

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DO COMPORTAMENTO DIFERIDO DO BETÃO OBSERVADO *IN SITU*



L. Oliveira Santos
Assist. de Investigação
LNEC
Lisboa



Francisco Virtuoso
Professor Associado
ICIST-IST
Lisboa



J. Almeida Fernandes
Investig. Coordenador
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

Propõe-se uma metodologia para caracterizar a variabilidade da evolução ao longo do tempo da retracção e da fluência do betão, que é aplicada ao betão do tabuleiro de quatro pontes observadas pelo LNEC, estabelecendo-se o confronto entre os resultados obtidos nas diversas obras.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento diferido do betão é influenciado por diversos factores, uns intrínsecos ao próprio betão, decorrentes da sua composição e das propriedades dos seus constituintes, outros extrínsecos, como a temperatura e a humidade relativa do ar, a chuva, o vento, a radiação solar, etc. A todos estes factores estão associadas incertezas de que resulta a própria natureza estocástica dos mecanismos de retracção e fluência do betão. Assim, a determinação *in situ* da retracção e da fluência é uma forma importante de aumentar o conhecimento sobre o desenvolvimento destes fenómenos, tendo em vista melhorar a previsão das suas consequências no comportamento das estruturas.

Na presente comunicação apresenta-se a caracterização da variabilidade do comportamento diferido do betão aplicado no tabuleiro de quatro pontes observadas pelo LNEC: S. João, Freixo e Miguel Torga (Régua) sobre o rio Douro e a ponte Internacional do Guadiana, em Castro Marim. Assim, após uma breve referência aos métodos utilizados para a obtenção dos valores experimentais da retracção e da fluência do betão, é proposta uma metodologia para efectuar o tratamento estatístico desses valores e faz-se o confronto entre os valores obtidos para as diversas pontes [1].

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

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. Num dos prismas (compensador termo-higrométrico) medem-se as extensões devidas às variações de temperatura e à retracção. No outro prisma (compensador de fluência) é aplicada uma tensão constante de compressão, 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 conforme se exemplifica na Figura 1. Nas diversas pontes a localização dos provetes é semelhante indicando-se na Tabela 1 os provetes utilizados.

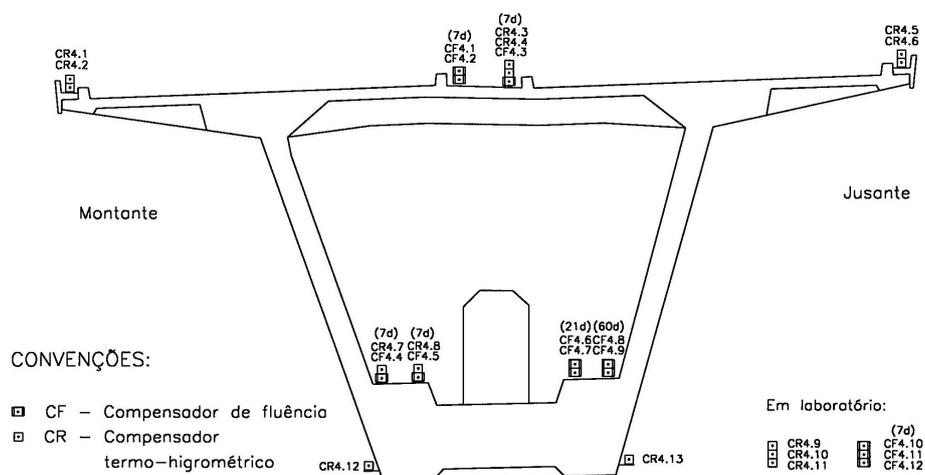


Figura 1 – Exemplo da instrumentação de uma secção (Ponte Miguel Torga, secção S4)

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.	Prov. 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

3. TRATAMENTO DOS VALORES EXPERIMENTAIS

3.1. Metodologia geral

A evolução média de cada propriedade ao longo do tempo é definida por um conjunto discreto de valores correspondentes às médias dos valores das diversas amostras obtidos em cada idade,

entendendo-se por uma amostra os provetes executados na mesma betonagem, mantidos nas mesmas condições e ensaiados nas mesmas datas. Para obter uma definição contínua efectuou-se uma regressão não linear aos valores médios experimentais, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e estimados, tendo-se utilizado, para este efeito, o método dos gradientes conjugados [2]. As regressões foram efectuadas tomando como referência as expressões algébricas que definem os modelos de retracção e da fluência propostos no MC90 [3] e incluídos no EC2 [4].

Admitiu-se ainda, que as diversas propriedades estudadas seguem uma distribuição normal. Esta distribuição é sugerida pelo MC90 [3] que, tal como o EC2 [4], indica os valores de 35% e de 20% como coeficientes de variação do conjunto dos resultados de ensaios laboratoriais que permitiram aferir os respectivos modelos de retracção e de fluência. Embora a reduzida dimensão de muitas das amostras tratadas neste trabalho não permita ser conclusivo quanto ao tipo de distribuição, nas amostras de maior dimensão verificou-se que a distribuição normal respeita os testes do qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov [5].

Admitindo que o conjunto de valores experimentais em determinada idade do betão segue uma distribuição normal, podem determinar-se os valores que correspondem a qualquer quantilho da função de distribuição. A curva que define a evolução ao longo do tempo desse quantilho pode ser obtida através de uma regressão não linear, da forma já utilizada para determinar a evolução média de cada uma das variáveis

3.2. Retracção

Para permitir o ajustamento da curva proposta pelo modelo de retracção do EC2 aos valores obtidos experimentalmente 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:

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

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

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

O estudo das variações de temperatura em diversos locais de Portugal permitiu concluir que a caracterização analítica das extensões respectivas pode ser efectuada através de harmónicas de período anual, associadas à variação sazonal, adoptando-se a seguinte função sinusoidal [6]:

$$\varepsilon_{cT}(t) = \left[A_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right] \quad (4)$$

O efeito que se pretende identificar é devido à diferença entre a temperatura do betão quando se efectuou a primeira leitura e quando se efectuaram as restantes medições. Assim as deformações devidas às variações de temperatura devem ter como referência a temperatura que se verificava no instante t_s da primeira leitura. Daqui resulta que as variações de extensão medidas nos provetes termo-higrométricos podem ser estimadas através da seguinte expressão:

$$\Delta \varepsilon_{csT}(t-t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t-t_s) + A_1 \left[\cos\left(\frac{2\pi(t-t_s)}{365}\right) - 1 \right] + A_2 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi(t-t_s)}{365}\right) \quad (5)$$

Através das extensões medidas nos provetes mantidos no ambiente exterior e no interior das secções em caixão fez-se a caracterização da retracção medida em cada ambiente. Para cada situação efectuou-se uma regressão não linear aos valores médios medidos ao longo do tempo, obtendo-se os parâmetros C_1 , C_2 , A_1 e A_2 da expressão (5). É assim possível separar os efeitos em cada amostra de provetes da variação de temperatura e da retracção, tal como se exemplifica na Figura 2, relativa aos provetes colocados no exterior da secção S4 da ponte Miguel Torga. Nesta figura, além de estarem representadas as curvas referentes apenas às extensões de retracção, definidas pela expressão (1) considerando os parâmetros C_1 e C_2 obtidos, é visível o bom ajustamento que esta metodologia permite obter entre as curvas definidas pela expressão (5) e os valores experimentais.

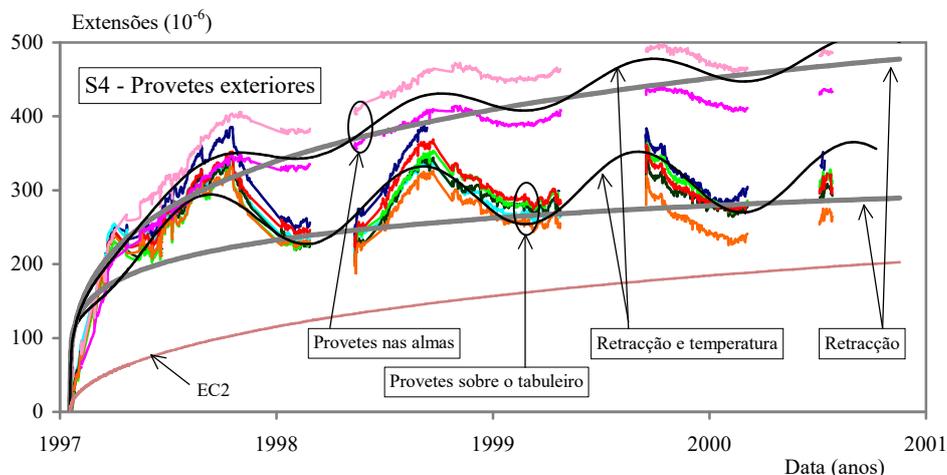


Figura 2 – Extensões de retracção (Ponte Miguel Torga, secção S4, ambiente exterior)

No tratamento estatístico dos resultados das diversas amostras, para determinar a média e o desvio padrão em diversas idades utilizam-se apenas as extensões resultantes da retracção já corrigidas dos efeitos da temperatura. A evolução das curvas de retracção, correspondentes aos diferentes quantilhos da distribuição normal, é então obtida através de regressões não lineares, apresentando-se na Figura 3 as extensões medidas nas diversas secções nos provetes colocados no interior do caixão da ponte do Freixo, bem como as curvas correspondentes aos quantilhos de 5%, 50% e 95% e resultante da aplicação directa do modelo do EC2.

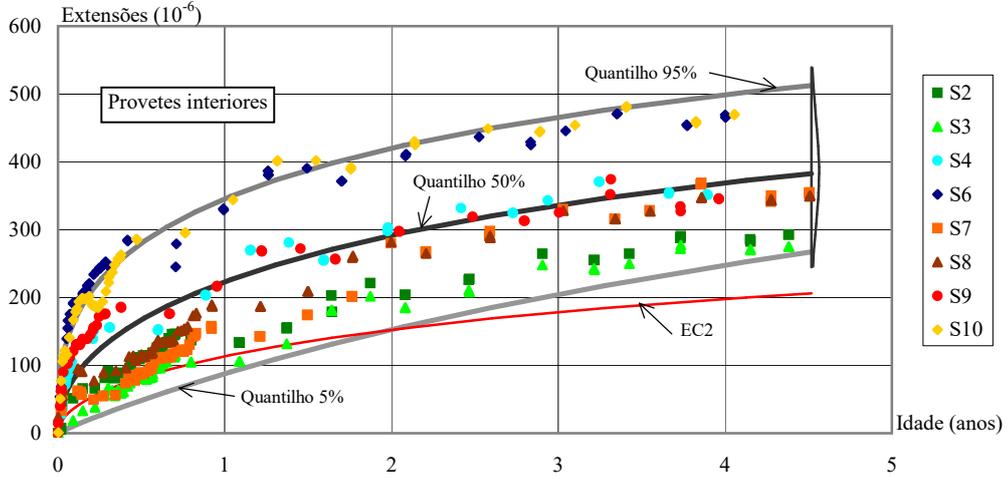


Figura 3 – Evolução das extensões de retracção nos provetes interiores (Ponte do Freixo)

3.3. Fluência

No domínio da fluência linear é possível definir o coeficiente de fluência como a relação entre o acréscimo de deformação que se vai verificando ao longo do tempo e a deformação elástica inicial, $\varepsilon(t_{0i})$, resultante da tensão aplicada a uma determinada idade t_{0i} :

$$\phi_{E_{cm}(t_{0i})}(t, t_{0i}) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon(t_{0i})}{\varepsilon(t_{0i})} \quad (6)$$

A extensão que o provete sofreu está relacionada com a tensão aplicada, através do módulo de elasticidade secante do betão na idade de carregamento, $E_{cm}(t_{0i})$. A determinação dos coeficientes de fluência relativa a outra idade de carregamento, t_0 , e tomando como referência a deformação elástica calculada com o módulo de elasticidade tangente aos 28 dias, $E_{c(28)}$, tal como é definido no EC2 [4], pode ser efectuada através da expressão [7]:

$$\phi(t + t_0 - t_{0i}, t_0) = \phi_{E_{cm}(t_{0i})}(t, t_{0i}) \times \frac{E_{c(28)}}{E_{cm}(t_{0i})} \times \frac{0,1 + t_{0i}^{0,2}}{0,1 + t_0^{0,2}} \quad (7)$$

O ajustamento da curva definida pelo modelo de fluência do EC2 aos valores experimentais foi efectuada através da introdução de dois parâmetros, C_3 e C_4 , que afectam o valor do coeficiente de fluência a tempo infinito e a sua evolução no tempo, de tal forma que o coeficiente de fluência passa a ser obtido através das seguintes expressões:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (8)$$

$$\phi_0 = C_3 \cdot \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (9)$$

$$\beta_c(t-t_0) = \left(\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)} \right)^{0,3C_4} \quad (10)$$

A determinação dos parâmetros C_3 e C_4 foi efectuada, mais uma vez, através duma regressão não linear aos valores experimentais. Atendendo ao facto dos valores obtidos nos provetes exterior e interiores não apresentarem diferenças significativas, apesar de nos provetes exteriores se obterem valores ligeiramente superiores [1], optou-se por apresentar apenas uma caracterização global da fluência, correspondente à média dos valores dos dois ambientes. Na Figura 4 incluem-se os valores experimentais obtidos na ponte de S. João, bem como as curvas correspondentes ao modelo do EC2 e aos quantilhos de 5%, 50% e 95%.

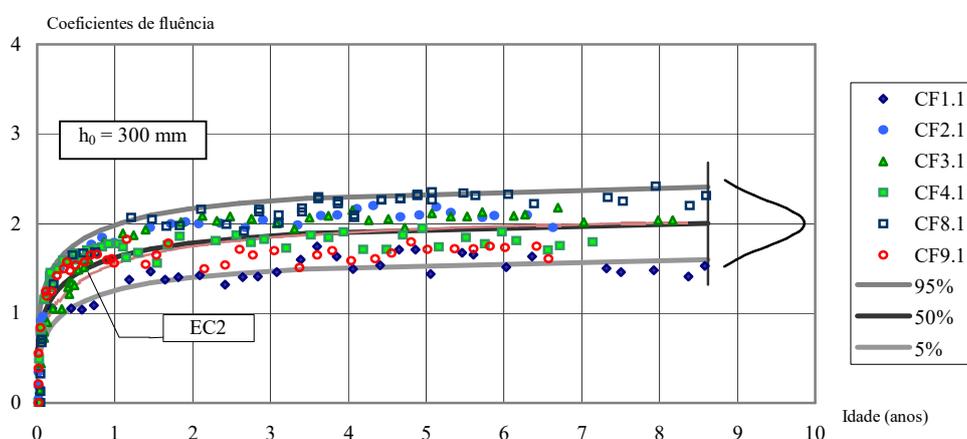


Figura 4 – Evolução do coeficiente de fluência (Ponte de S. João)

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIVERSAS PONTES

4.1. Retracção

Apresentam-se na Figura 5 os valores médios das extensões de retracção medidas nas diversas obras, nos provetes mantidos nos ambientes exterior e interior. A Figura 6 refere-se aos coeficientes de variação correspondentes às extensões de retracção apresentadas na figura anterior. Na análise desta figura pode verificar-se uma maior variabilidade nas extensões medidas em ambiente exterior, que se traduz num coeficiente de variação que, após os primeiros meses, estabiliza entre 20% e 30%, enquanto que nas extensões medidas em ambiente interior o coeficiente de variação oscila entre 10% e 20%. Na Figura 7 estabelece-se a comparação entre as extensões de retracção medidas e calculadas pelo modelo do EC2. Dos valores apresentados, e após um período inicial, verifica-se que, nas extensões medidas em ambiente exterior, a relação entre valores medidos e calculados varia de 0,6 (Freixo) a 1,3 (Miguel Torga). A retracção ocorrida no interior dos tabuleiros é, de uma forma geral, subestimada pelo modelo do EC2, variando a relação entre valores medidos e calculados entre 0,9 (S. João) e 2,2 (Miguel Torga).

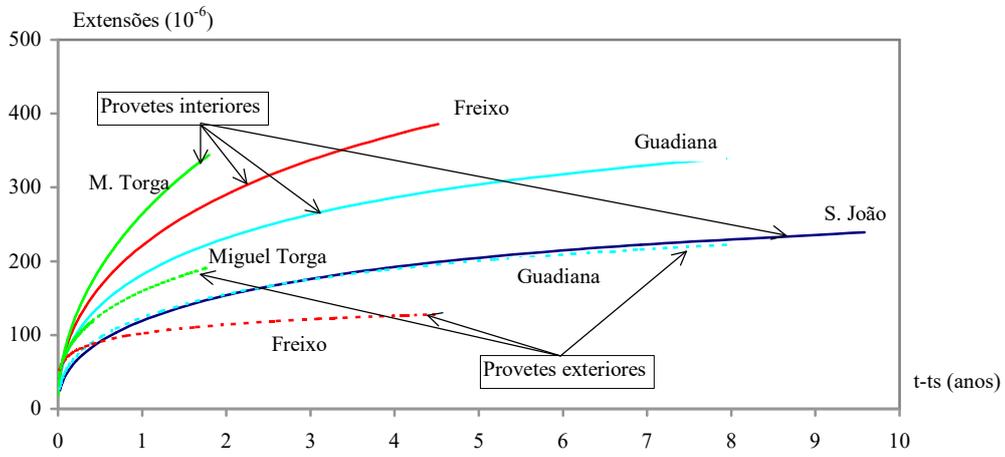


Figura 5 – Extensões de retracção: evolução do valor médio nas diversas pontes

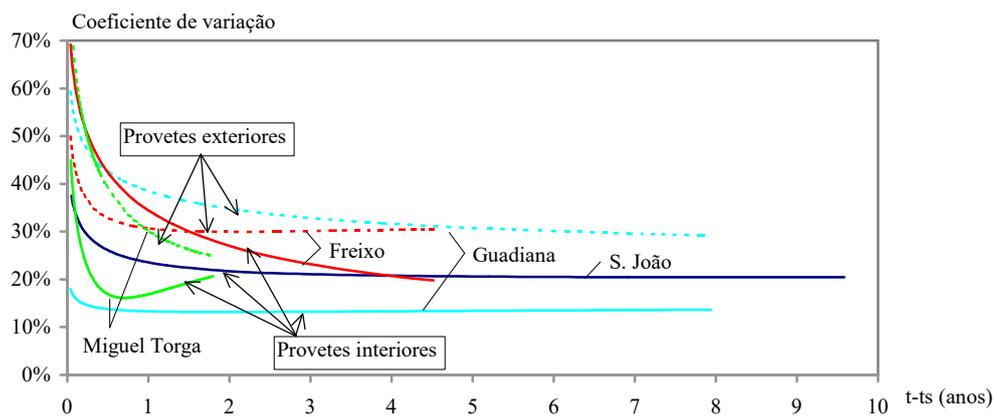


Figura 6 – Extensões de retracção: evolução do coeficiente de variação nas diversas pontes

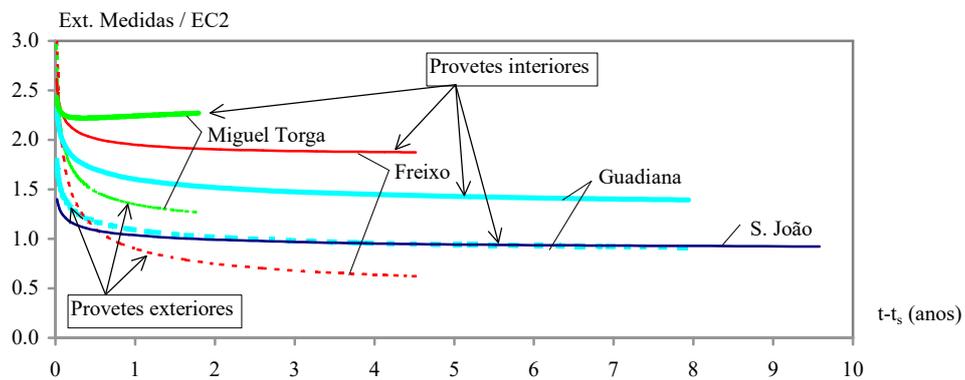


Figura 7 – Extensões de retracção: relação valores medidos e previstos pelo EC2

4.2. Fluência

Reuniram-se na Figura 8 os valores médios dos coeficientes de fluência obtidos nas quatro pontes em estudo, relativos ao módulo de elasticidade tangente de cada ponte e a uma idade de carregamento de 7 dias. Na análise desta figura verifica-se que o coeficiente de fluência em três das pontes estudadas tende para valores muito próximos entre si, compreendidos entre 1,8 e 1,9 sendo os valores relativos à ponte da Miguel Torga muito superiores, atingindo o valor de 2,5 ao fim de pouco mais de 2 anos. A dispersão dos valores obtidos na generalidade das pontes é semelhante, oscilando o respectivo coeficiente de variação entre 12% e 28%, em que este valor, bastante superior aos restantes, é relativo à ponte Miguel Torga, tal como se pode verificar na Figura 9.

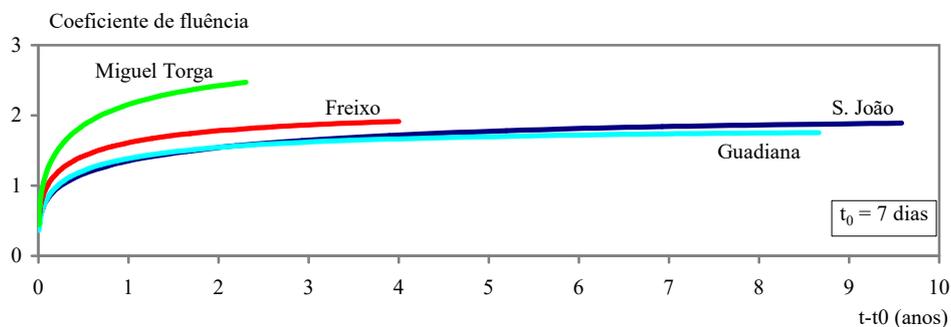


Figura 8 – Coeficiente de fluência: evolução do valor médio fluência nas diversas pontes

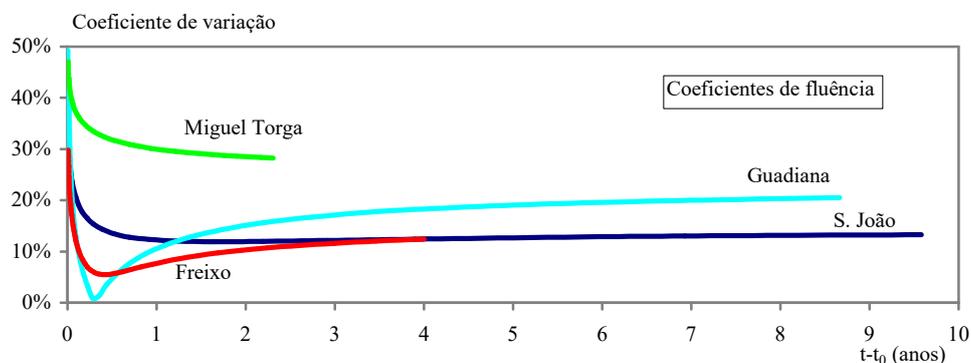


Figura 9 – Coeficiente de fluência: evolução do coeficiente de variação nas diversas pontes

A comparação entre os valores experimentais do coeficiente de fluência das diversas pontes e os respectivos valores calculados pelo modelo de fluência do EC2 é efectuada na Figura 10 permitiu verificar que este modelo estimou de uma forma bastante aproximada a fluência observada. A maior diferença verifica-se no caso da ponte Miguel Torga, em que a relação entre valores medidos e calculados é de 1,4, enquanto que nas restantes obras essa relação é muito próxima da unidade.

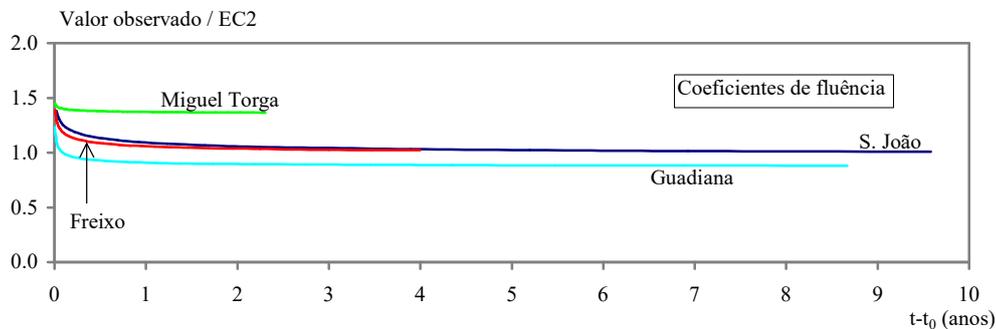


Figura 10 – Coeficiente de fluência: relação valores medidos e previstos pelo EC2

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentou-se uma metodologia para o tratamento dos valores experimentais da retracção e da fluência do betão, de forma a caracterizar a sua variabilidade. Esta metodologia foi aplicada a quatro pontes observadas pelo LNEC, permitindo o conjunto de valores analisados extrair algumas considerações que se apresentam seguidamente.

Relativamente às extensões de retracção é evidente a influência das condições ambientais na sua evolução. Com efeito, nas três pontes em que foram mantidos provetes sobre o tabuleiro e no seu interior foi notório que as extensões de retracção nos provetes mantidos no interior das secções em caixão foram muito superiores.

Diversos factores contribuem para a diferença entre os dois ambientes e conseqüentemente para os diferentes comportamentos: temperatura, humidade, chuva, exposição ao vento e à radiação solar. De acordo com Santos *et al* [7] e Sato *et al* [8] a chuva é um factor com uma importância decisiva, hipótese que é reforçada no presente trabalho pelos resultados obtidos nos dois provetes colocados na ponte Miguel Torga, abrigados da chuva sob as consolas do tabuleiro. Com efeito, as extensões medidas nestes provetes foram muito superiores às medidas nos restantes provetes exteriores, sendo inclusive um pouco superiores às extensões medidas nos provetes interiores.

A comparação dos resultados obtidos nas diversas obras permitiu ainda verificar que o modelo de retracção do EC2 se aproxima bastante dos valores das extensões medidas nos provetes colocados sobre o tabuleiro, subestimando, no entanto, a retracção ocorrida nos prismas mantidos no interior dos caixões. Verifica-se ainda uma menor variabilidade nas extensões medidas nestes provetes do que nas extensões medidas nos provetes exteriores.

Uma vez que as diversas faces do caixão de um tabuleiro têm diferentes condições de exposição entre si, torna-se necessário um melhor conhecimento da contribuição de cada ambiente para a retracção global da secção e para os efeitos que lhe pode provocar.

Relativamente à fluência, sobressai a menor importância das condições ambientais em relação à verificada na retracção. Com efeito, nas pontes em que foram mantidos compensadores de fluência no exterior e no interior do tabuleiro, os resultados obtidos, embora ligeiramente superiores nos provetes externos, não correspondem a diferenças significativas.

A dispersão dos coeficientes de fluência foi semelhante na generalidade das pontes, com valores do coeficiente de variação compreendidos entre 12% e 20%, enquanto que o coeficiente de variação obtido nos resultados da ponte Miguel Torga tende para um valor de 28%. Em relação a esta ponte deve ainda referir-se que nos provetes da mesma secção mantidos nas mesmas condições ambientais (exterior, interior ou laboratório) se obtiveram coeficientes de variação compreendidos entre 6% e 12%.

A comparação dos resultados obtidos nas diversas obras permitiu ainda verificar que o modelo de fluência do EC2 se aproxima bastante dos valores do coeficiente de fluência obtidos experimentalmente na generalidade das pontes, embora subestime os valores obtidos na ponte Miguel Torga, cujos resultados são cerca de 40% superiores.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos para a realização deste trabalho, nomeadamente por parte do Gabinete do Nó Ferroviário do Porto, do Instituto das Estradas de Portugal e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Santos, L. Oliveira – *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Dissertação de doutoramento, IST, 2000.
- [2] Visual Numerics – *IMSL – Fortran 90 subroutines and Functions*, Visual Numerics, Inc., Houston, Texas, www.vni.com, 1998.
- [3] CEB-FIP – *Model Code 1990 - Design code*. Thomas Telford, 1991, 438 p.
- [4] EC2 – *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, NP ENV 1992-1-1:1998, IPQ, 1998.
- [5] Benjamin, J. R.; Cornell, C. A. – *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, 1970, 684 p.
- [6] Silveira, António – *As variações de temperatura nas barragens*, Memória 177, LNEC, 1961, 450 p.
- [7] Santos, Teresa; Fernandes, J. Almeida; Branco, Fernando – “Retracção e fluência do betão *in situ*” em *Betão Estrutural 1996*, 1996, pp. 1.161-1.172
- [8] Sato, R.; Ujike, I. – “Field experiments and theoretical prediction of long-term behaviour of reinforced concrete beams”, *Fifth RILEM International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, 1993, pp 775-784.