

Monitorização e simulação numérica do processo construtivo de uma barragem gravidade de betão



Miguel Azenha¹



Rui Faria²



Denise Ferreira³

RESUMO

A construção de barragens em betão envolve grandes volumes deste material, razão pela qual é necessário particular cuidado na definição do faseamento construtivo. De facto, o calor de hidratação gerado em cada fase de betonagem, bem como as diferenças térmicas entre fases subsequentes, podem conduzir a estados de tensão próximos da fissuração do betão. Neste trabalho descreve-se um estudo de caso aplicado a uma barragem gravidade. O estudo inclui monitorização de temperaturas e extensões na barragem (e caracterização laboratorial complementar), bem como a simulação numérica do comportamento estrutural através de modelos termo-mecânicos. É dada especial ênfase à escolha dos parâmetros de modelação, envolvendo quer as propriedades térmicas do betão, quer a influência de efeitos ambientais sobre o calor gerado (radiação solar, arrefecimento por evaporação, arrefecimento nocturno, convecção, etc.). A coerência verificada entre as previsões numéricas e os resultados experimentais demonstra a capacidade da combinação das metodologias experimentais de caracterização com os modelos numéricos de análise para a definição de faseamentos construtivos em barragens.

PALAVRAS-CHAVE

Hidratação; betão; primeiras idades; risco de fendilhação; barragem.

¹ Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil - LABEST, mazenha@fe.up.pt

² Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil - LABEST, rfaria@fe.up.pt

³ Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil - LABEST, mec06001@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

Nas barragens gravidade é usual a betonagem sequencial por camadas de espessura variável (rondando cerca de 1m de altura), quer com o objectivo de ajustar os volumes de betonagem a valores exequíveis, quer com o objectivo de controlar os efeitos do calor de hidratação. É sabido que a dissipação do calor de hidratação gerado em barragens é um processo bastante moroso, podendo durar vários anos até que a temperatura da estrutura se aproxime da temperatura média ambiente. Quer durante o processo construtivo, quer durante o processo de arrefecimento subsequente, são geradas tensões no betão cuja grandeza é apenas contabilizada em fase de projecto com recurso a modelos simplificados.

A capacidade de previsão dos campos térmicos em barragens de betão, tendo em conta o faseamento construtivo e as trocas de energia com o ambiente circundante (convecção, radiação, influência da radiação solar, condução de calor para a fundação, arrefecimento por evaporação, entre outros), bem como o consequente campo de tensões, pode ser considerada uma valiosa ferramenta no que diz respeito ao suporte de decisões relacionadas com a composição do betão e o faseamento construtivo. De facto, ao minimizar o número de fases de construção de uma barragem podem ser obtidas fortes economias de tempo e dinheiro, quer para o empreiteiro, quer para o dono de obra.

No sentido de aferir as capacidades de modelação numérica deste tipo de problemas, foi efectuada uma campanha de monitorização numa barragem gravidade de betão em construção no interior de Portugal, com cerca de 28m de altura e 20m de espessura na base, betonada em fases de 1.2m de altura. A campanha de monitorização envolveu duas etapas de betonagem da barragem, e compreendeu a utilização de sensores de temperatura e deformação (cordas vibrantes), bem como a betonagem de prismas para ensaios de caracterização laboratorial.

Neste trabalho, para além da descrição da campanha de monitorização encetada, serão descritas genericamente as metodologias de análise termo-mecânica utilizadas para a simulação numérica. As temperaturas e deformações medidas na campanha experimental serão comparadas com os resultados da análise termo-mecânica, validando os modelos numéricos e os parâmetros de modelação adoptados. Efectua-se também um comentário sobre o faseamento construtivo adoptado em obra, através da quantificação do risco de fissuração associado.

2. DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA

A barragem em estudo localiza-se em Pretarouca (Lamego), no Rio Balsemão. Trata-se de uma barragem gravidade com altura total de 28.5m desde a cota de fundação. Em serviço esta barragem deverá inundar uma área de cerca de 43.4ha, com um volume de água retida de 3 219 000m³. Transversalmente ao rio a barragem é composta por 20 corpos, cada um deles com faseamento construtivo próprio. Os corpos correspondentes à parte central da barragem, onde é materializado um descarregador de cheia, são designados pelos nº9 e 10. O estudo a que se refere este artigo centra-se no corpo nº9, cuja secção transversal e faseamento construtivo (24 fases de betonagem) são representados na Fig. 1a. Na Fig. 1b pode-se observar uma fotografia da barragem após a construção (vista de jusante), em que o paramento com degraus diz respeito às fases 9 (mais à esquerda) e 10 (mais à direita).

No corpo em questão foram utilizados dois tipos de betão: betão C16/20 nas zonas vizinhas dos degraus do descarregador (conforme limitação indicada na Fig. 1a) e betão de dosagem D200 na restante parte. A composição destes dois betões está reproduzida no Quadro 1. O terreno de fundação é de natureza granítica. Trata-se de uma barragem maioritariamente em betão simples; no entanto, na vizinhança de galerias e dos degraus dos descarregadores existem algumas armaduras em aço S500. Conforme se pode constatar na Fig. 1a, existem várias galerias técnicas no interior da barragem, que representam dificuldades adicionais em termos da modelação numérica. De facto, a consideração destas galerias na modelação numérica dos campos de temperatura ocorridos na barragem tem uma influência bastante importante, conforme se poderá verificar mais adiante. Saliente-se que este é um grau de refinamento na modelação que não foi encontrado na revisão bibliográfica efectuada no âmbito deste trabalho [1, 2].

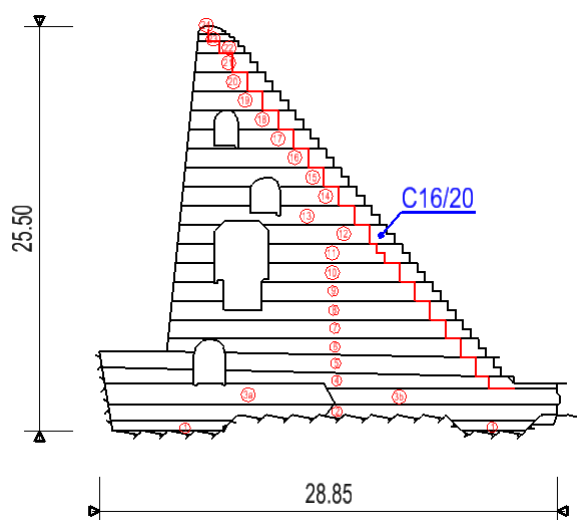


Figura 1. a) Corte transversal da barragem (bloco nº9); b) Fotografia da barragem - Julho/08.

Quadro 1. Composição dos betões utilizados.

	Dosagem (kg/m ³)	
	D200	C16/20
Areia 0/4	730	770
Brita 4/12	340	460
Brita 12/20	240	685
Brita 14/40	695	-
CEM II/A-L 42.5R	140	185
Cinzas volantes	60	75
Plastificante	2.4	2.3
Água	70	112.9

3. CAMPANHA DE MONITORIZAÇÃO

3.1 Considerações gerais

Dado que o objectivo principal do estudo se centra na validação das capacidades das ferramentas numéricas para a previsão das temperaturas e tensões que ocorrem na barragem, a monitorização in-situ assume-se como uma ferramenta fundamental ao providenciar resultados para comparação. Para esta aplicação em específico foram efectuadas medições de temperaturas e extensões no betão.

Devido ao facto de a entrada em obra só ter sido possível em Fevereiro de 2008, e tendo em conta que a construção do corpo nº9 havia sido iniciada em Novembro de 2007, foi apenas possível a monitorização na zona da fase 12, onde existe já algum estreitamento da barragem, e significativas perturbações devido à presença das galerias. Foi efectuada uma campanha de monitorização compreendendo duas fases: uma primeira, em que foram monitorizadas temperaturas em várias partes da fase 12; e uma segunda fase, em que foram monitorizadas temperaturas e extensões em várias zonas da fase 13, mantendo no entanto a medição de alguns dos pontos monitorizados na fase 12.

A campanha de monitorização prolonga-se numa perspectiva de longo prazo, estando o sistema de aquisição ainda em funcionamento à data de submissão deste artigo. Todos os sensores activos medem temperaturas e deformações desde o instante da betonagem, em intervalos de 10 minutos.

A fase 12 corresponde a uma fatia do corpo 9 com 1.2m de espessura, entre as cotas 905.8m e 907.0m. Conforme já referido, nesta fase foram apenas monitorizadas temperaturas, tendo sido utilizados dois conjuntos de sensores: 12 termopares tipo K (T1 a T12) e 5 sensores de temperatura resistivos do tipo PT100 (P1 a P5). O posicionamento dos sensores em corte transversal (fases 12 e 13) e em planta (fase 12) pode ser observado, respectivamente, na Fig. 2a e na Fig. 2b.

Chama-se a atenção para a presença de três tubos de PVC (tubos 1, 2 e 3) conforme indicado na Fig. 1, que funcionam de suporte a sensores de temperatura e de deformação quer na fase 12, quer na fase 13. Do posicionamento dos sensores pode observar-se que houve especial cuidado em tentar medir temperaturas ao longo da linha vertical do tubo 1, tentando obter o perfil vertical de temperaturas, uma vez que é nessa direcção que se esperam os maiores fluxos de temperatura. Há também medição de temperaturas ambiente quer na galeria, quer junto aos paramentos montante e jusante.

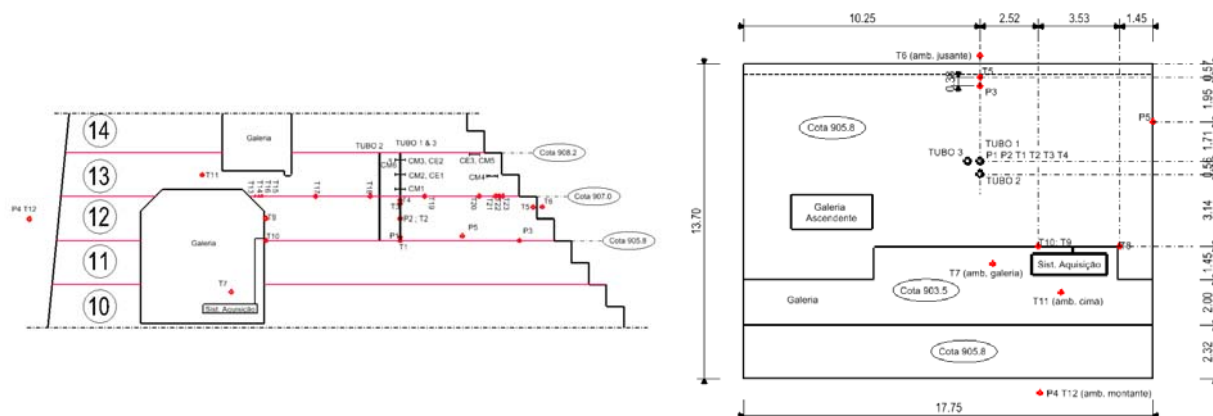


Figura 2. a) Posicionamento dos sensores em corte transversal; b) Posicionamento dos sensores em planta (fase 12).

A fase 13 corresponde a uma fatia do corpo nº9 com 1.2m de espessura entre as cotas 907.0 e 908.2. Nesta fase de betonagem, para além de medição das temperaturas (sensores T – termopares), foi efectuada medição das extensões com sensores de cordas vibrantes de base metálica (sensores CM) e extensómetros de cordas vibrantes de base plástica (sensores CE). Os sensores de cordas vibrantes também medem temperaturas, permitindo a compensação dos efeitos desta sobre as características de vibração das cordas, e por conseguinte a medição das extensões reais. O posicionamento dos sensores pode ser observado no corte representado na Fig. 2a, enquanto que a planta à cota 907 está reproduzida na Fig. 3a. Os sensores de deformação foram essencialmente colocados na direcção perpendicular ao eixo da barragem, por ser essa a direcção na qual se espera maior deformação associada a diferenças de temperatura. Na Fig. 3b pode observar-se o posicionamento dos sensores de deformação em obra na zona dos tubos em PVC. Assinala-se também na Fig. 2a os sensores de deformação CE3, CM4 e CM5 na zona dos degraus.

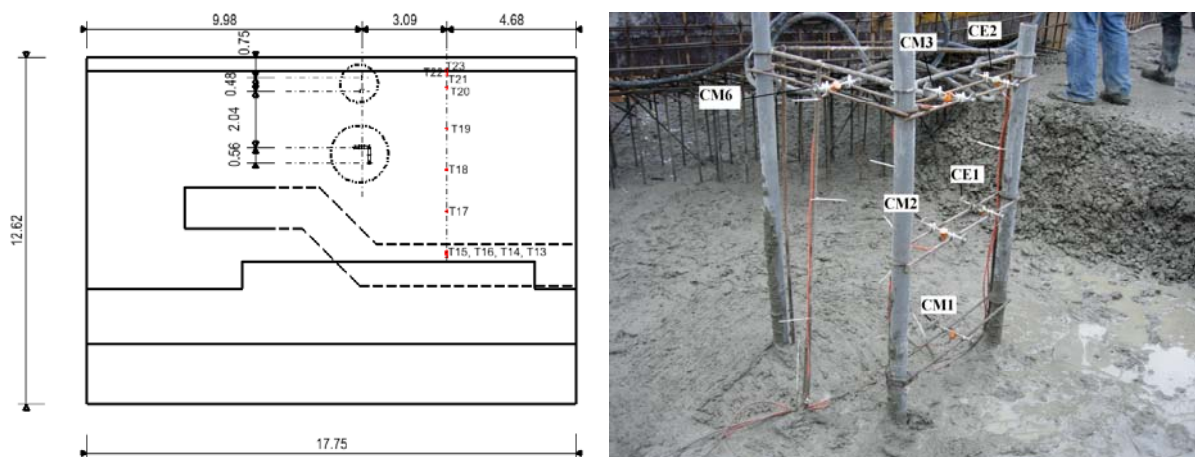


Figura 3. a) Posicionamento dos sensores em planta (fase 13); b) Foto ilustrativa do posicionamento dos sensores de deformação sobre os apoios dos tubos em PVC

Para além da monitorização descrita foram betonados os seguintes provetes para caracterização laboratorial de propriedades mecânicas do betão D200 (não foi feita qualquer caracterização mecânica para o betão C16/20): a) 4 prismas 15cm x 15cm x 60cm para caracterização do comportamento em fluência do betão, em carregamentos às idades: 1.8, 4.8, 7 e 28 dias; b) cubos e cilindros para ensaios de resistência a compressão e resistência à tracção (ensaio brasileiro) às idades de 1.5, 4.5, 7, 14 e 28

dias; c) retracção de secagem em ambiente caracterizado por $T=20^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\%$ - cura húmida até aos 2 dias de idade; e d) 6 cilindros (15cm diâmetro e 60cm de altura) para caracterização do módulo de elasticidade aos 7 e 30 dias de idade. Foi também efectuada a caracterização em calorímetro isotérmico [3] dos ligantes de ambos os betões, com o objectivo de aferir o seu potencial de geração de calor. Para uma descrição detalhada dos ensaios laboratoriais efectuados, o leitor poderá consultar o relatório [4].

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Metodologia de análise termo-mecânica

A metodologia de análise termo-mecânica utilizada é essencialmente idêntica a técnicas já descritas e utilizadas anteriormente pelos autores deste trabalho [5], pelo que não será descrita em detalhe neste artigo. Consiste na análise térmica da estrutura, seguida de uma análise mecânica que utiliza as temperaturas calculadas anteriormente como acções, tendo em consideração a evolução das propriedades mecânicas durante a hidratação do cimento. No que concerne ao modelo térmico é resolvida a equação de difusão de calor, baseada na Lei de Fourier,

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

em que k é a condutibilidade térmica e ρc é o calor específico volumétrico do betão, T é a temperatura e \dot{Q} é a taxa volumétrica de geração de calor por parte da reacção de hidratação do cimento. A parcela \dot{Q} tem os seus parâmetros definidos com base nos ensaios calorimétricos anteriormente mencionados, de acordo com a seguinte equação baseada na Lei de Arrhenius:

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

em que E_a é a energia de activação aparente, A é uma constante, α é o quociente entre o calor gerado até um dado instante e o calor total Q_{tot} de que é capaz a reacção química, $f(\alpha)$ é a função de geração de calor normalizada e R é a constante de Boltzmann. À Eq. (1) estão associadas condições fronteira relacionadas com fluxos convectivos, de radiação (ambiente/solar) e de arrefecimento por evaporação. Na modelação mecânica são de salientar determinados aspectos específicos das análises do betão durante as primeiras idades. Por um lado é fundamental a consideração do carácter evolutivo das propriedades mecânicas deste material, aspecto que neste trabalho foi atendido com base no Método da Maturidade (Idade Equivalente) [6], que permite exprimir as propriedades em cada ponto do modelo em relação às verificadas num ambiente de temperatura constante de referência, atendendo à evolução local de T . Por outro lado, o acentuado comportamento visco-elástico durante as primeiras idades do betão é tido em conta com recurso à Lei da Dupla Potência [7] (fluência básica)

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} (t')^{-m} (t - t')^n \quad (3)$$

em que E_0 é o módulo de elasticidade assintótico, t' é a idade do betão aquando do carregamento e ϕ_1 , m e n são parâmetros do modelo (ajustados de acordo com os resultados experimentais).

4.2 Simulação numérica: aspectos geométricos, malha e propriedades assumidas

Para simulação do campo de temperaturas foi simplificado considerado um modelo 2D, ignorando perdas de temperatura longitudinais à barragem. Uma parte do terreno de fundação foi modelada para simular a interacção térmica e mecânica entre a barragem e o granito subjacente. Foram utilizados elementos de 4 nós para o betão e o terreno, e elementos lineares de 2 nós para as fronteiras convectivas. No que concerne ao modelo mecânico foram utilizados elementos de 8 nós, tendo-se assumido um estado plano de tensão (logo ignorando as tensões desenvolvidas na direcção longitudinal à barragem). Esta opção pode parecer pouco evidente, mas há que ressaltar que se trata de uma barragem separada em vários corpos. Assim considerou-se fazer mais sentido ignorar a

restrição à deformação na direcção longitudinal na barragem do que considerá-la sob um estado plano de deformação, o que causaria tensões longitudinais elevadíssimas e irrealistas. A malha de elementos finitos, que pode ser observada na Fig. 4a (com os elementos de betão D200 a verde, os elementos C16/20 a vermelho e os elementos de terreno de fundação a azul), é estruturada, compreendendo apenas elementos quadrangulares. No que diz respeito a condições fronteira para o modelo térmico, e considerando uma fase genérica como a representada na Fig. 4b, definem-se as seguintes fronteiras: B1 representa o limite do terreno granítico, considerando-se que nesta fronteira não há qualquer transmissão de calor (fronteira adiabática); B2 representa a superfície do granito em contacto com o ar; B3 é a superfície montante da barragem (a dimensão desta fronteira vai aumentando à medida que vão sendo construídas mais fases da barragem); B4 é a superfície jusante (com dimensão crescente, tal como para B3); B5 diz respeito à fronteira superior da última fase construída num dado instante (é uma fronteira provisória que só existe a partir do instante que a fase correspondente é betonada, desaparecendo com o início da fase de betonagem seguinte); B6 representa a fronteira com o ambiente em zonas de interior de galerias (nestas fronteiras o betão está protegido de efeitos como a radiação solar, bem como do efeito do vento; esta fronteira só é activada quando a galeria é fechada totalmente pela face superior, sendo que até lá se comporta como a fronteira B5).

Em cada uma das fronteiras indicadas são considerados efeitos diversos, que se descrevem de forma genérica como segue (para mais detalhes consultar [4]):

- O efeito da temperatura ambiente exterior é tido em conta a partir dos resultados do sensor T7, posicionado no interior da galeria (ver Fig. 2a). As temperaturas medidas por este sensor não são afectadas pelos efeitos de radiação, que são contabilizados separadamente.
- O efeito da radiação solar é simulado numericamente [8], sendo modelada explicitamente a radiação solar incidente em cada superfície e em cada instante, tendo em conta a longitude, latitude, inclinação e orientação da superfície. É também tido em conta o efeito da nebulosidade e da turbulência atmosférica real, através da informação colhida por um sensor de radiação solar numa estação meteorológica relativamente próxima.
- O efeito da temperatura aparente do céu nocturno, que afecta fortemente as trocas por radiação entre o betão e o ambiente circundante, é tido em consideração, conduzindo a um fenómeno de arrefecimento.
- São considerados o efeito de arrefecimento por contacto com água e o arrefecimento por evaporação: algum tempo antes da betonagem a superfície da última fase betonada é limpa com recurso a jactos de água. A água bombada está genericamente a temperaturas iguais ou inferiores à ambiente, e por condução remove algum calor da superfície. Por outro lado, no período de tempo que medeia entre a limpeza com jacto de água e a betonagem da fase seguinte, há lugar a alguma evaporação de água superficial empoçada, o que conduz também a perdas térmicas (correspondentes à entalpia de evaporação). No período imediatamente após a betonagem o betão fresco encontra-se saturado, tendo também tendência a perder água por evaporação na superfície directamente exposta ao ambiente (i.e., não cofrada); esta evaporação conduz também a perdas térmicas superficiais. Os efeitos de arrefecimento mencionados neste item foram considerados de forma simplificada na modelação, uma vez que não existe informação acerca da temperatura da água lançada sobre a superfície, nem do instante de início e duração da actuação da mesma; não houve também informação acerca das capacidades evaporativas do ambiente (relacionadas com a pressão de vapor atmosférica instantânea e com os coeficientes de convecção de humidade).
- Os efeitos do vento (estimado de forma medianizada) e da existência ou remoção das cofragens foram considerados através de coeficientes de convecção apropriados, calculados de acordo com as metodologias indicadas em [9].

Para o modelo mecânico apenas foi considerada a condição fronteira correspondente à linha horizontal do limite inferior da fundação (granito), com restrição ao movimento na direcção vertical.

No que concerne às propriedades materiais para os modelos térmico e mecânico, não é possível no espaço limitado deste artigo fazer referência aos parâmetros adoptados (a maior parte dos quais obtidos a partir das campanhas experimentais complementares efectuadas em laboratório), pelo que para mais informações o leitor é remetido para [4]. Como condições iniciais foi considerada uma temperatura de 13.4°C para o granito (temperatura média anual para a zona em questão) e de 15°C para o betão (com base em medições efectuadas aquando da campanha de monitorização). A análise foi

conduzida por um período total de 194 dias desde a primeira betonagem (20 de Novembro de 2007), terminando cerca de 1 mês após a betonagem da fase 24. Devido à inclusão explícita das temperaturas diárias medidas no modelo, bem como da radiação solar incidente e outros fenómenos que variam durante cada dia, foram seleccionados passos constantes de análise de 1h.

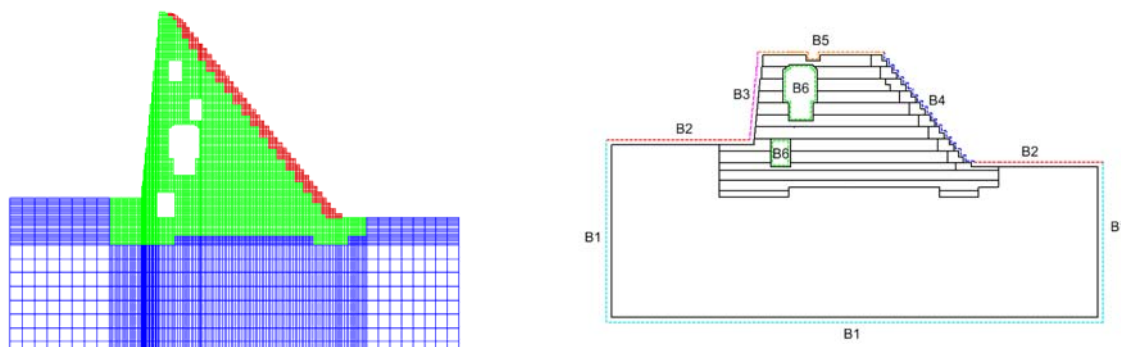


Figura 4. a) Malha de elementos finitos adoptada; b) Nomenclatura genérica de condições fronteira.

4.3 Resultados da simulação numérica

A comparação entre resultados da monitorização e os provenientes da simulação numérica resultou em coerências bastante satisfatórias, quer no que diz respeito a temperaturas (ver Fig. 5a), quer no que diz respeito a extensões (ver Fig. 5b). Estas coerências permitiram a obtenção de uma confiança acrescida, quer nos modelos de simulação, quer na escolha de parâmetros e opções de modelação, pelo que os resultados numéricos podem ser encarados como representativos do que realmente ocorreu na obra.

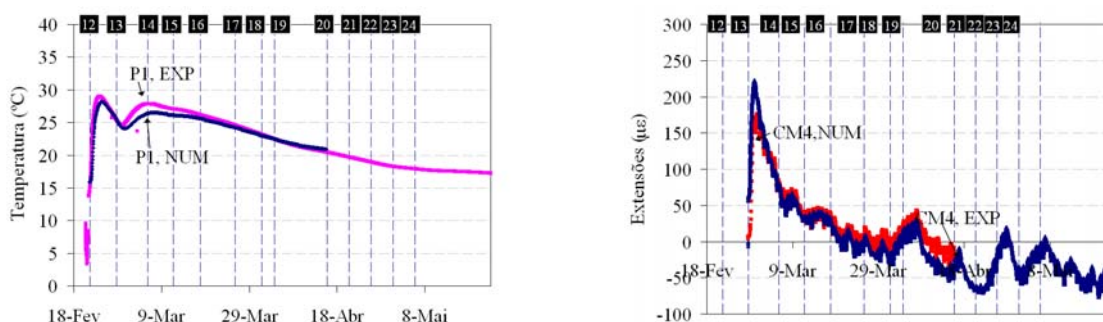


Figura 5. Resultados da monitorização v.s. simulação numérica: a) Temperaturas em P1; b) Extensões em CM4.

O desenvolvimento de temperaturas na barragem ao longo do faseamento construtivo pode ser observado na Fig. 6 que representa alguns instantes relevantes. É notório que em todas as fases de betonagem se observa que as temperaturas desenvolvidas no betão fresco são influenciadas pelas temperaturas das fases de betonagem anteriores. Por outro lado, é observável o efeito da existência das galerias, separando dois pólos de temperaturas elevadas (particularmente no caso da fase 15, 131h após a betonagem).

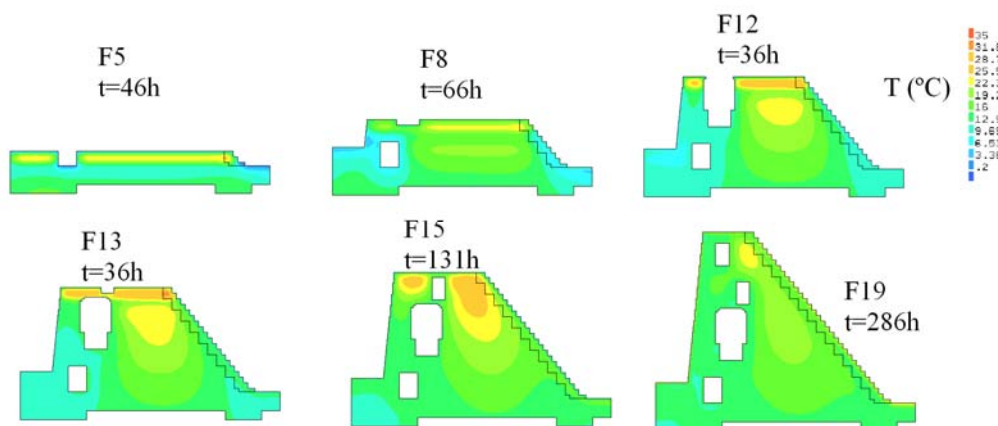


Figura 6. Evolução de temperaturas calculadas em vários instantes da obra.

Finalmente são apresentadas na Fig. 7 as temperaturas e as tensões normais calculadas na direcção horizontal durante as fases 12 e 13 (fases em que houve monitorização), onde se podem observar as diversas interacções de temperatura no seio de cada fase de betonagem, bem como as consequentes tensões. Com apoio nas seguintes partes destacadas da Fig. 7 é possível efectuar comentários específicos:

- F12, t=1h: betão da fase 12 é colocado a 15°C de temperatura e as tensões instaladas são nulas.
- F12, t=41h: betão da fase 12 atinge temperaturas na vizinhança dos 30°C nas zonas mais interiores, proporcionando o aparecimento de tensões de compressão nas áreas mais quentes (devidas à expansão impedida).
- F12, t=71h: o arrefecimento do betão da fase 12 leva à migração da sua zona de temperaturas máximas para junto da zona de temperaturas máximas da restante barragem. A zona comprimida no interior da fase 12 acompanha esta migração.
- F12, t=136h: último instante da fase 12, com agravamento das condições constatadas para o instante t=71h.
- F13: repetição do ciclo anteriormente constatado. A expansão térmica do betão da F13 conduz ao aparecimento de tracções no interior da F12, que acabam por se dissipar parcialmente devido ao arrefecimento parcial de F13.

É de salientar o facto de as tensões de tracção máximas verificadas ocorrerem ora nas interfaces entre fases, ora no núcleo das fases de betonagem, estando no entanto sempre abaixo de 1MPa, o que é indicativo de um baixo risco de fissuração dado que a resistência à tracção do betão D200 às 36 h de idade é de 0.8MPa (idade em que na obra não se verificam tensões de tracção significativas), evoluindo para 1.7MPa aos 4.5 dias de idade e 2.4MPa aos 28 dias.

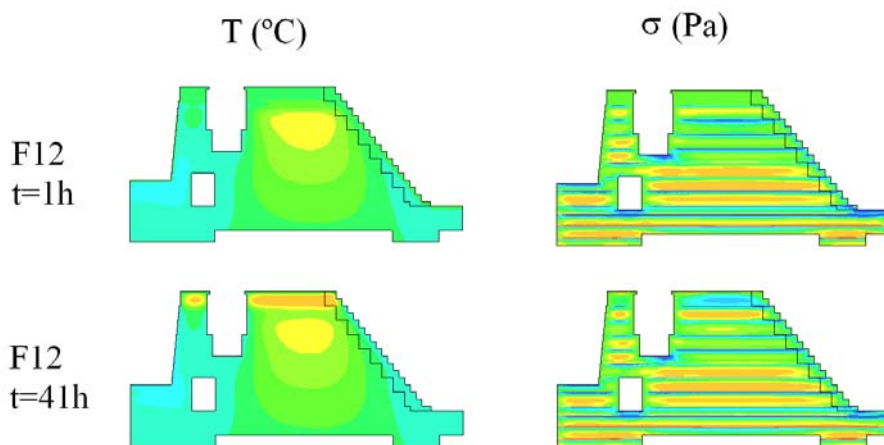


Figura 7. Evolução de temperaturas e correspondentes tensões horizontais durante as fases 12 e 13 (tensões de tracção com sinal positivo).

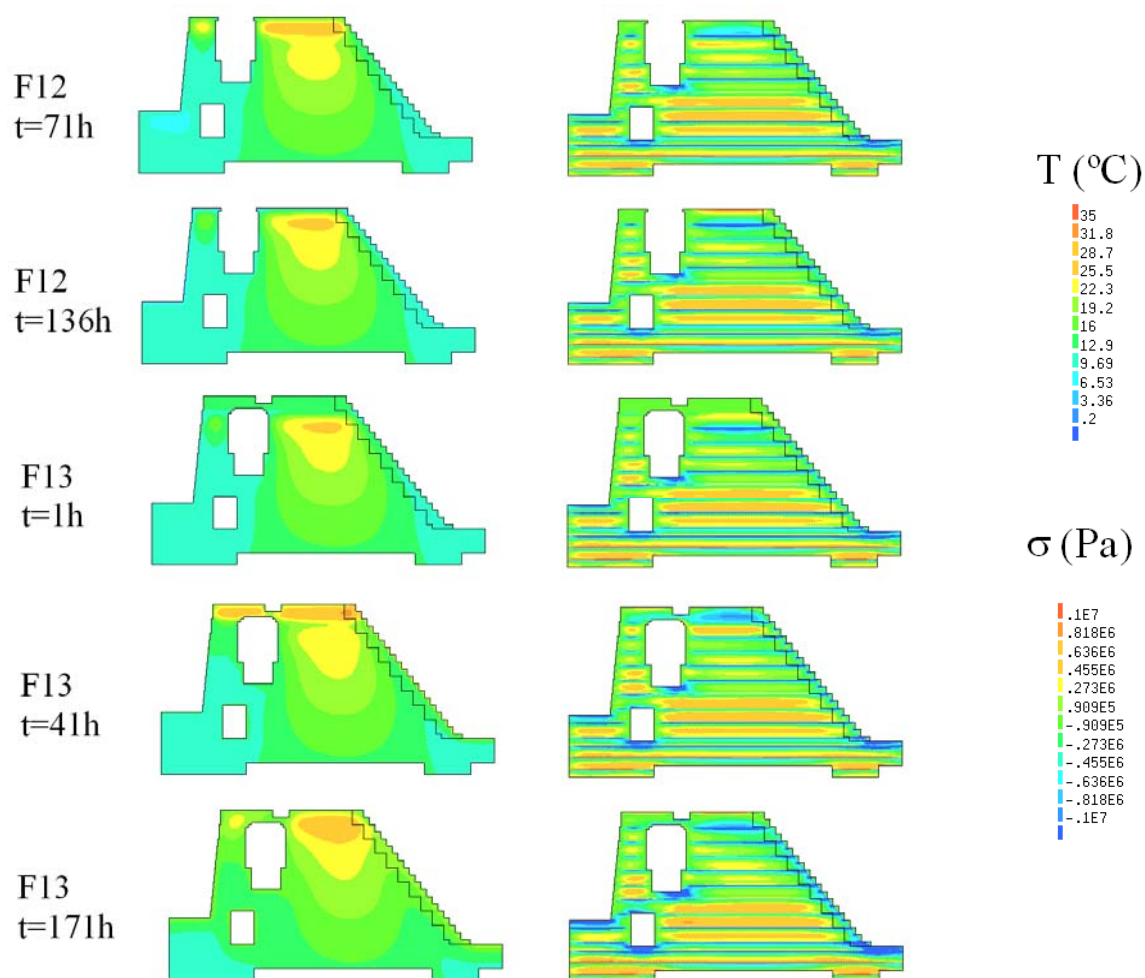


Figura 7. (cont.) Evolução de temperaturas e correspondentes tensões horizontais durante as fases 12 e 13 (tensões de tracção com sinal positivo).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho descreveram-se sucintamente as campanhas de monitorização e de caracterização material relacionadas com uma barragem gravidade, conduzidas com o objectivo de validar modelos numéricos de previsão de temperaturas e tensões em estruturas deste tipo desde as primeiras idades. Os referidos modelos numéricos fazem consideração explícita do potencial de geração de calor do betão (com base em parâmetros obtidos em ensaios calorimétricos), bem como de outros fenómenos frequentemente ignorados ou considerados de forma muito simplificada, como é o caso da radiação solar, do arrefecimento por evaporação e do arrefecimento nocturno por radiação. O interesse da análise efectuada é acrescido pelo facto de se tratar de uma barragem com galerias que ocupam parte significativa da secção transversal, situação pouco explorada na literatura. A comparação dos resultados da monitorização com as simulações numéricas permitiu constatar os seguintes factos:

- Os modelos disponíveis têm boas capacidades no que diz respeito à simulação das temperaturas, particularmente se forem contabilizados os efeitos da radiação solar e das perdas por arrefecimento (evaporação, condução por água e radiação). Apesar de não ser realista esperar previsões de temperatura exactas, devido à imprevisibilidade das condições meteorológicas e também à impossibilidade de ter em conta de forma rigorosa fenómenos como a evaporação por arrefecimento, as previsões de temperatura efectuadas revelaram-se bastante satisfatórias em termos de tendência geral e ordens de grandeza.
- Em conjunto com a boa previsão do campo de temperaturas, as caracterizações mecânicas conduzidas permitiram uma boa previsão das extensões que se desenvolveram no betão, o que se reflectiu na bastante satisfatória coerência entre resultados experimentais e numéricos.

- O risco de fissuração de origem térmica revelou-se bastante baixo nesta aplicação, podendo indiciar a possibilidade de adopção de esquemas construtivos com menos fases de betonagem.

A confiança nos modelos adoptados permite concluir que as metodologias apresentadas mostram potencial de obtenção de previsões de campos de tensões de qualidade elevada em barragens, podendo funcionar como ferramentas importantes de apoio à decisão no que concerne a faseamentos construtivos e composições dos betões a adoptar.

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 primeiro autor. O apoio concedido em obra pela Teixeira Duarte S.A., particularmente pelo Engº Teófilo Silva, e pelos Senhores Augusto e Vasco foi de crucial importância para o sucesso da campanha de monitorização realizada.

REFERÊNCIAS

- [1] ICOLD, *Thermal analysis of a RCC dam body during construction - Synthesis - Final Version*. 2004, International Commission On Large Dams.
- [2] LEITÃO, N., BATISTA, A., e CASTRO, A. *Análise termo-mecânica de estruturas maciças de betão, aplicação a barragens de betão compactado com cilindros*. in *Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia*. 2007. Porto, Portugal.
- [3] SILVA, L., AZENHA, M., e FARIA, R. *Técnica da calorimetria isotérmica para caracterização do calor de hidratação do cimento*. in *4ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas JPPE2006*. 2006. Lisboa.
- [4] AZENHA, M., FERREIRA, D., e FARIA, R., *Monitoring and modelling early age structural behaviour of a concrete dam*, LABEST, Editor. 2008.
- [5] FARIA, R., AZENHA, M., e FIGUEIRAS, J.A., *Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab*. *Cement and Concrete Composites*, 2006. 28(6): p. 572-585.
- [6] CARINO, N. e LEW, H. *The maturity method: from theory to application*. in *2001 Structures Congress & Exposition*. 2001. Washington DC: ASCE.
- [7] BAZANT, Z.P., *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. 1988, Chichester: John Wiley & Sons, Inc. xxii, 459 s.
- [8] BREUGEL, K. e KOENDERS, E., *Solar Radiation. Effect of solar radiation on the risk of cracking in young concrete*. 2001, IPACS Document, Subtask 4.2.
- [9] AZENHA, M., et al., *Heat and moisture transfer between concrete and the environment*, in *LABEST - internal reports*. 2005.