

# Aplicação de sistema baseado em bainhas de pré-esforço ventiladas para redução do risco de fissuração de origem térmica do betão nas primeiras idades

Miguel Azenha<sup>1</sup>   Rodrigo Lameiras<sup>2</sup>   Ângelo Costa<sup>3</sup>   Joaquim Barros<sup>4</sup>

## RESUMO

A gestão do risco de fissuração de origem térmica durante as primeiras idades do betão é frequentemente a razão para que sejam adotados critérios conservativos no que diz respeito às alturas de betonagem a adotar em estruturas de grande volume. Por outro lado, a adoção de sistemas de pré ou pós-arrefecimento do betão para diminuir os efeitos do calor de hidratação acarreta normalmente consequências práticas e económicas que dificultam a sua aplicabilidade na generalidade das estruturas que poderiam beneficiar dessas técnicas. No presente artigo são estudados os efeitos da aplicação de um sistema de pós-arrefecimento do betão, com implementação acessível, baseado em bainhas de pré-esforço ventiladas, para redução do risco de fissuração na parede central de um descarregador de cheias. Em paralelo com a aplicação do sistema de arrefecimento foi efetuada uma caracterização térmica e mecânica do betão utilizado, bem como monitorização *in-situ* das temperaturas e extensões ocorridas. Adicionalmente foi efetuada uma simulação termo-mecânica para apoiar a compreensão dos efeitos do sistema de arrefecimento. Finalmente, com base nos trabalhos efetuados, são discutidas as limitações e possibilidades de aplicação prática desta técnica de arrefecimento.

**Palavras-chave:** Calor de hidratação; Arrefecimento com ar; Monitorização; Análise termo-mecânica

## 1. INTRODUÇÃO

O faseamento construtivo de elementos estruturais que envolvem volumes significativos de betão é frequentemente condicionado por motivos relacionados com o risco de fissuração térmica. De facto, em estruturas com desenvolvimento e altura significativos, como ocorre com frequência em barragens, ou paredes espessas, a construção é efetuada por camadas de alturas relativamente reduzidas (normalmente inferiores a 1.5m), para evitar aumentos de temperatura e gradientes térmicos que possam provocar fissuração do betão durante as primeiras idades. A betonagem de camadas de reduzida altura, aliada aos tempos de espera entre betonagens consecutivas, leva ao aumento do tempo de construção, representando frequentemente o caminho crítico na execução das obras. Consequentemente, é desejável dispor de soluções que permitam o aumento da altura das camadas de betonagem, sem que por isso seja posta em causa a segurança do ponto de vista do risco de fissuração térmica. Para esse efeito, uma das técnicas disponíveis é o recurso a tubagens internas de arrefecimento embebidas no betão, refrigeradas com circulação de água arrefecida. Estes sistemas são de aplicação relativamente difícil, devido aos cuidados que são necessários adotar com as tubagens, quer durante a colocação das armaduras, quer durante a betonagem. Por outro lado, a opção por estes sistemas exige a disponibilidade de uma fonte de água e equipamentos de bombagem específicos, que

---

<sup>1</sup> ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães [miguel.azenha@civil.uminho.pt](mailto:miguel.azenha@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães [rmlameiras@civil.uminho.pt](mailto:rmlameiras@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães [angcosta.87@gmail.com](mailto:angcosta.87@gmail.com)

<sup>4</sup> ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães [barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt)

normalmente não são utilizados no âmbito da construção civil. Em alternativa a este tipo de sistemas, Hedlund e Groth [1] propuseram o conceito de arrefecimento com bainhas de pré-esforço ventiladas com ar. Este sistema tem a particularidade de usar apenas materiais (bainhas de pré-esforço) e equipamentos (ventiladores) habituais na construção civil, e com robustez compatível com operações de betonagem. No entanto, desde a proposta original há mais de 10 anos, não houve desenvolvimentos adicionais da metodologia de arrefecimento com ar. No presente trabalho é descrita a aplicação de um sistema de arrefecimento com ar aplicado à parede central de um descarregador complementar de cheias de uma barragem, com desenvolvimento horizontal dos tubos de arrefecimento (variante à proposta original de Hedlund e Groth [1]). A aplicação compreendeu monitorização de temperaturas e extensões, assim como a caracterização das propriedades do betão envolvido. Além da descrição da aplicação e monitorização efetuadas, procede-se também à análise termo-mecânica do comportamento do elemento estrutural, discutindo-se a eficácia do sistema de arrefecimento e propondo formas alternativas de utilização.

## **2. ARREFECIMENTO APÓS A BETONAGEM NA CONSTRUÇÃO EM BETÃO**

A aplicação de técnicas de arrefecimento do betão após a colocação é uma prática corrente em vários países, com exemplos de utilização que remontam aos anos 30 do século passado, existindo recomendações e normalização aplicável [2, 3]. O arrefecimento é usualmente efetuado com recurso a tubagens de reduzido diâmetro (da ordem de uma polegada), e de parede fina em aço, alumínio ou PVC, com percurso abrangente dentro da zona a betonar [4], i.e., com espaçamento entre tubagens relativamente reduzido, da ordem de 0.75m-2.0m [2]. O fluido utilizado para circulação dentro da tubagem de arrefecimento é normalmente água, com caudais de circulação da ordem dos 16 l/min, sendo a sua circulação ativada logo após as operações de betonagem. No que diz respeito ao comprimento das tubagens de arrefecimento, podem atingir valores da ordem dos 300 metros [2].

Em 1998 foi apresentado por Hedlund e Groth [1, 5] um estudo abrangente sobre a possibilidade de uso de tubagens ventiladas com ar em alternativa às metodologias clássicas baseadas em circulação de água. Dado o reduzido calor específico volumétrico do ar quando comparado com a água, para obtenção de capacidades de arrefecimento análogas é necessário o recurso a tubagens de maior diâmetro, com velocidades de circulação superior. Foram estudadas bainhas de pré-esforço com diâmetros da ordem de 90mm-125mm, e velocidades de ventilação de 2-12m/s. O sistema foi testado *in-situ* num pilar com secção transversal de 3m×4m, e tubagens de arrefecimento colocadas verticalmente e com espaçamentos entre si da ordem dos 0.8m. Apesar dos resultados reportados se terem revelado bastante promissores, desde a publicação do trabalho de Hedlund e Groth [1] em 1998, apenas mais uma aplicação de arrefecimento baseado em ventilação com ar por Ishikawa *et al.* em 2007 [6] foi encontrada na revisão bibliográfica efetuada no contexto deste trabalho. Nessa publicação são evidenciados resultados positivos ao nível do arrefecimento do betão e conseqüente redução do risco de fissuração.

## **3. CASO DE ESTUDO: PAREDE CENTRAL DE UM DESCARREGADOR DE CHEIAS**

### **3.1 Geometria, faseamento construtivo e materiais**

O caso de estudo aqui apresentado diz respeito à parede central de um descarregador de cheias, localizado no concelho de Montalegre, cujo corte longitudinal e planta estão representados na Fig. 1. O comprimento total da parede é de cerca de 27.5m e a sua largura é variável, assumindo o valor máximo de 2.8m próximo da sua extremidade montante. A altura da parede é de cerca de 15m acima da soleira do descarregador. Refira-se que entre as cotas 10.82m e 13.25m existem duas saliências, simetricamente posicionadas em relação à parede, com 3m de comprimento, ~2.5m de altura e saliência de 1.5m, correspondendo aos maciços de suporte das comportas do descarregador. A construção da parede foi efetuada por camadas de ~1.2m de altura, com exceção da 21ª fase de betonagem, que por corresponder à zona de embeimento das comportas nos maciços de suporte, foi betonada com altura total de 2.5m. Para a generalidade da parede foi utilizado betão da classe C30/37

de acordo com a EN1992-1 [7], com a seguinte composição expressa em kg por m<sup>3</sup> de betão: CEM I 42.5R – 224kg; cinzas volantes – 96kg; água – 170kg; superplastificante – 2.2 kg; areia 0/8 – 621kg; brita 4/8 – 306kg; brita 10/16 – 438 kg; brita 14/32 – 449kg . As armaduras ordinárias foram do tipo S400C.

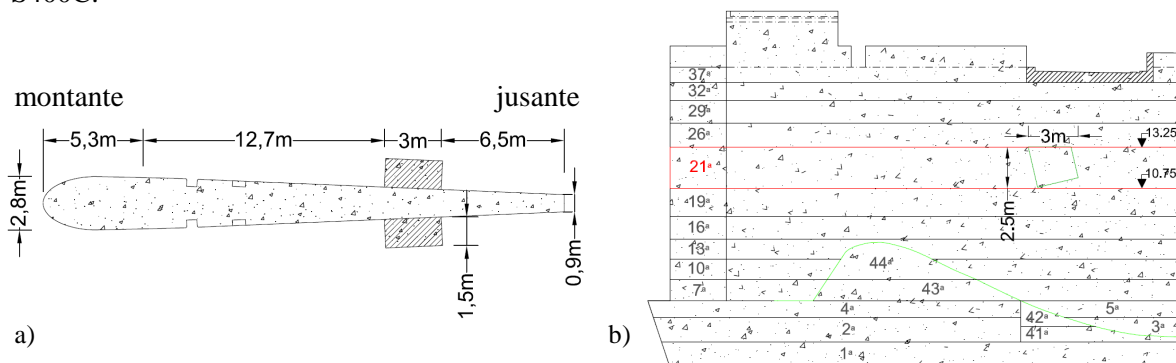


Figura 1. a) Planta da parede à cota 12m; b) Corte longitudinal pelo centro da parede.

### 3.2 Sistema de arrefecimento baseado em bainhas de pré-esforço ventiladas

No caso particular da 21ª fase de betonagem, a necessidade de betonar 2.5m de espessura de betão justificou o recurso a solução de arrefecimento para mitigar o risco de fissuração de origem térmica. Dadas as especificidades da obra, a disponibilidade de equipamentos de ventilação, e a recetividade do empreiteiro pela opção de colocação de bainhas de pré-esforço, decidiu-se por realizar uma solução baseada em bainhas de pré-esforço ventiladas. No entanto, ao contrário da solução proposta por Hedlund e Groth [1], as bainhas foram colocadas em posição horizontal, longitudinalmente ao desenvolvimento da parede (ver Fig. 2). Tendo em conta a dimensão máxima da secção transversal, e alguns estudos preliminares realizados com modelos de simulação 2D segundo o método dos elementos finitos, optou-se pela colocação de um total de 6 bainhas de arrefecimento com 90mm de diâmetro, dispostas em duas camadas, o que correspondeu a espaçamentos entre bainhas da ordem dos 90cm na direção vertical e da ordem dos 70cm na direção horizontal. Devido a restrições relacionadas com as armaduras da parede, o traçado das bainhas sofreu algumas adaptações, particularmente junto à zona jusante da parede, em que a espessura da mesma é reduzida (0.9m). A entrada de ar nos tubos foi efetuada pela extremidade jusante da parede com recurso a um ventilador industrial que permitiu velocidades de circulação nas bainhas da ordem dos 8.6m/s. Indique-se que, junto à extremidade montante, as bainhas tiveram adaptação ao traçado de forma a garantir que a saída do ar ocorria pela superfície superior da fase de betonagem. Com esta estratégia evitou-se a furação das cofragens desta extremidade e evitou-se a criação de possíveis canais de percolação de água montante/jusante, apesar da injeção das bainhas após o término das operações de ventilação. A ventilação foi iniciada 14 horas após a betonagem, evitando potenciais problemas associados às vibrações das bainhas antes da presa do betão, e terminada à idade de 7.7dias. Para referência, as seis bainhas utilizadas são designadas de T1 a T6 conforme indicado na Fig. 2b. Com o objetivo de melhor ilustrar o sistema de arrefecimento utilizado são mostradas na Figura 3 duas fotos relativas ao ventilador aplicado (Fig. 3a) e à localização das bainhas na vizinhança da secção A-A (Fig. 3b).

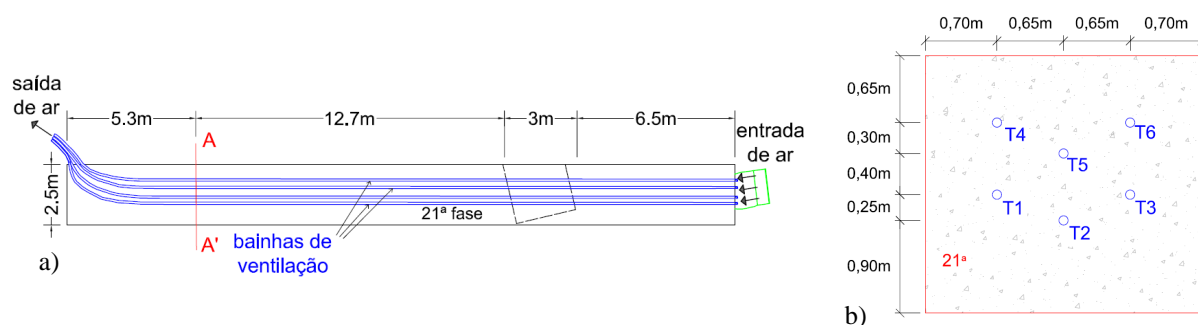


Figura 2. a) Corte longitudinal de localização das bainhas de arrefecimento; b) Corte transversal na secção A-A

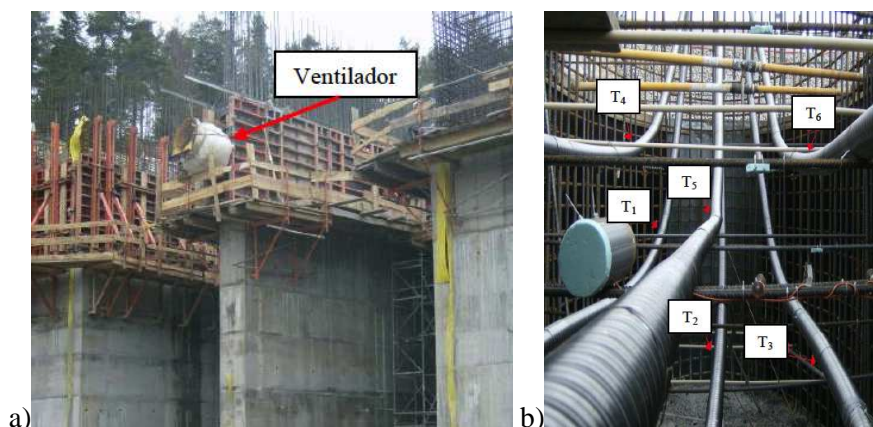


Figura 3. a) Foto da construção da 21ª fase com identificação do ventilador; b) Foto das bainhas de ventilação na zona do corte A-A, em perspetiva jusante/montante

## 4. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS E MONITORIZAÇÃO IN-SITU

### 4.1 Propriedades dos materiais: caracterização laboratorial e *in-situ*

#### *Propriedades térmicas*

No âmbito de trabalho de investigação recente [8], foi elaborado um programa alargado de caracterização por calorimetria isotérmica de cimentos comercializados em Portugal (pastas de cimento), sendo que um dos cimentos estudados coincidia com o cimento usado no contexto do caso de estudo em análise: mesmo tipo de cimento e mesma cimenteira. Assim sendo, e com base na formulação de Arrhenius proposta por Reinhardt [9] e explicada ao detalhe em [8], foi estimado o calor de hidratação do betão a partir do conteúdo volumétrico em cimento da mistura, obtendo-se os seguintes parâmetros da função de Arrhenius (ver simbologia e detalhes da função em [8]):  $E_a = 37.31$  kJ/mol,  $A = 4.989 \times 10^9$  W/m<sup>3</sup>,  $Q_{pot} = 8.295 \times 10^7$  J/m<sup>3</sup>, e função  $f(\alpha)$  caracterizada pelo seguinte conjunto de pontos  $[\alpha; f(\alpha)] = [0.00; 0.00], [0.05; 0.58], [0.10; 0.85], [0.15; 0.98], [0.20; 1.00], [0.30; 0.94], [0.40; 0.69], [0.50; 0.41], [0.60; 0.22], [0.70; 0.13], [0.80; 0.07], [0.90; 0.02], [1.00; 0.00]$ . A estimativa do calor de hidratação do betão com base nas propriedades do cimento utilizado não teve em conta a presença de cinzas na mistura, podendo isso conduzir a erros, caso o calor libertado pelas reações pozolânicas das cinzas se revele significativo. Para confirmação da viabilidade dos parâmetros da função de Arrhenius estimada foi efetuado um ensaio semi-adiabático *in-situ* com um provete em betão com 30cm×30cm×30cm, envolvido em todas as suas faces por placas de cofragem de madeira com 2.1cm de espessura e placas em poliestireno extrudido (XPS) com 12cm de espessura total, conforme a foto da Fig. 4a. O ensaio foi efetuado em simultâneo com as operações de betonagem da 21ª fase, tendo decorrido em ambiente exterior. As temperaturas no ambiente e no centro geométrico da caixa foram monitorizadas, estando os correspondentes resultados na Fig. 4b. Na mesma figura é também possível ver que a simulação do comportamento térmico da caixa com recurso ao método dos elementos finitos (ver detalhes nas referências [10] e [11]) conduziu a evolução de temperatura muito semelhante à monitorizada, validando-se a viabilidade dos parâmetros estimados para a função de geração de calor do betão.

Dado que a condutibilidade térmica ( $k$ ) e o calor específico volumétrico ( $\rho c$ ) do betão não puderam ser efetuadas diretamente, foram seguidas as recomendações do Japanese Concrete Institute (JCI) [12]. Assim, efetuou-se uma estimativa com base na ponderação das propriedades térmicas dos constituintes do betão, e das suas proporções mássicas na mistura, tendo sido obtidos os valores de:  $k=2.4$  W/m<sup>2</sup> K e  $\rho c=2400$  kJ/m<sup>3</sup> K.

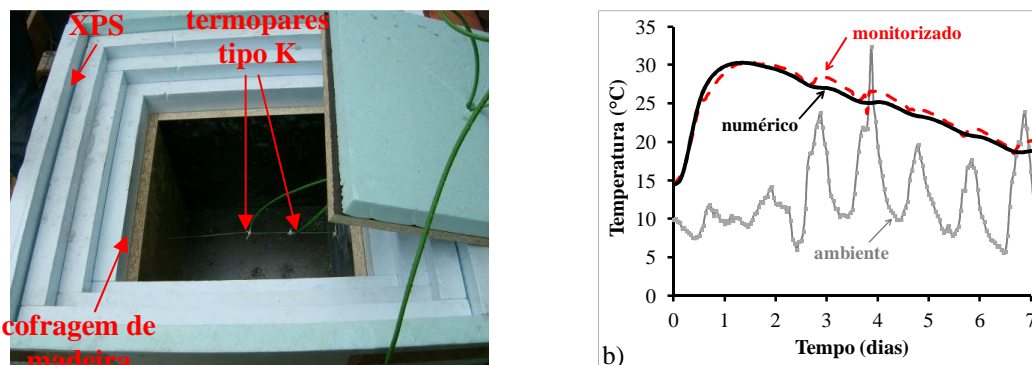


Figura 4. a) Molde utilizado para ensaio calorimétrico semi-adiabático; b) Resultados experimentais e simulação numérica da elevação de temperatura no interior do calorímetro semi-adiabático

*Propriedades mecânicas*

A evolução da resistência à compressão do betão foi avaliada em cubos com 15cm de aresta, curados a 20°C em condições saturadas, e a resistência à tração foi avaliada em cilindros (15cm de diâmetro e 30cm de comprimento), nas mesmas condições de cura, com recurso ao ensaio Brasileiro. A evolução da resistência à compressão em cubos ( $f_c$ ) e da resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) está indicada na lista que se segue: [t (dias);  $f_c$  (MPa);  $f_{ct,sp}$  (MPa)]=[1; 6.74; -]; [2; -; 1.4];[3; 19.99; -]; [7; 29.92; 2.1]; [15; -; -]; [29; 42.3; 2.6]. Em paralelo com os ensaios de evolução da resistência à compressão em cubos a 20°C, foram também efetuados ensaios de evolução da resistência à compressão em cubos curados a 40°C. Com base na informação de ambos os ensaios, foi possível aferir a energia de ativação mecânica do betão através do método da sobreposição [13], tendo-se obtido o valor de  $E_a= 37.0$  kJ/mol, que é coerente com os valores obtidos pela calorimetria isotérmica do cimento ( $E_a= 37.31$  kJ/mol).

O módulo de elasticidade do betão foi testado quer através de ensaios de compressão cíclica em cilindros a várias idades, quer através da metodologia EMM-ARM que permite a observação contínua do módulo de elasticidade do betão através da frequência de ressonância do provete (ver mais detalhes sobre o ensaio em [14]). Os resultados de ambas as metodologias de medição do módulo de elasticidade estão apresentados na Fig. 5a, onde se pode confirmar a coerência de valores e a mútua validação dos métodos. Ao proporcionar informação contínua e quantitativa sobre a evolução do módulo de elasticidade a EMM-ARM permite que seja simulado o comportamento em idades inferiores a 1 dia com base em informação direta, particularmente no que diz respeito ao instante da presa estrutural.

O comportamento em fluência do betão durante as primeiras idades foi avaliado com recurso a ensaios de compressão em cilindros (15cm de diâmetro e 30cm de comprimento) às idades de  $t=1.1d$ ,  $t=3.29d$  e  $t=7.25d$ . Os resultados correspondentes estão no gráfico da Fig. 5b. O coeficiente de dilatação térmica foi avaliado experimentalmente *in-situ* com procedimento detalhado em [10], tendo sido-se aferido o valor de:  $\alpha=11.41 \times 10^{-6} / ^\circ C$ .

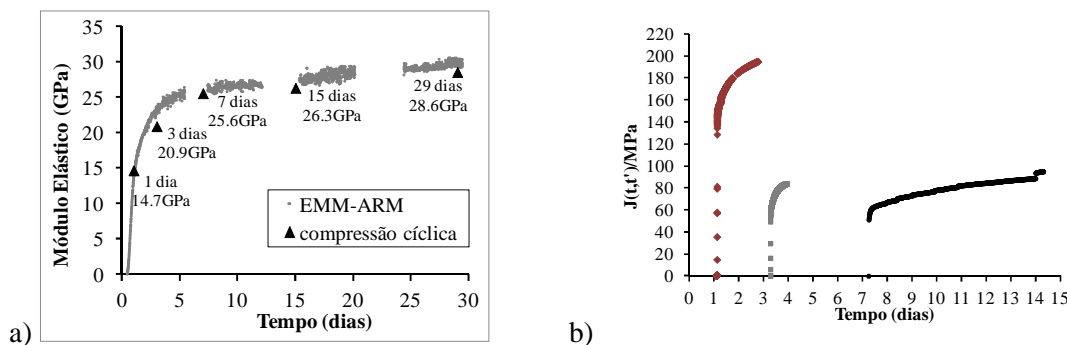


Figura 5. a) Evolução do módulo de elasticidade desde a betonagem; b) Ensaio de fluência às idades de  $t=1.1d$ ,  $t=3.29d$  e  $t=7.25d$ .

## 4.2 Monitorização *in-situ* de temperaturas e extensões

Em paralelo com a instalação das bainhas de arrefecimento, foi efetuado programa alargado de monitorização de temperaturas e extensões na fase de betonagem nº21, cujos aspetos gerais se apresentam de seguida. A monitorização *in-situ* foi efetuada com recurso a um sistema de aquisição Datalogger DT80G alimentado por baterias para evitar perda de informação relacionadas com falhas de eletricidade. Em termos de sensores, foram utilizados termopares do tipo K para medição de temperaturas e sensores de cordas vibrantes (Gage Technique TES/5.5/T) com capacidade de medição simultânea de temperaturas e extensões. A monitorização das temperaturas e extensões compreendeu períodos de aquisição de 30 minutos (desde a betonagem até aos 10 dias de idade), incidindo essencialmente sobre a secção transversal A-A, já identificada no âmbito da Fig. 2, em correspondência com a zona mais espessa do descarregador, com ~2.8m de largura. A localização dos sensores na secção A-A está apresentada na Fig 6a, onde os sensores de temperatura estão identificados pela sigla TP (TP1 a TP7) e os sensores de deformação/temperatura estão indicados pela sigla CV (CV1 a CV6). Os sensores de deformação foram colocados na direção longitudinal ao desenvolvimento da parede. A configuração adotada para os vários sensores permite que seja obtida informação sobre perfis verticais e horizontais de temperatura e extensão na secção A-A. Complementarmente aos sensores embebidos no betão, foram colocados termopares no interior das bainhas ventiladas (T1, T2 e T3), medindo a temperatura do ar nas posições indicadas na Fig. 6b. Adicionalmente, com recurso a termómetro portátil, foram também tomadas algumas medições discretas de temperaturas junto à entrada das bainhas de arrefecimento.

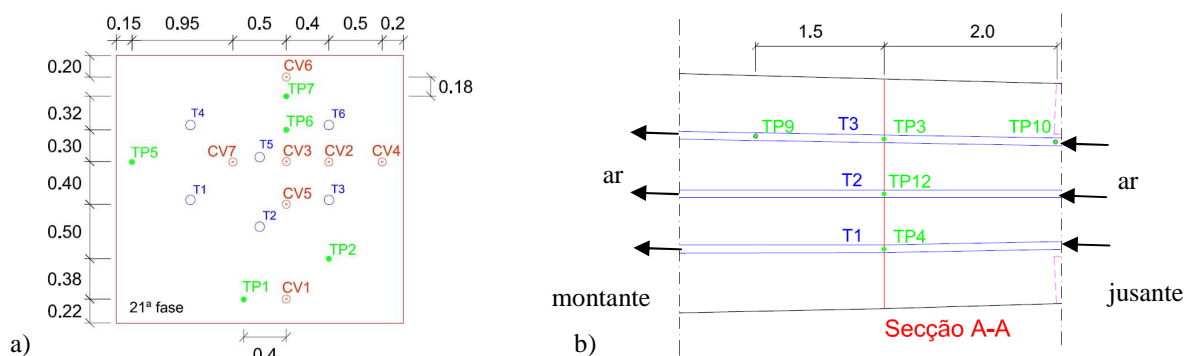


Figura 6. a) Identificação dos sensores colocados na secção A-A; b) Sensores de temperatura colocados no interior das bainhas (medidas em metros).

## 4.3 Resultados da monitorização e discussão

Dada a impossibilidade de mostrar e comentar todos os resultados do programa de monitorização no âmbito deste artigo, serão feitos alguns comentários gerais, com ênfase nos resultados relacionados com as bainhas ventiladas. Primeiramente é efetuada referência aos sensores localizados no alinhamento vertical que passa pelo sensor CV1 (ver Fig. 6a), cujas temperaturas registadas ao longo dos primeiros 10 dias estão representadas na Fig. 7a. Observa-se que a temperatura inicial do betão foi de ~15°C, i.e. 5°C acima da temperatura ambiente, o que é coerente com experiências prévias de monitorização [8] e com as indicações do JCI [12]. Os valores de pico das temperaturas registadas foram da ordem dos 41°C para os sensores CV3 e CV5, correspondendo a elevação de temperatura total da ordem dos 25°C. Os sensores TP6, TP7 e CV6 registaram temperaturas máximas inferiores em correspondência com a sua proximidade à superfície superior do betão, com trocas importantes com o meio circundante. No sensor CV1 é observado o comportamento típico de pontos próximos de uma fase de betonagem previamente existente [8]: a temperatura de pico é mais baixa do que os pontos centrais (ex: CV5) devido à inércia térmica do betão existente que já se encontrava em arrefecimento; por razões análogas o sensor CV1 revela um mais lento retorno a temperaturas da ordem da temperatura ambiente. É também interessante verificar que na maior parte dos sensores reportados na Fig. 7a é notória uma alteração da tendência da evolução da temperatura pelas 14h, em correspondência com o instante de início do processo de ventilação, refletindo o efeito da ventilação na redução das temperaturas de pico observadas. Por outro lado, a observação das temperaturas

registadas no interior da bacia T3 na secção A-A, indicadas na Fig. 7b (onde também é mostrada a temperatura ambiente e a temperatura nos sensores CV2 e CV5), permite constatar que antes da ventilação ser iniciada, a temperatura nas bacias era muito semelhante à do betão circundante. No entanto, pelas 14h de idade, observa-se uma clara descontinuidade na evolução de temperatura nas bacias, em correspondência com o início da ventilação. No entanto, a temperatura nas bacias é ainda superior à temperatura ambiente, traduzindo o aquecimento do ar ao longo das bacias. Com efeito, à passagem pela secção A-A o ar dentro das bacias já tinha percorrido 22.2m circundado por betão mais quente. Esse aquecimento do ar ao longo da bacia é claramente visível para os 3 instantes representados na Fig.8a, onde se pode constatar que junto ao ventilador (x=0m) a temperatura do ar na bacia coincide com a temperatura ambiente. Junto à secção A-A chega a haver elevações de temperatura da ordem dos 14°C, o que acarreta inevitavelmente a diminuição da capacidade de arrefecimento do ar ao longo do seu percurso. Apesar deste aquecimento do ar, a capacidade de arrefecimento do betão não foi eliminada na medida em que nos instantes de temperatura de pico ainda se registou uma diferença relevante entre a temperatura do betão e a temperatura do ar na secção A-A. Com efeito a informação da Fig. 7b permite confirmar que essa diferença foi da ordem dos 10°C. A título ilustrativo das extensões monitorizadas in-situ, apresenta-se na Fig. 8b os correspondentes valores registados pelo sensor CV5, em paralelo com o registo de temperaturas. Os dois aspetos essenciais a realçar, que são comuns aos restantes sensores, são: (i) há uma clara relação entre a variação das extensões e as variações de temperatura, com tendências ascendentes e descendentes coincidentes; (ii) é corroborada a conclusão obtida pela inspeção visual de que não houve fissuração de origem térmica, dado não terem sido registadas quaisquer descontinuidades nas extensões medidas.

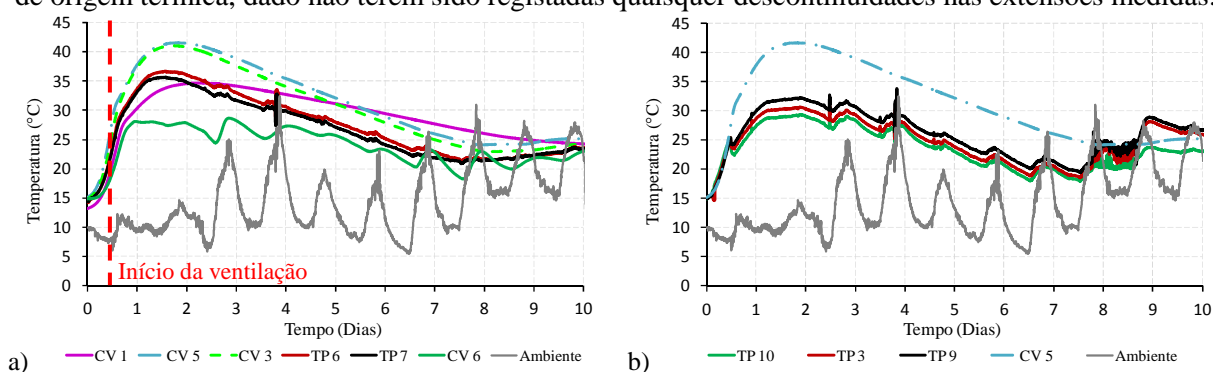


Figura 7. a) Temperaturas monitorizadas ao longo do perfil vertical que contém CV1; b) Temperaturas monitorizadas no interior das bacias pelos sensor TP.

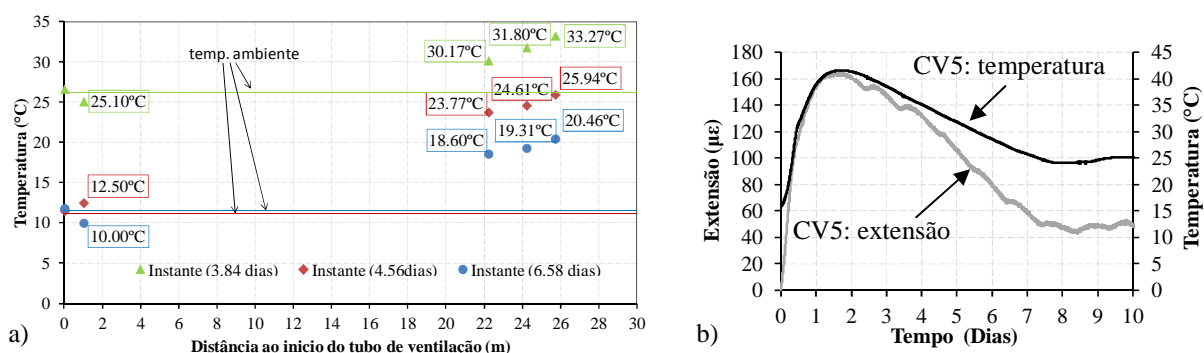


Figura 8. a) Perfis longitudinais de temperatura na bacia T3 para três instantes; b) Extensões monitorizadas pelo sensor CV5.

## 5. SIMULAÇÃO TERMO-MECÂNICA

### 5.1 Modelo de simulação

A estratégia de simulação termo-mecânica é em tudo semelhante à estratégia já apresentada em edição anterior do Congresso Betão Estrutural [8, 15], excetuando a inclusão neste caso de tubagens de

arrefecimento de acordo com o modelo descrito nas referências [4, 16]. Numa breve descrição do modelo de simulação adotado indica-se o recurso ao software DIANA [16], com análise térmica e mecânica sequenciais recorrendo a elementos finitos tridimensionais para o betão (8 nós para análise térmica e 20 nós para análise mecânica) e elementos quadrangulares de 4 nós para as fronteiras térmicas. As bainhas de arrefecimento foram tidas em conta através de elementos lineares de 2 nós, coincidentes com arestas dos elementos de betão, e permitindo portanto a interação térmica entre os elementos [16, 17]. Por motivos relacionados com o programa de cálculo utilizado, a temperatura à entrada dos tubos foi considerada constante e igual à temperatura média registada durante o período de funcionamento dos mesmos (13.9°C). Foi considerado o carácter termicamente ativado da reação de hidratação através da função de Arrhenius, bem como as fronteiras convectivas com o ambiente circundante, para o qual foi considerada a temperatura registada *in-situ*. Em relação à modelação da temperatura nas bainhas de arrefecimento, o modelo de simulação tem em conta a interação com o betão circundante, conduzindo a não-linearidades na resolução do sistema de equações. Para lidar com as não-linearidades associadas aos cálculos térmicos foi utilizado o método de Newton-Raphson. No que diz respeito à análise mecânica, para além da consideração do carácter evolutivo das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração) em função da idade equivalente do betão [18], foram também tidos em conta os efeitos viscoelásticos com recurso à Lei da Dupla Potência [19]. A malha de elementos finitos adotada, com simplificação de simetria ao longo do plano longitudinal da parede, está representada na Fig. 9a. Na Fig. 9b mostra-se um resumo dos principais parâmetros utilizados no modelo de cálculo. A análise foi conduzida por um período total de 13 dias, incluindo a betonagem e o tempo de cura da fase anterior à fase em estudo (4.5 dias) e 8.5 dias após a betonagem da 21ª fase. A análise foi efetuada com intervalos de 1h.

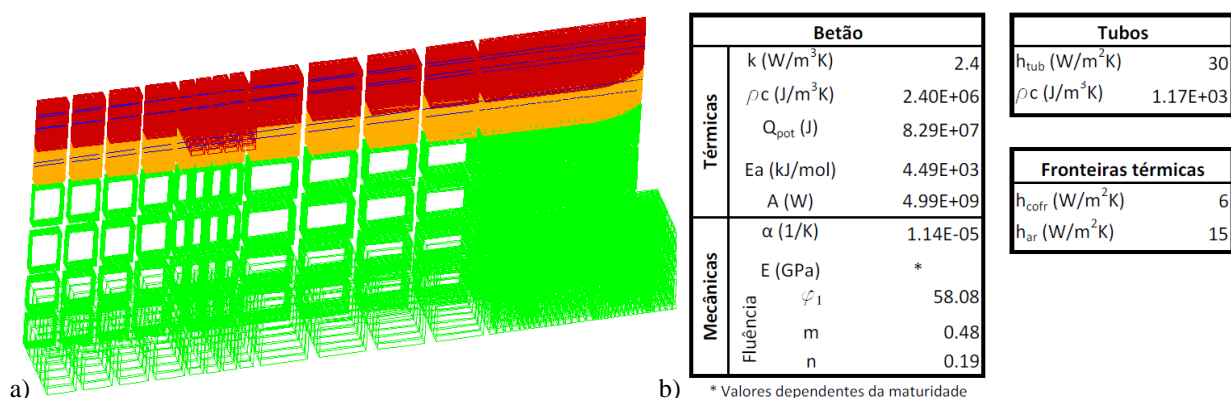


Figura 9. a) Malha de elementos finitos adotada para a simulação; b) Principais parâmetros de modelação adotados.

## 5.2 Resultados e discussão

A simulação de temperaturas e extensões no betão conduziu a resultados coerentes com os que haviam sido obtidos pela monitorização *in-situ*. A título exemplificativo, mostra-se na Fig. 10a a comparação entre valores previstos e monitorizados para ambas as grandezas monitorizadas em CV5. Ressalva-se apenas um desvio das extensões monitorizadas em relação às simuladas nas primeiras 5 horas de estudo. De facto, trata-se de um período durante parte do qual não existe solidarização do sensor ao betão, sendo que os resultados medidos não correspondem à verdadeira deformação do betão. Não seria portanto expectável a coerência com a simulação numérica, pelo que não é possível efetuar a validação da simulação nesses instantes iniciais. Apesar disso, não se considera tratar-se de situação problemática, na medida em que as tensões desenvolvidas nesse período são ainda extremamente baixas dada a reduzida rigidez do betão.

No que diz respeito ao risco de fissuração, os cálculos efetuados permitiram confirmar a ausência de fissuração observada em obra. No entanto, apesar do risco de fissuração se ter revelado relativamente baixo na fase de aquecimento do betão, na fase de arrefecimento foram identificadas pelo cálculo algumas zonas de risco moderado a elevado.



No que diz respeito à eficácia da colocação das bainhas de arrefecimento, e tendo em conta a validação dos modelos de cálculo para previsão da temperatura, apresenta-se na Fig. 10b uma comparação entre a distribuição de temperaturas no instante em que a temperatura máxima é atingida para o modelo em análise, e para um modelo alternativo, em tudo idêntico à exceção da remoção das tubagens de arrefecimento. Constata-se por observação da figura que a temperatura de pico sofreu diminuição da ordem dos 5°C, mas também que a eficácia dos tubos se foi reduzindo ao longo do seu desenvolvimento. Estas informações são relevantes para apoio a decisão de novas tentativas de aplicação da metodologia de arrefecimento.

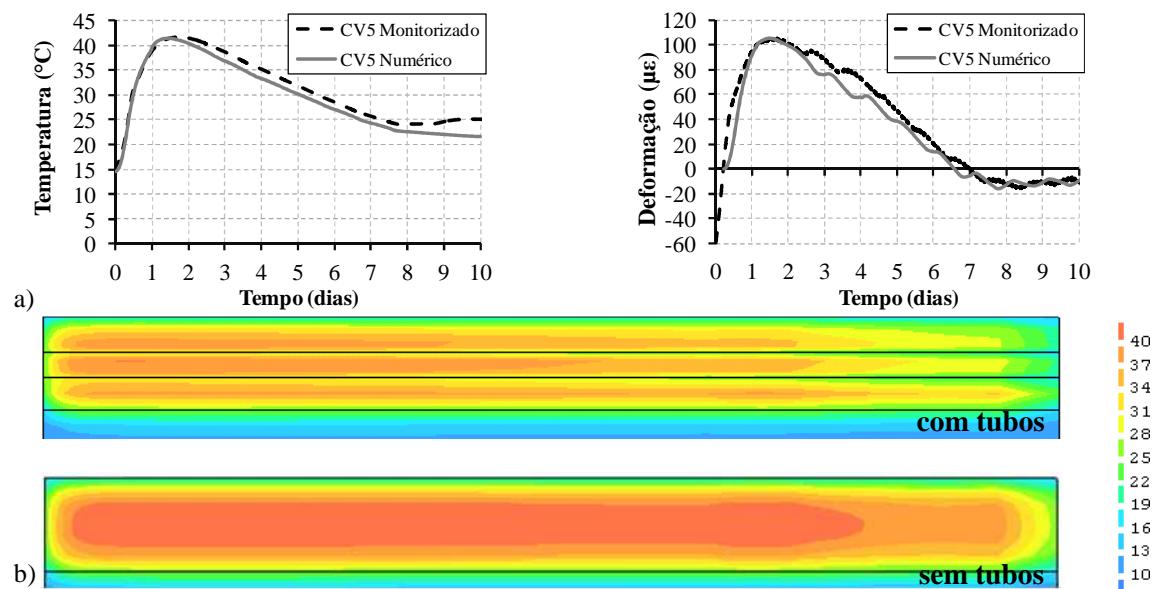


Figura 10. a) Comparação entre valores simulados e monitorizados para temperaturas e extensões – sensor CV5;  
 b) Comparação de mapas de temperaturas na 21ª fase para o instante de temperatura máxima no plano longitudinal de simetria com e sem adoção de bainhas de ventilação (temperatura em °C).

## CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou a possibilidade de aplicação de bainhas de pré-esforço ventiladas em estruturas laminares espessas para redução dos efeitos térmicos do calor de hidratação, viabilizando a construção com camadas de betonagem de maior altura e consequente redução de custos. O estudo compreendeu a análise da parede central de um descarregador de cheia, numa fase de betonagem com 2.5m de altura, tendo sido implementadas seis bainhas longitudinais à parede. As propriedades do betão foram caracterizadas, foram monitorizadas temperaturas e extensões, e o faseamento construtivo foi simulado numericamente com recurso a ferramenta de análise termo-mecânica. Os resultados da monitorização permitiram validar a análise termo-mecânica e, por conseguinte, a capacidade de simulação do efeito das tubagens de arrefecimento com ar. Com base na monitorização e análise termo-mecânica foi possível concluir que as bainhas permitiram diminuir a temperatura de pico do betão em cerca de 5°C relativamente ao que teria ocorrido caso não tivesse sido utilizada a técnica de arrefecimento. Por outro lado, constatou-se que a eficácia do arrefecimento com esta técnica é fortemente atenuada com o comprimento percorrido pelo ar dentro do betão. De facto, o baixo calor específico volumétrico do ar (3000 vezes inferior ao da água) faz com que a sua temperatura seja bastante incrementada ao longo do seu percurso, tendo-se verificado aumentos da ordem dos 14°C em apenas 22m. Em aplicações futuras deste tipo de técnica recomenda-se portanto a utilização de comprimentos de bainha mais curtos, eventualmente com vários pontos de entrada e saída, de forma a aumentar a eficácia desta metodologia.

## AGRADECIMENTOS

O suporte financeiro da FCT é reconhecido pela bolsa individual de doutoramento concedida ao segundo autor SFRH/BD/64415/2009, pelo projeto de investigação PTDC/ECM/099250/2008 –

SeLCo – “Comportamento em serviço de estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões auto-induzidas” e pelo suporte financeiro à unidade de investigação ISISE. Agradece-se também o contributo e apoio fornecido pela Teixeira Duarte (empreiteiro geral) através do Eng<sup>o</sup> Teófilo Silve e pela EDP (dono de obra) através dos Eng<sup>os</sup> Jorge Ferreira e Armando Camelo.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. Hedlund, P. Groth (1998). Air cooling of concrete by means of embedded cooling pipes-Part I: Laboratory tests of heat transfer coefficients, *Materials and Structures*, 31. 329-334.
- [2] ACI Committee 207 (2005). *Cooling and insulating systems for mass concrete ACI 207.4R-05*, in, Detroit, Michigan, 2005.
- [3] K. van Breugel (1998). Prediction of Temperature Development in Hardening Concrete, in: R.Springenschmid (Ed.) *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages - RILEM Report 15*, E & FN Spon, 1998.
- [4] J.K. Kim [*et al.*] (2001) Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system, *Computers and Structures*, 79. 163-171.
- [5] P. Groth, H. Hedlund (1998) Air cooling of concrete by means of embedded cooling pipes—Part II: Application in design, *Materials and Structures*, 31. 387-392.
- [6] S. Ishikawa [*et al.*] (2007). Air pipe cooling system, *Concrete International*, 29. 45-49.
- [7] CEN (2004). EN 1992-1 European Standard Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: general rules and rules for buildings.
- [8] M. Azenha (2009). Numerical Simulation of the Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages, PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, 2009.
- [9] H. Reinhardt [*et al.*] (1982). Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties., in: *International Conference Concrete at Early Ages*, Paris, France, 1982.
- [10] Â.M.V. Costa (2011). Análise termo-mecânica das tensões autoinduzidas no betão associadas ao calor de hidratação: estudo de caso do descarregador de cheias da barragem de Paradela, Tese de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2011.
- [11] M. Azenha [*et al.*], (2012). Construction phasing of a dam spillway: thermo-mechanical simulation, in: *SSCS-Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures*, Aix-en-Provence, France, 2012.
- [12] Japan Concrete Institute (2011). JCI Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete, in, JCI, 2011, pp. 153.
- [13] L. D'Aloia, G. Chanvillard (2002). Determining the “apparent” activation energy of concrete:  $E_a$ —numerical simulations of the heat of hydration of cement, *Cement and Concrete Research*, 32. 1277-1289.
- [14] J. Granja [*et al.*] (2012). Avaliação experimental do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades: aplicação laboratorial e in situ, in: *Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012*, Porto, 2012.
- [15] M. Azenha [*et al.*] (2008). Monitorização e simulação numérica do processo construtivo de uma barragem gravidade de betão, in: *Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2008*, Guimarães, 2008.
- [16] TNO-DIANA-BV (2007). Diana User’s Manual - Release 9.2, in, Delft, The Netherlands, 2007.
- [17] F.P. Incropera [*et al.*] (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, 2006.
- [18] N.J. Carino, H. Lew (2001). The Maturity Method: Theory and Application, in: *Structures Congress & Exposition*, American Society of Civil Engineers, Washington (DC), 2001, pp. 15.
- [19] Z. Bažant, E. Osman (1976). Double power law for basic creep of concrete, *Materials and Structures*, 9. 3-11.