

ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DEFORMABILIDADE DO BETÃO DE GRANDES BARRAGENS PORTUGUESAS



Carlos Serra*

Bolseiro de Doutoramento
LNEC, DBB
Lisboa
cserra@lnec.pt



António Lopes Batista

Investigador Principal
LNEC, DBB
Lisboa
a.l.batista@lnec.pt



Nuno Monteiro Azevedo

Investigador Auxiliar
LNEC, DBB
Lisboa
nazevedo@lnec.pt

SUMÁRIO

A caracterização das propriedades dos materiais estruturais através de ensaios é prática corrente em obras onde as deformações e tensões são elevadas, como pontes de grande vão, centrais nucleares, edifícios altos e grandes barragens.

Neste trabalho apresentam-se alguns estudos de avaliação da correlação entre a composição e as propriedades de deformabilidade dos betões integral e crivado utilizados na construção de barragens. Para isso compilaram-se os elementos relativos à composição e aos principais resultados dos ensaios de deformabilidade do betão de diversas barragens portuguesas, efetuados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil desde 1951. Foi possível estabelecer correlações entre alguns dados de composição e os resultados experimentais e entre os coeficientes de fluência do betão crivado e do betão integral, considerando os resultados dos ensaios realizados em laboratório e *in situ*.

Palavras-chave: Betão de barragens, deformabilidade do betão, ensaios *in situ* e em laboratório, correlação entre propriedades mecânicas

1. INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos hídricos, nas suas vertentes de captação de água para abastecimento público, rega e para produção de energia, continua a ter uma grande importância nos países desenvolvidos e em vias de desenvolvimento. A esta exploração estão, em numerosos casos, associadas barragens, que muitas vezes também se destinam ao controlo de cheias. A este tipo de estruturas são inerentes duas preocupações atuais: a manutenção e controlo de segurança das estruturas existentes, tendo muitas delas dezenas de anos; e o desenvolvimento de soluções técnicas, produtos e processos construtivos adequados às novas exigências impostas pelas obras em projeto, construção, reabilitação e reforço.

A orografia do terreno e as características dos maciços rochosos das regiões com maior potencial hidroelétrico em Portugal, associados à necessidade de escoar elevados caudais de cheia, e a adequação de soluções do tipo abóbada, arco-gravidade e gravidade, levou ao uso do betão em muitas destas obras. Entre as grandes barragens existentes em Portugal, uma percentagem significativa é de betão (cerca de 30% das barragens com mais de 15 m de altura e cerca de 50% das barragens com mais de 30 m de altura, segundo dados referentes a 2005). A experiência de projeto, construção e acompanhamento destas obras permitiu adquirir um extenso conhecimento [1].

A compreensão do comportamento do betão à escala do material e o conhecimento dos parâmetros dos modelos reológicos a considerar na análise das estruturas, nomeadamente os relativos à função de fluência e à capacidade resistente do betão, permitirão melhorar a definição dos requisitos dos materiais na fase de projeto, o controlo da qualidade do betão durante a construção e a interpretação do comportamento das estruturas. Existem bases de dados de resultados experimentais de ensaios de fluência e retração de diversas proveniências [2], que são de grande utilidade no estabelecimento dos modelos relativos à deformabilidade instantânea e diferida, mas os ensaios específicos são, em regra, apenas efetuados em obras de maior dimensão. No caso particular de barragens, a caracterização das propriedades do betão estrutural (betão integral) é condicionada pela grande dimensão dos agregados, pelo que é utilizado o betão crivado nessa caracterização, obtido do integral através de crivagem, em fresco, dos agregados de maior dimensão.

De forma a complementar o conhecimento das propriedades mecânicas dos betões integral e crivado das barragens, apresenta-se a análise integrada dos resultados disponíveis de ensaios de deformabilidade do betão de algumas barragens portuguesas, considerando, na medida do possível, também os dados relativos à sua composição. Os resultados apresentados foram compilados a partir de trabalhos publicados no LNEC ao longo das últimas décadas [3 a 12]. Pretende-se, com os referidos elementos, discutir os parâmetros característicos do comportamento diferido do betão das barragens em Portugal, identificando os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas do betão ao

longo do tempo, e estimar as propriedades do betão integral em condições de obra a partir dos resultados dos ensaios de betão crivado em laboratório.

2. COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO DE BARRAGENS

2.1 Considerações gerais

O comportamento diferido tem especial relevância na engenharia de estruturas, uma vez que, para além de estar diretamente relacionado com o aumento das deformações da estrutura ao longo do tempo sob a ação de forças permanentes (fluência), é também responsável pela relaxação de tensões sob deformações impostas, que é especialmente relevante no caso de barragens de betão. O conhecimento das propriedades mecânicas, através de ensaios correntes (determinação das resistências e do módulo de elasticidade), em conjunto com um bom controlo de qualidade do fabrico do betão, permite uma primeira previsão do comportamento diferido do betão através de expressões empíricas (§2.2).

Os fatores que determinam o comportamento diferido são vários, podendo dividir-se em intrínsecos (inalteráveis após o endurecimento) e extrínsecos (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 fatores extrínsecos 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 [7].

A composição do betão integral de barragens limita a execução de um grande número de ensaios experimentais, pelo que a previsão do seu comportamento diferido é ainda objeto de estudo. Atualmente não se dispõem de correlações entre o comportamento diferido do betão integral e do betão crivado, devido, principalmente, à referida escassez de resultados de ensaios. Esta questão tem constituído tema de estudo no LNEC nas últimas décadas [6, 7, 8, 13]. Alguns resultados experimentais, para determinação da função de fluência, mostram uma relação de 60 a 70% entre as deformações diferidas do betão integral e do betão crivado [7].

2.2 Composição do betão de barragens

Devido às condições específicas da utilização do betão em barragens, existem características que diferenciam o betão de barragens relativamente aos betões usados em estruturas correntes de edifícios e pontes. Sendo aplicado em massa, a colocação de grandes volumes de betão moldado *in situ* obriga à adoção de medidas de controlo da geração do calor de hidratação, sendo que as variações de volume associadas são suscetíveis de causar fendilhação [14]. Para cada barragem é produzido um betão com características próprias, designando-se, segundo a EN206-1 de 2005 [15], por betão de composição prescrita (“betão cujas propriedades requeridas e características adicionais são

especificadas ao produtor, que é responsável por fornecer um betão com a composição especificada”), sendo necessária a caracterização do sua resistência e deformabilidade para que possam ser consideradas na análise e interpretação do comportamento estrutural, com vista à avaliação da funcionalidade e da segurança das obras.

O betão de barragens é pobre em cimento, com dosagens entre 100 e 300 kg/m³, sendo comum a utilização de adições em grande percentagem, chegando a valores da ordem de 100% da dosagem de cimento (estas adições, em regra cinzas de alto forno ou pozolanas, para além das vantagens económicas, destinam-se a fazer face a outros efeitos, nomeadamente ao controlo do calor de hidratação dos cimentos e à prevenção de reações expansivas de origem interna). A dimensão máxima dos agregados é, em geral, 150 mm, e a percentagem de agregados pode atingir 60% do volume total.

O betão com agregados de grandes dimensões (betão integral) torna inviável a utilização de provetes correntes para ensaios em laboratório na avaliação sistemática das suas propriedades mecânicas. Para superar estas dificuldades é utilizado o betão crivado, obtido do integral, do qual são retirados os agregados de maiores dimensões (correntemente superiores a 38 mm). O betão crivado é amplamente ensaiado e envolve a aparelhagem de observação, ou seja, é aquele a partir do qual é feito o controlo de qualidade em obra e são medidas as extensões em extensómetros embebidos.

2.3 Condições de maturação do betão em barragens

No caso das barragens de betão, a libertação do calor de hidratação durante o processo de presa e endurecimento e o conseqüente risco de fendilhação no período de abaixamento de temperatura, constituem uma importante condicionante durante a fase de construção. Para a avaliação do risco de fendilhação é necessário conhecer a evolução das características mecânicas do betão aplicado em obra durante o período de arrefecimento, o qual poderá demorar alguns anos.

Nos ensaios em laboratório é possível caracterizar o comportamento do betão em condições controladas. Contudo, *in situ* as temperaturas do betão podem ter variações significativas, principalmente nas primeiras idades, podendo atingir 50 °C. As variações de temperatura influenciam a evolução das propriedades mecânicas, sendo que temperaturas mais elevadas aumentam a taxa de desenvolvimento das propriedades de deformabilidade e de resistência do betão.

2.4 Deformabilidade diferida do betão

O comportamento mecânico do betão depende da sua idade. A deformabilidade tem uma parcela instantânea, relacionada com o módulo de elasticidade, $E(t_0)$, e o coeficiente de *Poisson*, ν , e uma parcela diferida, depende do tempo sob carregamento, relacionada com a função de fluência, $J(t, t_0)$, e de relaxação, $R(t, t_0)$.

A fluência corresponde ao aumento de extensão sob tensão, $\sigma(t_0)$, e temperatura constantes. A extensão total, $\varepsilon^{total}(t, t_0)$, corresponde à soma das deformações instantâneas, $\varepsilon^i(t_0)$, e de fluência, $\varepsilon^c(t, t_0)$, depende da magnitude da tensão. A função de fluência, $J(t, t_0)$, corresponde à deformação total para uma tensão unitária, representando t o tempo decorrido e t_0 a idade de carregamento. Tem-se então,

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

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

O coeficiente de fluência, $\phi(t, t_0)$, quantifica as deformações de fluência através da proporção da deformação diferida, $\varepsilon^{fluência}(t, t_0)$, num determinado instante, t , relativamente à parcela instantânea, $1/E(t_0)$, referidas a uma idade de carregamento pré-definida, t_0 .

$$\phi(t, t_0) = \varepsilon^{fluência}(t, t_0)E(t_0) = J(t, t_0)E(t_0) - 1 \quad (3)$$

A definição da função de fluência desde as idades jovens tem sido objeto de vários estudos, resultando em várias formulações para a previsão das extensões de fluência ao longo do tempo. Os modelos de previsão mais utilizados são os desenvolvidos por Bažant, BaP [16], BP-KX [17] e, o mais recente, B3 [18], os modelos recomendados pela Federação Internacional do Betão Estrutural (FIB), *fib* Model Code 90 [19] e o atual *fib* Model Code 2010 [20], os modelos propostos pelo Instituto Americano do Betão (ACI), ACI-ASCE [21] e ACI 209R-92 [22], e o modelo GL2000 de Gardner e Lockman [23].

As condições específicas a que o betão de barragens se encontra sujeito, próximas da hipótese de isolamento higrométrico e com tensões de pequena intensidade (usualmente abaixo de 40% da tensão de rotura), levam a que apenas a fluência primária e básica seja considerada relevante na análise global do comportamento de barragens em condições de serviço [6, 7 e 24].

A forma logarítmica (3) para a função de fluência do betão de barragens,

$$J(t, t_0) = K(t_0) + F(t_0) \log(t), \quad (3)$$

tem sido proposta em diferentes estudos [3, 6 e 7], sendo vantajosa dado o baixo número de parâmetros a determinar, à facilidade do cálculo desses parâmetros recorrendo a resultados experimentais e ainda por se adaptar bem à fluência primária e básica que se verifica nas barragens. As desvantagens deste tipo de função estão associadas ao difícil ajuste aos resultados experimentais em toda a duração do ensaio e à definição dos parâmetros $K(t_0)$ e $F(t_0)$ para cada idade de carregamento, t_0 .

Tem havido uma atualização contínua dos modelos de previsão decorrente da observação de diversas pontes com deformações excessivas, pelo que não devem ser utilizados apenas resultados experimentais de fluência de provetes mantidos em laboratório, mas também resultados de observação das estruturas para a definição de funções de fluência mais adequadas [25].

No presente trabalho o ajuste dos resultados dos ensaios de fluência à função logarítmica permitiu uma comparação direta das propriedades de deformabilidade diferida do betão de diversas barragens e o estudo da influência das condições de maturação, em laboratório e *in situ*, no desenvolvimento das deformações.

2.5 Caracterização da deformabilidade do betão através de células de fluência

As células de fluência constituem uma técnica específica de caracterização do comportamento diferido do betão. Cada célula é constituída por um provete cilíndrico de betão inserido no corpo da barragem, de modo a estar sujeito às mesmas condições termo-higrométricas, mas isolado do seu campo de tensões. Através de um macaco plano, acionado por um sistema de carga, pode aplicar-se ao provete uma tensão normal, sendo a correspondente extensão medida, no seu interior, através de extensómetros embebidos. Com este sistema podem realizar-se ensaios de deformabilidade instantânea, para avaliação do módulo de elasticidade, e ensaios de fluência, mantendo a tensão constante no tempo. A utilização de células de fluência teve os seus primeiros desenvolvimentos na barragem do Carrapatelo, em 1967, e ainda hoje se recorre à instalação deste tipo de dispositivos nas barragens de betão mais importantes, dado que permitem a realização de ensaios nas condições termo-higrométricas do betão estrutural [26]. Em geral existem dois tipos de células de fluência, as células de betão integral (betão estrutural) e as células de betão crivado. Pretende-se, para além de caracterizar a deformabilidade do betão integral, conhecer a sua relação com a deformabilidade do betão crivado e, também, a influência das condições *in situ*. Até 1983 a crivagem era feita, em regra, pelo peneiro de abertura de 75 mm. A partir da construção da barragem do Torrão, em 1985, o peneiro utilizado passou a ser o de abertura de 38 mm. Foram instaladas células com betões crivados pelos dois peneiros nas barragens do Funcho e do Alto Lindoso, ambas em 1988, na barragem do Baixo Sabor, em 2012, e na barragem de Ribeiradio, em 2013.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA DEFORMABILIDADE DO BETÃO DE BARRAGENS

3.1 Composição dos betões analisados

A dificuldade de caracterização do comportamento do betão através de ensaios experimentais está associada à quantidade de variáveis envolvidas, nomeadamente aos tipos de materiais utilizados e, conseqüentemente, à variabilidade das suas propriedades, às dosagens de cada componente, às condições de betonagem e às condições de cura. No Quadro 1 são apresentados os elementos disponíveis sobre o betão das barragens analisadas. A primeira utilização de cinzas volantes em Portugal aconteceu na barragem de Alqueva (antes eram usados cimentos de alto forno), tendo a sua proporção vindo a aumentar nos últimos anos (na barragem do Alto Ceira II superou a dosagem de cimento). A

relação água-ligante variou entre 0,7 na barragem de Picote (1958) e 0,34 na barragem do Torrão (1988). As dosagens de água apresentadas representam dosagens totais provenientes de água adicionada sob a forma líquida e sólida (gelo) e de humidade dos agregados (de acordo com os elementos disponibilizados). Os agregados graníticos são os mais utilizados, dada a localização das obras e às características deste tipo de rocha.

Quadro 1 – Composição do betão de várias barragens portuguesas

Obra	Ano	Tipo de agregado	D _{max} (mm)	Dosagens (kg/m ³)						Proporções em peso	
				I		a	ag	ag gr	ag fi	I : c : v : a : ag : gr : fi	
				c	v						
Castelo de Bode	1951	Cascalho do rio Zêzere	n.d.	220	0	n.d.	2147	1611	536	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : 9,8 : 7,3 : 2,4	
Venda Nova	1951	Granito	n.d.	225	0	n.d.	2130	1675	455	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : 9,5 : 7,4 : 2	
Salamonde	1953	Granito	n.d.	250	0	n.d.	1992	1554	438	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : 8,0 : 6,2 : 1,8	
Cabril	1954	Granito	150	220	0	130	2064	1652	411	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,59 : 9,4 : 7,5 : 1,9	
Canieçada	1955	Granito	n.d.	250	0	n.d.	2080	1680	400	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : 8,3 : 6,7 : 1,6	
Bouçã	1955	Corneana	n.d.	250	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : n.d. : n.d. : n.d.	
Picote (w/c=0,5)	1958	Granito	n.d.	200	0	100	n.d.	n.d.	n.d.	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,50 : n.d. : n.d. : n.d.	
Picote (w/c=0,7)	1958	Granito	n.d.	200	0	140	n.d.	n.d.	n.d.	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,70 : n.d. : n.d. : n.d.	
Vilarinho das Furnas	1972	Granito	150	225	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,0 : 1,0 : 0,0 : n.d. : n.d. : n.d. : n.d.	
Régua	1973	Seixo	75	210	0	105	2010	1604	405	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,50 : 9,6 : 7,6 : 1,9	
Cahora Bassa	1975	Gneiss	150	215	0	127	2165	1716	449	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,59 : 10,1 : 8 : 2,1	
Agueira	1981	Granito	150	225	0	113	2104	1703	401	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,50 : 9,4 : 7,6 : 1,8	
Fronhas	1985	Godos do rio Alva	100	220	0	80	2075	1670	405	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,36 : 9,4 : 7,6 : 1,8	
Crestuma	1985	Seixo	38	300	0	150	1920	1437	483	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,50 : 6,4 : 4,8 : 1,6	
Torrão	1988	Granito	150	185	0	63	2122	1568	554	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,34 : 11,5 : 8,5 : 3	
Alto Lindoso ¹	1992	Granito	150	150	0	77	2187	1554	633	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,51 : 14,6 : 10,4 : 4,2	
			150	150	0	63	2187	1554	633	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,42 : 14,6 : 10,4 : 4,2	
			150	180	0	83	2187	1554	633	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,46 : 12,2 : 8,6 : 3,5	
			150	150	0	73	2187	1554	633	1,0 : 1,0 : 0,0 : 0,49 : 14,6 : 10,4 : 4,2	

¹ As diferentes composições dizem respeito a várias amassaduras utilizadas em ensaios

Obra	Ano	Tipo de agregado	D _{max} (mm)	Dosagens (kg/m ³)						Proporções em peso
				l		a	ag	ag gr	ag fi	l : c : v : a : ag : gr : fi
				c	v					
Alqueva ¹	2002	Xisto verde	150	158	39	102	2288	1638	650	1,0 : 0,8 : 0,2 : 0,52 : 11,6 : 8,3 : 3,3
			150	157	41	75	2407	1712	695	1,0 : 0,8 : 0,2 : 0,38 : 12,2 : 8,6 : 3,5
			150	164	41	104	2317	1667	650	1,0 : 0,8 : 0,2 : 0,51 : 11,3 : 8,1 : 3,2
			150	158	39	102	2288	1638	650	1,0 : 0,8 : 0,2 : 0,52 : 11,6 : 8,3 : 3,3
			150	159	40	71	2352	1663	689	1,0 : 0,8 : 0,2 : 0,36 : 11,8 : 8,4 : 3,5
Alto Ceira II	2013	Granito	63	117	143	151	1970	1193	777	1,0 : 0,5 : 0,6 : 0,60 : 7,6 : 4,6 : 3
Baixo Sabor (montante) ²	2014	Granito	150	111	110	129	1955	1434	521	1,0 : 0,5 : 0,5 : 0,58 : 8,9 : 6,5 : 2,4
			150	110	110	128	1962	1434	528	1,0 : 0,5 : 0,5 : 0,58 : 8,9 : 6,5 : 2,4
			150	110	110	133	2041	1431	610	1,0 : 0,5 : 0,5 : 0,60 : 9,3 : 6,5 : 2,8
Valor máximo			150	300	300	151	2407	1716	777	-
Valor mínimo			38	110	110	60	1920	12	400	-

D_{max} – diâmetro máximo do agregado mais grosso
l – dosagem de ligante (l=c+v); c – dosagem de cimento; v – dosagem de cinza volante; a – dosagem de água; ag – dosagem de agregado; ag gr – dosagem de agregado grosso; ag fi – dosagem de agregado fino; n. d. – valores não disponíveis

3.2 Síntese dos resultados dos ensaios de fluência

Os resultados dos ensaios de fluência disponíveis são diversos e foram organizados por obra, tipo de betão (crivado e integral), condições de maturação (laboratório e *in situ*) e idade do betão. Na Figura 1 representam-se alguns dos resultados dos ensaios de fluência e o respetivo ajuste à função logarítmica (linhas a tracejado).

No Quadro 2 apresenta-se um resumo dos parâmetros relativos ao ajuste da função de fluência logarítmica aos resultados experimentais das extensões totais (soma da extensão instantânea com a extensão de fluência) obtidas nas várias obras através da função de fluência logarítmica para várias idades de carregamento. Verifica-se que os valores de $K(t_0)$ e $F(t_0)$ e, conseqüentemente, de $J(1000, t_0)$ e $\Phi(1000, t_0)$ apresentam uma grande variação, função das diferentes composições e componentes utilizados. Por exemplo, para o betão integral *in situ*, o coeficiente de fluência para um carregamento aos 365 dias de idade e 1000 dias após carregamento, variou entre 0,16 e 0,67, o que corresponde a uma diferença percentual de cerca de 130% relativamente ao valor médio.

² As diferentes composições dizem respeito a várias amassaduras utilizadas em ensaios

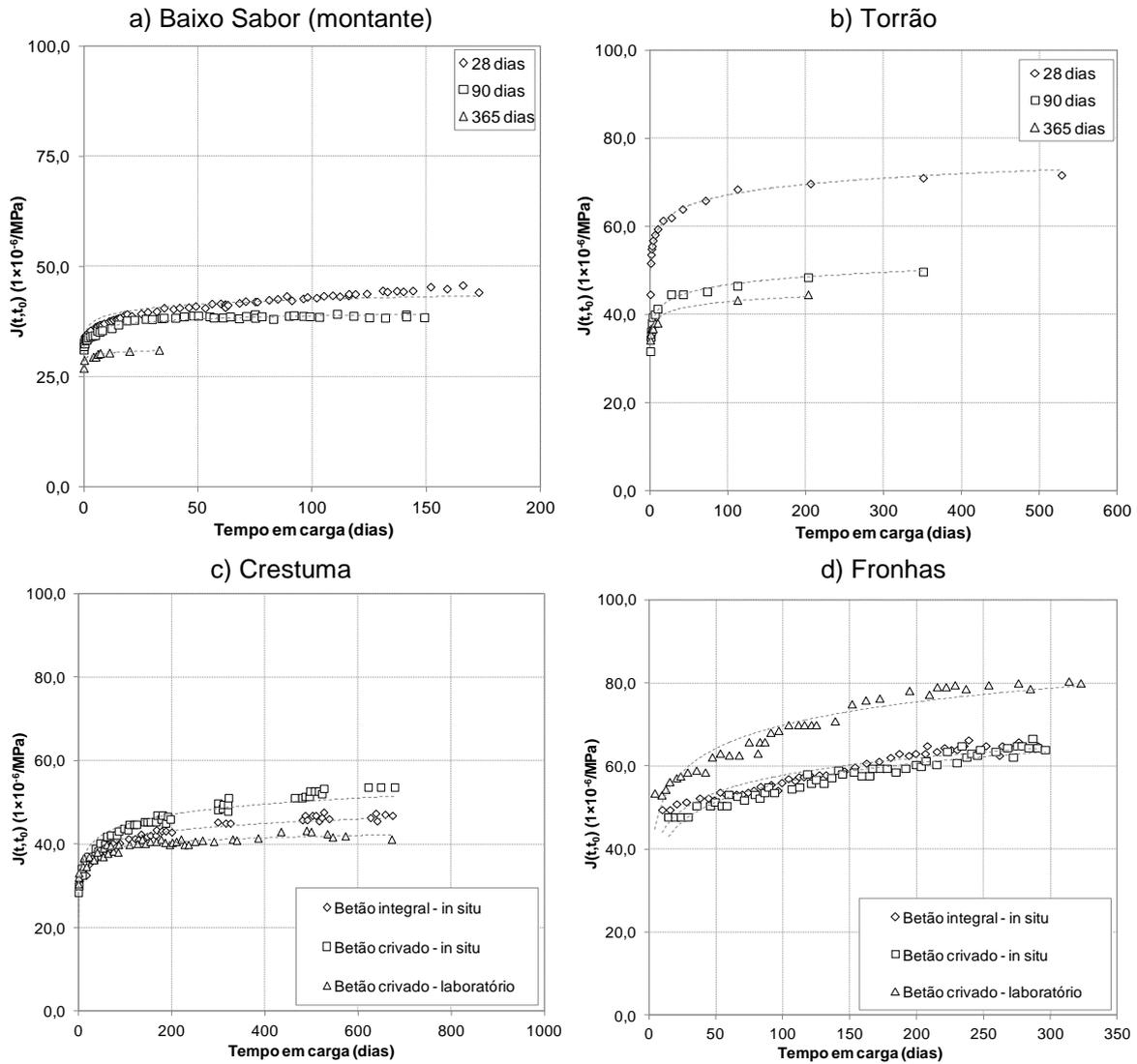


Figura 1. Resultados de ensaios de fluência: a) betão integral da barragem de montante do Baixo Sabor, *in situ*; b) betão integral da barragem do Torrão, *in situ*; c) betão da barragem de Crestuma, idade de carregamento de 35 dias; d) betão da barragem de Fronhas, idade de carregamento de 28 dias

Quadro 2 – Valores mínimos e máximos do ajuste logarítmico aos resultados dos ensaios de fluência do betão de várias barragens portuguesas

	Tipo de betão	Cond. maturação	t_0 (dias)	$K(t_0)$ (1×10^{-6} /MPa)	$F(t_0)$ (1×10^{-6} /MPaxdias)	$J(1000, t_0)$ (1×10^{-6} /MPa)	$\Phi(1000, t_0)$
Valores mínimos	Crivado	Laboratório	28	32,5	1,47	42,8	0,33
			90	28,8	1,05	41,6	0,24
			365	26,0	0,28	35,4	0,09
		<i>In situ</i>	28	29,6	2,65	62,2	0,53
			90	44,0	3,01	64,8	0,49
			365	33,2	1,52	43,8	0,41
	Integral	28	29,4	1,57	46,0	0,49	
		90	33,8	1,11	41,5	0,26	
		365	24,7	0,49	32,6	0,16	
Valores máximos	Crivado	Laboratório	28	73,6	8,25	125,7	1,46
			90	48,0	5,65	77,0	1,03
			365	40,7	3,56	61,6	0,66
		<i>In situ</i>	28	59,1	6,78	94,4	1,51
			90	48,2	4,58	79,8	0,63
			365	41,3	2,62	56,8	0,71
	Integral	28	68,2	6,03	103,0	0,96	
		90	57,4	2,54	73,5	0,58	
		365	35,2	2,01	46,7	0,67	

4. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Comparação dos resultados obtidos em diferentes barragens

A diversidade na composição dos betões invalida a possibilidade de encontrar uma relação direta entre as propriedades e dosagens dos componentes e as propriedades mecânicas do betão endurecido para todas as situações. Apesar disso, a comparação dos resultados permite ter uma ideia geral da evolução das propriedades ao longo do tempo.

Na Figura 2 apresentam-se os resultados do módulo de elasticidade em compressão, obtidos em 15 barragens (Castelo do Bode, Venda Nova, Picote, Cabril, Régua, Vilarinho das Furnas, Cahora Bassa, Agueira, Pracana, Torrão, Fronhas, Crestuma, Alqueva, Baixo Sabor (montante) e Alto Ceira II). Estes resultados são relativos a betão crivado ensaiado em laboratório. Verifica-se que, exceptuando alguns resultados particulares do betão das barragens de Alqueva e Cabril, o módulo de elasticidade varia aproximadamente entre 23 e 35 GPa aos 90 dias de idade e entre 27 e 40 GPa aos 365 dias de idade. A grande variação dos módulos de elasticidade do betão é devida, em grande parte, à deformabilidade da rocha utilizada para os agregados e à dosagem de agregado grosso e fino. Nos exemplos apresentados a maioria da rocha utilizada é granítica (70% dos betões analisados). No entanto, também os módulos de elasticidade das rochas graníticas utilizadas dependem de diversos fatores, que podem apresentar grande variabilidade.

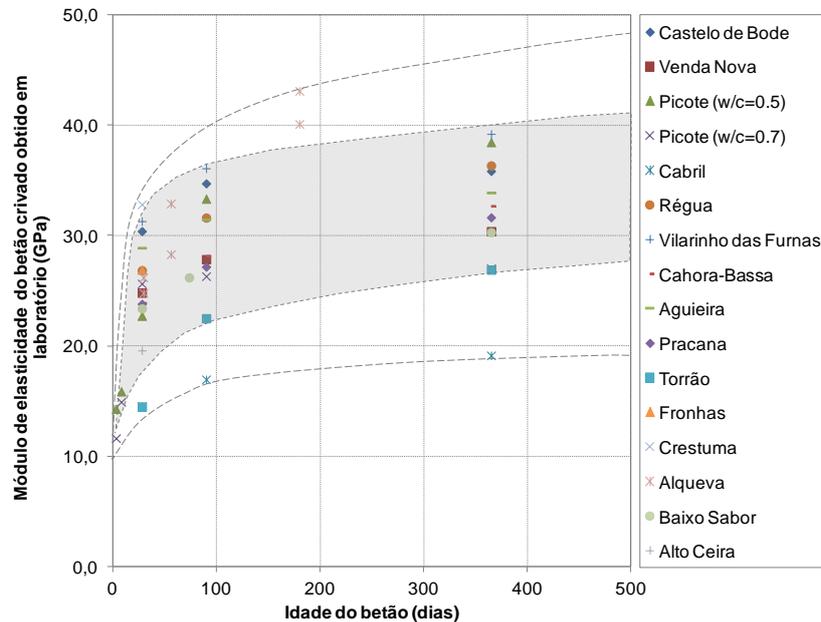


Figura 2. Resultados do módulo de elasticidade do betão crivado de diversas barragens em ensaios laboratoriais

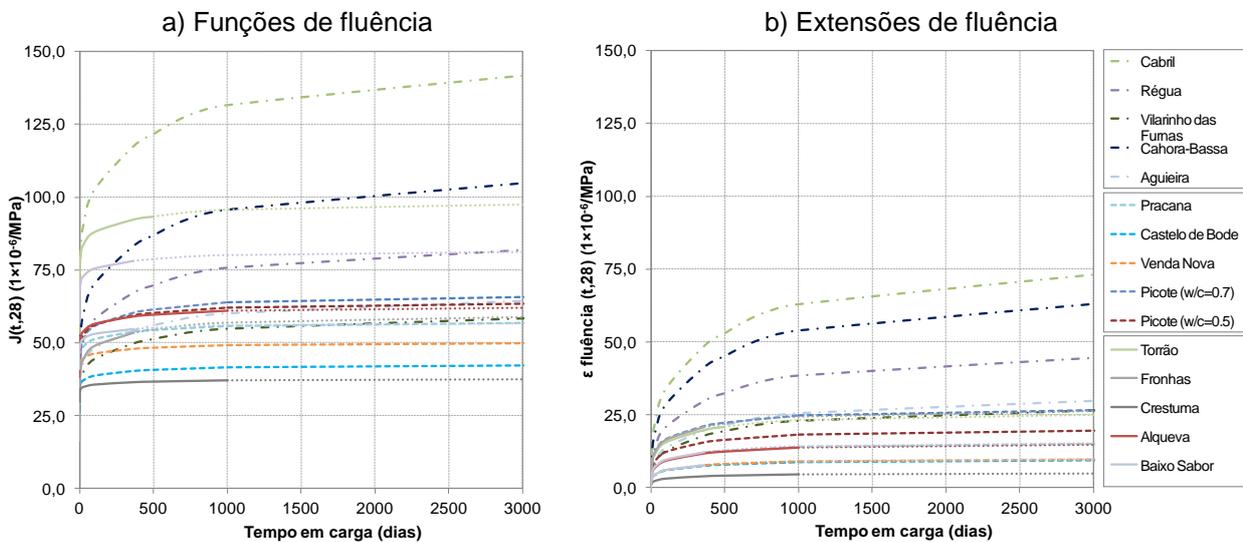


Figura 3. Representação das funções de fluência (a) e das correspondentes extensões de fluência (b), ajustadas aos resultados dos ensaios laboratoriais de fluência aos 28 dias do betão crivado de diversas barragens

Na Figura 3 apresentam-se as funções de fluência e as correspondentes extensões de fluência ajustadas aos resultados dos ensaios laboratoriais aos 28 dias de idade do betão crivado de diversas barragens. Os valores da função de fluência apresentam grande dispersão pois são condicionados pelo valor do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade, que apresenta uma grande variação. Os valores da extensão de fluência após 3000 dias (cerca de 8 anos) parecem estar compreendidos entre 5 e 25×10^{-6} /MPa, com menor

dispersão que os valores da função de fluência, exceto para os casos dos betões das barragens do Cabril, Régua e Cahora Bassa.

4.2 Influência da composição nas propriedades de deformabilidade do betão de barragens

A análise integrada dos dados de composição e dos resultados dos ensaios de deformabilidade permite avaliar a influência da dosagem de cada componente e as respetivas relações com as propriedades mecânicas do betão endurecido. No entanto, tratando-se de propriedades de deformabilidade, e como já foi referido, o tipo de agregado utilizado e a idade do betão são determinantes na análise. Deste modo, apresenta-se uma análise para os betões com agregados graníticos e para ensaios efetuados aos 28 e 365 dias de idade, dado que são idades de referência.

A Figura 4 apresenta a correlação obtida entre a dosagem de ligante (l) e a função de fluência, $J(1000, t_0)$, e o coeficiente de fluência, $\Phi(1000, t_0)$, 1000 dias após carregamento, para as idades de 28 e 365 dias. A relação entre as variáveis não mostra qualquer tipo de tendência. Deve referir-se que a dosagem de ligante corresponde à soma da dosagem de cimento com a dosagem de cinzas, podendo este facto influenciar a dispersão dos resultados. A Figura 5 apresenta a correlação entre a relação água-ligante (a/l) e $J(1000, t_0)$ e $\Phi(1000, t_0)$. Neste caso, os dados disponíveis mostram uma grande dispersão entre as duas variáveis, não sendo evidente uma correlação bem definida. A definição da dosagem de água nas referências consultadas não é muitas vezes clara no fato de a dosagem de água referir-se à água adicionada ou à água total, incluindo os valores da humidade dos agregados.

4.3 Correlação entre a deformabilidade do betão integral e do betão crivado

Recorrendo aos dados disponíveis de células de fluência instaladas nas barragens do Torrão, Fronhas, Alto Lindoso e montante do Baixo Sabor, foi possível obter uma correlação entre as propriedades de deformabilidade do betão crivado, obtidas em laboratório, e as propriedades de deformabilidade do betão crivado e integral determinadas *in situ*, nomeadamente os valores do módulo de elasticidade e de coeficiente de fluência após 1000 dias de carregamento, para várias idades de carregamento (Figura 6). Voltaram a ser utilizados apenas os resultados de betões com agregados graníticos.

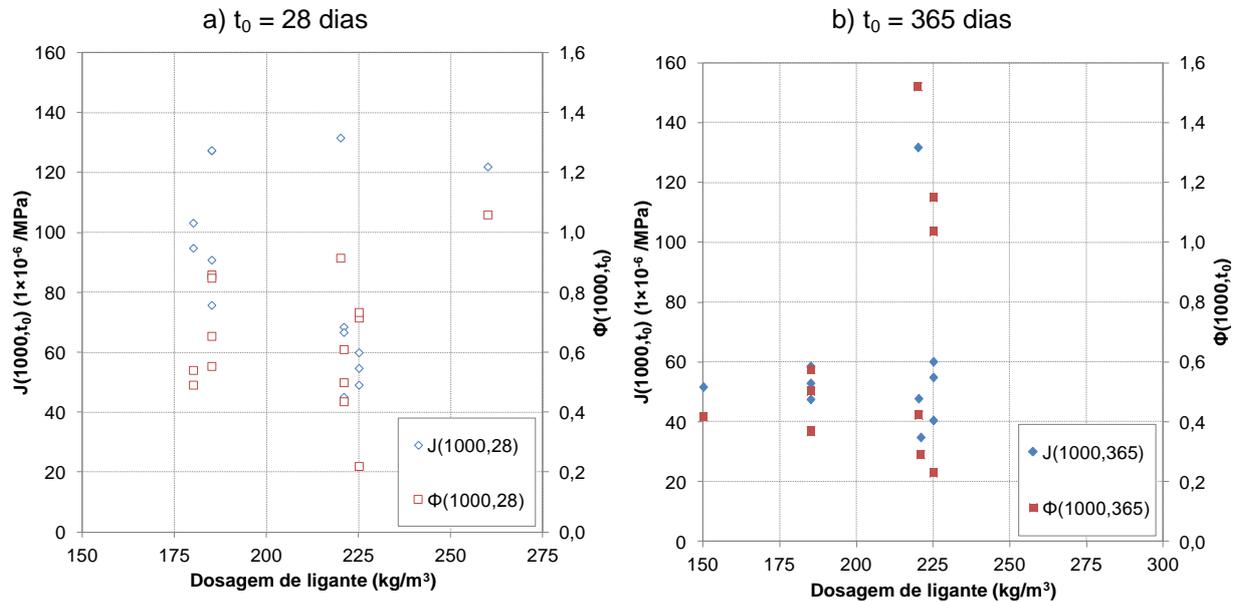


Figura 4. Correlação entre a dosagem de ligante e a função de fluência, $J(1000, t_0)$, e o coeficiente de fluência, $\Phi(1000, t_0)$, 1000 dias após carregamento, para as idades de 28 dias (a) e 365 dias (b), para betões com agregados graníticos

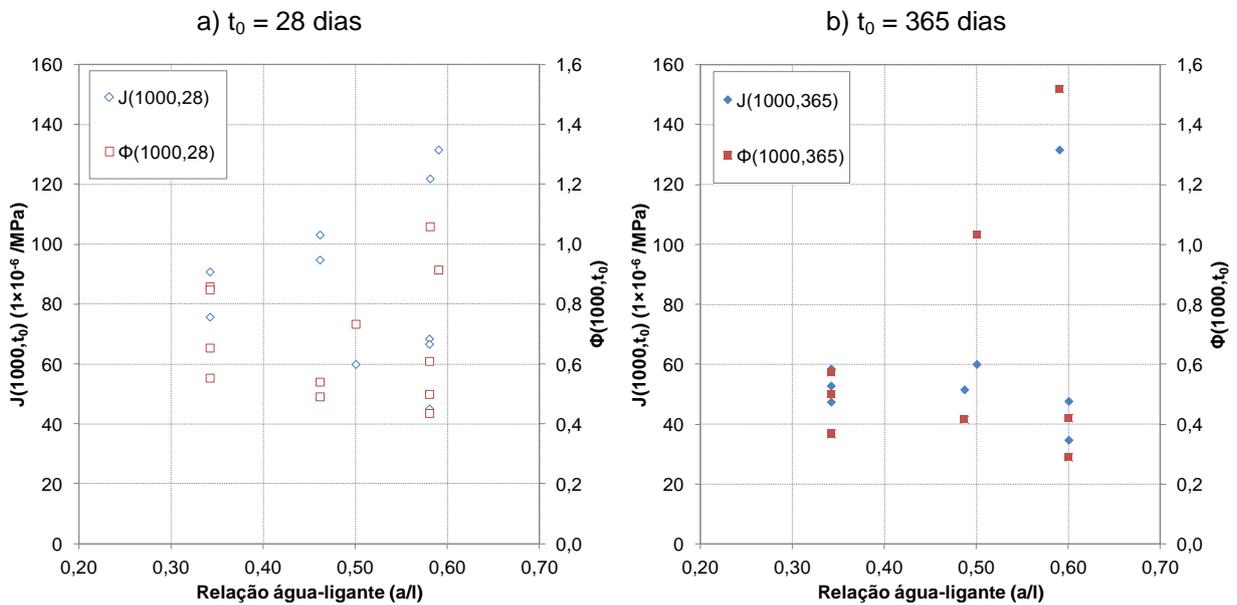


Figura 5. Correlação entre a relação água-ligante (a/l) e a função de fluência, $J(1000, t_0)$, e o coeficiente de fluência, $\Phi(1000, t_0)$, 1000 dias após carregamento, para as idades de 28 dias (a) e 365 dias (b), para betões com agregados graníticos

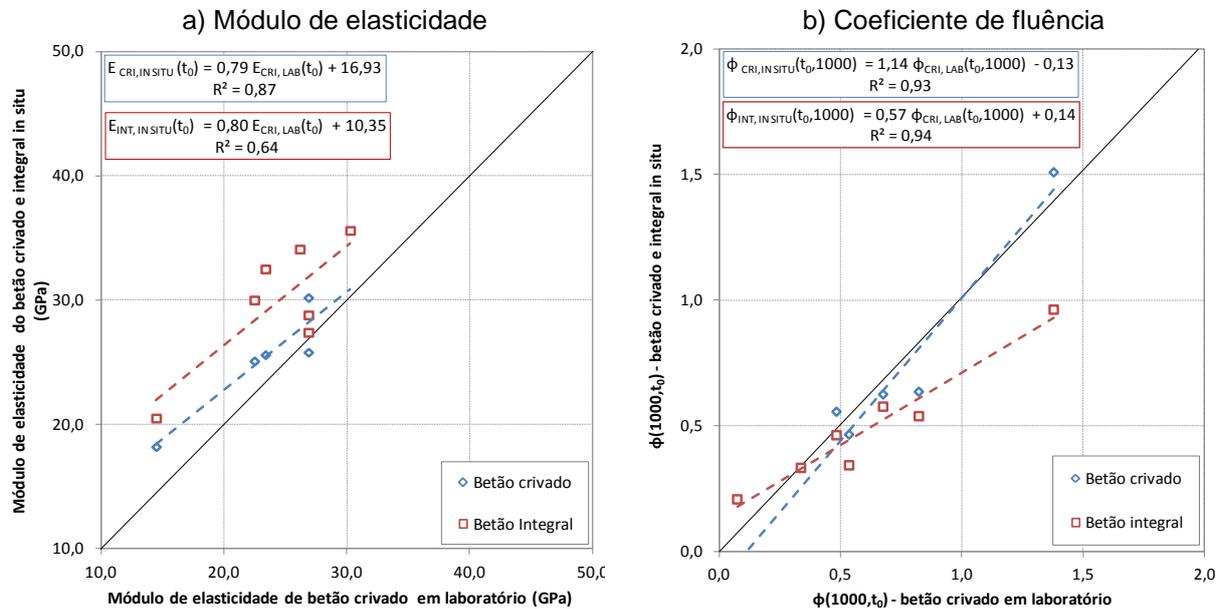


Figura 6. Correlação entre as propriedades de deformabilidade do betão integral e do betão crivado com agregados graníticos em condições laboratoriais e *in situ*: a) módulo de elasticidade; b) coeficiente de fluência aos 1000 dias de carregamento, para várias idades de carga

Verifica-se que, apesar da variabilidade das composições dos betões utilizados, das propriedades dos componentes, principalmente a relação água-ligante e a adição de cinzas volantes, parece existir uma correlação entre a deformabilidade do betão crivado e do betão integral que lhe deu origem. As correlações apresentam valores razoáveis de coeficiente de determinação, R^2 , exceto para os valores do módulo de elasticidade do betão integral *in situ*, em que se obteve um coeficiente de determinação de 0,64.

Com base nos resultados apresentados pode afirmar-se que, como seria expetável, os valores de módulo de elasticidade do betão integral obtidos *in situ* são sempre superiores aos do betão crivado obtidos em laboratório, devido à maior dosagem de agregados. Os valores dos coeficientes de fluência do betão integral tendem a ser inferiores aos obtidos em provetes de betão crivado em laboratório, em particular para os coeficientes de fluência mais elevados, o que usualmente corresponde a idades mais jovens.

5. CONCLUSÕES

O trabalho efetuado permitiu a compilação dos resultados de ensaios de deformabilidade do betão utilizado em várias barragens, a sua correlação com os dados de composição, condições de ensaio (laboratório e *in situ*) e o tipo de betão (integral e crivado). Pode concluir-se que existe uma correlação entre os valores das propriedades de deformabilidade e a relação água-ligante e entre as propriedades de deformabilidade do betão integral e do

betão crivado. Importa estender este estudo a outras barragens, para consolidar o conhecimento sobre as tendências identificadas.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP e à Hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB) a autorização concedida para a apresentação dos resultados dos ensaios de caracterização da deformabilidade do betão das barragens concessionadas por estas empresas.

REFERÊNCIAS

- [1] Pina, C. e Batista, A. L. – Estudos e projetos para o estrangeiro da engenharia portuguesa de barragens, Revista Pedra & Cal, Conservação & Reabilitação, Nº 56, 2014. p. 12-16.
- [2] Bažant, Z. P. e Li, G. – “Comprehensive database on concrete creep and shrinkage”. Evanston: Infrastructure Technology Institute, McCormick School of Engineering and Applied Science, Northwestern University, 2008. 10p.
- [3] Ramos, J. e Soares de Pinho, J. – “Deformabilidade do betão de barragens (Determinações laboratoriais e in situ)”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981. Relatório preliminar.
- [4] Silveira, A., Florentino, C. e Freitas, C. – “LNEC experience in the field of concrete dam observation and of in situ tests”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1981. Memória Nº 548.
- [5] Ramos, J. e Soares de Pinho, J. – “Deformabilidade do betão de barragens - Tratamento automático dos resultados dos ensaios laboratoriais”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1983. Relatório.
- [6] Ramos, J. – “Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985. Tese de especialista.
- [7] Soares de Pinho, J. – “Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989. Tese de especialista.
- [8] Soares de Pinho, J., Ramos, J. e Florentino, C. – “Control of mass concrete for dams. Full-mixed and wet-screened concrete tests”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988. Memória Nº 716.
- [9] Batista, A. L. – “Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens de abóbada”. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 1998. Tese de doutoramento.
- [10] Oliveira, S. – “Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulação de dano”. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000. Tese de doutoramento.

- [11] Batista, A. L., Gomes, J. P. e Ramos, J. M. – “Análise do comportamento estrutural da barragem de Cahora Bassa”. *Encontro Nacional Betão Estrutural 2002*. Lisboa: Grupo Português de Betão Estrutural, 2002. p. 435-442.
- [12] Vieira, M. – Estudo de fluência do betão para a empreitada de construção da nova barragem do Alto Ceira - 3.^a Colheita, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2012. Relatório 306/2012.
- [13] Serra, C., Batista, A. L. e Tavares de Castro, A. – “Determinação da função de fluência do betão da barragem de Alqueva”. *Encontro Nacional Betão Estrutural 2010*, Lisboa: Grupo Português de Betão Estrutural, 2010, p. 71-73.
- [14] ACI Committee 207 – 207.1R-05: “Guide to mass concrete” (Reapproved 2012). Detroit: American Concrete Institute, 2006. 30p.
- [15] IPQ – NP EN 206-1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2005.
- [16] Bažant, Z. P. e Osman, E. – “Double power law for basic creep of concrete.” *Materials and Structures (RILEM, Paris)*. vol. 9, Nº 49 (1976), p. 3-11.
- [17] Bažant, Z. P. e Kim, J. – “Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 2 - Basic creep”. *Materials and Structures*. vol. 24. Nº 6 (1991), p. 409-421.
- [18] Bažant, Z. P. e Baweja, S. – “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - model B3”. *Materials and Structures*. vol. 28. Nº 6 (1995), p. 357-365.
- [19] CEB-FIP – Model Code 1990. Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 1990.
- [20] CEB-FIP – Model Code 2010. Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 2010.
- [21] ACI-ASCE Committee 323 – “Tentative recommendations for prestressed concrete”. *Journal Proceedings*. vol. 54, Nº 2 (1958), p. 545-578.
- [22] ACI Committee 209 – 209R-92: “Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures” (Reapproved 2008). Detroit: American Concrete Institute, 1992. 47p.
- [23] Gardner, N. J. e Lockman, M. J. – “Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete”. *Materials Journal*. vol. 98, Nº2 (2001), p. 159-167.
- [24] Neville, A., Dilger, W., e Brooks, J. (1983). “Creep of plain and structural concrete”. New York: Longman Inc., 1983.
- [25] Bažant, Z. P. et al. – Wake-up call for creep, myth about size effect and black holes in safety: what to improve in fib model code draft. em *fib Symposium Prague*, 2011, Praga.
- [26] Serra, C. e Batista, A. L. – Procedimentos e recomendações para a realização de ensaios de deformabilidade em betão de barragens, efetuados *in situ* e em laboratório. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2013. Relatório 455/2013.