

## **CÁLCULO TÉRMICO 3D DE ESTRUTURAS DE USINA HIDRELÉTRICA COM ALTA COMPLEXIDADE GEOMÉTRICA**

**Marcos Martinez Silvano**  
**Eduardo de Moraes Rêgo Fairbairn**  
**Iuri Alves Ferreira**  
**Fernando L. B. Ribeiro**  
**Romildo Dias Toledo Filho**  
**Vicente Helano F. Batista**

*silvano@coc.ufrj.br*  
*eduardo@coc.ufrj.br*  
*fernando@coc.ufrj.br*  
*toledo@coc.ufrj.br*  
*iuri@coc.ufrj.br*  
*helano@coc.ufrj.br*

Programa de Engenharia Civil – COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68506 - 21941-972 – Rio de Janeiro – RJ - Brasil

**Abstract.** *O presente trabalho apresenta o cálculo 3D das tensões térmicas durante a fase construtiva de elementos estruturais de uma usina hidrelétrica (UHE) real. As análises correspondem à casa de força (turbina Kaplan) e ao vertedouro da UHE. O modelo utilizado é acoplado termo-químico-mecânico e leva em consideração os diversos fenômenos que intervêm durante a evolução da reação de hidratação do cimento, como exotermia, termo-ativação, evolução das propriedades térmicas e mecânicas. O modelo, implementado em um código paralelizado, foi então aplicado à simulação da construção em camadas e com zoneamento de concreto, sendo a análise realizada em malhas de até 4.000.000 de elementos por um período de até dois anos.*

**Keywords:** *concreto, acoplamento termo-químico-mecânico, análise numérica.*

# 1 INTRODUÇÃO

O projeto executivo de estruturas massivas de concreto, tais como as estruturas presentes em usinas de aproveitamento hidrelétrico, possui como um caminho crítico o controle da fissuração decorrente de tensões térmicas provocadas pelo calor liberado durante a hidratação do cimento. As medidas de controle tradicionalmente adotadas procuram minimizar a temperatura máxima atingida no interior da massa de concreto através de diferentes ações: diminuição da espessura das camadas de concretagem; aumento do tempo de espera entre o lançamento de concreto em camadas consecutivas; diminuição da temperatura inicial do concreto; alterações da composição do material cimentante com diminuição do calor de hidratação do material. Tais medidas, quando adotadas, podem representar um aumento no custo e no tempo necessário para execução do empreendimento. No caso de usinas hidrelétricas, a solução otimizada desse problema torna-se estratégica em função dos altos custos envolvidos em todo o projeto, e do retorno econômico obtido a partir da antecipação no início da geração de energia elétrica.

Apesar da importância do controle da temperatura, este problema deve ser considerado de maneira acoplada. Deve ser observado que a hidratação do cimento, fenômeno que gera o calor responsável pelo aumento da temperatura, também é o fenômeno que propicia a formação do esqueleto sólido do material, conferindo ao concreto ganhos de rigidez e de resistência. Assim, ao analisar numericamente o potencial de fissuração de uma estrutura massiva de concreto, deve-se adotar um modelo capaz de prever, não apenas o estado de tensões térmicas, mas também as resistências mecânicas desenvolvidas pelo material.

A solução numérica do problema descrito envolve a determinação para toda a estrutura dos campos de hidratação, de temperatura, de deslocamentos e de tensões ao longo de toda a fase construtiva até a estabilização térmica do maciço. Trata-se, portanto, da solução transiente da equação de difusão de calor, com fonte de geração interna provocada pela exotermia da reação de hidratação, em conjunto com a solução da equação constitutiva que relaciona tensão e deformação do material. Ambos os problemas são não lineares: o problema térmico, em função da natureza termo-ativada da reação de hidratação, faz com que a quantidade de calor gerado seja função da temperatura; o problema mecânico apresenta deformações dependentes do tempo e do estado de tensões, decorrentes da fluência básica do concreto.

Elementos estruturais de usinas hidrelétricas, como, por exemplo, casas de força, vertedouros, blocos de fundação e seções de barragens, apresentam elevada complexidade geométrica. Além disso, apresentam contornos com características diversas que proporcionam diferentes tipos de restrição às deformações impostas pelos efeitos da hidratação. Em função disso, torna-se necessário um modelo tridimensional capaz de capturar adequadamente o comportamento estrutural dos elementos estudados.

Para resolver o problema descrito utilizou-se neste trabalho um modelo termo-químico-mecânico acoplado resolvido pelo método dos elementos finitos. O modelo foi implementado utilizando estratégias de computação de alto desempenho para solução em paralelo em arquiteturas de memória distribuída. Tal fato permite sua aplicação em casos reais com tempos compatíveis para uma análise de engenharia. Neste trabalho é apresentada a aplicação do modelo desenvolvido na simulação da fase executiva da casa de força e do vertedouro de uma usina hidrelétrica real, com utilização de diferentes materiais, zoneamento de temperatura de lançamento, e etapas construtivas de dimensões variadas. Os resultados são analisados de modo a permitir uma avaliação do potencial de fissuração dos elementos estudados. Os resultados obtidos indicam que a metodologia desenvolvida constitui uma importante ferramenta de análise capaz de auxiliar na tomada de decisão por parte do responsável pela execução de empreendimentos dessa magnitude.

## 2 PRINCÍPIOS DO MODELO NUMÉRICO

Dentre os diversos modelos numéricos presentes na bibliografia para análise do concreto durante o endurecimento do material, destaca-se o modelo de acoplamento termo-químico-mecânico, desenvolvido por Ulm e Coussy (1995). Este modelo enquadra-se dentro de um consistente e rigoroso quadro teórico termodinâmico, que considera os efeitos cruzados entre a reação de hidratação, a evolução da temperatura, variações dimensionais e mudanças nas propriedades do concreto. Apesar do formalismo teórico, sua praticidade é verificada em diversos trabalhos, tendo sido desenvolvido e utilizado na análise de diferentes aplicações, como vigas de concreto armado (Ulm e Coussy, 1998), barragens de pequenas centrais hidroelétricas (Fairbairn et al., 2003), túneis (Helmich, 1999) e cascas em concreto projetado (Sercombe et al., 2000 e Helmich et al., 2000), dentre outras.

O modelo de acoplamento termo-químico-mecânico para concreto nas primeiras idades vem sendo desenvolvido e aplicado com sucesso no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, sendo constituído de um módulo termo-químico e de outro mecânico. No módulo termo-químico são calculados os campos de temperatura e hidratação, considerando a exotermia e a termoativação da reação de hidratação. A quantidade de calor gerada em um dado tempo (exotermia) depende, portanto, da evolução da hidratação que, por sua vez, depende do histórico de temperatura na massa de concreto (termo-ativação). No módulo mecânico são calculadas as tensões desenvolvidas no concreto considerando-se o acoplamento da deformação de origem térmica com a deformação de retração autógena e a deformação de fluência. Esta última é calculada através de um modelo que divide as deformações viscosas em duas parcelas (uma de longo prazo e outra de curto prazo) além de levar em consideração a parcela relativa ao retorno irreversível de fluência. Todos os parâmetros mecânicos mais significativos (como resistência, módulo de elasticidade, velocidade de fluência, etc.) são variáveis em relação à evolução da reação de hidratação.

O modelo foi implementado em um programa de elementos finitos tridimensional que permite o cálculo transiente da distribuição de temperatura, hidratação e tensões, com consideração de fluência básica, no interior de estruturas massivas de concreto durante o endurecimento do material. O código computacional permite a simulação da construção de estruturas em diferentes etapas, com consideração de variações da geometria e das condições de contorno com o tempo. Maiores detalhes sobre o modelo teórico adotado, bem como sobre os procedimentos de determinação dos parâmetros do modelo, encontram-se nos trabalhos de Silvano (2003) e Silvano et al. (2005a, 2005b). Recentemente, foi desenvolvida por Ferreira (2008) uma metodologia de paralelização em arquiteturas de memória distribuída, do modelo termo-químico-mecânico em questão, utilizando rotinas do padrão *MPI*. Tal implementação em computação de alto desempenho permitiu a realização das análises apresentadas neste trabalho.

### 2.1. Evolução da reação de hidratação

O modelo considera o concreto como um meio poroso quimicamente reativo composto de um esqueleto sólido e poros, que podem estar preenchidos por água ou ar. O esqueleto sólido é formado por grãos de cimento anidro e hidratos, que são os produtos da reação de hidratação do cimento. A formação do esqueleto sólido é responsável pela evolução das propriedades do concreto na medida em que a reação de hidratação avança. A evolução da reação de hidratação é, então, deduzida dentro de um quadro teórico termodinâmico, com base na evolução da massa de esqueleto (Ulm e Coussy, 1995). A Equação 1 apresenta a lei do tipo *Arrhenius* adotada para representar a evolução da reação de hidratação, considerando sua natureza exotérmica e termoativada.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d\xi}{dt} m_{\infty} = \frac{1}{\eta(\xi)} A(\xi) \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right); \quad \frac{d\xi}{dt} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (1)$$

onde:

- $dm/dt$  é a variação da massa de esqueleto;
- $0 < \xi < 1$  é o grau de hidratação, isto é, a relação entre a massa de esqueleto no tempo  $t$  pela massa de esqueleto quando a hidratação se completa, isto é,  $\xi(t) = m(t)/m_{\infty}$ ;
- $\eta(\xi)$  é um termo que representa o aumento da barreira física para microdifusão da água através da camada de hidratos já formada ao redor do grão de cimento anidro;
- $A(\xi)$  é a afinidade química da reação, dependente do estado da reação;
- $Ea$  é a energia aparente de ativação térmica, considerada constante com relação ao grau de hidratação.  $T$  é a temperatura (*Kelvin*), e  $R$  a constante universal dos gases.

A afinidade normalizada, representada pela função  $\tilde{A}(\xi)$ , é a propriedade intrínseca do material que governa a cinética da reação de hidratação. Tal propriedade pode ser obtida, dentre outros métodos, a partir de ensaios experimentais de elevação da temperatura do concreto em condições adiabáticas (Silvoso et al., 2005b).

## 2.2. Acoplamento termo-químico

A equação que determina os campos térmicos e de hidratação é composta por um acoplamento termo-químico dado pela Equação (2).

$$C_e \dot{T} = Q + L \dot{\xi} + k \nabla^2 T \quad (2)$$

onde:

- $T$  é a temperatura;
- $L \dot{\xi}$  representa o calor gerado pela exotermia da reação de hidratação, no qual  $L$  é o calor latente de hidratação, que pode ser determinado por meio de ensaios experimentais.
- $C_e$  e  $k$  representam, respectivamente, a capacidade térmica e a condutividade térmica (para um sólido considerado homogêneo e isotrópico) do concreto, propriedades consideradas constantes com a evolução da reação de hidratação.
- $Q$  é o calor proveniente de outras fontes.

A Equação(2) pode ser resolvida através de um algoritmo iterativo passo-a-passo, onde  $\dot{\xi}$  é determinada a partir da Equação (1). Para tanto é necessário conhecer a afinidade química normalizada  $\tilde{A}(\xi)$  que é a propriedade intrínseca do material.

## 2.3. Acoplamento químico-mecânico

O módulo mecânico é resolvido de modo a determinar o histórico de tensões, deslocamentos e potencial de fissuração do concreto, a partir dos resultados fornecidos pelo problema termo-químico. Para tanto, são consideradas as deformações impostas pela variação de temperatura e pela retração autógena do concreto, que é a retração ocasionada pela água que migra dos poros para a realização da reação de hidratação, sendo, portanto função do grau de hidratação. Além disso, neste trabalho são consideradas também as deformações de fluência básica, divididas aqui em fluência de curto prazo e fluência de longo prazo conforme apresentado por Helmich (1999) e Sercombe et al.(2000). O problema quimo-mecânico é definido pela lei de evolução do grau de hidratação e pela equação incremental de tensões, dada na Equação (3).

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\xi) : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^{fl} - d\boldsymbol{\varepsilon}^{fc} - d\boldsymbol{\varepsilon}^{RA} - d\boldsymbol{\varepsilon}^T) \quad (3)$$

onde:

- $\boldsymbol{\sigma}$  representa o tensor de tensões;
- $\mathbf{C}(\xi)$  é o tensor de rigidez elástica do concreto, dependente do grau de hidratação de modo a simular o endurecimento do material;
- $\boldsymbol{\varepsilon}$  representa o tensor de deformações totais;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^{fl}$  é o tensor de deformações de fluência básica de longo prazo;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^{fc}$  é o tensor de deformações de fluência básica de curto prazo;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^{RA}$  é o tensor de deformações associado a retração autógena do concreto, sendo  $d\boldsymbol{\varepsilon}^{RA} = \varepsilon^{RA}(\xi)\mathbf{1}\dot{\xi}$ , onde  $\beta(\xi)$  é uma função, dependente do grau de hidratação, que correlaciona a evolução da hidratação com a correspondente retração autógena;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^T$  é o tensor de deformações térmicas, sendo  $d\boldsymbol{\varepsilon}^T = \alpha\mathbf{1}dT$  com  $\alpha$  representando o coeficiente de dilatação térmica do concreto, considerado constante durante a hidratação do concreto.

O tensor de rigidez elástica  $\mathbf{C}(\xi)$  é função do módulo de elasticidade ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que são parâmetros do material, o valor de  $\nu$  pode ser considerado constante, sendo a evolução do módulo de elasticidade determinante no endurecimento do material.

A extensão do modelo de acoplamento para incluir fluência básica do concreto é apresentada por Helmich (1999) e Sercombe et al. (2000). A fluência é separada em duas partes: curto prazo e longo prazo. A primeira é considerada efeito da difusão de água através dos microporos do concreto. A segunda é considerada efeito de um processo de deslocamento entre as camadas de CSH, na escala nanométrica. As parcelas de fluência de curto e longo prazo são dadas, respectivamente pelas Equações (4) e (5).

$$\tau_w(\xi)d\boldsymbol{\varepsilon}^{fc} = J_\infty^{fc} \mathbf{G} : \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\varepsilon}^{fc} \quad (4)$$

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{fl} = \frac{1}{\eta f} \mathbf{G} : \boldsymbol{\sigma} \quad (5)$$

Na equação (4),  $\mathbf{G} = E\mathbf{C}(\xi)^{-1}$  é o tensor de fluência,  $\tau_w(\xi) = \tau_{w,\infty}\xi$   $\tau_w(\xi) = \tau_{w,\infty}\xi$  é um tempo característico e  $J_\infty^{fc}$  é a fluência específica assintótica de curto prazo. Os parâmetros  $\tau_{w,\infty}$  e  $J_\infty^{fc}$  caracterizam a fluência de curto prazo de cada material.

Na Equação (5),  $\eta f$  é um parâmetro associado à viscosidade das camadas de CSH, determinante na fluência de longo prazo, obtido a partir das Equações (6) e (7).

$$\frac{1}{\eta f} = lc'\Gamma \exp\left[-\frac{2U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right] \quad (6)$$

$$\Gamma = -H\dot{\gamma}, \text{ com } \dot{\gamma} = c\Gamma^2 \exp\left[-\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right] \quad (7)$$

Nas Equações (6) e (7),  $\Gamma$  é a força de micro pré-tensão interna, que vem a ser a força governante da fluência de longo prazo;  $U$  é a energia de ativação que reflete a natureza termoativada da fluência de longo prazo, sendo  $U/R = 2700$  K (Helmich, 1999);  $\dot{\gamma}$  representa uma taxa de deslizamento entre camadas de CSH;  $T_o$  é uma temperatura de referência; e  $H$ ,  $c$  e  $c'$  são os parâmetros do material.

Operando-se as Equações (6) e (7) obtém-se uma equação quadrática, cuja solução positiva possibilita o cálculo da parcela de fluência de longo prazo como função de  $H$ ,  $c$  e  $c'$ . Tomando  $c/c' = 1$ , o termo  $H$  pode ser obtido a partir de ensaios experimentais de fluência em condição isoterma ( $T = T_o$ ).

Dessa forma, os parâmetros do material que determinam o comportamento de fluência do material são  $\tau_{w,\infty}$  e  $J_{\infty}^{fc}$ , para a fluência de curto prazo, e  $H$  para a fluência de longo prazo. Nos trabalhos de Helmich (1999) e Sercombe et al. (2000) são apresentados os procedimentos necessários para a obtenção dos parâmetros do material a partir de ensaios de fluência básica realizados com diferentes idades de carregamento.

## 2.4. Índice de Fissuração

A solução da Equação (3) permite a determinação para cada intervalo de tempo das tensões principais ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) e suas direções em relação ao sistema global. Neste trabalho o potencial de fissuração é analisado a partir do parâmetro definido como índice de fissuração, que integra a análise de tensões com a evolução da resistência do concreto em função do grau de hidratação, dado pela Equação (8).

$$\eta^p = \left[ \frac{\sigma_1^p(t)}{f_{ct}^p(\xi(t))} \right] \quad (8)$$

onde:

- $\sigma_1^p(t)$  é a maior tensão principal de tração em um ponto  $p$  no instante de tempo  $t$ ;
- $f_{ct}^p(\xi(t))$  é a resistência à tração do concreto em um ponto  $p$  no instante de tempo  $t$ .

O índice de fissuração é um parâmetro que permite, para cada instante de tempo, avaliar através de sua distribuição espacial quais as regiões mais críticas do elemento estrutural. Observa-se, por sua definição, que um índice de fissuração maior que 1 indica uma tensão de tração máxima superior à resistência à tração desenvolvida pelo concreto até aquele dado instante de tempo, implicando, conseqüentemente, em fissuração. Com o intuito de realizar uma análise global do índice de fissuração, propõem-se utilizar um histograma de frequência de distribuição dos índices de fissuração máximos de cada elemento, normalizada em função do número de elementos finitos da malha.

Esta frequência é calculada para faixas de índices de fissuração definidas de modo que uma faixa  $i$  é aquela que possui os índices de fissuração máximos de cada elemento  $\max(\eta^p(t))$  que respeitam a relação dada a seguir.

$$(i-1) \cdot h < \eta^{p,\max} < i \cdot h, \text{ com } h = \max(\eta^{p,\max}) / nf \quad (9)$$

onde:  $h$  é a dimensão da faixa;  $nf$  o número de faixas do histograma; e  $\max(\eta^{p,\max})$  é o índice de fissuração máximo atingido em toda na análise.

Dessa forma, a frequência para uma faixa  $i$  é então definida como:

$$frequência_i(\%) = 100 \frac{nelf_i}{nel} \quad (10)$$

onde:  $nelf_i$  é o número de elementos finitos com  $\eta^{p,\max}$  pertencente à faixa  $i$ ; e  $nel$  é o número total de elementos finitos da malha.

Assim, é possível construir um gráfico que permite facilmente avaliar o potencial de fissuração do elemento estrutural estudado.

### 3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste trabalho foi utilizado o modelo de acoplamento termo-químico-mecânico descrito, implementado em um código de elementos finitos desenvolvido em paralelo para arquitetura distribuída. A parelização é feita dentro de um esquema *SBS* (subdomínio-por-subdomínio), e estruturas de dados comprimidas são utilizadas para o armazenamento das matrizes de coeficientes. Os sistemas de equações são resolvidos iterativamente através do método de gradientes conjugados. A estrutura de dados utilizada é o *CSRC* (*compressed storage row/columns*), que é uma variante da estrutura *CSR* (*compressed storage row*), apresentada por Ribeiro e Ferreira (2007). Para análises com diferentes etapas construtivas o particionamento da malha é dinâmico, sendo a malha re-paricionada a cada alteração da estrutura, isto é, a partir da ativação de cada nova camada de concreto. Detalhes das estratégias de parelização adotadas podem ser encontrados no trabalho de Ferreira (2008).

As análises apresentadas neste trabalho foram executadas utilizando um *cluster* de 32 PCs, cada nó com 8 GB DDR2 de memória RAM e processador de dois núcleos com clock 2,66 GHz (MB L2 cache).

### 4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Neste trabalho foram considerados dois concretos com dosagens, e consumos de cimento diferentes, e conseqüentemente com propriedades térmicas e mecânicas também distintas. Estes concretos são identificados por C21 e C28, por serem projetados para atingir aos 90 dias de idade, respectivamente, a resistência à compressão de 21MPa e 28 MPa. As propriedades dos materiais adotadas na análise foram obtidas a partir de dados de bibliografia para concretos com as características mencionadas (Andrade, 1997).

Para solução da Equação (1) é necessário conhecer a curva de afinidade normalizada  $\tilde{A}(\xi)$ , que é a função que descreve a cinética da hidratação. Tal função pode ser deduzida resolvendo a Equação (2) para condições adiabáticas, utilizando resultados experimentais de ensaios de elevação adiabática da temperatura do concreto, obtidos através de ensaios em calorímetros. Maiores detalhes desse procedimento podem ser encontrados nos trabalhos de Silvos (2003) e Silvos et al. (2005b). Na Figura 1a são apresentadas as curvas adotadas para a elevação adiabática da temperatura dos concretos. A Figura 1b apresenta as curvas da afinidade normalizada deduzidas utilizando as curvas da Figura 1a, para  $Ea/R=4000K$ .

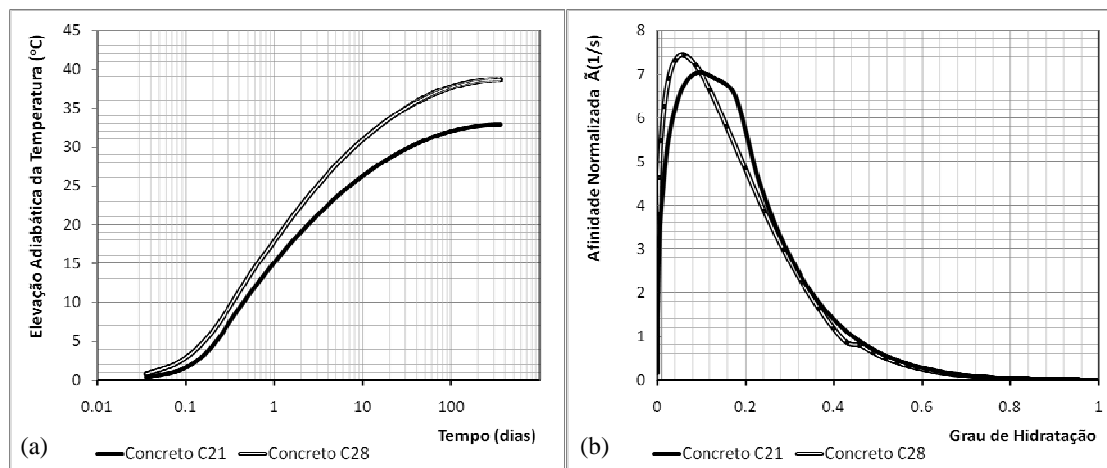


Figura 1 – Cinética de hidratação dos concretos: (a) Curvas de elevação adiabática da temperatura em escala semi-log; (b) Afinidade normalizada.

A caracterização do material para o problema termo-químico-mecânico deve ser considerada com relação ao grau de hidratação ( $\xi$ ). As propriedades mecânicas passam a existir após ser atingido um grau de hidratação limite para o qual o material deixa de ser um fluido e passa a ser um sólido. Tal grau de hidratação é chamado de patamar de percolação e denominado  $\xi_0$ . Sendo assim, dentro do quadro do presente trabalho, as propriedades mecânicas que variam com o grau de hidratação seguem a Equação (11).

$$P(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{se } 0 \leq \xi < \xi_0 \\ P^\infty \left( \frac{\xi - \xi_0}{1 - \xi_0} \right)^b & \text{se } \xi_0 \leq \xi \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

onde:

- $P(\xi)$ , representa uma propriedade variável com o grau de hidratação, sendo  $P^\infty$  a propriedade correspondente à hidratação completa;
- $0 \leq \xi < \xi_0$ , é o grau de hidratação, sendo que  $\xi = 0$  representa a hidratação ainda não iniciada,  $\xi = 1$  representa hidratação completa, e  $\xi_0$  representa o patamar de percolação;
- $b$  é um parâmetro dependente da propriedade analisada.

Na Tabela 1 estão apresentadas as propriedades dos dois concretos e da rocha de fundação dos elementos estruturais, utilizadas nas análises. Em ambos concretos, o módulo de elasticidade ( $E$ ), a resistência à tração ( $f_{ct}$ ) e a retração autógena ( $\varepsilon^{RA}$ ) foram consideradas como uma função do grau de hidratação ( $\xi$ ) na solução do problema termo-químico-mecânico, obedecendo a Equação (11).

Tabela 1 - Propriedades dos materiais consideradas na análise numérica.

| Propriedade                           | C21  | C28  | Rocha              |
|---------------------------------------|--|--|--------------------|
| $k$ (J/(m.s.K))                       | 2,69   | 2,70   | 2,70               |
| $C_e$ (J/(kg.K))                      | 1140,0   | 1140,0   | 1140               |
| $Ea/R$ (K)                            | 4000   | 4000   | -                  |
| $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )         | 2324   | 2330   | 3000               |
| $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )           | $9,04 \cdot 10^{-6}$                                     | $9,06 \cdot 10^{-6}$                                     | $11 \cdot 10^{-6}$ |
| $\xi_0$                               | 0,25   | 0,10   | -                  |
| $E$ (MPa)                             | $E^\infty = 24.700$ , $b = 0,65$                         | $E^\infty = 28.000$ , $b = 0,65$                         | 40.000             |
| $f_{ct}$ (MPa)                        | $f_{ct}^\infty = 2,9$ , $b = 1,0$                        | $f_{ct}^\infty = 3,4$ , $b = 1,0$                        | -                  |
| $\nu$                                 | 0,2 ( $\xi_0 \leq \xi \leq 1$ )                          | 0,2 ( $\xi_0 \leq \xi \leq 1$ )                          | 0,2                |
| $\varepsilon^{RA}$                    | $\varepsilon^{RA,\infty} = 50 \cdot 10^{-6}$ , $b = 1,0$ | $\varepsilon^{RA,\infty} = 50 \cdot 10^{-6}$ , $b = 1,0$ | -                  |
| $\tau_{w,\infty}$ (dias)              | 1,00   | 1,05   | -                  |
| $J_{\infty}^{fc}$ (Pa <sup>-1</sup> ) | $11,5 \cdot 10^{-12}$                                    | $11 \cdot 10^{-12}$                                      | -                  |
| $H$ (Pa)                              | 0,035  | 0,035  | -                  |

No problema térmico para as superfícies externas de concreto e da rocha foi considerada troca de calor por convecção com coeficiente pelicular  $h = 14,4$  W/(m<sup>2</sup>.K) e temperatura ambiente de 27°C. As restrições do modelo mecânico foram aplicadas à fundação, nas superfícies de corte virtual (solo com solo), com deslocamentos restringidos em todas as direções da base e na direção normal às superfícies em x e y.



5 CASA DE FORÇA

5.1. Geometria, Plano de Execução e Malha de Elementos Finitos

O modelo geométrico da casa de força analisada, com dimensões aproximadas de 60 metros de altura e comprimento e 30 metros de largura, está apresentado Figura 2. Na Figura 2 pode ser observada também a divisão da casa de força em diferentes volumes e sua identificação considerando a seqüência de execução prevista em projeto. Tal divisão visa analisar diversas fases construtivas e adotar zonas com temperaturas de lançamento diferentes (10°C, 12°C e 15°C).

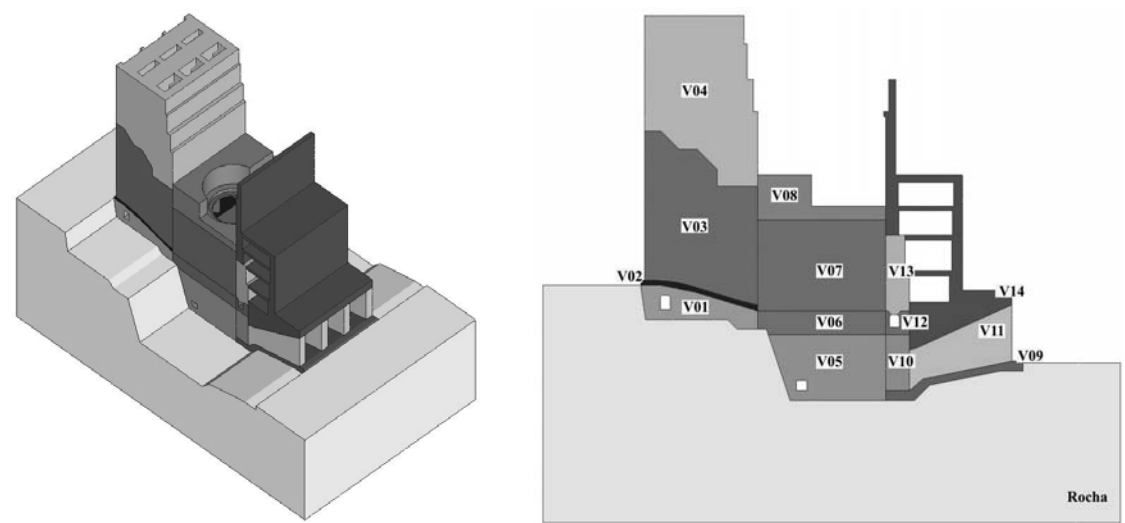


Figura 2 – Modelo geométrico da casa de força.

A execução dos volumes apresentados na Figura 2 foi simulada considerando as informações apresentadas na Figura 3 onde estão descritas as alturas das camadas construtivas, o intervalo entre camadas, a temperatura de lançamento do concreto e o material utilizado.

|     | Etap | Altura da Camada (m) | Idade (dias) | Temp. (°C) | Material |
|-----|------|----------------------|--------------|------------|----------|
| V01 | 1    | 3.70                 | 0            | 12         | C28      |
|     | 2    | 2.30                 | 7            | 12         | C28      |
|     | 3    | 1.00                 | 14           | 12         | C28      |
|     | 4    | 2.00                 | 21           | 12         | C28      |
| V02 | 5    | 1.00                 | 28           | 12         | C28      |
| V03 | 6    | 5.00                 | 35           | 12         | C28      |
|     | 7    | 7.00                 | 42           | 12         | C28      |
|     | 8    | 6.50                 | 49           | 12         | C28      |
|     | 9    | 2.50                 | 56           | 12         | C28      |
|     | 10   | 2.50                 | 63           | 12         | C28      |
|     | 11   | 2.50                 | 70           | 12         | C28      |
|     | 12   | 2.50                 | 77           | 12         | C28      |
|     | 13   | 2.50                 | 84           | 12         | C28      |
|     | 14   | 2.80                 | 91           | 12         | C28      |
|     | 15   | 3.20                 | 98           | 12         | C28      |
| V04 | 12   | 2.50                 | 77           | 15         | C28      |
|     | 13   | 2.50                 | 84           | 15         | C28      |
|     | 14   | 2.80                 | 91           | 15         | C28      |
|     | 15   | 2.80                 | 98           | 15         | C28      |
|     | 16   | 2.40                 | 105          | 15         | C28      |
|     | 17   | 2.50                 | 112          | 15         | C28      |
|     | 18   | 2.50                 | 119          | 15         | C28      |
|     | 19   | 2.20                 | 126          | 15         | C28      |
|     | 20   | 2.80                 | 133          | 15         | C28      |
|     | 21   | 2.50                 | 140          | 15         | C28      |
|     | 22   | 2.50                 | 147          | 15         | C28      |
| V05 | 26   | 2.00                 | 198          | 12         | C28      |
|     | 27   | 2.76                 | 205          | 12         | C28      |
|     | 28   | 2.00                 | 212          | 12         | C28      |
|     | 29   | 2.00                 | 219          | 12         | C28      |
| V06 | 30   | 2.00                 | 226          | 12         | C28      |
|     | 31   | 2.00                 | 233          | 12         | C28      |
|     | 32   | 2.25                 | 240          | 12         | C28      |
|     | 33   | 1.70                 | 247          | 12         | C28      |
| V07 | 34   | 1.50                 | 254          | 12         | C28      |
|     | 35   | 1.40                 | 261          | 10         | C28      |
|     | 36   | 1.40                 | 268          | 10         | C28      |
|     | 37   | 1.45                 | 275          | 10         | C28      |
| V08 | 38   | 1.25                 | 282          | 10         | C28      |
|     | 39   | 3.00                 | 289          | 10         | C28      |
|     | 40   | 2.40                 | 296          | 10         | C28      |
|     | 41   | 2.40                 | 303          | 10         | C28      |
| V09 | 42   | 2.40                 | 310          | 10         | C28      |
|     | 43   | 3.10                 | 317          | 10         | C28      |
|     | 44   | 0.95                 | 324          | 15         | C28      |
|     | 45   | 1.90                 | 331          | 15         | C28      |
| V10 | 46   | 3.10                 | 338          | 15         | C28      |
|     | 47   | 3.00                 | 345          | 15         | C28      |
|     | 48   | 2.46                 | 375          | 15         | C28      |
|     | 49   | 5.50                 | 382          | 12         | C28      |
| V11 | 50   | 2.76                 | 389          | 12         | C28      |
|     | 51   | 2.00                 | 396          | 12         | C28      |
|     | 52   | 2.00                 | 403          | 12         | C28      |
|     | 53   | 2.00                 | 410          | 12         | C28      |
|     | 54   | 2.00                 | 417          | 12         | C28      |
|     | 55   | 11.50                | 424          | 12         | C28      |
| V12 | 56   | 2.25                 | 424          | 12         | C28      |
|     | 57   | 1.70                 | 431          | 12         | C28      |
|     | 58   | 1.50                 | 438          | 12         | C28      |
|     | 59   | 1.40                 | 445          | 10         | C28      |
| V13 | 60   | 1.45                 | 452          | 10         | C28      |
|     | 61   | 1.45                 | 459          | 10         | C28      |
|     | 62   | 1.25                 | 466          | 10         | C28      |
|     | 63   | 3.00                 | 473          | 10         | C28      |
|     | 64   | 2.40                 | 480          | 10         | C28      |
|     | 65   | 2.40                 | 487          | 10         | C28      |
|     | 66   | 2.40                 | 494          | 10         | C28      |
| V14 | 67   | 2.00                 | 431          | 15         | C28      |
|     | 68   | 2.95                 | 438          | 15         | C28      |
|     | 69   | 2.10                 | 445          | 15         | C28      |
|     | 70   | 2.40                 | 452          | 15         | C28      |
|     | 71   | 3.00                 | 459          | 15         | C28      |
|     | 72   | 3.60                 | 466          | 15         | C28      |
|     | 73   | 3.60                 | 473          | 15         | C28      |
|     | 74   | 3.00                 | 480          | 15         | C28      |
|     | 75   | 3.00                 | 487          | 15         | C28      |
|     | 76   | 2.90                 | 494          | 15         | C28      |
|     | 77   | 2.90                 | 501          | 15         | C28      |
|     | 78   | 1.50                 | 508          | 15         | C28      |
|     | 79   | 3.50                 | 515          | 15         | C28      |
|     | 80   | 3.70                 | 522          | 15         | C28      |
|     | 81   | 2.90                 | 529          | 15         | C28      |
|     | 82   | 2.00                 | 536          | 15         | C28      |
|     | 83   | 3.00                 | 543          | 15         | C28      |
|     | 84   | 3.50                 | 550          | 15         | C28      |

Figura 3 – Plano de execução da casa de força.

A malha de elementos finitos utilizada é composta de 2.256.511 elementos tetraédricos lineares com 419.262 nós e está ilustrada na Figura 4. O tamanho da malha é ditado pela necessidade de considerar efeitos locais, na escala de centímetros, em uma estrutura que com dimensões da ordem de dezenas de metros.

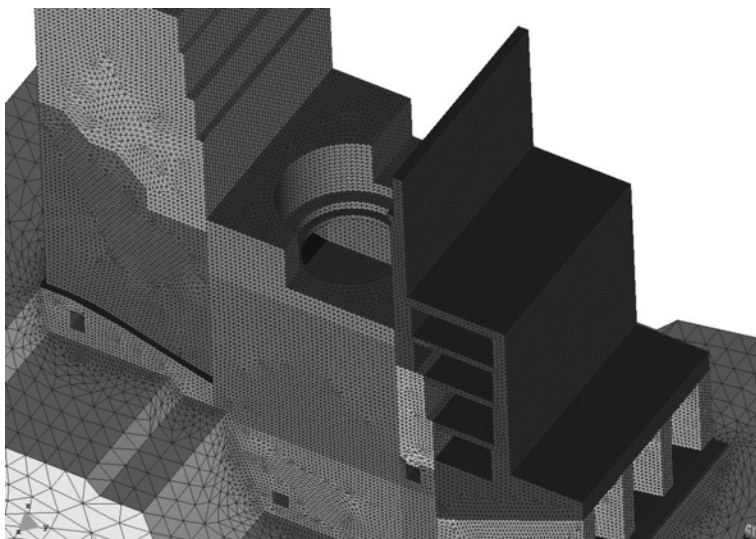


Figura 4 – Parte da malha de elementos finitos do modelo da casa de força.

## 5.2. Resultados

### 5.2.1. Temperatura

A Figura 5 apresenta as temperaturas máximas obtidas durante a evolução das etapas construtivas da casa de força. Na etapa 47, com idade de 367 dias, foi atingida a temperatura máxima global igual a 46,55°C. Os resultados de temperatura estão ilustrados da Figura 6 a Figura 8, onde também podem ser observados diferentes estágios do processo executivo.

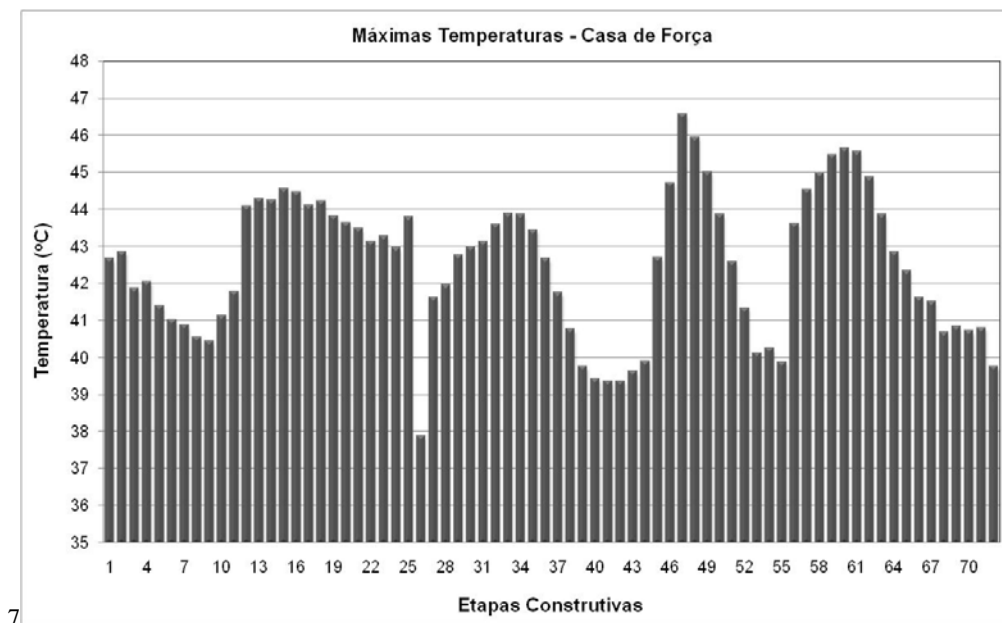


Figura 5 – Temperaturas máximas obtidas na casa de força.

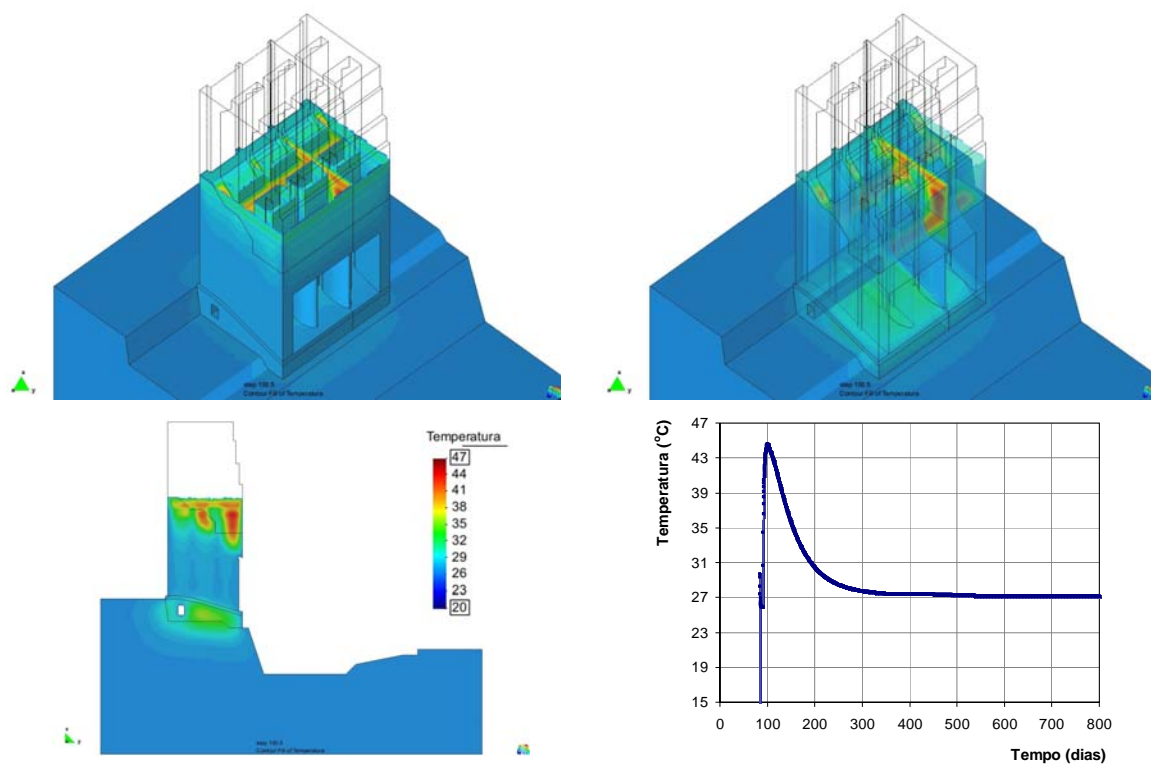


Figura 6 – Campos de temperatura para a idade de 100,5 dias e gráfico de evolução da temperatura do nó que atingiu a temperatura máxima no bloco de montante da casa de força.

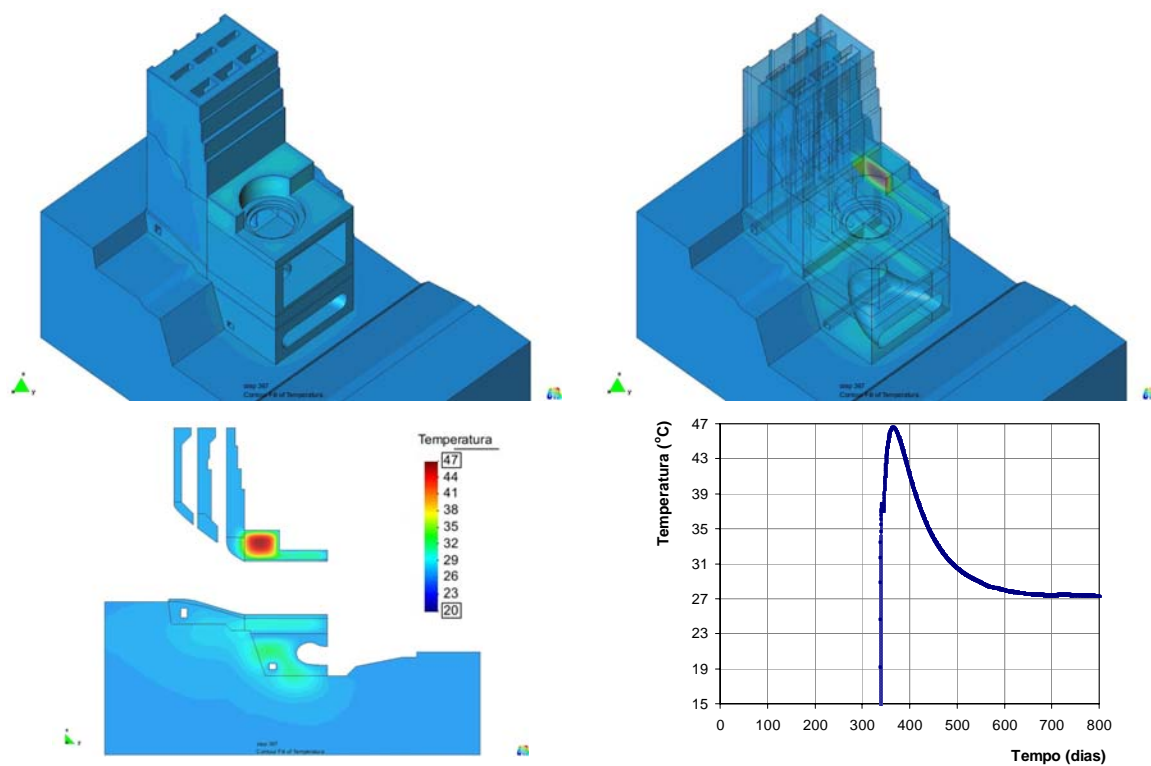


Figura 7 – Campos de temperatura para a idade de 367 dias e gráfico de evolução da temperatura do nó que atingiu a temperatura máxima na parte central da casa de força.

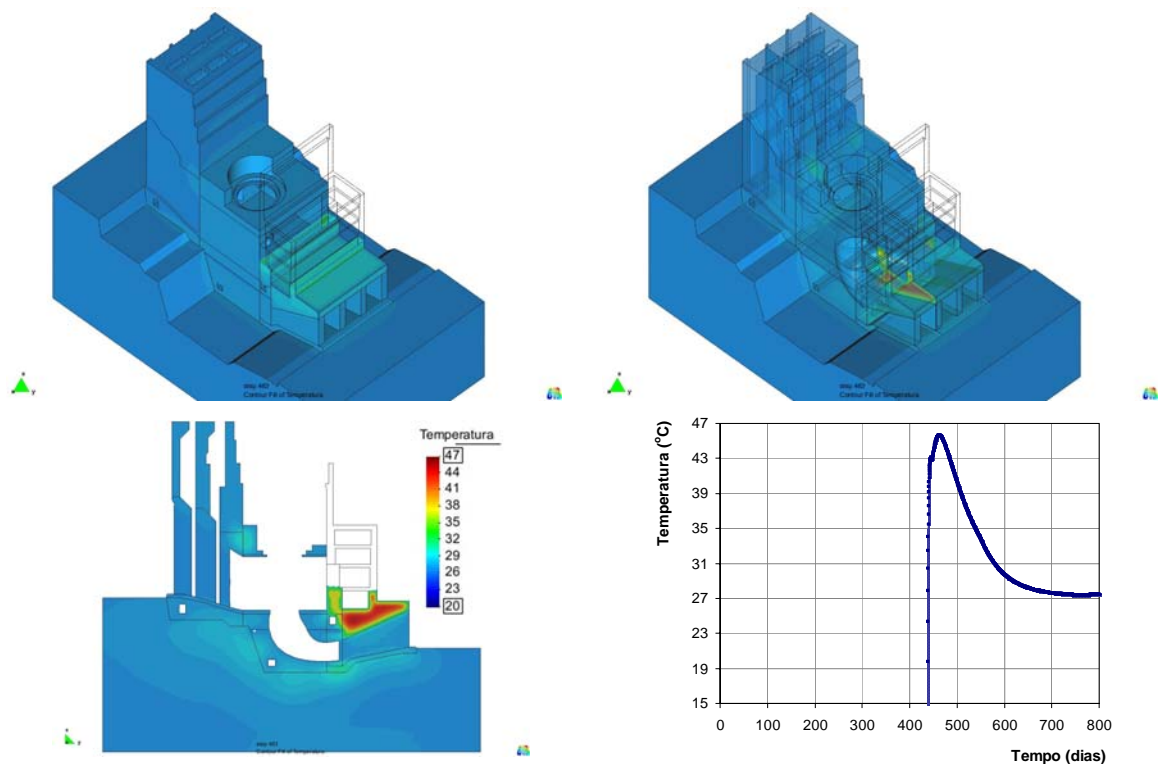


Figura 8 – Campos de temperatura para a idade de 463 dias e gráfico de evolução da temperatura do nó que atingiu a temperatura máxima no bloco de jusante da casa de força.

### 5.2.2. Índice de Fissuração

Na Figura 9 está apresentado o histograma de distribuição de frequência do índice de fissuração, obtido conforme definido no item 2.4. Devido a uma singularidade geométrica, que afetou a qualidade da malha de elementos finitos, foi atingido em uma região muito limitada da estrutura o máximo índice de fissuração de  $\eta_{p,max} = 1,998$ . Esse índice máximo não é significativo na análise global do problema, como pode ser observado pelo histograma da Figura 9, onde se nota também a maior proporção de índices de fissuração menores que 1. Na distribuição apresentada, 98% dos elementos atingiram um índice de fissuração máximo menor que 0,56.

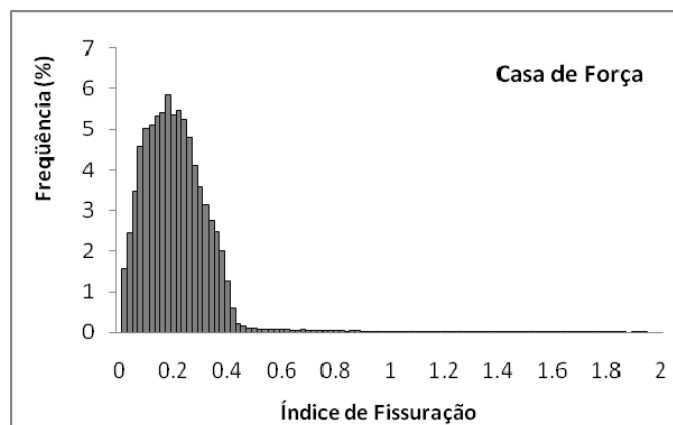


Figura 9 – Histograma de distribuição de frequência do índice de fissuração.

6 VERTEDOURO

6.1. Geometria, Plano de Execução e Malha de Elementos Finitos

Na Figura 10 está apresentado o modelo geométrico do vertedouro analisado, com dimensões aproximadas de 60 metros de altura, 50 metros de comprimento e 40 metros de largura. Observa-se também na Figura 10 a divisão do vertedouro em diferentes volumes, e sua identificação. A divisão apresentada visa também considerar a utilização de diferentes materiais e temperaturas de lançamento (10°C, 12°C e 15°C).

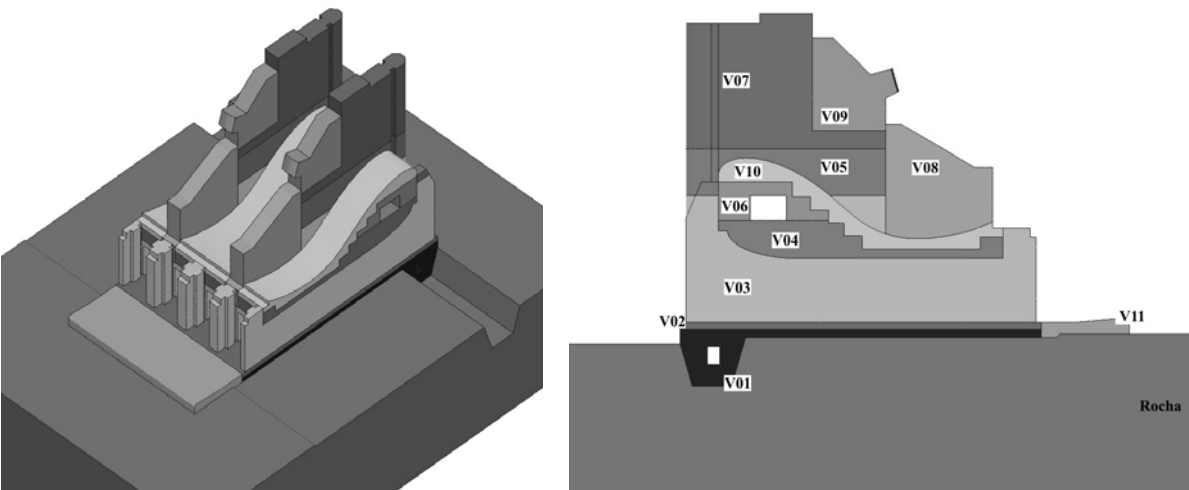


Figura 10 – Modelo geométrico do vertedouro.

A execução dos volumes apresentados na Figura 10 foi simulada considerando as informações apresentadas na Figura 11. Nela descreve-se para cada volume as alturas das camadas construtivas, a idade, a temperatura de lançamento do concreto e o material utilizado.

|     | Etapa | Altura da Camada (m) | Idade (dias) | Temp. (°C) | Material |
|-----|-------|----------------------|--------------|------------|----------|
| V01 | 1     | 9.3                  | 0            | 15         | C28      |
| V02 | 2     | 1.3                  | 7            | 10         | C28      |
| V03 | 3     | 4.2                  | 14           | 10         | C28      |
|     | 4     | 4.2                  | 21           | 10         | C28      |
|     | 5     | 4.2                  | 28           | 10         | C28      |
|     | 6     | 4.2                  | 35           | 15         | C28      |
|     | 7     | 4.0                  | 42           | 15         | C28      |
| V04 | 8     | 2.1                  | 49           | 15         | C21      |
|     | 9     | 4.2                  | 56           | 15         | C21      |
| V05 | 10    | 3.0                  | 63           | 15         | C28      |
|     | 11    | 2.4                  | 70           | 15         | C28      |
|     | 12    | 2.4                  | 77           | 15         | C28      |
| V06 | 13    | 4.0                  | 84           | 15         | C21      |
|     | 14    | 2.3                  | 91           | 15         | C21      |
| V07 | 15    | 3.0                  | 98           | 15         | C28      |
|     | 16    | 3.0                  | 105          | 15         | C28      |
|     | 17    | 4.0                  | 112          | 15         | C28      |
|     | 18    | 4.0                  | 119          | 15         | C28      |
|     | 19    | 4.3                  | 126          | 15         | C28      |
|     | 20    | 5.3                  | 133          | 15         | C28      |

|     | Etapa | Altura da Camada (m) | Idade (dias) | Temp. (°C) | Material |
|-----|-------|----------------------|--------------|------------|----------|
| V08 | 5     | 4.2                  | 28           | 15         | C28      |
|     | 6     | 4.2                  | 35           | 15         | C28      |
|     | 7     | 4.0                  | 42           | 15         | C28      |
|     | 10    | 3.0                  | 63           | 15         | C28      |
|     | 11    | 2.4                  | 70           | 15         | C28      |
|     | 12    | 2.4                  | 77           | 15         | C28      |
|     | 15    | 3.0                  | 98           | 15         | C28      |
|     | 16    | 3.0                  | 105          | 15         | C28      |
| V09 | 21    | 3.0                  | 140          | 12         | C28      |
|     | 22    | 6.6                  | 147          | 12         | C28      |
|     | 23    | 1.4                  | 154          | 12         | C28      |
|     | 24    | 4.3                  | 161          | 12         | C28      |
| V10 | 25    | 2.3                  | 168          | 12         | C28      |
| V11 | 26    | 2.7                  | 175          | 15         | C21      |

Figura 11 – Plano de execução do vertedouro.

A malha de elementos finitos utilizada é composta de 2.414.823 elementos tetraédricos lineares com 438.119 nós e está ilustrada na Figura 12.

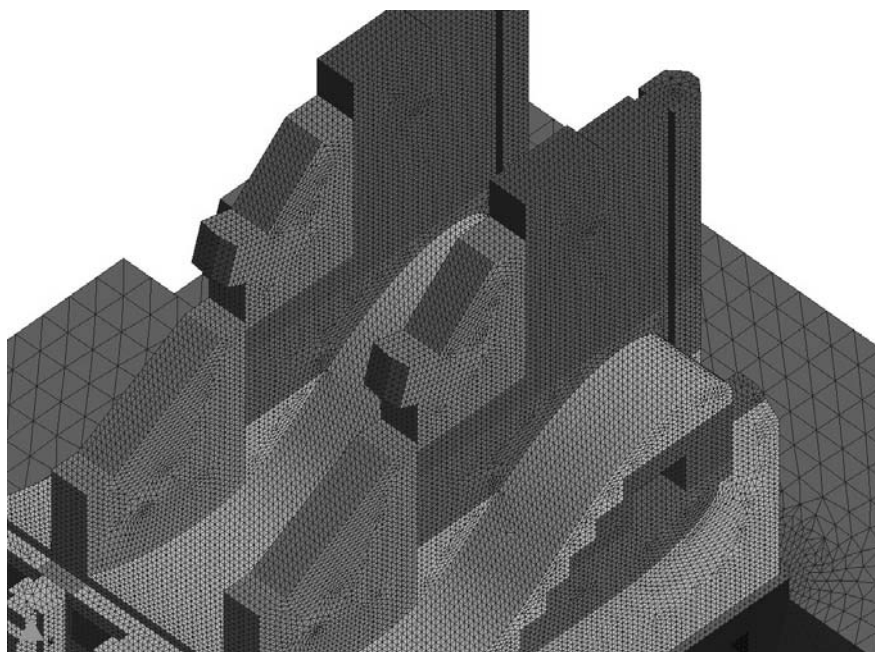


Figura 12 – Parte da malha de elementos finitos do modelo do vertedouro.

## 6.2. Resultados

### 6.2.1. Temperatura

A Figura 5 apresenta as temperaturas máximas obtidas durante a evolução das etapas construtivas do vertedouro. No volume 01 (fundação) após a execução da etapa 2, com idade de 10 dias, foi obtida a temperatura máxima global de 43,91°C. Os resultados de temperatura estão ilustrados na Figura 14 e Figura 15.

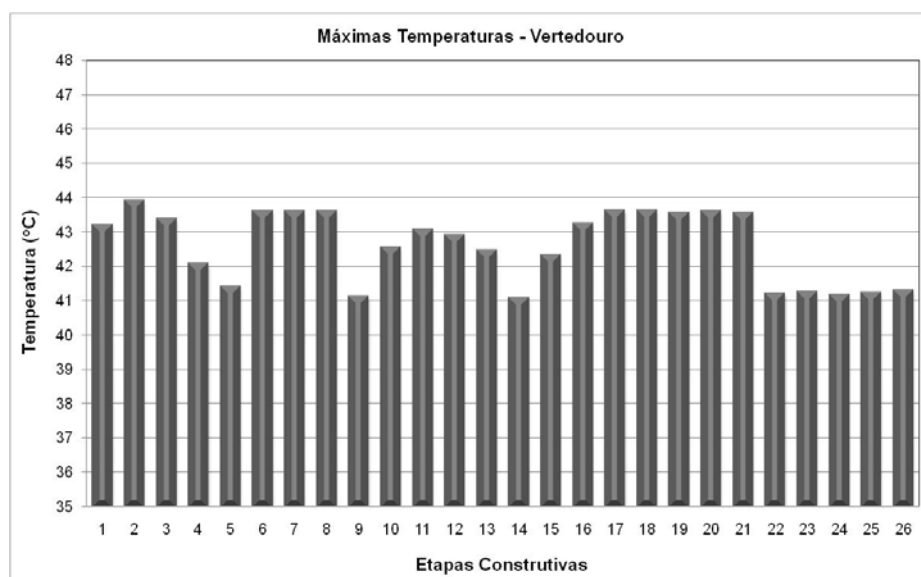


Figura 13 – Temperaturas máximas obtidas no vertedouro.

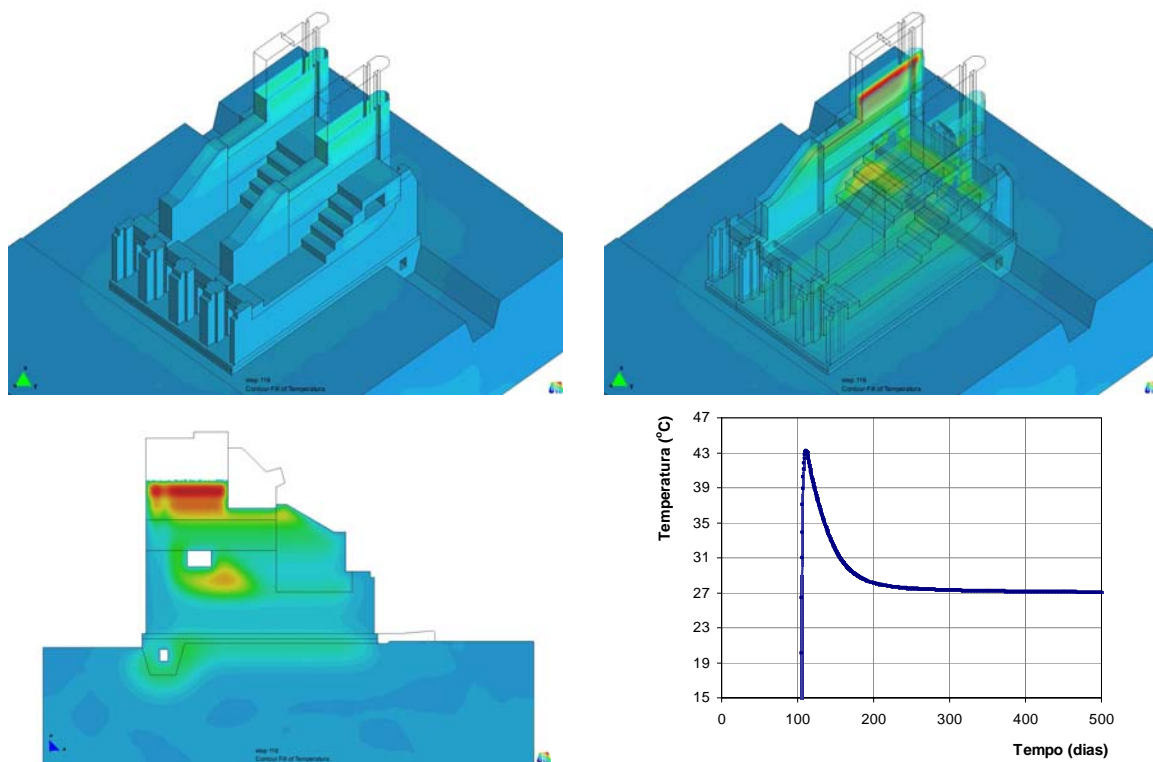


Figura 14 – Campos de temperatura para a idade de 119 dias e gráfico de evolução da temperatura do nó que atingiu a temperatura máxima no pilar do vertedouro.

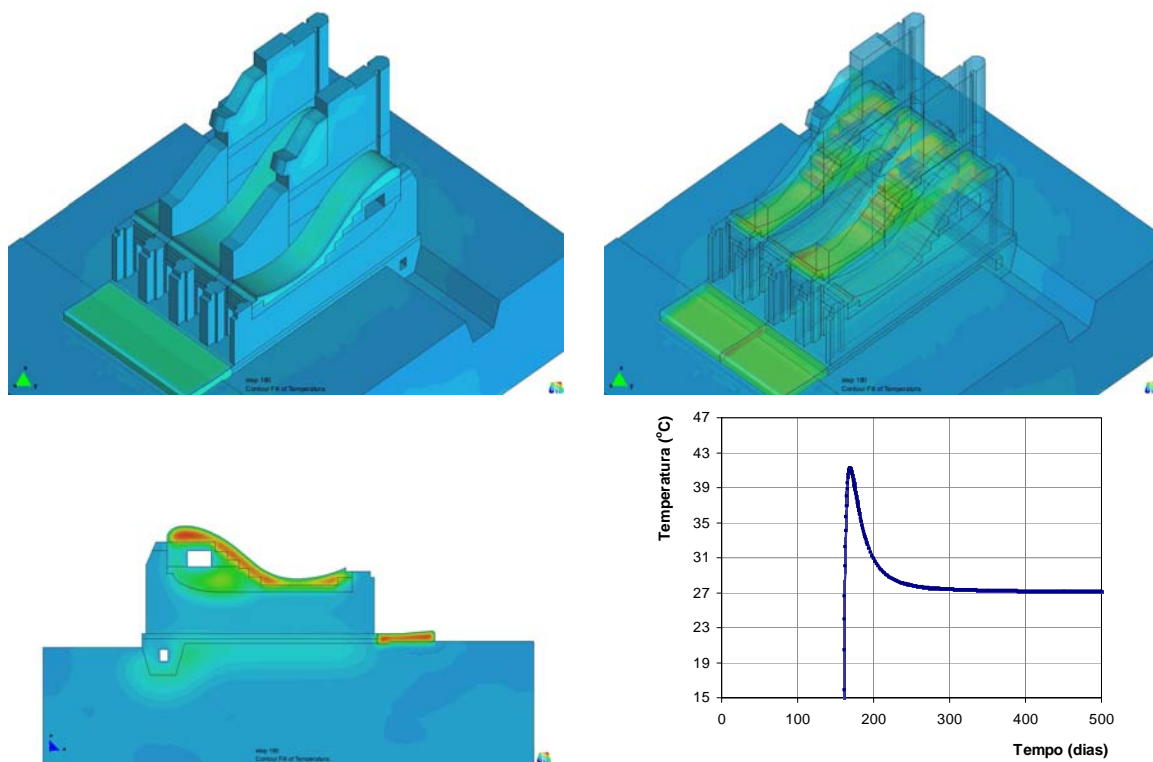


Figura 15 – Campos de temperatura para a idade de 180 dias e gráfico de evolução da temperatura do nó que atingiu a temperatura máxima no núcleo do vertedouro.



### 6.2.2. Índice de Fissuração

Na Figura 16 está apresentado o histograma de distribuição de frequência do índice de fissuração. O máximo índice de fissuração atingido foi  $\eta_{p,max} = 1,89$ . De modo similar a análise da casa de força, este índice máximo surgiu em uma região muito limitada da estrutura, não sendo significativo na avaliação global do comportamento do índice de fissuração. Pela análise da distribuição de frequência obtém-se que 98% dos elementos atingiram um índice de fissuração máximo menor que 0,41.

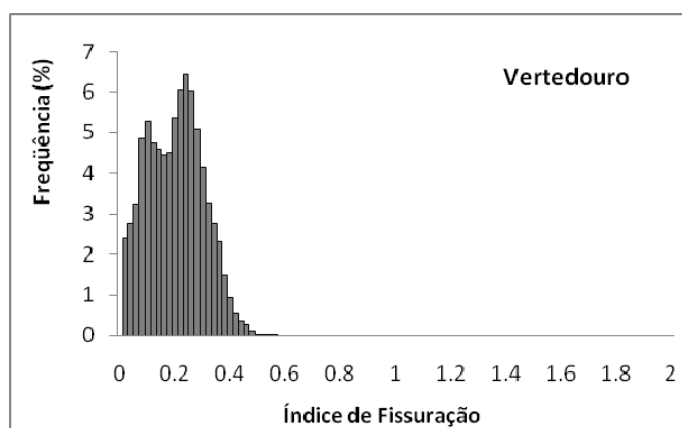


Figura 16 – Histograma de distribuição de frequência do índice de fissuração.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se neste trabalho a aplicação de um modelo termo-químico-mecânico para análise do concreto durante seu endurecimento. Este modelo foi implementado em um código de elementos finitos paralelizado que permitiu a simulação tridimensional da fase construtiva de elementos estruturais de usinas de aproveitamento hidrelétrico.

A alta capacidade computacional do modelo possibilitou a análise de estruturas de elevada complexidade geométrica com planos construtivos reais. Tais análises demandam a solução transiente do modelo termo-químico e mecânico durante toda a fase construtiva até a estabilização térmica da estrutura. Isto significa solucionar um sistema com um grande número de equações (ordem de  $10^6$ ) um grande número de vezes (ordem de  $10^4$ ), o que só é possível a partir da utilização de estratégias de computação de alto desempenho.

A metodologia apresentada neste trabalho permite avaliar o controle da fissuração do concreto em face dos efeitos de hidratação, através de uma análise numérica robusta e eficiente, capaz de simular o comportamento termo-químico-mecânico do material e avaliar globalmente o risco de fissuração do concreto nas primeiras idades. Tal metodologia constitui uma importante ferramenta para um adequado planejamento da fase construtiva de elementos estruturais de grandes dimensões, onde as tensões de origem térmica são significativas.

### Agradecimentos

Ao Consórcio OIV Tocomá e a CVG Electrificación del Caroní (CVG EDELCA)

Aos engenheiros Walton Pacelli de Andrade da ENGECONSOL e José Henrique Rodrigues Lopes da VLB Engenharia pela colaboração na definição das propriedades dos materiais e dos modelos geométricos dos elementos estruturais analisados.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, CNPq, CAPES, FAPERJ, ANEEL e FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS pelo suporte à pesquisa.



## REFERÊNCIAS

- Andrade, W. P., 1997. *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. Ensaio e propriedades*, editora PINI, 1997.
- Fairbairn, E. M. R., Silvoso, M. M., Toledo Filho, R. D., Alves, J. L. D. Ebecken, N. F. F., 2004. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Computers & Structures*, vol. 82, pp. 281-299.
- Ferreira, I. A., 2008. *Simulação em paralelo de um modelo termo-químico-mecânico para concreto jovem*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ-PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Hellmich, C., 1999. *Shotcrete as part of the new austrian tunneling method: from thermochemomechanical material modeling to structural analysis and safety assessment of tunnels*. Tese de Doutorado. Viena: Technischen Universität Wien.
- Ribeiro, L. F. B., e Ferreira, I. A., 2007. Parallel implementation of the finite element method using compressed data structures. *Computational Mechanics*, vol. 41, pp. 31-48.
- Sercombe, J., Hellmich, C., Ulm, F-J, Mang, H., 2000. Modeling of early age creep of shotcrete. I: model and model parameters. *Journal of Engineering Mechanics*, março de 2000, pp. 284-291.
- Hellmich, C., Sercombe, J., Ulm, F-J, Mang, H., 2000. Modeling of early age creep of shotcrete. II: Application to Tunneling. *Journal of Engineering Mechanics*, março de 2000, pp. 292-299.
- Silvoso, M. M., 2003. *Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos*, Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ-PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Silvoso, M. M., Fairbairn, E. M. R., Toledo Filho, R. D., 2005a. Early-age analysis of a foundation slab: sensitivity to creep parameters, In Pijaudier-Cabot, G., Gérard, B., Acker, P., eds, *CONCREEP 7, Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*. Hermes Science Publishing, pp. 429-434.
- Silvoso, M. M., Fairbairn, E. M. R., Toledo Filho, R. D., Guerra, E. A, Santos, S. B., 2005b. Análise experimental da evolução das propriedades térmicas e mecânicas do concreto massa aplicando a teoria dos acoplamentos termo-químico-mecânicos. In *Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005*, Recife. vol 2, pp. 1-16.
- Ulm, F.-J., Coussy, O., 1998. Couplings in early-age concrete: From material modeling to structural design. *International of Solids and Structures*, vol. 35, pp. 4295-4311.
- Ulm, F.-J., Coussy, O., 1995. Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, vol. 121, pp. 785-794.