

Determinação da função de fluência do betão da barragem de Alqueva



Carlos Serra¹



António Lopes
Batista²



António Tavares
de Castro³

RESUMO

O betão de barragens apresenta características reológicas distintas dos betões utilizados em edifícios e pontes. Dependendo da importância da barragem, a caracterização das propriedades do betão envolve a realização de ensaios específicos.

Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia para a determinação da função de fluência básica do betão da barragem de Alqueva recorrendo aos resultados experimentais obtidos nas células de fluência instaladas *in situ*, sob condições higrométricas variáveis, nos prismas ensaiados à fluência em laboratório, sob condições higrométricas controladas, e nos ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão de prismas do betão. Os parâmetros da lei de fluência básica representativa do comportamento diferido do betão da obra foram obtidos através do modelo de previsão BaP, desenvolvido por *Bazant* e *Panula* em 1976 e por ajuste aos resultados experimentais disponíveis. Os efeitos das variações de carga e de temperatura decorridas durante os ensaios foram considerados, respectivamente, através da hipótese de sobreposição de efeitos e da modelação do efeito das variações de temperatura.

A metodologia adoptada permitiu identificar a lei de fluência do betão, referente ao modelo de previsão, que melhor se adapta aos resultados dos ensaios efectuados *in situ* e em laboratório e, por sua vez, ao comportamento global da barragem.

PALAVRAS-CHAVE

Betão de barragens, Fluência, Modelos de Previsão, Ensaios *in situ*, Ensaios em laboratório

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Observação, Av. Brasil n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. cserra@lnec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Observação, Av. Brasil n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. a.l.batista@lnec.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Núcleo de Observação, Av. Brasil n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. tcastro@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

O fenómeno da fluência do betão tem relevância na interpretação do comportamento das barragens, na medida em que determina a evolução da deformabilidade do betão, introduz uma parcela significativa nas deformações e nos deslocamentos e induz uma redistribuição de tensões ao longo do tempo. Uma vez que o controlo de segurança deste tipo de estruturas passa pela modelação do comportamento observado, a correcta avaliação da função de fluência do betão estrutural torna-se essencial, constituindo uma etapa importante da interpretação [1,2].

Os modelos de previsão disponíveis permitem a obtenção de uma estimativa da evolução das extensões de fluência ao longo do tempo. No entanto, no que diz respeito ao betão de barragens e a condições termo-higrométricas variáveis existem ainda algumas limitações decorrentes do reduzido número de resultados experimentais [3]. Deste modo, neste tipo de estruturas realizam-se ensaios específicos para a caracterização da deformabilidade do betão, que incluem a medição das extensões observadas em células de fluência *in situ* e prismas em laboratório, a determinação das resistências à compressão e dos módulos de elasticidade a várias idades.

O tratamento e interpretação dos valores observados nos ensaios de fluência são apresentados neste trabalho, cujo objectivo consiste em determinar a função de fluência representativa do comportamento da estrutura, com base nos resultados experimentais disponíveis. A interpretação passou pela compensação dos efeitos das variações de carga e de temperatura observadas em cada célula e prisma, de forma a comparar directamente os resultados experimentais com a função de fluência teórica.

2. DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS DEFORMAÇÕES DE FLUÊNCIA

2.1 Deformações 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), $\varepsilon^s(t)$,

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

Sendo $J(t, t_0)$ a função de fluência (deformação total, ao longo do tempo, para uma tensão unitária aplicada),

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \varepsilon^f(t, t_0) \quad (2)$$

onde $E(t_0)$ representa o módulo de elasticidade à data da aplicação da carga, t_0 , e $\varepsilon^f(t)$ as extensões específicas de fluência.

As deformações instantâneas e de fluência podem escrever-se na forma,

$$J(t, t_0) \sigma(t_0) = \varepsilon^i(t_0) + \varepsilon^c(t, t_0) \quad (3)$$

com,

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

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

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

2.2 Previsão das deformações de fluência – Modelo de Bažant e Panulla 1986 (BaP)

Os modelos de previsão da função de fluência fornecem uma primeira estimativa das deformações ao longo do tempo com base em determinadas características do betão. Estes modelos são especialmente úteis na fase de projecto, quando não se dispõe de resultados de ensaios específicos, e na fase de interpretação, para obter uma expressão analítica representativa do comportamento do betão. Em estruturas importantes, como é o caso das grandes barragens, é aconselhável a realização, em fase de obra e de exploração, de ensaios específicos para obtenção das propriedades reológicas dos betões aplicados, apesar dos elevados custos directos e diferidos [4], permitindo um melhor ajuste das previsões ao betão colocado em obra.

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

No modelo BaP a função de fluência, $J(t, t_0)$, é dada pelo somatório da parcela elástica, $1/E_0$, da fluência básica, $C_0(t, t_0)$, e da fluência de secagem, $C_d(t, t_0)$.

Uma das particularidades desta formulação consiste na consideração da evolução do processo de maturação do betão na parcela de fluência básica através da multiplicação de uma potência da idade à data de carregamento, t_0 , por uma potência do tempo sob carga, $t-t_0$.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0, t') \quad (6)$$

$$C_0(t, t_0) = \frac{\varphi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha) (t - t_0)^n \quad (7)$$

onde E_0 , φ_1 , m , α e n são parâmetros dependentes das características intrínsecas do betão.

Dado que, no caso de barragens, a massa do betão encontra-se permanentemente saturada, pode-se considerar que a parcela de secagem não tem significado face aos valores de fluência básica.

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 da lei de fluência podem ser estimados recorrendo a dois métodos distintos. O primeiro permite a estimativa da função de fluência a partir da resistência à compressão aos 28 dias, $f_{c,28}$ (em MPa) e da composição do betão [5]. O segundo método, utilizado neste trabalho, considera apenas como característica intrínseca do material o valor $f_{c,28}$ (em MPa) [6],

$$\varphi_1 = 0,3 + 152,2 f_{c,28}^{-1,2} \quad (9)$$

$$\alpha = 0,05 \quad (10)$$

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

$$n = 0,115 + 0,183 (f_{c,28})^{3,4} \times 10^{-6} \quad (12)$$

$$E_0 = 0,0145 + 3,447 f_{c,28}^{-2} \quad (13)$$

Os efeitos da temperatura no valor das extensões de fluência podem ser considerados na formulação original, apresentada anteriormente, através da correcção da idade de carregamento de t_0 para t_e . Esta

idade equivalente, t_e , representa o período à temperatura T_0 que resulta no mesmo grau de hidratação à temperatura T (valores em Kelvin), no período t_0 .

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_T}{E_0} (t_e^{-m} + \alpha) (t - t_0)^{n_T} \quad (14)$$

onde,

$$t_e = \int_0^{t_0} \beta_T(t') dt' \quad (15)$$

$$\varphi_T = \varphi_1 (1 + C_T) \quad (16)$$

$$\beta_T = e^{\left(\frac{4000}{T_0} - \frac{4000}{T} \right)} \quad (17)$$

$$C_T = c_T \tau_T c_0 \quad (18)$$

$$c_T = \frac{19,4}{1 + (100/(T - 253,2))^{3,5}} - 1 \quad (19)$$

$$\tau_T = \frac{1}{1 + 60/t_T^{0,69}} + 0,78 \quad (20)$$

$$n_T = B_T n \quad (21)$$

$$B_T = \frac{0,25}{1 + (74/(T - 253,2))^7} + 1 \quad (22)$$

Com t_T igual à idade em que a temperatura T é aplicada. Estas expressões empíricas reflectem o conceito de energia de activação e os fenómenos relacionados com o processo de hidratação do betão [7].

Através do ajustamento a resultados experimentais verificou-se que o valor de c_0 pode ser relacionado com a composição do betão através da expressão,

$$c_0 = \frac{1}{8} \left(\frac{w}{c} \right)^2 \left(\frac{a}{c} \right) a_1 \quad (23)$$

onde w , a e c são as dosagens de água, agregados e cimento e a_1 é igual a 1,05 para cimentos com baixo calor de hidratação.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS DEFORMAÇÕES DE FLUÊNCIA

3.1 Caracterização da deformabilidade do betão

Dada a complexidade do fenómeno da fluência do betão e das suas inúmeras variáveis, desde as componentes do betão, passando pelos procedimentos de betonagem, cura e condições de maturação, é necessária, na sua avaliação, a consideração de um conjunto de características do betão.

Os resultados dos ensaios de controlo de qualidade, efectuados pelo Dono de Obra durante a construção, e os ensaios realizados pelo LNEC constituem elementos relevantes sobre a resistência e deformabilidade do betão aplicado em obra. De entre estes ensaios estão a determinação da resistência à compressão a diversas idades (segundo a especificação LNEC E226 [8]), a determinação da resistência à flexão (segundo a especificação LNEC E227 [9]), a obtenção da curva tensão-extensão até à rotura e a determinação do módulo de elasticidade em compressão (segundo a especificação LNEC E397 [10]).

Os ensaios efectuados *in situ* deverão ter uma correspondência com os ensaios em laboratório por forma a estabelecer correlações entre os tipos de betão (betão integral, constituinte principal das barragens, e o betão crivado, usado em laboratório e no envolvimento dos instrumentos de observação

embebidos no betão, como é o caso dos extensómetros) e as condições termo-higrométricas (variáveis em obra e controladas em laboratório).

O subsistema de observação relativo à caracterização da deformabilidade do betão, previsto nas barragens de maior dimensão, permite determinar as características de deformabilidade do betão aplicado em obra e acompanhar a sua evolução ao longo do tempo. A determinação das deformações de fluência e dos módulos de elasticidade instantâneos é realizada a partir das células de fluência, moldadas com betão integral e betão crivado, e dos respectivos prismas, moldados com o betão crivado e ensaiados em laboratório.

3.2 Células de fluência

As células de fluência são constituídas por um cilindro de betão inserido no corpo da barragem, de modo a ficar submetido às mesmas variações termo-higrométricas, 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, $\varepsilon^{totais}(t, t_0)$ [2,11,12]. Na proximidade, outra célula (corrector) tem deformação livre, permitindo registar as extensões devidas a fenómenos independentes da tensão, $\varepsilon^{autog}(t)$, designadas por variações autogéneas de volume. As extensões corrigidas correspondem às extensões devidas apenas às tensões aplicadas,

$$\varepsilon^{corr}(t, t_0) = \varepsilon^{totais}(t, t_0) - \varepsilon^{autog}(t) \quad (24)$$

A extensão específica é obtida pela divisão da extensão corrigida pela tensão aplicada,

$$\varepsilon^{esp}(t, t_0) = \frac{\varepsilon^{corr}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (25)$$

No que diz respeito à barragem de Alqueva, foram instalados treze (13) grupos de células de fluência para a caracterização da deformabilidade do betão (Fig. 1) [13]. Cada conjunto é composto por quatro (4) células, uma activa para o betão crivado (peneiro de 38 mm), outra activa para o betão integral (máxima dimensão dos agregados de 150 mm) e as correspondentes células correctoras (Fig. 2).

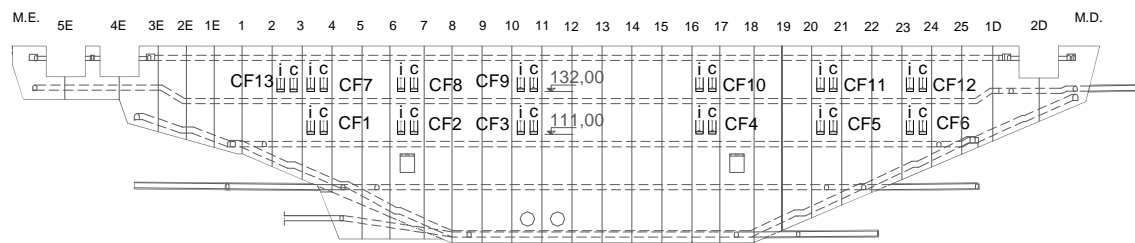


Figura 1. Distribuição dos grupos de células pela barragem (i – células de betão integral; c – células de betão crivado).

Em laboratório, por cada conjunto de células de fluência foram moldados três (3) prismas, dois activos e um corrector, com o betão crivado em fresco pelo peneiro de 38 mm (Fig.2).

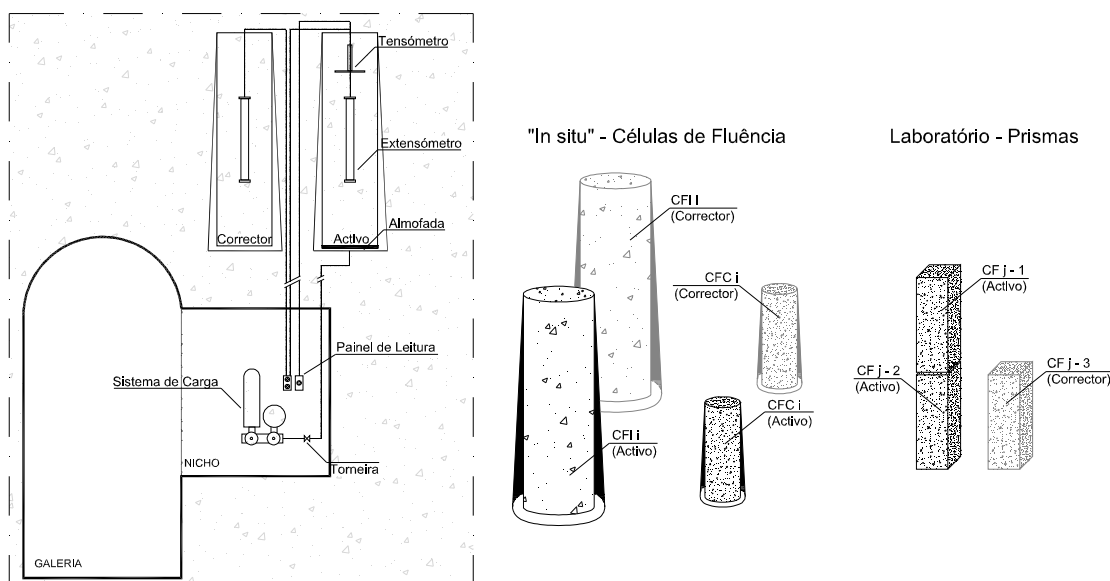


Figura 2. Células de fluência e prismas laboratoriais.

3.3 Tratamento dos dados de observação

A interpretação dos valores observados requer uma análise preliminar dos dados no sentido de validar as observações e evitar que eventuais situações anómalas influenciem os resultados dos estudos.

3.3.1 Desfasamento das temperaturas observadas em cada célula

Numa primeira análise verificou-se a existência de um desfasamento entre as temperaturas registadas na célula activa e na célula correctora em grande parte dos grupos de células instalados na barragem de Alqueva, resultando numa deficiente correcção das deformações autógenas, em particular na parcela das deformações impostas pela temperatura.

Este fenómeno, interpretado como sendo resultado do gradiente térmico existente através da espessura da barragem, é consequência do posicionamento relativo entre as células activa e correctora em espessura. Na Fig. 3 representa-se esquematicamente a evolução da temperatura ao longo da espessura da barragem para duas épocas, entre a temperatura registada na albufeira, $T_{\text{água, época } i}$, e a temperatura do ar, $T_{\text{ar, época } i}$.

Recorrendo à restante aparelhagem colocada em obra (termómetros, T_i , e grupos de extensómetros, G_j), foi possível obter a distribuição das temperaturas ao longo da espessura da barragem nas secções correspondentes a algumas células de fluência, permitindo a comparação de resultados obtidos de forma independente. Apresentam-se os resultados relativos à célula CFI12 (junto ao encontro da margem direita), onde o efeito é mais pronunciado (Quadro 1 e Figs. 4 e 5).

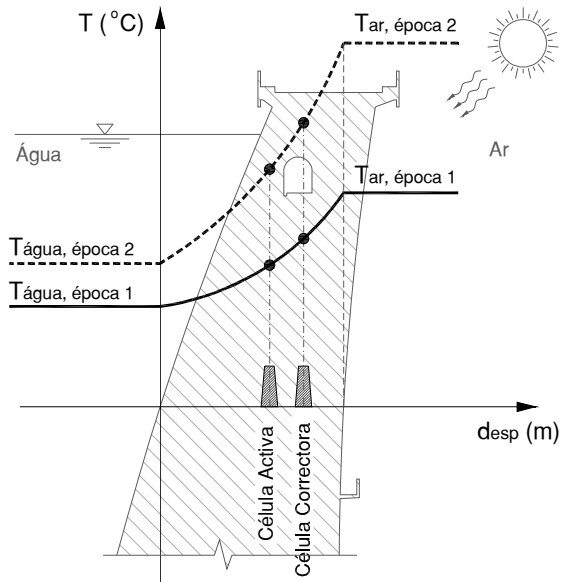


Figura 3. Representação esquemática da evolução das temperaturas na espessura da barragem.

Quadro 1. Aparelhos de resistência eléctrica existentes na secção da célula de fluência CFI12

Célula	Bloco	Cota [m]	Aparelhos de resistência eléctrica				
CFI12	24-25	141,0	T78	G44	T79	G45	T80

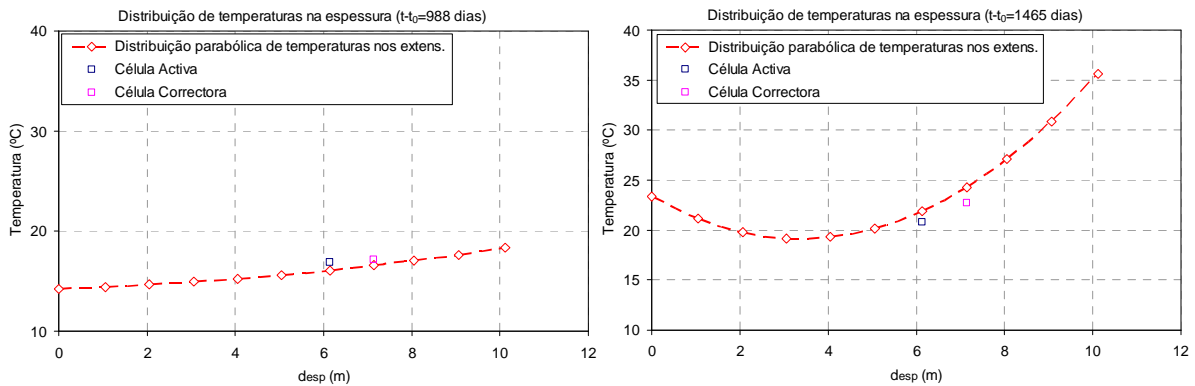


Figura 4. Distribuição de temperaturas na espessura na secção do grupo CFI12, em duas épocas distintas: 9/4/2003 (Esq.) e 29/7/2004 (Dir.).

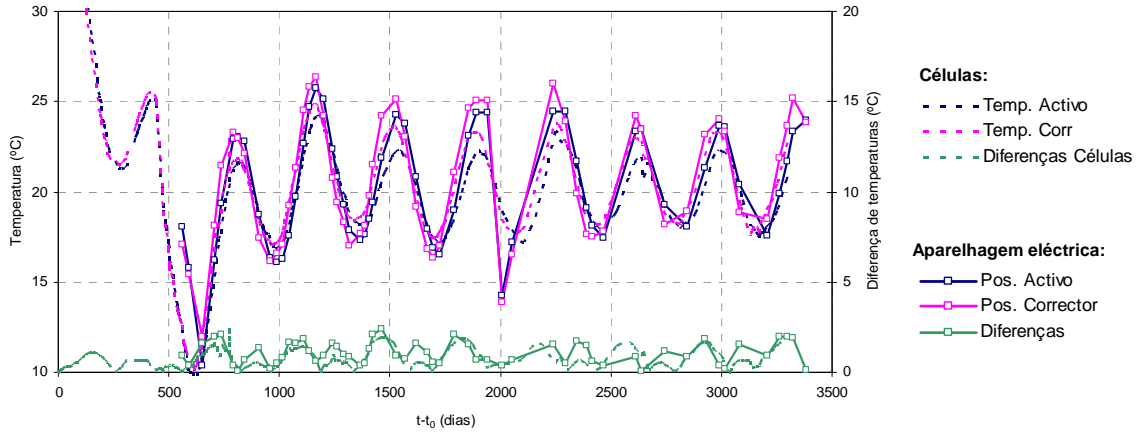


Figura 5. Comparação entre as temperaturas observadas na célula CFI12 e na aparelhagem eléctrica

Conclui-se que as temperaturas observadas nos grupos de extensómetros e termómetros colocados na espessura da barragem apresentam um registo semelhante ao observado nas células de fluência. Por outro lado, confirma-se que existe um desfasamento temporal entre as temperaturas observadas em cada célula analisando a evolução da diferença de temperatura registada por outros aparelhos de medição nas posições em espessura das células de fluência.

3.3.2 Correção do desfasamento de temperaturas no cálculo das extensões autógenas de volume

As extensões registadas nas células correctoras incluem os efeitos das deformações autógenas, ou seja, as deformações devidas a fenómenos independentes da tensão, como as variações de temperatura ou a retracção. A interpretação das extensões medidas nas células correctoras consistiu na separação dos efeitos da temperatura e dos efeitos diferidos ao longo do tempo, considerando a expressão,

$$\varepsilon^{autog}(t) = a \cos S + b \sin S + c \log\left(\frac{t}{t_0} + 1\right) + d t + k \quad (26)$$

$$S = \frac{2\pi s}{365} \quad (27)$$

com s igual ao número de dias decorridos desde o início do ano até à data da observação e a , b , c , d e k os parâmetros da interpretação.

Através da Eq. (26), pré-estabelecida com base no conhecimento dos fenómenos físicos inerentes à evolução das extensões autógenas de volume do betão, e das observações obtidas ao longo do tempo em cada célula correctora, foi possível, por regressão linear múltipla, calcular o valor dos parâmetros a , b , c , d e k que minimizam os somatório do quadrado dos resíduos. As primeiras duas parcelas representam o ajuste ao efeito térmico, através da soma de duas funções sinusoidais, e as parcelas dependentes do tempo definem o comportamento diferido.

O coeficiente de dilatação linear do betão, α , pode ser determinado ajustando uma recta aos pares de valores $(\varepsilon^{\Delta T}(t), T(t))$ onde,

$$\varepsilon^{\Delta T}(t) = a \cos S + b \sin S \quad (28)$$

e $T(t)$ a correspondente história de temperaturas observadas nas células e prismas correctores.

A extensão corrigida foi obtida através da separação dos efeitos das variações autógenas de volume e da correcção da diferença de temperaturas,

$$\varepsilon^{corr}(t, t_0) = \varepsilon^{totais, activa}(t, t_0) - \varepsilon^{autog, correct}(t) - \alpha(T_{activa} - T_{corr}) \quad (29)$$

No que diz respeito às células de fluência, dado que se encontram sujeitas às variações de temperatura *in situ*, registaram a refrigeração forçada da barragem para injeção de juntas, no primeiro trimestre de 2002, e o seguinte processo de subida de temperatura. Assim, a separação de efeitos incidiu apenas

sobre as medições efectuadas após 2004, onde as variações de temperatura resultam apenas do efeito sazonal e de efeitos dependentes do tempo.

A Fig. 6 ilustra a separação de efeitos das extensões autógenas de uma célula correctora do grupo CFC6, a determinação do coeficiente de dilatação linear a partir das deformações térmicas e o efeito da correcção nas extensões da célula activa.

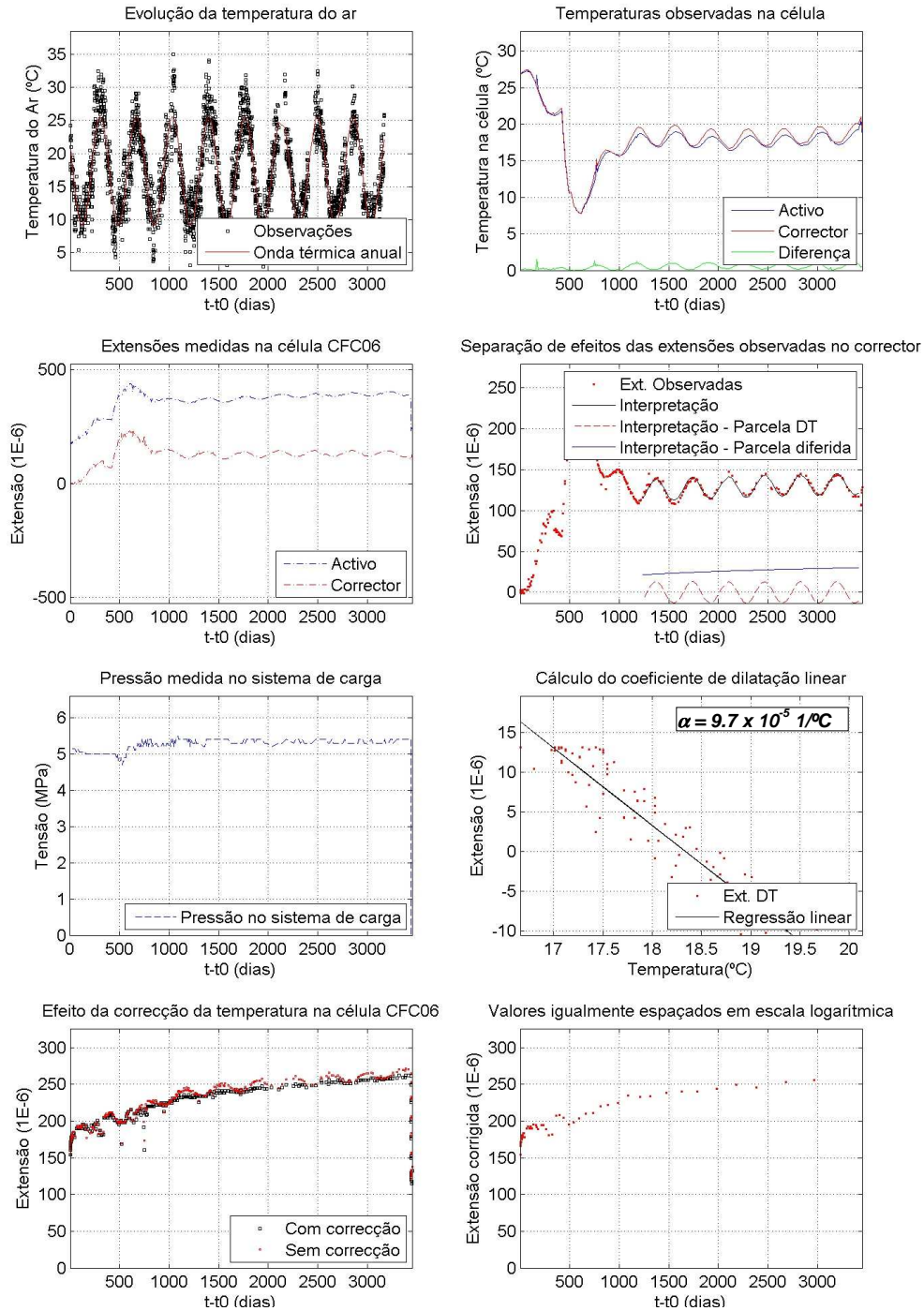


Figura 6. Correção das deformações autógenas de volume na célula CFC6.

4. INTERPRETAÇÃO DAS EXTENSÕES DE FLUÊNCIA OBTIDAS “IN SITU” E EM LABORATÓRIO

4.1 Composições do betão

Em geral, as principais composições utilizadas nos blocos da barragem de Alqueva sofreram poucas alterações ao longo da construção, tendo estabilizado numa proporção de referência para cada tipo de betão em Abril de 1999. Essa proporção inclui cinco britas (75/150, 38/75, 19/38, 10/19, 5/10), duas areias (2,5/5, 0/2,5), obtidas da rocha da pedreira por britagem (xistos luzentes sericito-cloríticos de cor esverdeada escura), e dosagens de cimento que variaram entre 160 e 240 kg/m³, conforme a composição em questão (Quadro 2).

Quadro 2. Principais composições do betão aplicado na barragem de Alqueva.

<i>Componentes</i>	<i>107</i>	<i>108</i>	<i>109</i>
	<i>C12/15</i>	<i>C16/20</i>	<i>C12/15</i>
	<i>07524020</i>	<i>07524000</i>	<i>15020020</i>
Br 75/150 [kg/m ³]	-	-	613
Br 38/75 [kg/m ³]	541	541	427
Br 19/38 [kg/m ³]	382	382	302
Br 10/19 [kg/m ³]	266	266	210
Br 5/10 [kg/m ³]	194	194	153
Ar. 2,5/5 [kg/m ³]	234	236	176
Ar. 0/2,5 [kg/m ³]	566	571	424
Cim. IV-32,5 [kg/m ³]	192	240	160
Cinzas [kg/m ³]	48	-	40
Água [kg/m ³]	146	146	117
Adjuvante BV 40 [kg/m ³]	1,037	1,152	0,864
Relação água/cimento	0,61	0,61	0,59

De acordo com as colheitas efectuadas ao longo da construção, para o controlo de qualidade, conclui-se que o corpo da barragem é constituído pelo betão com a composição 109, designada por 15020020 (ϕ_{\max} =150 mm, D_{ligante} = 200 kg/m³, incluindo 20% de cinzas). Os paramentos de montante e de jusante, numa espessura de 1,5 m, foram betonados com a composição 107 e 108, designadas por 07524020 (ϕ_{\max} = 75 mm, D_{ligante} = 240 kg/m³, dos quais 20% são cinzas) e 07524000 (ϕ_{\max} de 75 mm, D_{ligante} igual a 240 kg/m³). Para cada célula colocada em obra foram recolhidos os dados relativos à composição, provenientes do controlo de qualidade e à respectiva colheita. No Quadro 3 apresentam-se os dados da composição do betão de cada célula.

Quadro 3. Identificação e propriedades do betão colocado em cada grupo de células de fluência

<i>Célula</i>	<i>Data de colocação</i>	<i>Colheita</i>	<i>Cota [m]</i>	<i>Composição</i>
CF1	01/08/2000	912	111,0	109 (15020020)
CF2	22/12/2000	1172	110,0	
CF3	19/07/2000	891	111,5	
CF4	13/10/1999	484	110,5	
CF5	19/01/2000	660	110,5	
CF6	15/02/2000	703	111,0	
CF7	22/11/2000	1124	131,0	
CF8	29/03/2001	1316	132,0	
CF9	19/10/2000	1062	131,5	108 (7524000)
CF10	10/05/2000	840	132,5	109 (15020020)
CF11	11/07/2000	877	132,5	
CF12	25/07/2000	899	133,0	
CF13	04/09/2001	1582	134,5	

4.2 Previsão da função de fluência do betão e ajuste aos resultados experimentais

Na previsão original do modelo de fluência BaP, apresentada em §2.2, verifica-se uma melhor adaptação aos resultados observados nos ensaios de fluência quando é utilizado como parâmetro base o valor da resistência à compressão aos 365 dias de idade, $f_{c,365}$. Por outro lado, caso se efectue um ajuste do parâmetro E_0 , recorrendo aos valores de módulo de elasticidade obtidos em laboratório e à Eq. (8), verifica-se que o valor aos 365 dias, $E_{c,365}$ é o mais adequado. Estas conclusões, resultado de um estudo efectuado anteriormente sobre o betão da barragem de Alqueva [14], justificam-se pelas características do betão de barragens, em particular com a sua lenta maturação.

Deste modo, considerando como referência os valores de $f_{c,365}$ e $E_{c,365}$, foram efectuadas: i) previsões dos parâmetros E_0 , φ , m , n e α recorrendo aos valores médios de resistência à compressão; ii) previsão dos parâmetros φ , m , n e α e ajuste de E_0 através dos resultados de módulo de elasticidade médios obtidos em laboratório para o betão integral e crivado. Estes valores resultaram dos ensaios efectuados durante a construção, para o controlo de qualidade, e dos ensaios efectuados pelo LNEC, e são representativos das composições do betão de cada célula/prisma (composições 109 e 108). O resumo dos valores médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Valores médios da resistência à compressão, f_c , e do módulo de elasticidade, E_c , do betão das composições 109 e 108

Composição	Tipo de betão	f_c [MPa]			E_c [GPa]		
		28 dias	90 dias	365 dias	28 dias	90 dias	365 dias
109	Crivado	16,9	23,5	36,8	22,4	29,0	34,6
109	Integral	13,3	17,6	22,9	-	24,9	25,8
108	Crivado	21,9	28,9	34,9	24,9	31,0	36,6
108	Integral	17,8	22,7	27,6	21,3	28,6	29,8

A comparação directa entre os valores da função de fluência estimada, em termos de extensões de fluência, e os resultados experimentais, em termos de extensão específica, depende muito da qualidade dos resultados experimentais obtidos. A função de fluência teórica obtida por previsão ou por ajuste aos resultados experimentais representa a evolução das deformações ao longo do tempo devido a uma carga unitária constante, em condições de temperatura constantes. No entanto, devido às condições inerentes ao próprio ensaio, ocorrem variações de carga que invalidam a obtenção directa da função de fluência. Por outro lado, as variações de temperatura, em particular no caso das células de fluência, levam a alterações nos processos de maturação do betão e, por sua vez, nas deformações de fluência observadas.

O arrefecimento geral da barragem entre Setembro de 2001 e Maio de 2002, para a injeção das juntas de contracção, encontra-se patente nos registos de cada célula de fluência, com diminuição forçada das temperaturas no interior da barragem até cerca de 10°C. Este acontecimento coincidiu com os primeiros anos de carga das células e provocou alterações significativas em alguns dos resultados experimentais, nomeadamente na diminuição das extensões. Alguns exemplos são as células CFI1, CFI2 e CFI3 onde, durante o período de arrefecimento, as extensões específicas sofreram um decréscimo significativo.

Os efeitos das variações de carga e de temperatura ocorridas durante os ensaios foram contabilizados considerando a hipótese de sobreposição de efeitos (Eq. (31)) e correcções propostas na formulação BaP (§2.2.1).

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = \int_0^t J(t, t_0) d\sigma(t_0) \quad (30)$$

As referidas variações têm maior importância nos resultados das células de fluência. Este tipo de correcção permite realizar o ajuste às condições reais de ensaio e explicar a evolução das deformações em algumas células. No que diz respeito aos ensaios em laboratório, verifica-se a manutenção da carga constante durante o ensaio e variações de temperatura são pouco significativas.

A contabilização dos efeitos de cada uma das acções permitiu identificar as diferenças entre as extensões de fluência estimadas, para carga e temperatura constantes, e as extensões decorrentes das variações de carga e temperatura efectivamente ocorridas em cada uma das células e prismas. Esses desvios foram subtraídos aos resultados experimentais de modo a anular esses efeitos e a permitir a comparação directa entre os valores das extensões calculadas e observadas.

Em determinadas células e prismas registaram-se valores díspares, sem explicação evidente. As razões para estas disparidades podem ter diversas origens, como erros de leitura, má instalação dos aparelhos de medição, ineficácia do sistema de carga em aplicar uma determinada pressão à célula e prisma e/ou singularidades no betão colocado em cada célula ou prisma. De forma a recuperar os resultados obtidos nestes casos, bem como compatibilizar a interpretação de todas as células, os valores experimentais foram afectados por um coeficiente correctivo baseado no valor de módulo de elasticidade obtido em laboratório, sob condições controladas. Pretendeu-se assim anular os efeitos identificados anteriormente, tomando como hipótese a linearidade da fluência básica e o facto do módulo de elasticidade médio obtido em laboratório apresentar maior fiabilidade,

$$\varepsilon_{obs,corr} = \varepsilon_{obs} \times \frac{E_{CF}(t_0)}{E_{Lab}(t_0)} \quad (31)$$

onde $\varepsilon_{obs,corr}$ e ε_{obs} correspondem, respectivamente, às extensões totais corrigidas e observadas nos ensaios, $E_{Lab}(t_0)$ é o módulo de elasticidade médio obtido em laboratório através de ensaio específico à idade t_0 e $E_{CF}(t_0)$ é o módulo de elasticidade obtido para a célula ou prisma em questão, à idade t_0 .

4.3.1 Resultados

Os resultados da comparação directa das extensões totais obtidas através da previsão original BaP e do ajuste ao parâmetro E_0 considerando a pressão inicial instalada no início do ensaio e as extensões observadas corrigidas das variações de carga, das variações de temperatura e do módulo de elasticidade, são apresentadas para duas células. Nas Figs. 7 e 8 estão representadas, respectivamente para a célula CFI2 e CFC6: i) a evolução das pressões instaladas no sistema de carga e as tensões medidas no tensómetro; ii) a evolução das temperaturas observadas na célula activa; iii) a evolução do módulo de elasticidade estimado, os resultados médios dos ensaios experimentais de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos em laboratório; iv) a comparação entre extensões observadas e extensões estimadas com e sem o ajuste do módulo de elasticidade.

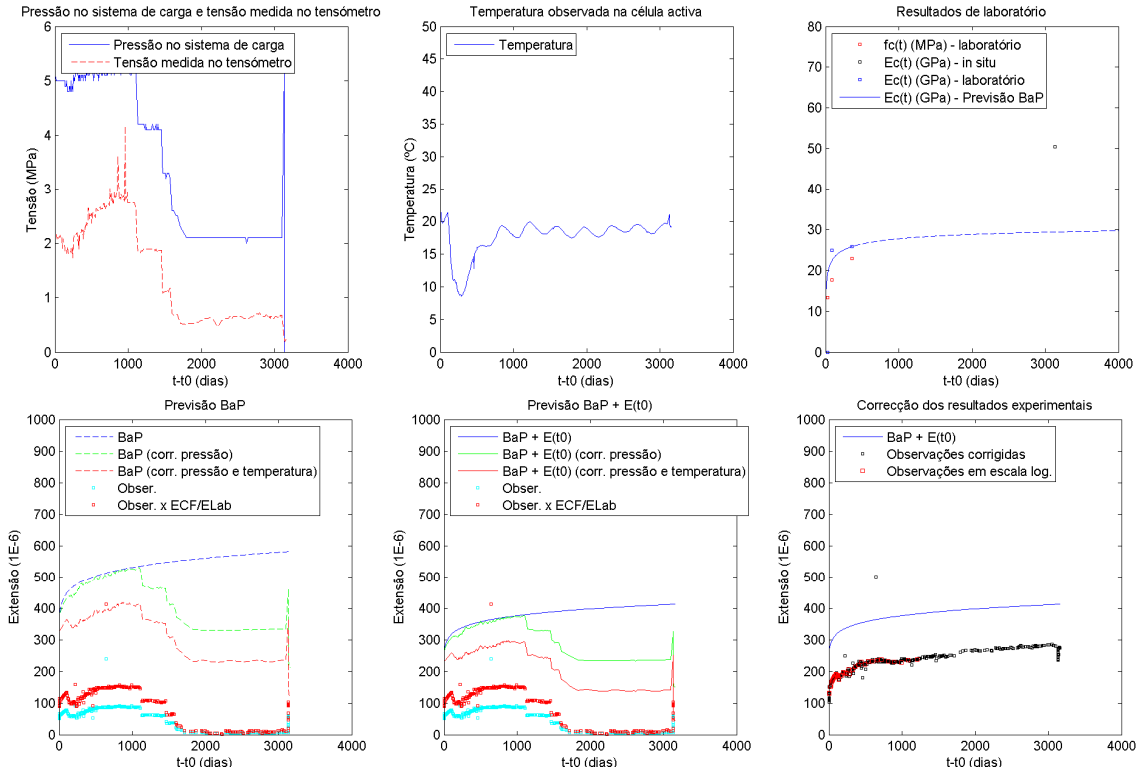


Figura 7. Resultados das correcções das extensões medidas na célula CFI2.

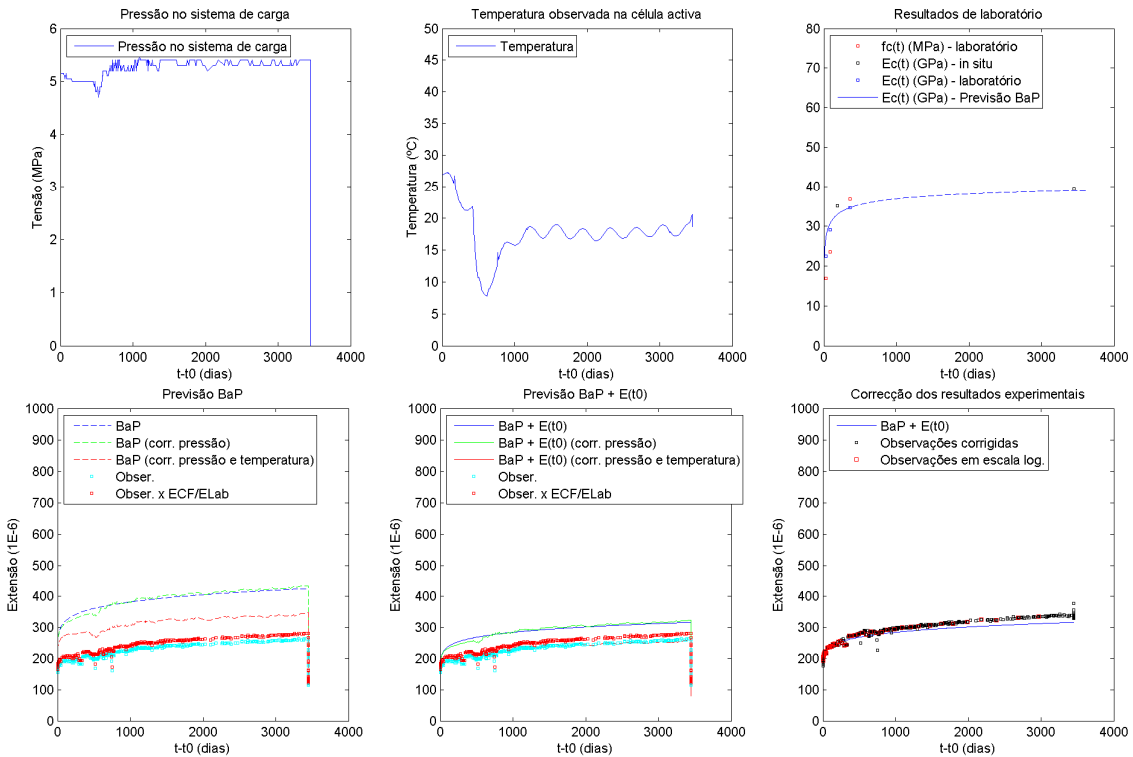


Figura 8. Resultados das correcções das extensões medidas na célula CFC6.

No caso da célula CFI2, os resultados apresentam grandes variações de extensão total ao longo do tempo devido às perdas de pressão aos 1000 e 1500 dias e às variações de temperatura nas primeiras

idades. A consideração da sobreposição de efeitos tomando o carregamento observado permitiu a reposição da continuidade dos resultados experimentais e a consideração da história de temperaturas observadas explicou, em parte, o abaixamento abrupto dos valores de extensão total. A eficácia das correcções são também patentes para a célula CFC6, onde o efeito da temperatura fez diminuir a taxa de crescimento das extensões de fluência no início do carregamento.

O ajuste do parâmetro E_0 através dos valores do módulo de elasticidade obtidos em laboratório em conjunto com o valor correctivo E_{CF}/E_{Lab} permitiu uma melhor adaptação da função analítica às extensões obtidas nos ensaios de fluência.

A correcção dos resultados experimentais com base nos referidos efeitos, permitiu uma correcta comparação entre a função de fluência do betão de toda a obra e cada um dos resultados experimentais obtidos em cada célula, para cada composição e tipo de betão.

Os parâmetros da função de fluência, calculados a partir da resistência à compressão média e ajustados aos módulos de elasticidade obtidos em laboratório, são apresentados para as duas composições e tipos de betão, integral e crivado (Quadro 5).

Quadro 5. Valores dos parâmetros da formulação para as composições 108 e 109

Composição	Tipo de betão	E_0 (GPa)	ϕ_1	m	n	α
108	Integral	42,5	3,14	0,34	0,13	0,05
	Crivado	50,8	2,75	0,32	0,14	0,05
109	Integral	38,0	3,85	0,37	0,12	0,05
	Crivado	48,5	2,87	0,33	0,13	0,05

Nas Figs. 9 e 10 representam-se as funções de fluência estimadas e a comparação com os resultados experimentais, de cada célula e prisma, em diferentes idades de carregamento, t_0 , após as referidas correcções.

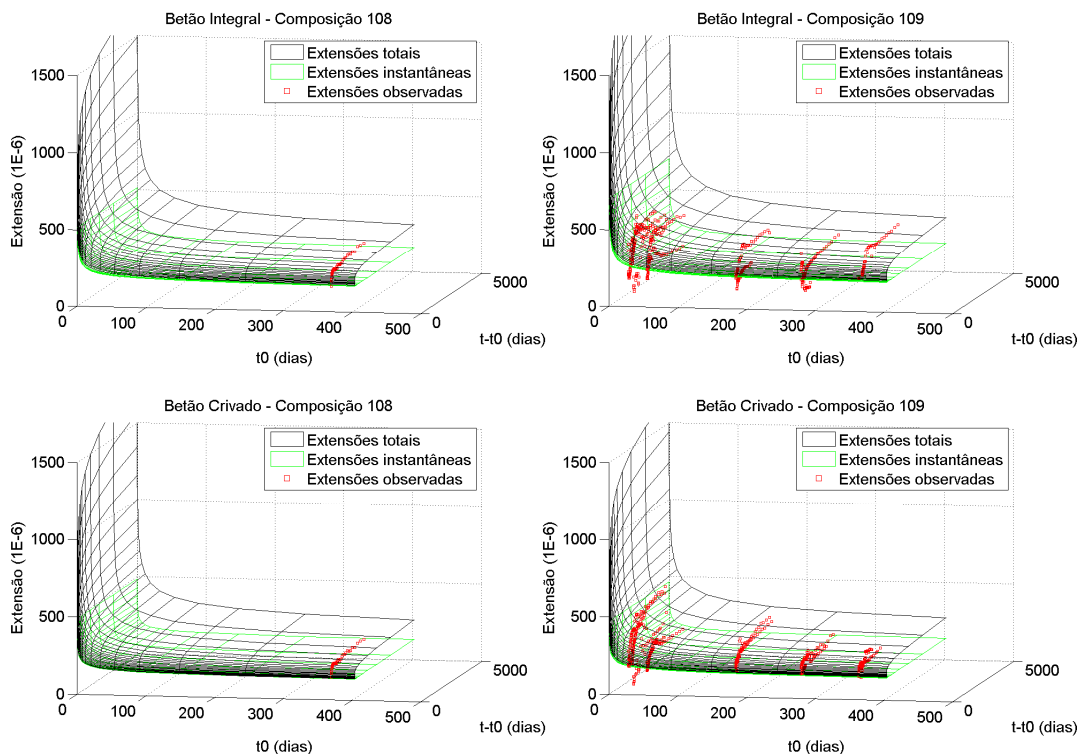


Figura 9. Comparação entre as extensões observadas nos ensaios realizados *in situ* e as extensões de fluência estimadas.

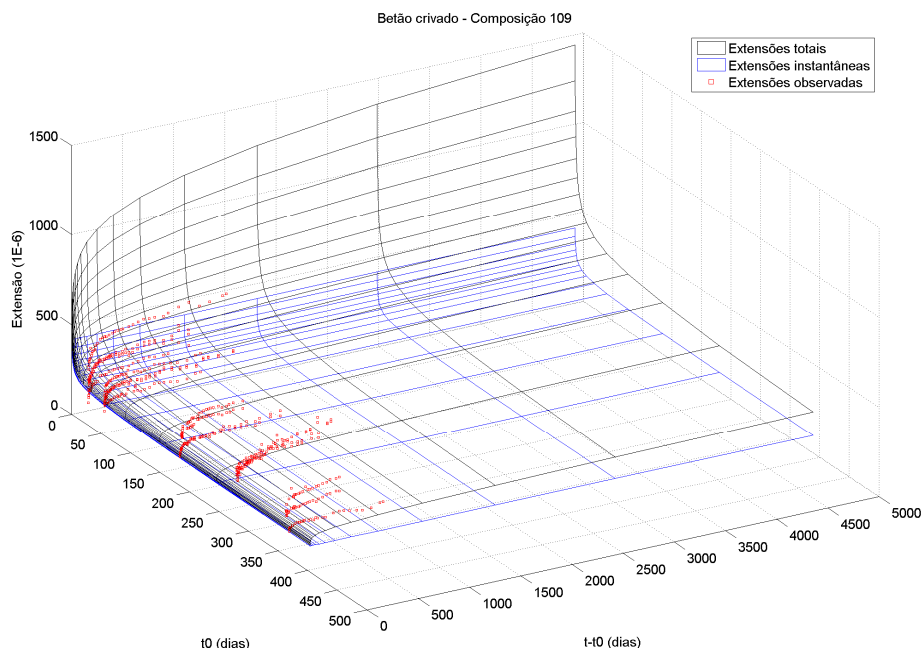


Figura 10. Comparação entre as extensões observadas nos ensaios laboratoriais e as extensões de fluência estimadas.

Dos gráficos anteriores pode-se concluir que, em geral, a metodologia apresentada para o tratamento e interpretação dos resultados experimentais permite alcançar a função de fluência representativa do comportamento global da estrutura e explicar alguns fenómenos decorridos nas células de fluência.

A função de fluência, obtida com base em propriedades médias de todo o betão da obra, para as composições 108 e 109 e de betão crivado e integral, dita a evolução da deformabilidade instantânea e diferida ao longo do tempo. Por seu lado, através das correcções efectuadas a cada um dos resultados experimentais e baseadas nos efeitos observados das células e prismas é possível afirmar que existe uma boa adaptação da função de fluência às observações.

Verifica-se também que os resultados obtidos nas células de betão integral apresentam pior ajuste, tanto no que diz respeito à deformabilidade instantânea como no andamento das deformações diferidas, quando em comparação com o betão crivado. Este facto pode resultar das dificuldades inerentes à constituição do betão (em particular devido aos agregados de grande dimensão), do processo de colocação e cura, do equipamento de observação das extensões e/ou da aplicação das pressões à própria célula.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o tratamento e uma interpretação dos resultados obtidos em células e prismas ensaiados à fluência ao longo de, aproximadamente, dez anos.

Verificou-se que a importância do conhecimento dos fenómenos físicos envolvidos pode resultar numa interpretação mais realista dos resultados e na eliminação de efeitos indesejados. Neste caso, as diferenças entre as temperaturas observadas em cada célula resultou do diferente posicionamento na espessura da barragem.

Por outro lado, devido aos condicionamentos associados aos ensaios *in situ*, foram consideradas as variações de tensão e de temperatura observadas no interior das células, de forma a: i) validar a hipótese de sobreposição de efeitos; ii) modelar o efeito das variações de temperatura no processo de

maturação do betão e os seus efeitos nas deformações de fluência através de previsão; e iii) comparar os resultados obtidos em cada célula e prisma, sem a influência dos referidos efeitos.

A comparação entre extensões experimentais corrigidas e extensões teóricas estimadas mostram concordância para as duas composições, 108 e 109, e para os dois tipos de betão, integral e crivado, tanto para os ensaios realizados *in situ* como em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas de Alqueva a autorização concedida para a apresentação dos resultados referentes à observação da barragem de Alqueva.

REFERÊNCIAS

- [1] RAMOS, J.M. – Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985. 223 p. Tese de Especialista.
- [2] PINHO, J.L. – Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989. 306 p. Tese de Especialista.
- [3] LNEC – Efeito da temperatura sobre a fluência do betão em massa. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968. Relatório Final.
- [4] FARINHA, M.L. – Extensões e tensões observadas em barragens de betão. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2000. 157 p. Tese de Mestrado (pré-Bolonha).
- [5] BAŽANT, Z. P.; OSMAN, E. – Double power law for basic creep of concrete. *Materials and Structures (RILEM, Paris)*. Vol. 9. 1976, 3-11.
- [6] NEVILLE, A.M. [et al.] – *Creep of plain and structural concrete*, New York: Longman Inc., 1983.
- [7] BAŽANT, Z. P. [et al.] – Practical formulation of shrinkage and creep of concrete. *Materials and Structures (RILEM, Paris)*. Vol. 9. 1976, 395-406.
- [8] LNEC – Especificação LNEC EN226. Lisboa: LNEC. 1968.
- [9] LNEC – Especificação LNEC EN227. Lisboa: LNEC. 1968.
- [10] LNEC – Especificação LNEC EN397. Lisboa: LNEC. 1993.
- [11] SILVEIRA, A.F., et. al. – LNEC experience in the field of concrete dam observation and of *in situ* tests. Lisbon: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981. Memória N.º. 548.
- [12] LNEC – Deformabilidade do betão de barragens (Determinações laboratoriais e *in situ*). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981. Relatório Preliminar.
- [13] LNEC – Plano de Observação do Escalão de Alqueva - Barragem, fundação, maciço envolvente, albufeira e obras anexas. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. Relatório 107/01-DB/NO.
- [14] SERRA, C. [et al.] – Caracterização do Comportamento Diferido do Betão. Aplicação à Barragem de Alqueva. 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental 2010, G. Vasconcelos, P.B. Lourenço, J.O. Barros, and F.S. Silva, Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2010, pp. 273-274.