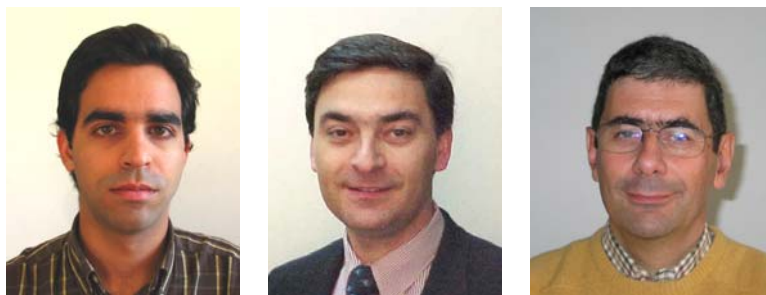


## CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DIFERIDO DO BETÃO DE BARRAGENS. APLICAÇÃO À BARRAGEM DE ALQUEVA

Serra, C.<sup>1</sup>, Batista, A.L.<sup>1</sup>, Tavares de Castro, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Observação



### RESUMO

*Descreve-se a metodologia de caracterização do comportamento diferido do betão de barragens a partir dos ensaios realizados "in situ" em células de fluência e apresentam-se os resultados relevantes do estudo de aplicação ao caso da barragem de Alqueva. Estas células, dispostas criteriosamente no corpo das barragens, são constituídas por provetes de betão integral e de betão crivado, idêntico ao que envolve a aparelhagem de observação. Considerando as deformações observadas nas células de fluência, em ensaios realizados "in situ", e a função de fluência básica de Bazant e Panulla, determinam-se os parâmetros das leis de fluência dos betões das diferentes células através de modelos de previsão e de regressão não linear. Os resultados dos ensaios foram ainda interpretados com um modelo tridimensional de elementos finitos das próprias células de fluência, analisado em regime viscoelástico, tendo-se obtido um bom ajuste com os valores observados das deformações. O estudo permitirá a generalização dos resultados obtidos nas células de fluência para o betão integral do corpo da obra.*

### 1- INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda a caracterização do comportamento diferido do betão de barragens, utilizando como caso de estudo a barragem de Alqueva, em particular os resultados de ensaios experimentais realizados "in situ" em células de fluência.

O trabalho foi organizado em duas partes. Em primeiro lugar, obtiveram-se os parâmetros das funções de fluência através de modelos de previsão considerando a composição e a resistência à compressão, e por métodos de regressão não linear, considerando os resultados de ensaios experi-

mentais, laboratoriais e "in situ" em células de fluência. Na segunda parte, partindo dos resultados obtidos na primeira, reproduziu-se o comportamento observado nos ensaios experimentais efectuados "in situ" recorrendo a modelos estruturais de elementos finitos, analisados em regime viscoelástico.

### 2- COMPORTAMENTO DIFERIDO DO BETÃO

#### 2.1 - Fenómeno físico da fluência

Considera-se que um material apresenta comportamento diferido caso se verifique o aumento da deformação no tempo

quando submetido a tensão. Designa-se por fluência a deformação diferida,  $\varepsilon^c$ , provocadas por uma tensão constante,  $\sigma$ , em condições de temperatura,  $T$ , constantes.

Os fenómenos físicos e químicos associados à fluência são complexos, tanto a nível microscópico como macroscópico, dado que o betão é um material compósito com maturação no tempo. Este tipo de comportamento parece estar relacionado com os mecanismos de difusão dos deslocamentos, a movimentação da água adsorvida na superfície do cimento hidratado, a deformação viscosa do cimento endurecido, o aumento da solubilidade dos sais que constituem o cimento sob a acção de uma pressão e o rearranjo da estrutura atómica à nanoescala (Coutinho 1974; Garcia 1995; Vandamme e Ulm 2009).

Os factores que influenciam a fluência são vários, podendo-se dividir em intrínsecos (inalteráveis após o endurecimento) e externos (podem alterar-se após o endurecimento). De entre os primeiros, devem referir-se as propriedades dos constituintes, a proporção da mistura e as condições de fabrico do betão. Os factores externos são, entre outros, a idade de aplicação da carga, a forma e dimensões da peça, as condições ambientais (humidade e temperatura) e a intensidade e tipo de tensão aplicada (Pinho 1989).

## 2.2 - Deformação de fluência

Procedendo à decomposição das extensões totais,  $\varepsilon(t, t_0)$ , originadas por uma determinada tensão,  $\sigma(t_0)$ , aplicada no instante  $t_0$  e mantida constante até ao instante  $t$ , podem considerar-se duas parcelas distintas, a deformação instantânea,  $\varepsilon^i(t_0)$ , e a deformação de fluência,  $\varepsilon^c(t, t_0)$ , a que se adicionará uma eventual deformação imposta (retracção/expansão),  $\varepsilon^s(t)$ ,

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon^i(t_0) + \varepsilon^c(t, t_0) + \varepsilon^s(t) \quad (1)$$

Uma vez que as deformações instantânea e de fluência dependem da tensão aplicada, pode escrever-se:

$$J(t, t_0) \sigma(t_0) = \varepsilon^i(t_0) + \varepsilon^c(t, t_0) \quad (2)$$

logo,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \varepsilon^f(t, t_0) \quad (3)$$

$$\varepsilon^f(t, t_0) = \frac{\varepsilon^c(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (4)$$

onde  $J(t, t_0)$  representa a função de fluência, ou seja, a função que representa a evolução das deformações de fluência ao longo do tempo, sendo  $E(t_0)$  o módulo de elasticidade à data da aplicação da carga,  $t_0$ .

Em análise de estruturas é comum, no entanto, representar as deformações de fluência em função das extensões instantâneas, elásticas, através do coeficiente de fluência,  $\varphi(t, t_0)$ ,

$$\varepsilon^f(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \times \varphi(t, t_0) = \varepsilon^i(t_0) \times \varphi(t, t_0) \quad (5)$$

## 3- CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DIFERIDA DO BETÃO DE BARRAGENS

### 3.1 - Determinação experimental das deformações de fluência

Em barragens de betão convencional, o betão integral do corpo das obras é fabricado, em regra, com dosagem baixa de cimento (máximo de 150 a 200 kg/m<sup>3</sup>) e agregados de dimensão máxima da ordem de 150 mm, resultando assim um betão com características substancialmente diferentes daqueles que são utilizados em outras obras de engenharia civil, nomeadamente edifícios e pontes.

Dado não ser possível envolver a generalidade dos dispositivos de observação por betão integral, atendendo à grande dimensão dos agregados, e também devido às dificuldades associadas à moldagem, transporte e ensaio de provetes de grandes dimensões que possam ser representativos das propriedades do betão integral, considera-se, em regra, o betão crivado, que é obtido do integral por crivagem, em fresco, utilizando o peneiro #38 mm ou o peneiro #75 mm.

A caracterização da deformabilidade do betão crivado, "in situ" e em laborató-

rio, fornece informação sobre a envolvente dos dispositivos embebidos (termómetros, medidores dos movimentos de juntas, extensómetros e tensómetros), permitindo, no caso dos extensómetros e dos tensómetros, a transformação directa entre tensões e extensões. Permite ainda o estabelecimento de uma ligação para a interpretação do comportamento da obra, construída com betão integral, a partir dos resultados obtidos nas células de fluência (betões integral e crivado) e em ensaios laboratoriais (em geral, com betão crivado).

Nestas condições, a correcta determinação da deformabilidade do betão integral é um elemento chave na avaliação do comportamento ao longo do tempo de barragens, quer seja para calibrar modelos de previsão baseados em deslocamentos observados (Ramos 1985), mas também na interpretação desse comportamento através de modelos matemáticos. A caracterização "in situ" da deformabilidade deste tipo de betão passa pela instalação de células de fluência de betão integral, permitindo conhecer a evolução do módulo de elasticidade e determinar directamente as deformações de fluência desse betão.

A instalação "in situ" de tais dispositivos de observação, e a posterior análise dos resultados, requer o conhecimento de um maior número de elementos do que a generalidade da aparelhagem colocada em obra. A complexidade da determinação da deformabilidade diferida do betão envolve um conjunto de variáveis que devem ser controladas durante a realização dos ensaios nas células de fluência, pelo que devem ser tidas em consideração na colocação destes equipamentos.

O planeamento e as condições de execução revestem-se de uma importância fundamental no sucesso dos ensaios. Relativo a cada ensaio de fluência "in situ", é necessária, como informação base, o conhecimento da composição do betão e da resistência à compressão. O conhecimento dos módulos de elasticidade instantâneos em diversas idades, obtidas através de ensaios laboratoriais para o betão colocado nas células, permite um melhor controlo dos ensaios "in situ" e fornece infor-

mação complementar na interpretação dos resultados.

As células de fluência são constituídas por um cilindro de betão inserido no corpo da barragem, de modo a ficar submetido às mesmas variações termohigrométricas, mas isolado do seu campo de tensões, através de um balde de parede dupla. Uma célula (activa) encontra-se sujeita a uma tensão controlada ao longo do tempo e contém, embebido no seu interior, um extensómetro de resistência eléctrica (Carlson) que mede as variações de extensão sofridas ao longo do tempo,  $\varepsilon^{totais}(t, t_0)$ . No mesmo local, outra célula (corrector) tem deformação livre, permitindo registar as extensões devidas a fenómenos independentes da tensão,  $\varepsilon^{autog}(t)$ , designadas por variações autógenas de volume.

A extensão específica é obtida através da eliminação dos efeitos das variações autógenas e posterior divisão pela tensão aplicada,

$$\varepsilon^{esp}(t, t_0) = \frac{\varepsilon^{totais}(t, t_0) - \varepsilon^{autog}(t)}{\sigma(t_0)} \quad (6)$$

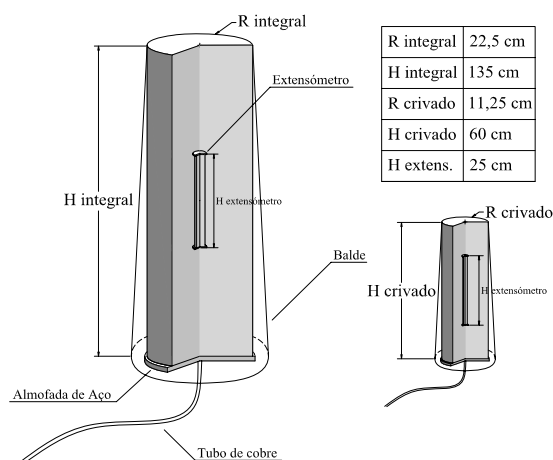


Fig. 1 – Representação esquemática das células de fluência activa de betão integral e crivado.

Caso a tensão aplicada na célula activa seja constante no tempo, as extensões específicas,  $\varepsilon^{esp}(t, t_0)$ , são equivalentes às extensões de fluência,  $\varepsilon^f(t, t_0)$ .

O sistema de carga associado a cada célula activa consiste num circuito fechado que regula a pressão aplicada sob a base do cilindro através de uma almofada de aço ligada a um tubo acessível do exterior. A pressão pode ser mantida constante através da regulação da pressão de uma mistura de

óleo hidráulico e de azoto que se encontra armazenada num recipiente colocado num nicho próximo da célula e ligado à almofada de aço por intermédio de tubos de cobre. O sistema permite introduzir variações de pressão suficientemente rápidas para efectuar ensaios de módulo de elasticidade. Nos ensaios de longa duração é mantida uma pressão constante, sendo possível, em qualquer instante, realizar a compensação de eventuais perdas de carga.



Fig. 2 – Dispositivos aparentes do sistema de carga das células de fluência

### 3.2 - Modelos de previsão

Os modelos de previsão de fluência permitem fazer uma primeira estimativa das deformações ao longo do tempo, com base nas características do betão. Estes modelos são muito úteis na fase de projecto e quando não se dispõe de resultados de ensaios específicos. No entanto, em estruturas importantes, como é o caso das grandes barragens, requer-se a realização, em fase de obra, de ensaios específicos, para obtenção das propriedades dos betões aplicados, apesar dos elevados custos directos e diferidos (Farinha 2003).

Os modelos de previsão estão associados a funções com determinadas características, que são escolhidas de forma a traduzirem o fenómeno físico. Os parâmetros destas funções, em regra calculados a partir de propriedades conhecidas do material, e, quando disponíveis, ajustados aos resultados de ensaios experimentais, permitem obter os valores das deformações de fluência dentro de determinadas hipóteses.

Resultante da investigação levada a cabo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) nesta área, desde a década de 80 do século passado (Silveira et al. 1981, Ramos 1985 e Pinho 1989), conside-

ra-se que o modelo de previsão proposto por Bažant e Panulla (BaP) entre 1975 e 1979 (Bažant e Osman 1976 e Bažant 1976) designado por *Double Power Law*, corresponde ao que melhor se ajusta aos resultados experimentais do betão das barragens portuguesas.

No modelo BaP, a função de fluência  $J(t, t_0)$  é dada pela expressão,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha) (t - t_0)^n \quad (7)$$

onde  $E_0$ ,  $\varphi_1$ ,  $m$ ,  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros dependentes das características intrínsecas do betão.

A previsão do valor do módulo de elasticidade ao longo do tempo pode ser obtida considerando o tempo sob carga,  $t - t_0$ , igual a 0,1 dias,

$$\frac{1}{E(t_0)} = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} 10^{-n} (t_0^{-m} + \alpha) \quad (8)$$

Os parâmetros desta lei podem ser determinados por dois métodos. O primeiro permite o cálculo desses parâmetros a partir da resistência à compressão aos 28 dias,  $f_{c,28}$  (em MPa) e da composição do betão,

$$\varphi_1 = \frac{10^{3n}}{2(28^{-m}) + \alpha} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{40 w/c} \quad (10)$$

$$m = 0,28 + 47,541 f_{c,28}^{-2} \quad (11)$$

$$n = \begin{cases} 0,12 + \frac{0,07x^6}{5130 + x^6} & \text{se } x > 0 \\ 0,12 & \text{se } x \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$x = \left[ 2,1 \frac{a/c}{(s/c)^{1,4}} + 5,523 \times 10^{-3} f_{c,28}^{1,5} \left( \frac{w}{c} \right)^{1/3} \left( \frac{a}{g} \right)^{2,2} \right] a_1 - 4 \quad (13)$$

$$a_1 = \begin{cases} 1,0 - \text{cimento tipo I ou II (comum)} \\ 0,93 - \text{cimento tipo III (rápido endurecimento)} \\ 1,05 - \text{cimento tipo IV (baixo calor de hidratação)} \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{1}{E_0} = 0,01305 + \frac{0,0853}{z_1^2} \quad (15)$$

$$z_1 = 2,823 \times 10^{-8} \rho^2 f_{c,28} \quad (16)$$

onde  $w$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $s$  e  $g$  são, respectivamente, as dosagens de água de amassadura, de cimento, de agregados, de areia e de brita, e  $\rho$  corresponde à massa volúmica em  $\text{kg/m}^3$ .

O segundo método (Neville et al. 1983) considera apenas como característica intrínseca do material o valor  $f_{c,28}$  (em MPa),

$$\varphi_1 = 0,3 + 152,2 f_{c,28}^{-1,2} \quad (17)$$

$$\alpha = 0,05 \quad (18)$$

$$m = 0,28 + 47,541 f_{c,28}^{-2} \quad (19)$$

$$n = 0,115 + 0,183 (f_{c,28})^{3,4} \times 10^{-6} \quad (20)$$

$$E_0 = 0,0145 + 3,447 f_{c,28}^{-2} \quad (21)$$

### 3.3 - Modelos de regressão não linear

Dispondo de um conjunto de resultados de ensaios experimentais, os modelos de regressão não linear permitem relacionar uma série de respostas,  $y_i$ , com os previsores,  $\beta_k$ , através de uma função pré-definida,  $f(\beta_k, x_i)$ , por forma a que a soma do quadrado dos resíduos,  $\varepsilon_i$ , seja minimizada. Neste caso particular pode escrever-se,

$$y_i = f(x_i, \beta_k) + \varepsilon_i \equiv J_i(t_i, t_0) + \varepsilon_i \quad (22)$$

$$J_i(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha) (t_i - t_0)^n + \varepsilon_i \quad (23)$$

onde  $x_i \equiv t_i$ ,  $\beta_k$  são os parâmetros a determinar e  $t_0$  é uma constante do modelo para os resultados experimentais a ajustar. O índice  $i$  varia entre 1 e o número de resultados válidos disponíveis, se possível, igualmente espaçados em escala logarítmica.

Resumidamente, a regressão não linear consiste em escrever a função  $f(\beta_k, x_i)$  sob a forma de uma série de Taylor truncada no primeiro termo, ou seja, linearizar o problema. Nestes casos é necessária uma estimativa dos parâmetros  $\beta_k$  e  $\beta_k^0$  para inicializar o processo iterativo de convergência,

$$y_i - f_i^0 \approx \sum_{k=1}^p \Delta_k^0 Z_{ki}^0 \quad (24)$$

$$Z_{ki}^0 = \left. \frac{\partial f(x_i, \beta_k)}{\partial \beta_k} \right|_{\beta_k = \beta_k^0} \quad (25)$$

$$\Delta_k^0 = \beta_k - \beta_k^0 \quad (26)$$

De seguida, ao aplicar o método dos mínimos quadrados ao gradiente de  $f(\beta_k, x_i)$ ,  $Z_{ki}$ , para  $\beta_k = \beta_k^0$ , obtém-se uma estimativa para  $\Delta_k^j$ ,  $\hat{\Delta}_k^j$  ( $j$  corresponde ao número de iterações),

$$\hat{\Delta}_k^j = \left( Z_{ki}^{jT} Z_{ki}^j \right)^{-1} Z_{ki}^{jT} (y_i - f_i^j) \quad (27)$$

$$\beta_k^{j+1} = \beta_k^j + \hat{\Delta}_k^j \quad (28)$$

O processo iterativo considera-se terminado quando o critério de convergência é verificado,

$$\frac{|\beta_k^{j+1} - \beta_k^j|}{\beta_k^j} < \delta \quad (29)$$

Em regra considera-se para  $\delta$  o valor  $1 \times 10^{-5}$ .

## 4- CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DO BETÃO DA BARRAGEM DE ALQUEVA

### 4.1 - Descrição sumária da obra

A barragem de Alqueva está implantada no rio Guadiana, criando uma albufeira de cerca de 4150 milhões de metros cúbicos de água (EDP 1988).



Fig. 3 – Vista geral da barragem de Alqueva

A barragem, constituída por uma abóbada espessa de dupla curvatura e dois encontros artificiais, tem uma altura máxima de 96 m acima da fundação e um desenvolvimento de 348 m ao nível do coroamento (cota 154,0 m) (EDP 1988).

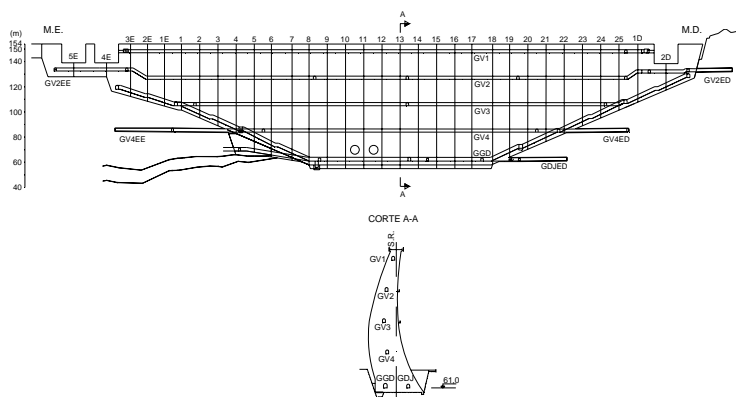


Fig. 4 – Barragem de Alqueva. Alçado de montante e corte pela consola central

A construção da obra teve início em finais de 1997, com a execução das escavações. O corpo da barragem foi betonado entre Maio de 1998 e Dezembro de 2001. O primeiro enchimento iniciou-se em Fevereiro de 2002, mas o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 152,00 m, só foi atingido em Janeiro de 2010.

## 4.2 - Betão da barragem

O betão integral do corpo da barragem é, na sua maioria, da classe de resistência, C12/15. Este betão dominante tem, em média, uma dosagem de cimento de 160 kg/m<sup>3</sup> e uma relação água-cimento de 0,5. As proporções médias do betão integral e crivado das células de fluência são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição média do betão das células de fluência

Componente	Betão integral (kg/m <sup>3</sup> )	Betão crivado (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 75/150	604	0
Brita 38/75	414	0
Brita 19/38	292	464
Brita 10/19	205	326
Brita 5/10	149	237
Areia 2,5/5	186	296
Areia 0/2,5	480	765
Cimento IV-32,5	160	244
Cinza	42	64
Água	76	120
Plast. BV 40	0,89	1,42

## 4.3 - Análise dos resultados experimentais

### 4.3.1 Abordagem adoptada

Com o presente trabalho pretendeu-se seleccionar as metodologias de previsão, tipo de abordagem e dados de caracterização que melhor se adaptam aos resultados experimentais obtidos com o betão da barragem de Alqueva.

A estimativa dos parâmetros da função de fluência BaP baseou-se na composição e na resistência à compressão (**C**), e apenas na resistência à compressão (**S**). Considerando os valores de alguns destes parâmetros, fez-se um ajuste dos outros parâmetros, utilizando resultados experimentais, através de diferentes abordagens (**Ji-C** e **Ji-S**), tal como se apresenta na Tabela 2.

Tabela 2 – Abordagens adoptadas

Nome	Abordagem
C e S	Previsão BaP para $\alpha$ , $m$ , $n$ , $\phi_1$ e $E_0$
J1-C e J1-S	Previsão BaP para $\alpha$ , $m$ , $n$ , e $\phi_1$ . Regressão não linear para obtenção de $E_0$
J2L-C e J2L-S	Previsão BaP para $\alpha$ , $m$ , $n$ , e $\phi_1$ . $E_0$ obtido a partir dos módulos de elasticidade a várias idades em ensaios laboratoriais (28, 90 e 365 dias)
J2I-C e J2I-S	Previsão BaP para $\alpha$ , $m$ , $n$ , e $\phi_1$ . $E_0$ obtido a partir do módulo de elasticidade, à data de carregamento, em ensaios "in situ"

Em cada abordagem analisou-se a adaptação da previsão BaP e dos diferentes ajustes aos resultados obtidos nos ensaios, comparando-se ainda a influência da idade escolhida para a resistência e para o módulo de elasticidade (7, 28, 90 e 365 dias). A comparação entre as diversas hipóteses, feita através de grandezas adimensionais,  $\delta_J$  e  $\delta_E$ , permitiu identificar a abordagem mais adequada, independentemente da célula em questão,

$$\delta_J = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_{J,i}^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_i^2}} \quad (30)$$

$$\delta_E = \sqrt{\frac{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta_{E,j}^2}{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j^2}} \quad (31)$$

onde  $\Delta_{J,i}$  e  $\Delta_{E,j}$  são os desvios entre os valores teóricos e experimentais, respectivamente para  $J(t, t_0)$  e  $E(t_0)$ ,  $N$  corresponde ao número de observações de  $\varepsilon^{esp}(t, t_0)$  (equação (6)),  $M$  é igual ao número de ensaios disponíveis de módulo de elasticidade,  $E(t_0)$ ,  $J_i$  são os valores para os quais os desvios são calculados e  $E_j$  são os valores medidos do módulo de elasticidade em determinadas idades.

Com base nos valores  $\delta_J$  e  $\delta_E$  calculados para as células de fluência que apresentavam um comportamento regular ao longo do tempo foi possível identificar, em termos médios, a abordagem, os parâmetros de previsão e a idade de caracterização da resistência à compressão e do módulo de elasticidade que melhor se adequavam aos valores observados.

#### 4.3.2 Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios foram organizados em função do tipo de betão e do tipo de medição das extensões de fluência. Como descrito anteriormente, a caracterização "in situ" incide sobre células de fluência de betão crivado e betão integral, originando duas séries de resultados distintos. Por outro lado, em paralelo com a caracterização "in situ", os resultados dos ensaios de laboratório, para determinação das extensões de fluência, permitem a avaliação conjunta de resultados, em condições termo-higrométricas controladas, para o betão crivado.

A previsão do modelo BaP depende de características que são, em regra, conhecidas, dando satisfação aos requisitos dos cadernos de encargos da construção e ao estabelecido no plano de observação. A deformabilidade e a resistência à compressão são obtidas para diferentes idades, permitindo avaliar a maturação do betão.

A caracterização da deformabilidade do betão de cada uma das células de fluência da barragem de Alqueva comportou os seguintes provetes e ensaios:

- 6 cubos de 20 cm de lado para determinação da resistência à compressão do betão crivado, no âmbito do controlo de qualidade do betão realizado em obra (28, 90 e 365 dias) (LNEC 1968);
- 8 cubos de 20 cm de lado para determinação, pelo LNEC, da resistência à compressão do betão crivado (7, 28, 90 e 365 dias) (LNEC 1968);
- 3 prismas com  $20 \times 20 \times 60$  cm para determinação das extensões de fluência do betão crivado, em laboratório do LNEC;
- 3 prismas com  $20 \times 20 \times 60$  cm para determinação do módulo de elasticidade do betão crivado, em laboratório do LNEC (28, 90 e 365 dias) (LNEC 1993);
- Ensaios de módulo de elasticidade "in situ" para cada célula (à data do primeiro carregamento,  $t_0$ , para o betão integral e crivado)<sup>1</sup>.

Uma vez que a previsão BaP recorre ao valor da resistência à compressão em cilindros é necessário converter a resistência obtida em cubos para resistência em cilindros.

A optimização das expressões empíricas da formulação BaP foi realizada para valores de resistência aos 28 dias. No entanto, devido às características particulares de composição do betão de barragens e às condições ambientais específicas, o processo de endurecimento do betão é mais lento, levando a um comportamento ao longo do tempo distinto das estruturas correntes. Assim, foi efectuado, para cada uma das abordagens referidas, um estudo de sensibilidade para a avaliação da idade de caracterização da resistência do betão e

---

<sup>1</sup> Segundo (LNEC 1981), é necessário considerar um acréscimo de 3% a 4% nos valores dos módulos de elasticidade determinados nos ensaios rápidos das células de fluência.

do módulo de elasticidade que melhor se ajustam à formulação BaP. As variáveis envolvidas neste estudo foram:

- a célula em análise: CF1 a CF13;
- o tipo de betão utilizado em cada ensaio: betão integral (I) e crivado pelo peneiro #38 mm (C);
- a idade de caracterização da resistência à compressão do betão ( $f_{c,7}$ ,  $f_{c,28}$ ,  $f_{c,90}$ ,  $f_{c,365}$ );
- a idade de caracterização do módulo de elasticidade ( $E_{c,28}$ ,  $E_{c,90}$ ,  $E_{c,365}$ );
- o tipo de ensaio de módulo de elasticidade ("in situ" e laboratorial);
- o tipo de previsão: baseada na composição (C) e na resistência (S);
- o tipo de abordagem: C, S, J1-C, J1-S, J2L-C, J2L-S, J2I-C, J2I-S;
- a medida comparativa:  $\delta_J$  e  $\delta_E$ .

#### 4.3.3 Apresentação de resultados

Nas figuras seguintes apresentam-se representações gráficas dos resultados relevantes em função do tipo de betão (integral e crivado), do tipo de ensaio, da idade de determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade

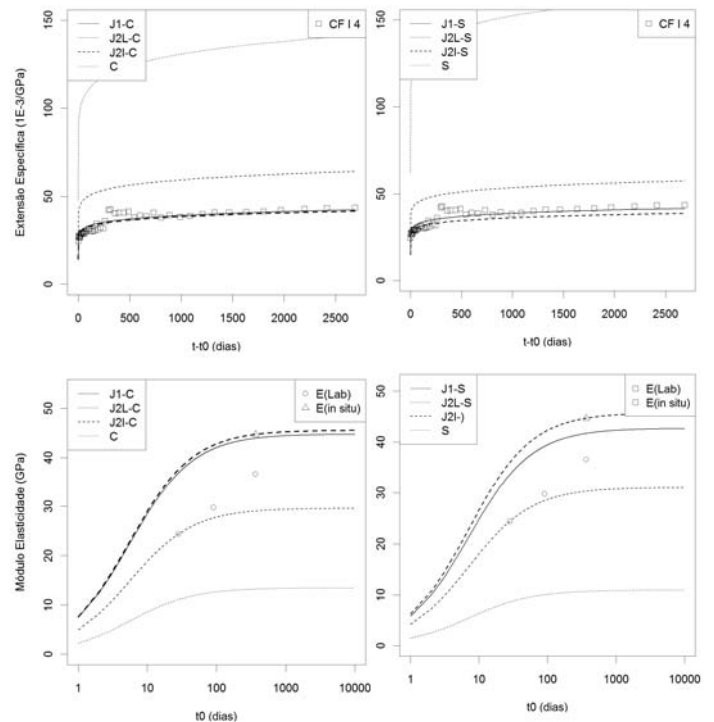


Fig. 5 – Resultados obtidos para a célula CF14, utilizando os parâmetros  $f_{c,7}$  e  $E_{c,28}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

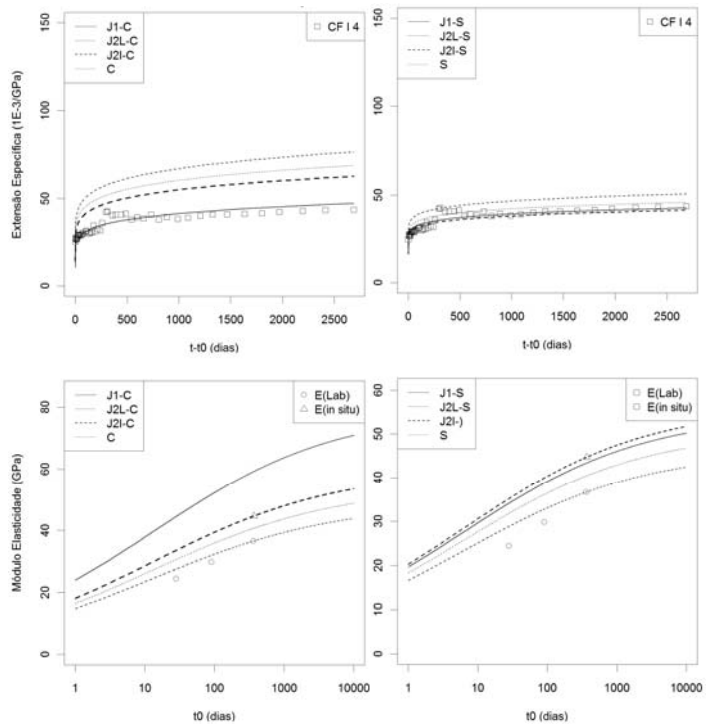


Fig. 6 – Resultados obtidos para a célula CF14, utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)



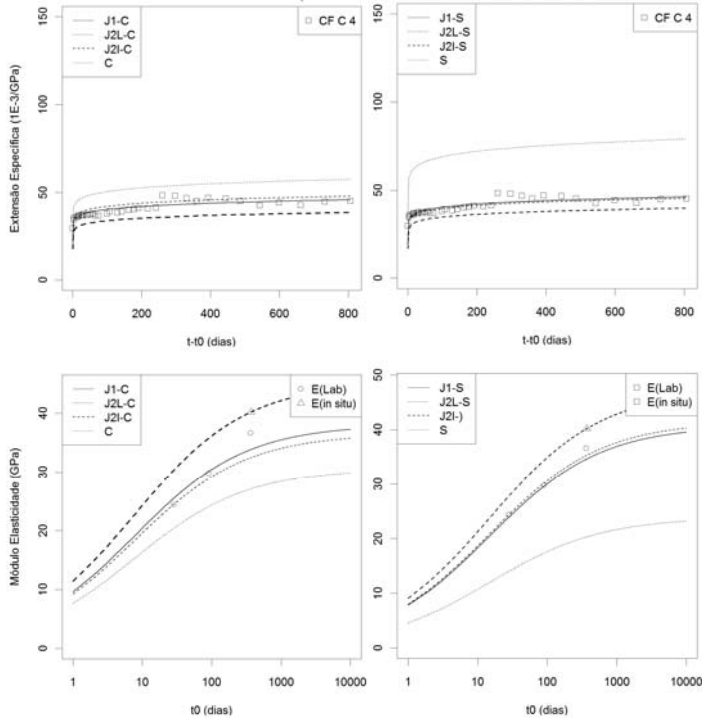


Fig. 7 – Resultados obtidos para a célula CFC4, utilizando os parâmetros  $f_{c,28}$  e  $E_{c,28}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

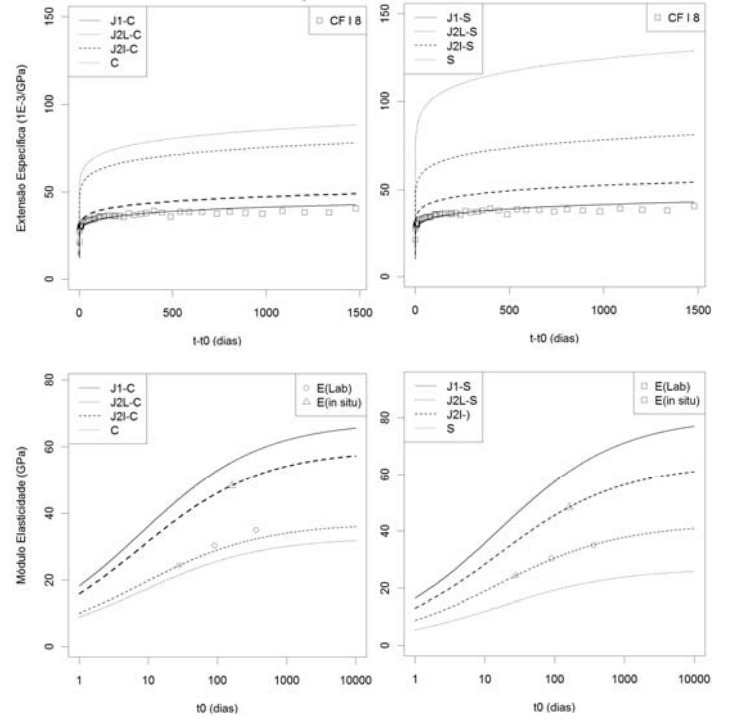


Fig. 9 – Resultados obtidos para a célula CFI8, utilizando os parâmetros  $f_{c,28}$  e  $E_{c,28}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

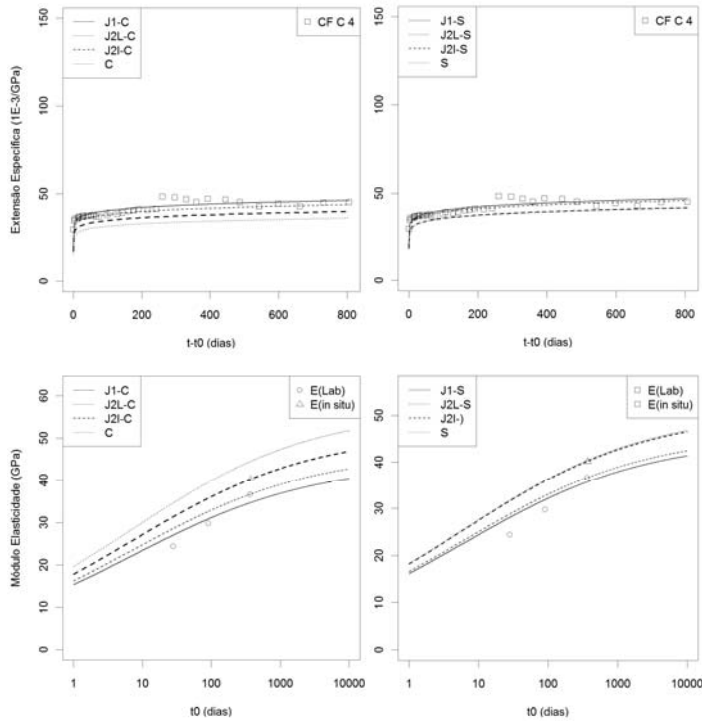


Fig. 8 – Resultados obtidos para a célula CFC4, utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

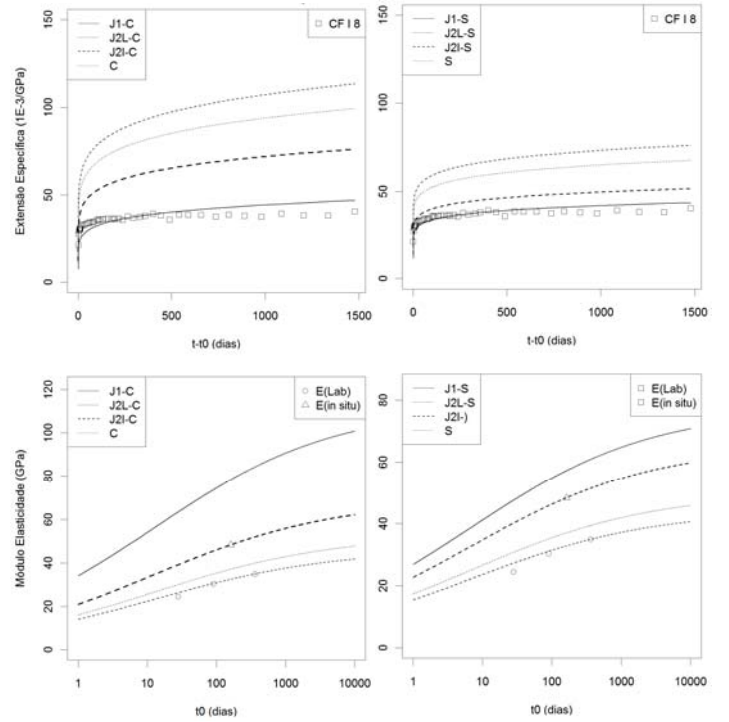


Fig. 10 – Resultados obtidos para a célula CFI8, utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

## Caracterização do comportamento diferido do betão de barragens. Aplicação à barragem de Alqueva

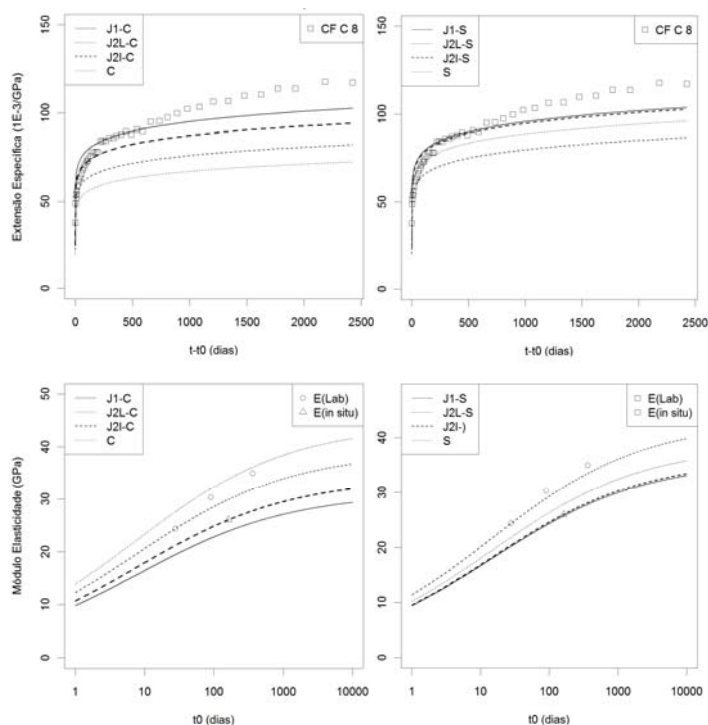


Fig. 11 – Resultados obtidos para a célula CFC8, utilizando os parâmetros  $f_{c,90}$  e  $E_{c,28}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

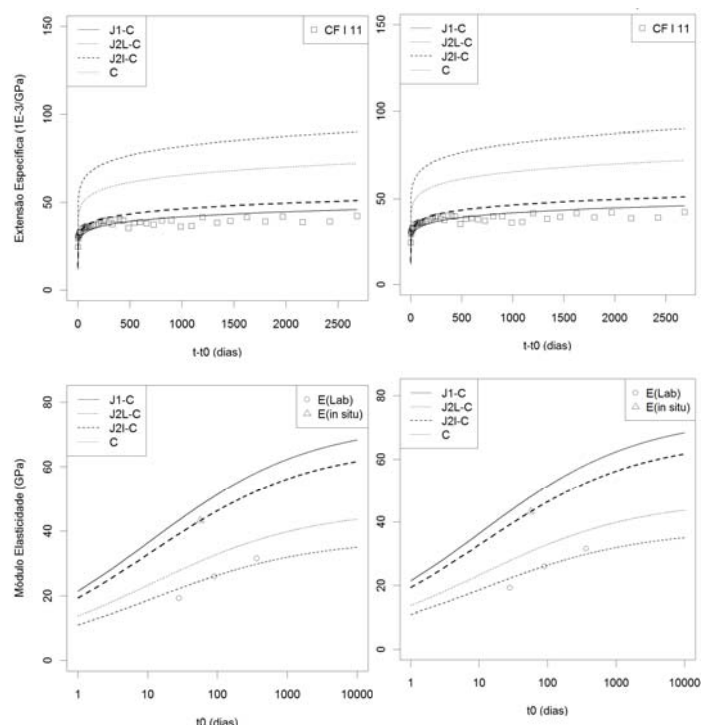


Fig. 13 – Resultados obtidos para a célula CFI11, utilizando os parâmetros  $f_{c,90}$  e  $E_{c,90}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

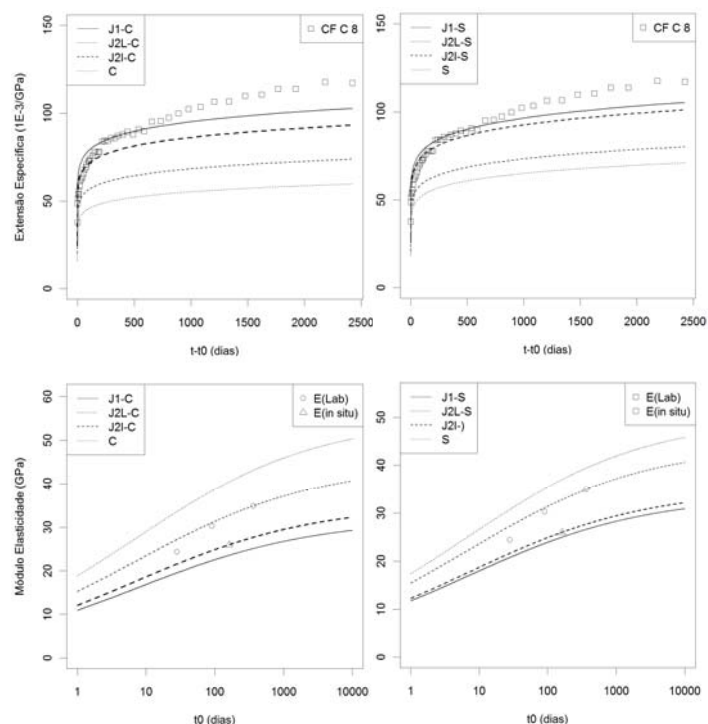


Fig. 12 – Resultados obtidos para a célula CFC8, utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

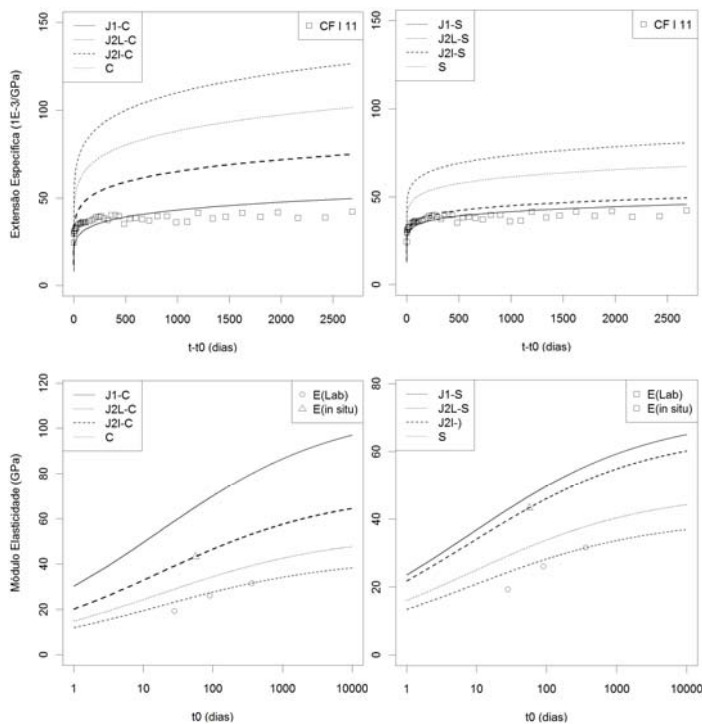


Fig. 14 – Resultados obtidos para a célula CFI11, utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

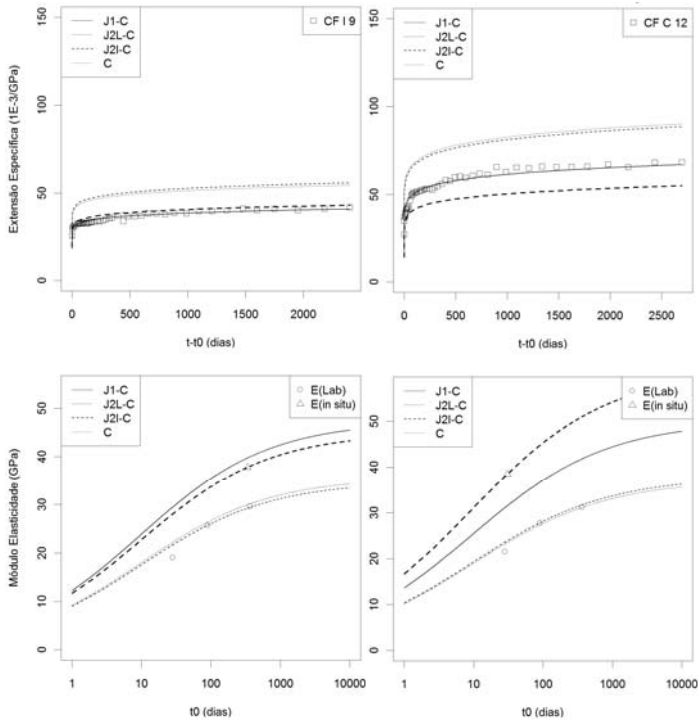


Fig. 15 – Resultados obtidos para a célula CFC11, utilizando os parâmetros  $f_{c,90}$  e  $E_{c,90}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

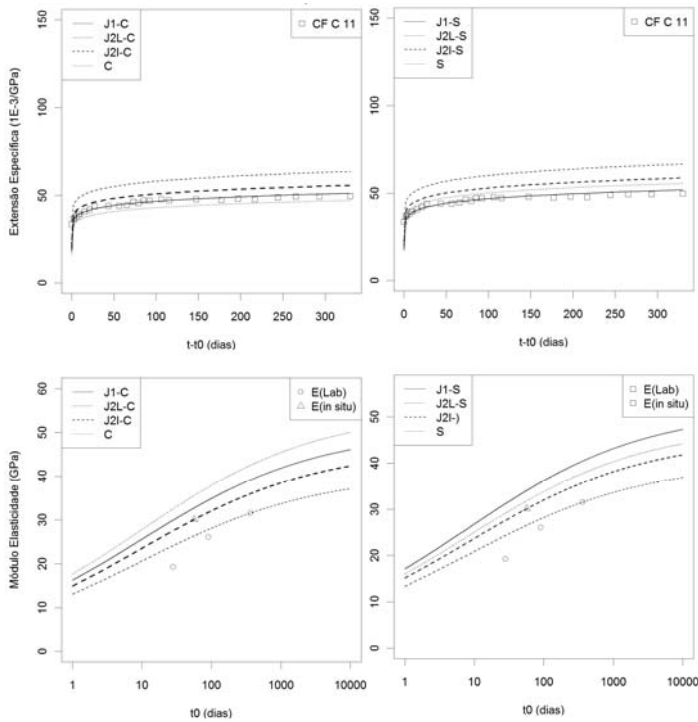


Fig. 16 – Resultados obtidos para a célula CFC11 utilizando os parâmetros  $f_{c,365}$  e  $E_{c,365}$  – BaP baseada na composição (esq.) e na resistência (dir.)

Conclui-se que os valores de  $E_0$  obtidos por regressão não linear (J1-C e J1-S) correspondem aos valores de  $\delta_J$  mais baixos, devido ao melhor ajuste aos valores

observados. Desta forma, os desvios relativos a cada abordagem ( $\delta_J(J2L-C)$ ,  $\delta_J(J2L-S)$ ,  $\delta_J(J2I-C)$ ,  $\delta_J(J2I-S)$ ,  $\delta_J(C)$  e  $\delta_J(S)$ ) foram obtidos em relação ao ajuste por regressão não linear de  $E_0$  ( $J_i(J1-C)$  e  $J_i(J1-S)$ ), de modo a obter uma comparação mais fiel entre abordagens.

Por outro lado, os valores de  $\delta_E$  de cada abordagem foram calculados em relação aos resultados dos ensaios laboratoriais de determinação do módulo de elasticidade.

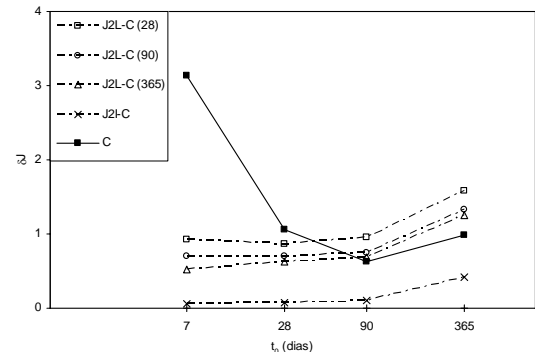


Fig. 17 – Valores dos desvios  $\delta_J(Ji)$  médios calculados para o betão integral das células de fluência das três abordagens, J2L-C, J2I-C e C, relativamente à abordagem J1-C

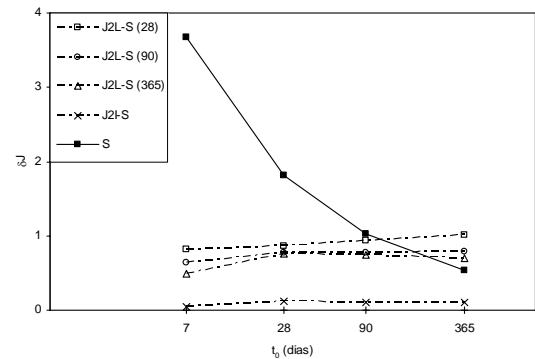


Fig. 18 – Valores dos desvios  $\delta_J(Ji)$  médios calculados para o betão integral das células de fluência das três abordagens, J2L-S, J2I-S e S, relativamente à abordagem J1-S

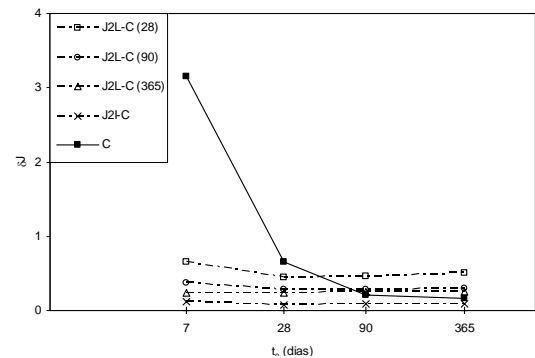


Fig. 19 – Valores dos desvios  $\delta_J(Ji)$  médios calculados para o betão crivado das células de fluência das três abordagens, J2L-C, J2I-C e C, relativamente à abordagem J1-C

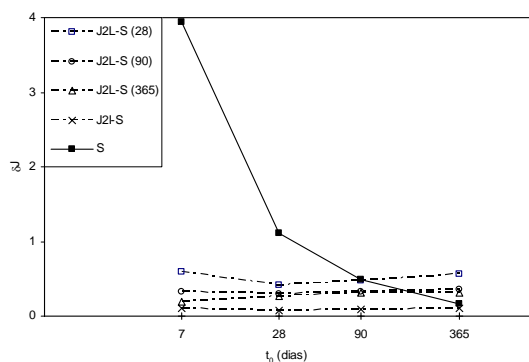


Fig. 20 – Valores dos desvios  $\delta_J(J_i)$  médios calculados para o betão crivado das células de fluência das três abordagens, J2L-S, J2I-S e S, relativamente à abordagem J1-S

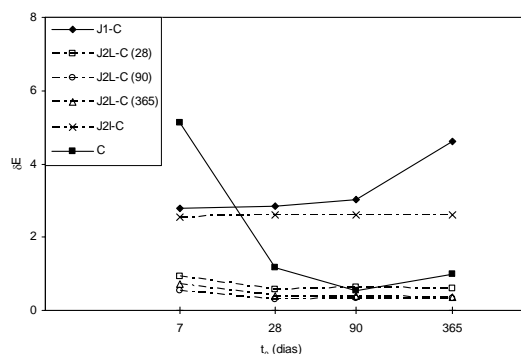


Fig. 21 – Valores dos desvios  $\delta_E(J_i)$  médios calculados para o betão integral das células de fluência das três abordagens, J2L-C, J2I-C e C, relativamente à abordagem J1-C

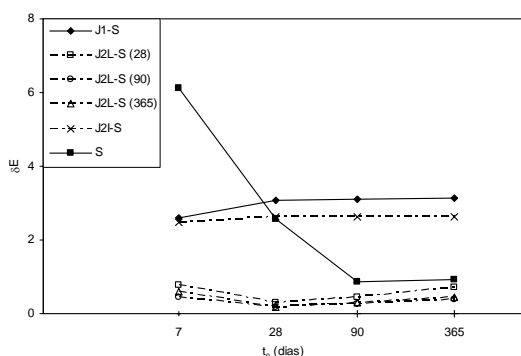


Fig. 22 – Valores dos desvios  $\delta_E(J_i)$  médios calculados para o betão integral das células de fluência das três abordagens, J2L-S, J2I-S e S, relativamente à abordagem J1-S

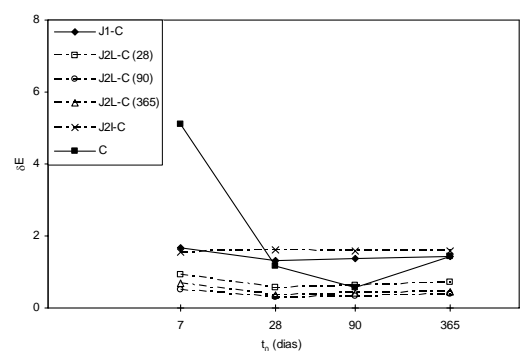


Fig. 23 – Valores dos desvios  $\delta_E(J_i)$  médios calculados para o betão crivado das células de fluência das três abordagens, J2L-C, J2I-C e C, relativamente à abordagem J1-C

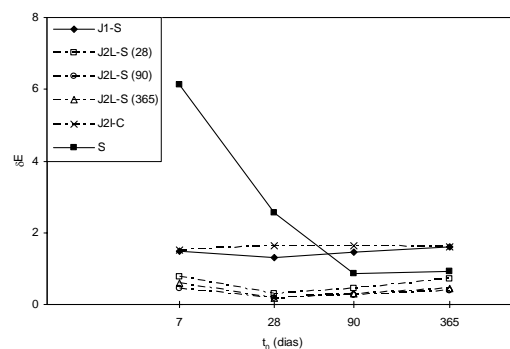


Fig. 24 – Valores dos desvios  $\delta_E(J_i)$  médios calculados para o betão crivado das células de fluência das três abordagens, J2L-S, J2I-S e S, relativamente à abordagem J1-S

A partir dos resultados apresentados é possível tirar algumas conclusões relativas à adaptação de cada abordagem aos valores observados das extensões de fluência:

- a estimativa dos valores das extensões específicas melhora consideravelmente caso se disponha de valores do módulo de elasticidade;
- o recurso aos valores de  $E_{c,365}$  (obtidos em laboratório, J2L-C (365)) e J2L-S (365)) resultam em previsões com desvios  $\delta_J$  mais baixos, apesar de existirem poucas diferenças comparativamente às outras idades de realização de ensaios em laboratório;
- o recurso aos valores de  $E_{c,t0}$  (obtidos "in situ") permite uma boa adaptação entre os valores de  $J(t,t_0)$  calculados e observados;
- as abordagens J2L e J2I quase não sofrem influência dos valores de resistência à compressão utilizados;
- nas abordagens C e S, a influência da resistência à compressão é mais evidente e os valores mínimos de  $\delta_J$  ocorrem, em geral, para valores de  $f_{c,365}$ ;

- as abordagens baseadas na composição apresentam, em geral, desvios superiores às aquelas que utilizam apenas a resistência à compressão.

Em relação aos desvios verificados entre os valores previstos e os determinados em laboratório para o módulo de elasticidade  $E(t)$  deve referir-se o seguinte:

- existem dificuldades em relacionar os resultados dos ensaios laboratoriais e "in situ". Os valores do módulo de elasticidade obtidos em laboratório apresentam algum desvio relativamente ao ajuste por regressão não linear, bem como ao ajuste J2I, recorrendo a  $E_{c,t0}$  ("in situ");
- estes desvios são mais evidentes para o betão integral, resultando em valores de  $\delta_E$ , em geral, superiores;
- tal como para a extensão específica, existe uma clara influência da resistência à compressão nas previsões C e S, comparativamente aos ajustes J2L e J2I. Neste caso, as idades de 90 e 365 dias apresentam os menores desvios.

Esta análise revela que, para o caso em estudo, existem abordagens mais adequadas, permitindo a determinação dos parâmetros que fornecem valores de extensão específica e módulo de elasticidade ao longo do tempo mais próximos dos observados.

Em relação à interpretação dos resultados do betão da barragem de Alqueva, os melhores resultados provêm da abordagem J2I, considerando a composição ou apenas a resistência. Esta abordagem recorre ao valor de módulo de elasticidade medido "in situ", à data de carregamento da célula em questão, para o cálculo do parâmetro  $E_0$ . Apesar da boa adaptação aos valores da extensão específica, parece existir um desfasamento entre a evolução do módulo de elasticidade obtido em laboratório e "in situ", explicado, em parte, pelas diferentes

condições em que são efectuados os ensaios.

No caso de se recorrer apenas à previsão original BaP, sem ajustamento a outros resultados experimentais, verifica-se uma melhor adaptação aos valores observados quando é utilizado como dado base o valor da resistência à compressão aos 365 dias de idade. Este facto relaciona-se com as características particulares do processo de endurecimento do betão de barragens. A lenta maturação, derivada de um baixo teor em cimento, leva a que os valores de referência da rigidez e da resistência sejam atingidos a idades muito tardias, em comparação com betões correntes. No entanto, verifica-se que a rigidez cresce mais rapidamente que a resistência.

## 5- INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DAS CÉLULAS DE FLUÊNCIA USANDO UM MODELO ESTRUTURAL

### 5.1 - Considerações gerais

A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados "in situ" nas células de fluência foi realizada através de modelação estrutural. Para este efeito foi elaborado um modelo tridimensional de elementos finitos que abrange não só a célula de fluência mas também parte da sua envolvente no corpo da barragem.

Em termos de acções foram consideradas as forças distribuídas correspondentes às cargas aplicadas pelo sistema hidráulico e as temperaturas observadas ao longo do tempo.

As propriedades do betão consideradas no modelo foram avaliadas através da formulação BaP apresentada anteriormente. Os parâmetros considerados na equação (7) foram os ajustados por regressão não linear, usando como previsor,  $\beta_k$ , o parâmetro  $E_0$ , sendo os restantes parâmetros,  $\varphi_1$ ,  $m$ ,  $n$  e  $\alpha$  obtidos através da previsão baseada apenas na resistência à compressão aos 365 dias de idade,  $f_{c,365}$  (J1-S).

As vantagens da utilização deste tipo de modelos para interpretar o comportamento da própria célula são: i) a possibili-



dade de validar a abordagem escolhida face aos resultados experimentais; ii) a consideração das acções específicas de cada célula; iii) a comparação de valores de extensão específica do modelo com valores de extensão específica observados, em detrimento das extensões de fluência, uma vez que o carregamento pode não ser constante ao longo do tempo; e iv) a validação dos valores observados e do próprio dispositivo de observação.

## 5.2 - Características dos modelos

Nos modelos foram considerados três grupos de células de fluência, nomeadamente as células CF4, CF8 e CF11 (Fig. 25).

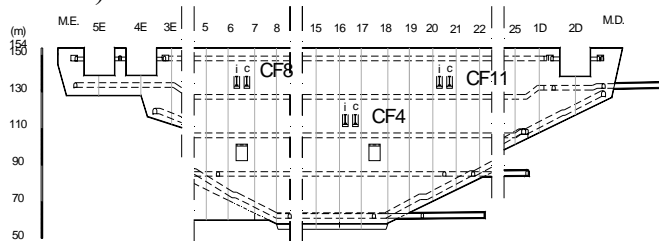


Fig. 25 – Localização dos grupos de células de fluência em análise no corpo da barragem

De forma a representar os sistemas de observação de cada célula, foram desenvolvidos quatro modelos distintos, para simular o tipo de betão, integral e crivado, e o tipo de célula, activa e correctora (Fig. 26).

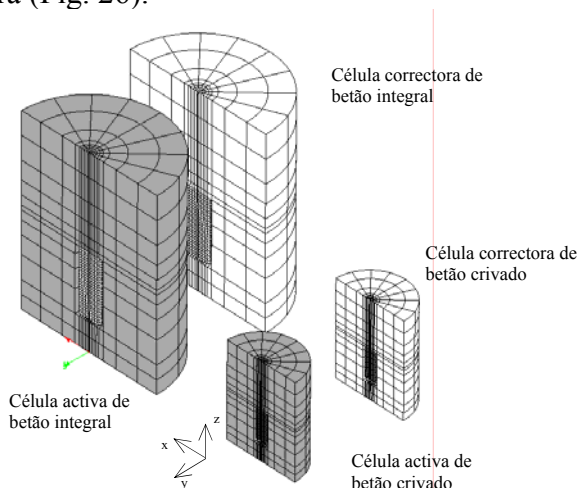


Fig. 26 – Modelos tridimensionais de elementos finitos das células de fluência e da sua envolvente.

Na modelação e interpretação do comportamento das células activa e correc-

tora foram consideradas as acções correspondentes às temperaturas observadas e às forças impostas pelo sistema de carga em cada intervalo de tempo. As extensões específicas de cada célula foram obtidas a partir dos valores calculados das deformações, de forma semelhante à utilizada no tratamento dos resultados dos ensaios “in situ” (equação 6).

A análise feita para cada grupo de células incidiu sobre o período decorrido desde o primeiro carregamento até à última data de observação disponível. A discretização das acções no tempo considerou intervalos mensais (Fig. 27 e Fig. 28).

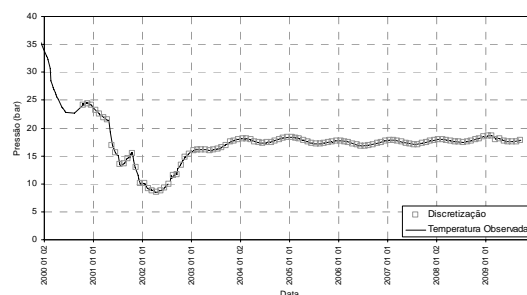


Fig. 27 – Discretização das temperaturas observadas na célula activa CF14

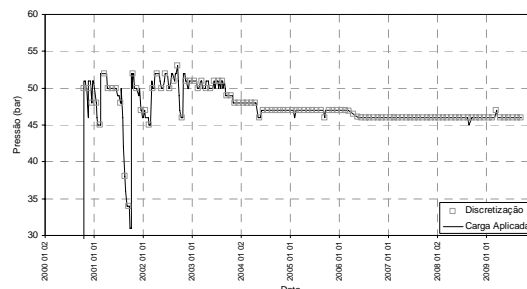


Fig. 28 – Discretização da pressão aplicada na célula activa CF14

Na análise dos modelos foram utilizados programas de cálculo automático desenvolvidos no Departamento de Barragens de Betão do LNEC (Batista 1998 e Oliveira 2000), que permitem, entre outras possibilidades, a consideração do comportamento viscoelástico linear com maturação do betão.

## 5.3 - Resultados

Nas Fig. 29 e Fig. 30 representam-se os deslocamentos ( $d_z$ ), as extensões ( $\epsilon_{zz}$ ) e as tensões ( $\sigma_{zz}$ ), na direcção z (vertical), calculados na célula CF14 em duas datas distintas.

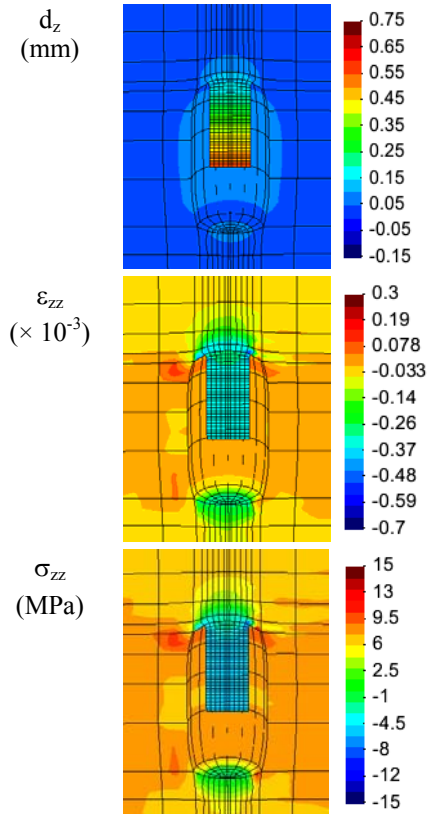


Fig. 29 – Resultados obtidos na análise estrutural do grupo CFI4, em 16/4/2002 ( $d_z$  (sup.),  $\varepsilon_{zz}$  (centro) e  $\sigma_{zz}$  (inf.))

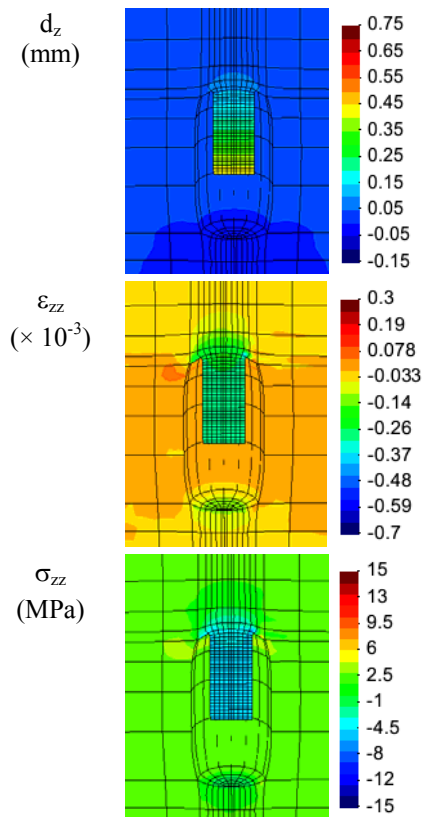


Fig. 30 – Resultados obtidos na análise estrutural do grupo CFI4, em 16/1/2007 ( $d_z$  (sup.),  $\varepsilon_{zz}$  (centro) e  $\sigma_{zz}$  (inf.))

De seguida faz-se a comparação das extensões de fluência teóricas, as extensões específicas calculadas e observadas "in situ", considerando o conjunto de acções referidas. Por outro lado, nos casos que se revelou necessário, foi efectuado um ajuste dos valores dos parâmetros da formulação BaP, de forma a que o comportamento global se aproximasse dos valores observados "in situ".

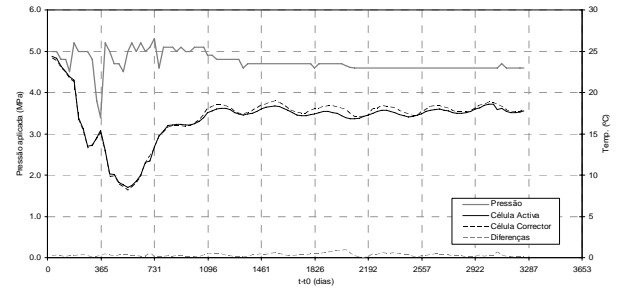


Fig. 31 – Evolução da pressão e temperatura na célula CFI4

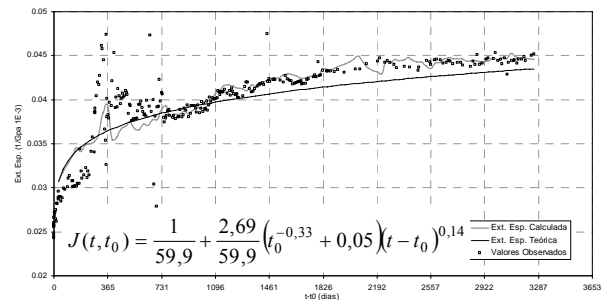


Fig. 32 – Comparação das extensões de fluência teóricas, calculadas e observadas "in situ" na célula CFI4

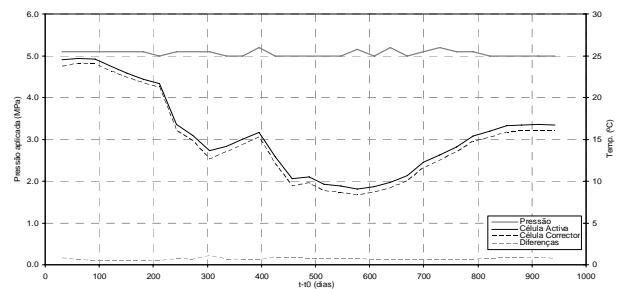


Fig. 33 – Evolução da pressão e temperatura na célula CFC4

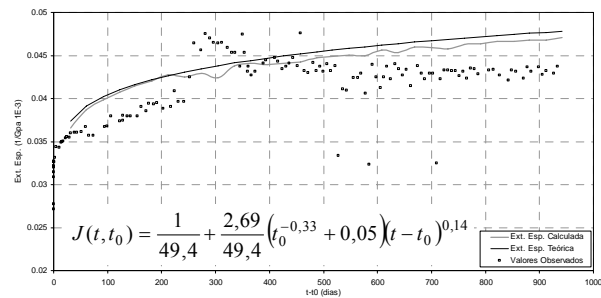


Fig. 34 – Comparação das extensões de fluência teóricas, calculadas e observadas "in situ" na célula CFC4

## Caracterização do comportamento diferido do betão de barragens. Aplicação à barragem de Alqueva

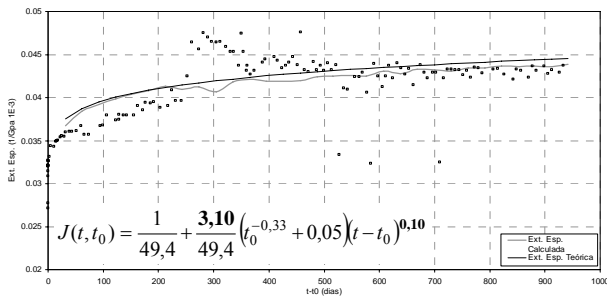


Fig. 35 – Comparação das extensões teóricas, calculadas e observadas após ajuste dos parâmetros da função de fluência da célula CFC4

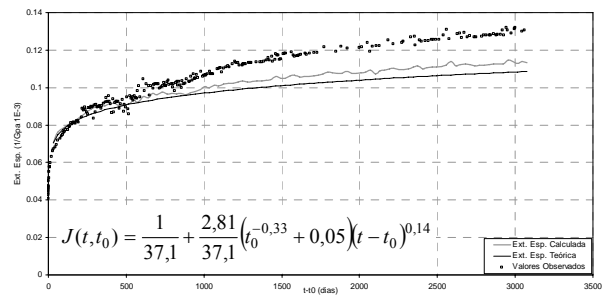


Fig. 40 – Comparação das extensões de fluência teóricas, calculadas e observadas "in situ" na célula CFC8

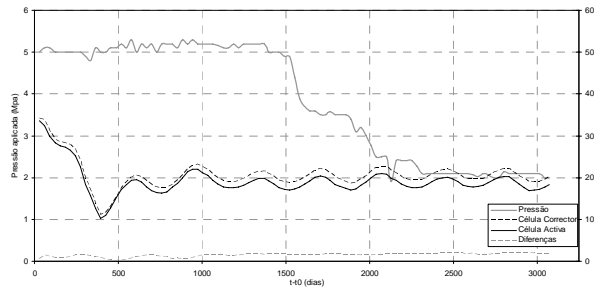


Fig. 36 – Evolução da pressão e temperatura na célula CFI8

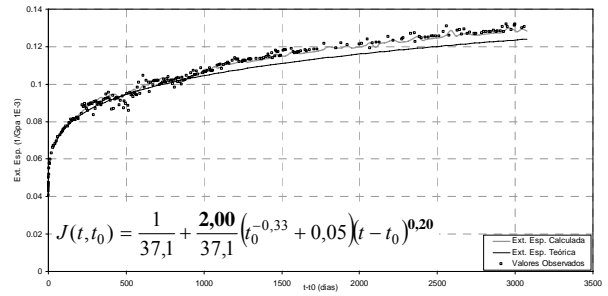


Fig. 41 – Comparação das extensões teóricas, calculadas e observadas após ajuste dos parâmetros da função de fluência da célula CFC8

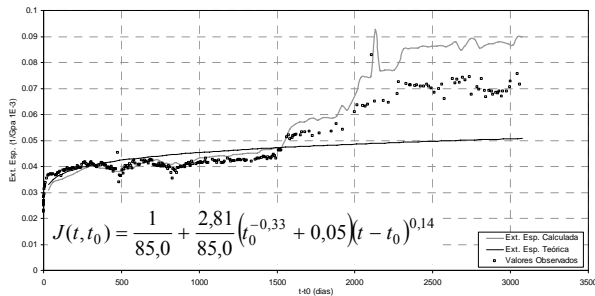


Fig. 37 – Comparação das extensões de fluência teóricas, calculadas e observadas "in situ" na célula CFI8

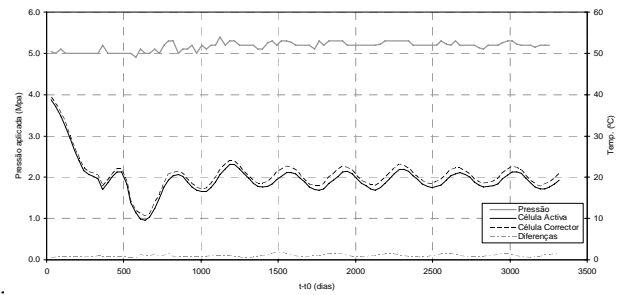


Fig. 42 – Evolução da pressão e temperatura na célula CFI11

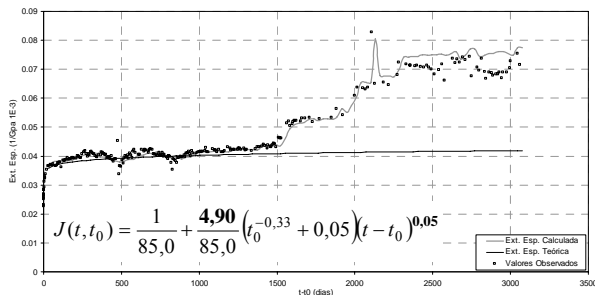


Fig. 38 – Comparação das extensões teóricas, calculadas e observadas após ajuste dos parâmetros da função de fluência da célula CFI8

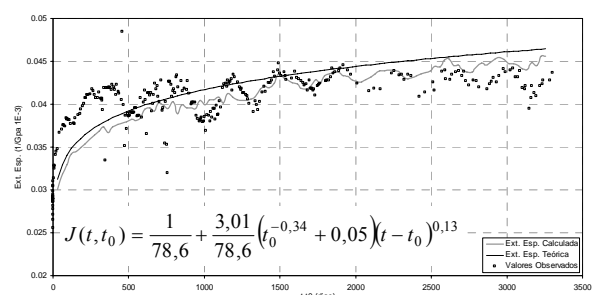


Fig. 43 – Comparação das extensões de fluência teóricas, calculadas e observadas "in situ" na célula CFI11

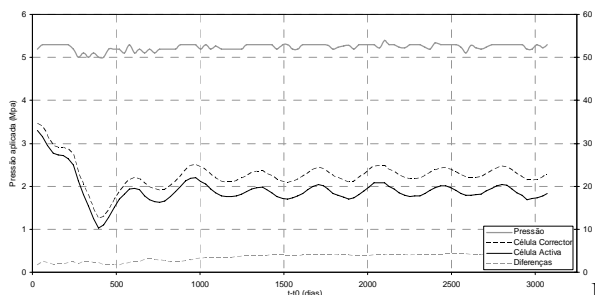


Fig. 39 – Evolução da pressão e temperatura na célula CFI8

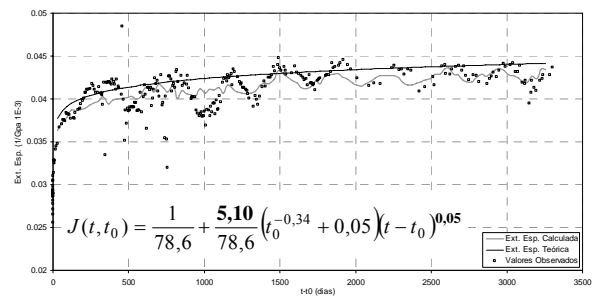


Fig. 44 – Comparação das extensões teóricas, calculadas e observadas após ajuste dos parâmetros da função de fluência da célula CFI11



O modelo numérico permitiu considerar as variações de pressão de óleo que efectivamente foram aplicadas ao longo do tempo. Por exemplo, para  $t-t_0 = 2107$  dias, na célula CFI8 (Fig. 36), registou-se uma depressão súbita, que resultou em valores de extensão específica observados anormais, mas cuja interpretação é validada através do modelo.

As diferenças de temperatura medidas entre as células activas e correctoras impossibilitaram a correcção rigorosa das extensões autógenas na célula activa, a partir das extensões observadas na célula correctora. No modelo de elementos finitos considerou-se essa diferença nas extensões específicas calculadas (Fig. 44).

A análise realizada permitiu uma melhor percepção da adequação das funções de fluência aferidas anteriormente, em particular para a regressão não linear, aos valores observados. Para algumas das células, a função de fluência teórica apresenta maiores desvios para idades avançadas, o que resulta em desvios significativos numa análise contínua (Fig. 37 e Fig. 40). De facto, a própria previsão BaP, no que diz respeito ao valor do parâmetro  $n$  (equações 12 e 20), induz uma taxa crescente das extensões de fluência a longo prazo. Na realidade, verifica-se que para algumas das células os incrementos de deformações diferidas, a partir de determinada idade, são muito pequenos (CFI8 e CFI11).

Recorrendo a estes resultados, foi efectuado um ajuste dos parâmetros obtidos com a regressão não linear, de forma a diminuir o declive da função  $J(t, t_0)$  para as idades mais avançadas. Assim, foi necessário variar o valor de  $n$  e, por sua vez, o valor de  $\phi_I$ , obtendo-se deste modo uma melhor adaptação aos valores observados. A nova função de fluência permitiu uma melhor interpretação do comportamento do betão da célula (Fig. 35, Fig. 38, Fig. 41 e Fig. 44).

## 6- CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma parte do estudo realizado sobre a deformabilidade do betão da barragem de Alqueva, tendo-se

efectuado a avaliação dos parâmetros da função de fluência básica de Bažant e Panulla que melhor se ajustam ao comportamento observado nos ensaios "in situ" das células de fluência, com vista à sua utilização na interpretação do comportamento global da barragem.

Concluiu-se que a resistência à compressão aos 365 dias constitui o parâmetro que melhor ajusta a função de fluência aos resultados observados, de acordo com a formulação BaP, baseada na resistência e na composição. Verificou-se também um bom ajuste da regressão não linear ao parâmetro  $E_0$  e a compatibilidade com os valores de previsão baseados na deformabilidade "in situ".

A interpretação dos resultados de cada célula através de um modelo estrutural permitiu ajustar as acções na própria célula, como as variações de carga e a correcção das deformações autógenas, que de outra forma seriam negligenciadas. O modelo numérico permitiu uma melhor interpretação dos resultados observados "in situ", uma vez que representou as condições efectivamente existentes nas células. Tornou ainda possível um reajuste dos parâmetros da função de fluência, representando melhor o comportamento diferido do betão de cada célula.

## 7- REFERÊNCIAS

- Batista, 1998. Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada, Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa.
- Bažant e Osman, 1976. Double power law for basic creep of concrete. *Materials and Structures (RILEM, Paris)*, 9(49), 3-11.
- Bažant, 1976. Practical formulation of shrinkage and creep of concrete. *Materials and Structures (RILEM, Paris)*, 9(54), 395-406.
- Coutinho, 1974. Fabrico e propriedades do betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- EDP, 1988. Escalão de Alqueva. Projecto, EDP, Porto
- Farinha, 2003. Extensões e tensões observadas em barragens de betão, Tese de Mestrado LNEC, Lisboa.

- Garcia, 1995. Retracção e fluência do betão observadas "in situ", Tese de Mestrado, Lisboa.
- LNEC, 1968. Especificação LNEC EN226, Lisboa: LNEC.
- LNEC, 1981. Deformabilidade do betão de barragens (Determinações laboratoriais e in situ), Relatório Preliminar, LNEC, Lisboa.
- LNEC, 1993. Especificação LNEC EN397, Lisboa: LNEC.
- Neville et al., 1983. Creep of plain and structural concrete, New York: Longman Inc.
- Oliveira, 2000. Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulação de dano, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Pinho, 1989. Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens, Tese de Especialista, LNEC, Lisboa.
- Ramos, 1985. Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens, Tese de Especialista, LNEC, Lisboa.
- Silveira et al., 1981. LNEC experience in the field of concrete dam observation and of in situ tests, Memória N.º 548, LNEC, Lisboa.
- Vandamme e Ulm, 2009. Nanogranular origin of concrete creep. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.