

## MODIFICAÇÃO DO ARRANJO DAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO DE BARRAGENS ABÓBADA, VISANDO ACELERAR A CONSTRUÇÃO



Rui Faria  
 Prof. Catedrático  
 FEUP  
 rfaria@fe.up.pt



José Conceição  
 Doutorando Eng.<sup>a</sup> Civil  
 Ripórtico – Engenharia  
 jose.conceicao@  
 riportico.com



Miguel Azenha  
 Prof. Auxiliar  
 Univ. do Minho  
 miguel.azenha@  
 civil.uminho.pt



Manuel Miranda  
 Prof. Associado  
 FEUP  
 manuelpinhomiranda@  
 gmail.com

### SUMÁRIO

Nas barragens abóbada ocorrem significativas deformações volumétricas durante a construção, em resultado do calor libertado pela hidratação do cimento e da baixa condutividade térmica do betão. Se restringidas estas deformações originam trações no betão, e consequentemente a fissuração da abóbada. Por este motivo tradicionalmente as barragens abóbada são construídas com base numa sucessão de blocos (ou consolas) individuais, separados por juntas de contração ao longo de toda a altura. Isto implica que os volumes de betonagem diminuem da fundação para o coroamento, o que reduz progressivamente a eficiência no aproveitamento dos equipamentos de produção e colocação de betão instalados em obra. Este problema pode ser atenuado com uma abordagem alternativa, interrompendo algumas juntas de contração a partir de determinada cota, reunindo blocos contíguos num único, permitindo assim aumentar o volume de betão a ser colocado em cada camada a partir de então. Apesar dos benefícios desta estratégia de construção, ela não é uma prática usual, devido à falta de resultados numéricos que comprovem a correspondente viabilidade. O presente artigo tem como objetivo avaliar a possibilidade de modificar a disposição das juntas de contração. A partir de análises termomecânicas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF) avalia-se se a referida disposição alternativa das juntas de contração conduz a um risco de fissuração do betão idêntico ao obtido com a disposição tradicional, o que permitiria obter benefícios económicos com a redução dos custos e do tempo de construção.

**Palavras-chave:** barragens abóbada, juntas de contração, pós-refrigeração, análises termomecânicas.

## 1. INTRODUÇÃO

Em estruturas massivas de betão os gradientes térmicos que ocorrem devido ao calor libertado durante a hidratação do cimento, bem como à baixa condutividade térmica do material, conduzem a deformações volumétricas significativas que, se restringidas, induzem elevadas tensões de tração [1]. Por esta razão, as barragens abóbada são construídas como uma sequência de monolitos (ou blocos) contíguos, separados por juntas de contração quase verticais, geralmente espaçadas de 15-20m [2] e tradicionalmente desenvolvendo-se ao longo de toda a altura da estrutura. Como ocorre uma grande redução da espessura da abóbada ao longo da altura dos monolitos, em cada bloco ocorre igualmente uma considerável diminuição dos volumes de betonagem desde a fundação até ao coroamento. Assim, durante a construção a eficiência na utilização dos equipamentos instalados para produção e colocação de betão diminui progressivamente ao longo do tempo, pelo que a utilização média da central de betão corresponde apenas a 60-75% da respetiva capacidade máxima [2].

Esta deficiência pode ser mitigada com a interrupção de algumas juntas de contração no terço superior da barragem. Uma estratégia semelhante foi aplicada com sucesso na barragem de Las Portas (ver Figura 1), onde algumas juntas de contração (representadas em metade da abóbada por linhas descontínuas de cor castanha) foram interrompidas para unir três blocos num único junto ao coroamento, mantendo-se as restantes juntas, representadas por linhas contínuas negras, ao longo de toda a altura da barragem. Na Figura 1 é visível que no topo de cada junta interrompida foi construída uma galeria circular, orientada segundo a linha de nível do plano da junta e atravessando quase toda a espessura da barragem, tendo em vista eliminar a singularidade no campo de deformações do betão e a correspondente concentração de tensões. Como medida construtiva cautelara, sobre a galeria circular devem ser colocadas armaduras de distribuição de tensões, semelhantes às utilizadas nas galerias de visita.



Figura 1. Juntas de contração na barragem de Las Portas

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de modificação do arranjo tradicional das juntas de contração, a fim de melhorar a utilização da capacidade dos equipamentos de produção e colocação de betão instalados no estaleiro, e assim acelerar a construção de barragens abóbada. Por meio de simulações numéricas baseadas no MEF, avaliar-se-á se um arranjo alternativo das juntas de contração (semelhante ao adotado na

barragem de Las Portas) conduz a um risco de fissuração do betão idêntico ao obtido com o arranjo tradicional. Para cada tipo de arranjo das juntas de contração – alternativo ou tradicional – é realizada uma simulação termomecânica independente, com o objetivo de analisar o comportamento dos blocos centrais de uma barragem abóbada durante a construção.

A modelação termomecânica consiste no cálculo inicial do campo térmico induzido pela libertação do calor de hidratação do cimento, e posterior determinação do campo de tensões na barragem. O problema térmico é reproduzido através de um modelo transiente, que leva em conta o calor gerado pela hidratação do cimento, o calor que flui para o ambiente, bem como as serpentinas de pós-refrigeração existentes. Para o problema mecânico o comportamento do betão dependente do tempo é descrito com base na teoria da viscoelasticidade linear para materiais com maturação.

É de realçar que o efeito das serpentinas de pós-refrigeração é simulado usando uma metodologia inovadora desenvolvida pelos autores, onde a remoção de calor é reproduzida usando fronteiras convectivas fictícias.

## 2. MODELAÇÃO TERMOMECÂNICA, COM RECURSO AO MEF

### 2.1 Problema térmico

#### 2.1.1 Equação de condução de calor e fronteiras externas

O campo térmico no betão em massa, induzido pela reação de hidratação do cimento, é regido pela equação de equilíbrio térmico [3]:

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

onde  $k$  é a condutividade térmica do betão,  $T$  é a temperatura,  $\dot{Q}$  é a taxa de calor interno gerado pela reação de hidratação do cimento e  $\rho c$  é o calor específico (volumétrico) do betão. A taxa de libertação do calor de hidratação pode ser descrita com uma lei do tipo Arrhenius [4]:

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

onde  $a$  é uma constante,  $f(\alpha)$  é a evolução normalizada da taxa de produção de calor,  $\alpha$  é a razão entre o calor total  $Q(t)$  libertado até ao instante  $t$  e o calor total  $Q_\infty$  no final da hidratação,  $E_a$  é a energia de ativação aparente e  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos ( $8,314 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

As fronteiras em contacto com o ar são reproduzidos pela lei de arrefecimento de Newton [3]:

$$q = h_{cr}(T_b - T_a) \quad (3)$$

onde  $q$  é o fluxo de calor por unidade de área,  $h_{cr}$  é o coeficiente de convecção-radiação,  $T_b$  é a temperatura na superfície do betão e  $T_a$  é a temperatura ambiente. Quando são utilizadas cofragens e mantas isolantes,  $h_{cr}$  é substituído por um coeficiente equivalente  $h_{eq}$  [5]:

$$h_{eq} = \left( \frac{1}{h_{cr}} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i} \right)^{-1} \quad (4)$$

em que  $L_i$  representa a espessura e  $k_i$  a condutividade térmica do material de cada camada  $i$ , sendo  $n$  o número de camadas.

### 2.1.2 Serpentinhas de pós-refrigeração

O arrefecimento que é promovido quando se utilizam serpentinhas formadas por tubos embebidos no betão, com circulação de água no interior, é aqui reproduzido a partir de uma abordagem inovadora, segundo a qual o calor removido pela pós-refrigeração é simulado com recurso a fronteiras convectivas fictícias – método das SAE (Superfícies de Arrefecimento Equivalentes), proposto em [6] pelos autores do presente artigo. Neste método o fluxo de calor  $q_{w,eq}$  ( $Wm^{-2}$ ) removido do betão pelas serpentinhas é reproduzido com base numa lei de arrefecimento inspirada na lei de Newton:

$$q_{w,eq} = h_{w,eq}(T_b - T_w) \quad (5)$$

onde  $T_b$  é a temperatura do betão na superfície da serpentina (dentro de uma área  $A_{w,eq}$ ),  $T_w$  é a temperatura da água (considerada igual à temperatura da água na entrada da serpentina  $T_{w,in}$ ) e  $h_{w,eq}$  é o coeficiente de convecção equivalente considerado para a superfície de pós-refrigeração. Como  $h_{w,eq}$  não pode ser avaliado experimentalmente – o método SAE é uma “abordagem de engenharia” –, considera-se uma estimativa com base nas seguintes equações [6]:

$$h_{w,eq} \cong \frac{\dot{m}_w c_w [1 - (1-g) e^{-\xi}] (1 - e^{-2.70\xi})}{A_{w,eq}} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{k_b L}{c_w \rho_w q_w} \quad (7)$$

$$g = \frac{\ln(100)}{\ln(b/r_e) + k_b/k_{cp} \ln(r_e/r_i)} \quad (8)$$

$$b = \sqrt{1.07 S_v S_h / \pi} \quad (\text{para serpentinhas com disposição retangular}) \quad (9)$$

onde  $\dot{m}_w$  ( $kg s^{-1}$ ) é a taxa de fluxo de massa de água,  $c_w$  é o calor específico da água,  $\rho_w$  é a massa específica da água,  $q_w$  é o caudal de água,  $k_b$  é a condutividade térmica do betão,  $k_{cp}$  é a condutividade térmica do tubo de refrigeração (de raio interno  $r_i$ , raio externo  $r_e$  e comprimento  $L$ ),  $b$  é o raio do cilindro de betão equivalente em torno da serpentina e  $S_h$  e  $S_v$  são os espaçamentos horizontal e vertical dos tubos de refrigeração.

## 2.2 Problema mecânico

Os campos de deslocamentos, deformações e tensões na barragem são determinados através de um modelo mecânico, que é ativado após a resolução do problema térmico. Como referido, o campo de tensões no betão é calculado com base na teoria da viscoelasticidade linear para materiais com envelhecimento. A evolução das propriedades mecânicas do betão, como consequência da hidratação do cimento, é quantificada usando o método da maturidade, baseado no conceito da idade equivalente:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} d\tau \quad (10)$$

onde  $T_{ref}$  é a temperatura de referência dos ensaios em laboratório (em geral  $\sim 20^\circ\text{C}$ ). A fluência básica do betão que ocorre durante as primeiras idades é reproduzida por meio da Lei da Dupla Potência (LDP) [7], utilizando a seguinte função de fluência na idade  $t$  para uma carga aplicada no instante  $t'$ :

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \frac{\varphi_1}{E_0(t')} (t')^{-m} (t - t')^n \quad (11)$$

Nesta expressão  $E_0(t')$  é o módulo de elasticidade assintótico (correspondente a cargas de curto duração), e  $\varphi_1$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros materiais. No presente trabalho a função de fluência foi implementada com base numa cadeia Kelvin [8]:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i(t')} \left[ 1 - e^{-\frac{(t-t')}{\tau_i}} \right] \quad (12)$$

onde  $E_0(t')$  e  $E_i(t')$  são módulos dependentes da maturidade e  $\tau_i$  são os tempos de retardação de cada uma das  $N$  unidades de cadeia  $i$ .

O modelo termomecânico brevemente descrito está implementado no software de elementos finitos (EF) DIANA FEA, utilizado no presente trabalho.

### 3. APLICAÇÃO NUMÉRICA: BARRAGEM ABÓBADA DURANTE A CONSTRUÇÃO

#### 3.1 Aspetos gerais

O modelo termomecânico descrito foi adotado para avaliar a possibilidade de utilização de um arranjo alternativo para as juntas de contração, com vista a permitir acelerar o cronograma de construção, e um uso mais eficiente do equipamento instalado no estaleiro para produção e colocação do betão. Com base em dois dos blocos centrais (B1 e B2) localizados junto ao plano de simetria de uma barragem abóbada construída em Portugal, na Figura 2b é ilustrada uma disposição das juntas verticais alternativa à tradicionalmente adotada (esta reproduzida na Figura 2a), permitindo aquela a colocação de camadas de betonagem com uma área horizontal de  $\sim 606\text{m}^2$  junto ao coroamento – aproximadamente o valor máximo esperado no cronograma da construção tradicional próximo da fundação. Assim, acima da cota 192m a interrupção da junta J1-2 permite unir os blocos B1 e B2, determinando a região B1-2 assinalada a cinzento escuro na Figura 2b. Abaixo desta cota os blocos são construídos de acordo com o faseamento construtivo tradicional.

Na presente secção pretende-se verificar se o arranjo alternativo das juntas de contração (AA) conduz a um risco de fissuração idêntico ao do arranjo tradicional (AT). Com este objetivo, os resultados previstos serão comparados por meio de dois modelos numéricos independentes: o modelo AT assume o faseamento construtivo original do bloco B2 (Figura 2a), enquanto para o modelo AA a junta de contração J1-2 é interrompida na cota 192m (Figura 2b) para permitir a betonagem conjunta dos blocos B1 e B2 no terço superior do corpo da barragem.

As operações de construção estão descritas na Tabela 1: o modelo AT reproduz o escalonamento das camadas de betonagem do bloco B2 entre as cotas 113m e 192m, e o das camadas entre as cotas 192m e 224m; o modelo AA reproduz a colocação das camadas de betonagem dos blocos B1 e B2 entre as cotas 192m e 224m, e das camadas L86-L101 (região B1-2) acima da cota 192m. As betonagens são realizadas com camadas de 2m de espessura, e tempos de espera de 7 dias entre camadas.

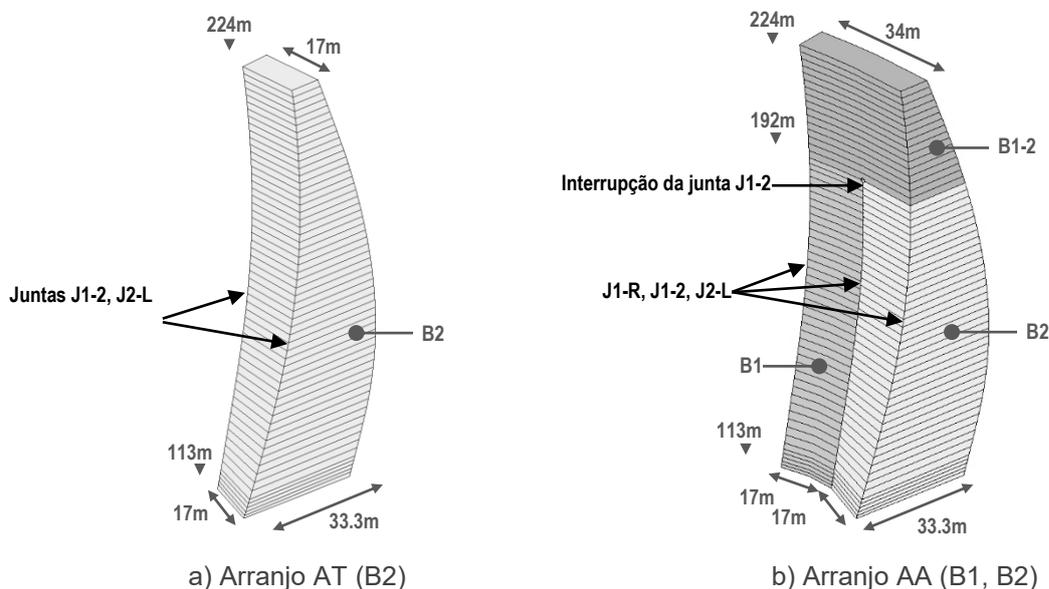


Figura 2. Arranjo das juntas de contração: faseamento da construção (blocos centrais)

Tabela 1. Detalhe da sequência construtiva

Cam.	Bloco	Cota (m)	Beton. (dias)	$T_{bi}$ (°C)	Cam.	Bloco	Cota (m)	Beton. (dias)	$T_{bi}$ (°C)	Cam.	Bloco	Cota (m)	Beton. (dias)	$T_{bi}$ (°C)
L1	B1	113-113.75	0	22.5	L35	B2	138-	127	25.0	L69	B1	177-179	247	16.8
L2	B1	113.75-	7	22.7	L36	B1	145-	133	25.0	L70	B2	174-176	253	15.6
L3	B1	114.5-115.5	14	22.7	L37	B2	140-	134	25.0	L71	B1	179-181	255	14.1
L4	B1	115.5-116.5	21	22.5	L38	B1	147-	140	25.0	L72	B2	176-178	260	10.0
L5	B2	113-114.15	22	21.7	L39	B2	142-	141	25.0	L73	B1	181-183	264	16.6
L6	B1	116.5-117.5	28	25.0	L40	B1	149-	147	25.0	L74	B2	178-180	267	15.6
L7	B2	114.15-115	29	25.0	L41	B2	144-	148	25.0	L75	B1	183-185	273	12.1
L8	B1	117.5-119	35	25.0	L42	B1	151-	154	25.0	L76	B2	180-182	274	10.0
L9	B2	115-116	36	25.0	L43	B2	146-	155	25.0	L77	B2	182-184	281	12.1
L10	B1	119-121	42	25.0	L44	B1	153-	161	25.0	L78	B1	185-187	282	14.5
L11	B2	116-117	43	25.0	L45	B2	148-	162	25.0	L79	B2	184-186	288	14.2
L12	B1	121-123	49	25.0	L46	B1	155-	168	25.0	L80	B1	187-189	291	13.2
L13	B2	117-118	50	24.4	L47	B2	150-	169	25.0	L81	B2	186-188	295	14.6
L14	B1	123-125	56	23.6	L48	B1	157-	175	25.0	L82	B1	189-	299	12.2
L15	B2	118-120	57	23.2	L49	B2	152-	176	25.0	L83	B2	188-190	302	12.5
L16	B1	125-127	63	25.0	L50	B1	159-	182	25.0	L84	B1	190.5-	307	10.0
L17	B2	120-122	64	25.0	L51	B2	154-	183	25.0	L85	B2	190-192	309	13.9
L18	B1	127-129	70	25.0	L52	B1	161-	189	24.3	L86	B1-2	192-194	316	14.6
L19	B2	122-124	71	25.0	L53	B2	156-	190	23.8	L87	B1-2	194-196	323	18.1
L20	B1	129-131	77	25.0	L54	B1	163-	196	18.6	L88	B1-2	196-198	330	17.4
L21	B2	124-126	78	25.0	L55	B2	158-	197	19.7	L89	B1-2	198-200	337	21.1
L22	B1	131-133	84	25.0	L56	B1	165-	203	21.1	L90	B1-2	200-202	344	16.3
L23	B2	126-128	85	25.0	L57	B2	160-	204	22.1	L91	B1-2	202-204	351	22.0
L24	B1	133-135	91	25.0	L58	B1	167-	210	17.9	L92	B1-2	204-206	358	19.3
L25	B2	128-130	92	25.0	L59	B2	162-	211	19.3	L93	B1-2	206-208	365	18.0
L26	B1	135-137	98	25.0	L60	B1	169-	217	17.6	L94	B1-2	208-210	372	18.0
L27	B2	130-132	99	25.0	L61	B2	164-	218	18.7	L95	B1-2	210-212	379	19.0
L28	B1	137-139	105	25.0	L62	B1	171-	224	17.3	L96	B1-2	212-214	386	19.9
L29	B2	132-134	106	25.0	L63	B2	166-	225	18.9	L97	B1-2	214-216	393	25.0

L30	B1	139-141	112	25.0	L64	B1	173-	231	13.6	L98	B1-2	216-218	400	25.0
L31	B2	134-136	113	25.0	L65	B2	168-	232	14.2	L99	B1-2	218-220	407	25.0
L32	B1	141-143	119	25.0	L66	B1	175-	238	18.4	L100	B1-2	220-222	414	25.0
L33	B2	136-138	120	25.0	L67	B2	170-	239	15.8	L101	B1-2	222-224	421	25.0
L34	B1	143-145	126	25.0	L68	B2	172-	246	18.1	-	-	-	-	-

As cofragens foram mantidas durante os primeiros 3,5 dias de idade do betão, e removidas posteriormente, exceto durante o Inverno onde as operações de remoção foram adiadas até aos 7 dias de idade. A pós-refrigeração (com circulação de água em serpentinas embebidas) foi utilizada para reduzir o pico de temperatura do betão nas primeiras idades (arrefecimento inicial), e para permitir uma redução uniforme da temperatura da massa de betão antes da injeção final das juntas de contração (arrefecimentos intermédio e final). Normalmente o arrefecimento inicial foi realizado quando a camada de betonagem sobrejacente tinha de 0 a 16 dias de idade, utilizando água do rio com temperatura variando de 13,0 a 24,6°C. O arrefecimento intermédio começou 224 dias após o início da construção, sendo realizado em 31 dias (com água do rio a 13,8-15,9°C) para arrefecer o betão entre as cotas 113m e 163m. O arrefecimento final começou aos 590 dias (com água a 5°C), e durou 18-40 dias (dependendo da região do bloco) para atingir a temperatura de injeção das juntas (cerca de 11°C).

### 3.2 Estratégia de modelação e malhas de EF

A avaliação das temperaturas e tensões do betão nos blocos B1 e B2 foi realizada por meio de análises termomecânicas faseadas, nas quais as serpentinas de refrigeração foram reproduzidas pelo método SAE. A Figura 3 ilustra a malha de EF adotada para o arranjo alternativo AA. Para a análise térmica, no modelo AA utilizaram-se 45120 EF hexaédricos de 8 nós para o betão (101 camadas de betonagem), 5880 EF hexaédricos de 8 nós para a fundação, EF quadriláteros de 4 nós para discretizar as fronteiras (que mudam durante a construção) e 10656 EF quadriláteros de 4 nós para reproduzir as 97 SAE. As análises mecânicas foram realizadas utilizando as mesmas geometrias das malhas de EF adotadas nas análises térmicas, com a diferença de que os hexaedros foram substituídos por EF de 20 nós. A junta de contração J1-2 foi representada por 2016 EF de interface, formados por quadriláteros com 4+4 nós para as análises térmicas e 8+8 nós para as análises mecânicas. Os blocos B1 e B2 foram considerados independentes, pois as juntas de contração ainda não estão injetadas.

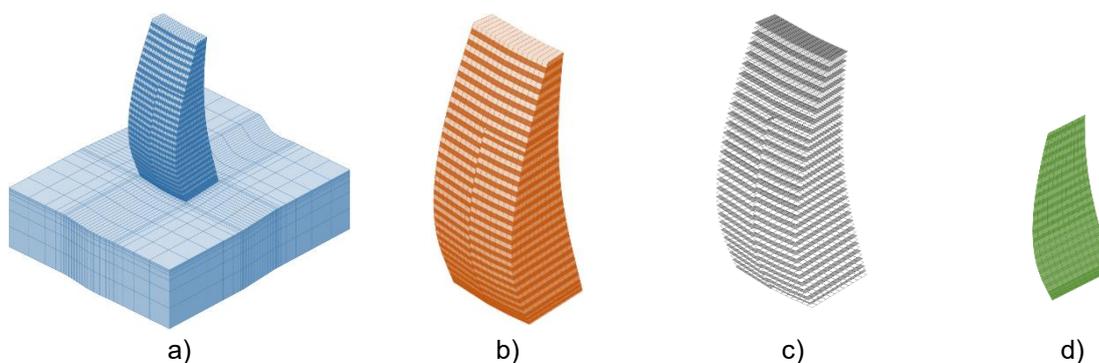


Figure 3. Malha de EF para o AA: a) vista geral; b) blocos B1 e B2; c) SAE; d) junta J1-2

Para as análises térmicas, no modelo AT utilizaram-se 22560 EF de 8 nós para o betão (58 camadas de betonagem), 5880 EF de 8 nós para a fundação (como no modelo AA), EF de 4 nós para discretizar as fronteiras, e 5280 EF para discretizar as 97 SAE. Tal como para o modelo AA, nas análises mecânicas do modelo AT utilizaram-se as mesmas malhas adotadas para as análises térmicas, porém com hexaedros de 20 nós. O bloco B2 foi considerado independente dos demais. A malha de EF adotada está representada na Figura 4.



Figura 4. Malha de EF para o AT: a) bloco B2; b) SAE

Em ambos os modelos AA e AT foram assumidos 4 tipos de condições fronteira nas análises térmicas: (i) tipo 1 – superfícies de betão ou fundação em contacto direto com o ar, cujo coeficiente  $h_{cr}$  (ver Figura 5a) foi estimado de acordo com [9]; (ii) tipo 2 – superfícies de betão em contacto com os blocos adjacentes e os planos de fundação afastados, através dos quais os fluxos de calor foram considerados nulos; (iii) tipo 3 – superfícies correspondentes às cofragens de madeira de 20mm de espessura, onde o coeficiente de convecção-radiação  $h_{cr}$  (Figura 5b) foi avaliado com a Equação 4; (iv) tipo 4 – superfícies de betão protegidas por mantas geotêxteis de 4mm de espessura, cujo coeficiente  $h_{cr}$  também foi avaliado com a Equação 4. Na fronteira tipo 4 o caderno de encargos previa que o betão fosse protegido quando a temperatura mínima do ar não ultrapassasse  $+1^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média diária do ar,  $T_a$ , foi estimada a partir de uma estação meteorológica próxima da barragem (Figura 5c).

A temperatura do betão no instante da colocação,  $T_{b,i}$  (ver Tabela 1), foi estimada de acordo com [10]. A temperatura inicial na fundação foi determinada com base numa análise transiente que partiu da temperatura média anual do ar, e considerou os fenómenos de condução e convecção de calor (com  $h_{cr} = 21\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) durante o período de três meses anterior ao início da construção.

As análises termomecânicas foram realizadas considerando 281 fases, que se estenderam por um período total de 635 dias, utilizando 1991 intervalos de tempo variando de 1 hora a 1 dia.

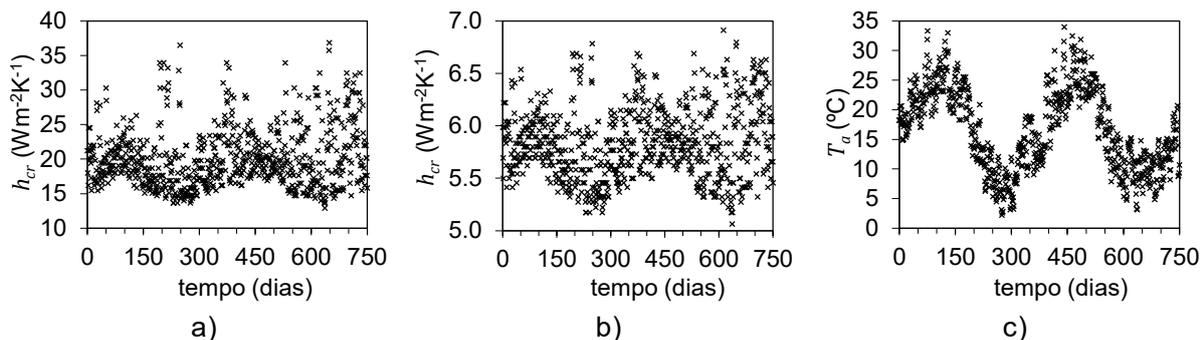
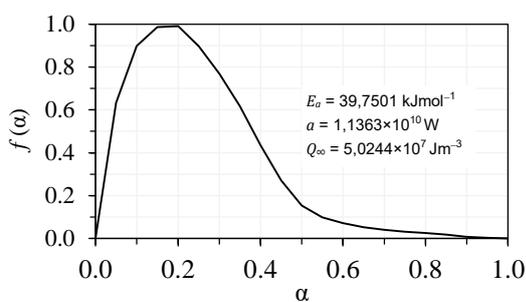


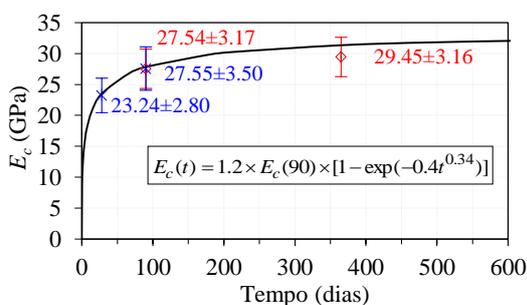
Figura 5. Dados para as fronteiras térmicas

### 3.3 Propriedades dos materiais

A mistura de betão incorpora  $110\text{kg/m}^3$  de cimento CEM I 42.5R,  $110\text{kg/m}^3$  de cinzas volantes (classe F),  $124\text{kg/m}^3$  de água,  $552\text{kg/m}^3$  de areia granítica,  $1400\text{kg/m}^3$  de brita granítica com  $D_{max} = 150\text{mm}$  e  $0,88\text{ kg/m}^3$  de adjuvante Pozzolith 398N. O desenvolvimento do calor de hidratação da pasta de cimento foi caracterizado com base em ensaios calorimétricos isotérmicos, resultando para o betão a geração de calor reproduzida na Figura 6a. Para o betão adotou-se uma condutividade térmica  $k_c = 2,6\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  e um calor específico  $\rho c = 2087\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ . Para a caracterização mecânica foram betonados provetes com betão integral e com betão crivado (neste fez-se a remoção dos agregados com dimensão superior a 38mm), de forma a avaliar o módulo de elasticidade  $E_c$ , a resistência à compressão  $f_c$  e a resistência à tração  $f_{ct}$ . Face à escassez de informação nas primeiras idades, a evolução de  $E_c$  foi considerada de acordo com [11], encontrando-se reproduzida na Figura 6b. Foram também realizados ensaios de compressão para caracterizar a fluência básica do betão integral, utilizando para o efeito células de fluência instaladas no interior da barragem, carregadas a várias idades (28, 90 e 365 dias após a betonagem). A Lei da Dupla Potência foi então ajustada aos resultados dos testes de fluência, devidamente corrigida usando o conceito de idade equivalente ( $E_a = 39.7501\text{kJmol}^{-1}$ ) – ver Figura 6c; nas aplicações numéricas a LDP foi ajustada por 7 cadeias Kelvin (ver detalhes em [10]). A deformação autógena foi desprezada, pois o seu efeito é relativamente baixo para relações água/ligante de 0.45-0.55 [12]. O coeficiente de dilatação térmica do betão, composto por agregados grossos graníticos, varia de  $7$  a  $9 \times 10^{-6}\text{°C}^{-1}$  [13], pelo que na modelação mecânica foi assumido um valor médio  $\alpha_c = 8 \times 10^{-6}\text{°C}^{-1}$ . O coeficiente de Poisson do betão foi tomado com o valor  $\nu_c = 0,2$ .



a)



b)

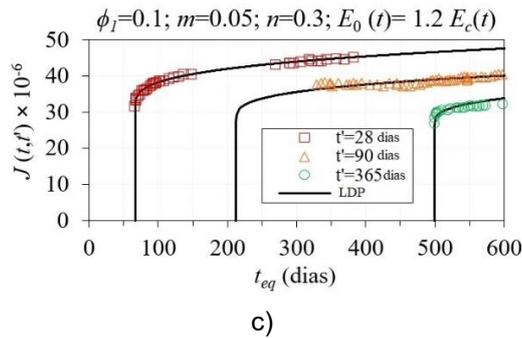


Figura 6. Propriedades do betão: a) Lei de Arrhenius; b)  $E_c$ ; c) LDP

Em termos mecânicos a junta J1-2 foi simulada com um modelo não-linear, considerando para a direção normal um comportamento linear à compressão (com uma rigidez de 108kPa/m) e um comportamento frágil à tração; para a direção tangencial foi assumida uma rigidez de corte aproximadamente nula. Do ponto de vista térmico assumiu-se uma condutância de  $1000\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  entre os blocos.

Para a rocha granítica da fundação foram assumidas as seguintes propriedades: (i) térmicas:  $k_f = 3,0\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $\rho_f c_f = 1882,5\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  e (ii) mecânicas:  $E_f = 20\text{GPa}$  e  $\nu_f = 0,2$ . O coeficiente de dilatação térmica da fundação foi considerado igual ao do betão.

O coeficiente de convecção  $h_{w,eq}$  das superfícies de arrefecimento equivalentes foi estimado usando a Equação (6), assumindo os seguintes valores nas simulações numéricas:  $\dot{m}_w = 0,1958\text{kgs}^{-1}$  (considerando  $v_w = 0,6\text{ms}^{-1}$ ),  $c_w = 4188,5\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $k_{cp} = 0,46\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Os espaçamentos horizontal e vertical dos tubos de refrigeração, com 1 polegada, foram tomados como  $S_v = 2,0\text{m}$  e  $S_h = 1,9\text{m}$ .

### 3.4 Temperaturas no betão

A Figura 7 reproduz os mapas de temperatura, bem como os valores máximo  $T_{máx}$  e mínimo  $T_{mín}$  previstos para os modelos AA e AT nos instantes correspondentes ao início ( $t = 224$  dias;  $t = 590$  dias) e ao final ( $t = 288$  dias;  $t = 635$  dias) das respetivas fases de arrefecimento intermédia e final. Os resultados térmicos também são apresentados para os instantes com valores extremos de temperatura do ar ( $t = 275$  dias;  $t = 486$  dias).

Como pode ser constatado na Figura 7, tanto o modelo AA como o AT conduzem a resultados semelhantes em relação aos gradientes térmicos. Portanto, a junção dos blocos B1 e B2 acima da interrupção da junta J1-2 não introduz mudanças significativas no campo de temperaturas do betão. Assim, os valores e evoluções das temperaturas do betão são sobretudo influenciados pelas propriedades deste material, pela espessura das camadas de betonagem, pelo cronograma de construção, pelas operações de pós-refrigeração e pela temperatura ambiente – que são idênticos em ambos os modelos.

### 3.5 Tensões no betão

As previsões numéricas das tensões principais máximas no betão,  $\sigma_1$ , estão representadas na Figura 8 para seis idades relevantes, coincidentes com o início e o fim das fases intermédia

e final de arrefecimento, bem como com os instantes em que se registam os valores máximo e mínimo da temperatura ambiente. Estes instantes são críticos do ponto de vista da geração de tensões de tração no núcleo de betão e, portanto, para a ocorrência de fissuras em toda a espessura da abóbada, que não têm tendência a fechar com o tempo.

Em geral, e tanto para o arranjo de juntas AA como para o AT, os núcleos das camadas de betonagem apresentam tensões principais máximas  $\sigma_1$  similares ao longo da altura dos blocos (exceto no pé da barragem), com valores entre 1,0 e 1,5MPa. Assim, os arranjos AA e AT conduzem a riscos de fissuração térmica do betão semelhantes. As camadas L89 (no modelo AA) e L15 (no modelo AT) são as mais condicionantes (em termos de tensões principais máximas) nas regiões inferior e superior dos blocos centrais, respetivamente. É importante notar que, dadas as dimensões em planta, estas camadas têm associados volumes de betão similares.

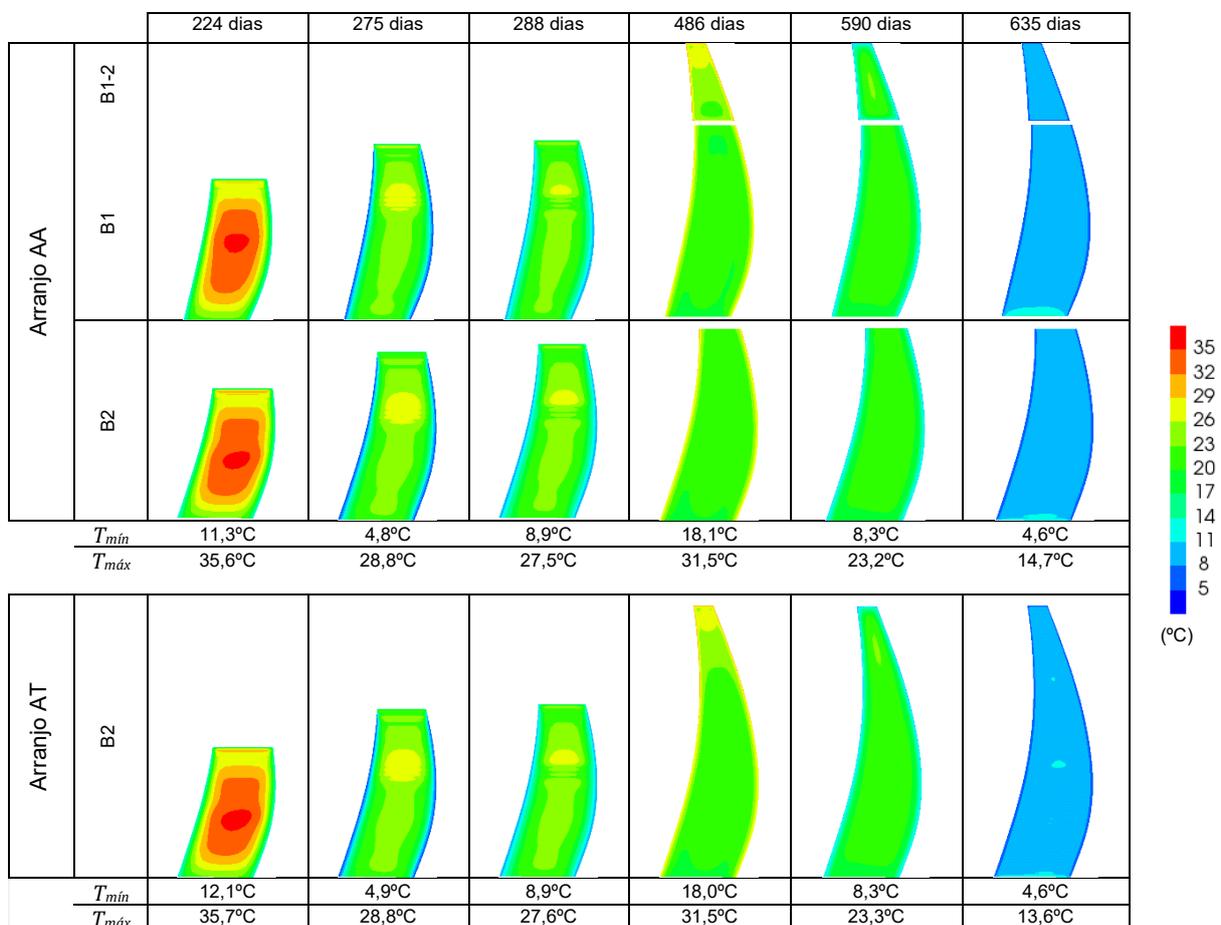


Figura 7. Temperaturas no betão (°C), para os arranjos de juntas AA e AT

A Figura 9 ilustra as evoluções temporais das tensões principais no betão, sendo que as curvas TN se referem às temperaturas no núcleo. Como pode ser observado, valores máximos de  $\sigma_1$  de 1,93MPa e 1,80MPa são alcançados no núcleo de betão das camadas L15 e L89, respetivamente. No entanto, é de destacar que estes valores de pico são observados em instantes diferentes, isto é:

- (i) Na camada L15 ocorrem durante a fase final de arrefecimento, que coincide com o Inverno ( $t = 634$  dias), sendo que a contração volumétrica do núcleo de betão (promovida pela

pós-refrigeração) é restringida pelas superfícies externas, que por sua vez levam ao aparecimento de tensões de tração no núcleo de betão e de tensões de compressão próximo das superfícies.

(ii) Na camada de betonagem L89 o pico da tensão de tração é devido à temperatura ambiente externa durante o Verão ( $t = 486$  dias). Como as superfícies de betão são mais sensíveis ao aumento da temperatura ambiente do que o betão do núcleo, a expansão das superfícies externas não é acompanhada de forma análoga pelo núcleo, que está a uma temperatura mais baixa e, como resultado, as superfícies externas são submetidas a tensões de compressão e o núcleo a tensões de tração.

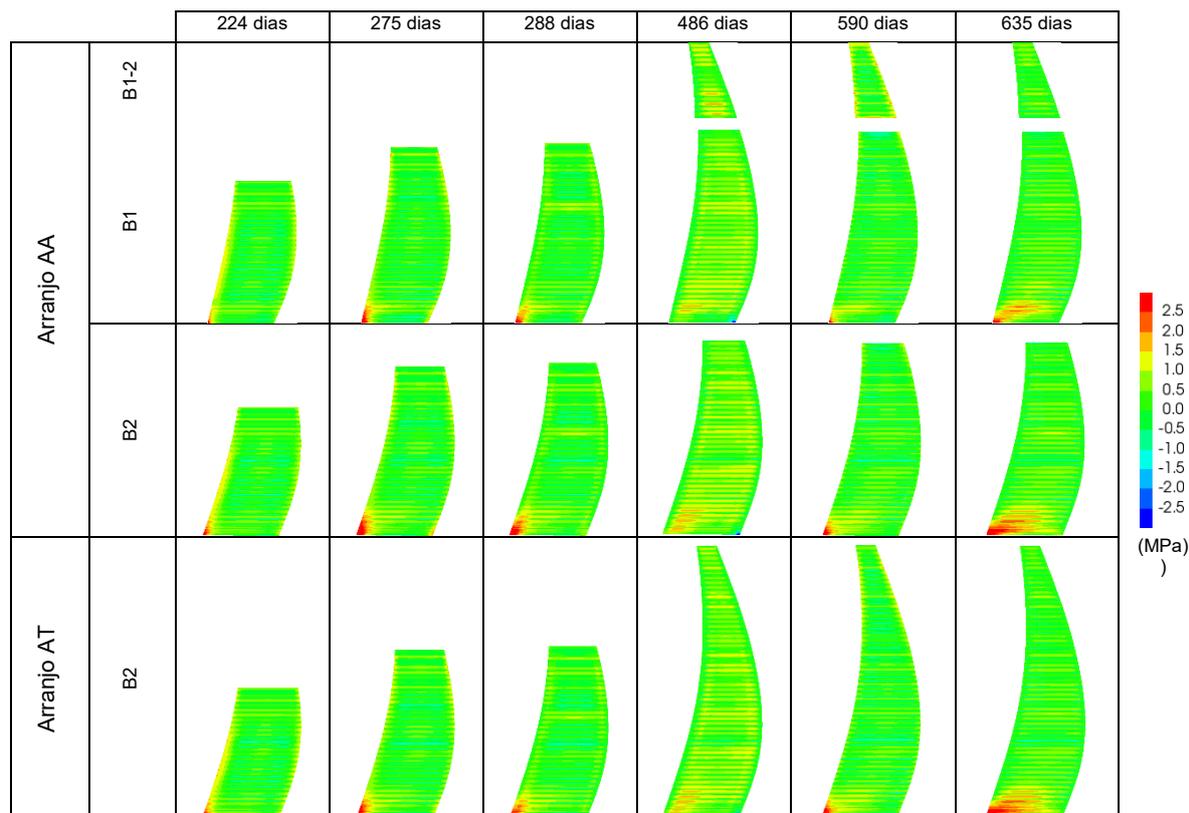


Figura 8. Tensões principais máximas  $\sigma_1$  (MPa) nos blocos

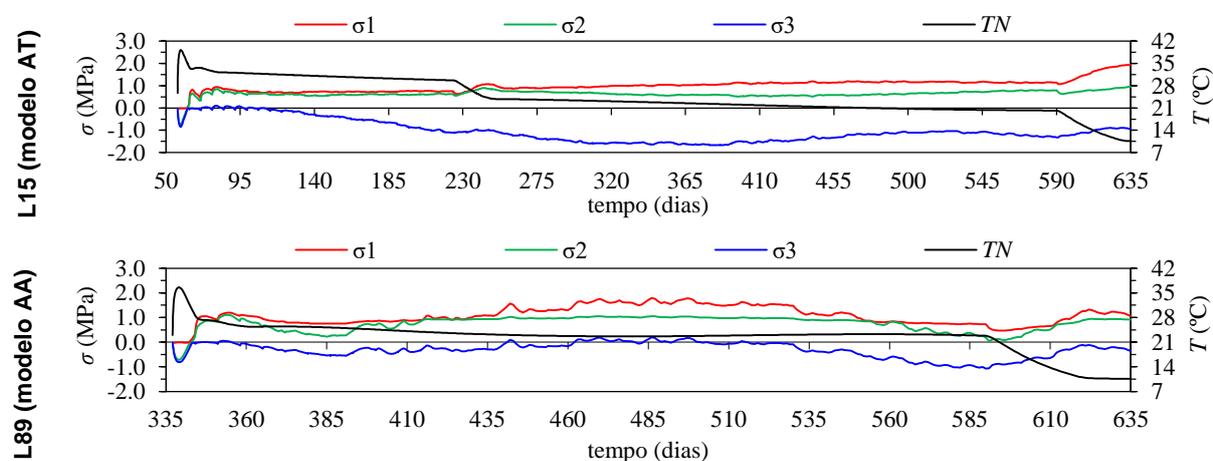


Figura 9. Evolução das tensões principais no betão do núcleo

## 4. CONCLUSÕES

Um arranjo alternativo para as juntas de contração de barragens abóbada foi analisado neste artigo. Com base nos resultados obtidos observou-se que o arranjo alternativo – com um espaçamento duplo das juntas de contração no terço superior da barragem – não conduziu a um aumento do risco de fissuração do betão, por comparação com o observado considerando o arranjo tradicional das referidas juntas. As tensões principais máximas  $\sigma_1$  previstas com o arranjo alternativo das juntas nas camadas L86-L101 (cotas 192-224m) mantiveram-se com valores semelhantes aos previstos com o arranjo de juntas tradicional entre as cotas 112 e 192m.

Portanto, é possível concluir que o risco de fissuração com o arranjo alternativo das juntas de contração é idêntico ao obtido quando se adota um arranjo tradicional (isto é, com juntas aproximadamente verticais, prolongando-se a toda a altura da barragem), pelo menos para abóbadas com geometria semelhante à analisada. Uma construção mais rápida das barragens abóbada pode, portanto, ser obtida, alterando a disposição tradicional das juntas de contração.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelos projetos POCI-01-0145-FEDER-007457 (CONSTRUCT) e POCI-01-0145-FEDER-007633 (ISISE), financiados por fundos FEDER através do COMPETE 2020 – Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (POCI), e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- [1] Conceição, J. et al. - "Early-age behaviour of the concrete surrounding a turbine spiral case: Monitoring and thermo-mechanical modelling", *Engineering Structures*, 2014, 81(0), p. 327-340.
- [2] "Conventional methods in dam construction", ICOLD Bulletin nº76, 1990.
- [3] Incropera, F. - "Fundamentals of heat and mass transfer", 2007, *Danvers*, John Wiley and Sons.
- [4] Reinhardt, H. et al. - "Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties", Proc. Int. conf. concrete at early ages, 1982, Paris.
- [5] Faria, R. et al. - "Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab", *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(6), p. 572-585.
- [6] Conceição, J. et al. - "A new method based on equivalent surfaces for simulation of the post cooling in concrete arch dams during construction" - *Engineering Structures*, 2020, 209, 109976.
- [7] Bažant, Z.; Osman, E. - "Double power law for basic creep of concrete" - *Matériaux et Construction*, 1976, 9(1), p. 3-11.
- [8] Bažant, Z.; Wu, S. T. - "Dirichlet series creep function for aging concrete" – *J. Engineering Mechanics Division*, 1973, 99(2), p. 367-387.
- [9] Lee, Y. et al. - "Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete - *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(1), 60-71.

- [10] Conceição, J. - "Influência da disposição das juntas de contração em barragens abóbada de betão", Tese de doutoramento, 2020, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [11] Zhu, B. - "Thermal stresses and temperature control of mass concrete", 2014, Elsevier Inc.
- [12] Baroghel-Véronique, V. - "Hydration and moisture distribution: Early age cracking in cementitious systems" *RILEM Report 25*, 2002, A. Bentur, RILEM publications S.A.R.L., p. 39 46.
- [13] "The physical properties of hardened conventional concrete in dams" - *ICOLD Bulletin*, 2008 nº145.