro foi fabricado, torna-se necessária uma correção semelhante à indicada para os extensômetros vulgares, isto é, a extensão é

$$\epsilon = \epsilon' - (\alpha - \alpha')(T - T_0)$$

onde

$\epsilon'$  — é a extensão medida,

$\alpha$  — o coeficiente de dilatação linear do material do modelo,

$\alpha'$  — o mesmo coeficiente do material para que o extensômetro foi feito,

$T$  — a temperatura no ponto,

$T_0$  — a temperatura do extensômetro de referência.

Note-se que neste caso deve ser usado um extensômetro compensador mantido a temperatura constante durante o ensaio, tal como quando se utilizam extensômetros vulgares.

Os extensômetros especiais Baldwin compensados para as temperaturas são colados com uma cola de bakelite, que pode ser usada em metais e em betão. O seu uso em plásticos não é, em regra, possível.

Dado que as condições variam rapidamente não é prático usar na medição de extensões de origem térmica em modelos os indicadores normais de extensões, tornando-se necessário usar aparelhos registradores nos estudos em curso serão usados instrumentos registradores Brush e Honeywell.

(continua)

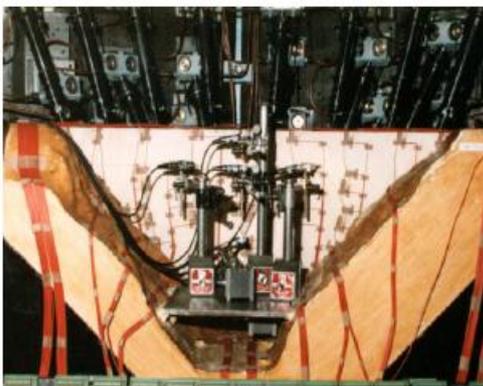
## Barragem de Alqueva - Évora / Portugal - 520 megawatts



<http://www.lnec.pt/organizacao/dbb>

A Barragem de Alqueva ( 520 megawatts) é a maior **barragem portuguesa** e da Europa Ocidental, situada no **rio Guadiana**, no **Alentejo interior**, perto da aldeia de **Alqueva**. Sua operação teve início em 2004.

Obra projetada com o uso de Programas de Elementos Finitos e de Modelos Reduzidos Experimentais



a)



b)

Utilização de modelos físicos em estudos de verificação da segurança para cenários de rotura. a) Barragem do Alto Lindoso (decréscimo da resistência); b) barragem do Alqueva (movimento horizontal na falha da fundação) (LNEC - NMMF).

QUADRO II

ESCALAS DOS TEMPOS E PERIODOS DAS ONDAS  
TERMICAS ANUAL E DIARIA

			1/100	1/200	1/300	1/400	1/500
Materiais dos modelos	Ferro fundido	Escala dos tempos	$\frac{1}{125.000}$	$\frac{1}{500.000}$	$\frac{1}{1.130.000}$	$\frac{1}{2.000.000}$	$\frac{1}{3.130.000}$
		Onda anual (seg.)	252	63	28	16	10
		Onda diária (seg.)	0,69	0,17	0,08	0,04	0,03
	Bronze	Escala dos tempos	$\frac{1}{262.000}$	$\frac{1}{1.050.000}$	$\frac{1}{2.360.000}$	$\frac{1}{4.190.000}$	$\frac{1}{6.540.000}$
		Onda anual (seg.)	120	30	13	8	5
		Onda diária (seg.)	0,33	0,08	0,04	0,02	0,01
	Alkathene	Escala dos tempos	$\frac{1}{1.280}$	$\frac{1}{5.120}$	$\frac{1}{11.500}$	$\frac{1}{20.500}$	$\frac{1}{32.000}$
		Onda anual (seg.)	24.600	6.150	2.740	1.540	985
		Onda diária (seg.)	67,50	16,90	7,50	4,22	2,70
	Perspex	Escala dos tempos	$\frac{1}{1.100}$	$\frac{1}{4.450}$	$\frac{1}{10.000}$	$\frac{1}{17.800}$	$\frac{1}{27.800}$
		Onda anual (seg.)	28.400	7.090	3.150	1.770	1.130
		Onda diária (seg.)	77,80	19,40	8,63	4,86	3,11
Micro-betão	Escala dos tempos	$\frac{1}{10.000}$	$\frac{1}{40.000}$	$\frac{1}{90.000}$	$\frac{1}{160.000}$	$\frac{1}{250.000}$	
	Onda anual (seg.)	3.150	788	350	197	126	
	Onda diária (seg.)	8,64	2,16	0,96	0,54	0,35	