

Retracção do betão em pontes. Estudos experimentais, observação e modelação estrutural



**Teresa Oliveira
Santos¹**



**António Lopes
Batista²**



**João Almeida
Fernandes³**



Xu Min⁴

RESUMO

A retracção e a fluência têm uma importância significativa na concepção, dimensionamento, processo construtivo e comportamento em serviço de grandes estruturas de betão armado pré-esforçado, como é o caso das pontes. Estes fenómenos são significativamente influenciados pelas condições ambientais a que as peças são sujeitas. No caso das pontes com tabuleiro em caixão, a previsão dos efeitos estruturais devidos a estes fenómenos é dificultada pelo facto de cada uma das peças que o constituem - banzos e almas - terem uma face sujeita ao ambiente exterior e a oposta ao ambiente interior do caixão.

Nesta comunicação apresenta-se parte de um estudo relativo à avaliação dos efeitos da retracção do betão no comportamento estrutural de pontes com tabuleiro em caixão, tendo sido seleccionados alguns resultados referentes à ponte Miguel Torga sobre o rio Douro, na Régua. A partir da informação obtida *in situ* em provetes foi estimada a retracção do betão das peças que constituem a secção transversal em caixão do tabuleiro dessa ponte, tendo em conta as diferentes espessuras equivalentes e as suas condições de exposição. A metodologia utilizada para a modelação do comportamento estrutural considerou a não uniformidade da retracção na secção transversal do tabuleiro, sendo utilizados dois modelos de elementos finitos, um de barra e outro de volume, para modelar, respectivamente, o comportamento longitudinal da estrutura e o comportamento das secções transversais das aduelas. Os resultados obtidos através dessa metodologia são comparados com os valores medidos na ponte em observação.

PALAVRAS-CHAVE

Betão, retracção, observação, pontes.

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. tosantos@lnec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. a.l.batista@lnec.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. almeida.fernandes@lnec.pt

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. xumin@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A retracção e a fluência têm uma importância significativa na concepção, dimensionamento, processo construtivo e comportamento em serviço de grandes estruturas de betão armado pré-esforçado, como é o caso das pontes. Estes fenómenos são significativamente influenciados pelas condições ambientais a que as peças são sujeitas e, no caso das pontes com tabuleiro em caixão, a previsão destes fenómenos é ainda dificultada pelo facto de cada uma das peças que o constituem - banzos e almas - terem uma face sujeita ao ambiente exterior e a oposta ao ambiente interior do caixão.

Com o objectivo de esclarecer qual a relação entre a retracção medida em provetes mantidos em diferentes ambientes e a retracção que ocorre em elementos estruturais cujas faces opostas estão sujeitas a esses ambientes, foi realizado um estudo experimental que permitiu obter bases para estimar qual o peso relativo que pode ser atribuído a cada um dos ambientes na estimativa da retracção em elementos estruturais nessas condições [1].

Assim, a partir da informação experimental obtida *in situ* em provetes compensadores e considerando os resultados conseguidos no estudo referido, foi avaliada a retracção do betão das peças que constituem a secção transversal em caixão do tabuleiro da ponte Miguel Torga sobre o rio Douro, na Régua, que estão sujeitas a diferentes condições de exposição. A avaliação dos efeitos estruturais devidos a este fenómeno foi realizada recorrendo a um modelo de elementos finitos de volume para representar a secção transversal das aduelas do tabuleiro e a um modelo de elementos finitos de barra para simular o comportamento estrutural longitudinal da ponte. Os resultados obtidos através dessa metodologia foram comparados com os valores medidos na ponte em observação. Para realçar as melhorias obtidas com essa metodologia, foram ainda feitas comparações com os resultados de outros cálculos realizados apenas com o modelo longitudinal de elementos de barra. Nesta comunicação são apenas apresentados os resultados referentes a uma das secções instrumentadas da ponte.

2. CARACTERIZAÇÃO DA RETRACÇÃO DO BETÃO DA PONTE MIGUEL TORGA

2.1 Retracção medida em provetes

A caracterização da retracção do betão da ponte Miguel Torga foi feita em diversas secções do tabuleiro, por meio de cinquenta e três provetes compensadores termo-higrométricos, todos com espessura equivalente de 300 mm, dos quais quarenta e sete foram mantidos *in situ* e os restantes em laboratório.

Das várias secções instrumentadas, optou-se por apresentar os resultados referentes à secção S4, não só por ser a secção mais instrumentada nesta ponte, havendo por isso muita informação experimental disponível, mas também porque sendo grande a diferença de espessuras entre os elementos que a constituem (Figura 1), são mais significativos os efeitos devidos à restrição da retracção do betão.

Para caracterizar a retracção do betão da secção S4 foram realizados treze provetes compensadores termo-higrométricos, dos quais oito foram colocados no exterior, dois no interior do caixão e os restantes três em laboratório. É de referir que dos oito provetes exteriores desta secção, seis foram, como habitualmente, colocados sobre o tabuleiro, enquanto que os restantes dois foram mantidos abrigados sob as consolas. Os valores medidos estão representados na Figura 2, sendo notória a influência que as condições ambientais têm na retracção do betão, nomeadamente o efeito das molhagens. De facto, verifica-se que nos provetes colocados no ambiente exterior, mas abrigados da chuva, a retracção foi muito superior às dos restantes provetes exteriores e mesmo superior à dos provetes em ambiente interior.

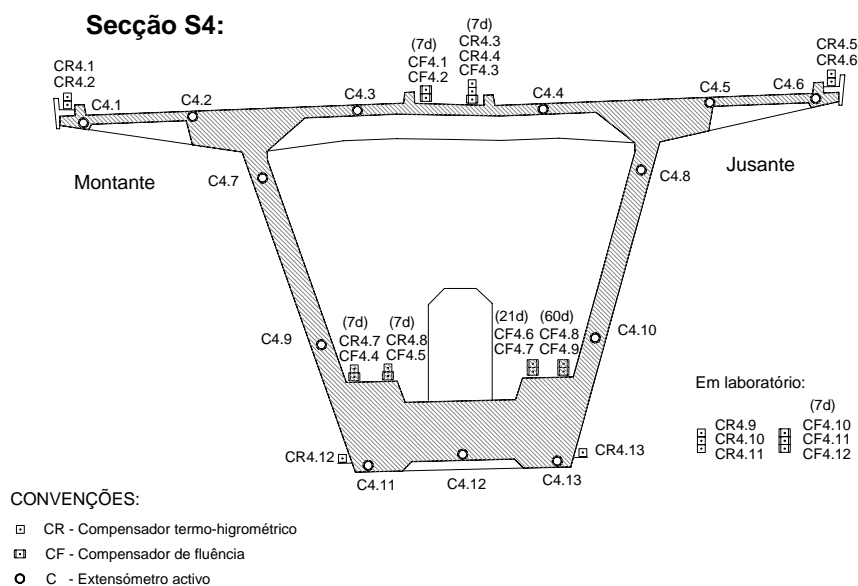


Figura 1 – P^{te} Miguel Torga. Secção instrumentada S4 [2]

Nos gráficos da Figura 2 estão também representadas as curvas ajustadas aos valores experimentais. Essas curvas foram obtidas utilizando regressões não lineares para ajustamento de funções aos valores medidos [3]. No caso da retracção do betão mantido em obra, considerou-se a função a ajustar constituída por duas parcelas, uma que representa a tendência e outra que representa a sazonalidade deste fenómeno reológico. A expressão de base utilizada para exprimir a parcela da tendência foi a indicada NP ENV 1992-1-1:1991 [4].

No que respeita à evolução da retracção associada às condições climáticas considerou-se a existência, em Portugal continental, de uma relação directa entre a temperatura do ar e a radiação solar e uma relação inversa com a precipitação ou a humidade relativa do ar. Nestas condições, as variações de temperatura estarão directamente relacionadas com a preponderância dos factores que propiciam a retracção. Assim, sendo a temperatura uma variável sazonal, é de esperar que a evolução ao longo do tempo da retracção tenha também uma componente sazonal do mesmo tipo. Para representar analiticamente a temperatura do ar em Portugal continental podem-se adoptar funções harmónicas de período diário e de período anual, sendo aleatórias as variações não interpretadas por essas funções [5]. Sendo a retracção do betão um fenómeno lento, os efeitos devidos à variação anual são os mais importantes, podendo-se desprezar os devidos à variação diária.

A função utilizada para ajustar aos valores medidos da retracção tem a seguinte forma:

$$\Delta \varepsilon_{csT}(t-t_s) = \left[\varepsilon_{cs0} \cdot C_1 \times [\beta_s(t-t_s)]^{C_2} \right] + \left[A_1 \sin\left(\frac{2\pi(t-t_s)}{365}\right) + A_2 \left(\cos\left(\frac{2\pi(t-t_s)}{365}\right) - 1 \right) \right] \quad (1)$$

Na Eq. (1) a primeira parcela representa a evolução média da retracção ao longo do tempo, sendo ε_{cs0} e $\beta_s(t-t_s)$ os parâmetros que constam do modelo preconizado no EC2 [4] e que representam, respectivamente, o valor da retracção a tempo infinito e a forma como se desenvolve ao longo do tempo. A segunda parcela representa o comportamento sazonal da retracção associado às variações climáticas. C_1 , C_2 , A_1 e A_2 são as variáveis que permitem o ajustamento da função aos dados. No caso da ponte Miguel Torga foi considerado um cimento de endurecimento normal ou rápido, humidade relativa de 70% e o valor de f_{cm} igual a 50,3 MPa [1].

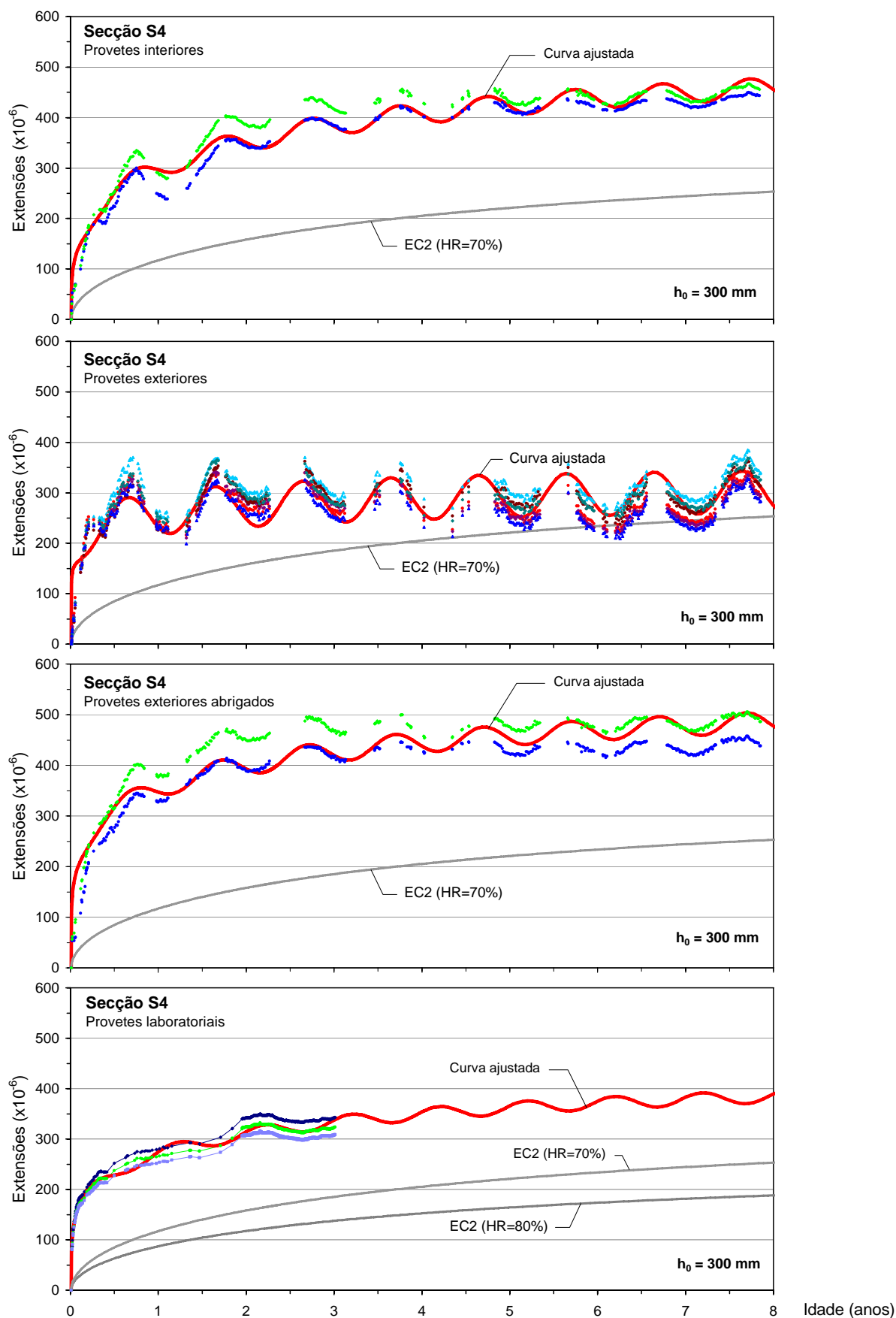


Figura 2 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Retracção dos provetes em obra: valores experimentais, curvas ajustadas a esses valores e curva do EC2

2.2 Retracção do betão na secção

Tendo como base os resultados do já referido estudo experimental [1], realizado com o objectivo esclarecer qual a relação entre a retracção medida em provetes mantidos em diferentes ambientes e a retracção que ocorre em elementos estruturais cujas faces opostas estão sujeitas a esses ambientes, foi estimada a retracção do betão dos elementos que constituem o caixão do tabuleiro da ponte. Nesse estudo obtiveram-se melhores estimativas do comportamento de peças de betão mantidas nessas situações, a partir das medições realizadas nos provetes nos diferentes ambientes, considerando uma maior contribuição da retracção medida nos provetes mantidos em ambiente interior. Apesar dos valores atribuídos, de 75% de influência do ambiente interior e 25% do ambiente exterior, resultarem de situações concretas, podem considerar-se valores de referência para aplicação no caso de outros betões sujeitos a outros ambientes. Nos ensaios realizados verificou-se uma influência significativa das variações ambientais sazonais na retracção do betão, especialmente no caso dos provetes mantidos em ambiente exterior nos quais se notava uma diminuição da retracção do betão nos períodos chuvosos. A explicação do menor peso da retracção medida em ambiente exterior reside no facto do efeito das molhagens afectar essencialmente as camadas superficiais do betão e, além disso, as peças serem, em geral, mais espessas que os provetes e apenas com uma face sujeita a molhagens.

Na modelação da retracção do betão da aduela foram consideradas várias zonas com retracção livre uniforme, definidas em função do tipo de fluxo de trocas higrométricas, dos ambientes de exposição e espessuras equivalentes. O zonamento considerado está representado na Figura 3.

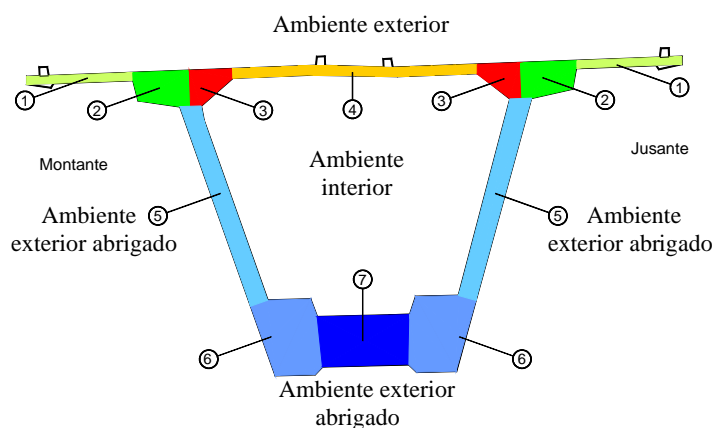


Figura 3 – P^{te} Miguel Torga. Modelação do comportamento da aduela que inclui a secção S4.
Zonas com retracção livre uniforme do betão

Como referido, adoptou-se o critério de que sempre que houvesse superfícies sujeitas a molhagens (ambiente exterior) a influência desse ambiente seria de 25%, sendo os restantes 75% avaliados a partir da retracção medida nos provetes sujeitos ao outro ambiente de exposição da peça. No caso de não haver superfícies expostas a molhagens, considerou-se uma influência de 50% de cada um dos ambientes de exposição.

Salienta-se novamente que estes valores devem ser encarados como uma ordem de grandeza, pois a influência das molhagens depende da relação entre as dimensões dos provetes e as das peças. De facto, à medida que as dimensões das peças forem aumentando, a influência das molhagens vai diminuindo. A consideração de 50% de influência dos dois ambientes, nos casos em que não há molhagens, é também uma simplificação, pois o facto dos ambientes serem diferentes faz com que os fluxos de trocas de humidade não sejam simétricos, não sendo por isso exactamente 50% a influência de cada ambiente. No entanto, como se pode observar no primeiro gráfico da Figura 4, os valores da retracção medida nos provetes mantidos nos dois ambientes sem molhagens são bastante próximos, pelo que é praticamente indiferente considerar igual ou ligeiramente diferente a influência destes dois ambientes.

No Quadro 1 está indicada a contribuição de cada ambiente na retracção e a espessura equivalente de cada zona. No mesmo quadro está também indicado um factor, k , o qual é aplicado à retracção já calculada de acordo com a contribuição de cada ambiente. A inclusão deste coeficiente deve-se a se ter verificado, em estudos efectuados em laboratório e em obra [1, 6], que o modelo do EC2 não considera devidamente a influência da espessura equivalente na retracção do betão¹. Assim, na extrapolação da retracção para espessuras equivalentes das peças cuja retracção foi utilizada para ajustar o modelo, foi considerada necessária a adopção deste factor k . No segundo gráfico da Figura 4 estão representadas as curvas de retracção do betão correspondentes às várias zonas da aduela definidas como tendo retracção livre uniforme, assim como a retracção média.

Quadro 1 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Características das zonas onde a retracção é considerada uniforme

Zona	Combinação	CONTRIBUIÇÃO DE CADA AMBIENTE NA RETRACÇÃO (%)			h_0 (mm)	k
		Exterior	Interior	Exterior abrigado		
1	1	25	0	75	300	1,0
2					860	0,7
3	2	25	75	0	900	0,7
4					300	1,0
5	3	0	50	50	700	0,7
6					1775	0,5
7					1770	0,5

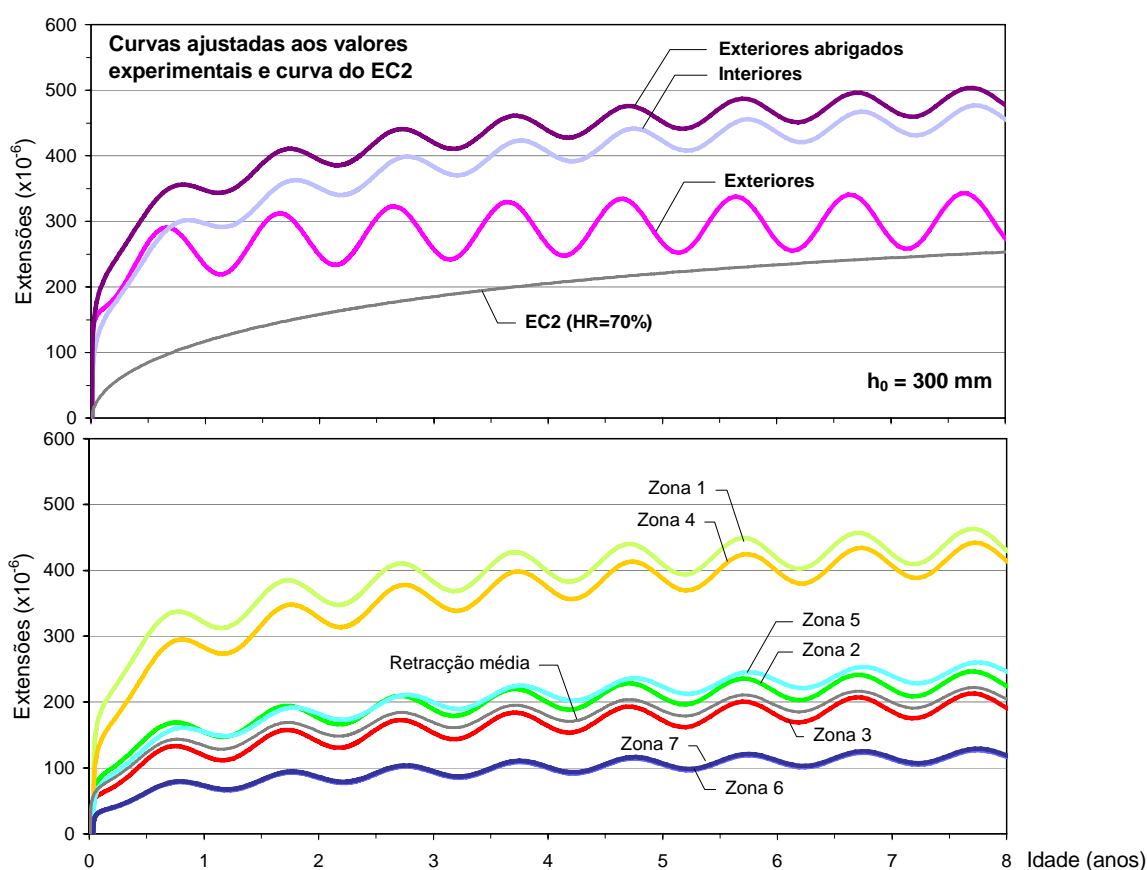


Figura 4 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Retracção do betão: curvas ajustadas aos valores experimentais e curva do EC2, curvas por zonas de retracção livre e curva da retracção média da secção

2.3 Modelação do comportamento estrutural

¹ Verificou-se uma tendência de o modelo do EC2 sobrestimar a retracção à medida que aumenta a espessura equivalente da peça. Esta tendência foi verificada em betões de diferentes composições. Assim, e apesar de a composição do betão desta ponte não ser igual, considerou-se que teria o mesmo tipo de comportamento.

Para modelar o comportamento estrutural da ponte Miguel Torga optou-se por conjugar a utilização de dois modelos de elementos finitos, correspondendo um a elementos finitos de barra, para simular o comportamento longitudinal da estrutura, e outro a elementos finitos de volume, para modelação do comportamento das aduelas devido à retracção do betão.

O estudo do comportamento longitudinal da estrutura da ponte Miguel Torga foi realizado tendo como base a modelação elaborada em estudos anteriores [3]. Foram consideradas as características mecânicas e geométricas definidas no projecto, sendo o tabuleiro e os pilares representados através de elementos de barra tridimensionais. O tabuleiro foi discretizado de modo a que cada elemento de barra correspondesse a uma aduela, sendo considerada a contribuição das armaduras passivas e de pré-esforço. O processo construtivo foi simulado de acordo com o ocorrido em obra, desde o início da betonagem dos pilares até à aplicação da restante carga permanente no tabuleiro. Porém, para minorar o número das fases construtivas a analisar, algumas operações foram concentradas no tempo². Para estimar a retracção a considerar no modelo longitudinal, com base na informação experimental recolhida, optou-se por ponderar as áreas das zonas da secção cuja retracção livre foi considerada uniforme. Pelo facto do modelo longitudinal de elementos finitos de barra não estar estruturado para que a retracção tenha uma parcela sazonal, foi apenas considerada a relativa à de tendência (Figura 5).

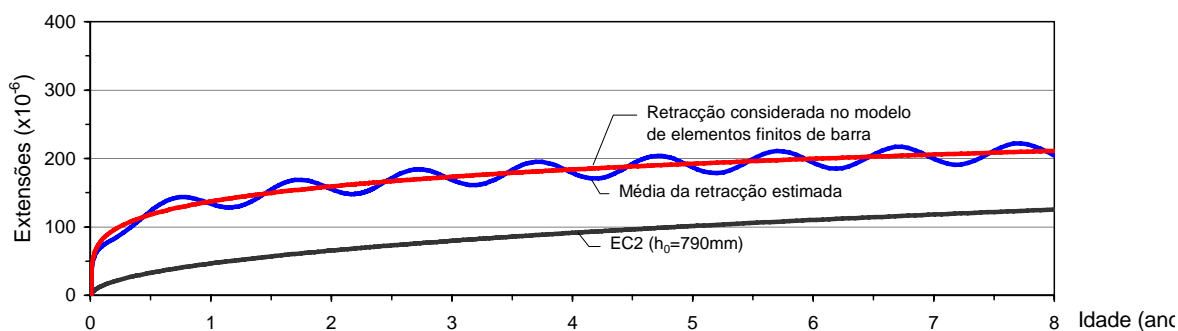


Figura 5 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Retracção estimada a partir da retracção medida *in situ*, parcela de tendência considerada no modelo global e curva de retracção estimada de acordo com o EC2

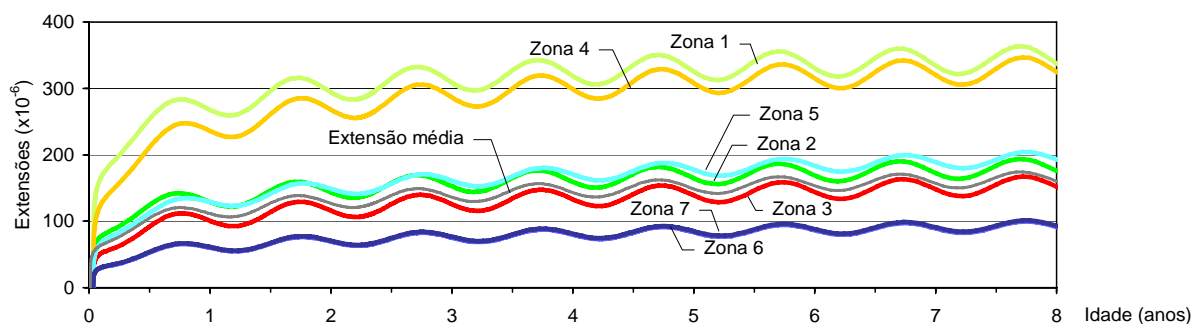
Para modelar os efeitos da retracção do betão ao nível das secções foi utilizado um modelo de elementos finitos de volume [7], tendo sido considerados os troços correspondentes às aduelas onde se localizam as secções. Não estando incorporados nos efeitos devidos à retracção do betão, obtidos através do modelo longitudinal, os devidos à parcela sazonal da retracção do betão, foi necessário adicioná-los. Assim, e admitindo o princípio da sobreposição de efeitos, às deformações devidas à parcela da tendência da retracção foram adicionadas as deformações correspondentes à sazonalidade da retracção. Os efeitos devidos à retracção total do betão foram então introduzidos no modelo local através de sucessivas deformações aplicadas nos vários elementos.

2.4 Análise dos valores medidos e calculados

Na Figura 6a apresenta-se, para a secção S4, a evolução da extensão média devida à retracção do betão, calculada através do modelo de elementos finitos de barra acrescida da parcela sazonal, assim como as correspondentes extensões, distribuídas por zonas de retracção livre uniforme na secção (Figura 3). Estas extensões foram consideradas no modelo local de elementos finitos de volume, apresentando-se na Figura 6b os resultados obtidos em pontos onde se localizam os extensómetros instalados nessa secção do tabuleiro da ponte.

a) Extensões consideradas no modelo de elementos finitos de volume em cada zona da aduela e extensão média:

² No trabalho referido encontra-se detalhadamente descrita a modelação realizada desta ponte.



b) Extensões devidas à retracção do betão, calculadas para os pontos onde se localizam os extensómetros:

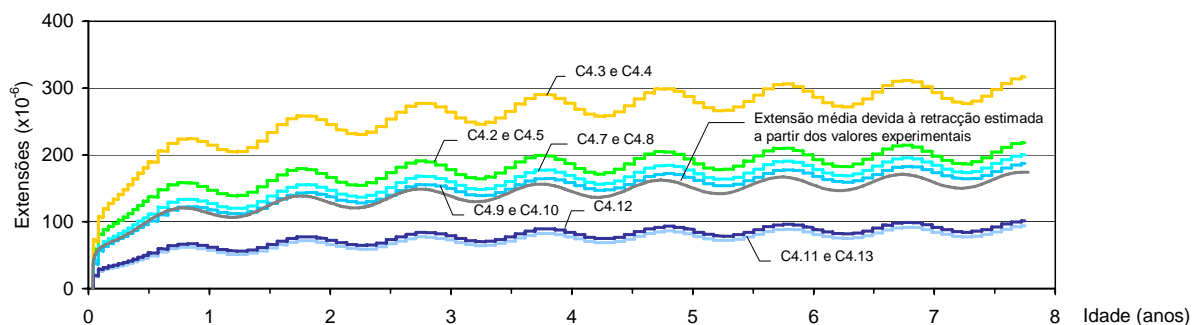


Figura 6 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Dados e resultados dos cálculos efectuados com o modelo de elementos finitos de volume

Na Figura 7 são apresentadas as extensões totais medidas na estrutura da ponte assim como as extensões totais calculadas através da utilização conjunta dos dois modelos de elementos finitos. São ainda apresentados resultados de dois cálculos realizados apenas com o modelo longitudinal de elementos de barra. Num desses cálculos, a retracção foi a estimada a partir da retracção medida nos provetes em obra e, no outro, a retracção foi estimada com base no EC2, considerando a tensão de rotura do betão da estrutura, assim como a humidade relativa média do local da obra. Deve referir-se que o estudo foi orientado apenas para a modelação da retracção do betão, pelo que os resultados dos cálculos efectuados com o modelo local (elementos finitos de volume) não teve em conta todos os fenómenos em jogo, nomeadamente os efeitos locais da fluência ou da distribuição não uniforme de armaduras na secção transversal.

Nos gráficos da referida figura os valores experimentais resultantes da observação estão identificados com a indicação do extensómetro e seguidos de “obs.”. Os resultados obtidos através da utilização conjunta dos dois programas de elementos finitos estão identificados apenas com a denominação dos extensómetros correspondentes. Os resultados obtidos utilizando apenas o programa de elementos de barra têm adicionalmente a indicação “simpl.” ou “EC2” consoante a retracção tenha sido calculada a partir da informação experimental ou de acordo com o EC2, respectivamente.

Observa-se que, de um modo geral, estimando a retracção do betão a partir dos valores experimentais medidos em obra, as extensões totais obtidas são mais próximas das medidas do que estimando a retracção através do EC2. Além disso, verifica-se que a conjugação dos dois modelos de elementos finitos conduz a valores mais próximos dos experimentais do que utilizando apenas o modelo longitudinal de elementos de barra.

Apresenta-se na Figura 8 a evolução das extensões totais medidas em obra e calculas nas três análises efectuadas. Mais uma vez se constata que a conjugação dos dois modelos de elementos finitos conduz a valores mais próximos dos experimentais do que utilizando apenas o modelo longitudinal de elementos de barra. A referida figura mostra igualmente a importância do empenamento da secção transversal, o qual não se deve exclusivamente à retracção do betão.

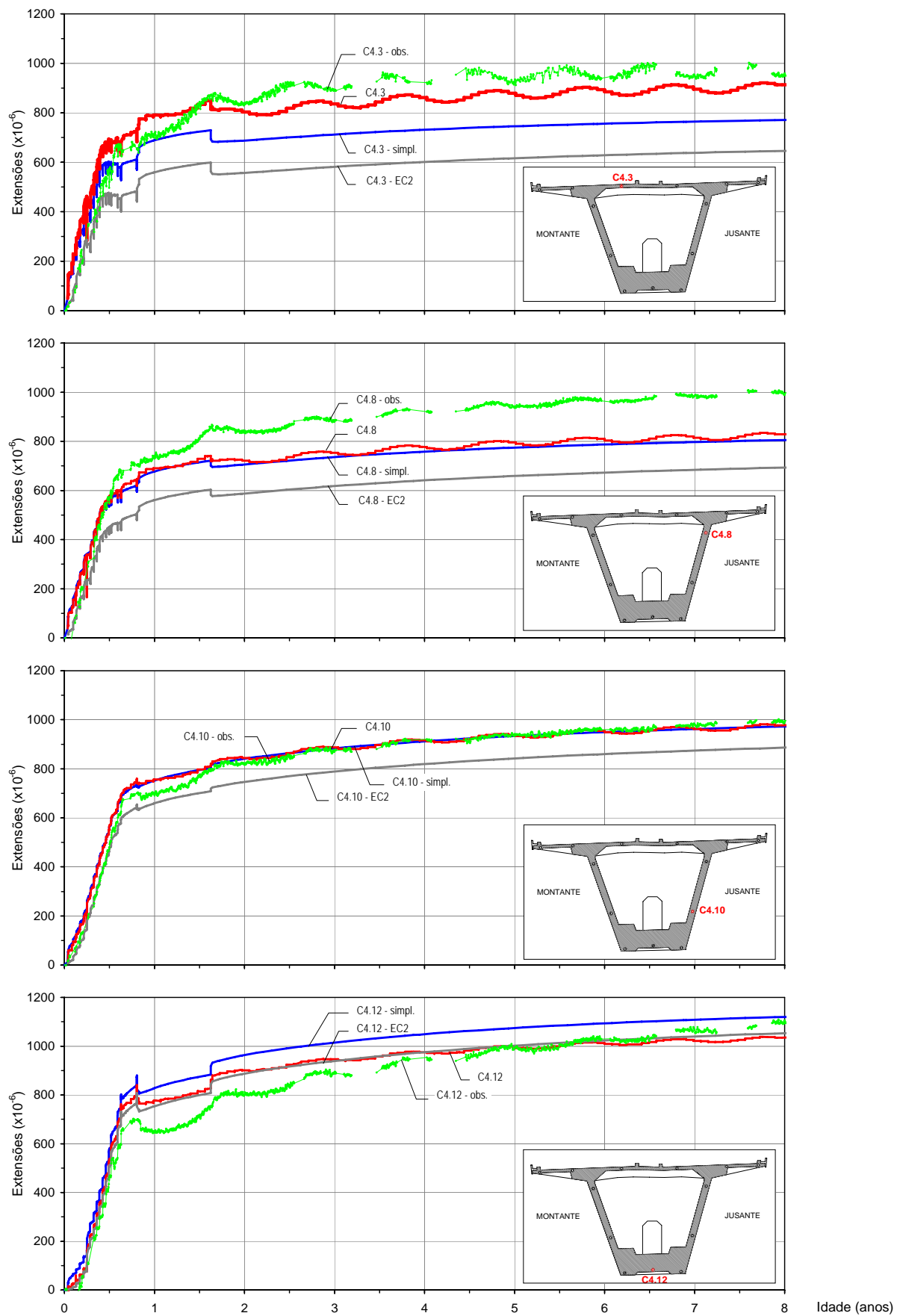


Figura 7 – P^{le} Miguel Torga. Secção S4. Extensões medidas e calculadas

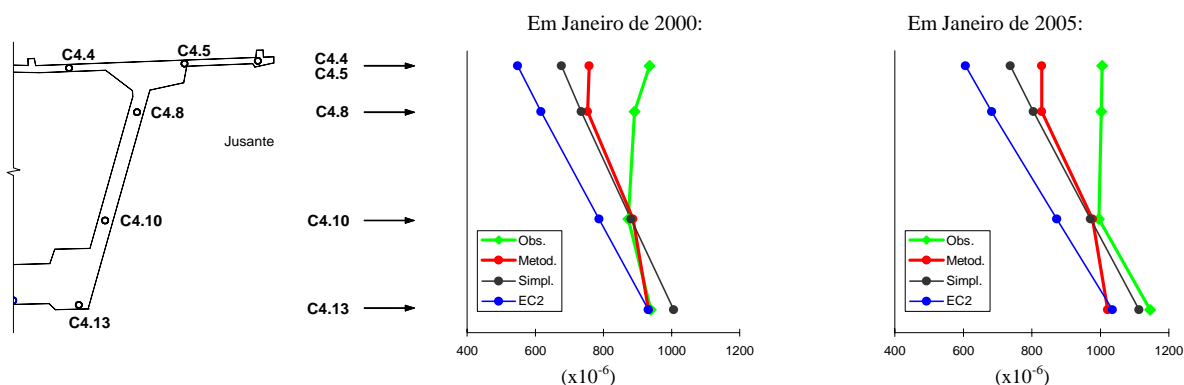


Figura 8 – P^{te} Miguel Torga. Secção S4. Extensões medidas e calculadas

3. CONCLUSÕES

Nesta comunicação foi apresentada parte de um estudo relativo à avaliação dos efeitos da retracção do betão no comportamento estrutural de pontes com tabuleiro em caixão, tendo sido seleccionados alguns resultados referentes à ponte Miguel Torga. A partir da informação obtida *in situ* em provetes foi estimada a retracção do betão das peças que constituem a secção transversal em caixão do tabuleiro dessa ponte, tendo em conta as diferentes espessuras equivalentes e condições de exposição dessas peças. A metodologia utilizada para a modelação do comportamento estrutural considera a não uniformidade da retracção na secção transversal do tabuleiro, sendo utilizados dois modelos de elementos finitos, um de barra e outro de volume, para modelar, respectivamente, o comportamento longitudinal da estrutura e o comportamento das secções devido à retracção do betão.

Verificou-se, em geral, que estimando a retracção do betão a partir dos valores experimentais medidos em provetes mantidos em obra, as extensões totais calculadas ajustaram-se melhor às medidas do que prevendo a retracção através do EC2. A utilização conjunta de modelos estruturais locais e globais permitiu realizar uma interpretação de melhor qualidade dos valores observados.

REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, Teresa O. – Retracção do betão em pontes. Observação e análise – Dissertação de doutoramento, FCT/UNL, 2006.
- [2] SANDRA, S.; SANTOS, Teresa O.; FERNANDES, J.A – Observação da p^{te} rodoviária da Régua sobre o rio Douro. Plano da instrumentação efectuada durante a construção – Rel. 7/98, LNEC, 1998.
- [3] SANTOS, L. Oliveira – Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão - Dissertação de doutoramento, IST, 2001.
- [4] EC2 – Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1.1: regras gerais e regras para edifícios – NP ENV 1992-1-1, IPQ, 1998.
- [5] SILVEIRA, António – As variações de temperatura nas barragens – Memória 177, LNEC, 1961.
- [6] CASTANHETA, Mário – Observação da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro. 12^a NT – Nota Técnica 03/01-NOE, LNEC, 2001.
- [7] BATISTA, António L. – Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada - Dissertação de doutoramento, IST, 1998.