

Metodologia para a previsão da resistência do betão de barragens usando modelos analíticos

Carlos Serra¹

**António Lopes
Batista²**

**Nuno Monteiro
Azevedo³**

João Custódio⁴

RESUMO

Os ensaios de betão integral de barragens, produzido com agregados de grandes dimensões, são de difícil execução, requerem equipamentos específicos e têm um custo elevado comparativamente com os ensaios correntes. É recorrente a crivagem do betão integral, i. e., a remoção, após a mistura dos componentes e ainda em fresco, dos agregados de grandes dimensões do betão integral, obtendo-se o betão crivado. Este tipo de betão é moldado em provetes de menores dimensões e é amplamente ensaiado durante a construção.

Esta comunicação apresenta uma metodologia para a previsão da resistência à compressão do betão integral a partir de resultados experimentais e de modelos analíticos. A previsão consiste na combinação de duas leis semi-empíricas, a lei de escala e uma adaptação da lei de Abrams. A primeira permite a uniformização da resistência obtida a partir de provetes de diferentes dimensões e a segunda prevê a resistência com base na relação água-materiais cimentícios e na máxima dimensão do agregado.

A metodologia foi validada através de um estudo de sensibilidade para determinar o número mínimo de resultados necessário para obter uma boa estimativa da resistência dos diferentes tipos de betões com agregados de grandes dimensões, incluindo o betão integral. O estudo utilizou os resultados de caracterização das propriedades do betão da barragem do Baixo Sabor.

Palavras-chave: Betão de barragens, Resistência à compressão, Efeito de escala, Lei de Abrams alargada

1. INTRODUÇÃO

O betão de barragens, aplicado em massa, é fabricado com uma baixa dosagem de cimento (100-300 kg/m³), para diminuir o calor libertado durante as reações de hidratação, e com agregados de dimensão máxima de 150 mm. As propriedades de resistência do betão em massa não são condicionantes, em geral, na formulação da sua composição [1], no entanto têm uma grande importância na avaliação do risco de fendilhação nas idades jovens e na avaliação de cenários de deterioração ao longo do tempo, por exemplo, devido a reações expansivas de origem interna [2].

A caracterização das propriedades do betão integral de barragens apresenta grandes dificuldades devido à existência de agregados de dimensões consideráveis. Estas condições implicam o uso de provetes de grandes dimensões e equipamentos de ensaio de grande capacidade, dificultando e elevando os custos associados ao controlo de qualidade. No sentido de agilizar o processo e minimizar os custos, é corrente

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal. cserra@lneec.pt

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal. a.l.batista@lneec.pt

³Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal. nazevedo@lneec.pt

⁴Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa, Portugal. jcustodio@lneec.pt

utilizar o betão crivado, obtido do betão integral, para a avaliação da qualidade e caracterização sistemática das propriedades do betão.

O betão crivado é usualmente obtido pela crivagem do betão integral em fresco através do peneiro de abertura de 38 mm [3]. A relação entre as propriedades mecânicas do betão integral e o betão crivado têm sido objeto de estudo, predominantemente através da via experimental [4–18].

A resistência do betão depende da geometria do provete, da estrutura interna do betão e das condições de ensaio, nomeadamente da forma de aplicação e velocidade da carga [19]. A rotura deste tipo de material quase-frágil depende da dimensão do provete devido ao desenvolvimento de uma zona de progressão da fratura num volume finito [20]. Este comportamento implica que provetes maiores tenham valores de resistência menores [21].

As previsões da resistência do betão estão usualmente relacionadas com a relação água-cimento. Alguns estudos referem a importância de outros fatores, como a dosagem de cimento, a dosagem de água e a máxima dimensão do agregado [22–24]. Popovics propôs uma adaptação da lei de Abrams [25] incluindo a dosagem de cimento, a dosagem de água e a consistência do betão como variáveis adicionais ao modelo original de Abrams [24]. Embora tenha referido a importância da dimensão das partículas de agregado, esta variável não tem sido tida em consideração [24].

Esta comunicação apresenta uma metodologia para a previsão das propriedades de resistência à compressão do betão de barragens com base em resultados experimentais e em modelos analíticos ou semi-empíricos. A metodologia considera ainda os resultados da resistência de diferentes tipos de provetes. O primeiro passo consiste na conversão dos resultados de betão crivado obtidos de provetes pequenos para resultados de betão crivado em provetes de grandes dimensões (correntemente utilizados para a moldagem do betão integral), recorrendo a uma lei de escala. Os resultados de resistência de betão integral e crivado, ambos relativos a provetes de grandes dimensões, são ajustados a uma lei de Abrams alargada que tem em consideração o efeito da composição, nomeadamente a relação água-material cimentício e a máxima dimensão do agregado. Foram considerados no estudo os resultados de caracterização das propriedades do betão da barragem do Baixo Sabor.

2. PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DO BETÃO DE BARRAGENS

2.1 Aspetos gerais

A previsão da resistência do betão de barragens que se propõe recorre à lei de Abrams alargada, ajustada aos resultados de resistência à compressão do betão obtidos nas mesmas condições, designadamente para as mesmas dimensões de provete. Para além disso, o ajuste da lei de Abrams alargada pressupõe que ao longo da construção das obras tenham sido utilizados os mesmos componentes e que as condições de betonagem tenham sido semelhantes.

Antes da determinação dos parâmetros da lei de Abrams alargada é necessário proceder à conversão dos resultados de resistência do betão crivado obtidos em provetes de pequenas dimensões em resultados de resistência de betão crivado obtidos em provetes de grandes dimensões compatíveis com os utilizados para o betão integral, utilizando a lei de escala de Kim *et al.* (§ 2.2).

A lei de Abrams alargada foi validada recorrendo a outros conjuntos de resultados disponíveis na literatura [25], nomeadamente os resultados de Blanks e McNamara [3], que estudou a influência da crivagem do betão de barragens, e nos resultados de Higginson *et al.* [22] para o estudo da influência da máxima dimensão do agregado na resistência à compressão do betão.

2.2 Conversão do tamanho do provete com base na lei de escala

Baseado no trabalho de Bažant sobre o efeito de escala em materiais quase-frágeis [26], Kim *et al.* propuseram uma lei de escala genérica para a resistência à compressão em cilindros (1), independente do efeito do tamanho do agregado [21, 27, 28],

$$f_{c,\phi} = 0,8 f_{c,\phi_0} + \frac{0,4 f_{c,\phi_0}}{\sqrt{1 + \frac{(H-\phi)}{50}}} \quad (1)$$

em que $f_{c,\phi}$ é a resistência à compressão obtida a partir de cilindros com diâmetro ϕ e f_{c,ϕ_0} é a resistência à compressão obtida a partir de cilindros com diâmetro de referência, ϕ_0 .

2.3 Lei de Abrams alargada

A lei de Abrams original [29] relaciona a resistência com a relação água-cimento através da expressão (2),

$$f = \frac{A}{B^c} \quad (2)$$

em que f é a resistência à compressão, $\frac{a}{c}$ é a relação água-cimento e A e B são parâmetros que dependem das propriedades do cimento, do tipo de agregado, das adições e adjuvantes, das condições de cura, do tipo de carregamento, das condições de ensaio e da idade do betão.

O fator de eficiência cimentícia da cinza volante é considerado na composição do betão, sendo obtido através da comparação entre a relação água-cimento e a resistência de betões sem cinzas e os seus valores equivalentes de relação água-materiais cimentícios e resistência de betões com cinzas. Babu e Rao propuseram uma expressão geral para o fator de eficiência cimentícia, k , para a idade de 90 dias (Eq. (3)), com base na relação entre a dosagem de cinza, v , e a dosagem de ligante, $c+v$ [30].

$$k_{90} = 2,5 p^2 - 3,59 p + 1,73, \quad p = \frac{v}{c+v} \quad (3)$$

A lei de Abrams alargada proposta (4) tem em consideração a relação entre a dosagem de água e a dosagem efetiva de material cimentício, $\frac{a}{c+kv}$, e a máxima dimensão do agregado de cada tipo de betão, D_{max} ,

$$f_{c,\phi} = \frac{A}{B \left[\frac{a}{c+kv} + \alpha_d \log \left(\frac{D_{max}}{D_{max}^0} \right) \right]} \quad (4)$$

em que $f_{c,\phi}$ é a resistência à compressão obtida em cilindros com diâmetro ϕ , k é o fator de eficiência cimentícia, a é a dosagem de água, c é a dosagem de cimento, v é a dosagem de cinzas volantes, D_{max} é a máxima dimensão dos agregados, D_{max}^0 é a máxima dimensão dos agregados de referência (considerada igual a 150 mm). Os valores de A, B e α_d são parâmetros a ajustar.

3. APLICAÇÃO AO BETÃO DA BARRAGEM DO BAIXO SABOR

3.1 Breve descrição da barragem

O Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS) situa-se no troço inferior do rio Sabor e é constituído por dois escalões, o de montante e o de jusante, cujo projeto foi desenvolvido pela EDP. A barragem de montante, designada atualmente por barragem do Baixo Sabor, é constituída por uma abóbada de dupla curvatura, com uma altura máxima de 123,00 m acima da superfície média mais baixa da fundação (Fig. 1). O coroamento tem um desenvolvimento de 505 m e uma espessura de 6,00 m, situando-se à cota 236,00 m. A abóbada tem 32 blocos, separados por juntas de contração verticais [31]. O volume total de betão é de cerca de 700.000 m³. A construção da barragem teve início em 2012 e terminou em 2014.



Figura 1. Barragem do Baixo Sabor. Vista de jusante (à esquerda) e corte vertical pela consola central (à direita)

A albufeira criada pela barragem tem uma capacidade de cerca de 1095 hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 234,00 m.

3.2 Propriedades de resistência do betão

Os tipos de betão podem ser divididos em betão integral e betão crivado, referidos como INT e CRI, respetivamente. O betão integral foi produzido para constituir o betão estrutural da obra e o betão crivado foi obtido por crivagem em fresco do betão integral pelo peneiro com abertura de 38 mm. O betão crivado foi apenas utilizado para o controlo de qualidade, caracterização das propriedades e embebimento dos aparelhos de observação de resistência elétrica, em particular os extensómetros de resistência elétrica. O controlo de qualidade do betão e a caracterização do betão incluiu ensaios de betão integral e crivado, mas os ensaios de betão crivado foram em muito maior número devido às dificuldades de manuseamento e ensaio dos provetes de betão integral.

Os betões integrais podem ainda ser classificados em função do local de aplicação, designadamente do núcleo, de paramento e de envolvimento de armaduras. O betão do núcleo foi colocado no interior da barragem, tendo uma máxima dimensão dos agregados ($D_{máx}$) de 150 mm, o betão de paramento foi colocado numa espessura de 1,0-1,5 m junto aos paramentos de montante e jusante ($D_{máx}$ = 76 mm) e o betão de envolvimento da armadura foi aplicado nas zonas armadas, como é o caso da envolvente das galerias ($D_{máx}$ = 38 mm).

Os estudos da composição dos betões durante a fase de projeto e as adaptações durante a obra foram efectuados pela EDP. O Quadro 1 apresenta os dados de composição dos vários tipos de betão colocados

na barragem do Baixo Sabor. As principais diferenças são a máxima dimensão do agregado ($D_{m\acute{a}x}$), as dosagens de agregado fino e grosso, ligantes e água, e a relação água-ligante.

A percentagem de substituição de cimento por cinza volante é de 50 % em todos os tipos de betão. Os agregados finos e grossos são graníticos com um peso volúmico de 2644 kg/m³. Os valores médios e os respetivos desvios-padrão do módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral da rocha utilizada para os agregados são de 46,3 GPa e 5,2 GPa, 99,5 MPa e 4,0 MPa e 7,3 MPa e 0,8 MPa, respetivamente.

Quadro 1. Composição dos vários tipos de betão da barragem do Baixo Sabor

Tipo de betão	Cimento	Cinza volante	Agregado fino		Agregado grosso			Relação água-ligante	
	[kg/m ³]		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]		
	I 42.5 R		0/4,75 mm	4,75/9,5 mm	9,5/19 mm	19/37,5 mm	37,5/75 mm	75/150 mm	
Núcleo, INT	110,0	110,0	527,0	186,0	234,0	273,0	351,0	381,0	0,56
Núcleo, CRI	141,5	141,5	674,9	265,4	333,8	389,5	-	-	0,56
Paramento, INT	130,0	130,0	637,0	212,0	271,0	366,0	444,0	-	0,55
Paramento, CRI	149,7	149,7	730,9	262,0	335,0	452,4	-	-	0,55
Envolvimento Armaduras, INT	175,0	175,0	798,0	233,0	301,0	518,0	-	-	0,50

Os resultados de resistência à compressão de cada tipo de betão foram obtidos a partir de provetes de diferentes dimensões devido à máxima dimensão dos agregados. O Quadro 2 apresenta os diferentes tipos de provete, o número de provetes ensaiados e os correspondentes resultados de resistência obtidos aos 90 dias de idade.

Quadro 2. Resultados de resistência à compressão para os vários tipos de betão da barragem do Baixo sabor

Tipo de betão	$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	Tipo de provete	Idade [dias]	$N_{amostras}$	f_c (média (desvio-padrão)) [MPa]
Núcleo, INT	150	$\Phi = 450$ mm H = 900 mm	90	134	24,7 (4,2)
Núcleo, CRI	38	$\Phi = 150$ mm H = 300 mm	90	256	25,3 (5,2)
Paramento, INT	76	$\Phi = 450$ mm H = 900 mm	90	108	26,3 (4,0)
Paramento, CRI	38	$\Phi = 150$ mm H = 300 mm	90	260	26,9 (5,5)
Envolvimento Armaduras, INT	38	$\Phi = 150$ mm H = 300 mm	90	84	36,7 (5,9)

A variabilidade nos resultados de resistência pode ser devida a alterações de alguns constituintes, à utilização de dois tipos de cinzas (cinzas da central de Compostilla em maior número e cinzas da central de Sines em menor número) e à variabilidade das propriedades dos agregados, em especial quando os agregados têm grandes dimensões [11]. Para além disso, a relação entre a dimensão do provete e a máxima dimensão do agregado pode introduzir alguns desvios relativamente ao valor médio.

3.3 Previsão da resistência do betão recorrendo à lei de escala e à lei de Abrams alargada

A conversão da resistência obtida em provetes pequenos ($\phi = 150$ mm para os betões núcleo, CRI, paramento, CRI, e envolvimento de armaduras, INT) para a resistência obtida em provetes grandes ($\phi = 450$ mm para os betões núcleo, INT, e Paramento, INT), foi baseada na Eq. (1). Para a dosagem de

cinza utilizada no betão da barragem do Baixo Sabor, correspondente a 50% da dosagem de ligante, o valor do fator de eficiência cimentícia, k , para a idade de 90 dias (k_{90}) é igual a 0,56 (Eq. 3).

No sentido de efetuar uma avaliação das capacidades de previsão da lei de Abrams alargada foi efetuado o ajuste da função proposta, por regressão linear múltipla, apenas uma amostra de teste com os resultados de resistência do betão da barragem do Baixo Sabor obtidos durante a construção. Após determinação dos parâmetros A , B e α_d , a função ajustada foi comparada com os resultados remanescentes, permitindo quantificar a qualidade da previsão. O número mínimo de valores de resistência necessários para a amostra de teste foi obtido a partir de um estudo de sensibilidade onde se determinou o desvio médio em percentagem entre os valores de previsão e os valores de resistência remanescentes em função da dimensão da amostra de teste, ε (Eq. (6)).

$$\varepsilon_N = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{f_{c,prev,i} - f_{c,exp,i}^*}{f_{c,med,i}}}{N} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^M \varepsilon_N}{M} \quad (6)$$

Nas Eq. (5) e (6) $f_{c,prev,i}$ é a resistência prevista pela lei de Abrams alargada utilizando a amostra de teste para o tipo de betão i , $f_{c,exp,i}^*$ é a resistência média do betão utilizando os resultados remanescentes da amostra total para o tipo de betão i , $f_{c,med,i}$ é a resistência média do betão utilizando os resultados da amostra de teste para o tipo de betão i , N é o número de tipos de betão em análise (neste caso, 5 tipos de betão), M é o número de gerações aleatórias de amostras de teste (neste caso, 50 gerações aleatórias), ε_N é o desvio médio individual de uma amostra aleatória e ε é o desvio médio considerando todas as gerações aleatórias, M .

A Fig. 2 apresenta o resultado do estudo de sensibilidade utilizando 50 amostras aleatórias para cada dimensão da amostra de teste. Pode concluir-se que o desvio médio entre a previsão obtida da amostra e os valores remanescentes, ε , diminui com a dimensão da amostra de teste e que tende a estabilizar quando a amostra de teste utilizada é superior a 30 % da amostra total. Considera-se que uma boa previsão da média da resistência do betão de barragens, com um desvio médio de 2 %, pode ser obtida utilizando no mínimo 25 resultados de cada tipo de betão. Este valor pode ser atingido numa fase de ensaios de teste ou na fase inicial da construção.

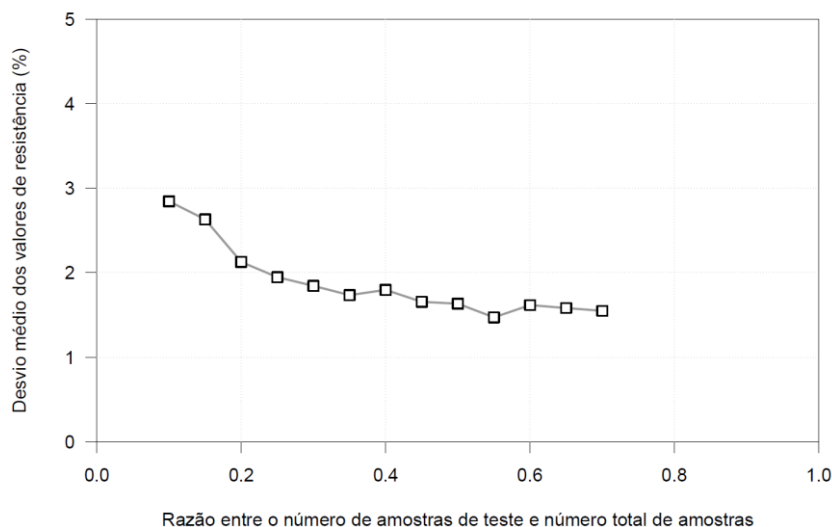


Figura 2. Desvio médio entre a previsão utilizando a amostra de teste e os resultados de resistência remanescentes em função da razão entre o número de amostras de teste e o número total de amostras.

As Figs. 3 e 4 apresentam os ajustes da lei de Abrams alargada (linha a cheio) utilizando 30% e 70%, respetivamente, dos valores de resistência disponíveis para cada tipo de betão (pontos cinzentos) e a comparação com os resultados de resistência remanescentes não utilizados no ajuste (pontos brancos). Verifica-se que existe uma boa previsão do comportamento do betão para os vários tipos de betão. A Fig. 5 mostra o ajuste utilizando a totalidade dos resultados obtidos durante a construção da barragem e verifica-se que o desenvolvimento da resistência em função da máxima dimensão do agregado e da relação água-materiais cimentícios é semelhante ao obtido com uma amostra de teste.

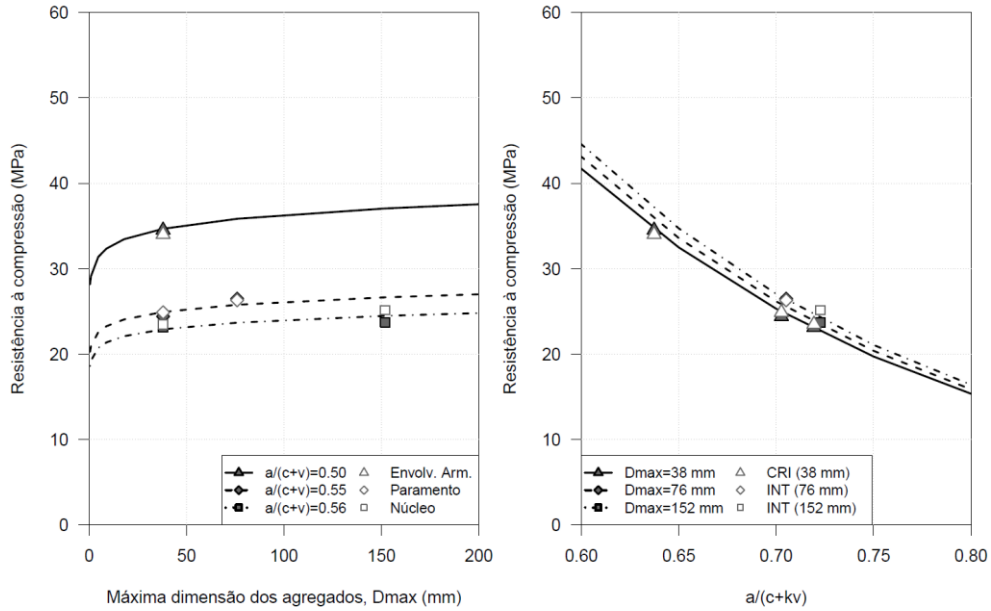


Figura 3. Ajuste da lei de Abrams alargada utilizando 30% das amostras de cada tipo de betão e comparação com os resultados de resistência remanescentes.

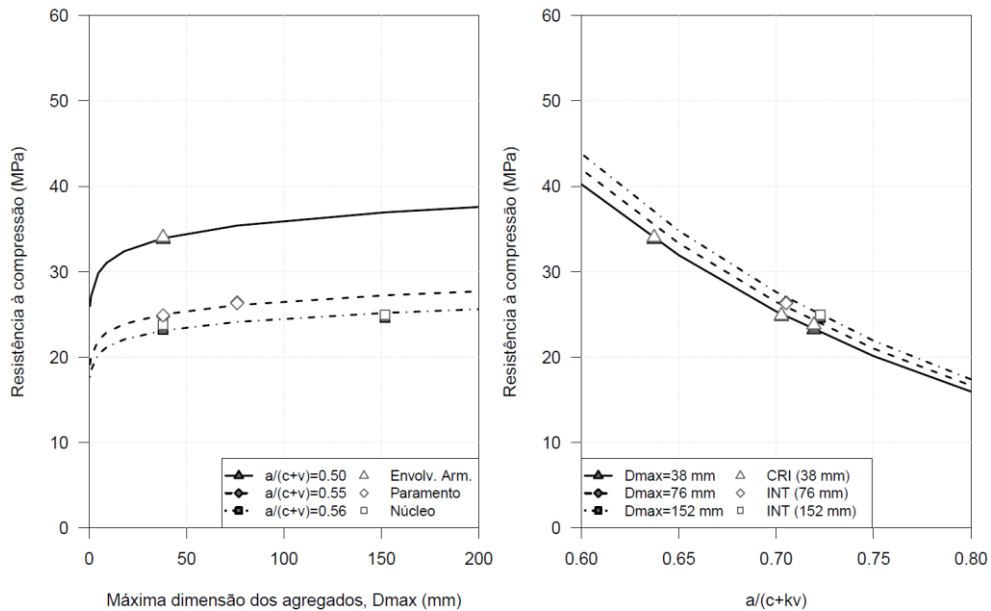


Figura 4. Ajuste da lei de Abrams alargada utilizando 70% das amostras de cada tipo de betão e comparação com os resultados de resistência remanescentes.

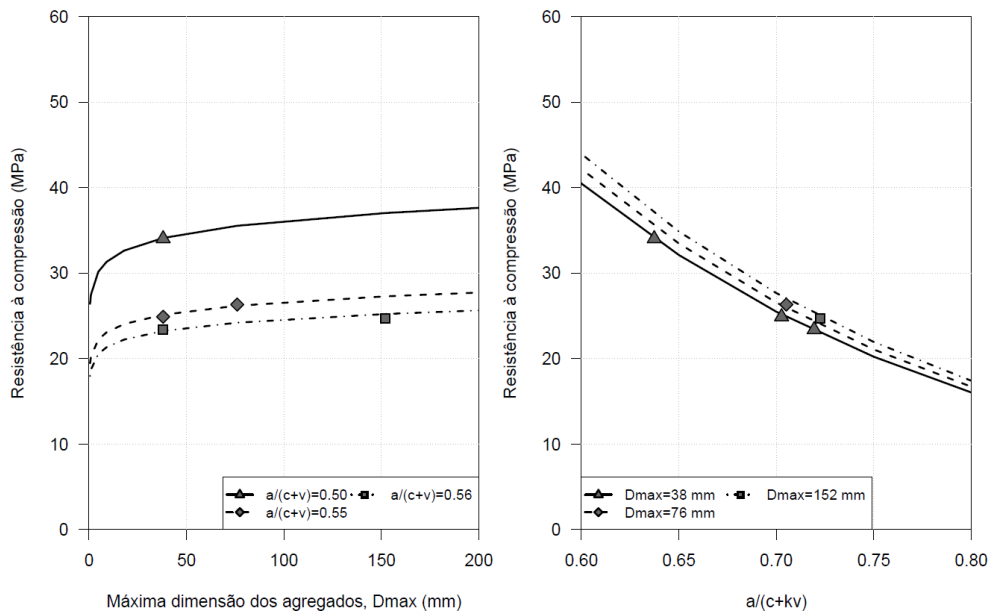


Figura 5. Ajuste da lei de Abrams alargada utilizando todos os resultados de cada tipo de betão.

Os parâmetros A , B e α_d e o coeficiente de determinação ajustado, R^2_{adj} , obtidos por regressão linear múltipla, são apresentados no Quadro 3, considerando 30%, 70% e 100% dos resultados de resistência. O valor de coeficiente de determinação ajustado próximo da unidade indica um bom ajuste. Estudos anteriores mostram também que os parâmetros escolhidos para a previsão são significativos [26].

Quadro 3. Média dos parâmetros do ajuste da lei de Abrams alargada aos valores da amostra de teste gerada aleatoriamente considerando 30% da amostra total.

Parâmetro	30% da amostra total	70% da amostra total	Amostra total
A (MPa)	768,6	683,2	705,3
B	118,0	98,0	102,2
α_d	$-12,7 \times 10^{-3}$	$-13,0 \times 10^{-3}$	$-12,8 \times 10^{-3}$
R^2_{adj}	0,97	0,99	0,99
Desvio médio, ε (%)	1,8	1,5	0,73

4. CONCLUSÕES

O betão aplicado em grandes barragens é produzido com agregados de grandes dimensões, pelo que os ensaios requerem a utilização de provetes de maiores dimensões que as correntes e de equipamento laboratorial de grande capacidade. Devido a estes constrangimentos, o controlo de qualidade e a caracterização do betão de barragens recorrem principalmente aos resultados do betão crivado obtido do betão integral (betão em massa estrutural).

Esta comunicação apresenta uma metodologia de previsão da resistência do betão de barragens com base nos dados de composição mais relevantes, nomeadamente a relação água-ligante e a máxima dimensão dos agregados. O primeiro passo do método consiste na conversão dos resultados de resistência do betão crivado obtidos em provetes pequenos em valores de resistência obtidos em provetes grandes, comparáveis com os resultados de resistência do betão integral obtidos em provetes de grandes dimensões. A segunda parte consiste no ajuste da lei de Abrams alargada a uma amostra de resultados reduzida para avaliação da qualidade da previsão.

A comparação entre o ajuste da lei de Abrams alargada para uma amostra de teste e os valores remanescentes de resistência do betão de barragens permitiu concluir que o desvio médio entre os dois

é reduzido, desde que a amostra de teste de valores de resistência seja constituída, no mínimo, por 25 resultados de cada tipo de betão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP a autorização concedida para a apresentação de resultados experimentais obtidos nos ensaios de caracterização do betão durante a construção da barragem do Baixo Sabor.

REFERÊNCIAS

- [1] ACI Committee 207 (2005). ACI 207.1R-05: Guide to mass concrete. American Concrete Institute, Detroit
- [2] Nixon, P. J.; Sims, I. (2016). RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures. Springer Netherlands, Dordrecht
- [3] Blanks, R. F.; McNamara, C. C. (1935). Mass concrete tests in large cylinders. *J Proc* 31:280–303
- [4] USBR (1988). Concrete manual. A water resources technical publication, 8th Ed. United States Government Printing Office, Washington
- [5] Soares de Pinho, J.; Ramos, J.; Florentino, C. (1988). Control of mass concrete for dams. Full-mixed and wet-screened concrete tests. In: ICOLD Congress. International Commission On Large Dams (ICOLD), San Francisco, p. 8
- [6] Sajna, A.; Linsbauer, H. (1998). Fracture mechanics of mass concrete - wet-screening procedure (FMWS). In: Li, V.C., Leung, K.Y., Willam, K.J., Billington, S.L. (eds) *Fracture Mechanics of Concrete Structures*. AEDIFICATIO, Freiburg, Germany, Gifu, Japan, pp 101–110
- [7] Vilardell, J.; Aguado, A.; Agullo, L.; Gettu, R. (1998). Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete. *Cement and Concrete Research* 28:93–101 . doi: doi:10.1016/S0008-8846(97)00214-7
- [8] Topçu, I.B. (2005). Alternative estimation of the modulus of elasticity for dam concrete. *Cement and Concrete Research* 35:2199–2202 . doi: 10.1016/j.cemconres.2004.08.010
- [9] ICOLD (2008). The physical properties of hardened conventional concrete in dams Bulletin 145 (Preprint)
- [10] Deng, Z.; Li, Q.; Fu, H. (2008). Comparison between mechanical properties of dam and sieved concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering* 20:321–326 . doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:4(321)
- [11] Khaloo, A.R.; Mohamadi Shooreh M.R.; Askari S.M. (2009). Size influence of specimens and maximum aggregate on dam concrete: Compressive strength. *Journal of Materials in Civil Engineering* 21:349–355 . doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:8(349)
- [12] Zhou, S.H.; Yang H.Q.; Dong, Y. (2010). Analysis and comparison on mechanical properties between full-graded and wet-screened concretes. *Advanced Materials Research* 168–170:426–429 . doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.426
- [13] Serra, C.; Batista, A.L.; Tavares de Castro, A. (2012). Creep of dam concrete evaluated from laboratory and in situ tests. *Strain* 48:241–255 . doi: 10.1111/j.1475-1305.2011.00818.x
- [14] Kumar, R.; Mahure, N. V.; Gupta, R. (2015). Establishing the correlation between compressive strength of small sized wet screened concrete cubes and full size large concrete cubes for mass concrete of dam. *Eng Sci Mgmt* 5:26–31
- [15] Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016). Utilização de modelos compósitos na determinação da deformabilidade do betão de barragens. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016. Coimbra

- [16] Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016). Effect of wet screening in the elastic properties of dam concrete: experimental in situ test results and fit to composite models. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28:10 . doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001672
- [17] Guan, J.; Li, Q.; Wu, Z., (2016). Fracture parameters of site-cast dam and sieved concrete. *Mag Concr Res* 68:43–54 . doi: 10.1680/mac.15.00008
- [18] Yang, H.; Rao, M.; Dong, Y. (2016). Influence study of extra-large stone limited size and content on full-graded concrete properties. *Construction Building Materials* 127:774–783 . doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.006
- [19] Van Mier, J.G.; Nooru-Mohamed, M.B. (1990). Geometrical and structural aspects of concrete fracture. *Engineering Fracture Mechanics* 35:617–628 . doi: 10.1016/0013-7944(90)90144-6
- [20] Bažant, Z.P. (1994). Recent advances in fracture mechanics, size effect and rate dependence of concrete: Implication for dams. *International Workshop on Dam Fracture and Damage*. Bourdarot E, Mazars J., Saouma V. (eds) A. A. Balkema, Rotterdam, Chambéry, France, pp 41–54
- [21] Kim, J.-K.; Yi, S.-T.; Park, C.-K.; Eo S.-H. (1999). Size effect on compressive strength of plain and spirally reinforced concrete cylinders. *Struct J* 96:88–94
- [22] Higginson, E.; Wallace, G.; Ore, E. (1962). Effect of maximum size of aggregate upon compressive strength of concrete. *Symposium on mass concrete*. U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, p 23
- [23] Akçaoğlu, T.; Tokyay, M.; Çelik, T. (2004). Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. *Cem Concr Compos* 26:633–638 . doi: 10.1016/S0958-9465(03)00092-1
- [24] Popovics, S.; Ujhelyi, J. (2008). Contribution to the concrete strength versus water-cement ratio relationship. *Journal of Materials in Civil Engineering* 20:459–463 . doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:7(459)
- [25] Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N.; Custódio, J. (2017). Prediction of dam concrete compressive and splitting tensile strength based on wet-screened concrete test results. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29:10 . doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002012
- [26] Bažant, Z.P. (1984). Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics* 110:518–535
- [27] Kim, J.-K.; Eo, S.-H.; Park, H.-K. (1990). Size effect in concrete structures without initial crack. *Spec Publ* 118:179–196
- [28] Kim, J.-K. (1990). Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks. *Mag Concr Res* 42:233–238 . doi: 10.1680/mac.1990.42.153.233
- [29] Abrams, D. (1918). *Design of concrete mixtures*. Lewis Institute, Chicago
- [30] Ganesh Babu, K.; Siva Nageswara Rao, G. (1996). Efficiency of fly ash in concrete with age. *Cement and Concrete Research* 26:465–474 . doi: 10.1016/S0008-8846(96)85034-4
- [31] EDP (2005). *Aproveitamento hidroelétrico do Bbaixo Sabor*. Projecto. *Memória Geral e Apêndices*