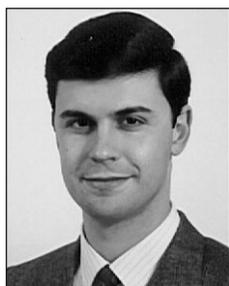


A VARIABILIDADE DO COMPORTAMENTO DIFERIDO DE PONTES DE BETÃO



L. OLIVEIRA SANTOS
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa



FRANCISCO VIRTUOSO
Professor Associado
ICIST-IST
Lisboa



J. ALMEIDA FERNANDES
Investig. Coordenador
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

Apresenta-se uma metodologia utilizada para caracterizar a variabilidade do comportamento diferido de pontes de betão. A referida metodologia inclui a caracterização experimental do comportamento diferido do betão, a sua modelação e consideração na análise estrutural. Refere-se ainda a forma como foi implementada uma análise probabilística recorrendo ao método de Monte Carlo, apresentando-se alguns resultados decorrentes das análises efectuadas a quatro pontes observadas pelo LNEC, que são comparados com os valores observados.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento diferido de uma ponte de betão armado e pré-esforçado está intimamente ligado à evolução ao longo do tempo das propriedades do betão, nomeadamente, ao módulo de elasticidade, à retracção e à fluência. A evolução destas propriedades está associada a uma incerteza que não se reflecte na natureza determinística dos modelos de previsão correntemente utilizados.

Vários autores^(1,2) têm alertado para as vantagens dos estudos do comportamento diferido das pontes de betão serem efectuados com base numa abordagem probabilística das propriedades do betão, à semelhança do que sucede relativamente a outras variáveis, como por exemplo, os valores das resistências dos materiais.

Com o objectivo de estudar a sensibilidade das estruturas à variabilidade do comportamento diferido do betão, efectuou-se um estudo baseado na caracterização *in situ* dos fenómenos cuja variabilidade se pretende considerar - o módulo de elasticidade, a retracção e a fluência do betão - que inclui uma análise probabilística do comportamento diferido das pontes de S. João, Guadiana, Freixo e Miguel Torga⁽³⁾. Nesta comunicação, após

uma breve descrição do modelo de análise desenvolvido e da forma como foi implementada a análise probabilística, apresentam-se alguns dos principais resultados obtidos através da análise das quatro pontes referidas, que são comparados com os valores observados.

2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO E SUA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

A modelação do comportamento dos materiais foi efectuada de acordo com os modelos do MC90⁽⁴⁾, que serviram de base ao EC2⁽⁵⁾, tanto no que se refere ao aço como ao betão. Relativamente ao aço há que distinguir entre o aço das armaduras passivas e o aço de pré-esforço, este sujeito a fenómenos de relaxação. O comportamento diferido do betão inclui a retracção, a fluência e a maturação, que se reflecte na evolução da resistência e do módulo de elasticidade.

A caracterização experimental da evolução da tensão de rotura e do módulo de elasticidade foi efectuada através de ensaios laboratoriais, realizados em diversas idades do betão.

A determinação *in situ* da retracção e da fluência é efectuada através de pares de provetes betonados em simultâneo com a estrutura e que ficam sujeitos às mesmas condições ambientais. Nos provetes compensadores termo-higrométricos medem-se as extensões devidas às variações de temperatura e à retracção. Nos compensadores de fluência é aplicada uma tensão de compressão constante, considerando-se que as deformações devidas à tensão aplicada - deformações instantânea e de fluência - correspondem à diferença entre as deformações medidas nos dois provetes. Estes provetes são, em geral, colocados sobre o tabuleiro e no interior das secções em caixão. A localização dos provetes nas diversas pontes é semelhante indicando-se na Tabela 1 os provetes utilizados em cada uma das pontes incluídas neste estudo.

Tabela 1: Instrumentação utilizada para a caracterização do betão das pontes analisadas.

Ponte	Mód. Elasticidade		Retracção				Fluência			
	Secções	Provetes	Secções	Prov. ext.	Prov. int.	Prov. lab	Secções	Prov. ext	Prov. int.	Prv. Lab
S. João	7	22	6	-	15	-	6	-	15	-
Guadiana	4	10	4	7	6	-	2	4	3	-
Freixo	8	22	8	8	12	-	4	-	8	-
M. Torga	5	15	5	32	15	6	2	3	3	3
TOTAL	24	69	23	47	48	6	14	7	29	3

O tratamento dos valores experimentais foi efectuada através de regressões não lineares aos valores experimentais, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e estimados através das expressões algébricas propostas no MC90⁽⁴⁾. Para este efeito introduziram-se dois coeficientes, um para afectar o valor da retracção a tempo infinito, C_1 , e outro destinado a corrigir o seu desenvolvimento no tempo, C_2 , passando a extensão de retracção a ser obtida através das seguintes expressões:

$$\varepsilon_{cs}(t-t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t-t_s) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cs0} = C_1 \cdot \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (2)$$

$$\beta_s(t-t_s) = \left(\frac{t-t_s}{0,035h_0^2 + (t-t_s)} \right)^{0,5C_2} \quad (3)$$

Pelas mesmas razões, introduziram-se os parâmetros C_3 e C_4 no modelo de fluência do MC90, de tal forma que o coeficiente de fluência passa a ser obtido através das seguintes expressões:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (4)$$

$$\phi_0 = C_3 \cdot \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (5)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left(\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right)^{0,3C_4} \quad (6)$$

A descrição detalhada da forma como é efectuada a caracterização da variabilidade do comportamento diferido do betão a partir dos resultados experimentais pode ser consultada em trabalhos anteriores^(3,6).

3. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

A metodologia desenvolvida e implementada para o comportamento estrutural permite a análise de modelos tridimensionais, recorrendo a elementos finitos lineares para simular os pilares e o tabuleiro. Estes elementos pressupõem válida a hipótese de Bernoulli e consideram a influência das armaduras passivas e dos cabos de pré-esforço aderente. Esta influência repercute-se não só na rigidez dos elementos, mas também nas restrições que as armaduras impõem às deformações resultantes da retracção e da fluência do betão. Foi igualmente implementado um elemento de tirante, na formulação do qual foi considerada a não linearidade geométrica resultante do efeito do seu peso próprio, e um elemento para simular o comportamento dos cabos de pré-esforço exterior.

A metodologia desenvolvida considera os efeitos diferidos dos materiais, nomeadamente a maturação, a retracção e a fluência do betão e a relaxação dos aços de pré-esforço. Tendo em conta os níveis de deslocamentos e de deformações, este procedimento é perfeitamente justificável na generalidade das pontes de betão, nomeadamente na análise do seu comportamento em serviço.

Finalmente, é considerada a modelação evolutiva da estrutura, incluindo não só o comportamento diferido dos materiais, mas também a sequência construtiva, implicando a inclusão ou exclusão de elementos ou de apoios.

4. ANÁLISE PROBABILÍSTICA

A simulação do comportamento estrutural através do método de Monte Carlo é efectuada em três fases: simulação estocástica das variáveis aleatórias, análise estrutural e tratamento estatístico dos resultados. Assim, com a sucessiva geração de conjuntos das propriedades do betão consideradas variáveis aleatórias, são realizadas sucessivas análi-

ses determinísticas, é efectuado o tratamento estatístico da amostra constituída pelos resultados, e são finalmente estimadas as distribuições de probabilidade da resposta da estrutura.

A simulação do comportamento estrutural inicia-se pela escolha e caracterização das variáveis aleatórias básicas que, no presente caso, são o módulo de elasticidade, a retracção e a fluência do betão. Refira-se que a resposta probabilística de uma estrutura é afectada por outras variáveis que, embora tendo uma natureza aleatória, dado o âmbito do trabalho foram consideradas determinísticas.

A análise estrutural foi efectuada através da realização de sucessivos cálculos determinísticos, cada um com um conjunto de variáveis aleatórias geradas de acordo com as suas distribuições de probabilidades. Para cada cálculo determinístico a efectuar associou-se a cada barra um conjunto de valores do módulo de elasticidade, da retracção e da fluência do betão cujas características foram geradas por um processo de simulação, sendo consideradas independentes entre si. Por outro lado, as propriedades dos materiais de cada barra foram consideradas independentes em relação às das restantes barras. Esta opção justifica-se pelo facto de, geralmente, a cada barra corresponder uma aduela, sendo cada aduela executada através duma só betonagem, diferente das betonagens das aduelas adjacentes.

O tratamento estatístico da resposta da estrutura permite obter o valor médio da evolução das diversas grandezas bem como a respectiva variabilidade.

5. ALGUNS RESULTADOS DAS ANÁLISES EFECTUADAS

Apresentam-se de seguida alguns exemplos dos resultados obtidos, tendo em vista ilustrar os procedimentos acima expostos. Assim, em cada um dos gráficos que seguidamente se apresentam estão representados, para além dos valores experimentais, a curva média e as curvas correspondentes aos quantilhos de 5% e 95% provenientes da análise probabilística. Estas duas curvas definem, para cada grandeza, um intervalo com uma probabilidade de ocorrência de 90%, que, por uma questão de simplicidade de expressão, será referido como *Intervalo de 90%*.

Para estabelecer uma comparação com os limites deste intervalo de 90% definido pela análise probabilística, efectuaram-se dois cálculos determinísticos: um proporcionando uma baixa deformação, executado com os valores da retracção e da fluência correspondentes ao quantilho de 5% associados aos valores relativos ao quantilho de 95% do módulo de elasticidade; o outro propiciando elevadas deformações, efectuado com os valores da retracção e da fluência referentes ao quantilho de 95% e os valores do módulo de elasticidade respeitantes ao quantilho de 5%. As curvas obtidas através destes dois cálculos foram incluídas nos gráficos em que são apresentadas as diversas grandezas, verificando-se que, como seria de esperar, constituem majorantes do intervalo de 90% acima referido.

Foi ainda incluída, nos diversos gráficos, uma curva resultante da aplicação directa dos modelos de retracção e de fluência do EC2, considerando a curva média do módulo de elasticidade.

Na Figura 1 apresenta-se a evolução dos deslocamentos verticais na secção de meio vão do tramo principal (250 m) da ponte de S. João, cujos valores experimentais foram

obtidos através de nivelamentos geométricos realizados pela REFER⁽⁷⁾. Nesta figura, em que se distingue claramente a fase final da construção (até Junho de 1991) da fase de serviço da obra, ressalta a pequena variabilidade que se verifica nestes deslocamentos.

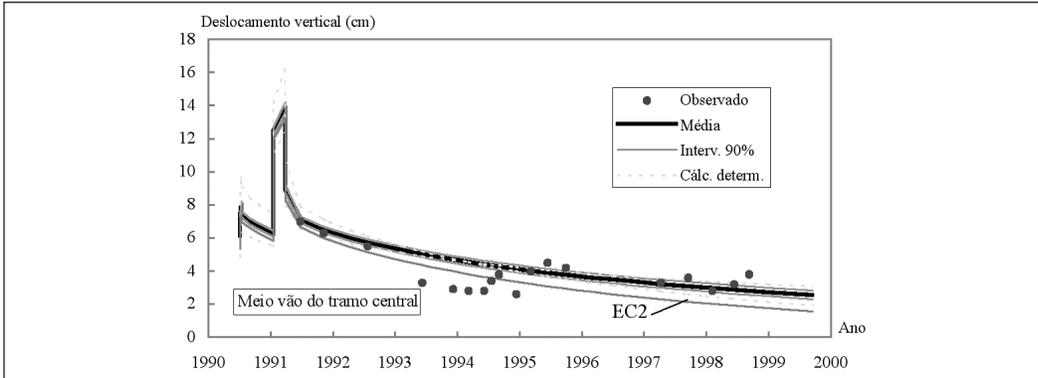


Figura 1: Ponte de S. João: deslocamentos verticais na secção de meio vão do tramo central.

A evolução das rotações na secção S20, localizada a um quarto do vão central da ponte Internacional do Guadiana⁽⁸⁾ está representada na Figura 3. Também nesta figura é evidente a pequena variabilidade das rotações, verificando-se ainda que os valores de cálculo exibem uma razoável concordância com os valores experimentais, medidos a partir do final da construção com clinómetros de bolha de ar.

A evolução das juntas de dilatação permite uma avaliação global de alguns dos efeitos do comportamento diferido de uma ponte, pese embora os valores da abertura das juntas sejam afectados de forma muito significativa pelas variações de temperatura sazonais. Na Figura 4 está representada a evolução da abertura da junta norte da ponte do Freixo⁽⁹⁾. Nesse gráfico, para além das curvas anteriormente apresentadas, incluiu-se uma curva sinusoidal de período anual cuja amplitude em torno da curva média foi determinada através de uma regressão não linear às diferenças entre os valores observados e a referida curva média. Torna-se assim evidente a origem sazonal das variações dos valores medidos em torno da evolução média.

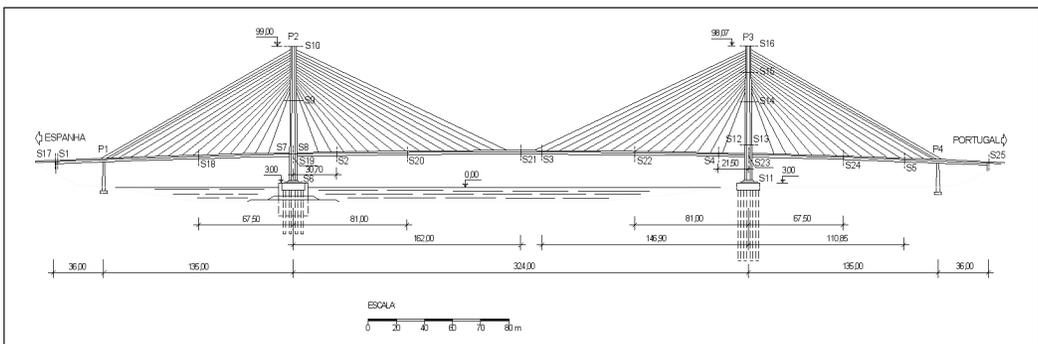


Figura 2: Ponte do Guadiana: localização das secções instrumentadas.

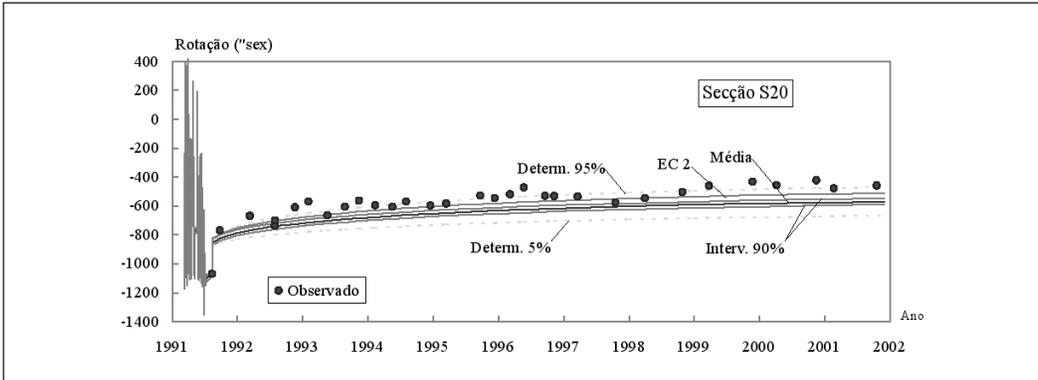


Figura 3: Ponte do Guadiana: evolução da rotação no tabuleiro (secção a ¼ do vão central).

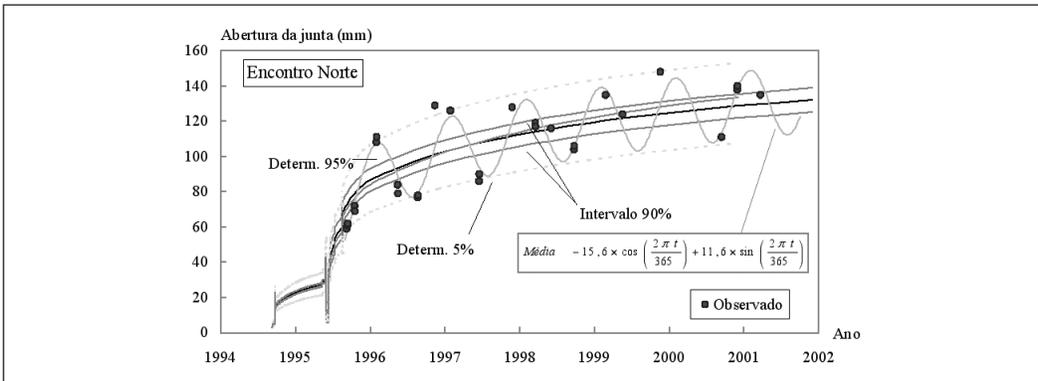


Figura 4: Ponte do Freixo: evolução da abertura da junta de dilatação Norte.

Apresentam-se na Figura 6 as extensões, medidas através de vários extensómetros de corda vibrante (C5.1 a C5.9), na secção S5, próxima do meio vão do tramo de 180 m da ponte Miguel Torga, sobre o rio Douro, na Régua⁽¹⁰⁾, podendo-se constatar uma significativa variabilidade nas extensões. Na Figura 7 apresentam-se os valores das tensões da secção referida anteriormente, constatando-se a sua reduzida variabilidade face à variabilidade das extensões.

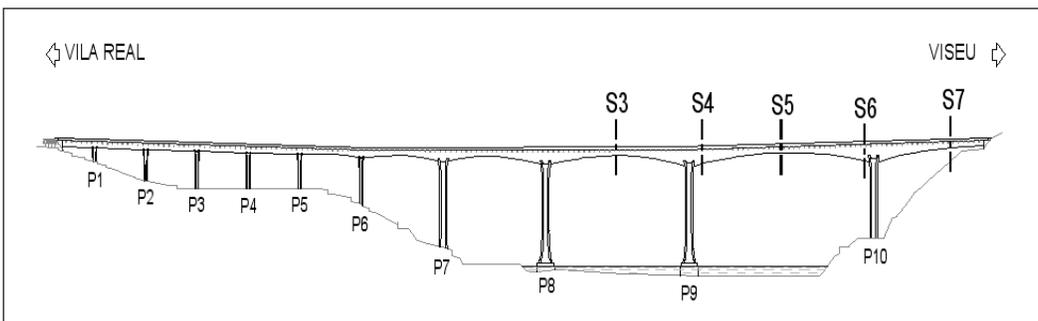


Figura 5: Ponte Miguel Torga: localização das secções do tabuleiro instrumentadas.

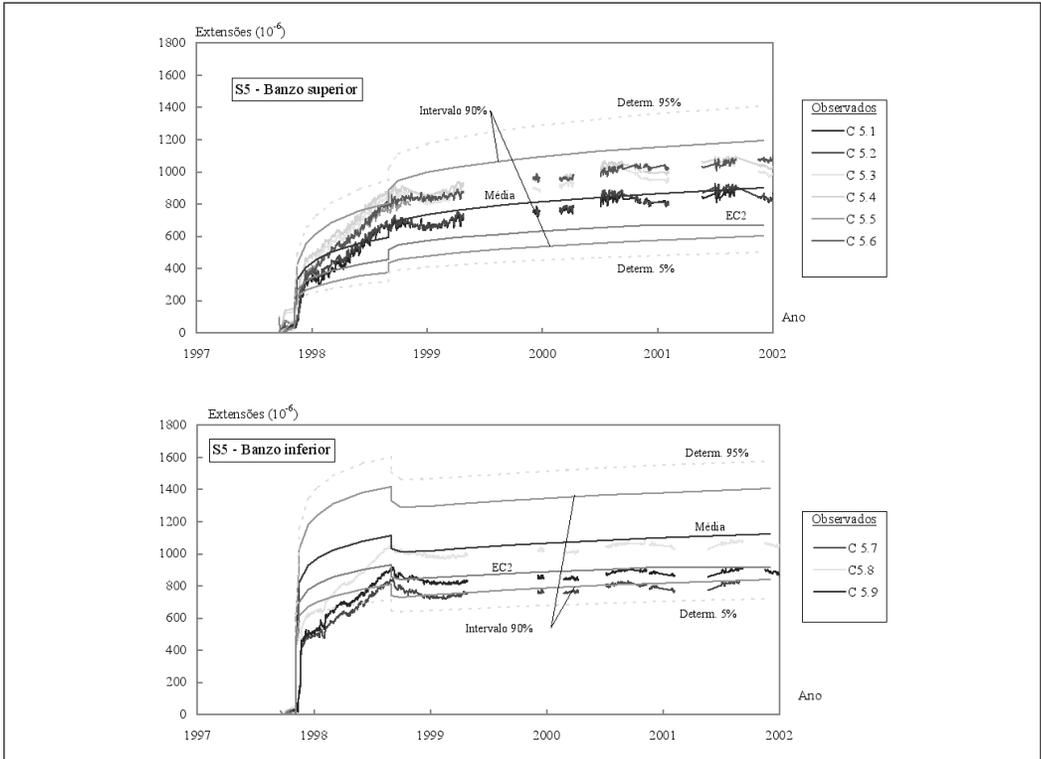


Figura 6: Ponte Miguel Torga: evolução das extensões na secção S5 (1/2 vão).

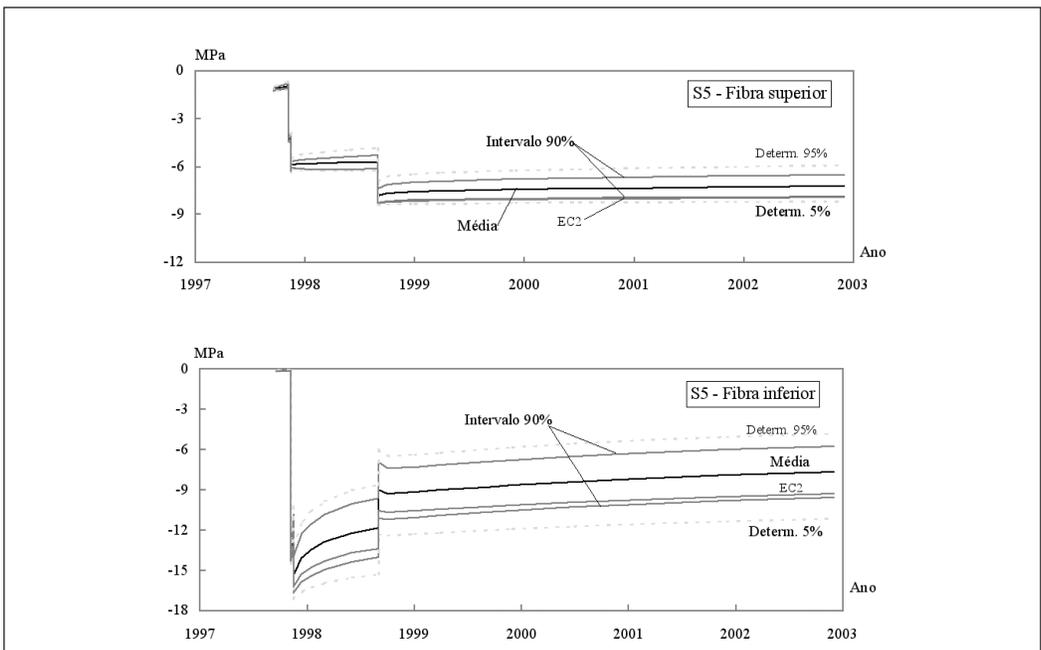


Figura 7: Ponte Miguel Torga: evolução das tensões no betão da secção S5 (1/2 vão).

Nos diversos gráficos apresentados incluíram-se duas curvas provenientes de dois cálculos determinísticos efectuados com características do betão, um dos quais propicia uma baixa deformabilidade e, o outro, elevada deformabilidade. Estas curvas, pelas características dos dados utilizados, definem um intervalo que contém o intervalo de 90% obtido por via probabilística. Para aferir da utilidade destes cálculos determinísticos importa, pois, estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos por estas duas vias. Esta comparação é estabelecida na Tabela 2, onde se apresenta a relação entre as amplitudes dos intervalos definidos por via determinística e probabilística, nas diferentes grandezas estudadas, nas diversas pontes e após 10 anos em serviço.

A análise probabilística efectuada permitiu constatar que, de uma forma geral, nas diversas pontes estudadas os deslocamentos lineares e angulares são pouco sensíveis à variabilidade do comportamento diferido do betão. Em contrapartida, nas extensões é visível o efeito dessa variabilidade, que se traduz em coeficientes de variação com valores próximos de 10%, tanto durante a construção como nos primeiros 10 anos em serviço.

Efectuou-se também uma análise de sensibilidade que evidenciou a importância da variabilidade do módulo de elasticidade do betão no comportamento diferido das pontes durante a construção.

Tabela 2: Relação entre a amplitude dos intervalos de 90% definidos pelos cálculos determinísticos e probabilísticos (após 10 anos em serviço)

Grandeza	Secção	S. João	Guadiana	Freixo	Miguel Torga
Desloc. vertical	1/2 vão	2,5	16,1	1,1	5,0
Abert. de juntas	Encontro	9,4	6,1	9,4	8,6
Rotação	Topo pilar	5,0	3,8	2,0	3,7
Extensão superior	Apoio	1,6	1,6	1,5	1,8
Extensão inferior		1,6	1,7	1,6	1,8
Extensão superior	1/2 vão	1,6	1,9	1,4	1,6
Extensão inferior		1,3	1,9	1,5	1,6
Tensão superior	Apoio	1,7	2,3	1,6	1,8
Tensão inferior		1,7	1,1	1,0	1,8
Tensão superior	1/2 vão	1,1	2,0	2,0	1,0
Tensão inferior		2,1	2,0	1,3	1,9

Após a entrada em serviço, o contributo da variabilidade da retracção no comportamento das obras ganha uma importância acrescida. A contribuição da fluência na variabilidade da resposta da estrutura manifesta-se tanto durante a construção como após a sua entrada em serviço.

6. CONCLUSÕES

A presente comunicação teve como objectivo a apresentação dos procedimentos adoptados na análise probabilística do comportamento diferido de quatro pontes de betão observadas pelo LNEC, tendo-se considerado como variáveis aleatórias o módulo de elasticidade, a retracção e a fluência do betão utilizado nessas obras.

Os valores resultantes das análises efectuadas evidenciam uma razoável concordância com os valores observados, tanto em relação a deslocamentos lineares e angulares como em relação a extensões, o que reflecte a validade dos modelos implementados.

Das análises efectuadas ressalta a importância decisiva que a fase construtiva tem na evolução dos estados de deformação ao longo da vida das obras, pelo que se torna necessário, em termos de observação, um acompanhamento detalhado desta fase, em particular durante operações cuja caracterização seja mais difícil, como, por exemplo, a imposição de deslocamentos antes da execução de secções de fecho.

A realização de cálculos determinísticos realizados definindo o betão correspondente, por um lado, aos quantilhos de 5% do módulo de elasticidade e de 95% da retracção e da fluência do betão (elevada deformabilidade) e, por outro lado, com os quantilhos de 95% do módulo de elasticidade e de 5% da retracção e da fluência do betão (baixa deformabilidade) permitiu verificar que os intervalos da resposta das estruturas definidos por estes cálculos têm sempre uma amplitude superior à dos intervalos definidos pelos cálculos probabilísticos. Verificou-se ainda que a relação entre essas amplitudes é, de uma forma geral, elevada no que diz respeito aos deslocamentos verticais, à abertura de juntas e às rotações, mas que, relativamente às extensões e às tensões no betão, essa relação apresenta valores compreendidos entre 1,0 e 2,3.

As grandes diferenças verificadas entre as relações respeitantes aos deslocamentos e as relações correspondentes às restantes grandezas pode prender-se com o carácter mais global dos deslocamentos, tanto lineares como angulares. Isto é, o valor dos deslocamentos resulta da integração das características de todo o tabuleiro enquanto que as restantes grandezas são mais dependentes das características locais, neste caso do betão, o que poderá explicar a pequena variabilidade verificada nos deslocamentos obtidos por via probabilística. Com efeito, nestes cálculos foi gerado de forma aleatória, através do Método de Monte Carlo, um betão diferente para as diversas aduelas enquanto que nos cálculos determinísticos foi usado o mesmo betão para toda a estrutura. Por consequência a variabilidade das propriedades do betão introduzidas nos cálculos probabilísticos atenua-se de forma mais marcante nos deslocamentos, em virtude destes serem função das características do betão de todo o tabuleiro que conduz a uma menor variabilidade em torno do seu valor médio.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos para a realização deste trabalho, nomeadamente por parte da REFER, do Instituto das Estradas de Portugal e do Lab. Nacional de Engenharia Civil.

7. REFERÊNCIAS

- (1) Tsubaki, T. *et al* – “Probabilistic Models”, *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Chap. 5, John Wiley & Sons Ltd, 1988, pp.311-383.
- (2) Oh, Byung; Yang, In – “Sensitivity analysis of time-dependent behavior in PSC box girder bridges”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2000, pp. 171-179.

Índice

Índice de Autores

- ⁽³⁾ Santos, L. Oliveira – *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Dissertação de doutoramento, IST, 2001, 334 p.
- ⁽⁴⁾ CEB-FIP – *Model Code 1990 - Design code*. Thomas Telford, 1991, 438 p.
- ⁽⁵⁾ EC2 – *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, NP ENV 1992-1-1:1998, IPQ, 1998.
- ⁽⁶⁾ Santos, L. Oliveira, Virtuoso, F.; Fernandes, J. Almeida – “Caracterização da variabilidade do comportamento diferido do betão observado *in situ*”, *Betão Estrutural 2000*, FEUP, 2000, pp 551-560.
- ⁽⁷⁾ Castanheta, Mário – *Observação da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro - 12ª Nota Técnica*. Nota Técnica 3/01–NOE, LNEC, 2001, 71 p.
- ⁽⁸⁾ Martins, J. L. Câncio – “Ponte Internacional sobre o Guadiana em Castro Marim”, *Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, 1983, pp. 3-15.
- ⁽⁹⁾ Reis, António; Sousa, Daniel - “Ponte do Freixo: concepção”, *Betão Estrutural 1994*, Porto, 1994, pp. 723-733.
- ⁽¹⁰⁾ Rito, Armando – “As pontes da Régua e do Varosa e Balsemão no lanço Régua-Reconcos no IP3”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, nº 39, 1995, pp. 35-39.