

## **Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens.**

### **Parte 1 – Caracterização probabilística das propriedades potenciais a partir de resultados de ensaios**



**Renato Pereira<sup>1</sup>**



**António Lopes  
Batista<sup>2</sup>**



**Luís Canhoto  
Neves<sup>3</sup>**

#### **Resumo**

O betão em massa utilizado na construção de barragens, devido aos requisitos do seu desempenho, tem, em regra, uma pequena dosagem de ligante e agregados de grandes dimensões (até cerca de 150 mm). O cimento tem vindo a ser substituído, nos últimos anos, por adições, principalmente cinzas volantes, até cerca de 50% da sua quantidade. Devido às diferenças de composição, as propriedades mecânicas do betão de barragens, designadamente a resistência e a deformabilidade, são distintas e desenvolvem-se mais lentamente que as do betão correntemente utilizado nas estruturas de edifícios e pontes.

Na primeira parte deste trabalho propõe-se uma metodologia para a caracterização probabilística das propriedades potenciais do betão de barragens a partir de resultados de ensaios laboratoriais de resistência e deformabilidade, com vista à quantificação das suas propriedades estruturais (“in situ”) e posterior utilização em análises de fiabilidade de obras integradas em novos projetos. Para este efeito consideram-se os resultados dos ensaios realizados durante a construção de 5 grandes barragens de betão portuguesas, para quantificar a variabilidade das suas propriedades potenciais, individualizando o betão fabricado em central no estaleiro da obra, o betão pronto fabricado em central industrial e o betão compactado com cilindros. Propõem-se coeficientes de variação da resistência potencial à compressão dos diferentes tipos de betão, sendo a quantificação dos valores potenciais das restantes propriedades (resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração em flexão, resistência à tração direta e módulo de elasticidade) feita, a partir da resistência potencial à compressão, por análises de regressão. Apresentam-se ainda exemplos das distribuições de probabilidade das propriedades potenciais para cada tipo de betão.

**Palavras-chave:** Betão de barragens, ensaios, propriedades potenciais, propriedades estruturais.

---

<sup>1</sup> Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Caparica, Portugal; e-mail: r.pereira@campus.fct.unl.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa Portugal; e-mail: a.l.batista@lnec.pt

<sup>3</sup> The University of Nottingham, Nottingham Transportation Engineering Centre, Nottingham, United Kingdom; email: luis.neves@nottingham.ac.uk

## 1. INTRODUÇÃO

O betão em massa utilizado na construção de barragens, devido aos requisitos do seu desempenho, tem, em regra, uma pequena dosagem de ligante e agregados de grandes dimensões (até cerca de 150 mm). O cimento tem vindo a ser substituído, nos últimos anos, por adições, principalmente cinzas volantes, até cerca de 50% da sua quantidade. Devido às diferenças de composição, as propriedades mecânicas do betão de barragens, designadamente a resistência e a deformabilidade, são distintas e desenvolvem-se mais lentamente que as do betão correntemente utilizado nas estruturas de edifícios e pontes.

As propriedades mecânicas do betão devem ser quantificadas considerando a sua incerteza [1]. Os ensaios realizados sobre provetes moldados durante o fabrico e colocação têm por objetivo quantificar as propriedades potenciais do betão (propriedades equivalentes obtidas nos provetes para idades de referência) e validar a sua utilização. Os resultados destes ensaios permitem ainda estimar a variabilidade das propriedades potenciais, que são devidas à variabilidade das propriedades dos componentes naturais do betão e às condições de fabrico do betão e de cura e endurecimento dos provetes em laboratório, bem como à forma e dimensão dos provetes e às próprias condições de ensaio. As propriedades reais do betão estrutural “in situ” dependem ainda das condições de transporte, colocação, cura e endurecimento em obra, bem como do tratamento das juntas de betonagem. No caso das barragens, onde o número de juntas de betonagem é muito grande, as propriedades estruturais do betão a considerar em análises de segurança dependem muito da qualidade dessas juntas.

Na primeira parte deste trabalho propõe-se uma metodologia para a caracterização probabilística das propriedades potenciais do betão de barragens a partir de resultados de ensaios laboratoriais de resistência e deformabilidade, realizados durante a construção, com vista à quantificação das suas propriedades estruturais e posterior utilização em análises de fiabilidade. Na segunda parte do trabalho propõe-se um modelo de previsão das propriedades estruturais do betão de barragens, considerando o efeito de escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes de pequenas dimensões, e os efeitos, aleatórios, resultantes da heterogeneidade espacial do betão e das suas condições de aplicação.

A partir dos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização da resistência e da deformabilidade do betão utilizado em 5 grandes barragens de betão portuguesas, quantifica-se a variabilidade das suas propriedades potenciais, individualizando o betão fabricado em central no estaleiro da obra (BFE), o betão pronto fabricado em central industrial (BPC) e o betão compactado com cilindros (BCC). Através da análise estatística dos resultados dos ensaios, propõem-se coeficientes de variação da resistência potencial à compressão dos diferentes tipos de betão. Posteriormente, através de análises de regressão, propõem-se modelos preditivos de outras propriedades potenciais (resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração em flexão, resistência à tração direta e módulo de elasticidade) em função da resistência potencial à compressão.

Por fim, mostra-se um exemplo de quantificação probabilística das propriedades potenciais de cada tipo de betão de barragens em função da resistência característica à compressão.

## 2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE ENSAIOS LABORATORIAIS DE CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO DE 5 GRANDES BARRAGENS PORTUGUESAS

### 2.1. Considerações gerais sobre os ensaios

Os elementos de base do presente trabalho são os resultados dos ensaios de caracterização da resistência potencial à compressão do betão de 5 grandes barragens portuguesas, as barragens do Baixo Sabor, Ribeiradio, Ferradosa, Olgas e Pedrógão. Nas barragens do Baixo Sabor, Ferradosa e Ribeiradio utilizou-se betão fabricado em central no estaleiro (BFE), na barragem de Olgas usou-se

betão pronto fabricado em central industrial (BPC) localizada na proximidade da obra (cerca de 20 km) e na barragem de Pedrógão utilizou-se betão compactado com cilindros (BCC). A barragem de Olgas é um dos poucos exemplos, em Portugal, em que se usou integralmente betão pronto numa grande barragem, e a barragem de Pedrógão é a única barragem portuguesa construída com BCC.

Para o controlo de qualidade dos betões destas obras foram realizados ensaios sobre provetes de dimensões e geometrias normalizadas [2], desde os primeiros dias até cerca de um ano de idade. Em dois casos (Baixo Sabor e Ribeiradio), em que a máxima dimensão do agregado utilizado excedia 38 mm, ensaiaram-se maioritariamente provetes de betão crivado pelo peneiro #38, embora também tenham sido ensaiados alguns provetes de betão integral, em que a menor dimensão do provete foi de, no mínimo, 3 vezes a máxima dimensão do agregado, numa prensa de grande capacidade de carga.

Agruparam-se os resultados dos ensaios por idade e tipo de provete. Para cada amostra de resultados, procedeu-se à sua análise estatística dando especial atenção à evolução do coeficiente de variação no tempo.

## 2.2. Aspectos relacionados com a análise estatística

A média ( $\bar{x}$ ) e desvio-padrão ( $s$ ) de uma amostra  $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , são parâmetros estatísticos que quantificam o valor médio e a dispersão das observações, respetivamente, sendo dados por,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2)$$

Considera-se frequentemente o coeficiente de variação na comparação das propriedades de materiais estruturais [3]. O coeficiente de variação, sendo uma medida relativa da dispersão de uma amostra, é muito útil no estabelecimento da comparação da resistência à compressão de betões de diferentes composições, que naturalmente apresentam diferentes ordens de grandeza deste valor.

O coeficiente de variação (CV) de uma amostra é dado pela razão entre o desvio-padrão e a média,

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3)$$

Contudo, o cálculo do coeficiente de variação pela expressão apresentada pode levar a más interpretações caso o tamanho da amostra seja pequeno, podendo conduzir a valores do CV irrealisticamente pequenos, ou se for observada assimetria na distribuição das observações [4]. Nestes casos, o coeficiente de variação deve ser estimado considerando o valor médio e o desvio-padrão da distribuição que melhor se ajusta às observações, devendo ser calculado um intervalo de confiança desta grandeza, que depende do tamanho da amostra.

A distribuição normal tem sido considerada para modelar a variabilidade das propriedades do betão [5, 6, 7]. Contudo, o código-modelo da Joint Committee on Structural Safety [8] e o Eurocódigo 0 [9] recomendam a consideração de distribuições não negativas, tais como distribuição log-normal e de Weibull. Em análises de fiabilidade, onde interessam particularmente as caudas inferiores da distribuição de probabilidades das propriedades estruturais, a distribuição normal só deve ser considerada em casos em que a probabilidade de observação de valores negativos (impossíveis) seja irrelevante.

Verificou-se a qualidade do ajuste das distribuições normal, log-normal e de Weibull pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Na secção seguinte mostram-se, para cada amostra de resultados, as distribuições que melhor se ajustaram.

### 2.3. Propriedades estatísticas dos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização da resistência à compressão

#### 2.3.1. Betão da barragem do Baixo Sabor

A barragem do Baixo Sabor localiza-se no trecho inferior do rio Sabor. É uma barragem abóbada de dupla curvatura com 123 m de altura, concluída recentemente. Utilizaram-se agregados grossos graníticos com máxima dimensão de 150 mm no betão aplicado no núcleo da barragem. Ensaíram-se, no estaleiro da obra, provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150) de betão crivado. Testaram-se também, no laboratório da EDP (dono de obra), provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150) e cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura ( $\phi 150 \times 300$ ) de betão crivado, e provetes cilíndricos de 450 mm de diâmetro e 900 mm de altura ( $\phi 450 \times 900$ ) de betão integral. Na Figura 1 mostram-se a evolução no tempo dos resultados dos ensaios de caracterização, a distribuição que melhor se adequa a cada amostra e a estimativa e intervalo de confiança do coeficiente de variação da resistência à compressão do betão utilizado.

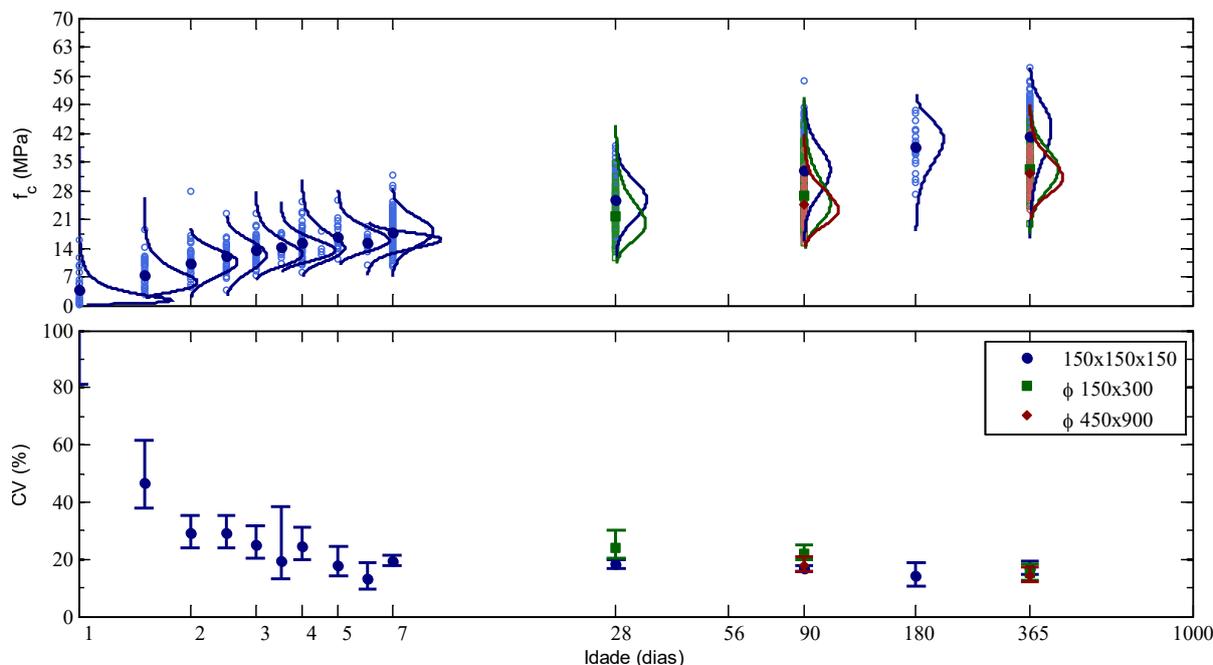


Figura 1. Evolução no tempo dos resultados e dos coeficientes de variação dos ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão da barragem do Baixo Sabor.

#### 2.3.2. Betão da barragem de Ferradosa

A barragem de Ferradosa localiza-se na ribeira de Ferradosa, no concelho de Freixo de Espada à Cinta. É uma barragem gravidade com 33,40 m de altura, concluída em 2007. Utilizaram-se agregados grossos graníticos no betão aplicado na barragem. Ensaíram-se, no estaleiro da obra, provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150). Testaram-se também, no LNEC, provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150) e de 200 mm de aresta (200x200x200). Na Figura 2 mostram-se a evolução no tempo dos resultados dos ensaios de caracterização, a distribuição que melhor se adequa a cada amostra e a estimativa e intervalo de confiança do coeficiente de variação da resistência à compressão do betão utilizado.

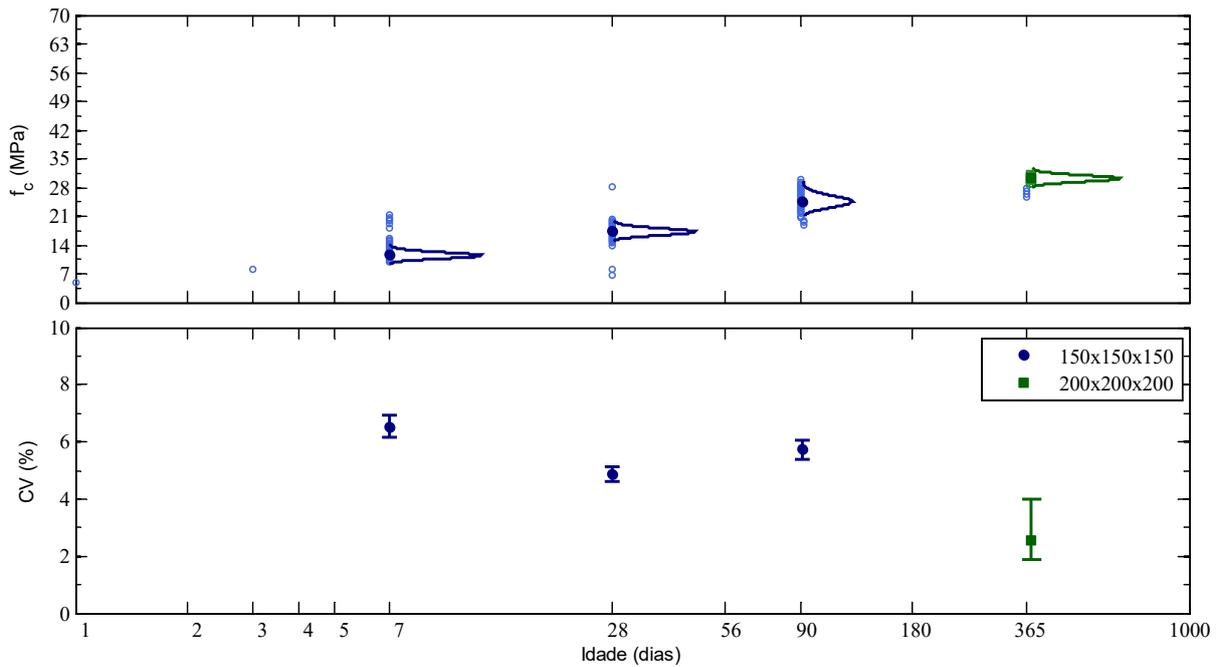


Figura 2. Evolução no tempo dos resultados e dos coeficientes de variação dos ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão da barragem de Ferradosa.

### 2.3.3. Betão da barragem de Olgas

A barragem de Olgas localiza-se na ribeira do Arroio, no concelho de Torre de Moncorvo. É uma barragem gravidade com 34,50 m de altura, concluída em 2007. O betão aplicado na barragem, com agregados grossos do tipo granítico, foi produzido na central da CIMPOR em Torre de Moncorvo. Ensaaiaram-se, no estaleiro da obra, provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150). Ensaaiaram-se também, no LNEC, provetes cúbicos de 150 mm (150x150x150) e 200 mm de aresta (200x200x200). Na Figura 3 mostram-se a evolução no tempo dos resultados dos ensaios de caracterização, a distribuição que melhor se adequa a cada amostra e a estimativa e intervalo de confiança do coeficiente de variação da resistência à compressão do betão utilizado.

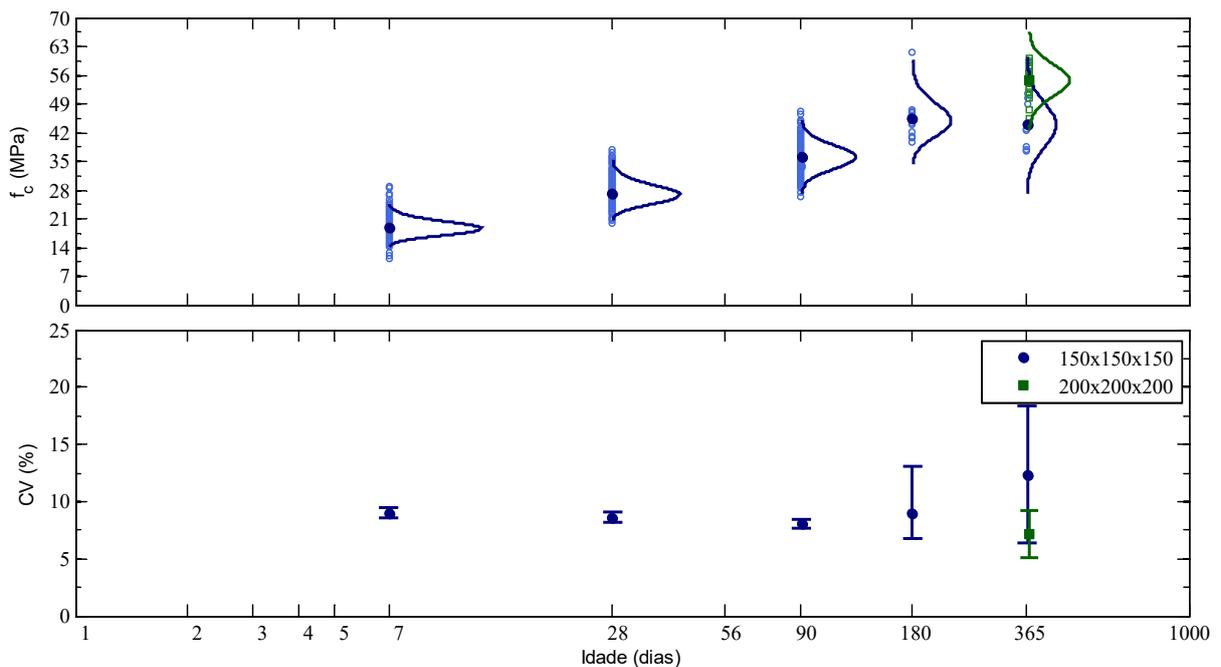


Figura 3. Evolução no tempo dos resultados e dos coeficientes de variação dos ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão da barragem de Olgas.

### 2.3.4. Betão da barragem de Pedrógão

A barragem de Pedrógão localiza-se no rio Guadiana, a jusante da barragem de Alqueva. É uma barragem gravidade com 43 m de altura, concluída em 2006. É a primeira e única barragem, em Portugal, construída em betão compactado com cilindros (BCC). Utilizaram-se betões com 3 composições diferentes (BBC1A, BCC2 e BCC3), com agregados grossos do tipo quartzítico. Ensaíram-se, no LNEC, provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Na Figura 4 mostram-se a evolução no tempo dos resultados dos ensaios de caracterização, a distribuição que melhor se adequa a cada amostra e a estimativa e intervalo de confiança do coeficiente de variação da resistência à compressão do betão utilizado.

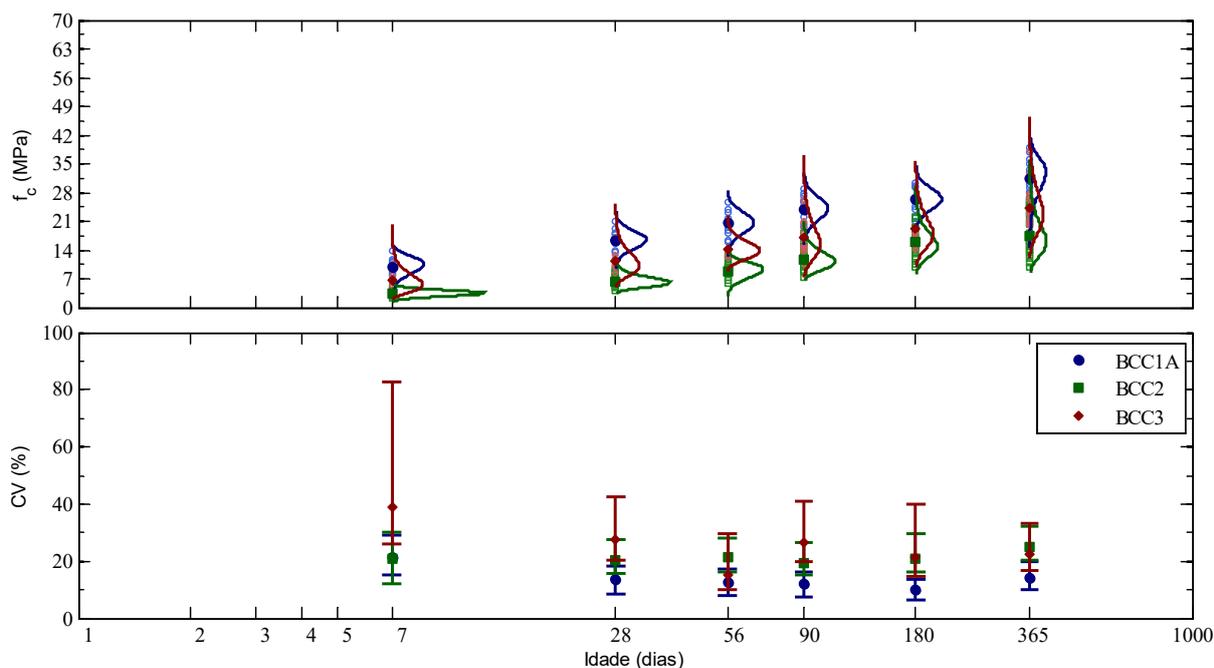


Figura 4. Evolução no tempo dos resultados e dos coeficientes de variação dos ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão da barragem de Pedrógão.

### 2.3.5. Betão da barragem de Ribeiradio

A barragem de Ribeiradio localiza-se no rio Vouga, no concelho de Sever do Vouga. É uma barragem gravidade de 83 m de altura, concluída em 2015. Utilizaram-se agregados grossos graníticos com máxima dimensão de 125 mm no betão aplicado no núcleo da barragem. Ensaíram-se, no estaleiro da obra, provetes cúbicos de 150 mm de aresta (150x150x150) de betão crivado. Ensaíram-se também, no laboratório da EDP (dono de obra), provetes cúbicos de 150 mm (150x150x150) e 200 mm de aresta (200x200x200) de betão crivado, e provetes cilíndricos de 450 mm de diâmetro e 900 mm de altura ( $\phi 450 \times 900$ ) de betão integral. Na Figura 5 mostram-se a evolução no tempo dos resultados dos ensaios de caracterização, a distribuição que melhor se adequa a cada amostra e a estimativa e intervalo de confiança do coeficiente de variação da resistência à compressão do betão utilizado.

## 2.4. Interpretação dos resultados da análise estatística

De um modo geral, as amostras foram bem ajustadas por uma das três distribuições consideradas, sendo que, para idades muito jovens, a distribuição log-normal foi a que melhor se ajustou na maioria dos casos. A partir dos 28 dias de idade a distribuição normal é a que melhor se ajusta. Como distribuição assimétrica, a distribuição de Weibull não apresenta vantagens relativamente à distribuição log-normal. As amostras que foram melhor ajustadas por esta distribuição tinham, em geral, tamanhos reduzidos.

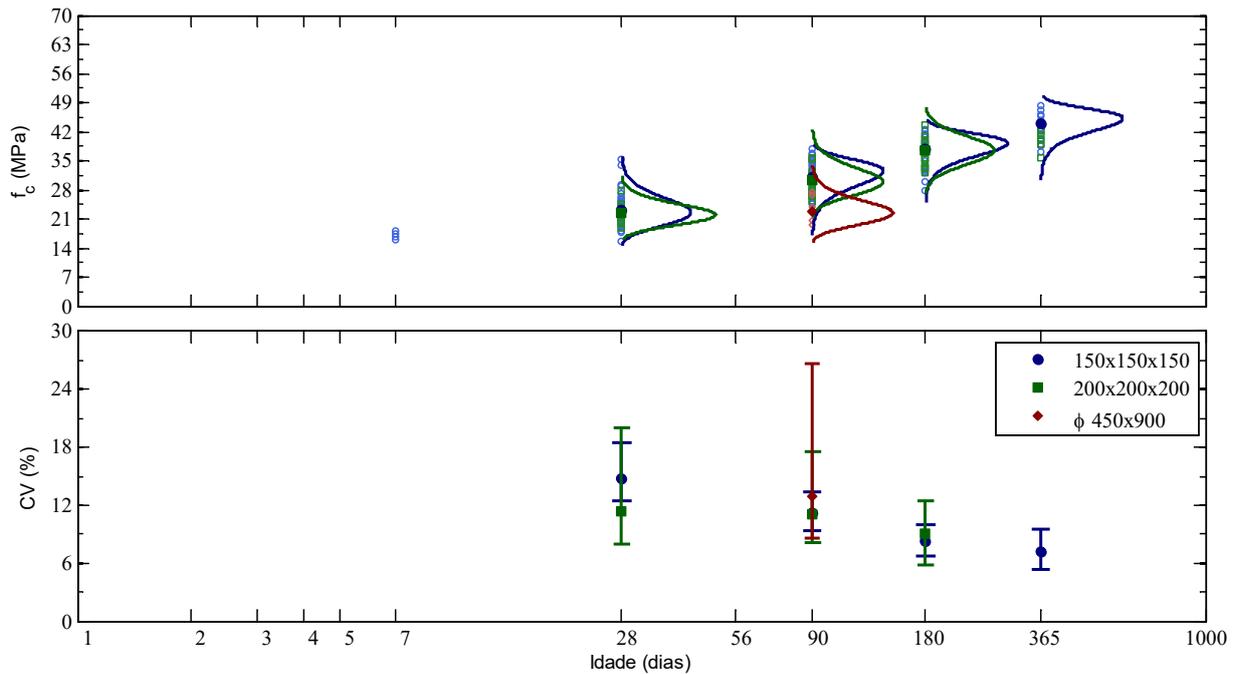


Figura 5. Evolução no tempo dos resultados e dos coeficientes de variação dos ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão da barragem de Ribeiradio.

Como a idade de referência para a resistência do betão de barragens é, em geral, igual ou superior a 90 dias [1], é pouco provável observarem-se resistências baixas nos ensaios à compressão. Contudo, opta-se por considerar a distribuição log-normal na quantificação probabilística desta e das restantes propriedades potenciais do betão, para se evitar obter, em análises de fiabilidade, resultados sem significado.

O coeficiente de variação apresenta uma tendência decrescente no tempo. Este facto é claramente observado no caso do betão da barragem do Baixo Sabor, em que se dispõe de resultados de ensaios desde idades muito jovens. Para idades correspondentes à idade de referência geralmente considerada, observam-se diferentes ordens de grandeza do coeficiente de variação. Assim: i) para o betão fabricado em central no estaleiro (BFE) propõe-se a consideração de um coeficiente de variação de 20% correspondente ao pior caso observado (Baixo Sabor); ii) para o betão pronto fabricado em central industrial (BPC), apesar de se terem observado valores da ordem de 10% no betão da barragem de Olgas, propõe-se a consideração de um coeficiente de variação de 15%, da mesma ordem de grandeza dos valores observados para o betão de outro tipo de estruturas [10]; e iii) para o betão compactado com cilindros (BCC), tendo-se verificado no betão da barragem de Pedrógão um valor maior que nos restantes casos analisados, propõe-se a consideração de um coeficiente de variação de 25%, em acordo com o valor médio desta grandeza obtido em outras barragens de BCC [11].

### 3. ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E OUTRAS PROPRIEDADES POTENCIAIS

#### 3.1. Aspectos relacionados com as análises de regressão

Utilizaram-se também os resultados de ensaios de caracterização de outras propriedades potenciais do betão para propor modelos preditivos dessas propriedades a partir dos resultados de ensaios de caracterização da resistência potencial à compressão. Estes modelos são obtidos a partir de análises de regressão.

Admita-se que se dispõe de uma amostra de  $n$  pares de observações das propriedades  $x$  e  $y$   $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ . A partir da análise de regressão, estabelece-se um modelo, em que o erro ( $\varepsilon$ )

segue uma distribuição normal com média nula. Nos casos em que se considera que a variável a quantificar segue uma distribuição log-normal, deve-se fazer uso da afinidade entre as propriedades das distribuições normal e log-normal. Assim, o modelo é dado por,

$$\ln(y) | x = \ln(f(x)) + \varepsilon = \ln(f(x)) + \sigma \cdot N(0,1) \quad (4)$$

em que  $\ln(y)$  é o logaritmo da propriedade  $y$ ,  $f(x)$  é uma função da propriedade  $x$  e  $\sigma$  é o desvio-padrão dos resíduos. No entanto, para contabilizar a incerteza estatística que advém da consideração de um número finito de observações, deve-se usar a distribuição t de Student em vez da distribuição normal [12]. Este modelo é dado por,

$$\ln(y) | x = \ln(f(x)) + \sigma \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \cdot T_{n-2} \quad (5)$$

em que  $T_{n-2}$  é a distribuição t de Student com  $n-2$  graus de liberdade.

### 3.2. Modelo probabilístico de previsão do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do betão

Na literatura [13, 14, 15] encontram-se expressões que relacionam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão do betão. A maioria das expressões traduzem uma relação do tipo exponencial, ou seja,

$$E = f(f_c) = k \cdot f_c^\beta \quad (6)$$

Ajustou-se uma relação deste tipo aos pares de valores disponíveis. Separaram-se as observações de acordo com o tipo de betão. Têm-se: i) 711 observações para o betão fabricado em central no estaleiro (BFE) provenientes dos ensaios de caracterização do betão das barragens do Baixo Sabor e Ribeiradio; ii) nenhuma observação para o betão pronto fabricado em central industrial (BPC); e iii) 26 observações para o betão compactado com cilindros (BCC), provenientes dos ensaios de caracterização do betão da barragem de Pedrógão. Na Figura 6 mostra-se o ajuste da expressão dada pela Eq. (6) às observações de cada tipo de betão, considerando as diferentes idades.

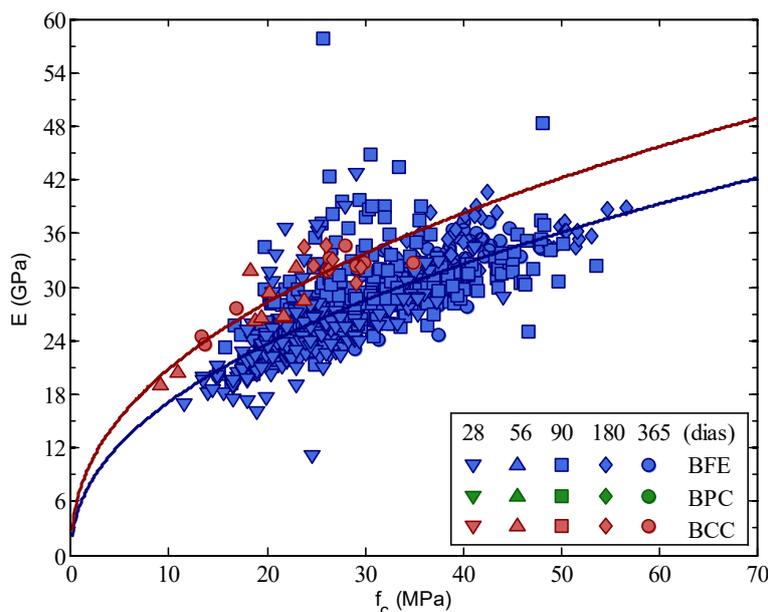


Figura 6. Ajuste da expressão dada na Eq. (6) aos pares de valores  $f_c$ -E observados.

No Quadro 1 resumem-se os parâmetros do modelo preditivo do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.

Quadro 1. Parâmetros do modelo preditivo do módulo de elasticidade.

Tipo de betão	Estimadores			n
	$\hat{k}$	$\hat{\beta}$	$\hat{\sigma}$	
BFE	5888,9	0,4634	0,1175	711
BPC	-	-	-	-
BCC	7614,1	0,4376	0,0703	26

Por falta de informação, para o betão pronto fabricado em central industrial (BPC) considera-se a relação obtida para o betão fabricado em central no estaleiro (BFE).

### 3.3. Modelo probabilístico de previsão das resistências à tração em função da resistência à compressão do betão

Como indicado na literatura [13, 14], considerou-se também uma expressão do tipo exponencial para relacionar a resistência à tração com a resistência à compressão, ou seja,

$$f_t = f(f_c) = k \cdot f_c^\beta \tag{7}$$

Ajustou-se uma relação deste tipo aos pares de valores disponíveis. Separaram-se as observações de acordo com o tipo de ensaio executado. Assim, têm-se: i) 92 observações dos ensaios de caracterização de resistência à tração direta (TD) do betão da barragem de Pedrógão; ii) 326 observações dos ensaios de caracterização da resistência à tração por compressão diametral (TCD) do betão das barragens do Baixo Sabor e Ribeiradio; e iii) 136 observações dos ensaios de caracterização da resistência à tração em flexão (TF) do betão da barragem de Ribeiradio. Na Figura 7 mostra-se o ajuste da expressão dada pela Eq. (7) às observações de cada tipo de ensaio, tendo-se agrupado as observações de diferentes idades.

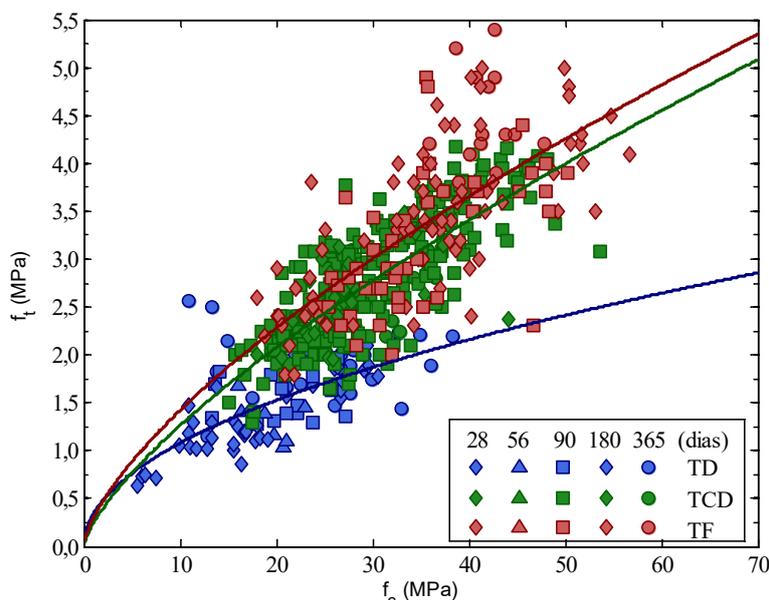


Figura 7. Ajuste da expressão dada na Eq. (7) aos pares de valores  $f_c$ - $f_t$  observados.

No Quadro 2 resumem-se os parâmetros do modelo preditivo da resistência à tração em função da resistência à compressão.

Quadro 2. Parâmetros do modelo preditivo da resistência à tração.

Tipo de ensaio	Estimadores			n
	$\hat{k}$	$\hat{\beta}$	$\hat{\sigma}$	
TD	0,3414	0,4999	0,2151	92
TCD	0,2437	0,7149	0,1399	326
TF	0,2968	0,6806	0,1783	136

#### 4. ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES POTENCIAIS DE CADA TIPO DE BETÃO DE BARRAGENS EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO

Suponha-se que se prescreve para o betão uma resistência potencial característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa e que esse valor deve corresponder ao 5º quantil dos resultados dos ensaios de caracterização. Considerando o método de Monte Carlo e as propostas apresentadas neste trabalho, pode obter-se a distribuição de probabilidade das restantes propriedades potenciais.

Este procedimento tem uma sequência de quatro passos: 1) com o coeficiente de variação da resistência potencial à compressão, calculam-se os parâmetros da distribuição log-normal que verificam a condição  $P(f_c < f_{ck}) = 5\%$ ; 2) gera-se uma amostra da resistência potencial à compressão; 3) gera-se uma amostra das restantes propriedades potenciais considerando o modelo traduzido pela Eq. (5) e as relações apresentadas nas secções anteriores; e 4) infere-se sobre as distribuições de probabilidade dessas propriedades.

Na Figura 8 apresentam-se as distribuições de probabilidade obtidas considerando a resistência potencial característica à compressão de 25 MPa.

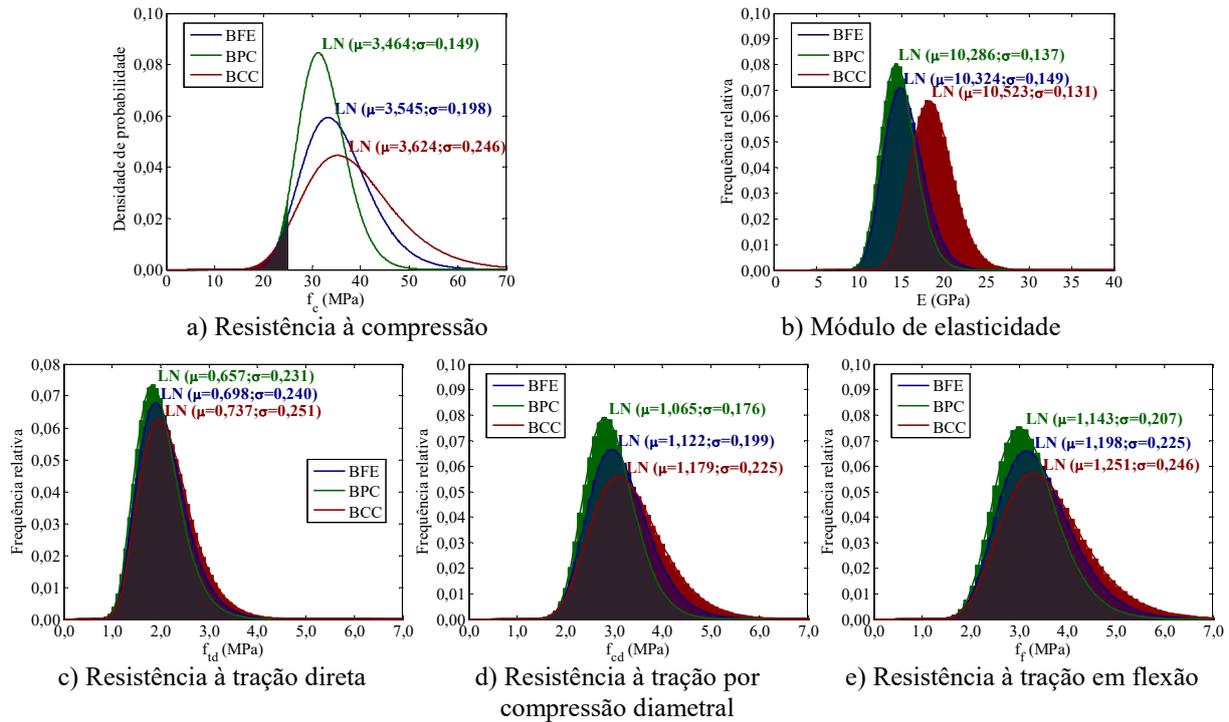


Figura 8. Distribuição de probabilidades das propriedades potenciais de um betão de cada tipo cuja resistência potencial característica à compressão é de 25 MPa.

## 5. CONCLUSÕES

O betão em massa utilizado na construção de barragens, devido aos requisitos do seu desempenho, tem, em regra, uma pequena dosagem de ligante e agregados de grandes dimensões (até cerca de 150 mm). O cimento tem vindo a ser substituído, nos últimos anos, por adições, principalmente cinzas volantes, até cerca de 50% da sua quantidade. Devido às diferenças de composição, as propriedades mecânicas do betão de barragens, designadamente a resistência e a deformabilidade, são distintas e desenvolvem-se mais lentamente que as do betão correntemente utilizado nas estruturas de edifícios e pontes.

Considerando que as propriedades mecânicas do betão devem ser quantificadas considerando a sua incerteza [1], neste trabalho apresenta-se uma metodologia de quantificação da variabilidade das propriedades potenciais do betão de barragens, utilizando os resultados de ensaios realizados sobre provetes moldados durante o fabrico e colocação, individualizando-se o betão fabricado em central no estaleiro da obra, o betão pronto fabricado em central industrial e o betão compactado com cilindros. Numa primeira fase, através da análise estatística dos resultados dos ensaios, propõem-se coeficientes de variação da resistência potencial à compressão dos diferentes tipos de betão. De seguida, através de análises de regressão, propõem-se modelos preditivos de outras propriedades potenciais (resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração em flexão, resistência à tração direta e módulo de elasticidade) em função da resistência potencial à compressão.

Mostra-se um exemplo de quantificação probabilística das propriedades potenciais de cada tipo de betão de barragens em função da resistência característica à compressão, que servirá de base para a segunda parte deste trabalho, onde se propõe um modelo de previsão das propriedades estruturais do betão de barragens considerando o efeito de escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes de pequenas dimensões, e os efeitos, aleatórios, resultantes da heterogeneidade espacial do betão e das condições da sua aplicação.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a autorização concedida pelos donos de obra para a utilização dos resultados dos ensaios laboratoriais. Agradecem também ao LNEC pelo apoio recebido e à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento através da bolsa SFRH/BD/91131/2012.

## REFERÊNCIAS

- [1] ICOLD (2008). The physical properties of hardened conventional concrete in dams. Technical report, Draft for ICOLD review.
- [2] NPEN 206-1 (2007). Norma portuguesa do betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. 2ª Edição, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- [3] Verrill, S. (2003). Confidence Bounds for Normal and Lognormal Distribution Coefficients of Variation. Research Paper FPL-RP-609, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.
- [4] Koopmans, L.H.; Owen, D.B.; Rosenblatt, J.I. (1964). Confidence intervals for the coefficient of variation for the normal and lognormal distributions. *Biometrika*, Vol. 51, No. 1/2, pp. 25-32.
- [5] Kreuzer, H.L. (1973). A probability-based safety factor approach for arch dams. *Water Power & Dams Construction*, Vol. 25, No. 12, pp. 458-463
- [6] Ferry-Borges, J.; Castanheta, M. (1968). Structural safety. LNEC, Curso 101.

- [7] Pedro, J.O. (2007). Barragens abóbada: Coeficientes de funcionalidade e segurança e probabilidades de incidente e acidente para cenários de degradação do betão. LNEC, Informação técnica ITB35 – Barragens.
- [8] JCSS (2001) Probabilistic model code – Part I: Basis of design. Technical report, Joint Committee on Structural Safety.
- [9] EN1990 (2002). Eurocode 0. Basis of structural design. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [10] Aït-Mokhtar *et al.* (2013). Experimental investigation on the variability of the concrete durability properties. *Cement and Concrete Research*, Vol. 45, pp. 21-36.
- [11] Jafarbegloo, M.; Hajialikhani, M.R. (2012). Quality control in Zirdam RCC dam. *Proceedings of the 6th International Symposium on Roller-Compacted Concrete (RCC) Dams*, 23-25 October 2012, Zaragoza, Spain.
- [12] Bernardo, J.M.; Smith, A.F.M. (2000). Bayesian theory. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- [13] FIB (2010). Model code for concrete structures 2010. International Federation for Structural Concrete, Wiley.
- [14] ACI (2005). Guide to mass concrete. American Concrete Institute, ACI Report 207.1R-05.
- [15] EN1992 (2004). Eurocode 2. Design of concrete structures – Part I: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.