

## **ESTUDO DA FISSURAÇÃO TÉRMICA DOS BLOCOS DE CONTRAFORTE DA UHE ITAIPU: ANÁLISE NUMÉRICA TERMO-QUÍMICO-MECÂNICA**

**Gabriella P. Valentim**

**Mariane R. Rita**

**Eduardo M. R. Fairbairn**

*gabriella.valentim@coc.ufrj.br*

*mariane\_rita@coc.ufrj.br*

*eduardo@coc.ufrj.br*

*COPPE/UFRJ Civil Engineering Department of the Post-Graduate Institute of the Federal University of Rio de Janeiro*

*149 Athos da Silveira Ramos Ave, 21941-909, Rio de Janeiro - RJ, Brazil*

**Étore F. Faria**

*eng.etore@gmail.com*

*Itaipu Binacional, Civil Works Division*

*6731 Tancredo Neves Ave, 85856-970, Foz do Iguaçu - PR, Brazil*

**Abstract.** Itaipu Dam's hydroelectric power plant is the largest producer of electric power in the world. It is composed by structures made of concrete, rock and earthfill that serve to harness the water and obtain the difference in levels of 120 m, which allows the operation of the turbines. The first buttresses blocks, which were located in the right bank dam, began to be built in November 1978. The first cracks were noticed by visual inspection in August 1980. A 2-D simplified FEM analysis has shown a high adiabatic raise of temperature in the core of the blocks due to the cement hydration, causing thermal stresses. The location of the cracks in the modelling is very similar to the pattern of cracking that is presented in the construction reports. Therefore, it is possible to assure that the cause of cracking in the buttresses blocks of Itaipu Dam is thermal cracking.

**Keywords:** Thermal cracking, massive structures, Itaipu dam

## 1 Introdução

A combinação de calor de hidratação e condições ambientais, retração autógena e condições de contorno podem causar alterações volumétricas ou tensões térmicas. Sempre que essas tensões atingem a resistência à tração do concreto, ocorre a fissuração que, por sua vez, pode prejudicar a manutenção e a durabilidade de estruturas massivas.

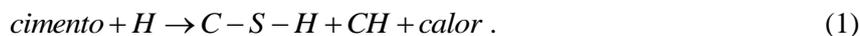
Existem vários tipos de estruturas que podem ser consideradas estruturas massivas. Este termo é definido por Fairbairn e Azenha [1] como estruturas para as quais os efeitos dos materiais cimentícios nas primeiras idades, como a geração de calor e a retração autógena, podem levar à fissuração. Alguns exemplos dessas estruturas são: barragens de concreto, lajes, muros de contenção, pontes e pilares, vertedouros, etc.

A fissuração térmica de estruturas massivas é um problema comum e pode ser analisado através da modelagem da estrutura usando, por exemplo, um software de MEF. A simulação pode prever as tensões térmicas que poderiam se tornar maiores que a resistência à tração, causando as fissuras. Sendo assim, é importante modelar a estrutura previamente à construção e, se necessário, adicionar algumas medidas preventivas para evitar fissurações.

## 2 Modelagem numérica do concreto

### 2.1 Hidratação do cimento

A matriz cimentícia é um meio poroso reativo de acordo com Ulm [2]. Nesse meio ocorre a hidratação dos grãos de clínquer, formando Silicatos de Cálcio Hidratado (C-S-H), Portlandita (Hidróxido de Cálcio), além de gerar calor. A hidratação do cimento é altamente exotérmica e também é termoativada, o que significa que a evolução da temperatura influencia a cinética da hidratação. A hidratação do cimento é mostrada de maneira simplificada na Eq. (1) abaixo:



O conceito de grau de hidratação é definido por Silva [3] como o avanço das reações de hidratação. A determinação experimental desse parâmetro pode ser feita por ensaios adiabáticos. Nestes ensaios não há fonte externa de calor, e a natureza exotérmica da reação de hidratação é a única responsável pelo aumento da temperatura no sistema. Este fenômeno pode ser descrito pela formulação do acoplamento termoquímico Ulm e Coussy [4, 5] apresentado na Eq. (2):

$$C_\varepsilon \cdot \frac{dT}{dt} = Q^0 + L \cdot \frac{d\xi}{dt} . \quad (2)$$

em que  $C_\varepsilon$  = capacidade térmica;  $T$  = temperatura;  $t$  = tempo;  $Q_0$  = taxa de transferência de calor vindo do exterior;  $L$  = constante do material, que é sempre positiva devido a natureza exotérmica da reação de hidratação;  $\xi$  = grau de hidratação.

A microdifusão da água é controlada pelo desequilíbrio termodinâmico entre a água livre e a água combinada no esqueleto sólido. Esse fenômeno de afinidade química também é amplificado pela termoativação e a Lei de Arrhenius é usada para modelar este processo, como mostrado na Eq. (3):

$$A_m = \eta \cdot \frac{dm}{dt} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) . \quad (3)$$

em que  $E_a$  = energia de ativação;  $R$  = constante universal dos gases;  $\eta$  = medida de viscosidade.

### 2.2 Propriedades térmicas e tensões térmicas

Na formulação de acoplamento termoquímico de Ulm e Coussy [4, 5], são apresentadas algumas

propriedades que governam a transferência de calor e as consequentes mudanças de temperatura no sistema. As propriedades térmicas do concreto dependem das propriedades individuais de cada componente e da dosagem da mistura.

Algumas das propriedades que influenciam no aumento da temperatura são: condutividade térmica, capacidade térmica, e coeficiente de expansão térmica. Este último é o responsável por prever a mudança de volume nas estruturas devido a gradientes térmicos.

Para o cálculo das tensões, o acoplamento termoquímico é apresentado na Eq. (4), combinando o modelo de acoplamento termoquímico de Ulm e Coussy [4, 5] e os efeitos de fluência de Hellmich [6] e Sercombe et al. [7].

$$d\sigma = C(\xi) : (d\varepsilon - d\varepsilon^p - d\varepsilon^f - d\varepsilon^v - \alpha dT - \beta dm). \quad (4)$$

em que  $C(\xi)$  = tensor de rigidez elástica como função do grau de hidratação;  $\varepsilon$  = tensor de deformação;  $\varepsilon^p$  = tensor de deformação plástica;  $\varepsilon^f$  = tensor de fluência a longo prazo;  $\varepsilon^v$  = tensor de fluência a curto prazo;  $\alpha = CTD \cdot 1$ , CTD é o coeficiente de dilatação térmica;  $\beta = \beta \cdot 1$  é o tensor do coeficiente de dilatação química e  $\beta$  é o coeficiente que correlaciona a hidratação com retração autógena.

Na origem das tensões térmicas, pode-se destacar dois tipos de gradientes térmicos diferentes que ocorrem em estruturas massivas. Um é relativo ao tempo, uma vez que à medida que o tempo passa, há um estágio em que a temperatura está aumentando e outro quando está diminuindo devido à hidratação do cimento. No primeiro estágio, o concreto é mais jovem que no seguinte estágio, então as propriedades mecânicas são inferiores. Isto significa que, no segundo estágio, ao resfriar, as tensões são maiores que o primeiro estágio. Se essa diferença atingir a resistência à tração (que também evolui com o grau de hidratação), a fissuração pode acontecer. O segundo gradiente é o gradiente espacial. Este ocorre quando há uma diferença de temperatura entre diferentes pontos na estrutura em um mesmo instante. Se a estrutura tiver restrições na direção desses pontos, as tensões são geradas para compensar a tendência de se expandir ou retrair.

### 3 Estudo de caso

A Itaipu Binacional é líder mundial em energia limpa e renovável, já que produziu mais de 100 milhões de MWh de geração anual e mais de 2,5 bilhões de MWh desde que começou a operar (1984). A Itaipu possui 20 unidades geradoras, cada uma delas capaz de gerar 700MW. Totalizando, a usina hidrelétrica possui 14.000 MW de potência instalada e fornece 15% da energia consumida no Brasil e 86% da energia consumida no Paraguai.

O reservatório de Itaipu, com uma área inundada de 1350 km<sup>2</sup>, é o sétimo maior do Brasil, mas possui o melhor coeficiente de aproveitamento de água para a geração de eletricidade de todos os grandes reservatórios brasileiros [8].

A barragem é a estrutura que serve para aproveitar a água e obter a diferença em níveis de 120 m que permite a operação das turbinas. Existem estruturas feitas de concreto, enrocamento e aterro. No geral, tem 7919 metros de comprimento e uma altura máxima de 196 metros. Durante a construção, consumiu 12,3 milhões de metros cúbicos de concreto. A concretagem foi bastante rápida e o volume de concreto colocado em apenas um dia chegou a 15.000 m<sup>3</sup> e, em um único mês, 340.000 m<sup>3</sup> [8].

Para garantir o suprimento adequado e contínuo dessas altas demandas de concreto fresco, foram instalados quatro centros de britagem, dois em cada margem para a produção de agregados, e seis centrais de concreto, com capacidade de 180 m<sup>3</sup> / h cada. Além disso, o pátio industrial foi equipado com dois moinhos de clínquer, caso a capacidade de produção das empresas fornecedoras do Brasil e do Paraguai não conseguissem atender à demanda adicional da construção de Itaipu.

A barragem de contraforte constitui a Barragem Lateral Direita e a Barragem de ligação dos lados direito e esquerdo, como mostrado na Planta Geral na Fig.1. A construção da barragem lateral direita começou em novembro de 1978, quando os primeiros blocos de contrafortes (D27 a D30) foram concretados. As primeiras fissuras foram notadas nesses mesmos blocos por inspeção visual em agosto de 1980.

Havia fissuras em 34 dos 47 blocos construídos além de El. 190m na margem direita. Havia também fissuras na parte E e I, que são as partes de ligação com a barragem principal da tomada

d'água. As fissuras estavam localizadas principalmente nos contrafortes e, às vezes, nas cabeças dos blocos. Elas eram verticais, começavam na fundação e estavam localizados nos terços a montante ou jusante da base. As fissuras não eram profundas, tinham abertura de 0,3 a 0,9mm e as mais significativas tinham de 10 a 20m de comprimento, como visto na Fig. 2. Na época, foi desenvolvido um programa de investigação e controle, que incluiu mapeamento das fissuras, extração de testemunhas, teste de perda d'água e outros testes de monitoramento.

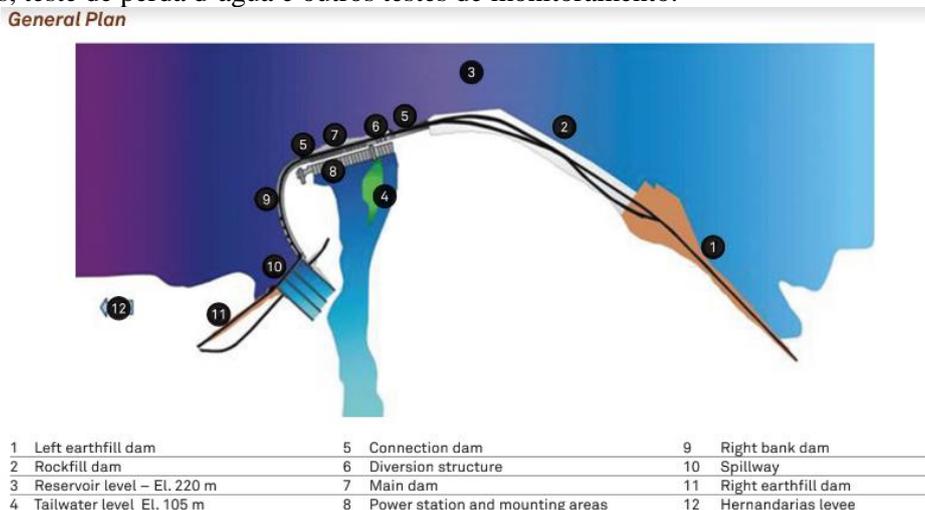


Figura 1. Planta Geral da Usina Hidrelétrica de Itaipu – Andriolo e Bertoli [8]

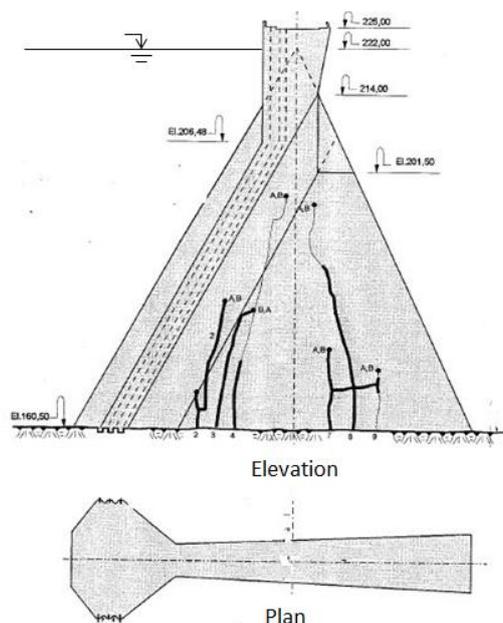


Figura 2. Fissuras nos blocos de contraforte - Betioli et al.[9]

No geral, as alturas das primeiras 3 camadas foram de 0,7m, 1,5m, 1,75m e as outras camadas foram de 2,5m de altura. As primeiras 5 camadas foram construídas com o tipo de concreto B-210f e, em seguida, A-140f. O B-210f tem mais teor de cimento que o A-140f.

A taxa de concretagem foi de aproximadamente uma camada a cada 7 a 10 dias, e o tempo de espera foi de 48 horas. A temperatura ambiente média foi de 22°C. A temperatura do concretagem era de 7 ° C. Para obter essa baixa temperatura, foram tomadas algumas medidas de pré-resfriamento, como resfriamento de agregados graúdos, aspersão na correia e suprimento de ar frio e substituição de parte da água da mistura por gelo. Não foram aplicadas técnicas de pós-resfriamento. A temperatura média alcançada nas centrais de concreto foi de 6 ° C.

### 3.1 Propriedades dos Concretos

A caracterização do concreto utilizado no canteiro de obras foi realizada pelo Laboratório Itaipu, onde foram realizados diversos ensaios tecnológicos, como ensaios adiabáticos, ensaios de obtenção das propriedades térmicas, ensaio de cisalhamento, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, fluência, retração autógena, entre outros. A minuciosa caracterização aliada a grande experiência na construção de barragens no Brasil determinou a dosagem adequada dos concretos.

Os principais valores das propriedades estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedade dos tipos de concreto A-140f e B-210f

| Propriedade                                     | B-210f |                   | A-140f |                   |
|---|--------|-------------------|--------|-------------------|
| Cimento   | 169    | kg/m <sup>3</sup> | 108    | kg/m <sup>3</sup> |
| Cinza Volante                                   | 20     | kg/m <sup>3</sup> | 13     | kg/m <sup>3</sup> |
| Água  | 108    | kg/m <sup>3</sup> | 85     | kg/m <sup>3</sup> |
| a/c   | 0.54   |                   | 0.67   |                   |
| Dmax  | 76     | mm                | 152    | mm                |
| Resistência a compressão de projeto em 360 dias | 21     | MPa               | 14     | MPa               |
| Condutividade térmica                           | 1.97   | W/m.K             | 2.05   | W/m.K             |
| Calor específico                                | 895.98 | J/kg.K            | 895.98 | J/kg.K            |
| Coefficiente de expansão térmica                | 8      | µs                | 8      | µs                |
| Massa específica                                | 2605   | kg/m <sup>3</sup> | 2658   | kg/m <sup>3</sup> |
| Módulo de Young                                 | 43.69  | GPa               | 44.77  | GPa               |
| Resistência a compressão uniaxial               | 25.3   | MPa               | 17.10  | MPa               |
| Resistência a tração pelo ensaio brasileiro     | 2.84   | MPa               | 2.22   | MPa               |
| Coefficiente de Poisson                         | 0.22   |                   | 0.22   |                   |

De Faria [10] e Fonseca [11] proveram os dados para se traçar a curva adiabática desses tipos de concreto. Os dados foram ajustados em uma Função Hill, dada na Eq. (5):

$$\Delta T^{ad}(t) = \Delta T_{\max} \cdot \frac{t^n}{k^n + t^n} \quad (5)$$

em que  $\Delta T_{\max}$  = máxima elevação de temperatura obtida no ensaio; t = tempo; k e n = parâmetros de ajuste.

Os parâmetros de ajuste utilizados nas curvas dos concretos são dados na Tabela 2 e a curva de elevação adiabática na Fig. 3.

Tabela 2 – Parâmetros da Função de Hill

| Parâmetro         | B-210f  |         | A-140f  |         |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
|                   |         | unidade |         | unidade |
| $\Delta T_{\max}$ | 25.6    | °C      | 18.83   | °C      |
| $T_{\text{ini}}$  | 20.09   | °C      | 7.21    | °C      |
| k                 | 1.56767 |         | 1.82721 |         |
| n                 | 1.22362 |         | 1.11321 |         |

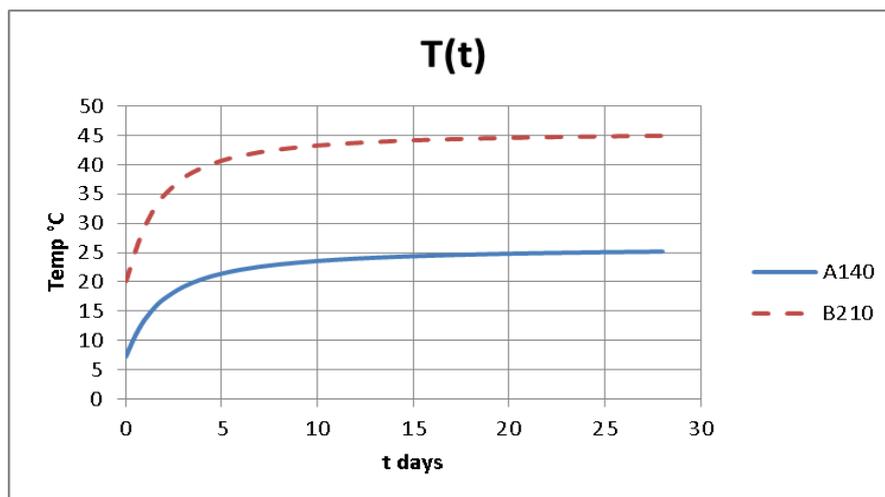


Figura 3. Elevações adiabáticas dos concretos A-140 e B-210

### 3.2 Medidas tomadas após a fissuração

Foi aplicada resina epóxi nas fissuras, restaurando a monoliticidade dos blocos. Tal medida apresentou um resultado satisfatório, uma vez que os blocos fissurados apresentaram comportamento estrutural semelhante ao de blocos não fissurados.

Em outubro de 1980, havia blocos parcialmente construídos, completamente construídos e ainda não construídos. Para este último grupo, ou para aqueles em que apenas primeiras camadas haviam sido construídas, adotou-se uma série de medidas para evitar a fissuração como: junta de contração paralela à face de montante, entre a cabeça e o contraforte; uso do concreto tipo B-180f nas primeiras 5 camadas acima da fundação; mudança da altura das primeiras 3 camadas para 0,75 m, 0,75 m e 1,00 m.

Para os blocos já construídos em uma altura inferior a 20m, foi possível inserir a junta de contração paralela à face de montante entre a cabeça e o contraforte. As 2 seguintes camadas foram feitas com o concreto B-180f e A-140f nas próximas.

Essas medidas puderam evitar que estes blocos fissurassem. A medida mais importante foi certamente a junta de contração, que funcionou como uma "fissura artificial", aliviando a estrutura e permitindo que esta se deformasse sem restrições, induzindo menos tensões.

### 3.3 Análises prévias de Elementos Finitos

Os estudos de MEF realizados em 1977, antes da construção, concluíram que a tensão principal máxima seria inferior à resistência à tração, não havendo necessidade de adicionar juntas a esses blocos - já que essa medida poderia custar mais à construção.

Rosso e Piasentin [12] compararam os dados obtidos da instrumentação instalada dentro dos blocos com os resultados obtidos pelo estudo anterior. Suas conclusões foram: a temperatura máxima medida foi de 36 ° C na cabeça e 34 ° C no contraforte em um concreto de 90 dias, enquanto os estudos previam uma temperatura máxima de 28 ° C na cabeça e 26 ° C no contraforte; a temperatura ambiente foi maior que a assumida; o módulo de Young foi maior que o adotado no projeto original.

Outro estudo de MEF realizado por ENGEVIX-GCAP [13] após a fissuração revelou como a principal causa como a queda excessiva de temperatura em idades precoces, principalmente no contraforte. No projeto original, o concreto que deveria ser usado nos blocos dos contrafortes era o A-140f, que tem menos conteúdo de cimento do que o concreto B-210f. Na construção, essa mudança foi feita, o que significa um maior calor de hidratação nas camadas inferiores. Além disso, a modelagem 2D anterior era simples demais e não levava em consideração a redução abrupta da geometria entre a cabeça e o contraforte.

Outra possível hipótese apresentada por Rosso e Piasentin [12] é que essas fissuras podem ser consequência de tensões de cisalhamento nas primeiras idades.

## 4 Metodologia

Embora já existissem alguns estudos feitos com MEF antes e depois da construção da barragem, inclusive após a fissuração, estes são datados da década de 80. Naquela época, a formulação de Ulm e Coussy [4, 5] para o acoplamento térmico-químico não havia sido desenvolvida ainda, o que significa que os cálculos de tensões térmicas não englobavam alguns fenômenos. Além disso, os cálculos de fluência eram bastante aproximados naquele tempo. Por essas razões, se fez necessário fazer uma nova análise de MEF para englobar as formulações do início dos anos 90 e do advento dos supercomputadores.

A construção da barragem de contraforte foi simulada utilizando o software de Elementos Finitos DAMTHE implementado na linguagem Fortran, desenvolvido pelo PEC / COPPE / UFRJ [14, 15].

Este software contém um modelo numérico de alto desempenho para o problema de acoplamentos termo-químico-mecânicos de concreto nas primeiras idades, e pode ser aplicado para simular grandes construções como barragens. O modelo conjuga, dentro da termodinâmica, os diversos fenômenos que intervêm na reação de hidratação, tais como: exotermicidade, termoativação e dependência de propriedades térmicas e mecânicas no avanço da reação de hidratação [16].

O código computacional também permite a simulação de construção por camadas, considerando variações nas condições geométricas e de contorno com o tempo decorrido desde o início da análise.

O bloco de contraforte foi modelado simulando uma situação de estado plano de tensão e levando em conta os efeitos de fluência, como proposto por Hellmich [6], e Sercombe et al. [7]. O modelo de fluência considera efeitos por fluência de curto prazo e fluência a longo prazo. Os dados de saída do problema foram temperatura e índice de fissuração em cada instante. Foi simulado um período de 2 anos a partir do início da construção e foram utilizados intervalos de tempo de 15 minutos. A geometria foi discretizada com 17735 nós e 51879 elementos tetraédricos. A temperatura ambiente adotada foi constante de 22°C.

O índice de fissuração representa a tendência de fissurar para qualquer elemento em qualquer instante, como mostrado na Eq. (6):

$$I_{\sigma}(x, y, z, t) = \frac{\langle \sigma_1(x, y, z, t) \rangle^+}{f_t(\xi(x, y, z, t))} \quad (6)$$

em que  $f_t(\xi) =$  resistência a tração como função do grau de hidratação;  $\sigma_1 =$  máxima tensão principal positiva.

É importante ressaltar que no programa, o índice de fissuração é calculado na faixa elástica para cada intervalo de tempo e para cada elemento - mesmo que seja maior que 1, quando as tensões de tração excedem as resistências à tração. O programa não computa o comportamento pós-fissuração (evolução da fissura) das estruturas. O objetivo é basicamente saber se, em qualquer instante, a estrutura foi fissurada, por isso não há necessidade de usar um sofisticado modelo de mecânica da fratura, que simula a evolução dos danos causados pelo concreto fissurado.

Neste caso, o índice de fissuração foi computado de forma cumulativa, o que significa que, se a qualquer instante o valor de 1 for atingido, o índice receberá este valor máximo. Tal artifício é necessário porque é possível que no tempo seguinte o índice de fissuração diminua em comparação com o anterior. Fisicamente, a fissura tende a evoluir e não regredir de forma natural. Como o programa não leva em conta nenhum modelo de fissuração, este artifício da acumulação do índice já é satisfatório.

## 5 Resultados

### 5.1 Evolução de temperatura

Alguns pontos da estrutura foram selecionados para se avaliar a evolução da temperatura com o tempo durante a simulação. A localização dos pontos se encontra na Fig. 4 e a evolução de temperatura na Fig. 5.

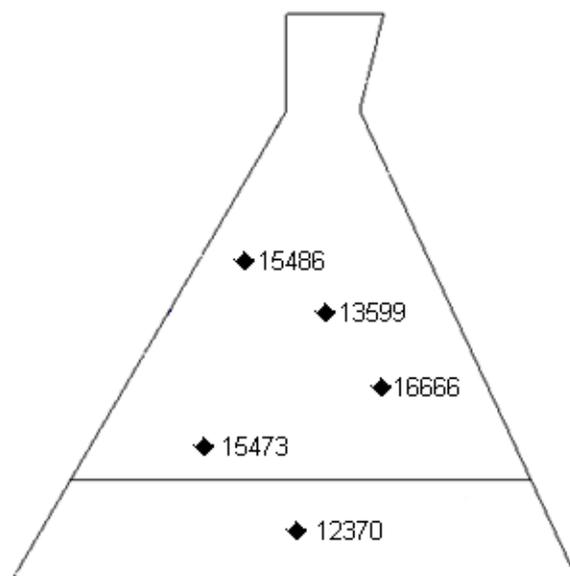


Figura 4 – Localização dos pontos de observação da evolução de temperatura

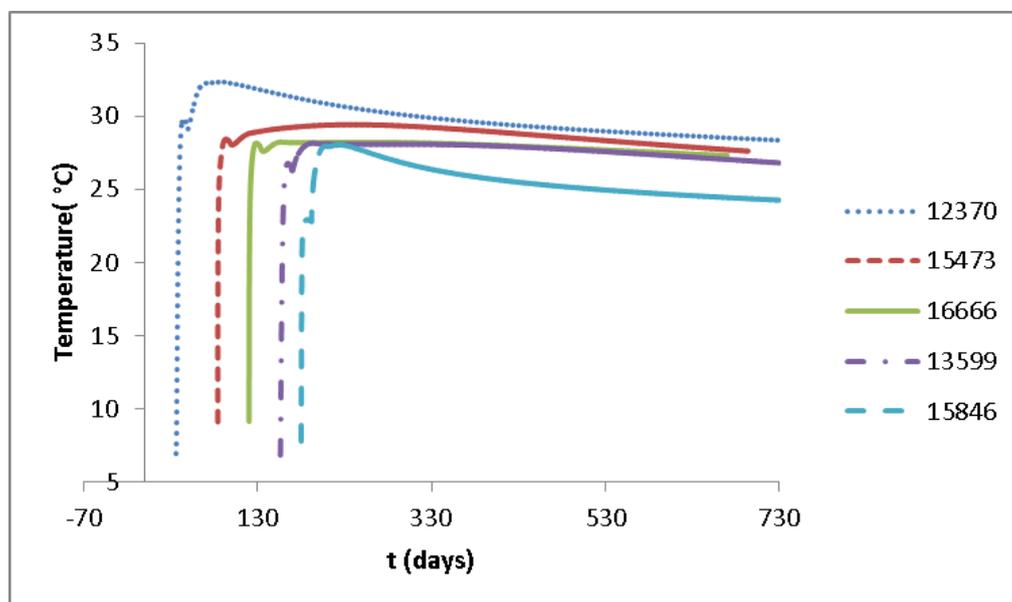


Figura 5 – Evolução da temperatura dos pontos selecionados

É válido ressaltar que o ponto que atinge a temperatura máxima de  $33.1^{\circ}\text{C}$  está no meio das camadas inferiores, que foram construídas com o concreto B-210f. Este tipo de concreto tem mais conteúdo de cimento que o das camadas superiores. As outras curvas têm picos menores de temperatura porque são feitas de concreto tipo A-140f.

## 5.2 Comparação entre temperatura e índice de fissuração ao longo do tempo

Juntamente com a elevação da temperatura, alguns elementos fissurados surgiam na estrutura. Algumas etapas de tempo importantes são mostradas nas próximas figuras, comparando o campo de temperatura e o desenvolvimento das fissuras através do índice de fissuração.

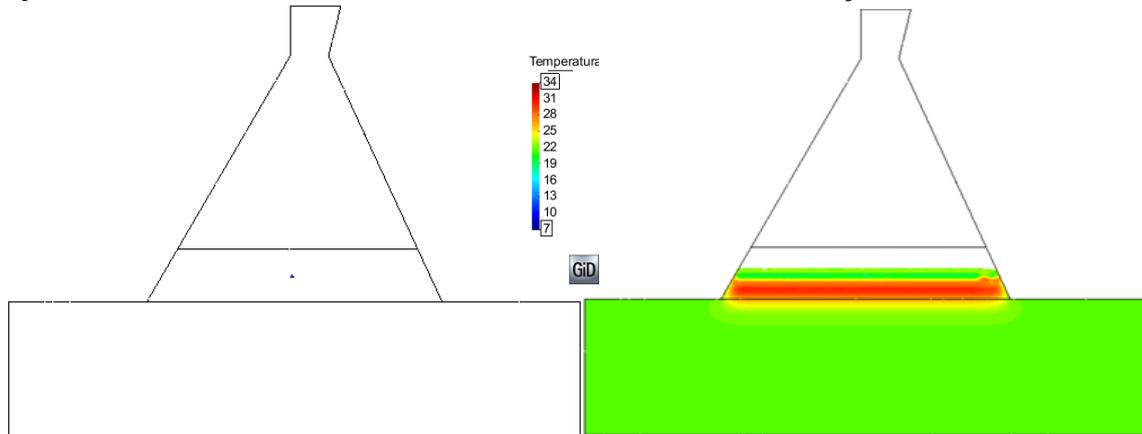


Figura 6. 38 dias: Temperatura Mínima = 18.599°C ; Temperatura Máxima = 30.17°C

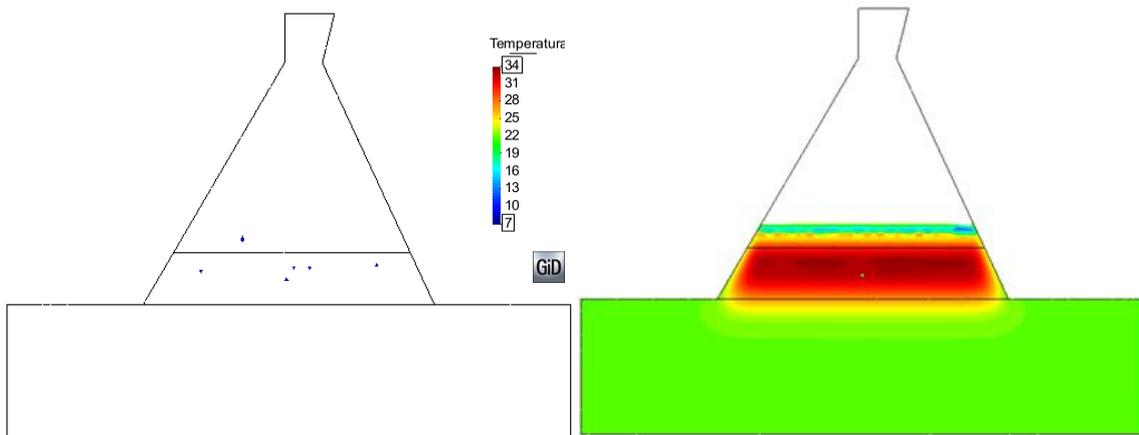


Figura 7. 85 dias: Temperatura Mínima = 12.552°C ; Temperatura Máxima = 33.121°C

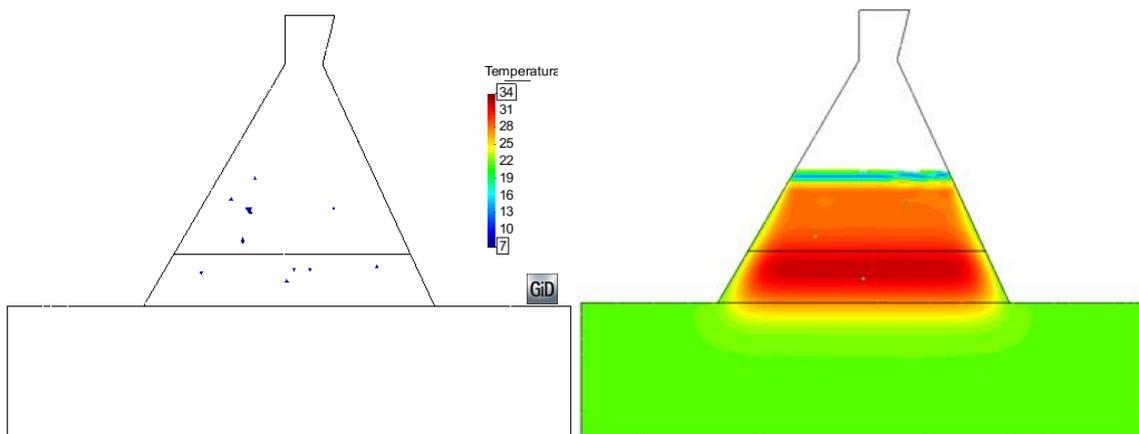


Figura 8. 145 dias: Temperatura Mínima = 12.613°C ; Temperatura Máxima = 32.219°C

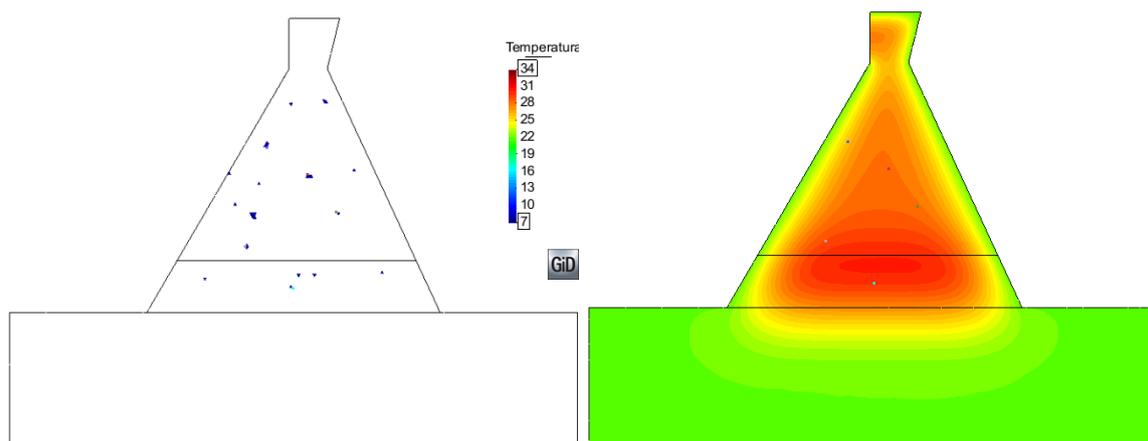


Figura 9. 365 dias: Temperatura Mínima = 21.922°C ; Temperatura Máxima = 30.198°C

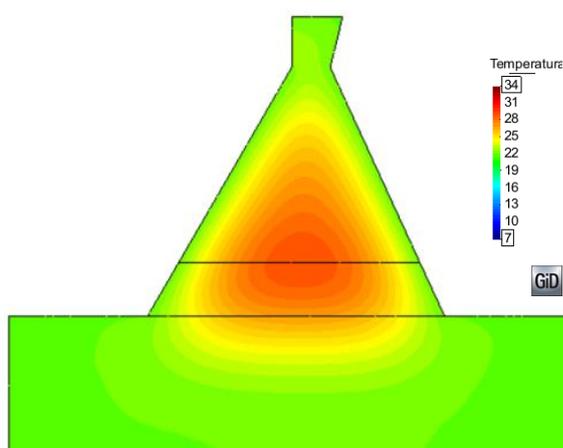


Figura 10. 730 dias: Temperatura Mínima = 21.869°C ; Temperatura Máxima = 28.941°C

O número de elementos fissurados em 365 e 730 dias permaneceu o mesmo e representa 3.85% dos elementos ativos nestas etapas. A temperatura máxima atingida aos 85 dias na simulação foi de 33.121°C.

### 5.3 Índice de Fissuração

O padrão de fissuração verificado na modelagem é semelhante ao observado *in loco*. A comparação entre esses padrões é apresentada na Figura 11.

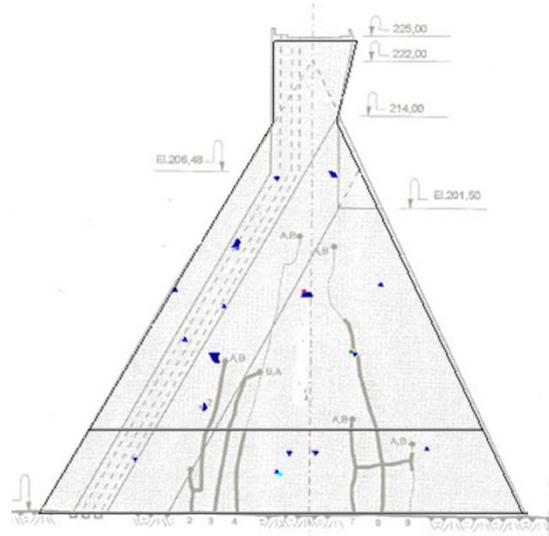


Figura 11 – Comparação do padrão de fissuração – Adaptação de Betioli *et al.* [9]

O resultado da modelagem mostrou um caminho vertical formado por elementos fissurados através do bloco. Tal comportamento é similar ao das fissuras presentes nos blocos, que também eram, em sua maior parte, verticais. É válido ressaltar que o índice de fissuração mostra apenas uma tendência de fissurar, não a evolução da fissura, uma vez que no modelo, a estrutura trabalha apenas na faixa elástica e não há modelos de fissuração implementados.

## 6 Conclusão

A temperatura máxima medida pelos instrumentos nos blocos foi de  $36^{\circ}\text{C}$  na cabeça e  $34^{\circ}\text{C}$  no contraforte em 90 dias. Nesta análise de MEF, foi observada uma temperatura máxima de  $33^{\circ}\text{C}$  também em torno de 90 dias. Este é um resultado melhor, comparado às análises anteriores, que simularam uma temperatura máxima de  $26^{\circ}\text{C}$  no contraforte, já que não anteciparam o alto gradiente térmico.

Na comparação do desenvolvimento das fissuras, é possível perceber a semelhança entre o padrão de fissuração apresentado nos relatórios de construção e o padrão de índice de fissuração obtido na modelagem. Esta é uma evidência firme de que a fissuração térmica é a principal causa do surgimento de fissuras nas primeiras idades da Barragem de Itaipu.

Essa análise não leva em conta a redução abrupta da geometria entre a cabeça e o contraforte, porque é uma simulação em 2-D. Portanto, não foi possível distinguir as diferenças de temperatura entre a cabeça e o contraforte.

Para os trabalhos futuros, recomenda-se executar uma simulação 3D completa, com todos os aspectos de geometria do bloco, a fim de obter resultados mais precisos e comparar a tendência de fissuração com o padrão visualizado no campo.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

## Referências Bibliográficas

- [1] E. M. R. Fairbairn, M. Azenha. *Thermal cracking of massive structures, State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS*. Springer, 2018.
- [2] O. Coussy. *Mechanics of Porous Continua*. Chichester: Wiley, 1995.
- [3] E. F. Silva. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. PhD Thesis COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.
- [4] F. J. Ulm, O. Coussy. Modeling of thermochemo mechanical couplings of concrete at early ages. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, pp. 785–794, 1995.
- [5] F. J. Ulm, O. Coussy. Strength Growth as Chemo-Plastic Hardening in Early Age Concrete. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, v. 122, pp. 1123–1132, 1996.
- [6] C. Hellmich. Shotcrete as part of the new Austrian tunneling method: from thermochemomechanical material modeling to structural analysis and safety assessment of tunnels. PhD thesis Technischen Universita<sup>t</sup>. Wien, 1999.
- [7] J. Sercombe, C. Hellmich, F. J. Ulm, H. Mang. Modeling of early-age creep of shotcrete. I: Model and model parameters. *ASCE J Eng Mech*, 126:284–291, 2000.
- [8] F. R. Andriolo, I. Betioli. *Itaipu Project-concrete works: Development, Control, Quality, Durability ... 40 Years later*. São Carlos - Editora Cubo: São Carlos, 2015.
- [9] I. Betioli, S. N. Sá, A. S. Fiorini. Criteria for control and survey of the cracking of the buttress dam of Itaipu. *XXII Simpósio Nacional de Grandes Barragens, CBDB*, 1997.
- [10] E. F. De Faria. Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados. Master's thesis COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.
- [11] D. D. Fonseca. Predição da elevação adiabática da temperatura do concreto através de modelos baseados em dados. Master's thesis COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, 2008.
- [12] J. A. Rosso, C. Piasentin. Studies on the cracking of the buttress dam of Itaipu. *XXII Simpósio Nacional de Grandes Barragens, CBDB*, 1997.
- [13] Engevix -Gcap / Promon-Gcap. Simple Buttresses Blocks – Structural analysis and study of cracking using the Finite Element Method. Construction reports: Paraná, 1980.
- [14] E. M. R. Fairbairn, M. M. Silvos, E. A. B. Koenders, F. L.B. Ribeiro, R. D. Toledo Filho. Thermo-Chemo-Mechanical Cracking Assessment for Early-Age Mass Concrete Structures. *Concrete International*, 34, 30-35, 2012.
- [15] E. M. R. Fairbairn, M. M.Silvos, F. L. B. Ribeiro, R. D. Toledo Filho. Determining the adiabatic temperature rise of concrete by inverse analysis: case study of a spillway gate pier. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 21:3, 272-288, 2017.
- [16] I. A. Ferreira. Solução em Paralelo de um Modelo Termo-Químico-Mecânico para Concreto Jovem. PhD Thesis COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2008.