

Otimização do faseamento construtivo de estruturas constituídas por grandes volumes de betão: Estudo do canal do descarregador de cheias de uma barragem

Optimization of mass concrete construction phasing: Case study of the channel of a dam spillway

Rodrigo Lameiras (1); Miguel Azenha (2); Joaquim Barros (3)

(1) *Aluno do Programa Doutoral em Engenharia Civil, ISISE / Universidade do Minho*

(2) *Professor Auxiliar, ISISE / Universidade do Minho*

(3) *Professor Catedrático, ISISE / Universidade do Minho*

Departamento de Engenharia Civil / Escola de Engenharia / Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Resumo

Tendo em vista evitar riscos elevados de fissuração em construções constituídas por grandes volumes de betão, são geralmente estabelecidas limitações construtivas, tais como imposição de altura máxima das camadas e de tempos mínimos entre os inícios de betonagens de camadas sequenciais. Geralmente estes limites são estabelecidos pelo dono de obra, com base em experiências prévias ou com base em exigências regulamentares. No entanto, esta abordagem é demasiado simplificada por não considerar as complexidades envolvidas no risco de fissuração de cada caso específico. O presente trabalho descreve os estudos realizados para a avaliação da possibilidade de diminuir o tempo entre duas fases subsequentes de betonagem da zona corrente do descarregador de cheias de uma barragem. Adota-se uma metodologia de simulação numérica do comportamento termo-químico-mecânico na fase de construção, com recurso a software baseado no Método dos Elementos Finitos. O problema térmico é simulado recorrendo a um modelo em regime transiente que permite determinar a evolução da temperatura no betão tendo em conta o calor de hidratação do cimento, as condições ambientais e a geometria da estrutura. A capacidade de previsão das ferramentas de análise do problema térmico é validada através de resultados da monitorização de temperaturas realizada durante uma das betonagens da obra. Por fim, são realizadas análises paramétricas com o objetivo de avaliar as consequências da alteração do ciclo construtivo.

Palavra-Chave: Modelo termo-químico-mecânico, risco de fissuração, calor de hidratação

Abstract

In order to avoid high cracking risk in construction of massive elements, limitations are generally established on the construction process, such as the imposition of maximum height of concreting layers and minimum time between consecutive casting phases. Construction phasing/schedules are generally set by owners and contractors based on previous experiences or on regulation requirements. However, this approach tends to be conservative as it overlooks several factors that influence cracking risk. This paper describes a study conducted to evaluate the possibility of optimizing the height and time interval between two subsequent concreting stages of a channel of a dam spillway. The study is based on the numerical simulation of construction through coupled thermo-chemo-mechanical FEM based software. The thermal problem is simulated using a transient model for determining the temperature evolution in the concrete taking into account the heat hydration, environmental conditions and the geometry of the structure. The predictive performance of the numerical tools adopted for the thermal problem is validated by considering the temperatures measured during one of the concreting phases. Special emphasis is given to choice of modeling parameters based on previous experiences of the research team. Finally, the evaluation of alternative construction scenarios and their cracking risk is made using the validated model.

Keywords: Thermo-chemo-mechanical model, cracking risk, heat of hydration

1 Introdução

As construções de estruturas que empregam grandes volumes de betão geralmente estão sujeitas a riscos relevantes de fissuração ainda nas primeiras idades. Este risco resulta, principalmente, da restrição às deformações volumétricas devidas ao desenvolvimento de calor de hidratação dos materiais cimentícios contidos no betão. Estas deformações são geralmente restringidas internamente e externamente. A restrição interna resulta da expansão/retração diferencial do próprio maciço betonado durante a fase de elevação da temperatura ou arrefecimento. Já a restrição externa ocorre por elementos que compõem o contorno do elemento betonado: seja um maciço rochoso ou fases anteriores ou posteriores de betonagem.

Devido às complexidades envolvidas no problema, uma prática comum entre os projetistas é o de procurar controlar o risco de fissuração impondo-se alturas máximas das camadas ou estabelecendo-se tempos mínimos de espera entre betonagens. Estas medidas são tomadas visando uma dissipação mais acelerada do calor gerado, de forma a evitar uma elevação muito acentuada das temperaturas no elemento de betão. No entanto, uma vez que o risco de fissuração depende de um conjunto alargado de fatores para além das condições geométricas (por exemplo: dosagem do betão, temperatura ambiente, temperatura inicial do betão, condições fronteira, etc), compreende-se que as regras comumente estabelecidas em caderno de encargos se revelem conservativas, traduzindo experiência acumulada de prescrições que normalmente conduzem a resultados positivos.

O presente artigo trata de um estudo, de carácter preliminar, do comportamento termo-mecânico da zona corrente do novo descarregador de cheias de uma barragem localizada no Norte de Portugal. O estudo foi realizado através da simulação numérica do comportamento termo-mecânico das várias fases construtivas, fazendo-se uso de um software baseado no Método dos Elementos Finitos. O artigo enfoca nos estudos de avaliação da possibilidade de acelerar os ciclos de betonagem, de forma a possibilitar uma maior velocidade de construção, sem prejuízo das margens de segurança no que diz respeito ao risco de fissuração do betão nas suas primeiras idades.

2 Geometria, faseamento construtivo e descrição do problema a estudar

O estudo apresentado neste artigo limita-se à zona corrente do descarregador da barragem. Este segmento do descarregador, que se estende do órgão de entrada até ao dissipador de energia (salto de esqui), passa por várias variações de secção ao longo do seu comprimento, com juntas transversais espaçadas de aproximadamente 14 m. A secção transversal da zona corrente típica está representada na Figura 1. Pode observar-se na figura a existência de várias fases de betonagem, identificadas por F1 a F7, sendo ainda de salientar o facto da secção do descarregador estar limitada do lado esquerdo pelo terreno da encosta (granito) até uma cota superior à do lado direito. O presente trabalho analisa o lado esquerdo da secção transversal, onde se pode observar que nas fases F1 e F2, a altura de betonagem é de cerca de 0,80 m, enquanto nas fases F3 e F4 as alturas

de betonagem são, respectivamente, da ordem de 1.50 m e 1.00 m. A betonagem F5 diz respeito à parede lateral do descarregador com largura de 0.70 m.

Por aplicação das regras explicitadas nas condições técnicas para faseamento de betonagens estabelecidas pela contratante, o faseamento nas blocagens neste caso consiste em realizar betonagens com intervalos mínimos de 4 dias. Tendo em conta o caráter potencialmente conservativo deste requisito do caderno de encargos, efetuar-se-á um conjunto de análises de forma a avaliar a possibilidade de reduzir o período de 4 dias de espera nas fases F3 e F4, sem que seja posta em causa a margem de segurança da solução adotada no que diz respeito à probabilidade de fissuração associada às variações térmicas decorrentes da libertação de calor de hidratação do cimento.

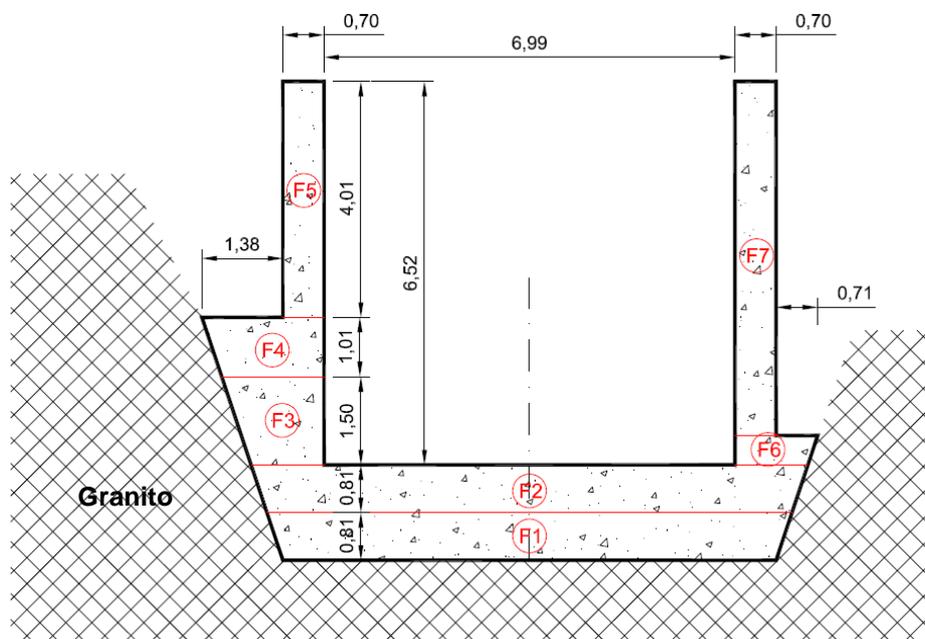


Figura 1 – Corte transversal da zona corrente do descarregador (medidas em metros).

3 Simulação numérica de validação

3.1 Considerações gerais, geometria e modelo de elementos finitos

A qualidade da simulação numérica do desenvolvimento de temperaturas em estruturas de betão armado depende especialmente da capacidade de quantificação das propriedades do betão em termos de libertação de calor, bem como da replicação correta das condições de fronteira do problema. Para assegurar confiança nas capacidades preditivas dos modelos de simulação utilizados, aproveitou-se do facto do troço do descarregador em estudo ter sido monitorizado em termos de temperaturas aquando da sua construção, permitindo validação dos resultados da simulação. A presente secção apresenta os pressupostos de modelação adotados e os resultados da correspondente simulação, comparando-os com os resultados da monitorização de temperaturas. Esta validação dos modelos numéricos permitirá uma confiança acrescida nos resultados das análises paramétricas apresentadas no Secção 4 deste artigo, e também das ilações tiradas a partir dessas mesmas análises.

Por simplificação da análise, e tendo em conta que a elevação de temperatura (e conseqüente risco de fissuração associado) é mais elevada na zona do lado da encosta, efetua-se a análise apenas dessa parte da secção, considerando-se simetria. Na Figura 2 apresenta-se a geometria adotada para realizar as análises numéricas com coloração distinta nos vários materiais/elementos adotados. Nela os elementos da malha de elementos finitos são apresentados na forma encolhida, facilitando a possível visualização e identificação dos elementos de fronteira. O betão está representado com cor azul e o granito está representado em laranja.

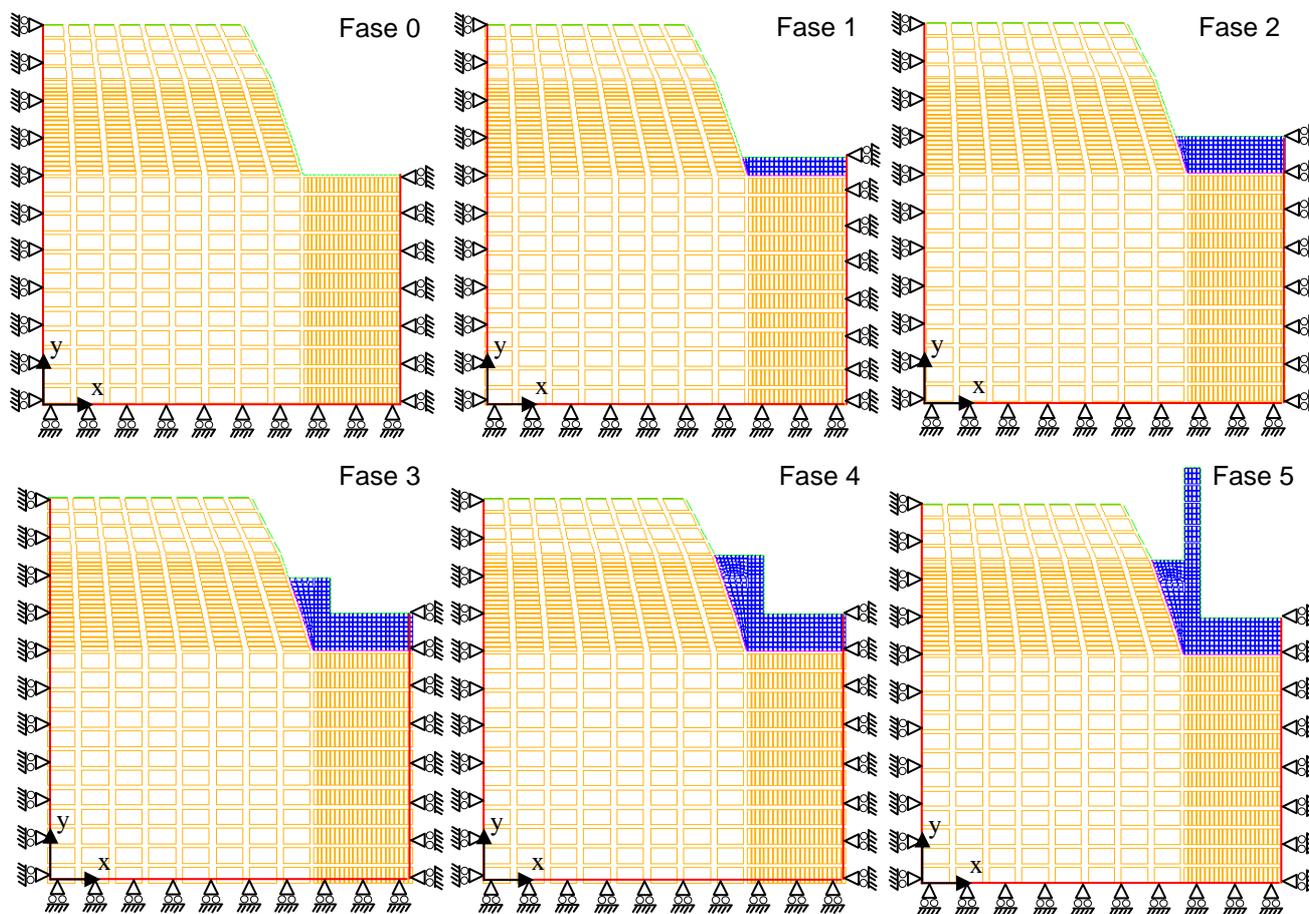


Figura 2 – Geometria da secção transversal estudada em diferentes fases (maciço granítico em laranja, betão em azul, fronteiras adiabáticas em vermelho e fronteiras convectivas em verde).

É de referir que se optou por uma análise plana da secção (fluxos térmicos apenas considerados no plano da secção transversal), o que permite resultados bastante realistas na medida em que as trocas de calor pelas extremidades do corpo em estudo podem ser consideradas negligenciáveis. Para a análise mecânica, é considerado um estado plano de deformação, que conduzirá a valores conservativos (superiores aos reais) das tensões calculadas, na medida em que pressupõe restrição total à deformação na direção perpendicular ao plano de análise. Tal facto não é verificado na realidade, uma vez que o desenvolvimento longitudinal do corpo em análise é relativamente reduzido (~14 m). Assim sendo, espera-se que os resultados conduzidos com esta abordagem de modelação sejam realistas em termos do campo térmico, mas conservativos no que ANAIS DO 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012 – 54CBC

concerne aos campos de tensões, na medida em que a restrição à deformação no modelo de simulação é claramente maior do que a verificada em obra.

A dimensão adotada para o maciço granítico prende-se com a intenção de garantir que as suas fronteiras térmicas limites estejam suficientemente afastadas para não exercerem influência sobre as temperaturas calculadas no betão. Análises preliminares apontaram que considerar um maciço de granito com profundidade de 10 m e com um troço também de 10 metros em desenvolvimento horizontal para a esquerda da parede do descarregador é suficiente para alcançar os objetivos pretendidos.

Na Figura 2 também é possível observar a cor verde as fronteiras térmicas de convecção através das quais se admite haver trocas de calor entre o sistema betão/granito e o ambiente circundante. Nas arestas da esquerda e inferior do bloco de granito, representadas a cor vermelha, foram consideradas condições-fronteira adiabáticas. A mesma condição foi considerada para o eixo de simetria. Relativamente às condições-fronteira do modelo mecânico, os apoios de simetria, localizados no alinhamento vertical da extremidade direita da malha de elementos finitos, restringem os movimentos na direção X (ver sistema de eixos na figura). Os deslocamentos na direção Y são impedidos ao longo da aresta inferior do bloco de granito. Na interface betão-granito, foram adotados elementos de interface retangulares de espessura virtualmente nula, capazes de simular o deslizamento relativo ao longo da interface.

A análise foi efetuada tendo em conta o faseamento construtivo, com ativação sequencial de várias partes do modelo, bem como das correspondentes condições fronteira térmicas e mecânicas. No modelo térmico foram utilizados elementos finitos quadriláteros de quatro nós com 2x2 pontos de integração. Para as fronteiras convectivas foram adotados elementos lineares de dois nós, com 2 pontos de integração. O calor de hidratação é tido em conta através duma formulação da Lei de Arrhenius modificada (Reinhardt, 1982) que traduz o carácter exotérmico e termicamente ativado das reações de hidratação do cimento. Por este facto, é necessário o recurso a algoritmos de análise não-linear, nomeadamente através do método de Newton-Raphson. A análise não-linear mecânica foi realizada com recurso a elementos finitos em estado plano de deformação. Foram utilizados elementos quadrangulares de 8 nós, com 3x3 pontos de Gauss, cujos vértices dos elementos são coincidentes com os da análise térmica. Os elementos de interface betão-granito utilizados são de 6 nós (3+3 nós coincidentes).

Para realizar a validação do modelo, foi conduzida uma análise no domínio do tempo. Tratando-se de um corpo cujas temperaturas foram monitorizadas, usou-se o faseamento construtivo de betonagem real apresentado na **Error! Reference source not found..**

Tabela 1 – Discretização da análise no tempo

Fase	Descrição	Data de Início (DD/MM/AAAA HH:MM)	Discretização
F0	Somente granito	6/11/2009 12:00	986 x 10.800 s + 3600 s
F1	+ 0,8 m de laje de betão	9/3/2010 19:00	214 x 3600 s + 1800 s
F2	+ 0,8 m de laje de betão	18/3/2010 17:30	645 x 3600 s + 1800 s
F3	+ 1,5 m de blocagem de betão	14/4/2010 15:00	123 x 3600 s + 1800 s
F4	+ 1,0 m de blocagem de betão	19/4/2010 18:30	139 x 3600 s
F5	+ 4,0 m de parede de betão	25/4/10 13:30	360 x 3600 s

Note-se que os tempos de intervalo entre betonagens adotados nesse caso respeitaram os limites mínimos estabelecidos pela contratante, mas não foram iguais aos valores mínimos estabelecidos (4 dias). A justificativa detalhada da existência e duração da fase F0 em que apenas é considerado o granito subjacente será dada na Seção 3.2.2.

3.2 Propriedades consideradas para os materiais na simulação numérica

3.2.1 Betão

Para a simulação do calor de hidratação foi tido em conta o tipo de cimento utilizado - CEM I 42.5R (SECIL), bem como as quantidades volumétricas do mesmo nos betões, conforme apresentado na Tabela 2 – Composição dos betões utilizados para a zona do descarregador Tabela 2.

Tabela 2 – Composição dos betões utilizados para a zona do descarregador em estudo

Componente	Quantidade (kg/m ³)	
	C30/37 S1 (fases F1 e F2)	C30/37 S3 (fases F3, F4 e F5)
Brita	1222.0	1002.0
Areia 0/8	597.0	690.0
Cimento tipo I 42.5 R	252.0	273.0
Cinzas Volantes	108.0	117.0
Pozzolilh 390 S	3.2	3.9
Água	162.0	179.0

Tirando partido da caracterização calorimétrica efetuada por Azenha (2009) para os cimentos comercializados em Portugal, foi possível estimar os parâmetros necessários para a simulação numérica do potencial de geração de calor do betão, indicados na Figura 3.

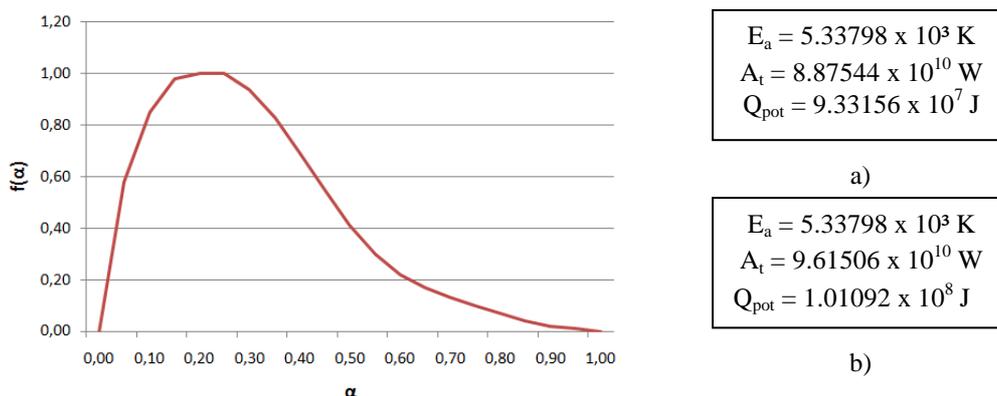


Figura 3 – Parâmetros adotados na simulação do potencial de geração de calor dos betões. a) C30/37 S1 (fases F1 e F2); b) C30/37 S3 (fases F3, F4 e F5).

Nesta figura são indicados os valores para a energia de ativação aparente, E_a , para a constante de proporcionalidade utilizada na lei de Arrhenius, A_t , para o calor gerado a tempo infinito, Q_{pot} , e para a função de geração de calor normalizada, $f(\alpha)$. Detalhes

sobre a metodologia de extrapolação que permite obter o calor de hidratação dum betão a partir da caracterização do cimento utilizado podem ser encontrados em Azenha (2009).

Relativamente à condutividade térmica e ao calor específico, foram adotados, para ambos os betões, os valores de referência: $k = 2.60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e $\rho_c = 2400 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$.

Como condição inicial aquando da betonagem, considerou-se que a temperatura inicial do betão de uma determinada fase corresponde à média das temperaturas iniciais registradas através de amostragem dos betões imediatamente antes da colocação para todos os betões correspondentes à fase do corpo em questão. Os valores adotados para os betões das fases F1, F2, F3, F4 e F5 foram, respectivamente: 10 °C, 9 °C, 13 °C, 17 °C e 9 °C.

No contexto deste trabalho, não foi executado qualquer programa experimental de caracterização mecânica dos betões. Dessa forma, os resultados relativos ao cálculo de tensões deverão ser considerados como indicativos. No entanto, a escolha das propriedades a utilizar teve em conta a experiência colhida em trabalhos anteriores do mesmo tipo, nos quais a caracterização mecânica tinha sido efetuada. Foi então selecionado o betão utilizado numa obra anterior – Barragem de Pretarouca, Lamego – (Azenha, 2008), para o qual havia sido feita caracterização detalhada desse betão. Refira-se que o betão em questão continha uma quantidade volumétrica de cimento comparável com a utilizada neste caso.

O módulo de elasticidade foi considerado dependente da idade equivalente. A evolução do mesmo foi estimada com base em ensaios realizados nas idades de 7 dias e 28 dias para o betão do caso acima mencionado, respectivamente, 26.2 GPa e 31.4 GPa.

Para o coeficiente de Poisson adotou-se o valor de 0.2, que é o geralmente adotado para betão endurecido, enquanto o coeficiente de dilatação térmica foi considerado com o valor $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Relativamente às características de fluência do betão, foram tidos em conta os resultados obtidos nos ensaios de fluência realizados para o betão do caso acima mencionado, em prismas às idades de 1, 3 e 7 dias, tendo-se obtido os seguintes resultados para a Lei da Dupla Potência (Bazant and Osman, 1976): $\phi = 0.2246$; $m = 0.2$; $n = 0.3$ (tempo em dias).

Uma vez que o contexto das análises efetuadas se concentra nas primeiras idades, optou-se por ignorar o efeito da retração de secagem nas análises mecânicas, na medida em que esta tem valores muito reduzidos nas fases iniciais de exposição do betão ao ambiente circundante. Por outro lado, e tendo em conta o conteúdo volumétrico de cimento relativamente reduzido na mistura utilizada, considerou-se plausível negligenciar o efeito da retração autogénea.

3.2.2 Terreno de fundação (maciço granítico)

Tendo em conta as características geotécnicas do terreno de fundação foram consideradas as seguintes propriedades térmicas de referência: $k = 2.79 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e $\rho_c = 2040 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ (Azenha e Faria, 2007).

Relativamente às temperaturas iniciais consideradas para o granito, e tendo em conta a sua importância para a simulação de temperaturas no betão, optou-se por uma solução que permite um realismo considerado aceitável, e que se descreve de seguida. De acordo com Popiel et al. (2001), a temperatura de um solo ou rocha é apenas afetada pelas

variações sazonais de temperatura ambiente até uma certa profundidade, sendo que abaixo dessa profundidade se pode considerar que as temperaturas do solo/rocha são constantes e iguais à temperatura média anual do local em questão. Assim sendo, para poder dispor de valores de temperatura verossímeis no granito adjacente ao descarregador, optou-se por realizar o estudo térmico compreendendo um período relativamente alargado de tempo antes do início das betonagens (cerca de 4 meses), com consideração de temperatura inicial do granito de 10°C (temperatura média anual do local da obra). Este tipo de estratégia tem semelhanças com a abordagem anteriormente adotada por Azenha e Faria (2007).

Em termos de características mecânicas do granito, foi considerado comportamento linear elástico com as seguintes características mecânicas que são também valores de referência: módulo de elasticidade, E, igual a 8 GPa; coeficiente de Poisson igual a 0.3; coeficiente de dilatação térmica igual a $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

3.2.3 Condições de fronteira térmicas e zonas de interface

A fronteira térmica entre os sólidos (betão e granito) e o ambiente circundante é tida em conta através de um coeficiente misto de radiação/convecção com o valor de $15.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Na superfície de betão onde se aplica cofragem, o coeficiente misto de condução/radiação/convecção adotado foi de $5.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Este valor foi alcançado considerando-se o coeficiente de condução da cofragem fornecido pelo fabricante e tendo em conta a analogia elétrica detalhada em Faria et al. (2006). Seguindo o procedimento adotado na obra, considerou-se que as cofragens de todas as fases eram retiradas 2 dias após a betonagem.

Em termos da temperatura ambiente considerada para a simulação, foram adotadas as temperaturas horárias registradas pela estação meteorológica mais próxima nos instantes de execução do troço do descarregador em estudo.

Nas zonas de betão em contato com o granito foram adotados elementos de interface na modelação. No estudo térmico, estes elementos permitem a condução direta do calor sem qualquer alteração dos fluxos térmicos que ocorreriam na ausência dos elementos de interface. Já na análise mecânica, foram adotados elementos de interface na modelação. Relativamente aos parâmetros mecânicos para a interface betão/granito adotou-se: para a interface inferior uma rigidez normal muito elevada e uma rigidez tangencial praticamente nula; para a interface lateral adotou-se valor praticamente nulo para ambas as componentes de rigidez. Com esta estratégia pretendeu-se simular a possibilidade de existir deslize entre o betão e o granito, ignorando-se, portanto, a possibilidade do granito restringir as deformações térmicas do betão.

3.3 Discussão dos resultados e validação da simulação numérica

Na Figura 4 representam-se os campos de temperatura para o instante $t=24 \text{ h}$ após o início de cada fase. Constata-se que os maiores gradientes de temperatura são alcançados nas fases 3 e 4, aproximadamente 24 h após a betonagem, obtendo-se para esses casos temperaturas máximas no betão superiores a 40 °C.

Na Tabela 3 são apresentadas as temperaturas máximas em cada uma das fases de betonagem, bem como os tempos decorridos desde o respectivo início e o instante em que a temperatura máxima é atingida.

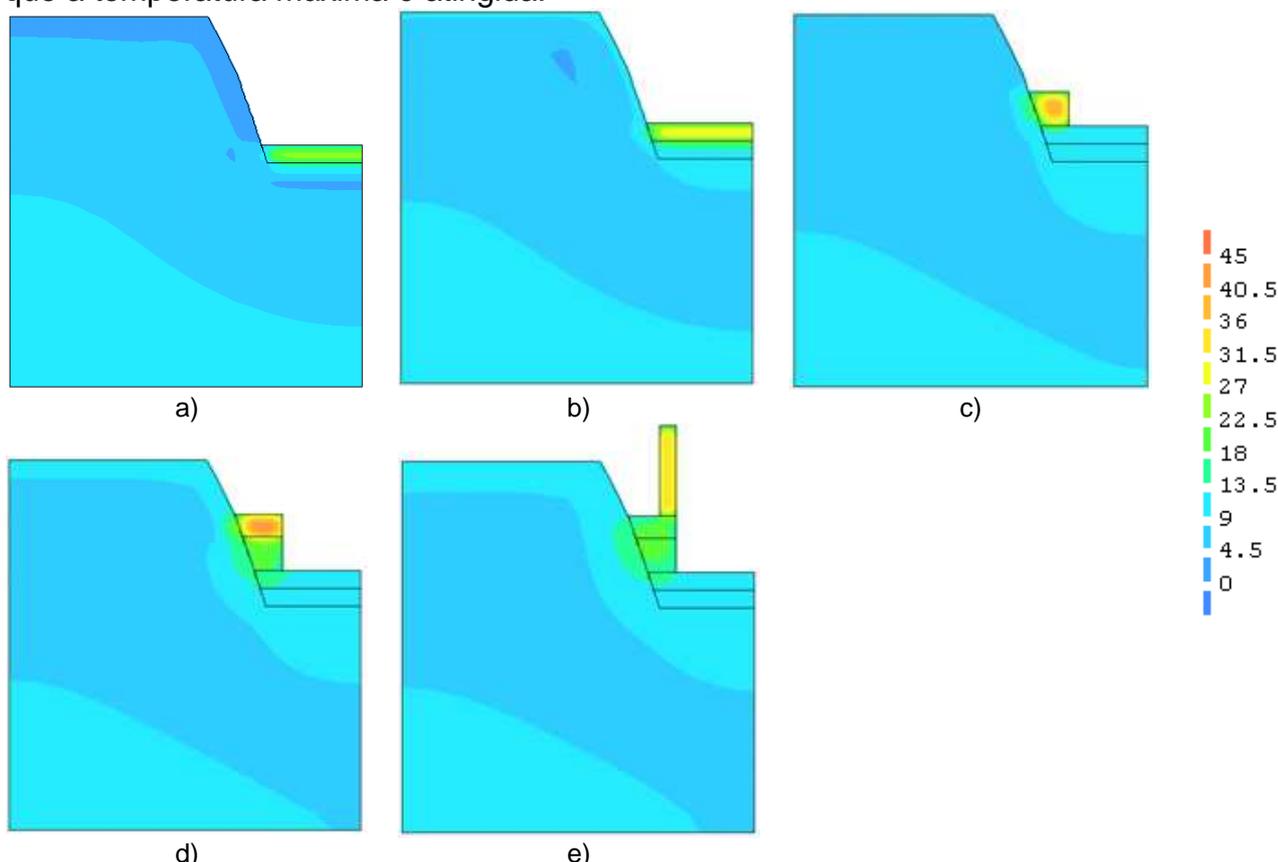


Figura 4 – Campo de temperatura 24h após a betonagem para as fases de betonagem: a) F1, b) F2, c) F3, d) F4 e e) F5. (temperatura em °C).

Tabela 3 – Temperaturas máximas e tempos decorridos desde o início da betonagem até o instante em que a temperatura máxima é atingida.

Fase	Temperatura máxima	Tempo decorrido desde a betonagem até à temperatura máxima
F1	23.9 °C	26 h
F2	30.1 °C	30 h
F3	40.4 °C	29 h
F4	43.4 °C	22 h
F5	35.3 °C	36 h

Em face dos resultados da análise térmica confirma-se a tendência expectável de uma elevação de temperatura relativamente baixa nas fases F1, F2 e F5, por se tratar de peças com menores espessuras. Os resultados também apontam para um maior risco de fissuração na fase F4, na qual a temperatura máxima, além de ser mais elevada, é atingida mais cedo do que no caso da fase F3 (ou seja, num instante para o qual o betão apresenta uma menor resistência).

Na Figura 5 ilustra-se a comparação da temperatura monitorizada e calculada no ponto PC60 (localização identificada na Figura). Também são apresentadas as temperaturas máximas verificadas ($T_{\text{monitorizado}}^{\text{max}}$) e calculadas ($T_{\text{modelo}}^{\text{max}}$) no PC60.

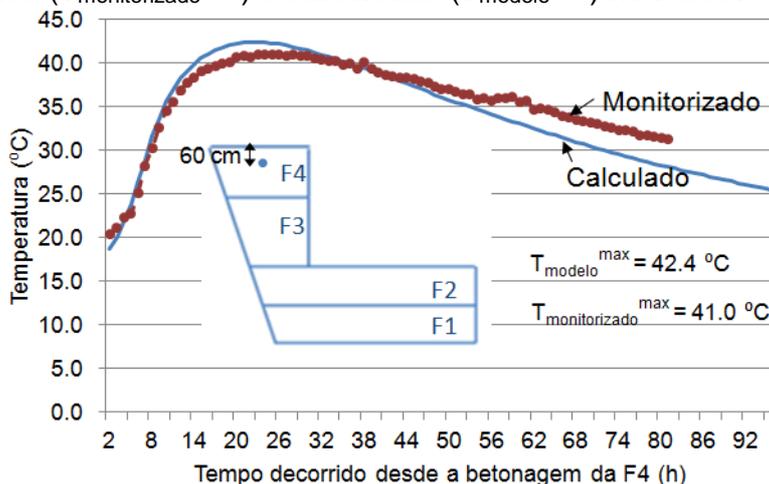


Figura 5 – Comparação da evolução de temperatura no ponto PC60 da fase F4 – monitorizado vs modelo numérico.

Os resultados apontam para uma boa capacidade do modelo simular a evolução de temperaturas no ponto monitorizado, evidenciando, no entanto, ligeiros desvios associados às simplificações adotadas, mas que no entanto não põem em causa a capacidade preditiva dos modelos do ponto de vista prático de engenharia.

Tendo em conta as propriedades mecânicas consideradas, decidiu-se fazer um estudo exploratório do nível das tensões normais atingido no betão. As evoluções das tensões no plano perpendicular à secção analisada nos pontos designados por PCEN e PSUP são apresentadas na Figura 6.

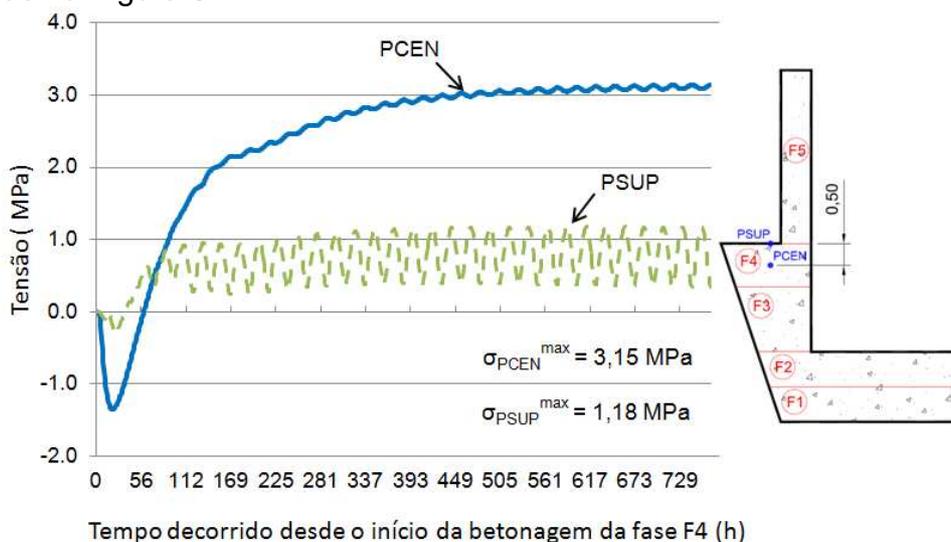


Figura 6 – Evolução das tensões no ponto PCEN e PSUP da fase F4.

O valor das tensões calculadas deve ser interpretado com alguma precaução, na medida em que, tal como já foi referido, o modelo de análise adotado foi de estado plano de

deformação que considera restrição total na direção longitudinal do descarregador. Na realidade, a restrição não é total (peça com cerca de 14m de desenvolvimento), pelo que os níveis máximos de tensões indicados na Figura 6 deverão ser considerados como majorantes das tensões reais. Assim sendo, as tensões calculadas neste artigo deverão ser encaradas como meramente indicativas, sendo apresentadas essencialmente para comparação de risco de fissuração entre cenários distintos.

Como consequência do que acaba de ser dito, as ilações deste artigo em termos de risco de fissuração serão essencialmente baseadas nas temperaturas calculadas (gradientes térmicos no espaço e no tempo), aproveitando-se os resultados das análises mecânicas para confirmação das tendências observadas nos campos de temperatura.

4 Análises paramétricas

Uma vez verificada a capacidade do modelo térmico para simular adequadamente as variações de temperatura na zona corrente do descarregador, foram realizados estudos paramétricos recorrendo-se a simulações numéricas para determinar a alteração do risco de fissuração associada a potenciais modificações no processo construtivo (particularmente no que diz respeito aos ciclos entre betonagens).

O modelo utilizado nos estudos paramétricos foi baseado no modelo já elaborado para validação da simulação numérica, ou seja, as análises foram realizadas considerando-se a geometria da zona corrente do descarregador. Assim, foram consideradas as mesmas fases de betonagem e a mesma malha de elementos finitos apresentadas na Figura 2. As modificações realizadas no modelo limitaram-se à composição do betão e às variáveis do estudo que foram: o tempo decorrido no intervalo das betonagens F3-F4 e F4-F5; e a temperatura inicial do betão.

Pelos motivos já mencionados anteriormente, apesar do modelo numérico implementado ser do tipo termo-mecânico, optou-se por avaliar os riscos de fissuração essencialmente através dos resultados do modelo térmico.

4.1 Situação de referência e variáveis de estudo

A situação de referência estudada corresponde a um cenário de Verão, considerado desfavorável para o risco de fissuração. Fixando-se as condições ambientais, foram realizadas análises paramétricas a um conjunto de variáveis de estudo que permitiram tirar ilações acerca da possibilidade de efetuar propostas de alteração ao faseamento construtivo.

Um dos aspectos a ter em conta no estabelecimento das situações de referência é a temperatura inicial do betão aquando da betonagem. Considerou-se a temperatura inicial máxima aceitável de $T_{bet}=25^{\circ}\text{C}$ (de acordo com as condições técnicas do contratante), representando o pior cenário em termos de risco de fissuração nesta época do ano. O intervalo entre betonagens é igual ao intervalo mínimo entre betonagens especificado nas condições técnicas da obra para os elementos mais espessos, ou seja, um intervalo de 4 dias.

As modificações no processo construtivo aqui estudadas contemplam os tempos de intervalo entre as betonagens das fases F3 e F4 (F3-F4) e fases F4 e F5 (F4-F5). Além disso, avaliou-se o impacto da alteração da temperatura inicial do betão da fase F4 nos

casos onde o intervalo entre betonagens considerado é de 2 dias. Um resumo do conjunto de estudos paramétricos realizado é apresentado na Tabela 4. Em todos os casos considerou-se que a cofragem era retirada 2 dias após a betonagem, independentemente do intervalo entre as betonagens (com exceção da fase F3, na qual a cofragem é retirada somente no momento de descofragem da fase F4).

Tabela 4 – Análise paramétrica.

Análise	Condição ambiental	Tempo decorrido no intervalo entre betonagens F3-F4 e F4-F5	Temperatura inicial do betão da fase F4
VER25T4D (REF)	Verão	4 dias	25 °C
VER25T3D	Verão	3 dias	25 °C
VER25T2D	Verão	2 dias	25 °C
VER23T2D	Verão	2 dias	23 °C
VER21T2D	Verão	2 dias	21 °C

4.2 Condições ambientais

As temperaturas horárias consideradas nas simulações correspondem às registradas no dia de temperatura média mais elevada ocorrida no cenário de Verão. Para o estabelecimento da variação diária da temperatura a incluir nos modelos, criou-se uma evolução fictícia das temperaturas ambientais selecionando-se o dia mais quente do ano de 2009 e replicando-o ao longo do tempo de análise (dia caracterizado por uma temperatura mínima e máxima diária iguais a, respectivamente, 20 °C e 33 °C). Para isto, foram utilizados dados de uma estação meteorológica próxima do local da obra. Para que a distribuição de temperaturas no maciço de granito utilizada na simulação numérica se assemelhasse à real, optou-se por simular 3 meses de exposição do granito às temperaturas ambientes antes de qualquer betonagem (fase F0). As temperaturas ambientes adotadas para esse período correspondem às temperaturas médias horárias registradas pela estação meteorológica mais próxima da obra nos 3 meses que antecedem o período do cenário da betonagem.

4.3 Materiais

Para o estudo paramétrico foram consideradas novas composições de betão apresentadas pela contratante, as quais se encontram na Tabela 5 (alteração ocorrida após as simulações/betonagens versadas na Secção 3 deste artigo).

Tabela 5 - Composição dos betões utilizados no estudo paramétrico.

Componente	Quantidade (kg/m³)	
	C30/37 S1 (fases F1 e F2)	C30/37 S3 (fases F3, F4 e F5)
Brita	1203.0	1170.0
Areia 0/8	611.0	611.0
Cimento tipo I 42.5 R	224.0	238.0
Cinzas Volantes	96.0	102.0
Pozzolite 390 S	2.2	3.4

Água	179.0	190.0
------	-------	-------

Os parâmetros necessários para a simulação numérica do potencial de geração de calor do betão foram determinados de forma análoga à já descrita na anterior secção, obtendo-se: $E_a = 5.33798 \times 10^3$ K; $A_t = 7.88928 \times 10^{10}$ W e $Q_{pot} = 8.29472 \times 10^7$ J no caso do betão C30/37 S1 (fases 1 e 2) e $E_a = 5.33798 \times 10^3$ K; $A_t = 8.38236 \times 10^{10}$ W e $Q_{pot} = 8.81314 \times 10^7$ J no caso do betão C30/37 S3 (fases 3, 4 e 5). Relativamente à condutividade térmica e ao calor específico, foram adotados, para ambos os betões, os valores de referência: $k=2.6$ W·m⁻¹·K⁻¹ e $\rho_c=2400$ kJ·m⁻³·K⁻¹.

4.4 Parâmetros de controlo

Os parâmetros de controlo adotados nos estudos paramétricos foram: gradiente temporal e gradiente espacial de temperatura, ilustrados de forma esquemática na Figura 7.

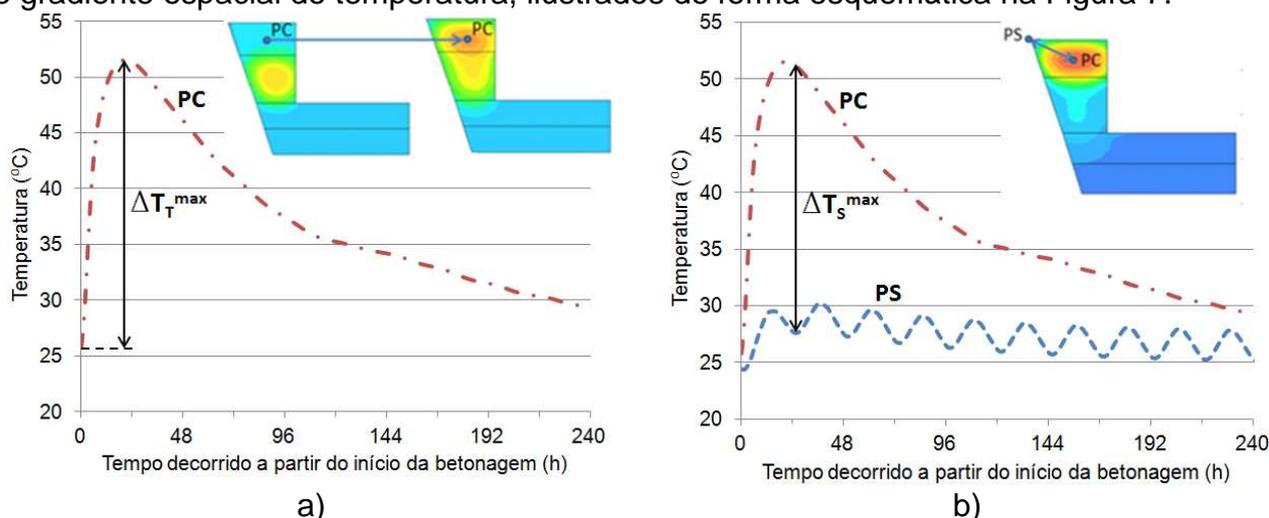


Figura 7 – Esquema representativo dos parâmetros de controlo: a) gradiente temporal de temperatura; b) gradiente espacial de temperatura.

O gradiente temporal de temperatura (ΔT_T) corresponde à variação de temperatura em qualquer ponto observada ao longo do tempo desde o instante da betonagem. Este gradiente está relacionado ao grau de restrição externa do elemento estrutural. No contexto deste estudo o gradiente temporal será avaliado sistematicamente no ponto de cada fase em que é atingida a máxima temperatura da mesma. Por sua vez, o gradiente espacial de temperatura (ΔT_S) corresponde ao maior valor da diferença de temperatura entre dois pontos pertencentes à mesma fase de betonagem para um mesmo instante. Este parâmetro diz respeito à restrição interna do elemento.

4.5 Discussão dos resultados

4.5.1 Redução dos intervalos entre betonagens

A Figura 8 apresenta a evolução das temperaturas do betão para um cenário de Verão e temperatura inicial do betão de 25°C (com designação VER25T). Nela são apresentadas ANAIS DO 54^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012 – 54CBC

as evoluções de temperatura nos pontos que apresentam temperaturas máximas e mínimas no betão da fase F4 para intervalos entre betonagens de 4, 3 e 2 dias, respectivamente. Também são apresentados os gradientes temporais (ΔT_T) e espaciais (ΔT_S) máximos obtidos em cada um dos casos.

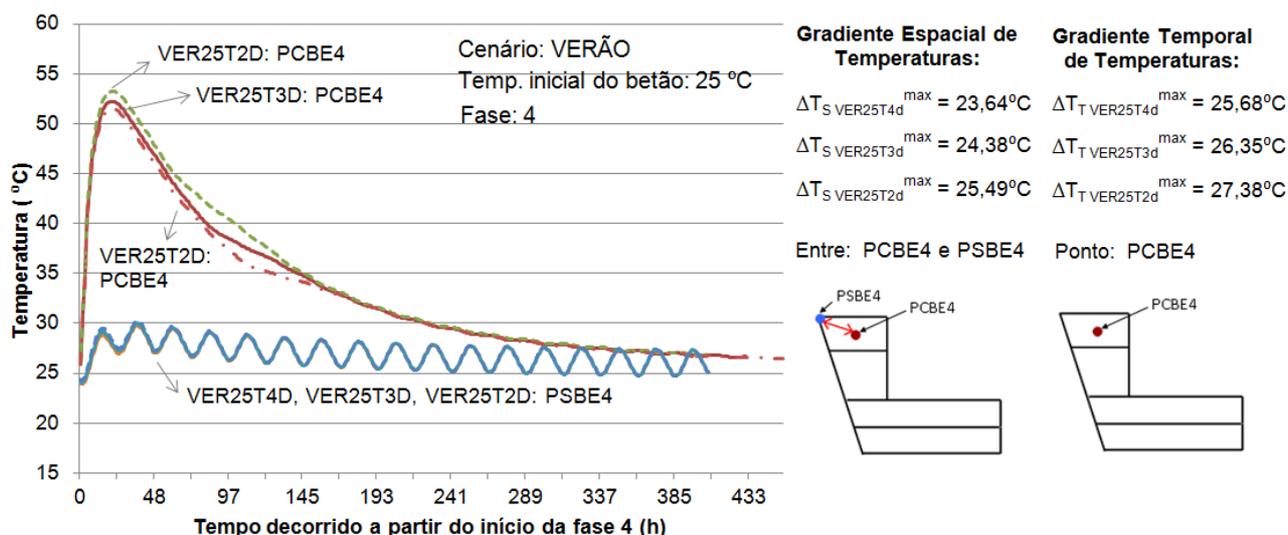


Figura 8 – Evolução das temperaturas do betão da fase F4 – Cenário: Verão / Temperatura inicial do betão = 25 °C / Tempo entre betonagens = 4 dias.

Verifica-se uma tendência de aumento dos gradientes de temperatura com a redução dos intervalos entre betonagens. Os resultados indicam aumentos de 3.1% e 2.5% nos gradientes espacial e temporal de temperatura, respectivamente, quando se reduz o intervalo entre betonagens F3-F4 e F4-F5 de 4 dias para 3 dias. Já para o caso da redução do intervalo de 4 para 2 dias, os aumentos são, respectivamente de 7.8% e 6.6%.

4.5.2 Temperatura inicial do betão

Tendo em conta que os gradientes térmicos constatados no cenário de referência de Verão são elevados, e visto que a diminuição do tempo decorrido entre as betonagens F3-F4 e F4-F5 provoca um aumento nesses gradientes, optou-se por avaliar qual a diminuição da temperatura inicial do betão da fase F4 (relativamente ao cenário de referência com 25°C) que proporcionaria gradientes térmicos associados ao cenário com 2 dias entre betonagens equivalentes aos obtidos no cenário de referência (4 dias entre betonagens). A Figura 9 ilustra as evoluções das temperaturas num ponto central e noutra superficial do betão da fase F4. Os gráficos correspondem a diferentes temperaturas iniciais do betão da fase F4. Também são apresentados os gradientes máximos de temperatura, temporais e espaciais, para cada um dos casos estudados.

Os dados ilustrados na Figura 9 mostram uma redução dos gradientes espaciais de temperatura com a redução da temperatura inicial do betão da fase F4. O mesmo não ocorre para o caso dos gradientes temporais de temperatura, que indicam um aumento com o resfriamento do betão. Ao observarmos os resultados verifica-se que os gradientes temporais de temperatura aumentam com a redução da temperatura inicial do betão pelo facto de, no cenário de Verão, a redução da temperatura máxima atingida no ponto

central do betão não acompanhar a redução da temperatura feita inicialmente. No entanto, esse aumento de gradiente provavelmente não traduz num maior risco de fissuração do betão, uma vez que ocorre na fase em que o betão não possui rigidez suficiente para que as variações de temperatura gerem tensões internas significativas. Além disso, nessa fase inicial o núcleo da peça de betão encontra-se comprimido, surgindo as primeiras tensões de tração à medida que a massa de betão vai arrefecendo.

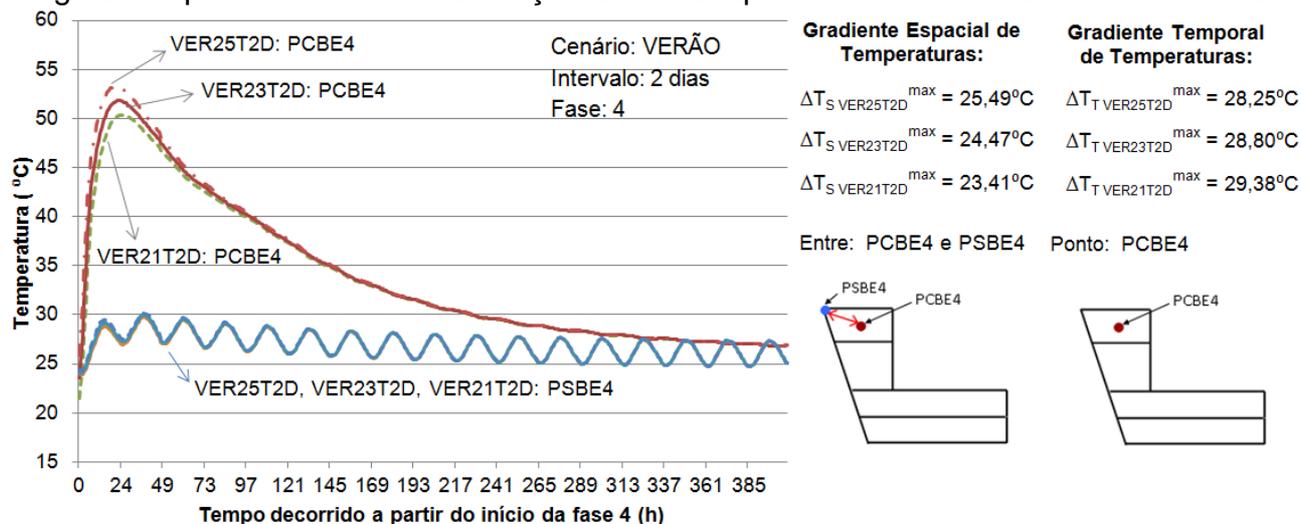


Figura 9 – Efeito da temperatura inicial do betão na evolução das temperaturas do betão da fase F4 – Cenário: Verão / Tempo entre betonagens = 2 dias.

A partir desses resultados e tomando como base os gradientes de temperatura correspondentes à situação de referência (VER25T4D) foi possível determinar, para intervalo entre betonagens de 2 dias, qual deve ser a temperatura máxima do betão da fase F4 que leva ao mesmo risco de fissuração da situação de referência. Para os casos em que o risco de fissuração é inferido a partir do gradiente espacial e temporal de temperaturas, os valores obtidos foram, respectivamente, de 21.4°C e 23.2°C.

5 Conclusões

No presente artigo foi apresentado um conjunto de estudos relativos à hipotética alteração dos ciclos construtivos a adotar na zona corrente do descarregador complementar de uma barragem. Os estudos em questão incidiram, essencialmente, sobre a redução do tempo de espera entre as fases que pertencem à zona espessa das paredes do descarregador. O estudo foi realizado através da análise termo-químico-mecânica em estado plano de deformação de um bloco considerado representativo da zona corrente. As interpretações de aumento/diminuição de risco de fissuração foram realizadas com base nos gradientes de temperatura calculados. Os estudos foram iniciados por um processo de validação das ferramentas de cálculo térmico utilizadas, demonstrando a sua capacidade de reprodução dos resultados obtidos por monitorização de temperaturas de um dos corpos do descarregador em estudo. Após a validação dos modelos de cálculo e parâmetros de modelação, procedeu-se a uma análise paramétrica dos efeitos da variação dos tempos envolvidos no ciclo construtivo, tendo como base o cenário de Verão. Tendo em conta os resultados apresentados, foram obtidas as seguintes conclusões:

- A redução dos intervalos entre betonagens no período de 4 para 3 e para 2 dias conduziu a aumentos dos gradientes térmicos observados, com o correspondente aumento do risco de fissuração;
- A redução da temperatura inicial de 25°C para 21.4°C num cenário de Verão e com 2 dias de intervalo entre betonagens, permite que seja atingido um risco de fissuração semelhante ao expectável para o cenário de referência (temperatura inicial de 25°C e 4 dias de intervalo entre betonagens).

Com o presente estudo foi possível constatar que a redução da temperatura de colocação do betão pode permitir acelerar os ritmos construtivos do descarregador, através da redução dos tempos de espera entre betonagens consecutivas (de 4 dias para 2 dias). De facto, mesmo sem simulação dos campos de tensões, é possível mostrar que o risco de fissuração é diminuído porque a ação que o provoca (temperatura desenvolvida) fica em níveis inferiores aos do cenário de referência.

O recurso a ferramentas de análise térmica revela-se, portanto, como uma mais valia importante na rentabilidade de processos de construção, permitindo opções mais arrojadas, sem que seja aumentado o risco de fissuração de origem térmica.

6 Referências

- Azenha, M.; Faria, R. (2007) Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower—A case study. *Engineering Structures*, 30, 2392-2400.
- Azenha, M.; Faria, R.; Ferreira, D. (2008) Monitorização e simulação numérica do processo construtivo de uma barragem gravidade de betão. *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008 – BE2008*, Guimarães, 2008.
- Azenha, M. (2009) Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages. *Tese Doutoramento*, Faculdade de Engenharia, Univ. do Porto, 375 pp.
- Bazant, Z.; Osman, E. Double power law for basic creep of concrete. *Materials and Structures*, RILEM. 1976, 9(49).
- Faria R, Azenha M, Figueiras JA. (2006) Modelling of concrete at early ages: application to an externally restrained slab. *Cement & Concrete Composites*, 2006; 28(6):572–85.
- Popiel CO, Wojtkowiak J, Biernacka B. (2001) Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2001; 25(5):301–9.
- Reinhardt, H., Blaauwendraad, J. and Jongedijk, J. (1982). Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties, *Int. Conf. Concrete at Early Ages*, Paris, France.