

# MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES: VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS NUMÉRICOS

Denise Ferreira<sup>1</sup>, Miguel Azenha<sup>2</sup>, Rui Faria<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bolseira de Investigação, <sup>2</sup>Assistente, <sup>3</sup>Prof. Associado com Agregação  
Departamento de Engenharia Civil, FEUP



## RESUMO

*Nas primeiras idades o betão experimenta deformações térmicas, devidas ao facto de a reacção de hidratação do cimento libertar calor. Se restringidas estas deformações podem originar fissuras, pelo que é importante o recurso a modelos numéricos para a respectiva previsão, devendo estes ser validados através da monitorização do comportamento do betão nos primeiros dias de idade. Neste trabalho é apresentado um ensaio experimental realizado com dois objectivos: (i) avaliação do desempenho de diferentes extensómetros, com vista a determinar os mais adequados para as primeiras idades do betão; (ii) validação do modelo numérico com base na monitorização de temperaturas e extensões no betão.*

## 1 - INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de estruturas de betão nas primeiras idades é um tema muito actual, devido não só à crescente utilização de betões de alto desempenho, mas também à possibilidade de este material fissurar precocemente, em resultado das deformações volumétricas induzidas pelo calor libertado durante a reacção de hidratação do cimento. Envolve, no entanto, consideráveis complexidades, inerentes à determinação das fases de aquecimento e arrefecimento em diferentes pontos, e ao facto de nas primeiras idades as propriedades térmicas e mecânicas do betão estarem em constante alteração (Reinhardt *et al.*, 1982).

Desta forma é importante dispor de ferramentas de modelação numérica que

permitam prever o desenvolvimento das temperaturas e deformações no betão nas primeiras idades (tipicamente nos primeiros 3 dias), com vista a antecipar, e se possível evitar, a fissuração precoce de origem térmica. A metodologia termo-mecânica utilizada no presente artigo, que se apoia no Método dos Elementos Finitos (MEF), realiza primeiramente uma análise térmica, seguindo-se-lhe uma análise mecânica. A análise térmica assimila a geração de calor decorrente da hidratação do cimento a uma fonte interna, e considera os fluxos energéticos por convecção e radiação entre o betão e o meio ambiente. Na análise mecânica tem-se em consideração a contínua evolução da maturidade e das propriedades mecânicas do betão, bem como a geração de deformações por fluência neste material.

Por outro lado é necessário recorrer a ensaios experimentais e à monitorização, a fim de calibrar adequadamente o referido modelo numérico. O facto de o material se encontrar num estágio evolutivo levanta, porém, dificuldades à respectiva caracterização experimental, pelo que a monitorização do betão nas primeiras idades é um assunto ainda pouco explorado.

Pelos motivos expostos neste trabalho será apresentado um ensaio experimental de uma peça de betão, realizado com dois objectivos:

- O primeiro diz respeito à comparação do desempenho de diferentes sensores, de forma a determinar os mais adequados para as primeiras idades do betão. Segundo a experiência dos autores do presente artigo as principais dificuldades surgem na medição das extensões, sendo que a medição das temperaturas é, em geral, bem sucedida (Azenha *et al.*, 2004, Faria *et al.*, 2006). A inadequação da generalidade dos extensómetros a este estágio de desenvolvimento do betão, em que são experimentados elevados gradientes de rigidez e temperatura, aliada às dificuldades de caracterização do material em formação, são algumas das razões do insucesso na monitorização de extensões durante a fase de hidratação do cimento. De entre as principais dúvidas que subsistem destacam-se: (i) o instante de aderência do extensómetro ao betão e (ii) a sensibilidade daquele à temperatura, antes e depois da solidarização.
- O segundo objectivo relaciona-se com a validação do modelo numérico termo-mecânico utilizado para previsão do comportamento do betão nas primeiras idades, recorrendo para o efeito às temperaturas e extensões medidas em vários pontos da peça durante a hidratação do cimento.

Assim, decidiu-se levar a cabo o ensaio experimental de uma peça de betão com uma geometria de fácil modelação numérica, de dimensões comportáveis com o trabalho laboratorial, e ao mesmo tempo com uma geração de calor suficientemente elevada para originar diferenciais de

temperatura e de extensões mensuráveis. As deformações do betão que se pretenderam medir na monitorização foram as extensões totais, isto é, as correspondentes à efectiva variação da distância entre dois pontos (soma das deformações térmica e mecânica).

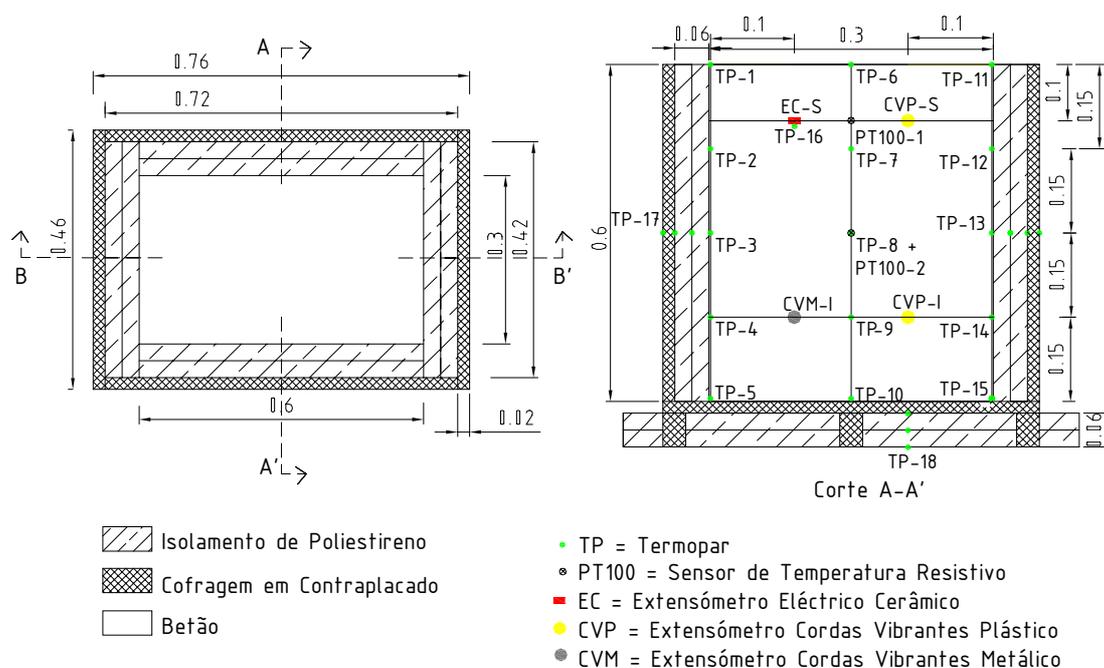
## 2 - ENSAIO EXPERIMENTAL

### 2.1 – Descrição

Para melhor definir as características do ensaio experimental a realizar, previamente foi efectuada uma análise numérica da peça de betão, a fim de confirmar que os gradientes de temperatura e de deformação pretendidos eram alcançáveis. Na figura 1 pode observar-se a geometria da peça ensaiada em laboratório, cujas dimensões são  $0.60 \times 0.30 \times 0.60 \text{m}^3$ . Nas faces verticais da peça foram colocados isolamentos de poliestireno com 6cm de espessura, e exteriormente uma cofragem de contraplacado marítimo com 2.1cm de espessura; na base optou-se por colocar o contraplacado em contacto com o betão, e exteriormente o isolamento, para evitar a danificação deste último (de baixa resistência mecânica) pela actuação do peso próprio do betão.

Na composição do betão foram utilizados os seguintes materiais:  $1134 \text{kg/m}^3$  de brita calcária,  $263 \text{kg/m}^3$  de areia de agregado reciclado,  $264 \text{kg/m}^3$  de areia natural,  $400 \text{kg/m}^3$  de cimento tipo I 42.5R e  $200 \text{kg/m}^3$  de água.

Sensores de diferentes tipos foram localizados em posições sujeitas a iguais diferenciais de temperatura e de deformação, a fim de se poder comparar o respectivo desempenho e aptidão. Quanto aos sensores de temperatura, foram utilizados dois tipos: (i) termopares tipo K (TP), de muito fácil utilização e baixo custo, cuja precisão é de  $\pm 2.2^\circ\text{C}$ ; (ii) sensores de temperatura resistivos (PT100), encapsulados com material altamente condutor (cobre) e de muito maior precisão ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). Relativamente à medição de deformações foram utilizados extensómetros eléctricos de revestimento



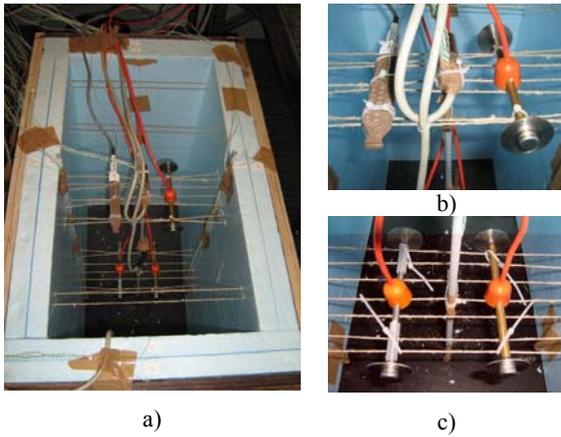
**Fig. 1** - Esquema do ensaio: corte vertical da peça (dimensões  $0.60 \times 0.30 \times 0.60 \text{m}^3$ ) e localização dos sensores

cerâmico (EC), e dois tipos de extensómetros de cordas vibrantes com rigidezes diferentes: um mais rígido de invólucro metálico (CVM), e outro mais flexível de revestimento plástico (CVP). Este último (CVP) é um sensor especialmente desenvolvido para a medição de deformações nas primeiras idades, pois sendo de menor rigidez adere e acompanha o comportamento do betão mais precocemente do que o CVM. Os sensores de cordas vibrantes têm incorporado um sensor de temperatura do tipo resistivo, o que lhes permite também monitorizar temperaturas. Todos os extensómetros utilizados são de uso interno, isto é, de embeber no betão.

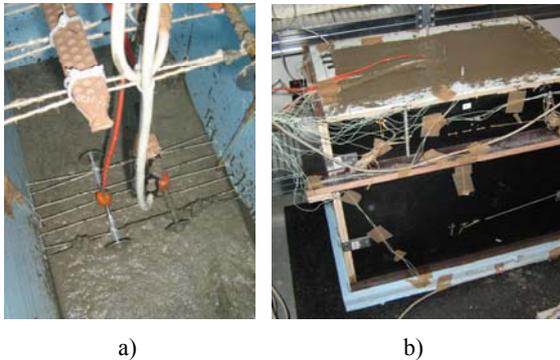
Na figura 1 pode observar-se a localização esquemática dos sensores instalados. Os sensores de temperatura foram dispostos em todas as faces verticais e na base, assim como nas interfaces dos isolamentos, de forma a validar as condições de fronteira térmicas do modelo numérico; no interior da peça foram colocados, a várias alturas, 16 termopares TP e dois PT100. Os extensómetros foram colocados em dois níveis: (i) um inferior, numa zona em que são atingidas temperaturas e extensões mais elevadas (devido à maior proximidade do isolamento); (ii) outro superior, onde as

temperaturas e deformações são menores (por estar mais próximo da superfície). Em cada nível os sensores foram colocados em posições simétricas relativamente ao alinhamento B-B', de modo a ficarem sujeitos a temperaturas e extensões aproximadamente iguais.

O dispositivo experimental é também observável na figura 2. No nível superior, a 10cm da superfície, foram colocados um extensómetro eléctrico cerâmico EC e um de cordas vibrantes plástico CVP (figura 2b). No nível inferior, a 15cm da base, foram colocados dois extensómetros de cordas vibrantes: um CVM e um CVP (figura 2c). Os extensómetros foram fixados a malhas horizontais de um vulgar fio têxtil, enquanto que os termopares foram posicionados ao longo de tubos de plástico verticais de 1cm de diâmetro; deste modo foi garantida a estabilidade dos sensores durante a betonagem, garantindo-se em simultâneo pequena intrusão nas medições de deformações e temperaturas. A betonagem e o ensaio decorreram no interior de uma câmara climática, com uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de 50%, ambas constantes. Na figura 3 ilustra-se a betonagem da peça, tendo a aquisição de dados sido iniciada após a finalização daquela.

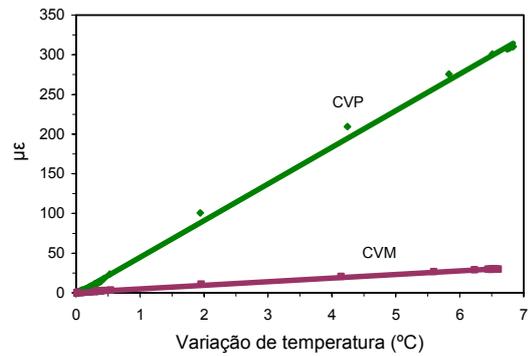


**Fig. 2** - a) Isolamentos e sensores; b) Extensómetros no nível superior: EC (esq.) e CVP (dir.); c) Extensómetros no nível inferior: CVM e CVP



**Fig. 3** - a) Betonagem; b) Início da aquisição de dados

Em paralelo com este ensaio procedeu-se igualmente a uma comparação das respostas dos dois tipos de sensores de cordas vibrantes quando sujeitos a variações de temperatura em regime livre (isto é, não embebidos no betão). Assim, os sensores foram colocados no interior de uma câmara climática em que foi induzida uma variação de temperatura, tendo sido monitorizadas as respostas reproduzidas na figura 4. Como se pode observar, o extensómetro CVP tem mais sensibilidade à temperatura do que o CVM. No entanto, quando estes dois tipos de sensores estiverem embebidos e perfeitamente aderentes ao betão, e numa mesma localização, a variação de temperatura deverá determinar respostas iguais em ambos, uma vez que as extensões totais virão então determinadas pela deformação térmica do betão. À deformação medida pelo sensor terá, contudo, de ser retirada a parcela correspondente à deformação térmica da corda vibrante, a qual segundo o fabricante é de  $11\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ .



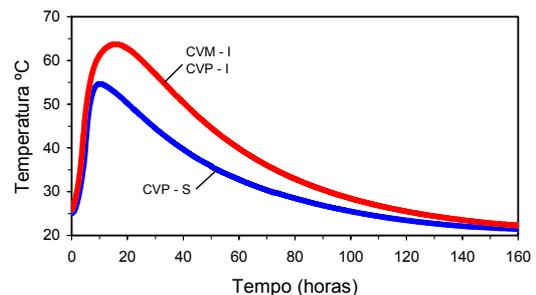
**Fig. 4** - Resposta livre de dois tipos de sensores de cordas vibrantes em função da temperatura

No que diz respeito aos extensómetros EC, e uma vez que estes fornecem directamente a deformação mecânica – são ditos ‘auto compensados em relação à extensão térmica do betão’ –, para se obter a extensão total do betão é necessário adicionar à medição a deformação térmica do sensor, que segundo o fabricante é de  $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ .

## 2.2 – Interpretação dos resultados dos sensores

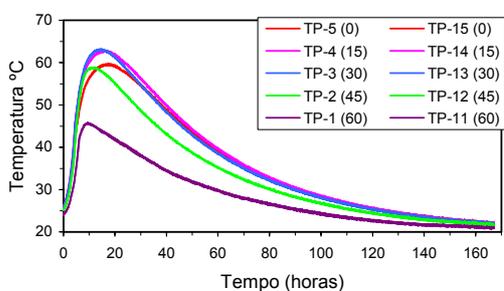
### Temperaturas

As temperaturas medidas na peça de betão pelos sensores de cordas vibrantes encontram-se representadas na figura 5. Verifica-se que os sensores colocados no nível inferior registam temperaturas mais elevadas do que os do nível superior, pois correspondem a localizações termicamente mais isoladas: a temperatura máxima no nível inferior é de  $64^\circ\text{C}$  (às 17h) e no nível superior de  $55^\circ\text{C}$  (às 11h). É também de realçar a perfeita coincidência dos registos de temperaturas obtidos nos dois sensores do nível inferior, posicionados simetricamente em relação ao plano B-B' da figura 1.



**Fig. 5** - Temperaturas medidas nos sensores de cordas vibrantes

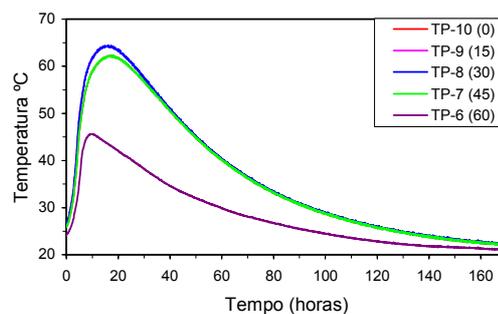
Na figura 6 procede-se à representação dos registos de temperaturas obtidos nos termopares TP ao longo dos alinhamentos laterais, enquanto que na figura 7 é feita idêntica representação para o alinhamento central (ver também figura 1). É visível a influência do isolamento térmico colocado nas paredes laterais e no fundo da peça, promovendo temperaturas mais elevadas no núcleo até bastante próximo da base. Como seria de esperar, as zonas próximas da superfície superior, não isolada, atingiram temperaturas inferiores. A visualização destas distribuições de temperaturas também pode ser efectuada na figura 8, que reproduz os perfis de temperaturas lateral e central medidos nos termopares às 16h.



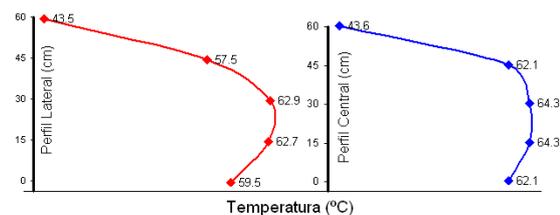
**Fig. 6** - Temperaturas nos termopares laterais ao longo da altura (entre parêntesis indica-se a distância à base, em cm)

Nas figuras 6 e 7 constata-se ainda que o período de aquecimento se inicia logo depois da colocação do betão, durando cerca de 20h. Segue-se-lhe um período de arrefecimento, sendo que ao fim de 160h a peça já está em equilíbrio térmico com o ambiente da câmara climática. É de salientar a perfeita coerência de temperaturas medidas através dos TP instalados ao longo da altura, nas duas fronteiras laterais (figura 6).

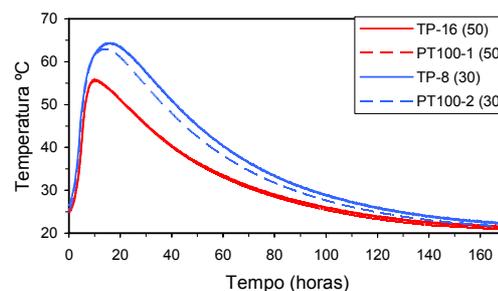
Outro aspecto merecedor de realce é o facto de nos locais onde se colocaram simultaneamente sensores TP e PT100 os respectivos registos de temperaturas apresentarem uma elevada coerência (figura 9), garantindo confiança nas leituras efectuadas pelos TP, apesar de estes serem de menor precisão e muito mais baixo custo do que os PT100.



**Fig. 7** – Temperaturas nos termopares centrais ao longo da altura



**Fig. 8** – Perfis de temperaturas às 16h medidos nos TP ao longo da altura, nas zonas lateral e central



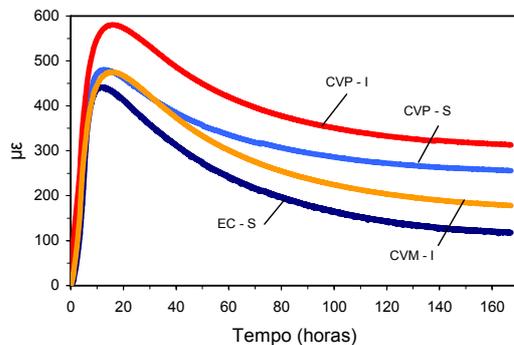
**Fig. 9** – Comparação das temperaturas medidas nos termopares TP e nos PT100

### Extensões totais

No que concerne às deformações, na figura 10 representam-se as extensões totais medidas nos vários sensores embebidos na peça: (i) no nível inferior, nos extensómetros de cordas vibrantes metálico (CVM-I) e plástico (CVP-I); (ii) no nível superior, num extensómetro de cordas vibrantes plástico (CVP-S) e num eléctrico de revestimento cerâmico (EC-S). Uma vez que as zonas que atingem temperaturas mais elevadas têm tendência para maiores expansões, eram de esperar deformações totais mais elevadas no nível inferior do que no nível superior, o que a figura 10 confirma.

No nível inferior os sensores registaram distintos valores máximos de extensões (ver figura 10), o que se deve às seguintes razões: (i) a rigidez do CVP-I é bastante

inferior à do CVM-I, pelo que a entrada em funcionamento daquele (por perfeita aderência ao betão) ocorre antes deste; (ii) antes da aderência ao betão o sensor CVP-I apresenta uma sensibilidade à temperatura mais elevada do que o CVM-I (rever figura 4), registando, portanto, deformações térmicas mais elevadas na fase de aquecimento. No entanto, na fase de arrefecimento do betão, isto é, após as 20h de idade, ambos os extensómetros apresentam tendências de evolução idênticas. Observa-se, assim, que os dois tipos de sensores de cordas vibrantes são adequados para medição de extensões na fase de arrefecimento do betão, estágio em que este material, apresentando já uma razoável rigidez, garante aderência perfeita a qualquer dos sensores.



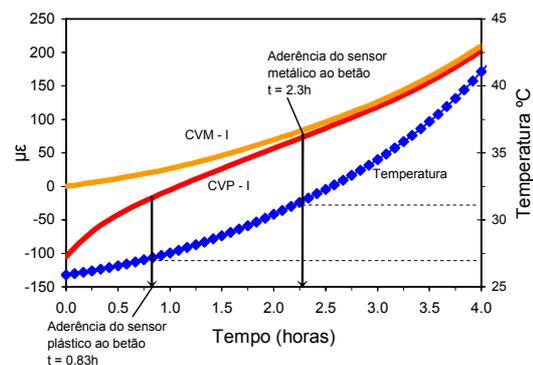
**Fig. 10** - Extensões totais medidas na peça de betão

Quanto às extensões no nível superior (ver figura 10), as tendências de evolução registadas pelos sensores EC-S e CVP-S no regime pós-pico são algo diferentes, o que assinala alguma falta de vocação dos extensómetros eléctricos para a monitorização de deformações nas primeiras idades do betão. Isto deve-se ao facto de os sensores EC-S realizarem compensações automáticas das deformações de origem térmica, baseando-se para tal no coeficiente de dilatação térmica do betão endurecido, o que não é adequado durante a fase de hidratação do cimento, em que há evolução desta propriedade.

A problemática da solidarização dos extensómetros ao betão é, como já referido, fulcral no contexto da medição das deformações nas primeiras idades, sendo dependente da relação entre a rigidez do

sensor e a do betão ao qual está ligado. Naturalmente o sensor será capaz de reproduzir as deformações do betão quando a rigidez deste for suficientemente elevada para ambos se poderem considerar perfeitamente solidarizados. Tendo em conta que o sensor de cordas vibrantes plástico adere ao betão antes do metálico, poder-se-á definir o instante em que o sensor metálico se solidariza ao betão como aproximadamente aquele a partir do qual as respostas dos dois tipos de sensores passam a exibir tendências de evolução similares, como ilustrado na figura 10.

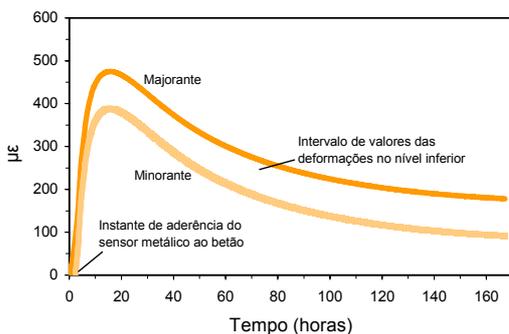
Na figura 11 apresenta-se um detalhe, até às 4h de idade, das deformações medidas pelos extensómetros de cordas vibrantes CVP-I e CVM-I, sendo que o gráfico referente ao sensor plástico foi deslocado verticalmente até o respectivo pico coincidir com o relativo ao sensor metálico. Representa-se igualmente a curva de evolução da temperatura no ponto em questão. Quanto ao sensor plástico é notória uma mudança da tendência de evolução da curva de extensões cerca das 0.8h após a betonagem, sendo razoável considerar este o instante de aderência do sensor ao betão. É também visível que aproximadamente às 2.3h os dois sensores registam extensões semelhantes, o que significa que este é o instante em que ocorreu a aderência do sensor metálico ao betão. No respeitante às variações de temperatura ( $\Delta T$ ) medidas pelos sensores entre a betonagem e o início da aderência, verifica-se que: (i) o sensor plástico esteve sujeito a  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ , a que corresponde uma deformação térmica livre da corda vibrante de cerca de  $66\mu\text{e}$ ; (ii) no sensor metálico  $\Delta T=5.7^{\circ}\text{C}$ , a que está



**Fig. 11** - Instante de aderência dos sensores de cordas vibrantes plástico e metálico

associada uma deformação térmica livre de  $27\mu\epsilon$ . Estes valores da sensibilidade à temperatura são meramente indicativos das diferenças entre os dois tipos de sensores de cordas vibrantes, uma vez que na fase de aderência parcial ao betão os extensómetros não estão totalmente livres de se deformarem termicamente.

Uma vez determinado o instante de aderência ao betão do sensor de cordas vibrantes metálico, é possível corrigir o correspondente registo de extensões, deslocando-o verticalmente de forma a anular as deformações anteriores à solidarização (ver figura 12). O registo original pode assim ser considerado um majorante das extensões totais, sendo o gráfico corrigido o correspondente minorante. As reais extensões totais estarão no intervalo destas envolventes, pois o majorante sobrestima a deformação devido ao erro decorrente da sensibilidade do sensor à temperatura antes da perfeita solidarização, e o minorante não contempla as deformações do betão que ocorrem durante a fase de aderência parcial. Dada a menor sensibilidade à temperatura na fase prévia à aderência total, o sensor de cordas vibrantes metálico é mais adequado para medição das deformações nas primeiras idades do betão, mesmo aderindo mais tarde do que o plástico. Este último é, contudo, essencial para definição do instante de aderência do sensor de cordas vibrantes metálico.



**Fig. 12** – Respostas do sensor CVM-I: majorante (gráfico original) versus minorante (após subtracção do sinal até ao instante de aderência ao betão)

### 3 - MODELO TERMO-MECÂNICO

A equação de difusão de calor de um betão nas primeiras idades pode ser

expressa na seguinte forma, baseada na lei de Fourier,

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

em que  $k$  designa a condutibilidade térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $T$  a temperatura (K),  $Q$  o calor interno por unidade de volume devido à hidratação do cimento ( $\text{Jm}^{-3}$ ) e  $\rho c$  o calor específico volumétrico ( $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ). A taxa de geração interna de calor é geralmente traduzida por uma expressão que deriva de uma lei de Arrhenius

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

em que  $a$  é uma constante ( $\text{s}^{-1}$ ),  $f(\alpha)$  é uma função que descreve a evolução da geração de calor normalizado,  $\alpha$  é o grau de hidratação (evolui desde 0 no início da reacção de hidratação até próximo de 1 no final),  $E_a$  é a energia de activação aparente da reacção de hidratação ( $\text{Jmol}^{-1}$ ) e  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos ( $8.314\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Quanto ao problema mecânico, a evolução das propriedades do betão em resultado da hidratação pode ser quantificada de acordo com o Método da Maturidade (Carino e Lew, 2001), directamente relacionado com o conceito de Idade Equivalente, o qual permite converter a idade real  $t$  do betão numa idade equivalente  $t_{eq}$  (ambas em dias):

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

Se as temperaturas  $T(\tau)$  durante a hidratação forem superiores à temperatura de referência  $T_{ref}$  (normalmente  $20^\circ\text{C}$ ) sucederá que  $t_{eq} > t$ , o que expressa o efeito acelerador da temperatura de cura no desenvolvimento das propriedades mecânicas do betão. Para traduzir a evolução do módulo de elasticidade do betão  $E_{cm}$  durante a hidratação foi adoptada a expressão do Eurocódigo 2 (CEN, 2004)

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

em que  $E_{cm}(28)$  é o módulo de elasticidade médio do betão aos 28 dias de idade e  $s$  é um parâmetro que depende do tipo de cimento, caracterizando a rapidez com que

este se combina com a água e ganha presa. O coeficiente de dilatação térmica  $\alpha_T$  e o coeficiente de Poisson  $\nu$  do betão foram considerados constantes.

Para simulação do comportamento viscoelástico do betão nas primeiras idades foi adoptada a Lei da Dupla Potência (Bazant, 1988), 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.

O modelo sucintamente descrito está implementado num código computacional baseado no MEF (para mais detalhes consultar Faria *et al.*, 2006), permitindo determinar as temperaturas e extensões que se instalam no betão durante as primeiras idades, como se ilustrará na aplicação que se segue à peça de betão ensaiada.

## 4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO

### 4.1 – Aspectos gerais

A peça de betão ensaiada em laboratório foi discretizada em elementos finitos (EF) 3D, de acordo com a malha representada na figura 13, na qual estão assinaladas a dupla simetria considerada e as condições fronteira do modelo térmico. No que concerne à geometria do modelo foram tomadas as seguintes opções:

- A peça de betão e o isolamento em poliestireno foram explicitamente discretizados em EF, e modelados de acordo com as correspondentes propriedades térmicas e mecânicas;
- A cofragem de contraplacado foi reproduzida de duas formas distintas: (i) nas paredes laterais foi implicitamente considerada no coeficiente de convecção-radiação  $h_{eq}$  que reproduz os fluxos de calor em direcção ao ambiente (Faria *et al.*, 2006); (ii) na base, uma vez

que está interposta entre o betão e o isolamento, foi discretizada em EF e modelada com as correspondentes propriedades térmicas.

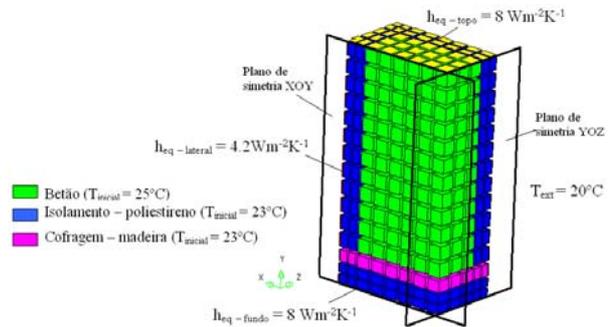


Fig. 13 - Peça ensaiada: malha, simetrias e fronteiras térmicas

Para as condições fronteira do modelo mecânico foram consideradas as seguintes restrições de deslocamentos (ver figura 13): (i) ao longo da direcção X no plano de simetria YOZ; (ii) ao longo da direcção Z no plano de simetria XOY; e (iii) ao longo da direcção Y no plano da base da peça. Uma vez que não existe aderência mecânica relevante entre o betão e os restantes materiais, as propriedades mecânicas do poliestireno e da madeira foram consideradas praticamente nulas.

Relativamente à modelação térmica da peça ensaiada, no Quadro 1 apresentam-se as propriedades térmicas consideradas para cada material. A lei de Arrhenius expressa na equação (2) foi determinada a partir de calorimetria isotérmica (Silva *et al.*, 2006a), sendo caracterizada pela função  $f(\alpha)$  representada na figura 14, e por  $E_a = 44.71 \text{ kJmol}^{-1}$  e  $a = 3.0166 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Quadro 1 – Propriedades térmicas dos materiais

	$k$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$\rho c$ ( $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ )
Betão	2.6	$2.4 \times 10^6$
Poliestireno	0.035	$2.84 \times 10^4$
Madeira	0.150	$8.544 \times 10^5$

Para a caracterização mecânica do betão foram realizados ensaios à compressão às idades de 1 e 3 dias, que permitiram determinar a evolução de  $E_{cm}$  e obter os parâmetros da lei de fluência. Na definição

do módulo de elasticidade do betão através da equação (4) foram considerados  $E_{cm}(28) = 39\text{GPa}$  e  $\nu = 0.2$ ; para a função de fluência (equação (5)) tomou-se  $\phi_1 = 0.6$ ,  $m = 0.15$  e  $n = 0.20$ , tendo-se adoptado para  $E_0$  valores 30% superiores ao módulo de elasticidade estático em cada idade de carregamento. O coeficiente de dilatação térmica do betão foi considerado com o valor  $\alpha_T = 8 \times 10^{-6}$ , correspondente a uma ponderação volumétrica dos coeficientes de dilatação térmica dos respectivos componentes (FIB, 1999, Khan *et al.*, 1998); para o coeficiente de Poisson adoptou-se  $\nu = 0.20$ .

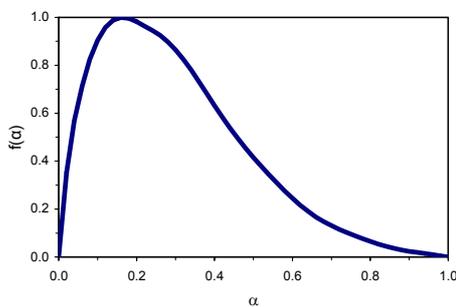


Fig. 14 – Função  $f(\alpha)$  para o betão da peça ensaiada

Na análise térmica a malha da figura 13 correspondeu a EF de 8 nós, enquanto que para a análise mecânica foram utilizados EF de 20 nós (os dois tipos de EF têm nós de canto coincidentes). A análise termo-mecânica foi realizada de forma incremental até à idade de 7 dias, adoptando um passo de tempo de 0.25h.

#### 4.1 – Temperaturas

As temperaturas resultantes da análise térmica vão ser comparadas com as correspondentes medições efectuadas no ensaio experimental descrito no capítulo 2. De forma a visualizar as temperaturas no interior da peça de betão, na figura 15 apresenta-se a correspondente distribuição para o instante de temperatura máxima (15.8h): de acordo com o que era esperado, e tal como registado pelos sensores (rever figuras 6, 7 e 8), observam-se temperaturas mais elevadas no núcleo do betão e na base da peça, devido ao efeito de isolamento, apresentando-se mais fria a superfície

superior do betão, em contacto com o ar ambiente.

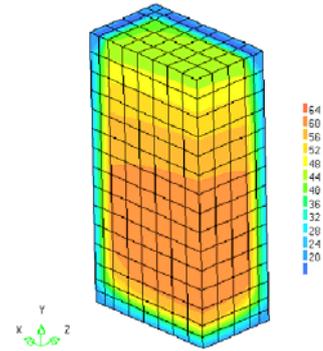


Fig. 15 – Temperaturas na idade de 15.8h

No que diz respeito às temperaturas nas posições em que foram dispostos extensómetros, na figura 16 pode observar-se a comparação dos registos experimentais com os obtidos na análise térmica. Como se pode verificar existe uma elevada coerência entre ambos os tipos de registos, para o que contribuiu o facto de se tratar de uma zona interna da peça, onde a influência das condições fronteira térmicas é minimizada.

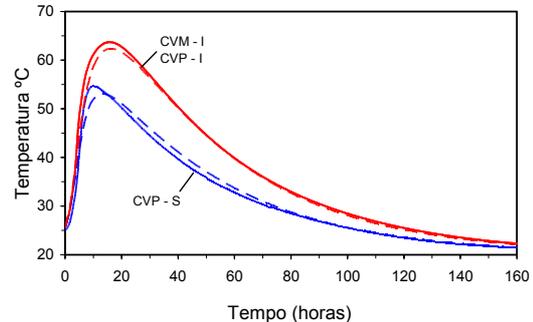
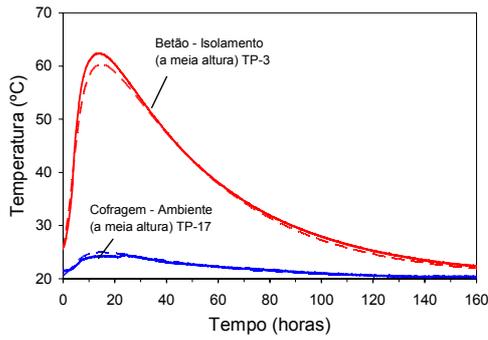
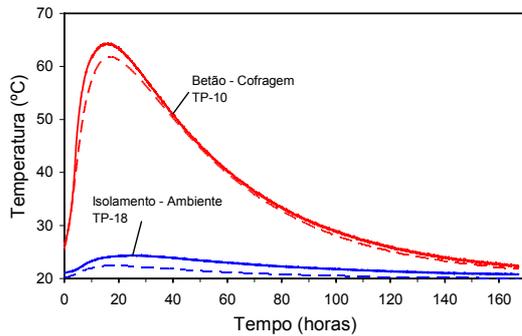


Fig. 16 – Temperaturas nas posições dos extensómetros: resultados experimentais (cheio) e numéricos (tracejado)

A fim de verificar a adequabilidade das condições fronteira assumidas na modelação térmica, apresentam-se igualmente os registos de temperaturas numéricos e experimentais relativos às interfaces das paredes verticais (figura 17) e da base (figura 18). Em ambas as figuras é de assinalar a muito boa correspondência entre os resultados experimentais e numéricos, o que evidencia o realismo das hipóteses assumidas na simulação.



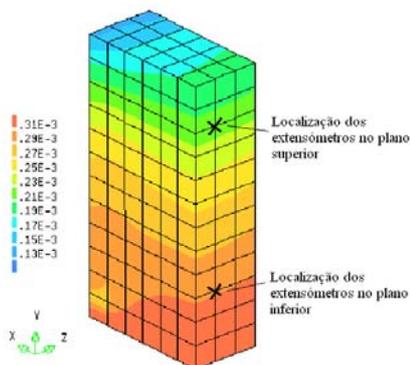
**Fig. 17** – Temperaturas nas fronteiras das paredes verticais: resultados experimentais (cheio) e numéricos (tracejado)



**Fig. 18** – Temperaturas nas fronteiras da base: resultados experimentais (cheio) e numéricos (tracejado)

#### 4.2 – Extensões totais

No que diz respeito ao problema mecânico, e similarmente à estratégia adoptada para o problema térmico, as extensões totais previstas na simulação numérica vão ser comparadas com as medidas experimentalmente nos sensores. Na figura 19 apresenta-se a distribuição de extensões totais no betão segundo a direcção X, obtidas numericamente para o

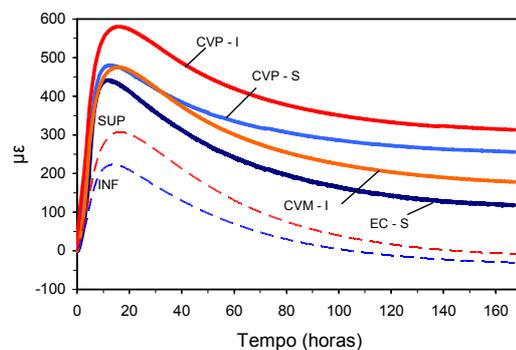


**Fig. 19** – Extensões totais (direcção X) na idade de 15.8h

instante de temperatura máxima (15.8h). É interessante constatar o gradiente de deformações que se instala nas zonas inferior e superior da peça, em correspondência com os dois planos de localização dos extensómetros, que já tinha sido identificado e assinalado na interpretação dos resultados experimentais apresentada no subcapítulo 2.2.

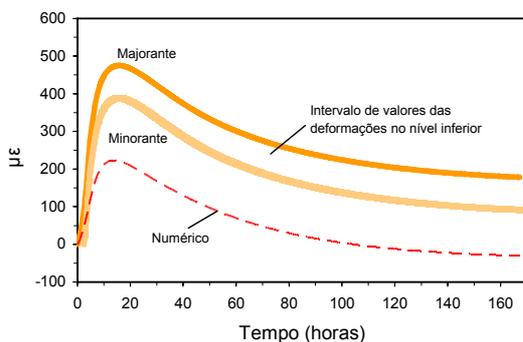
Na figura 20 podem observar-se as evoluções das extensões totais medidas experimentalmente e as obtidas através do modelo numérico, para os níveis superior e inferior de colocação dos extensómetros. Uma vez que a modelação térmica já foi validada, as discrepâncias que se observam nos valores de pico das extensões numéricas em relação às experimentais devem-se exclusivamente a deficiências da modelação mecânica. No entanto, e como já referido, os registos obtidos directamente das medições dos sensores de cordas vibrantes são majorantes das reais extensões totais, uma vez que apresentam sensibilidade à temperatura na fase prévia à solidarização ao betão. Efectuando a correcção vertical dos registos dos sensores de cordas vibrantes do nível inferior, descrita a propósito das figuras 11 e 12, apresenta-se na figura 21 o intervalo de valores expectável para as extensões totais, bem como o correspondente registo do modelo numérico. Observa-se que o pico da curva numérica está bastante abaixo do referido intervalo, embora a tendência de evolução da curva numérica seja bastante concordante com as dos registos experimentais.

Para melhor analisar estas tendências os

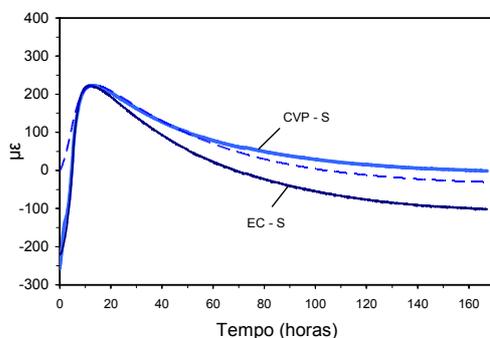


**Fig. 20** – Evolução das extensões totais: resultados experimentais (cheio) e numéricos (tracejado)

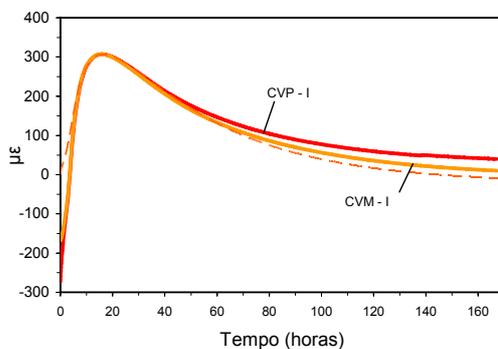
registos dos sensores de cordas vibrantes foram deslocados verticalmente, de modo a que os respectivos picos passassem a coincidir com os dos registos determinados numericamente, como se pode verificar na figura 22 para o nível superior de extensómetros, e na figura 23 para o nível inferior. Desta forma, e dentro das margens de erro consideradas aceitáveis para este tipo de problemas, pode afirmar-se que na fase pós-pico o modelo numérico fornece previsões bastante coerentes com os resultados experimentais corrigidos.



**Fig. 21** - Extensões totais nos sensores de cordas vibrantes do nível inferior

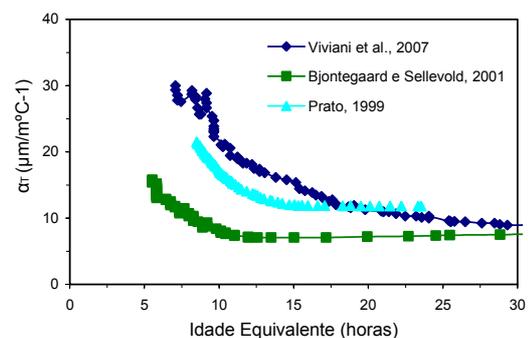


**Fig. 22** - Extensões totais no nível superior: resultados experimentais corrigidos verticalmente (cheio) e numéricos (tracejado)



**Fig. 23** - Extensões totais no nível inferior: resultados experimentais corrigidos verticalmente (cheio) e numéricos (tracejado)

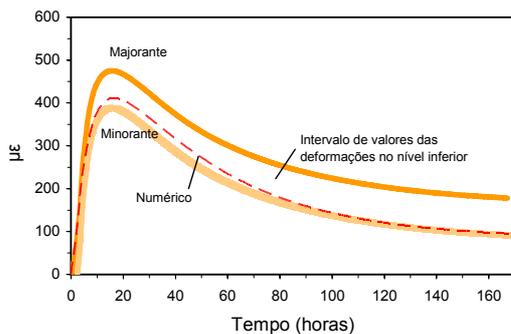
Entre as razões que poderão explicar a diferença de deformações de pico do modelo numérico relativamente às observadas nos sensores, a mais importante reside no facto de o coeficiente de dilatação térmica do betão não ser constante ao longo do processo de hidratação do cimento, como assumido na presente modelação, tratando-se de uma propriedade de determinação experimental muito complexa. Na figura 24 apresentam-se as evoluções experimentais de  $\alpha_T$  com a idade equivalente do betão, reportados em Bjontegaard e Sellevold, 2001, Prato, 1999 e Viviani *et al.*, 2007: a disparidade dos resultados é assinalável, resultante não só de diferenças nos betões ensaiados, mas sobretudo dos métodos utilizados para medição do coeficiente de dilatação térmica, que ainda não reúnem consenso no meio científico. Desta figura ressalta que nas primeiras 5h (estádio de desenvolvimento do betão em que a fase líquida tem grande relevância)  $\alpha_T$  assume valores em torno de  $20 \times 10^{-6}$  (Viviani *et al.*, 2007) ou superiores, decrescendo para menos de metade à medida que o betão vai endurecendo (relevância crescente da fase sólida).



**Fig. 24** - Evolução do coeficiente de dilatação térmica do betão durante a hidratação do cimento

A fim de avaliar a influência nas extensões totais da redução do coeficiente de dilatação térmica do betão nas primeiras horas, foi realizada uma nova análise numérica utilizando a evolução de Bjontegaard e Sellevold reproduzida na figura 24. Os resultados desta simulação numérica, em termos das extensões totais nos sensores do nível inferior da peça,

encontram-se representados na figura 25. Consta-se agora que as previsões do modelo numérico são consideravelmente mais coerentes com os registos experimentais, tanto na fase de aquecimento como na de arrefecimento, e sobretudo que os valores das extensões totais resultantes da modelação se situam agora no intervalo de valores de deformações expectável, em face das medições dos sensores de cordas vibrantes. Salienta-se, assim, a importância de a modelação numérica incluir explicitamente a redução do coeficiente de dilatação térmica do betão durante as primeiras horas de hidratação do cimento, o que requer igualmente a implementação de um ensaio adequado para caracterização experimental desta propriedade, de importância tão relevante, conforme demonstrado.



**Fig. 25** – Extensões totais no nível inferior: resultados experimentais corrigidos verticalmente (cheio) e numéricos com evolução de  $\alpha_T$  (tracejado)

## 5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho comparou-se o desempenho de diferentes extensómetros, quando sujeitos às mesmas temperaturas e deformações nas primeiras idades de uma peça de betão construída para o efeito. O sensor de cordas vibrantes plástico, de muito baixa rigidez, adere cedo ao betão mas apresenta uma elevada sensibilidade à temperatura na fase de pré-aderência, conduzindo no período de aquecimento a extensões totais mais elevadas do que as reais. Assim, para trabalhos *in situ* envolvendo monitorização de extensões nas primeiras idades do betão recomenda-se a utilização do sensor de cordas vibrantes metálico, mais robusto e apresentando

menor sensibilidade à temperatura. No entanto, o sensor de cordas vibrante plástico é importante para definição do instante de solidarização ao betão do sensor de cordas vibrantes metálico, aquele assim considerado quando os dois tipos de sensores passam a responder com tendências de evolução similares. A partir da definição daquele instante é possível obter um registo majorante das extensões totais (coincidente com o sinal medido directamente pelo sensor), bem como um minorante (a partir da subtracção ao sinal medido das deformações registadas pelo sensor de cordas vibrantes metálico até à solidarização ao betão). O extensómetro eléctrico de revestimento cerâmico (também designado ‘de embeber no betão’) revelou-se inadequado para a monitorização das extensões nas primeiras idades do betão, conduzindo a medições bastante diferentes das obtidas através dos sensores de cordas vibrantes.

Foi efectuada uma bem sucedida simulação numérica do comportamento térmico da peça de betão ensaiada em laboratório, tendo as previsões das temperaturas exibido elevada coerência com os resultados medidos pelos sensores. O modelo de análise termo-mecânica adoptado permitiu igualmente prever o desenvolvimento das extensões totais do betão nas primeiras idades. Na fase de arrefecimento deste material as previsões numéricas acompanharam bem as tendências de evolução das extensões fornecidas pelos sensores de cordas vibrantes. Contudo, na fase de aquecimento as deformações máximas registadas pelos sensores foram superiores às previstas numericamente, tendo-se verificado que esta discordância se devia sobretudo à diminuição do coeficiente de dilatação térmica que ocorre nas primeiras 5-10h de vida do betão, e que geralmente não é considerada na modelação por ser de difícil caracterização experimental.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do financiamento do Projecto de Investigação POCI/ECM/56458/2004, bem como da

Bolsa Individual de Doutoramento (SFRH/BD/13137/2003) concedida ao segundo autor.

## REFERÊNCIAS

- Azenha, M; Faria, R; Figueiras, J - *Análise térmica e mecânica de uma laje de betão instrumentada nas primeiras idades*. In: Betão Estrutural 2004, Porto, 2004.
- Bazant, Zdenek P. - *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- Bjontegaard, O; Sellevold, E - *Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete*. Materials and Structures. 2001. p.
- Carino, NJ; Lew, HS - *The maturity method: from theory to application*. In: 2001 Structures Congress & Exposition, Washington DC, 2001.
- CEN - *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1.1: General rules for buildings*. 2004.
- Faria, R; Azenha, M; Figueiras, J - *Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab*. Cem. and Concr. Comp. 28:6,2006. p. 572-585.
- FIB - *Structural Concrete - Textbook on behaviour, design and performance updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 - Volume 1*. FIB - CEB/FIP, 1999.
- Khan, A.; Cook, William D.; Mitchell, D. - *Thermal properties and transient thermal analysis of structural members during hydration*. ACI Materials Journal. 95:3,1998. p. 293-303.
- Prato, T 1999 - *Comportamiento del hormigón en edades tempranas. Modelización y aplicaciones*. Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
- Reinhardt, HW; Blaauwendraad, J; Jongedijk, J - *Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties*. In: Int. Conf. Concrete at Early Ages, Paris, France, 1982.
- Silva, L; Faria, R; Azenha, M - *Caracterização Calorimétrica de Cimentos na Fase de Hidratação. Relatório FCT - Projecto POCI/ECM/56458/2004*. LABEST - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006a.
- Silva, L; Faria, R; Azenha, M - *Caracterização mecânica do betão nas primeiras idades. Relatório FCT - Projecto POCI/ECM/56458/2004*. LABEST - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006b.
- Viviani, M; Glisic, B; Smith, I - *Separation of thermal and autogenous deformation at varying temperatures using optical fiber sensors*. Cem. and Concr. Comp. 29:2007. p. 435-447.