

## **Monitorização e modelação do comportamento do betão nas primeiras idades: aplicação a uma viga pré-fabricada**



**Denise Ferreira<sup>1</sup>**



**Miguel Azenha<sup>2</sup>**



**Rui Faria<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Com a crescente utilização de betões de elevada resistência a problemática do comportamento do betão nas primeiras idades é sublinhada, em termos da durabilidade e do desempenho estrutural. De facto, nas primeiras idades o betão experimenta deformações térmicas não uniformes, com génese na reacção exotérmica de hidratação do cimento. Estas deformações, se restringidas, podem originar fissuração precoce das estruturas, pelo que é importante dispor de modelos numéricos para prever este problema, adequadamente validados por via experimental. Neste trabalho é apresentada a monitorização, desde os primeiros dias de idade, das temperaturas e extensões de uma viga pré-fabricada de secção em I, sendo aquelas medições comparadas com as previsões de um modelo numérico termo-mecânico apoiado no MEF. No que concerne ao modelo numérico utilizado, a análise térmica tem em conta a geração de calor decorrente da hidratação do cimento e os fluxos energéticos entre a viga e o meio ambiente. A análise mecânica considera a evolução das propriedades mecânicas do betão com a maturidade, a retracção autógena e a geração de deformações por fluência. A par da campanha de monitorização foram também realizados ensaios de caracterização do betão a nível térmico (calorimetria) e a nível mecânico (fluência, retracção e evolução das propriedades físicas). A referida viga foi ainda analisada quando sujeita a uma cura térmica de vapor nas primeiras horas, tendo em vista avaliar a respectiva influência no potencial de fissuração da peça.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Primeiras idades do betão, hidratação do cimento, monitorização de deformações e temperaturas, modelação numérica, fendilhação térmica.

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LABEST, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.  
[mec06001@fe.up.pt](mailto:mec06001@fe.up.pt)

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LABEST, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.  
[mazinha@fe.up.pt](mailto:mazinha@fe.up.pt)

<sup>3</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LABEST, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.  
[rfaria@fe.up.pt](mailto:rfaria@fe.up.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

A fissuração do betão nas primeiras idades é um problema muito actual devido à crescente utilização de betões de elevada resistência, que por apresentarem altas quantidades de ligante têm associadas importantes deformações de origem térmica e de retracção autógena. Este tema envolve diversas complexidades inerentes ao facto de o campo de temperaturas no betão ser não uniforme durante as fases de aquecimento e de arrefecimento causadas pela libertação do calor de hidratação do cimento, e de as propriedades térmicas e mecânicas do betão estarem em mutação constante [1,2]. Deste modo, é essencial dispor de ferramentas numéricas que permitam analisar, e se possível evitar, a fissuração nas idades jovens do betão, fornecendo previsões da evolução das temperaturas, deformações e tensões.

A indústria da pré-fabricação utiliza betões de elevada resistência no fabrico de elementos estruturais, recorrendo por vezes a curas térmicas de vapor para acelerar o desenvolvimento das propriedades mecânicas do betão, tendo em vista antecipar a descofragem. Assim, e com o objectivo de avaliar o comportamento de uma viga pré-fabricada de betão, realizou-se uma campanha de monitorização de temperaturas e deformações desde a fase de betonagem até cerca dos 3 dias de idade. O procedimento de instrumentação adoptado foi previamente calibrado no âmbito de um ensaio experimental realizado em laboratório, no qual foi comparada a eficácia de vários tipos de sensores [3]. Assim, e no que diz respeito à medição de deformações, foram utilizados dois tipos de extensómetros de cordas vibrantes, de revestimentos metálico e plástico. O uso combinado destes extensómetros permite a determinação aproximada do instante de aderência ao betão do sensor mais rígido (o de revestimento metálico), sendo este definido com o momento a partir do qual os dois tipos de extensómetros fornecem respostas com evoluções semelhantes (o extensómetro de cordas vibrantes plástico, de muito menor rigidez, irá aderir mais cedo do que o metálico).

A par da referida monitorização empreendeu-se igualmente uma análise termo-mecânica da viga, determinando-se os campos térmico e mecânico instalados no betão, tendo em conta, por um lado, a geração interna de calor de hidratação e as trocas de energia com o meio ambiente, e, por outro lado, a evolução das propriedades mecânicas com a maturidade, fluência e retracção. As temperaturas e extensões monitorizadas são comparadas com as previsões do modelo numérico, e o risco de fissuração é avaliado localmente, comparando a máxima tensão principal de tracção com a resistência instantânea do betão. É ainda apresentado o estudo da referida viga sujeita a uma cura térmica, cujas temperaturas impostas foram monitorizadas.

## **2. MONITORIZAÇÃO DA VIGA PRÉ-FABRICADA**

### **2.1. Descrição da monitorização**

A viga instrumentada é pré-fabricada e pré-tensionada, de secção em I de 1.5m de altura e largura variável, com 15.7m de comprimento: ver alçado na Fig. 1a e cortes transversais na Fig. 1b. Na monitorização da viga foram utilizados os seguintes sensores de embeber no betão: (i) para medição de temperaturas, termopares tipo K e detectores de temperatura resistivos de platina PT100; (ii) para medição de deformações, extensómetros de cordas vibrantes de revestimento metálico e plástico (os extensómetros têm também um termómetro incorporado). As deformações que se pretenderam medir correspondem às extensões totais do betão, isto é, à soma das extensões térmica e mecânica.

Foram escolhidas duas secções a instrumentar: uma na zona de secção maciça (SECM1) e outra na zona de secção aligeirada (SECM2), com localizações ilustradas na Fig. 1a. Os sensores de temperaturas e deformações foram dispostos ao longo da altura e da espessura das secções de acordo com o esquema da Fig. 2: na SECM2 colocaram-se 8 termopares (T1-T8), 5 PT100 (PT1-PT5), 3 extensómetros de cordas vibrantes metálicos (CM1-CM3) e um plástico (CP1); na SECM2 foram dispostos 1 PT100 (PT7), 4 extensómetros de cordas vibrantes metálicos (CM4-CM6 e CM9) e 1 plástico (CP2). Para caracterização da temperatura ambiente utilizou-se 1 PT100 (PT6) e 1 termopar

(T9). Na Fig. 3 ilustra-se alguma da instrumentação colocada na SECM1. Na Fig. 4a apresenta-se a viga no instante de finalização da betonagem e na Fig. 4b o instante de descofragem (realizada aos 0.75 dias). A viga foi curada em ambiente natural e a pré-tensão foi aplicada aos 1.70 dias de idade.

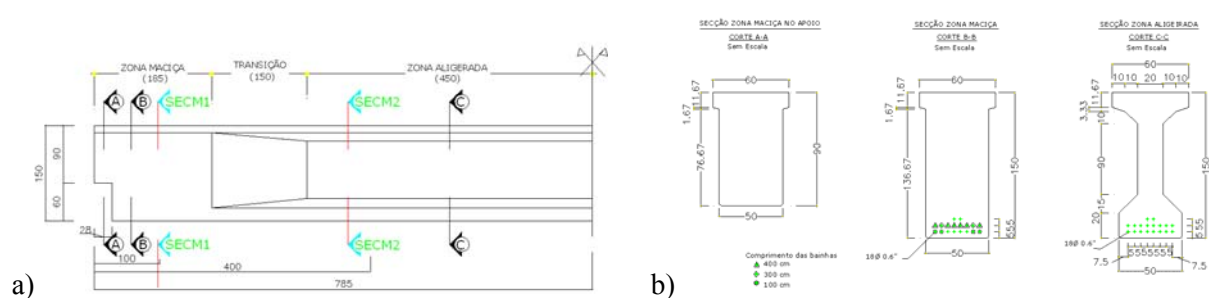


Figura 1. Viga instrumentada: a) alçado e b) secções transversais.

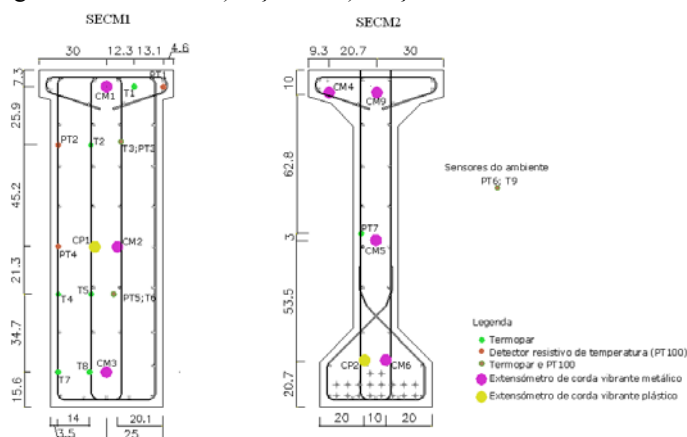


Figura 2. Secções de monitorização na viga pré-fabricada.

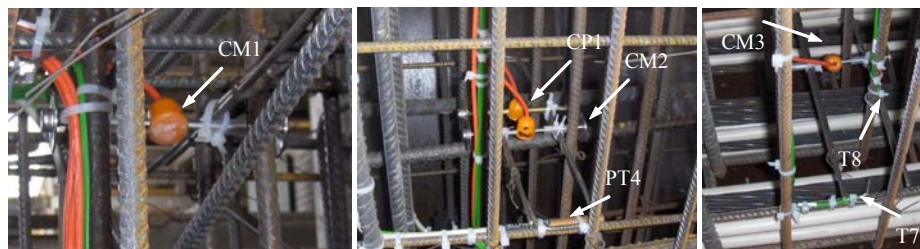


Figura 3. Sensores da SECM1.

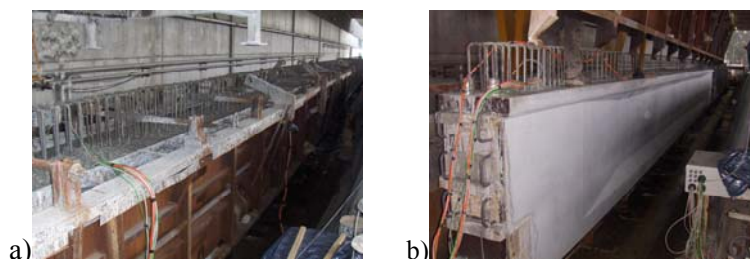


Figura 4. Viga instrumentada: a) instante final da betonagem; b) retirada das cofragens.

## 2.2. Temperaturas observadas

A secção SECM1 é a mais amplamente caracterizada a nível térmico, com um total de 17 medições, sendo os resultados apresentados na Fig. 5a. Observa-se que o período de aquecimento ocorre até aos primeiros 0.6 dias de idade, seguindo-se o período de arrefecimento até cerca dos 1.9 dias, altura em que o betão atinge o equilíbrio térmico com o ambiente. O valor máximo da temperatura medida é de cerca de 48°C, na zona do núcleo da secção (termómetros T5, T6 e PT5), e o valor mínimo registado é

de cerca de 30°C, na zona superficial mais exposta ao meio ambiente (sensor PT1). Observa-se, assim, um gradiente de temperatura entre as zonas mais quentes e frias desta secção de cerca de 18°C. No que concerne à secção SECM2, na Fig. 5b observa-se que as durações dos períodos de aquecimento e arrefecimento são similares às da SECM1. No entanto, e como esperado, a temperatura máxima é inferior, uma vez que se trata de uma secção menos espessa, atingindo cerca de 34°C no banzo inferior da viga; a temperatura mínima foi de 27°C no banzo superior, pelo que o gradiente de temperatura nesta secção é de apenas 7°C.

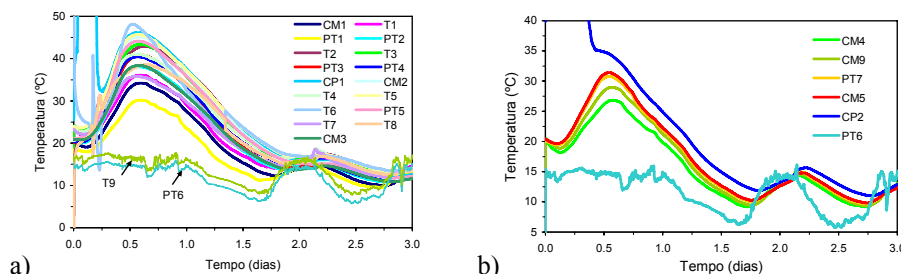


Figura 5. Temperaturas: a) SECM1 e b) SECM2.

### 2.3. Extensões totais observadas

No que diz respeito às deformações, apresentam-se na Fig. 6a os resultados decorrentes da monitorização da SECM1 e na Fig. 6b da SECM2. O sinal inicial dos extensómetros de cordas vibrantes plásticas (CP1 na SECM1 e CP2 na SECM2) não é representado, uma vez que ambos sofreram elevadas interferências neste período, o que impossibilitou a definição do instante de aderência dos extensómetros metálicos que lhes estavam adjacentes (CM2 na SECM1 e CM6 na SECM2). Em correspondência com as fases de aquecimento e de arrefecimento, observa-se um período de expansão até aos 0.6 dias, seguido de um de contracção, até que cerca dos 1.7 dias é aplicada a pré-tensão. Particularmente na SECM1 é observado um ligeiro gradiente nas extensões totais medidas pelos sensores ao longo da altura da secção durante a fase de hidratação, sendo atingidos máximos de 200µε na zona sujeita a temperaturas mais elevadas (CM2) e de 150µε na zona de menores temperaturas (CM1 e CM3). Por sua vez na SECM2, e uma vez que as temperaturas nesta secção são inferiores, as deformações são também menores do que na SECM1, sendo alcançado um máximo de expansão de cerca de 80µε à idade de 0.6 dias. Após a aplicação da pré-tensão os extensómetros das duas secções instrumentadas medem deformações distintas consoante a sua localização ao longo da altura da viga, devido à deformada negativa (contra-flecha) a que a esta fica sujeita.

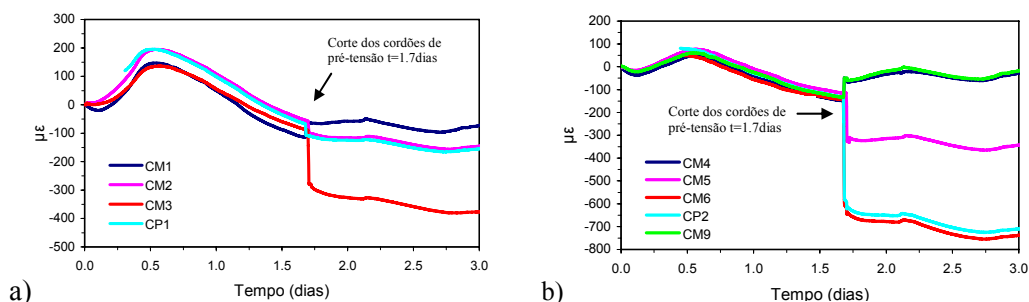


Figura 6. Extensões totais: a) SECM1 e b) SECM2.

### 2.4. Fissuras superficiais

Após a finalização do processo de fabrico foi possível observar, tanto na viga instrumentada como numa viga similar sujeita a cura térmica, várias fissuras superficiais ao nível do banzo superior. Estas fissuras (ver Fig. 7a) apresentam um desenvolvimento de cerca de 30 cm e 1 mm de abertura. A localização das fissuras observadas está representada nos esquemas da Fig. 7b no caso da viga instrumentada e na Fig. 7c para a viga sujeita a cura térmica. Quanto à viga instrumentada, curada sob ambiente natural, observaram-se 9 fissuras maioritariamente localizadas na zona de secção aligeirada.

No caso da viga sujeita a cura térmica o número de fissuras é significativamente superior, com 19 fissuras ao longo do vão, mas mais concentradas na zona maciça próxima do extremo B.

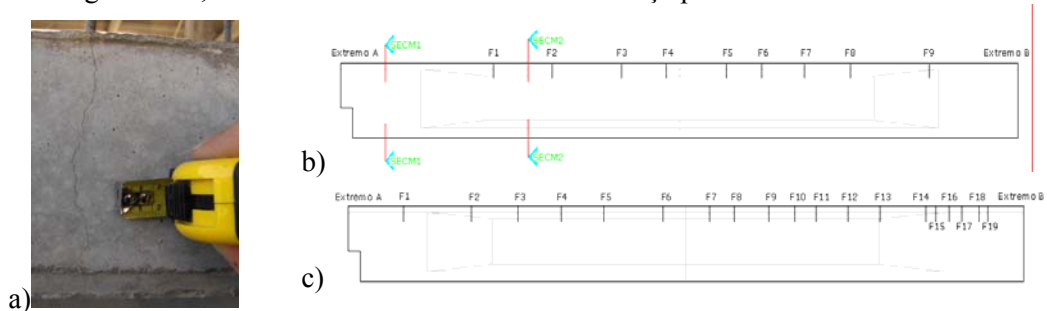


Figura 7. Fissuras observadas: a) e b) viga instrumentada; c) viga com cura térmica.

### 3. MODELO TERMO-MECÂNICO

O equilíbrio térmico do betão nas primeiras idades rege-se pela seguinte equação, baseada na lei de Fourier,

$$k \nabla \cdot (\nabla T) + \dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (1)$$

em que  $k$  e  $\rho c$  são a condutibilidade térmica e o calor específico volumétrico do betão,  $T$  é a temperatura e  $\dot{Q}$  é o calor interno devido à hidratação do cimento. A taxa de geração interna de calor decorrente da hidratação do cimento é simulada através de uma expressão que deriva de uma lei de Arrhenius [2]

$$\dot{Q} = A \dot{\alpha} = A f(\alpha) e^{-E_a/(RT)} \quad (2)$$

sendo  $a$  uma constante ( $s^{-1}$ ),  $f(\alpha)$  uma função que descreve a evolução da geração de calor normalizado,  $\alpha$  o grau de hidratação (expressa a evolução da reacção de hidratação, evoluindo desde 0 até próximo de 1),  $E_a$  a energia de activação da reacção de hidratação ( $Jmol^{-1}$ ) e  $R$  a constante universal dos gases perfeitos ( $8.314 Jmol^{-1}K^{-1}$ ).

Quanto ao problema mecânico, o Método da Maturidade [4] permite expressar a evolução das propriedades do betão ao longo da hidratação. Para tal é necessário recorrer ao conceito de Idade Equivalente, o qual tendo em conta o tempo e o historial de temperaturas  $T(\tau)$  a que o betão esteve sujeito, permite transformar a idade real  $t$  deste material numa ‘idade equivalente’  $t_{eq}$  (ambas em dias), de acordo com a seguinte expressão:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-E_a/R(1/T(\tau) - 1/T_{ref})} d\tau \quad (3)$$

Esta idade é superior à idade real sempre que o historial de temperaturas durante a hidratação for superior à temperatura de referência  $T_{ref}$  (normalmente  $20^\circ C$ ), permitindo reproduzir o papel acelerador da temperatura no desenvolvimento das características mecânicas do betão. No módulo de elasticidade, por exemplo, esta influência pode ser simulada através de expressões como a especificada no Eurocódigo 2 [5]

$$E_{cm}(t_{eq}) = e^{0.3s(1 - \sqrt{28/t_{eq}})} E_{cm}(28) \quad (4)$$

em que  $E_{cm}(28)$  é o módulo de elasticidade médio do betão para a idade de referência de 28 dias e  $s$  é um parâmetro que depende do tipo de cimento. Expressões análogas permitem reproduzir as evoluções das resistências médias à compressão  $f_{cm}$  e à tracção  $f_{ctm}$  do betão (ver [5]). A simulação do comportamento viscoelástico do betão nas primeiras idades é geralmente realizada a partir da Lei da Dupla Potência (DPL) [6], que considera a seguinte função de fluência para uma idade  $t$  e tensão aplicada à idade  $t'$

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \frac{\phi_1}{E_0(t')} (t')^{-m} (t - t')^n \quad (5)$$



em que  $E_0(t')$  é o módulo de elasticidade assintótico do betão (relativo a cargas de curta duração), e  $\phi_1$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros do material. Para quantificar o risco de fissuração da viga estudada é determinado um parâmetro local e instantâneo denominado Índice de Fissuração (IF), expresso pela razão entre a máxima tensão principal de tracção instalada  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e a resistência do betão, ambas determinadas para o mesmo instante  $t$  (e correspondente idade equivalente  $t_{eq}$ ):

$$IF(t) = \sigma_{m\acute{a}x}(t) / f_{ctm}(t_{eq}) \quad (6)$$

O modelo sumariamente descrito está implementado no código computacional DIANA, baseado no MEF (para mais detalhes consultar [7]). Permite determinar as temperaturas, extensões e tensões instaladas no betão durante a hidratação do cimento, tendo sido aplicado na análise da viga descrita no Capítulo 2.

## 4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA VIGA PRÉ-FABRICADA

### 4.1. Caracterização termo-mecânica

A viga pré-fabricada descrita no Capítulo 2 foi discretizada em elementos finitos 3D, tirando partido da dupla simetria, tal como ilustrado para um quarto da peça na malha da Fig. 8a. A análise térmica envolveu elementos finitos de 8 nós com uma integração de Lobatto  $2 \times 2 \times 2$ , e a análise mecânica recorreu a elementos de 20 nós com  $3 \times 3 \times 3$  pontos de Gauss. A análise termo-mecânica foi realizada até à idade de 3 dias, com incrementos de tempo de 0.5h até aos 1.67 dias, e de 1h no período 1.67-3 dias.

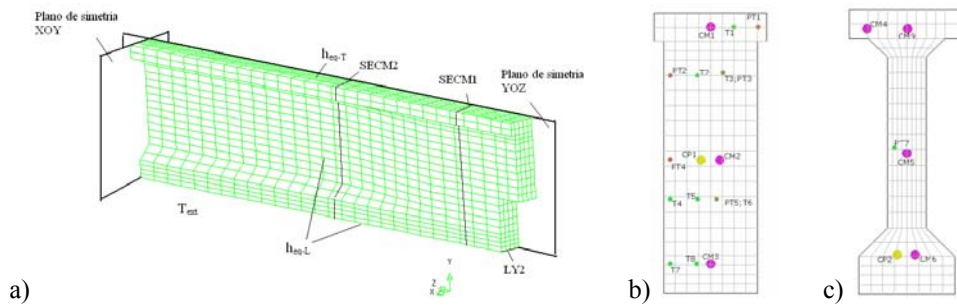


Figura 8. Viga pré-fabricada: a) malha de EF, fronteiras térmica e mecânica; b) SECM1; c) SECM2.

Na modelação térmica considerou-se para o betão  $k = 2.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $\rho c = 2400 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ . A lei de Arrhenius que define a taxa de libertação do calor de hidratação do cimento, Eq. (2), foi caracterizada através de ensaios realizados num calorímetro isotérmico JAF com amostras de pasta contendo cimento, filler, adjuvante e água nas mesmas proporções existentes no betão, tendo-se determinado as seguintes entidades:  $E_a = 42.12 \text{ kJmol}^{-1}$ ,  $a = 1.072 \times 10^8 \text{ s}^{-1}\text{K}^{-1}$  e a função  $f(\alpha)$  representada na Fig. 9a. Para as fronteiras térmicas foram considerados os seguintes coeficientes de convecção-radiação  $h_{eq}$  (que permitem reproduzir os fluxos de calor para o ambiente [6,8]): (i) para a superfície do topo  $h_{eq-T} = 13 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  com a cofragem e  $h_{eq-T} = 15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  após descofragem; (ii) para as faces laterais e para a base  $h_{eq-L} = 10 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  com a cofragem e  $h_{eq-L} = 12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  após descofragem. No modelo numérico impôs-se como temperatura ambiente ( $T_{ext}$ ) a registada pelos termómetros colocados externamente à viga durante a campanha de monitorização.

Relativamente às propriedades mecânicas realizaram-se ensaios a várias idades para determinar as evoluções da resistência à tracção e do módulo de elasticidade do betão (ver Fig. 9b), bem como da retracção autógena e da fluência. Na caracterização da fluência (ver Fig. 9c) os parâmetros da Eq. (5) foram ajustados recorrendo ao Método dos Mínimos Quadrados, tendo-se obtido:  $\phi_1 = 0.8$ ,  $m = 0.15$  e  $n = 0.15$ ;  $E_0$  foi considerado 20% superior ao módulo de elasticidade estático em cada idade de carregamento. O coeficiente de dilatação térmica do betão foi considerado com o valor  $\alpha_T = 10^{-5}$ , e para coeficiente de Poisson adoptou-se  $\nu = 0.20$ . A pré-tensão foi simulada a partir de forças pontuais aplicadas nas extremidades da parte activa de cada cordão (nalguns cordões parte da respectiva

extensão estava desactivada por embainhamentos com tubos plásticos). Uma vez que a viga foi pré-tensionada aos 1.7 dias de idade, procedeu-se a uma análise faseada em que no período 0-1.7 dias a peça foi considerada totalmente apoiada na base, e no período 1.7-3 dias a viga foi considerada simplesmente apoiada, sujeita à acção do peso próprio e da acção equivalente do pré-esforço.

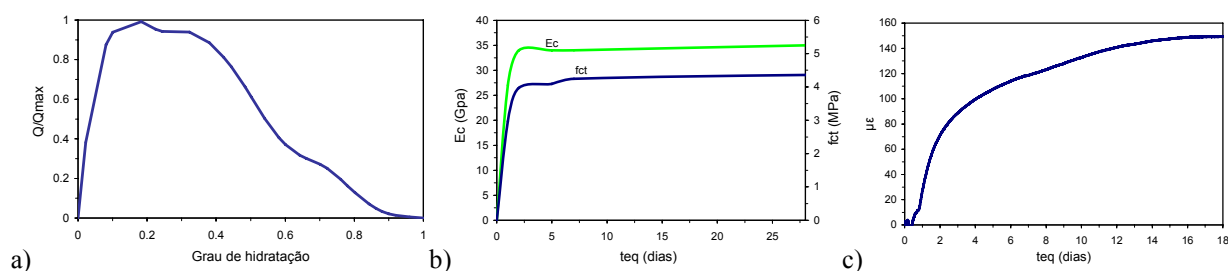


Figura 9. Caracterização experimental do betão: a) função  $f(\alpha)$ ; b)  $E_c$  e  $f_{ct}$ ; c) fluência.

## 4.2. Temperaturas

Na Figura 10 as temperaturas obtidas na análise térmica (curvas a tracejado) são comparadas com as medições *in situ* (curvas a cheio) para as secções SECM1 e SECM2, e nas localizações dos sensores consideradas mais representativas (rever Figs. 2 e 8). Genericamente observa-se uma boa coerência entre os resultados numéricos e experimentais, com as seguintes ressalvas: (i) nos pontos de medição superficiais (PT2, PT7 e CM4) a queda de temperatura a partir do instante de descofragem (0.8 dias) não foi no modelo numérico tão acentuada como registado na monitorização, o que se poderá dever ao súbito arrefecimento das superfícies húmidas quando expostas ao ar ('evaporative cooling'), fenómeno não contemplado na simulação; (ii) nos pontos de medição mais próximos do plano de simetria vertical das secções (CM1 e CM2) o modelo sobrestimou as temperaturas observadas, o que se deverá à existência da armadura, a qual potencia uma uniformização das temperaturas no núcleo.

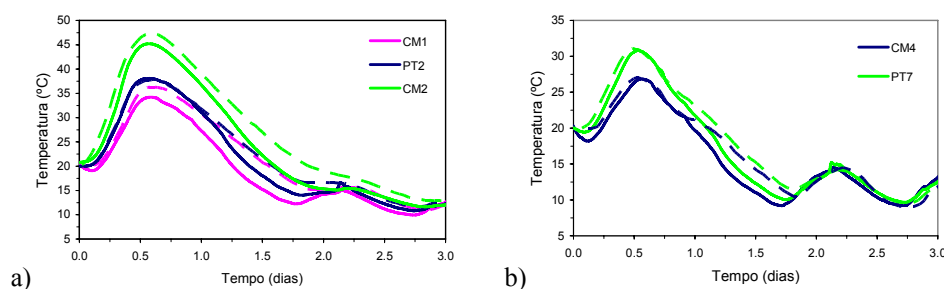


Figura 10. Temperaturas medidas (cheio) e numéricas (tracejado): a) SECM1 e b) SECM2.

## 4.3. Extensões totais

As extensões totais  $\epsilon_z$  na direcção longitudinal da viga, previstas para o betão pelo modelo numérico e medidas durante a monitorização, são comparadas na Fig. 11 para as secções SECM1 e SECM2, nas posições dos sensores CM1 a CM6. Como se constata, de um modo geral o modelo numérico prevê adequadamente o campo de deformações instalado no betão da viga. Durante a primeira fase de análise (até aos 1.7 dias), em que a viga está sujeita unicamente à acção térmica decorrente do calor de hidratação, os resultados experimentais e numéricos apresentam-se bastante coerentes, não reproduzindo o modelo de forma inteiramente fiel os ligeiros diferenciais de deformação observados ao longo da altura da secção, o que se pode dever à rigidez dos cordões de pré-esforço, não contabilizada na simulação. A fase de aplicação do pré-esforço (aos 1.7 dias) é reproduzida pelo modelo, e as diferenças entre os resultados experimentais e numéricos após este instante resultam dos desvios assinalados na primeira fase.

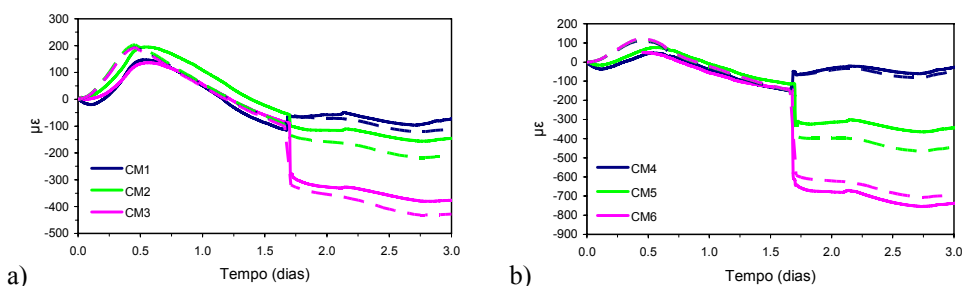


Figura 11. Extensões totais  $\epsilon_z$  medidas (cheio) e numéricas (tracejado): a) SECM1 e b) SECM2.

#### 4.4. Risco de fissuração

Uma vez que o modelo mecânico foi validado na secção anterior, o estado de tensão instalado no betão da viga pode ser avaliado com relativa confiança, bem como o índice de fendilhação IF especificado na Eq. 6. A evolução do estado de tensão no interior da peça passa por várias etapas: (i) no período de aquecimento até  $t = 0.437$  dias o núcleo das secções mais maciças atinge as temperaturas mais elevadas, e portanto tem maiores necessidades de expansão, o que faz com que as zonas superficiais das correspondentes secções fiquem traccionadas; (ii) ao longo do período de arrefecimento até  $t = 0.686$  dias a situação inverte-se, pelo que as tensões de compressão inicialmente presentes nas zonas interiores da secção de betão são gradualmente substituídas por tracções, e por sua vez as tracções da superfície dão lugar a compressões; (iii) numa fase mais avançada do arrefecimento, até  $t = 1.64$  dias, atingem-se as tracções máximas no interior da viga; (iv) no período subsequente à aplicação da pré-tensão ( $t > 1.71$  dias) a viga fica sujeita a flexão composta com o banzo superior traccionado, como ilustrado na Fig. 12a. Durante as etapas (i)-(iii) não se observaram valores importantes de IF; no entanto após a pré-tensão as tensões de tracção no betão induzem valores de IF bastante elevados no banzo superior, como se pode observar na Fig. 12b, numa extensão do vão em correspondência com a localização das fissuras superficiais observadas *in situ* (rever Fig. 7b).

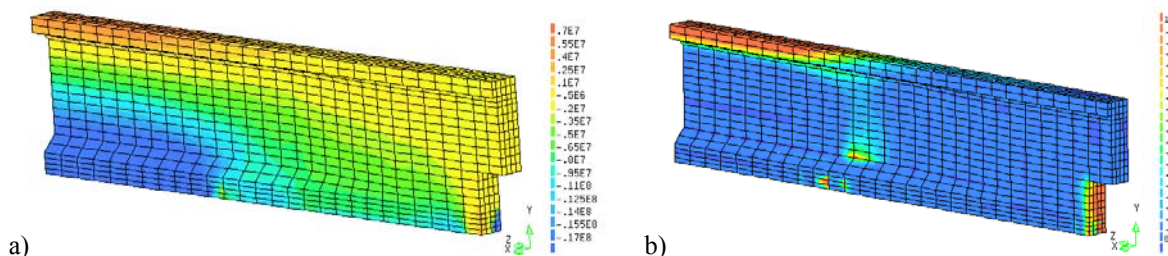


Figura 12. Viga após a pré-tensão: a)  $\sigma_z$  (em Pa) e b) IF.

#### 4.5. Viga com cura térmica de vapor

Com frequência as vigas pré-fabricadas como a do presente estudo são sujeitas a uma cura térmica de vapor, o que permite activar o desenvolvimento das propriedades mecânicas do betão e acelerar o processo de fabrico. Na fábrica visitada o uso da cura térmica permitiu a retirada das cofragens aos 0.17 dias de idade e a aplicação da pré-tensão aos 0.90 dias. Assim, realizou-se uma nova simulação numérica em que a temperatura ambiente  $T_{ext}$  foi especificada por forma a reproduzir a cura térmica, representada nos gráficos da Fig. 13 pelas curvas a cheio. As evoluções das temperaturas no interior da viga são apresentadas para dois pontos das secções analisadas, tanto para o caso da viga curada em ambiente natural, como quando sujeita a cura térmica: um correspondente ao sensor CM2, para a secção SECM1 (Fig. 13a), e outro relativo ao sensor CM5, na secção SECM2 (Fig. 13b). Verifica-se que com a aplicação da cura térmica a simulação numérica prevê, de facto, uma significativa aceleração da hidratação do cimento, com as temperaturas de pico a atingirem valores superiores e mais cedo do que no caso da viga curada naturalmente. Observa-se ainda que a secção SECM2, mais esbelta, reflecte maior influência do calor proveniente da cura térmica do que a secção mais espessa SECM1, atingindo mais rapidamente a temperatura de pico, que é praticamente igual à da SECM1,



mesmo apresentando menor massa de betão. Em virtude deste efeito a variação de temperaturas de pico no betão, com e sem cura térmica, é também mais pronunciada na secção SECM2, onde atinge 50°C, enquanto que na secção SECM1 a variação é de apenas 17.5°C.

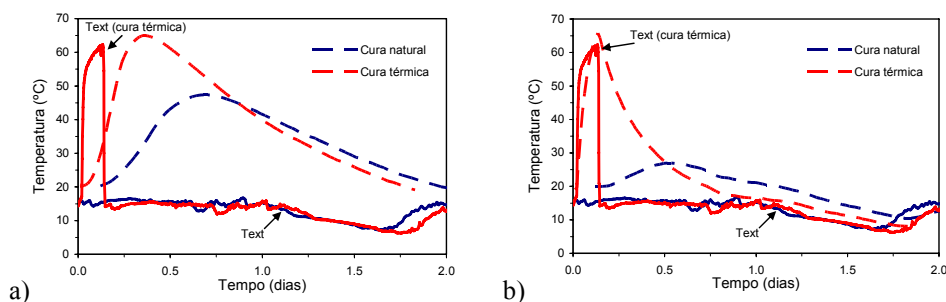


Figura 13. Temperaturas no interior da viga: a) CM2 da SECM1 e b) CM5 da SECM2.

Apresentam-se na Fig. 14 as extensões totais  $\epsilon_z$  no betão, para os dois casos de cura e pontos já referidos a propósito da Fig. 13. Em correspondência com o que foi observado em termos de temperaturas, com cura térmica a viga apresenta  $\epsilon_z$  máximas superiores às que se registam com cura natural, e em idades mais precoces. Além disso, com cura térmica a aplicação do pré-esforço ocorre sensivelmente a meio da fase de arrefecimento, enquanto que na viga instrumentada, que foi objecto de uma cura natural, aquela operação ocorreu na fase final daquele período.

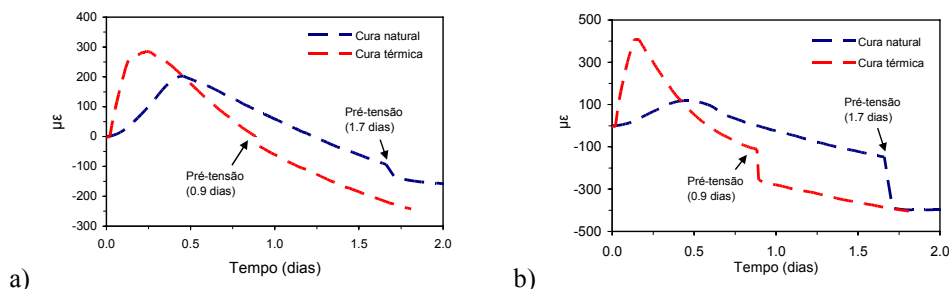


Figura 14. Extensões totais  $\epsilon_z$ : a) CM2 da SECM1 e b) CM5 da SECM2.

No que diz respeito às tensões longitudinais instaladas e ao risco de fissuração do betão, na idade de 0.4 dias (ou seja, antes da aplicação do pré-esforço) observam-se importantes valores de  $\sigma_z$  de tracção (Fig. 15a) e de IF (Fig. 15b) no banzo superior, em consequência dos gradientes térmicos da peça, tanto nas zonas de secção maciça como de secção aligeirada. Esta constatação denuncia uma elevada propensão para a ocorrência de fissuração no betão do banzo superior aquando da pré-tensão, uma vez que esta operação também induz tensões de tracção neste banzo, o que aliás é coerente com a fissuração observada na viga com cura térmica (rever a Fig. 7c), que se revelou mais pronunciada do que na viga curada naturalmente (Fig. 7b).

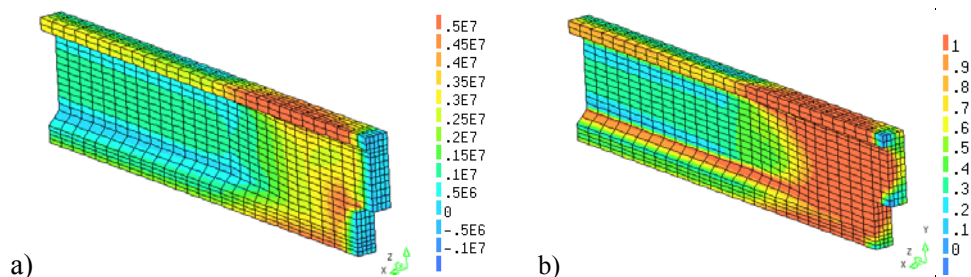


Figura 15. Viga com cura térmica aos 0.4 dias de idade: a)  $\sigma_z$  (Pa) e b) IF.

## **5. CONCLUSÃO**

No âmbito deste trabalho procedeu-se à instrumentação de uma viga de betão pré-fabricada e pré-esforçada, curada em ambiente natural, de forma a medir temperaturas e extensões totais desde os primeiros instantes da betonagem até aos 3 dias de idade. A par dos trabalhos de monitorização realizou-se uma modelação numérica termo-mecânica da viga. Os resultados numéricos em termos de temperaturas e de extensões totais no betão foram comparados com os obtidos na campanha de monitorização, tendo sido observada uma boa coerência entre ambos. Após validação do modelo numérico procedeu-se à avaliação das tensões no betão, tendo-se constatado ser diminuto o risco de fissuração de origem térmica. No entanto, conclui-se existir uma elevada propensão para a fissuração do betão no banzo superior da secção aligeirada da viga, em consequência da aplicação do pré-esforço. Uma vez que a prática comum de fabrico destes elementos estruturais envolve o emprego de cura térmica de vapor, realizou-se ainda uma análise numérica para avaliar a influência desta prática no risco de fissuração da viga. Assim, e por comparação com o observado na viga em que se empregou uma cura natural, a análise numérica com cura térmica evidenciou um agravamento do risco de fissuração do banzo superior da viga, em consequência do aquecimento e arrefecimento repentinos impostos na fase de hidratação do cimento. Salienta-se, assim, a importância da utilização de regimes de cura térmica adequados, para evitar a ocorrência de gradientes de temperatura elevados no interior das peças de betão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradece-se o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do Projecto de Investigação POCI/ECM/56458/2004, cujo financiamento permitiu a atribuição de um bolsa de investigação ao primeiro autor. Agradece-se ainda à FCT o apoio concedido ao segundo autor, sobre a forma de Bolsa Individual de Doutoramento SFRH/BD/13137/2003.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] KOVLER, K.; et al. - Early age concrete - Properties and performance. *Cem. and Concr. Comp.*, 2004. 26: p. 413-415.
- [2] REINHARDT, H.W.; BLAAUWENDRAAD, J.; JONGEDIJK, J. - Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties. in *Int. Conf. Concrete at Early Ages*. 1982. Paris, France.
- [3] FERREIRA, D.; FARIA, R.; AZENHA, M. - Ensaio experimental de avaliação das potencialidades dos sensores para medição de temperaturas e deformações nas primeiras idades do betão. Relatório FCT - Projecto POCI/ECM/56458/2004, 2008. LABEST/FEUP.
- [4] CARINO, N. and H. LEW - The maturity method: from theory to application. in *2001 Structures Congress & Exposition*. 2001. Washington DC: ASCE.
- [5] CEN. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part I: General Rules and Rules for Buildings, Brussels, 2004.
- [6] BAZANT, Z.P. - Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete. 1988, Chichester: John Wiley & Sons, Inc. xxii, 459 s.
- [7] FARIA, R.; AZENHA, M.; FIGUEIRAS, J.A. - Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites*, 2006. 28(6): p. 572-585.
- [8] JONASSON, J.-E. - Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete. 1994, Lulea University of Technology: Lulea.