

COMPORTAMENTO DO BETÃO DA BARRAGEM DE DAIVÕES AO LONGO DO TEMPO. ENSAIOS DE FLUÊNCIA E AJUSTE A MODELOS SEMI-EMPÍRICOS



Carlos Serra
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa
cserra@lnec.pt



João Conde Silva
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa
jrsilva@lnec.pt



Manuel Vieira
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa
mvieira@lnec.pt

SUMÁRIO

No contexto da construção do Sistema Electroprodutor do Tâmega, concessionado à empresa Iberdrola, apresenta-se o plano de ensaios preconizado para o controlo de qualidade do betão e para a avaliação do comportamento do betão ao longo do tempo, assim como um resumo dos respetivos resultados. De entre os ensaios realizados, destacam-se os de fluência em compressão com idades de carregamento entre 3 e 92 dias. Com base nos resultados dos ensaios de fluência foram ajustados os parâmetros de uma lei de fluência básica representativa do comportamento diferido.

Palavras-chave: Barragem de Daivões; Betão de barragens; Ensaios de fluência; Modelos semi-empíricos

1. INTRODUÇÃO

O conjunto barragem-fundação-albufeira constitui um sistema estrutural complexo com características específicas condicionadas por circunstâncias espaciotemporais, tais como as propriedades do maciço de fundação e as disponibilidades de matérias-primas para a produção do betão.

Na construção de barragens de grande dimensão é usual recorrer a composições de betão no sentido de otimizar a relação entre os custos de produção e os requisitos estruturais e de durabilidade. Para além disso, com a aplicação do betão em massa, a dimensão máxima dos agregados e a utilização de adições é muito superior à dos betões correntes. Neste contexto,

é necessário um maior controlo de qualidade e programas específicos para a caracterização do betão aplicado em obra.

O betão aplicado em grandes barragens é produzido com agregados de grandes dimensões pelo que, para a realização de ensaios, se requiere a utilização de provetes de dimensões maiores que as correntes e de equipamento laboratorial de grande capacidade, o que dificulta a logística dos respetivos ensaios. Devido a estes constrangimentos, o controlo de qualidade e a caracterização do betão de barragens recorre principalmente aos resultados do betão crivado, obtido por crivagem do betão integral (betão em massa estrutural) [1, 2]. Os extensómetros embebidos são envolvidos com este tipo de betão.

A crivagem consiste na remoção, em fresco, dos agregados com dimensão superior a um determinado diâmetro (normalmente, 38 mm). Apesar de periodicamente serem feitas campanhas de ensaio com os dois tipos de betão, a relação entre as propriedades dos betões integral e crivado são ainda limitadas ao comportamento instantâneo [3-8]. Por exemplo, o comité 207 do ACI refere que a resistência à compressão de provetes de grandes dimensões com betão integral é 80 a 90 % da resistência do betão crivado obtida em provetes de dimensões correntes.

O fenómeno da fluência do betão tem particular 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 correta avaliação da função de fluência do betão estrutural torna-se essencial, constituindo uma etapa importante da interpretação [9, 10].

No contexto da construção da barragem de Daivões, localizada no rio Tâmega, realizou-se um programa experimental, idealizado em conjunto pela Iberdrola e pelo LNEC, que incluiu ensaios correntes para o controlo de qualidade ao longo da construção e ensaios específicos, entre os quais ensaios de fluência com idades de carregamento entre 3 dias e 2 anos. Devido à grande espessura deste tipo de estruturas, considera-se que não existem perdas significativas de água por secagem, daí que apenas se tenha determinado a fluência básica medida em provetes selados. Este programa foi concretizado no LNEC, designadamente os ensaios de determinação das resistências à compressão, dos módulos de elasticidade em compressão, das velocidades de propagação de ondas ultrassónicas e das extensões específicas totais ao longo do tempo.

Nesta comunicação apresenta-se o referido programa de ensaios ao betão e um resumo dos respetivos resultados, até à idade de carregamento de 92 dias. Complementarmente, apresentam-se os resultados experimentais relativos à mesma amassadura obtidos no laboratório de obra da Iberdrola, localizado em Bustelo (concelho de Ribeira de Pena, Distrito de Vila Real).

Com base nos resultados obtidos foram estimados os parâmetros da lei de fluência básica representativa do comportamento diferido da obra através do modelo de fluência semi-empírico *Double Power Law*, desenvolvido por Bažant e Panulla em 1976 [11]. A lei de fluência básica estimada a partir dos resultados experimentais tem sido utilizada para estimar

as propriedades viscoelásticas do betão ao longo do tempo e prever e interpretar o comportamento estrutural da barragem.

2. PROGRAMA DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO

2.1 Definição do programa de ensaios

O programa de ensaios previa a realização de ensaios laboratoriais de fluência em compressão de provetes de betão crivado, considerando as idades de carregamento de 3, 7, 14, 28, 90, 365, 730 e 1825 dias, recorrendo a 18 provetes prismáticos selados com dimensões 150×150×600 mm³, e do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, em 32 provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Apresentam-se também alguns resultados de ensaios complementares, efetuados pelo Dono de Obra durante a construção da barragem.

Nos três quadros seguintes apresenta-se uma listagem de ensaios laboratoriais, no que respeita à determinação do módulo de elasticidade (Quadro 1), da resistência à compressão (Quadro 2) e da resistência à tração (Quadro 3), incluindo as idades de ensaio e a forma e dimensão dos provetes. Em relação aos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, utilizaram-se as designações $E_{cilindro}$ e E_{prisma} para os ensaios realizados em provetes cilíndricos de betão integral e crivado, segundo a NP EN 12390-13 [12], e para os ensaios realizados em provetes prismáticos de betão crivado, segundo a especificação LNEC E 397 [13], respetivamente. Por sua vez, as designações $f_{c,cilindro}$ e $f_{c,cubo}$ referem-se aos ensaios de determinação da resistência à compressão em provetes cilíndricos de betão integral e crivado e em provetes cúbicos de betão crivado, respetivamente, segundo a NP EN 12390-3 [14]. Por fim, as designações $f_{t,comp}$ e $f_{t,flex}$ referem-se aos resultados dos ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral realizados em provetes cilíndricos de betão integral e crivado, segundo a NP EN 12390-6 [15], e aos ensaios de tração por flexão realizados em provetes prismáticos de betão crivado, segundo a NP EN 12390-5 [16], respetivamente.

Quadro 1. Caracterização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade em laboratório

Nomenclatura	Propriedade mecânica	Idades de ensaio (dias)	Tipo de provete	Dimensão do provete (mm)
Núcleo, INT	$E_{cilindro}$	7, 28, 90, 180, 365	Cilindro	$\Phi = 300, H = 440$
Núcleo, CRI38	$E_{cilindro}$ E_{prisma}	3, 7, 14, 28, 90, 180, 365, 730 3, 7, 14, 28, 90, 365, 730, 3650	Cilindro Prisma	$\Phi = 150, H = 300$ 150 × 150 × 600

Quadro 2. Caracterização dos ensaios de determinação da resistência à compressão em laboratório

Nomenclatura	Propriedade mecânica	Idades de ensaio (dias)	Tipo de provete	Dimensão do provete (mm)
Núcleo, INT	$f_{c,cilindro}$	7, 28, 90, 180, 365	Cilindro	$\Phi = 300, H = 440$
Núcleo, CRI38	$f_{c,cubo}$ $f_{c,cilindro}$	7, 14, 28, 90, 365 3, 7, 14, 28, 90, 180, 365, 730	Cubo Cilindro	150 x 150 x 150 $\Phi = 150, H = 300$

Quadro 3. Caracterização dos ensaios de determinação da resistência à tração (por compressão diametral e por flexão) em laboratório

Nomenclatura	Propriedade mecânica	Idades de ensaio (dias)	Tipo de provete	Dimensão do provete (mm)
Núcleo, INT	$f_{t,comp}$	90, 365	Cilindro	$\Phi = 300, H = 440$
Núcleo, CRI38	$f_{t,comp}$ $f_{t,flex}$	90, 365 28, 90, 180, 365	Cilindro Prisma	$\Phi = 150, H = 300$ 150 x 150 x 600

2.2 Equipamentos para o ensaio de fluência em compressão

Para a execução dos ensaios de fluência em compressão foram utilizadas prensas específicas para o efeito, com um sistema de compensação da pressão com botija de azoto e óleo hidráulico (Figura 1 a)). Foram adotados dois sistemas redundantes para a medição das deformações em cada provete: um manual e um automático. Ambos os sistemas apoiam-se em duas bases de alongâmetro afastadas 388 mm em cada face, fixas em varões centrados que atravessam toda a secção do provete, perpendicularmente às faces de medida (Figura 1 b)). O sistema manual consiste na medição da distância entre as bases de alongâmetro em cada face (lado A e lado B) através de um alongâmetro com um defletómetro. O sistema automático consiste na medição da distância entre as bases de alongâmetro em cada face (lado A e lado B) através de dispositivos específicos que incorporam transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*linear variable displacement transformer*) para registo em contínuo (Figura 1 c)). As pressões são também obtidas através de medição manual e automática, recorrendo a um transdutor de pressão com manómetro digital (Figura 1 d)). O sistema de aquisição de dados é centralizado numa unidade principal e num modelo de expansão, num total de 60 canais analógicos.



a)



b)



c)



d)

Figura 1. Equipamentos para ensaios de fluência: a) vista geral da sala de ensaios de fluência; b) provetes em ensaio com sistemas de medição das deformações automática e manual; c) transdutores de deslocamento do tipo LVDT; d) transdutor de pressão

3. COMPOSIÇÃO DO BETÃO E PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM, TRANSPORTE E CONSERVAÇÃO DOS PROVETES

3.1 Composição do betão

Na composição do betão da barragem de Daivões utilizou-se cimento VLH IV/B (V) 22,5 que incorpora cerca de 45% da sua composição, em massa, por cinzas volantes. Os agregados utilizados no betão são graníticos. Os agregados finos foram divididos em duas classes, 0/1,2 mm e 1,2/5 mm, e os agregados grossos foram divididos em quatro classes, 5/15 mm, 15/30 mm, 30/70 mm e 70/150 mm. Foi utilizado o adjuvante Muraplast FK 88i como plastificante.

No Quadro 4 apresentam-se as composições dos dois tipos de betão e as suas relações água-cimento, respetivamente. O cálculo das dosagens foi efetuado assumindo valores de massa volúmica de 2635 kg/m³, 2668 kg/m³, 2800 kg/m³, 1000 kg/m³ e 1200 kg/m³ para o agregado grosso, o agregado fino, o ligante, a água e o adjuvante, respetivamente. Considerou-se um teor de ar de 1%. A composição do betão crivado foi estimada a partir das dosagens do betão integral removendo os volumes aproximados de agregado com dimensões superiores a 38 mm e o volume de argamassa envolvente desses agregados perdida durante a crivagem [17].

Quadro 4. Dosagens dos componentes do betão integral do núcleo (INT) e do respetivo betão crivado (CRI38)

Tipo de betão	Cimento (kg/m ³)	Água adicionada (kg/m ³)	Água agregados (kg/m ³)	Água total (kg/m ³)	Adjuvante (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grosso (kg/m ³)	Relação água-cimento
Núcleo, INT	173,7	92,3 [†]	15,9	108,3	1,8	569,9	1619,3	0,62
Núcleo, CRI38 ^{††}	240,0	126,9 [†]	23,9	150,8	2,4	756,2	1141,9	0,63

[†] 74% do valor de água corresponde a gelo
^{††} Valores estimados

3.2 Procedimentos de moldagem, transporte e conservação dos provetes

A moldagem dos provetes foi efetuada pela equipa da empresa Cemoso, responsável pelas colheitas de betão em obra, e acompanhada por técnicos do LNEC que se encarregaram da operação de selagem dos provetes. A compactação do betão foi efetuada recorrendo a mesa vibratória, à semelhança da compactação dos provetes utilizados na caracterização e controlo de qualidade do betão. A selagem dos provetes prismáticos destinados aos ensaios de fluência foi realizada com folha de chumbo, imediatamente após a moldagem dos provetes.

Os provetes selados encontram-se na sala de fluência do Departamento de Materiais do LNEC com temperatura ambiente de 20°C ± 2°C. Os provetes não selados são mantidos em ambiente com humidade relativa de 95% e temperatura de 20°C ± 2°C.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 Considerações iniciais

Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios realizados no âmbito do programa de ensaios de fluência complementares, realizados no LNEC, bem como de alguns ensaios realizados pelo dono de obra. Os referidos ensaios são os de determinação da massa volúmica, da resistência à compressão, do módulo de elasticidade em compressão, da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, da resistência à tração por flexão e da resistência à tração por compressão diametral. São apresentados os resultados dos ensaios de fluência para as idades de carregamento de 3, 7, 14, 28 e 92 dias, incluindo as extensões livres e totais, as extensões totais corrigidas e as extensões específicas totais de cada provete.

4.2 Determinação do módulo de elasticidade

Na Figura 2 apresentam-se os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade realizados com provetes prismáticos selados com dimensões de $150 \times 150 \text{ mm}^2$ de secção transversal e altura de 600 mm ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$), provetes cilíndricos não selados com diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm ($\Phi 150 \times 300 \text{ mm}^3$) de betão crivado.

Os resultados obtidos entre os dois laboratórios são coerentes entre si e apresentam uma evolução significativa após os 200 dias de ensaio, devido principalmente à grande quantidade de cinzas volantes utilizada na composição do ligante.

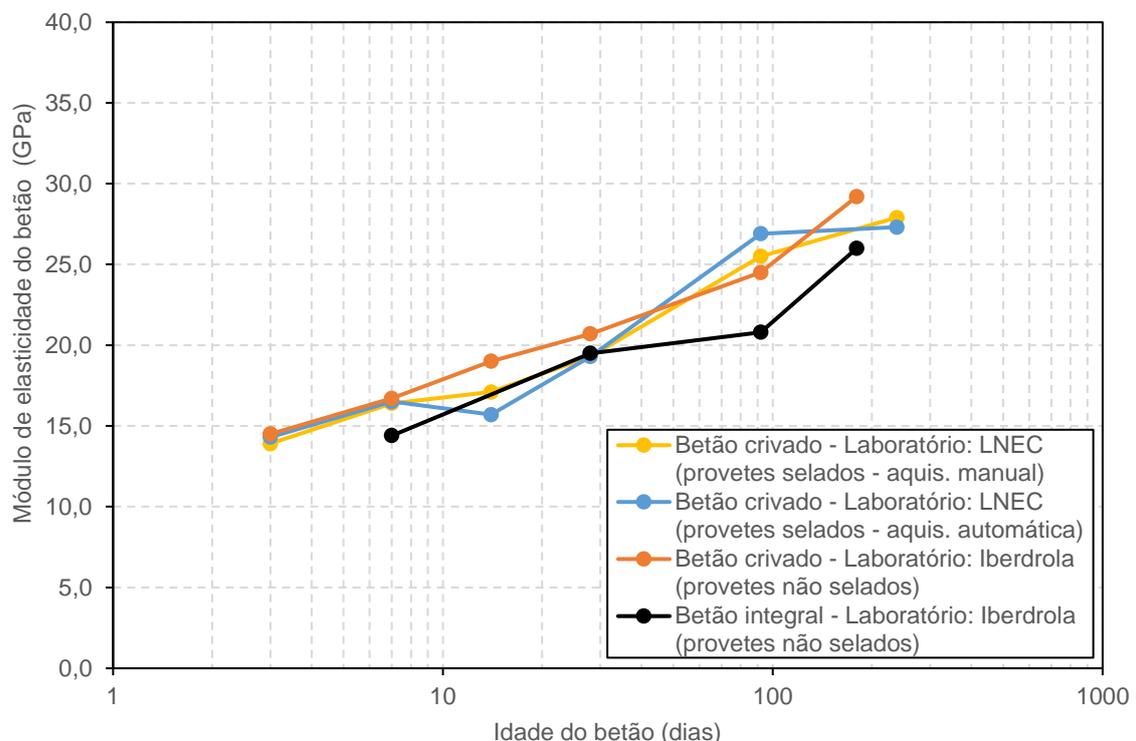


Figura 2. Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade do betão crivado e do betão integral

4.3 Determinação da resistência à compressão

Na Figura 3 apresentam-se os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão obtidos em provetes cilíndricos não selados com diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm ($\Phi 150 \times 300 \text{ mm}^3$) de betão crivado.

Em relação aos resultados de resistência à compressão, verifica-se alguma diferença entre os resultados obtidos no laboratório de obra e no laboratório do LNEC, apesar de terem sido obtidos do mesmo tipo de provetes e terem sido submetidos a condições ambientais semelhantes. Os valores de resistência à compressão são moderados não ultrapassando os 25 MPa aos 90 dias. Verifica-se uma evolução significativa após essa idade (aumentos de mais de 30% após 90 dias) quando comparada com o desenvolvimento da resistência de betões convencionais, sem adições significativas de cinzas volantes.

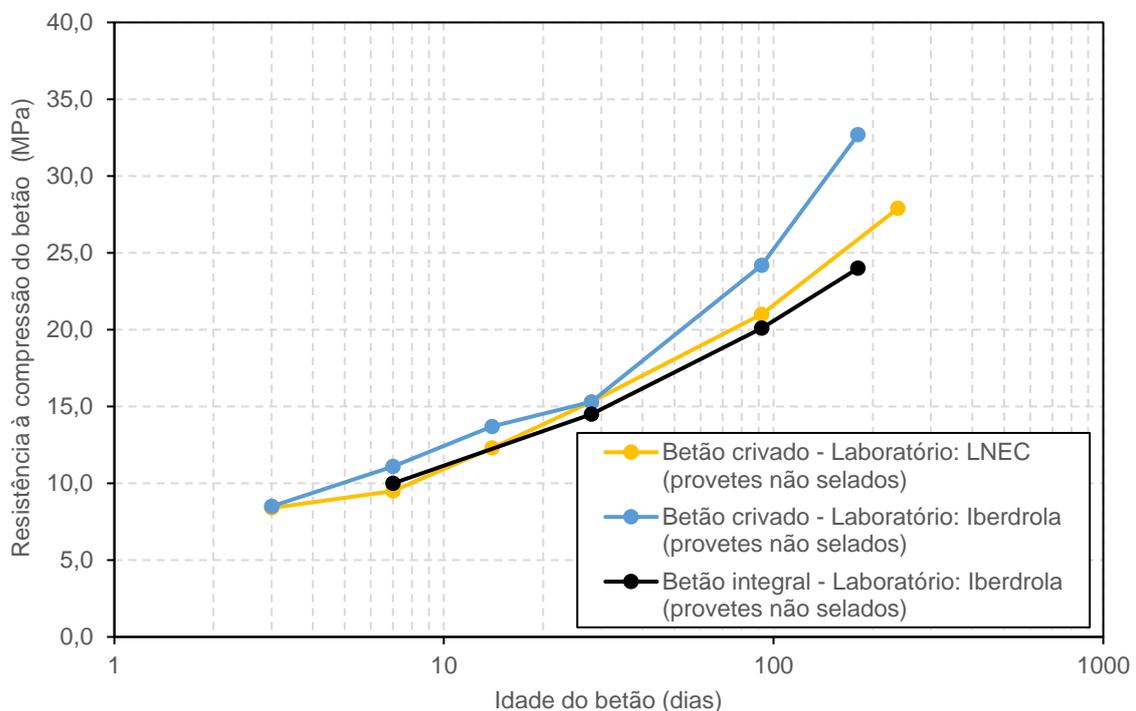


Figura 3. Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão do betão crivado e do betão integral

4.4 Determinação das extensões de fluência

A fluência corresponde ao aumento no tempo da extensão sob tensão constante, $\sigma(t_0)$, em condições de temperatura constante. As deformações instantâneas, $\varepsilon^i(t_0)$, e de fluência, $\varepsilon^c(t, t_0)$, dependem da magnitude da tensão, sendo a função de fluência, $J(t, t_0)$, a deformação total para uma tensão unitária, representando t o tempo decorrido desde a betonagem e t_0 a idade de carregamento, isto é, a idade do betão à data do carregamento. Tem-se então,

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

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

No sentido de quantificar a fluência do betão, procede-se ao cálculo das extensões específicas a partir das extensões medidas em cada provete, ou seja, a extensão para uma tensão unitária, após o início do ensaio de fluência. Para que se possam medir as extensões de fluência devidas apenas à tensão aplicada, é necessária a moldagem de provetes ativos e corretores. As extensões medidas no provete ativo correspondem a extensões totais, $\varepsilon^{total}(t, t_0)$, e as extensões livres medidas no provete corretor correspondem a extensões devidas às variações de temperatura e a deformações autogéneas, $\varepsilon^{corr}(t)$. As extensões totais subtraídas das extensões medidas no provete corretor, designadas por extensões totais corrigidas, $\varepsilon^{total\ corr}(t, t_0)$, e as extensões totais específicas, $\varepsilon^{total\ esp}(t, t_0)$, são dadas por,

$$\varepsilon^{total\ corr}(t, t_0) = \varepsilon^{total}(t, t_0) - \varepsilon^{corr}(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon^{total\ esp}(t, t_0) = \frac{\varepsilon^{total\ corr}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (4)$$

Esta secção apresenta os resultados de cada uma das parcelas das equações (3) e (4) para cada idade de carregamento, t_0 , obtidos através de medição manual e automática das deformações. Os valores positivos correspondem a extensões e tensões de tração e os valores negativos a extensões e tensões de compressão.

A Figura 4 apresenta as extensões específicas totais obtidas durante os ensaios de fluência com recurso a medição automática para as várias idades de carregamento, em função da idade do betão.

Verifica-se que existe coerência entre os resultados obtidos e as características diferidas do betão. Salientam-se a diminuição progressiva das extensões diferidas ao longo do tempo para cada idade de carregamento (valores mais elevados das extensões específicas totais e diferidas para as idades jovens, 3 e 7 dias, em comparação com as idades mais avançadas, 28 e 92 dias) e a diminuição das extensões específicas instantâneas ao longo do tempo. Observa-se também que as extensões específicas diferidas para as idades de carregamento de 3 e 7 dias são muito semelhantes. Verifica-se que as extensões diferidas continuam a aumentar (ainda que com uma pequena taxa de aumento, abaixo de $10 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ em 100 dias), mesmo após vários dias de carregamento, para todas as idades de carregamento do betão.

O Quadro 5 resume os resultados obtidos para cada idade de carregamento e apresenta o cálculo do coeficiente de fluência obtido experimentalmente, $\phi^{exp}(t, t_0)$, com base na expressão (5). Como seria expectável, os valores de coeficiente de fluência obtidos diminuem com a idade de carregamento e são considerados baixos quando comparados com valores calculados considerando a regulamentação específica para estruturas de betão [18].

$$\phi^{exp}(t, t_0) = \frac{\varepsilon^{esp\ total}(t, t_0)}{\varepsilon^{esp\ inst}(t_0)} \quad (5)$$

Quadro 5. Determinação do coeficiente de fluência experimental para as várias idades de carregamento

Provede	Idade de carregamento, t_0 (dias)	Tempo sob tensão, $t-t_0$ (dias)	Tensão, $\sigma(t_0)$ (MPa)	$\varepsilon^{inst\ esp}(t_0)$ ($\times 10^{-6}/\text{MPa}$)	$\varepsilon^{total\ esp}(t, t_0)$ ($\times 10^{-6}/\text{MPa}$)	$\Phi^{exp}(t, t_0)$
3	3	219,8	3,0	69,9	156,0	1,2
11			3,5	71,9	136,2	0,9
4	7	215,9	2,7	60,4	133,6	1,2
12			2,1	61,0	120,3	1,0
5	14	209,0	4,2	64,0	116,0	0,8
13			4,6	58,4	97,6	0,7
6	28	195,0	4,6	51,7	86,7	0,7
14			4,8	51,6	84,1	0,6
7	92	130,8	7,0	37,0	50,7	0,4
15			5,3	42,0	61,9	0,5

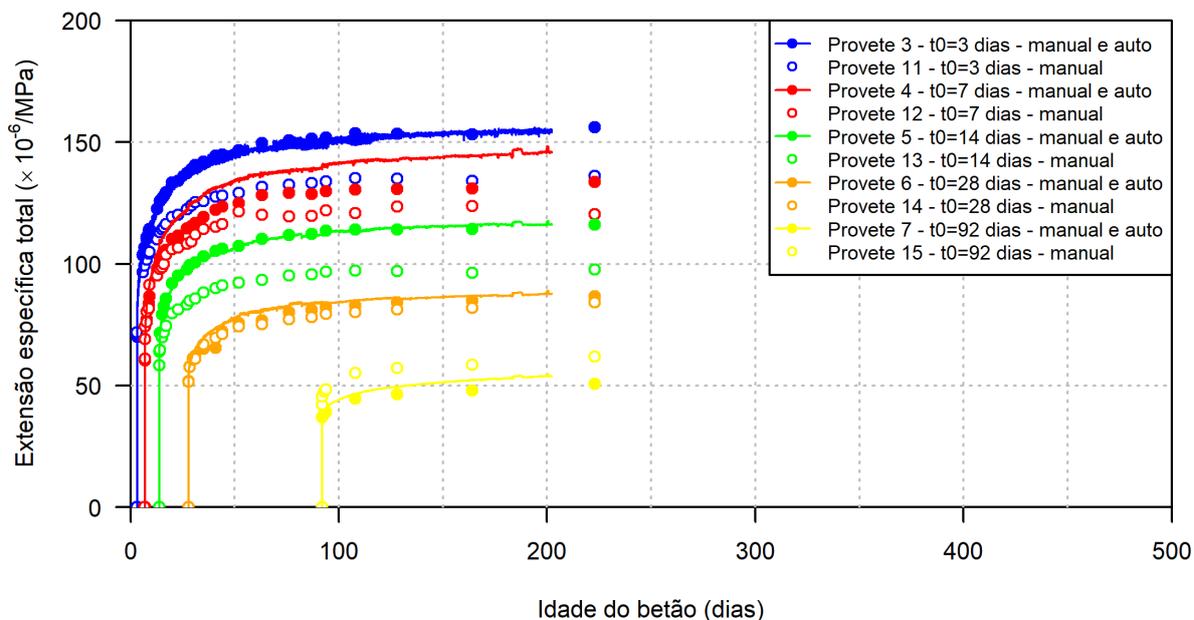


Figura 4. Comparação das extensões específicas totais para diferentes idades de carregamento

5. AJUSTE DOS RESULTADOS A MODELOS DE FLUÊNCIA SEMI-EMPÍRICOS

5.1 Considerações iniciais

Os modelos de previsão estão associados a funções com características específicas, escolhidas de forma a traduzirem o fenómeno físico da fluência do betão. Os parâmetros destas funções, determinados 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.

5.2 Modelo de Bažant e Panula (BaP) de previsão da função de fluência e ajuste aos resultados experimentais

No modelo de Bažant e Panula (BaP) [11], 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, $C_d(t, t_0, t')$, de acordo com as expressões (6) e (7).

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, $t-t_0$.

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

$$C_0(t, t_0) = \frac{\phi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha) (t - t_0)^n \quad (7)$$

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

Dado que, no caso de barragens, o betão não tem, na prática, perdas de água para o exterior, considera-se que a parcela da fluência de secagem não tem significado face aos valores de fluência básica.

A previsão do valor do módulo de elasticidade ao longo do tempo (expressão (8)) pode ser obtida a partir das expressões (6) e (7) considerando o tempo sob carga, $t-t_0$, igual a 0,01 dias,

$$\frac{1}{E(t_0)} = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} 100^{-n} (t_0^{-m} + \alpha) \quad (8)$$

Note-se que as expressões do modelo de previsão BaP foram calibradas com base em vários ensaios experimentais disponíveis na literatura abrangendo vários tipos de betão [11].

Na ausência de resultados de ensaios de fluência, os parâmetros da lei de fluência podem ser estimados recorrendo ao modelo de previsão que considera apenas como característica intrínseca do material o valor de $f_{c,28}$ (em MPa) [19], através das expressões (9) a (12).

$$\phi_1 = 0,3 + 152,2 f_{c,28}^{-1,2} \quad (9)$$

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

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

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

Neste trabalho, dadas as características particulares do betão de barragens e a existência de resultados de ensaios de fluência, optou-se por fazer o ajuste dos parâmetros do modelo BaP considerando esta informação. Ajustaram-se os parâmetros ϕ_1 , m , n e α através da minimização da diferença entre a fluência calculada pelo modelo e os resultados experimentais das extensões específicas para as idades de carregamento entre 3 e 92 dias. Considerou-se ainda no ajuste a estimativa do módulo de elasticidade e os resultados experimentais obtidos ao longo do tempo. A primeira estimativa dos parâmetros ϕ_1 , m , n e α para o processo de minimização foi obtida considerando, nas expressões (9) a (12), o valor médio da resistência à compressão do betão crivado aos 90 dias (21,0 MPa). A estimativa do

parâmetro E_0 foi obtida a partir da expressão (8), considerando o valor médio de módulo de elasticidade aos 238 dias (27,3 GPa), por forma a ter uma melhor aproximação a longo prazo. A expressão preliminar (13) representa a função de fluência que ajusta os resultados experimentais.

$$J^{BaP}(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha)(t - t_0)^n = \frac{1}{34,3} + \frac{4,04}{34,3} (t_0^{-0,42} + 0,00)(t - t_0)^{0,11} \quad (GPa^{-1}) \quad (13)$$

No Quadro 6 verifica-se uma boa concordância entre os valores de coeficiente de fluência estimados pelo ajuste ao modelo BaP (Eq. (14)) e os valores obtidos experimentalmente, para as várias idades de carregamento.

$$\phi^{BaP}(t, t_0) = J^{BaP}(t, t_0)E^{BaP}(t_0) - 1 \quad (14)$$

Quadro 6. Determinação do coeficiente de fluência experimental para as várias idades de carregamento

Idade de carregamento, t_0 (dias)	Tempo sob tensão, $t-t_0$ (dias)	$E^{BaP}(t_0)$ (GPa)	$J^{BaP}(t, t_0)$ ($\times 10^{-6}/MPa$)	$\phi^{BaP}(t, t_0)$	$\phi^{exp, média}(t, t_0)$
3	219,8	13,5	159,8	1,2	1,1
7	215,9	16,4	122,9	1,0	1,1
14	209,0	18,9	99,7	0,9	0,8
28	195,0	21,3	81,7	0,7	0,7
92	130,8	24,9	60,0	0,5	0,5

A Figura 5 apresenta os valores de extensão específica total medidos nos provetes ensaiados, o ajuste preliminar da função de fluência, $J(t, t_0)$, e respetiva evolução das extensões específicas instantâneas, $1/E(t_0)$. Na Figura 6 apresentam-se os correspondentes valores da evolução do módulo de elasticidade obtidos do ajuste preliminar e a comparação com os resultados experimentais obtidos nos provetes ensaiados.

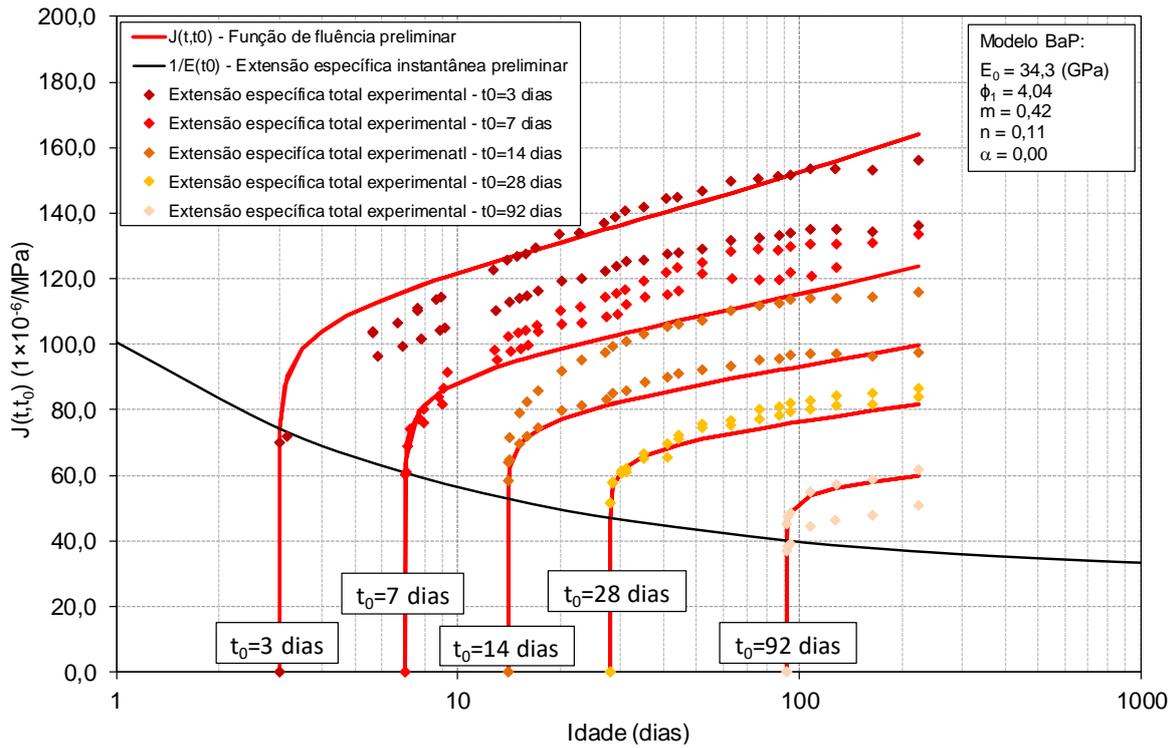


Figura 5. Ajuste preliminar das extensões específicas instantâneas, da função de fluência e resultados dos ensaios de fluência para as várias idades de carregamento

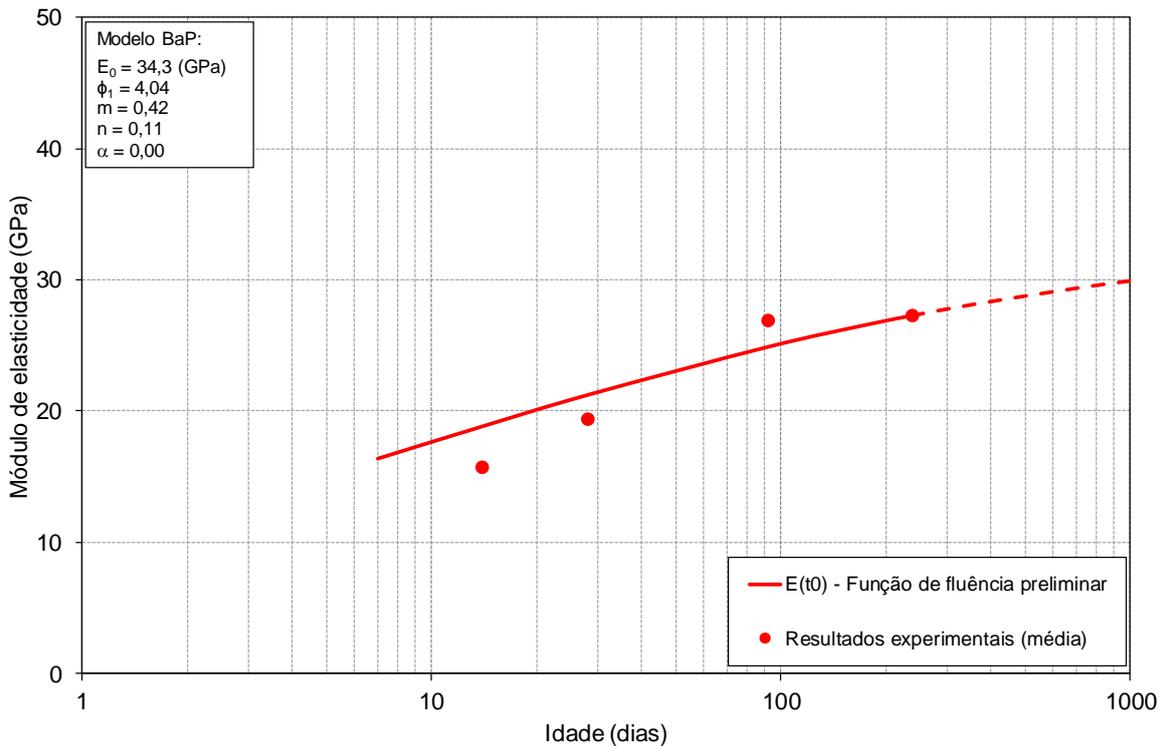


Figura 6. Valores de módulo de elasticidade segundo o ajuste preliminar da função de fluência e resultados dos ensaios

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta comunicação apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais correntes e nos ensaios de fluência do betão crivado, obtido do betão integral do tipo 1 da barragem de Daivões, para as idades de carregamento de 3, 7, 14, 28 e 92 dias de idade, durante períodos de 3 a 6 meses de carregamento.

Os resultados experimentais mostram um desenvolvimento significativo dos valores de módulo de elasticidade do betão crivado após seis meses de idade, valores de extensão específica total e diferida reduzidos e, conseqüentemente, valores de coeficiente de fluência também reduzidos.

Foi também efetuado um ajuste preliminar da função de fluência do modelo de Bažant e Panula (BaP) aos resultados experimentais de módulo de elasticidade ao longo do tempo e das extensões específicas totais para todas as idades de carregamento previstas, durante períodos de 3 a 6 meses de carregamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Iberdrola pela autorização de publicação dos resultados dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] ICOLD – *ICOLD Bulletin: The physical properties of hardened conventional concrete in dams*. Draft for ICOLD review, 2008,
- [2] USBR – *Concrete manual. A water resources technical publication*, 8th Ed. Washington, United States Government Printing Office, 1988,
- [3] Popovics, S.; Ujhelyi, J. – “Contribution to the concrete strength versus water-cement ratio relationship”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2008, vol. 20, no. 7, pp. 459–463.
- [4] Elices M.; C. Rocco – “Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete”, *Eng. Fract. Mech.*, 2008, vol. 75, no. 13, pp. 3839-3851.
- [5] Vilardell J. et al. – “Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete”, *Cem. Concr. Res.*, 1998, vol. 28, no. 1, pp. 93–101.
- [6] Topçu, I. B.; Ugurlu; A. – “Elasticity theory of concrete and prediction of static E-modulus for dam concrete using composite models”, *Tek. Dergi*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 4055–4067.
- [7] Khaloo, A. R.; Mohamadi Shooreh, M. R.; Askari, S. M. – “Size influence of specimens and maximum aggregate on dam concrete: Compressive strength”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2009, vol. 21, no. 8, pp. 349–355.
- [8] Deng, Z.; Li, Q.; Fu, H. – “Comparison between Mechanical Properties of Dam and Sieved Concretes”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2008, vol. 20, no. 4, pp. 321–326.

- [9] Ramos, J.M. – *Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985, Tese de Especialista, 223 p..
- [10] Pinho, J.L. – *Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989, Tese de Especialista, 306 p.
- [11] Bažant, Z. P.; Osman, E. – “Double power law for basic creep of concrete”, *Materials and Structures (RILEM, Paris)*, 1976, vol. 9, no. 49, p. 3-11.
- [12] IPQ – *NP EN 12390-13: 2014. Ensaaios do betão endurecido. Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*, 2014, IPQ, Caparica.
- [13] LNEC – *Especificação LNEC E 397:1993 Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*, 1993, Lisboa.
- [14] IPQ – *NP EN 12390-3: 2011. Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*, 2011, IPQ, Caparica.
- [15] IPQ – *NP EN 12390-6: 2011. Ensaaios do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes*, 2011, IPQ, Caparica.
- [16] IPQ – *NP EN 12390-5:2009. Ensaaios do betão endurecido; Parte 5: Resistência à flexão de provetes*, IPQ, Caparica.
- [17] Serra, C. – *Prediction of dam concrete structural properties based on wet-screened test results and mesoscale modelling*. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, 2017, Tese de doutoramento, 368 p.
- [18] IPQ – *NP EN 1992-1-1:2010 – Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão; Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, 2010, IPQ, Caparica.
- [19] Neville, A.; Dilger, W.; Brooks, J. – *Creep of plain and structural concrete*. New York: Longman Inc., 1983, 361 p.