

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

### **Parte 2 – Estimativa das propriedades reais a partir das propriedades potenciais**



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



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



**Luís Canhoto  
Neves<sup>3</sup>**

#### **Resumo**

Na primeira parte do presente trabalho apresentou-se a metodologia proposta 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 “in situ” e posterior utilização em análises de fiabilidade de obras integradas em novos projetos.

No caso das barragens, que são estruturas de betão em massa, têm-se verificado, no final da construção e início da exploração, situações de heterogeneidade espacial do betão aplicado nas obras, devidas não só a variações de composição do betão mas também à existência de zonas com vazios localizados e deficientes ligações entre camadas de betonagem, a que muitas vezes estão associados repasses de água. Esta falta de homogeneidade do betão aplicado está relacionada com condições menos adequadas no transporte, colocação, vibração, cura e endurecimento do betão das obras, mas também com o deficiente tratamento de juntas de construção.

Nesta segunda parte do trabalho propõe-se um modelo de previsão das propriedades estruturais do betão de barragens, conhecida a caracterização probabilística das propriedades potenciais, obtida, como referido, a partir dos resultados de ensaios laboratoriais sobre provetes de betão moldados durante a construção. O modelo considera o efeito de escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes de pequenas dimensões, e os efeitos, aleatórios, resultantes da referida heterogeneidade espacial do betão aplicado nas obras.

**Palavras-chave:** Betão de barragens, 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

As propriedades do betão são normalmente quantificadas a partir dos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização da resistência e deformabilidade, realizados durante a construção, que permitem obter as propriedades potenciais do betão, que dependem não só da variabilidade intrínseca do material mas também das condições de ensaio. Em regra, dispõe-se de muita informação sobre os ensaios, principalmente no que respeita à resistência à compressão, já que é nela que assenta, predominantemente, o controlo de qualidade do betão na fase construtiva.

No caso das barragens, que são estruturas de betão em massa, aplicado por camadas nos diferentes blocos em que as obras são divididas, têm-se verificado, no final da construção e início da exploração, situações de heterogeneidade espacial do betão, caracterizadas essencialmente pela existência de vazios localizados e deficientes ligações entre camadas de betonagem, a que muitas vezes estão associados repasses de água. Passagens de água podem também estar associadas a juntas de contração não injetadas ou mal preenchidas com calda de cimento. A falta de homogeneidade do betão aplicado está relacionada, em regra, com condições menos adequadas no transporte, colocação, vibração, cura e endurecimento do betão da obra, mas também pode ser devida ao deficiente tratamento de juntas de construção. Este último aspeto reveste-se de uma importância acrescida nas barragens pois o número de juntas de betonagem é muito grande e normalmente é nelas que são aparentes as consequências de grande parte das referidas deficiências de construção, através de passagens de água.

O betão estrutural das barragens é fabricado, em regra, com agregados de grandes dimensões (até cerca de 150 mm). A caracterização das propriedades deste betão, usualmente designado por betão integral, obriga à moldagem de provetes de dimensões apreciáveis (a menor dimensão do provete deve ser, no mínimo, 3 vezes a máxima dimensão do agregado), que, para além do difícil manuseamento e transporte, só podem ser ensaiados com equipamentos de grande capacidade, que normalmente não estão disponíveis nos laboratórios de obra. Assim, no controlo da qualidade dos betões nos estaleiros utilizam-se, predominantemente, provetes de menores dimensões, com geometrias normalizadas, moldados com betão crivado, que é obtido do betão integral pela remoção, em fresco, dos agregados de maiores dimensões, utilizando peneiros (em regra usam-se peneiros com malha de 38 mm). Os resultados dos ensaios do betão integral (realizados em laboratório específico) e do correspondente betão crivado permitem o controlo dos betões aplicados, mas as propriedades potenciais do betão estrutural são as obtidas nos ensaios do betão integral.

A caracterização das propriedades do betão das barragens na fase de exploração pode ser feita, de uma forma direta, através de ensaios realizados sobre carotes extraídas do corpo das obras, e, no que diz respeito à deformabilidade, de uma forma indireta, através de ensaios de ultra-sons e de vibração forçada. Face à dimensão das barragens, para a caracterização da resistência do betão é normalmente limitado o número de carotes e dos correspondentes ensaios, colocando-se o problema da representatividade da amostragem e dos resultados. Ao invés, os ensaios de ultra-sons e de vibração forçada fornecem informações preciosas relativamente à deformabilidade global das estruturas ou de partes delas.

Face às condicionantes descritas, no presente trabalho propõe-se um modelo de previsão das propriedades estruturais do betão de barragens a partir da caracterização probabilística das propriedades potenciais (obtidas a partir dos resultados de ensaios laboratoriais sobre provetes de betão integral moldados durante a construção), considerando o efeito de escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes, e os efeitos, aleatórios, resultantes da referida heterogeneidade espacial do betão aplicado. Estes últimos efeitos são representados por um coeficiente, designado por coeficiente de qualidade de construção, que foi quantificado, em termos probabilísticos, através dos resultados da inspeção visual de 53 grandes barragens de betão portuguesas no início da sua exploração.

No final mostram-se exemplos de gerações de valores aleatórios das propriedades estruturais do betão de barragens, a usar em análises de fiabilidade de obras integradas em novos projetos, para os casos

em que se utilizam betão fabricado em central no estaleiro da obra, betão pronto fabricado em central industrial e betão compactado com cilindros.

## 2. INCERTEZAS RELATIVAS ÀS PROPRIEDADES DO BETÃO DAS OBRAS

### 2.1. Aspetos gerais

As propriedades do betão obtidas em condições normalizadas, como acontece nos ensaios laboratoriais, são diferentes daquelas que se verificam nas obras, devido às condições particulares de colocação e cura do betão [1]. De facto, a resistência e a deformabilidade real do betão, definidas pela Concrete Society [2] como sendo as propriedades do betão aplicado “in situ”, não podem ser estimadas a partir das propriedades potenciais (propriedades equivalentes obtidas nos provetes para idades de referência) sem tomar em consideração as diferenças entre as condições laboratoriais e “in situ”.

No caso de barragens de betão, tratando-se de betão em massa colocado em camadas sucessivas, os fatores particulares associados às condições de colocação e cura têm uma importância acrescida. Durante as fases construtivas as barragens são sujeitas, em regra, a variações consideráveis nas condições reais de exposição a fatores exteriores, designadamente no que respeita às condições estruturais de fronteira, às condições térmicas impostas em períodos específicos e às condições ambientais.

Sendo muito difícil quantificar todos os efeitos inerentes ao processo construtivo, em termos práticos considera-se que as propriedades estruturais do betão aplicado em obra podem ser estimadas, a partir das propriedades potenciais obtidas em ensaios de provetes em condições normalizadas, tendo em conta o efeito de escala (devido à utilização de provetes de reduzidas dimensões quando comparadas com as dimensões dos elementos estruturais) e a influência do processo construtivo, designadamente as condições de colocação e de cura, bem como as condições das inúmeras juntas de betonagem. Considera-se assim que uma determinada propriedade real do betão, “in situ”, por exemplo a resistência real  $f^r$ , pode ser estimada por,

$$f^r = f^p \cdot \gamma_{se} \cdot \gamma_{cq} \quad (1)$$

em que  $f^p$  representa a resistência potencial obtida nos referidos ensaios (definida, em regra, por uma distribuição estatística),  $\gamma_{se}$  é uma variável (ou coeficiente) que traduz o efeito de escala e  $\gamma_{cq}$  é uma outra variável (ou coeficiente) que representa a influência das condições de construção, que se designará por coeficiente de qualidade da construção. Nos pontos seguintes detalham-se as abordagens consideradas para avaliar estes dois coeficientes, sendo que ambos deverão ter valores menores ou iguais à unidade, atendendo às realidades físicas que representam.

### 2.2. Efeito de escala

Os primeiros resultados de ensaios experimentais realizados com o mesmo betão e provetes de diferentes formas e dimensões mostraram a existência de um efeito de escala [3]. No entanto, estudos posteriores [4] revelaram ser difícil o estabelecimento de uma teoria para quantificar esse efeito de escala no betão, designadamente no que respeita à resistência à compressão. Usando os resultados experimentais disponíveis na literatura técnica e científica, foi possível encontrar uma relação para prever a resistência à compressão de provetes cilíndricos de betão com diferentes diâmetros ( $d$ ) e alturas ( $h$ ) [4]. Para relações  $h/d$  próximas de 1, a dispersão dos resultados disponíveis é grande, devidos aos efeitos de confinamento. Para provetes mais alongados a análise dos resultados permitiu concluir que a resistência estrutural (real) do betão é de cerca de 80% da resistência obtida em ensaios laboratoriais, sendo os efeitos do confinamento progressivamente menos importantes para relações crescentes de  $h/d$ .

Estudos realizados no LNEC [1], para betões usados em vigas e pilares de estruturas de edifícios e pontes, também puseram em evidência os efeitos das condições de ensaio na avaliação da resistência real do betão estrutural. Foi também feita uma pesquisa acerca do coeficiente de correlação entre a resistência potencial e real do betão (isto é, o fator que reflete o efeito de escala) considerado em vários países. Os valores adotados estão compreendidos entre 70% e 90%, sendo o valor de 85% o mais utilizado. Contudo, estes valores não têm em consideração as condições de colocação, cura e endurecimento, pelo que devem ser considerados com cautela.

Apesar das limitações referidas, no presente estudo considerar-se-á um coeficiente de 0,85 relativo ao efeito de escala para o betão estrutural das barragens. Contudo, considera-se que este valor deverá ser confirmado por estudos posteriores pois existe um parco conhecimento deste tipo de efeito no betão de barragens.

### 2.3. Efeitos das condições de construção

As condições de colocação, cura e endurecimento do betão em obra são condicionadas por diferentes fatores, em que se destacam a preparação das cofragens e das juntas de construção, os processos e sequências de betonagem, a utilização de arrefecimento artificial e a geração de calor e variações de temperatura associadas durante a cura e endurecimento.

Da experiência do LNEC na inspeção de barragens pode inferir-se que a qualidade aparente das superfícies de betão dos paramentos e galerias, que indiretamente integra muitas das consequências de grande parte das deficiências de construção, varia desde um aspeto compacto e homogéneo até situações variadas do estado das referidas juntas. Face a estas circunstâncias, propõe-se uma avaliação empírica da qualidade da construção a partir das inspeções visuais, considerando o estado aparente das superfícies de betão e a sua classificação em termos de aceitabilidade estrutural (Quadro 1).

Quadro 1. Avaliação empírica do estado aparente do betão a partir da inspeção visual e correspondente classificação em termos de aceitabilidade estrutural

Estado aparente das superfícies de betão	Classificação em termos de aceitabilidade estrutural
Muito homogéneo, sendo boa a ligação entre camadas de betonagem	Excelente
Homogéneo, existe um número muito reduzido de juntas de betonagem com humidade e pequenos depósitos de carbonato de cálcio	Muito bom
Suficientemente homogéneo, existe um número reduzido de juntas de betonagem com ligeiras passagens de água e depósitos de carbonato de cálcio	Bom
Menos homogéneo, existem juntas de betonagem com passagens de água e depósitos de carbonato de cálcio (até cerca de 5% do total)	Satisfatório

Situações correspondentes a betões pouco homogéneos, com vazios e/ou juntas de betonagem abertas com passagens de água e depósitos de carbonato de cálcio, não são aceitáveis do ponto de vista estrutural, pelo que requerem intervenções no sentido de solucionar este tipo de anomalias previamente à entrada em exploração normal das obras.

Na Fig. 1 apresentam-se dois exemplos relativos à consideração dos critérios de classificação propostos no Quadro 1.

No Quadro 2 apresentam-se propostas relativas à afetação da resistência estrutural (compressão, tração e corte) e de qualidade da construção em função da classificação em termos de aceitabilidade

estrutural. Os coeficientes de afetação da resistência que se propõem resultam da experiência prática dos ensaios realizados no Departamento de Materiais do LNEC sobre carotes retiradas de juntas de betonagem de barragens [5,6]. Assim, sempre que se verifiquem os critérios de aceitabilidade estrutural, considerou-se que a resistência à compressão do betão não é, na prática, afetada. No que respeita à resistência à tração, a existência de juntas de betonagem em menos boas condições pode comprometer o desempenho, pelo que se considerou uma diminuição máxima de resistência para 70% do valor obtido para o betão em boas condições. Relativamente à resistência ao corte, que pode ser considerada pelas parcelas de coesão e de atrito interno, esta segunda é menos afetada pelo deficiente estado das juntas, pelo que se considerou um coeficiente máximo de afetação de 0,85, que corresponde a um valor intermédio entre as afetações de resistência à compressão e à tração. Sendo um dos objetivos do projeto de barragens de betão a eliminação prática das tensões de tração e verificando-se que as roturas, em condições extremas, se dão predominantemente por corte, consideraram-se os coeficientes de qualidade da construção, a considerar em todas as propriedades nas análises de fiabilidade, idênticos aos coeficientes de afetação da resistência ao corte (ver Quadro 2).



Figura 1. Exemplos de estados aparentes dos paramentos de barragens: betão com aspeto homogéneo e boa ligação entre camadas de betonagem (à esquerda); betão com aspeto menos homogéneo e juntas de betonagem com repasses de água (à direita)

Quadro 2. Propostas relativas à afetação da resistência estrutural e ao coeficiente de qualidade da construção em função da classificação em termos de aceitabilidade estrutural

Classificação em termos de aceitabilidade estrutural	Coeficiente considerado para a afetação da resistência			Coeficiente de qualidade da construção ( $\gamma_{cq}$ )
	Compressão	Tração	Corte	
Excelente	1,0	1,0	1,0	1,0
Muito bom	1,0	0,90	0,95	0,95
Bom	1,0	0,80	0,90	0,90
Satisfatório	1,0	0,70	0,85	0,85

A escolha dos coeficientes que constam do Quadro 2 foi feita, como referido, considerando a experiência do LNEC. No contexto da análise da fiabilidade estrutural de barragens existentes, podem ser atribuídos valores bem definidos às diferentes zonas da estrutura. Contudo, na perspetiva da análise

estrutural na fase de projeto, propõe-se que o coeficiente de qualidade da construção seja considerado como uma variável aleatória cuja distribuição de probabilidade pode ser obtida a partir dos valores dos correspondentes coeficientes atribuídos ao universo das grandes barragens de betão portuguesas, o que será feito na secção seguinte.

### 3. COEFICIENTE DE QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO

#### 3.1. Avaliação da qualidade da construção das grandes barragens de betão portuguesas

No Quadro 3 apresentam-se os resultados da avaliação empírica do estado aparente das superfícies de betão de 53 grandes barragens de betão portuguesas, realizada no início da exploração das obras (após o primeiro enchimento das respetivas albufeiras e depois de corrigidas algumas anomalias pontuais que se verificaram durante esse enchimento). Esta avaliação foi feita recorrendo aos registos fotográficos e aos elementos que constam de inúmeros relatórios do LNEC correspondentes à análise do comportamento observado das barragens durante o primeiro enchimento das albufeiras. Em primeiro lugar deve salientar-se que a grande maioria das barragens tiveram uma classificação, em termos de aceitabilidade estrutural, de excelente ou muito bom. Nas barragens que tiveram uma classificação de bom (oito) ou satisfatório (apenas uma) ocorreram problemas pontuais durante a construção, designadamente relacionados com interrupções prolongadas de betonagens ou com o controlo da qualidade dos componentes e/ou do betão aplicado.

Quadro 3. Número estimado de grandes barragens de betão portuguesas em função do estado aparentes dos seus paramentos no início da fase de exploração

Estado aparente das superfícies de betão	Classificação em termos de aceitabilidade estrutural ( $\gamma_{cq}$ )	Número estimado de grandes barragens de betão portuguesas
Muito homogéneo, sendo boa a ligação entre camadas de betonagem	Excelente (1,0)	16
Homogéneo, existe um número muito reduzido de juntas de betonagem com humidade e pequenos depósitos de carbonato de cálcio	Muito bom (0,95)	28
Suficientemente homogéneo, existe um número reduzido de juntas de betonagem com ligeiras passagens de água e depósitos de carbonato de cálcio	Bom (0,90)	8
Menos homogéneo, existem juntas de betonagem com passagens de água e depósitos de carbonato de cálcio (até cerca de 5% do total)	Satisfatório (0,85)	1

#### 3.2. Quantificação probabilística do coeficiente de qualidade da construção

Na quantificação probabilística do coeficiente de qualidade da construção considerou-se uma distribuição normal contínua, que foi ajustada ao histograma dos valores discretos correspondentes aos coeficientes atribuídos às 53 grandes barragens de betão portuguesas. A distribuição foi truncada inferiormente no valor de 0,85 (como referido, coeficientes menores que 0,85 dizem respeito a estruturas de betão que não satisfazem os requisitos de qualidade requeridos) e superiormente no valor de 1,0 (que corresponde a condições excelentes de construção). A distribuição de probabilidade de  $\gamma_{cq}$  está representada na Fig. 2, sendo os seus parâmetros  $\mu=0,959$  e  $\sigma=0,037$ .

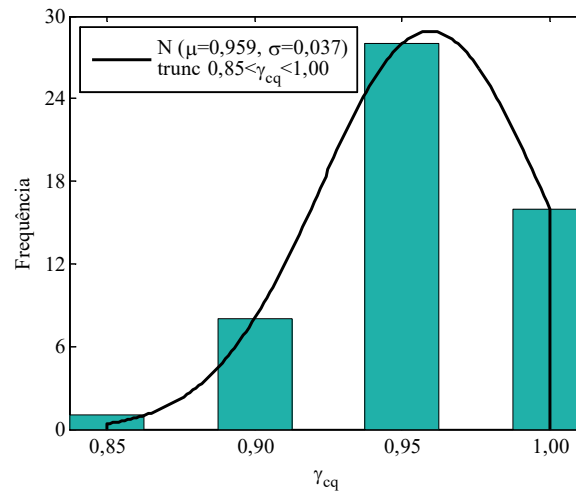


Figura 2. Distribuição de probabilidade do coeficiente de qualidade da construção das grandes barragens de betão portuguesas

O valor médio da distribuição de probabilidade do coeficiente de qualidade da construção,  $E[\gamma_{cq}] = 0,953$ , indica que a qualidade média de construção das 53 grandes barragens de betão portuguesas é muito boa.

#### 4. CONSIDERAÇÃO DA INCERTEZA DAS PROPRIEDADES DO BETÃO EM ANÁLISES DE FIABILIDADE

Como referido, em análises de fiabilidade as propriedades do betão devem ser consideradas como variáveis aleatórias. A quantificação da sua incerteza, através de distribuições de probabilidade, deve ter em consideração as incertezas referidas no presente trabalho. Assim, para obras novas considera-se que a abordagem deste problema deve passar pelas seguintes etapas:

- i) Os parâmetros da distribuição relativos à resistência potencial à compressão do betão podem ser obtidos considerando uma distribuição log-normal (ou outra, quando justificado) e que o valor característico objetivo corresponde ao 5º quantil dos resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização;
- ii) As distribuições probabilísticas de outras propriedades potenciais (resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração em flexão, resistência à tração direta e módulo de elasticidade) podem ser obtidas por inferência estatística de amostras virtuais geradas pelo método de Monte Carlo considerando os modelos estabelecidos por análises de regressão entre estas e a resistência potencial à compressão;
- iii) Deve ser considerado o efeito de escala devido à reduzida dimensão dos provetes de ensaio; esse efeito poderá ser contabilizado, simplifadamente, através da afetação das propriedades resistentes potenciais por um coeficiente específico;
- iv) Finalmente, para cada zona da estrutura, as propriedades resistentes devem ser afetadas pelo coeficiente de qualidade da construção, para se ter em consideração, em análises de fiabilidade, os efeitos da variação das condições de colocação, cura e endurecimento do betão.

Considerando as distribuições de probabilidade das propriedades potenciais obtidas na primeira parte do presente trabalho [7], apresentam-se na Fig. 3 exemplos de resultados de duas gerações de valores aleatórios, no âmbito de análises de fiabilidade na fase de projeto, para a resistência à compressão de diferentes zonas de uma barragem teórica executada com betão fabricado em central no estaleiro (duas imagens superiores), betão pronto fabricado em central industrial (duas imagens intermédias) e betão compactado com cilindros (duas imagens inferiores), considerando um valor característico da resistência à compressão de 25 MPa (resistência potencial do betão integral), os efeitos de escala

(coeficiente constante de 0,85) e o coeficiente de qualidade da construção (distribuição normal caracterizada por  $\mu=0,959$  e  $\sigma=0,037$ , truncada inferiormente em 0,8 e superiormente em 1).

No que respeita à deformabilidade do betão, pode considerar-se uma abordagem semelhante. Os resultados de ensaios de ultra-sons e de vibração forçada, realizados em várias barragens portuguesas, permitiram a determinação de módulos de elasticidade dinâmicos (globais ou parciais) que são cerca de 50% superiores aos correspondentes módulos de elasticidade estáticos. Estes valores dos módulos de elasticidade estáticos são normalmente de cerca de 70% a 80% dos valores dos módulos de elasticidade obtidos em carotes retiradas de zonas aparentemente em bom estado das obras, de acordo com a larga experiência do LNEC na análise e interpretação do comportamento observado de dezenas de barragens. Isto comprova, em termos genéricos, que a deformabilidade global do betão “in situ” pode ser estimada a partir dos resultados dos ensaios de provetes ou carotes considerando os efeitos de escala e da qualidade da construção.

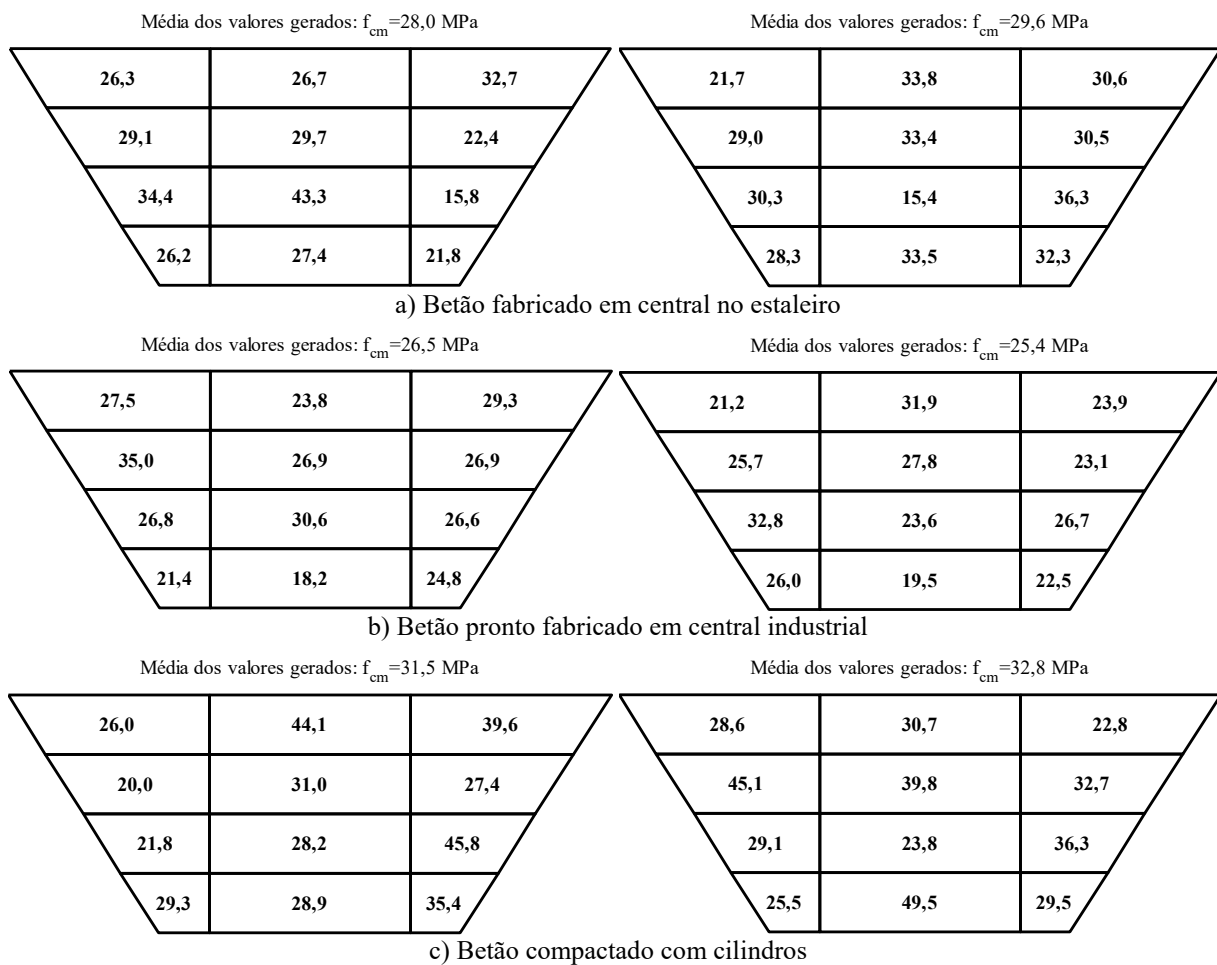


Figura 3. Resultados de duas gerações de valores aleatórios, no âmbito de análises de fiabilidade, para a resistência à compressão (em MPa) de diferentes zonas de uma barragem teórica executada com betão fabricado em central no estaleiro, betão pronto e betão compactado com cilindros, considerando um valor característico da resistência potencial à compressão de 25 MPa, os efeitos de escala e o coeficiente de qualidade da construção

No caso de barragens existentes, as análises de fiabilidade podem considerar a informação que puder ser colhida diretamente das obras, devendo a amostragem das propriedades e a consequente discretização estrutural serem ajustados aos objetivos dos estudos.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades do betão são normalmente quantificadas a partir dos resultados de ensaios laboratoriais de caracterização da resistência e deformabilidade, que permitem obter as suas propriedades potenciais, que dependem não só da variabilidade intrínseca do material mas também das condições de ensaio.

No caso das barragens, que são estruturas de betão em massa, têm-se verificado, no final da construção e início da exploração, situações de heterogeneidade espacial do betão aplicado nas obras, caracterizadas essencialmente pela existência de vazios localizados e deficientes ligações entre camadas de betonagem, a que muitas vezes estão associados repasses de água. Esta falta de homogeneidade do betão aplicado está relacionada com condições menos adequadas no transporte, colocação, vibração, cura e endurecimento do betão da obra, mas também com o deficiente tratamento de juntas de construção.

Na primeira parte do presente trabalho apresentou-se a metodologia proposta 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 de obras integradas em novos projetos.

Nesta segunda parte do trabalho propõe-se um modelo de previsão das propriedades estruturais do betão de barragens a partir da caracterização probabilística das propriedades potenciais (obtidas a partir dos resultados de ensaios laboratoriais sobre provetes de betão moldados durante a construção), considerando o efeito de escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes de pequenas dimensões, e os efeitos, aleatórios, resultantes da referida heterogeneidade espacial do betão aplicado. Estes últimos efeitos são representados por um coeficiente, designado por coeficiente de qualidade de construção, que foi quantificado, em termos probabilísticos, através dos resultados da inspeção visual de 53 grandes barragens de betão portuguesas no início da sua exploração.

No final mostram-se exemplos de gerações de valores aleatórios das propriedades estruturais do betão de barragens, no contexto de análises de fiabilidade, para os casos em que se utilizam betão fabricado em central no estaleiro da obra, betão pronto fabricado em central industrial e betão compactado com cilindros.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LNEC o apoio recebido e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento através da bolsa SFRH/BD/91131/2012.

## REFERÊNCIAS

- [1] Gonçalves, A. (1999). Durabilidade real e potencial do betão. LNEC, Programa de investigação.
- [2] Concrete Society (1987). Concrete core testing for strength. Concrete Society, Technical report nº 11.
- [3] Neville, A.M. (1996). A general relation for strength of concrete specimens of different shape and size. *ACI Journal Proceedings*, Vol. 63, No. 10, pp. 1095-1110.
- [4] Kim, J.K.; Park, H.K.; Eo, S.H. (1999). Size effect on compressive strength of plain and spirally reinforced concrete cylinders. *Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, pp. 88-94.

- [5] LNEC (2007). Betão compactado com cilindros aplicado na barragem de Pedrógão. Colaboração do Departamento de Materiais do LNEC. Relatório 126/2007, DM/NB, LNEC, Lisboa (documento confidencial).
- [6] LNEC (2014). Barragem de montante do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor. Análise das causas da abertura de juntas de betonagem às cotas 185 m e 186 m, na zona central do paramento de montante, no final da construção, e apreciação da solução de reabilitação. Relatório 452/2014, DBB/NO/NMMR, LNEC, Lisboa (documento confidencial).
- [7] Pereira, R.; Batista, A.L.; Neves, L.C. (2016). Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens. Parte 1 – Caracterização probabilística das propriedades potenciais a partir de resultados de ensaios. Encontro Nacional Betão Estrutural 2016, Coimbra.