

ANÁLISE TERMO-HIDRO-MECÂNICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Rafaela O. Amaral.^a, Michèle Cristina R. Farage.^b e Flávia S. Bastos.^b

^a*Bacharel em Engenharia Civil – Mestre em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de fora, Brasil. Faculdade de Engenharia – Sala 4117 – Campus Universitário – Juiz de Fora – CEP 36036-330 rafaela.amaral@engenharia.ufjf.br.*

^b*Professora Doutora, Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional e Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Juiz de Fora, Brasil. Faculdade de Engenharia – Sala 4117 – Campus Universitário – Juiz de Fora – CEP 36036-330*

Palavras Chave: Dano de Mazars; Fênomeno de transporte; Temperaturas elevadas; Cast3m.

Resumo. A exposição a temperaturas elevadas provocadas por incêndios é uma das situações mais críticas a que uma estrutura pode estar exposta. Por questões de segurança, é importante compreender e prever os efeitos do fogo sobre a integridade estrutural. Quando se trata de uma estrutura de concreto, a análise deve levar em conta as complexas reações físico-químicas desenvolvidas no material. Deste modo, procura-se representar de forma realista a degradação mecânica resultante de mecanismos de transporte de massa e energia.

Este trabalho apresenta uma abordagem termo-hidro-mecânica para simular o comportamento de estruturas formadas por camadas de rocha e concreto sujeitas a incêndios. Emprega-se um modelo transiente e não-linear, em que o dano é representado através do Modelo de Mazars.

As análises numéricas foram realizadas através do programa livre Cast3m e comparadas a dados experimentais, de modo a representar situações reais, como as observadas em estruturas como túneis.

1 INTRODUÇÃO

Concreto, produto resultante do endurecimento de uma mistura, em determinadas proporções, de cimento Portland com agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água, é o material de engenharia para construção civil mais utilizado no mundo. Ele é um material heterogêneo e poroso, contendo em seu interior fluidos na forma líquida e gasosa, o que dificulta a descrição e previsão do comportamento de estruturas feitas com esse material (Mehta e Monteiro, 2008).

Estruturas de concreto possuem boa resistência ao incêndio, devido às suas baixas condutividade térmica e capacidade de combustão, e não exalam gases tóxicos ao serem aquecidas. Mas, com o aumento da temperatura, sua resistência característica e seu módulo de elasticidade são reduzidos e ocorre perda de rigidez da estrutura. Quando o concreto é aquecido, independentemente da causa, ocorrem fenômenos complexos que incluem transporte de massa, de energia e reações químicas, que podem prejudicar muito sua integridade estrutural, provocando a degradação das características mecânicas e comprometendo a capacidade da estrutura em desempenhar o papel para o qual foi projetada. A estabilidade da estrutura depende da evolução das características do concreto durante a exposição a temperaturas elevadas (Ferreira, 2011), que geram tensões e deformações (elásticas e plásticas). Essas deformações desempenham, em geral, o principal papel na falha das estruturas quando aquecidas (Bazant e Kaplan, 1996). Em muitos casos, elementos de concreto sujeitos a altas temperaturas podem ter suas camadas fragmentadas devido a uma explosão do material, fenômeno conhecido como “spalling”, Fig. 1. Conforme Kanema et al. (2011), porosidade, permeabilidade, expansão térmica diferencial entre a pasta de cimento e agregado, alto teor de umidade, taxa de calor e carregamento externo são parâmetros que contribuem para a ocorrência desse fenômeno.



Figura 1: Deterioração de um corpo-de-prova por “spalling” (Ferreira, 2011)

Muitos fenômenos e interações estão envolvidos na evolução das propriedades que ocorrem no interior do concreto aquecido, o que torna este tipo de problema altamente não-linear (Gawin et al., 2003). Assim, para descrever corretamente o comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas, é importante considerar a condução de calor acoplada, o fluxo de fluidos e o comportamento mecânico. Fratura e “spalling” no concreto aquecido são questões importantes que dependem dos fatores termo-hídrico - TH - e termo-mecânico - TM - (Cülfik e Özturan, 2010).

Pode-se citar como propriedades térmicas do concreto a condutividade térmica, calor específico e expansão térmica, que são dadas em função do tipo e da quantidade de agregado usados na mistura do concreto. A porosidade e a permeabilidade são as propriedades físicas do concreto que influenciam seu comportamento térmico.

Este trabalho trata de um modelo acoplado termo-hidro-mecânico - THM - transiente e não-linear, aplicado ao problema de transporte de energia e massa em meios porosos. Será considerada a perda de rigidez do concreto através do modelo de Dano Mecânico de Mazars. Para esta análise, foi usado o código para análise estrutural Cast3m (DMT/CEA - Département de Mécanique et Technologie Du Commissariat à l'Énergie Atomique). Foram analisados dois corpos sob situação de incêndio: um corpo-de-prova em bicamada rocha-concreto e uma faixa da parede da casa de força de uma usina hidrelétrica.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição do modelo THM adotado e as aplicações realizadas.

2 MECÂNICA DO DANO APLICADA AO CONCRETO

De acordo com [Álvares \(1993\)](#), a 'teoria do dano' descreve a evolução local do processo de deterioração do material partindo de uma configuração inicial ideal, sem defeitos, até um estado final onde fissuras discretas ou microfissuras possam ser observadas.

Para o concreto, o modelo de dano pode ser classificado como isotrópico e anisotrópico. O modelo de dano de Mazars, que foi o adotado nesse trabalho, é isotrópico e representado pela variável escalar 'D'.

Observando a Fig. 2, a variável dano na direção normal \vec{n} , Eq. (2), é definida como sendo a razão entre a área danificada, S_d , e a área da seção do elemento de volume, S , onde a área danificada, Eq. (1), é a diferença entre a área da seção e a área efetiva, \tilde{S} .

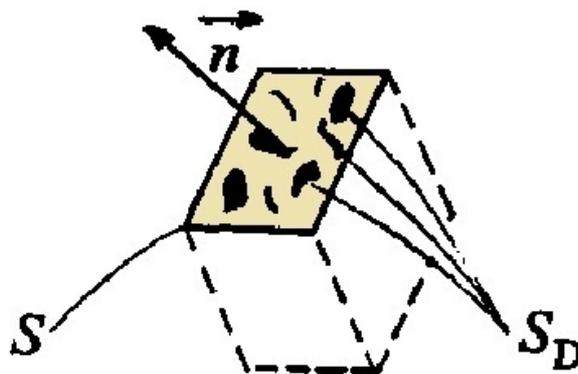


Figura 2: Elemento de um sólido danificado

$$S_D = S - \tilde{S} \quad (1)$$

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad (2)$$

A variável de dano, D_n , varia de 0 a 1, sendo 0 para o material íntegro e 1 para o material completamente danificado. Para o caso de isotropia, a variável dano é uniforme em todas as

direções. A Eq. (3) faz referência a esta hipótese de isotropia.

$$D_n = D \quad \forall \quad \vec{n} \quad (3)$$

A tensão efetiva, $\tilde{\sigma}$, é definida como sendo a razão entre a força aplicada na seção do elemento de volume representativo, F , pela área efetiva dessa seção, \tilde{S} , Eq. (4). A tensão efetiva em função da variável de dano será dada através da Eq. (5).

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1 - D)} \quad (5)$$

Válida para $\tilde{\sigma} \geq \sigma$, sendo:

$$\tilde{\sigma} = \sigma \rightarrow \text{material virgem};$$

$$\tilde{\sigma} = \infty \rightarrow \text{quando } D \rightarrow 1 \text{ (dano máximo)}.$$

Segundo [Lemaitre e Chaboche \(1994\)](#), qualquer comportamento de deformação, sendo uniaxial ou multiaxial, do material danificado é representado pela lei constitutiva do material íntegro em que a tensão usual é substituída pela tensão efetiva. A Fig. 3 ilustra a deformação elástica unidimensional de um material com dano descrita em função de um material íntegro, ou seja, a variável dano, D , e a tensão usual, σ , foram substituídas por uma tensão efetiva, $\tilde{\sigma}$.

Para o exemplo da lei elástica linear uniaxial do material danificado, dessa relação têm-se a deformação equivalente, $\tilde{\epsilon}$, que é dada por:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1 - D)E} \quad (6)$$

onde E é o módulo de Young para o material íntegro.

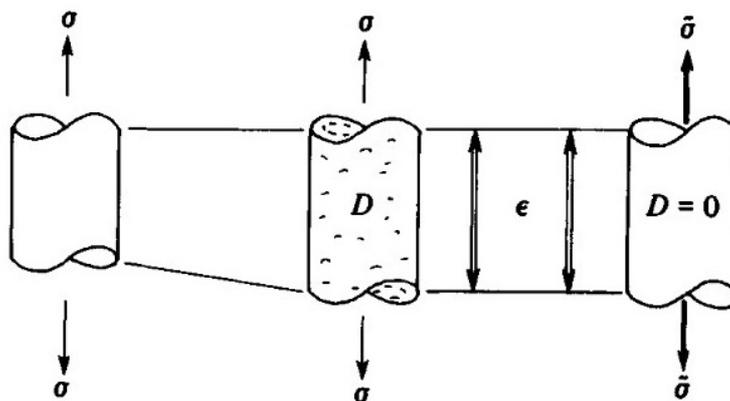


Figura 3: Tensão efetiva e deformação equivalente, adaptado de [Lemaitre e Chaboche \(1994\)](#).

3 FORMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA PARA O CONCRETO

3.1 Considerações iniciais

Para a formulação TH algumas considerações foram levadas em conta: o esqueleto sólido sofre deformações infinitesimais; o comportamento do vapor de água será considerado como o de um gás perfeito; a água líquida será considerada incompressível; a histerese da curva de sorção (e dessorção) será desprezada; a difusão na fase gasosa não será considerada; a existência

do ar seco nos poros serão desprezados e o calor transportado por convecção pelos fluidos será desprezado.

A formulação matemática para o modelo TH consistiu de 4 equações: equação de balanço de massa para as fases fluidas (água líquida e vapor d'água), equação de balanço de energia (através da Lei de Fourier e do princípio da conservação de energia), equação de momento linear das fases fluidas e equação de equilíbrio termodinâmico entre as fases líquidas e vapor.

Para a formulação matemática do modelo mecânico foi incorporada a teoria do dano mecânico de Mazars.

As fórmulas descritas a diante são as que foram empregada nas análises computacionais realizadas com o Cast3m.

3.2 Formulação térmica

A formulação térmica foi definida pelo Balanço de Energia que é representado pela Eq. (7):

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \dot{\mu}_{l \rightarrow v} - L_{s \rightarrow l} \dot{d} \quad (7)$$

$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_{ll} \quad (8)$$

onde: $c(S_l, d)$ é o calor específico volumétrico dado em função da desidratação, d , e da saturação, S_l ; ϕ é a porosidade do meio; d_0 e d é a desidratação máxima e a desidratação no tempo, respectivamente; C_s , C_l e C_{ll} é o calor específico da fase sólida, líquida e da água ligada, respectivamente; ρ é a massa específica; T é a temperatura; t é o tempo; $\lambda(T)$ é a condutividade térmica variando com a temperatura ($W/(mK)$); $L_{l \rightarrow v}(T)$ é o calor latente de vaporização; $L_{s \rightarrow l}$ é o calor latente de desidratação; $\dot{\mu}_{l \rightarrow v}$ é a quantidade de água vaporizada por unidade de tempo ($Kg/m^3/s$) e \dot{d} é a cinética da desidratação ($Kg/m^3/s$).

3.3 Formulação hídrica

A formulação hídrica foi dada pela equação que descreve os movimentos da água líquida ou em vapor no material poroso, considerando uma parcela de acúmulo de massa devido à dilatação térmica (Gawin et al., 2006):

$$\frac{\partial [\rho_l(T) - \rho_v(T)] \phi(d) S_l}{\partial t} - \chi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [D(S_l, d, T) \nabla (S_l)] + \dot{d} \quad (9)$$

Sendo a condutividade hídrica do meio definida pela Eq. (10) e o parâmetro χ dado em função da dilatação térmica, α , definido pela Eq. (11), parcela referente ao efeito mecânico no modelo hídrico.

$$D(S_l, d, T) = \left[\frac{\rho_l(T)}{\mu_l(T)} k_{rl}(S_l) K_l(d) \frac{\rho_l}{\rho_v} \frac{1}{S_l} + \frac{\rho_v(T)}{\mu_v(T)} k_{rv}(S_l) K_v(d) \right] \frac{\partial p_v}{\partial S_l} \quad (10)$$

$$\chi = \alpha(1 - \phi)(S_g \rho_v + S_l \rho_l) \quad (11)$$

onde K_l é a permeabilidade intrínseca líquida; K_v é a permeabilidade intrínseca ao gás; k_{rl} é a permeabilidade relativa líquida; k_{rv} é a permeabilidade relativa ao gás; μ_l é a viscosidade dinâmica líquida; μ_v é a viscosidade dinâmica de vapor; p_v é a pressão de vapor; S_l é a saturação de água líquida; S_v é a saturação de vapor de água; ρ_l é a massa específica de água líquida e ρ_v é a massa específica de vapor de água.

3.4 Evolução das propriedades termo-hídricas

A Tabela 1 mostra as leis de evolução adotadas para diversos parâmetros do material em termos da temperatura.

Permeabilidade aparente do meio	$k_a = \frac{Kk_{ri}}{\mu_l}$
Permeabilidade intrínseca ao gás ($Kg.m^2$)	$k_v(d) = K_{v0}e^{0,126d}$ onde $K_{v0} = 1,0 \times 10^{-17}$
Permeabilidade intrínseca ao líquido ($Kg.m^2$)	$k_l(d) = K_{l0}e^{0,126d}$ onde $K_{l0} = 10^{-4} \times K_{v0}$
Permeabilidade relativa ao gás	$k_{rv}(S_l) = \sqrt{1 - S_l(1 - S_l^2)}$
Permeabilidade relativa ao líquido	$k_{rl}(S_l) = \sqrt{S_l(1 - \sqrt{(1 - S_l^2)})^2}$
Pressão de vapor saturante	$p_{vs} = p_{atm} \exp\left(\frac{M\Delta H_v}{R} \frac{T - 373,15}{373,15T}\right)$ onde $p_{atm} = 101325 Pa$, $R = 8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$, $M_v = 0,018 Kg.mol^{-1}$, $\Delta H_v = 2,26 \times 10^6 J.Kg^{-1}$ T em Kelvin
Cinética de desidratação (Kg/m^3)	$d = \frac{d_{max}}{540}(T - 60)$ para $T > 60^\circ C$
Porosidade total	$\phi = \phi(60) + \frac{d(T)}{\rho_{hyd}}$ sendo $\rho_{hyd} = 817,42 Kg/m^3$
Massa volumétrica da água líquida	$\rho_l(T) = 314,4 + 685,6 \left[1 - \left(\frac{T}{374,4}\right)^{1/0,55}\right]^{0,55}$, T em $^\circ C$
Viscosidade dinâmica líquida ($Kg/(ms)$)	$\mu_l(T) = 2,414 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{570,58058}{T+133,15}\right)$, T em $^\circ C$
Viscosidade dinâmica de vapor de água ($Kg/(ms)$)	$\mu_v(T) = 3,85 \times 10^{-8}T + 10^{-5}$, T em $^\circ C$
Calor latente de vaporização (KJ/Kg)	$L_{l \rightarrow v} = \frac{2450,2502 - 6,433949T}{1 - 0,0019057413T - 7,0023846T^2}$
Condutividade térmica da rocha ($W/(mK)$)	$\lambda_r = \frac{0,0936}{0,026 + 3m\phi\left(\frac{T}{T_0}\right)}$ onde $m = 0,08$ para $T_{ambiente}$ e $m = 0,11$ para $T > 443K$
Condutividade térmica do concreto comum ($W/(mK)$)	$\lambda_{CC} = 2 - 0,2451\left(\frac{T}{100}\right) + 0,0107\left(\frac{T}{100}\right)^2$
Condutividade térmica do concreto de alto desempenho ($W/(mK)$)	$\lambda_{CAD} = 2,3 - 0,2451\left(\frac{T}{100}\right) + 0,0107\left(\frac{T}{100}\right)^2$

Tabela 1: Evolução das propriedades termo-hídricas (Ferreira, 2011)

3.5 Formulação Mecânica

A teoria do dano de Mazars para o concreto em processo de dano evolutivo considera as seguintes hipóteses: o comportamento é elástico; o dano é causado pela existência de alongamentos em uma das direções principais de deformação ($\varepsilon_i > 0$); o dano é isotrópico, porém existe uma variável dano para compressão e outra para tração; o dano é representado localmente por uma variável escalar D ($0 \leq D \leq 1$). A evolução do dano acontece quando um determinado valor de referência para a deformação equivalente (alongamento) for superado.

Torna-se necessário definir como um parâmetro representativo do estado local de extensão do material uma deformação equivalente ($\tilde{\varepsilon}$), que é expressa pela Eq. (12).

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{(\varepsilon_1)_+^2 + (\varepsilon_2)_+^2 + (\varepsilon_3)_+^2} \quad (12)$$

onde $(\varepsilon_i)_+$ é a parte positiva do alongamento na direção i e é definido como:

$$(\varepsilon_i)_+ = \frac{1}{2}[\varepsilon_i + |\varepsilon_i|] = \begin{cases} \varepsilon_i, & \text{se } \varepsilon_i > 0 \\ 0, & \text{se } \varepsilon_i \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

O dano começa a ocorrer quando a deformação $\tilde{\varepsilon}$ atinge um valor inicial $S(0)$, que, por convenção, é igual à deformação ε_{d0} determinada em teste de tração uniaxial, e corresponde à máxima tensão, que pode ser aproximada pela Eq. (14).

$$\varepsilon_{d0} = \frac{f_t}{E} \quad (14)$$

onde f_t é a resistência a tração e E é o módulo de Young.

O critério de dano pode ser expresso por uma função f do tensor equivalente $\tilde{\varepsilon}$ e do dano escalar D , tal como:

$$f(\tilde{\varepsilon}, D) = \tilde{\varepsilon} - S(D) \leq 0 \quad \text{com} \quad S(0) = \varepsilon_{d0} \quad (15)$$

A lei de evolução da variável dano, D , é definida pela condição seguinte:

$$\begin{aligned} \dot{D} &= 0, \text{ se } f < 0 \text{ ou } f = 0 \text{ e } \dot{f} < 0 \\ \dot{D} &= F(\tilde{\varepsilon})(\dot{\tilde{\varepsilon}})_+, \text{ se } f = 0 \text{ e } \dot{f} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

onde: Onde: $(\dot{\quad})$ indica a variação no tempo e $F(\tilde{\varepsilon})$ é uma função contínua positiva da deformação equivalente $\tilde{\varepsilon}$. Com isso, a variável dano crescerá continuamente, o que representa o comportamento físico observado.

No modelo isotrópico, foram propostas por Mazars (Álvares, 1993) duas variáveis escalares: D_t para tração e D_c para compressão:

$$D_i = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_i)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_i}{\exp[B_i(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{d0})]} \quad (17)$$

onde: o índice i se refere a tração ou compressão e os parâmetros A_t , A_c , B_t e B_c são parâmetros do concreto, na tensão e compressão uniaxial, determinados através das curvas tensão-deformação do material.

A variável dano é então a combinação linear de D_t e D_c :

$$D = \alpha_t^\beta D_t + \alpha_c^\beta D_c \quad \text{sendo} \quad \alpha_t^\beta + \alpha_c^\beta = 1 \quad (18)$$

onde os valores para α_t^β e α_c^β pertencem ao intervalo fechado $[0, 1]$, e representam a contribuição de tração e compressão para o estado local de alongamento. O parâmetro β foi introduzido para melhorar o comportamento ao cisalhamento do modelo. Seu valor sugerido pela literatura para o concreto é $\beta = 1,06$. Através das equações (19) e (20) obtém-se as expressões para α_t e α_c :

$$\alpha_t = \frac{\sum \varepsilon_{ti}(\varepsilon_i)_+}{\tilde{\varepsilon}^2} \quad (19)$$

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t \quad (20)$$

onde ε_{ti} é o vetor normal na direção principal e é calculado para a tensão efetiva principal positiva, $(\bar{\sigma}_i)_+$, pela Eq. (21).

$$\varepsilon_{ti} = \frac{1 + \nu}{E} (\bar{\sigma}_i)_+ - \frac{\nu}{E} ((\bar{\sigma}_i)_+ + (\bar{\sigma}_j)_+ + (\bar{\sigma}_k)_+) \quad (21)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson e E é o módulo de Young do material.

Segundo o Modelo de Mazars, o dano no concreto inicia-se quando a deformação equivalente atinge o limite elástico de tração desse material ε_{d0} . A partir desse momento, a relação constitutiva será expressa por:

$$\bar{\sigma} = (1 - D) \overline{\overline{C_0}} \bar{\varepsilon} \quad (22)$$

onde $\overline{\overline{C_0}}$ é o tensor elástico de quarta ordem para o material íntegro.

Mazars (Álvares, 1993) propôs os seguintes intervalos de validade para os valores dos parâmetros ε_{d0} , A_t , A_c , B_t e B_c :

$$\begin{aligned} 1,0 \cdot 10^{-5} &\leq \varepsilon_{d0} \leq 1,0 \cdot 10^{-4} \\ 0,7 &\leq A_t \leq 1,0 \\ 1,0 \cdot 10^4 &\leq B_t \leq 1,0 \cdot 10^5 \\ 1,0 &\leq A_c \leq 1,5 \\ 1,0 \cdot 10^3 &\leq B_c \leq 2,0 \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (23)$$

Esses parâmetros podem ser determinados através das curvas tensão-deformação do concreto, à tração e à compressão uniaxial. A Tabela 2 mostra as expressões para o cálculo de ε_{d0} , A_t , A_c , B_t e B_c .

ε_{d0}	$\varepsilon_{d0} = \frac{f_t}{E}$
A_t	$A_t = 1 - \frac{\sigma_\infty}{E \cdot \varepsilon_{d0}}$
B_t	$B_t = \frac{1 + \xi}{\varepsilon_{d0}}$
A_c	$A_c = \frac{f_c - E \cdot \varepsilon_{d0}}{E \cdot \varepsilon + E \cdot \varepsilon_{max} \cdot \exp(-1 + \frac{\varepsilon_{d0}}{\varepsilon_{max}})}$
B_c	$B_c = \frac{1}{\varepsilon_{max}}$

Tabela 2: Cálculo dos parâmetros de Mazars.

4 APLICAÇÕES NUMÉRICAS

Cast3m é um programa para a resolução de equações diferenciais parciais pelo Método dos Elementos Finitos. Trata-se de um sistema de código aberto e gratuito, que permite a incorporação e adaptação de modelos por parte do usuário. Foi desenvolvido no DMT/CEA (Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique). Trata-se de um sistema que incorpora as funções de cálculo, pré-processamento e pós-processamento. Por ele é possível realizar análises de problemas de elasticidade linear, térmicos, não-lineares, dinâmicos, dentre outros. A linguagem de programação usada no Cast3m é a GIBIANE (<http://www-cast3m.cea.fr>, acesso em 06/2014).

Neste trabalho foi incorporado o modelo mecânico no algoritmo apresentado por Ferreira (2011), usado para analisar a influência da temperatura no comportamento do concreto (como se dá a distribuição de temperatura na estrutura e que modificações e deteriorações o aquecimento

pode causar), através do modelo termo-hídrico. A Fig. 4 apresenta a estrutura do algoritmo, destacando os pontos onde houve as adaptações para incorporar o cálculo mecânico.

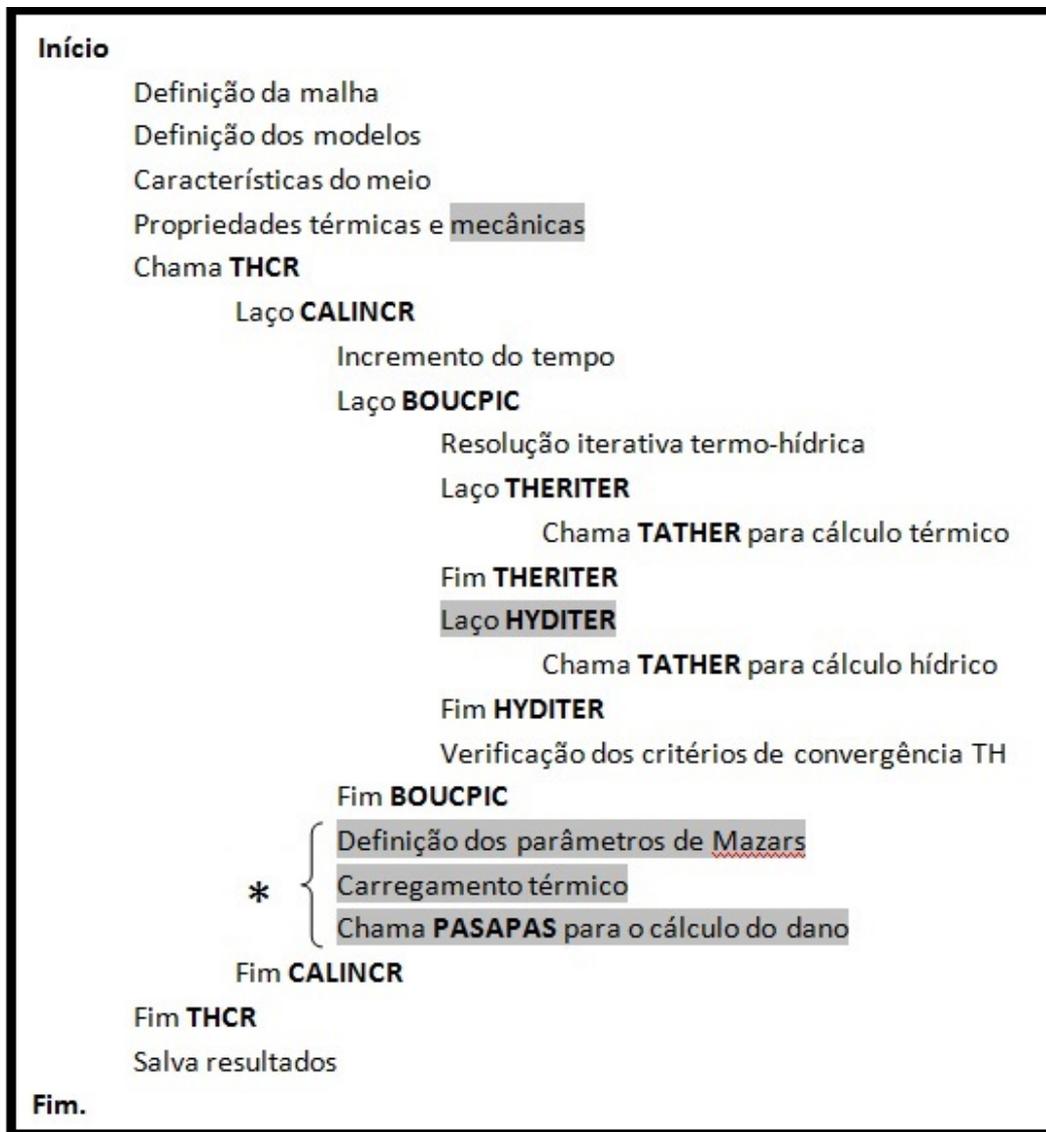


Figura 4: Algoritmo para o cálculo termo-hidro-mecânico.

Para a resolução do problema termo-hidro-mecânico, segundo [Ervin et al. \(2012\)](#), para o cálculo de estruturas em situações de fogo, o acoplamento termo-mecânico envolve soluções numéricas muito complexas, porém seu resultado quando comparado à solução sem esse acoplamento não é muito diferente, o que significa que o resultado mecânico não influencia no resultado térmico, no mesmo passo de tempo. Então neste trabalho o algoritmo a ser usado primeiramente realizará o cálculo acoplado termo-hídrico e em seguida o cálculo mecânico.

4.1 Aplicação 1: Bcamada rocha-concreto

Esta aplicação simula o comportamento de um corpo-de-prova (CP) bicamada (concreto com 23cm de altura aderida a uma camada de 7cm de rocha) dentro de um forno programado para aquecer na base do concreto e as demais faces isoladas com lã-de-vidro. A Fig. 5 esquematiza

o corpo-de-prova usado na análise experimental (Xing, 2011), a posição dos termopares que foram usados para medir a temperatura dentro do forno, a geometria usada na análise numérica e as condições de contorno impostas para o cálculo THM. A Fig. 6 mostra o corpo-de-prova usado na análise experimental por Xing (2011), que teve por objetivo simular um túnel em situação de incêndio.

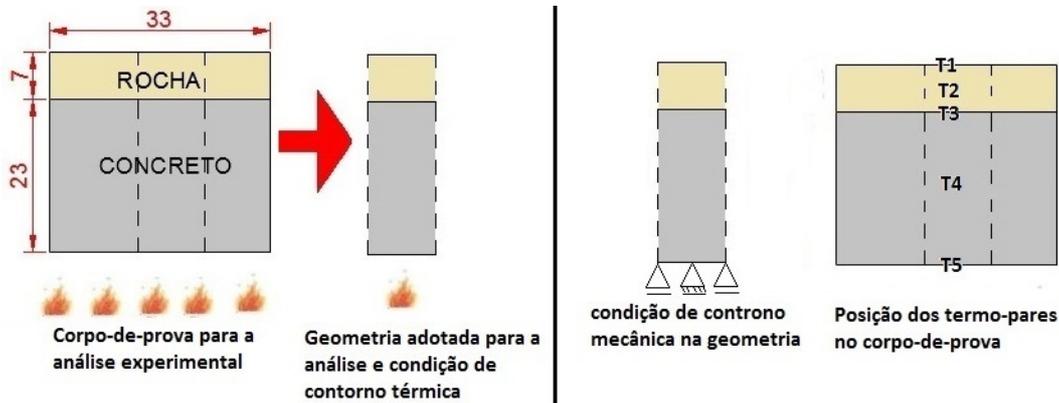


Figura 5: Esquema do corpo-de-prova, da posição dos termopares no corpo-de-prova, da geometria usada na análise numérica e as condições de contorno impostas para o cálculo THM.

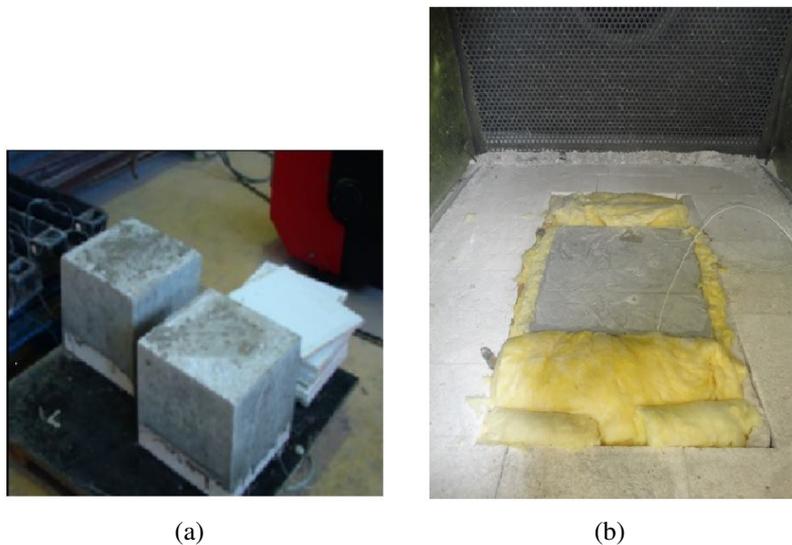


Figura 6: Fotografia do CP dentro e fora do forno, experimento realizado por Xing (2011).

A aplicação desse modelo THM terá por objetivo avaliar o efeito da incorporação do modelo mecânico (dano mecânico de Mazars) sobre os resultados da análise da bicamada. Os resultados obtidos aqui foram comparados aos obtidos experimentalmente - apresentados por Xing (2011) - e aos obtidos numericamente pelo modelo termo-hídrico - apresentados por Ferreira (2011).

Foram fornecidas ao código algumas propriedades iniciais que podem ser vistas na Tabela 3 e 4 e a carga térmica imposta na superfície do concreto, que é a mesma que foi medida no forno, mostrada na Fig. 7.

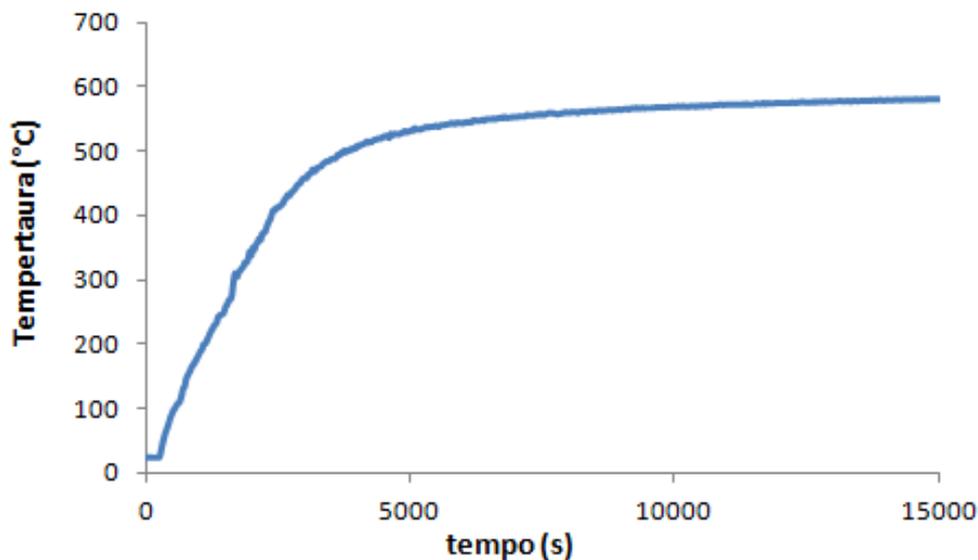
Cimento	750
Agregado	800
Água livre	4184
Água ligada	3760
Rocha	674

Tabela 3: Calores específicos ($J.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$) (Ferreira, 2011)

Constituintes/Propriedade	Unidade	CC	CAD	Rocha
Cimento CEM I 52,2	Kg/m^3	362	500	-
Brita 2 Sílico-calcária	Kg/m^3	956	987	-
Areia média Silico-calcária	Kg/m^3	692	715	-
Água	Kg/m^3	217	150	-
Superplastificante	Kg/m^3	-	4,71	-
Resistência à compressão	MPa	35,9	81,2	39,8
Resistência à tração	MPa	3,7	5,2	4,2
Módulo de elasticidade	GPa	35,6	45,2	17,7
Coefficiente de Poisson	-	0,18	0,18	0,3
Densidade aparente	Kg/m^3	2150	2330	2296
Densidade real	Kg/m^3	-	-	2671
Condutividade térmica	$W/(m.K)$	1,86	2,06	-
Água ligada	Kg/m^3	0,9xqt.cimentox0,21	0,9xqt.cimentox0,21	-
Porosidade	%	16	9,5	
Permeabilidade ao gás	m^2	1×10^{-17}	1×10^{-19}	
Temperatura	$^{\circ}C$	24	24	24
Saturação	%	superfície: 39% e restante: 95%	superfície: 39% e restante: 95%	70
Dilatação térmica	$^{\circ}C^{-1}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-6}$

Tabela 4: Propriedades dos materiais usados para a bicamada (Ferreira, 2011)

Temperatura na superfície do concreto



Para definir os parâmetros de Mazars, foi utilizada a ferramenta para análise paramétrica SWADE, desenvolvida por Bonifácio e Barbosa (2013), onde foram testados vários conjuntos de valores para esses parâmetros e os selecionados foram os que forneceram os melhores ajustes para a curva da variação no tempo da variável dano. Então, após essa análise paramétrica, ficou definido que os parâmetros usados nessa aplicação seriam: $\varepsilon_{d0} = 6,0 \times 10^{-5}$, $A_t = 0,8$, $A_c = 1,4$, $B_t = 1,0 \times 10^4$ e $B_c = 1,0 \times 10^3$. Esses valores respeitam o intervalo proposto por Mazars, Eq. (23). A Fig. 8 mostra a curva para a variável dano de Mazars obtida para esses valores para o resultado numérico e experimental.

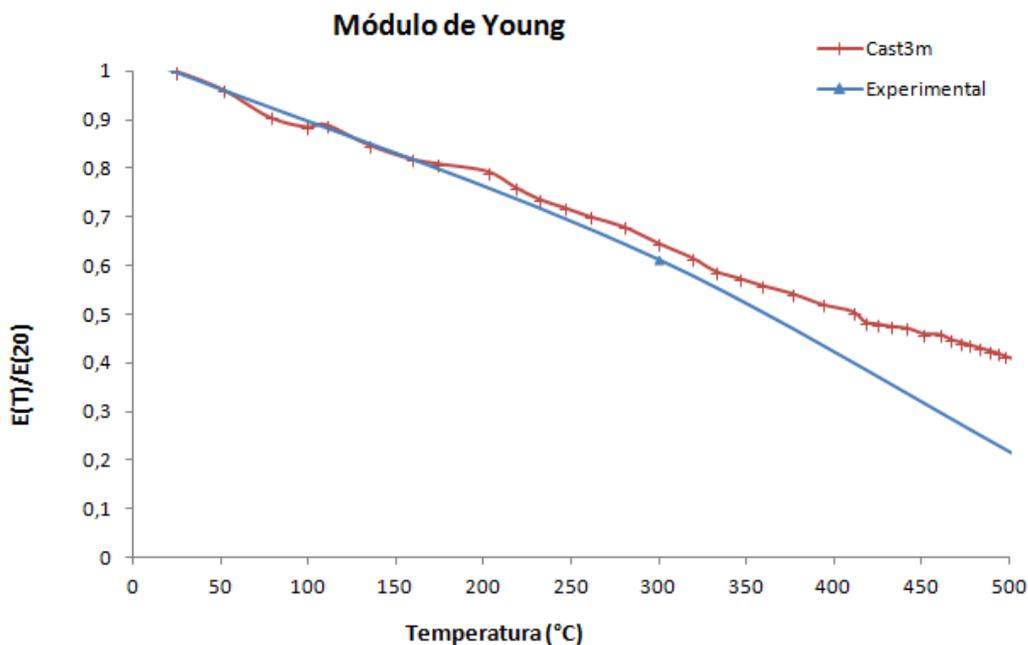


Figura 8: Curva $E(T)/E(20) \times T$ para resultados experimental e numérico, para o concreto CC.

Obteve-se como resultado, para essa análise, o mapa com o dano mecânico no corpo no momento em que a temperatura na superfície do concreto é máxima, para os concreto CC e CAD, Fig. 9. Percebe-se que a região mais danificada foi a superfície do concreto, que foi a região mais aquecida. Essa Figura pode ser comparada à Fig. 1, sendo possível notar que a configuração do mapa de dano lembra a configuração do efeito “spalling” no corpo-de-prova bicamada. Cabe ressaltar que este fenômeno seria mais bem representado através de um modelo em 3D. Foi observada a influência do grau de refinamento da malha sobre a distribuição de dano.

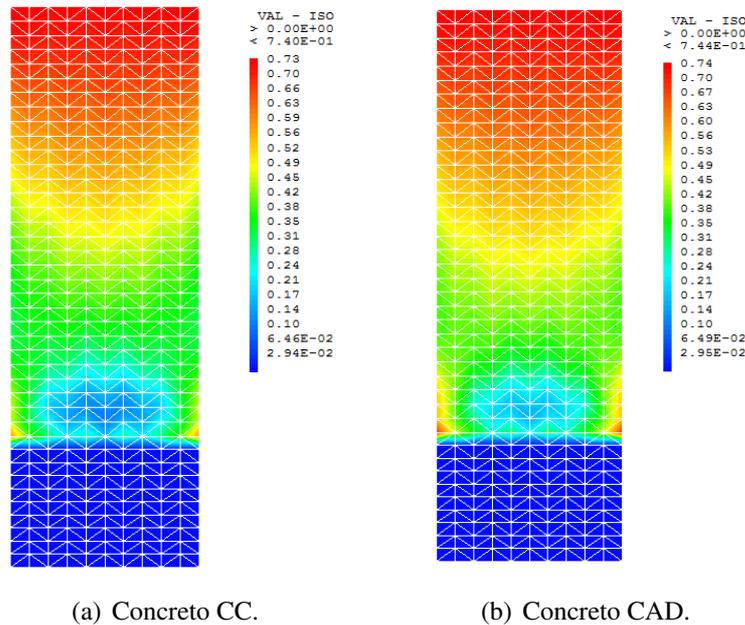
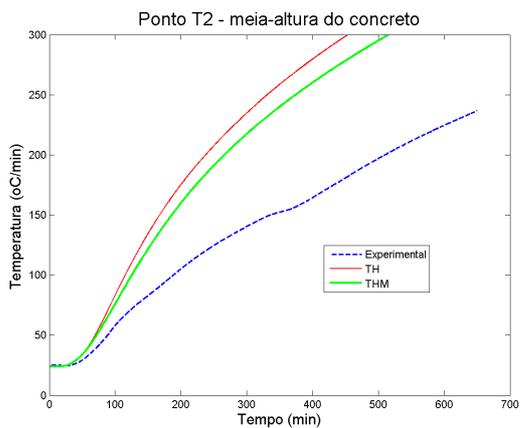
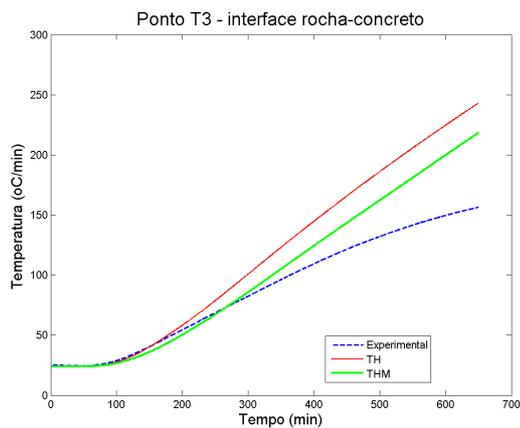


Figura 9: Distribuição do dano mecânico na bicamada no momento em que $T(t) = 600^{\circ}C$.

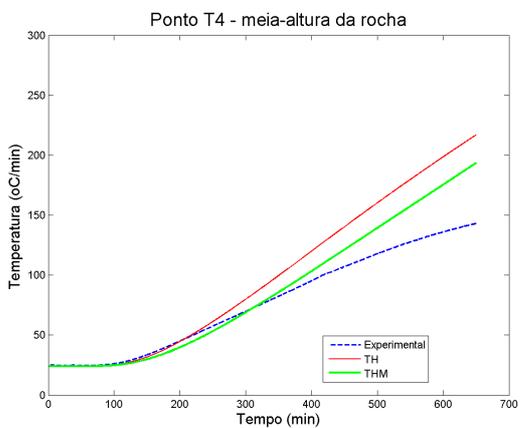
Para os concretos CC e CAD, obteve-se os gráficos das Fig. 10 e 11, respectivamente, que apresentam a variação da temperatura no tempo para o modelo THM comparados a outros dois resultados: experimental (Xing, 2011) e numérico do modelo TH (Ferreira, 2011), para os pontos definidos pelos termopares. Para o CC, observa-se que com a incorporação do efeito mecânico no modelo termo-hídrico, houve uma aproximação do resultado numérico ao experimental, conforme se esperava. Já para o CAD, as curvas TH e THM são praticamente coincidentes - indicando a necessidade de uma análise mais cuidadosa acerca dos efeitos da temperatura sobre as características deste material. Percebe-se que os resultados numéricos e experimentais começam a se distanciar para temperaturas maiores que $60^{\circ}C$, que é a temperatura na qual, numericamente, considera-se o início da desidratação. Quanto mais longe da superfície aquecida, menor é a distância observado entre as curvas. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que o comportamento do concreto, com a ocorrência de desidratação/reidratação, é muito mais complexo do que o da rocha.



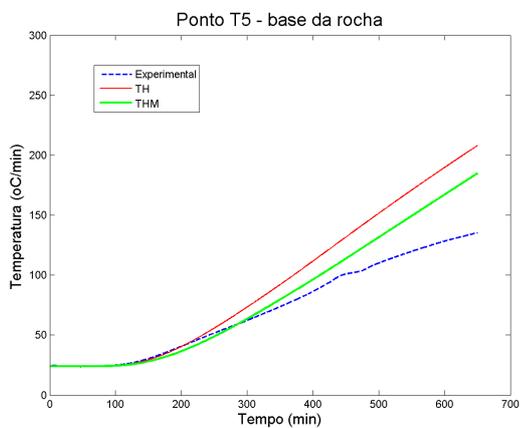
(a) CC (T2).



(b) CC (T3).

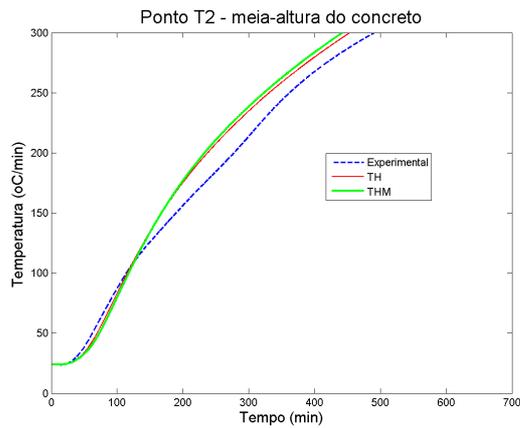


(c) CC (T4).

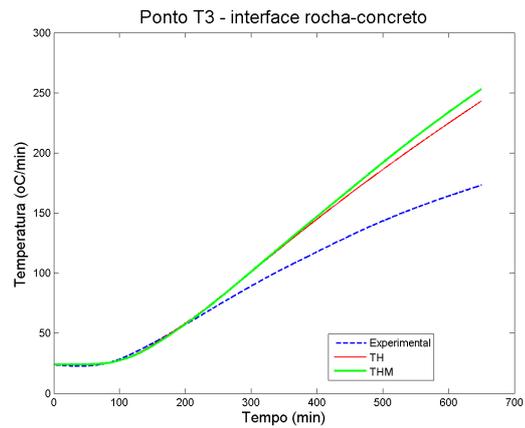


(d) CC (T5).

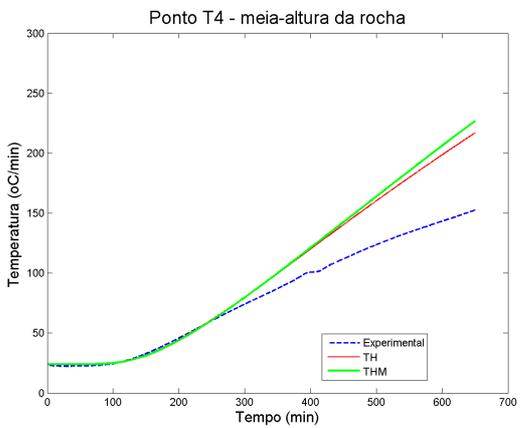
Figura 10: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC.



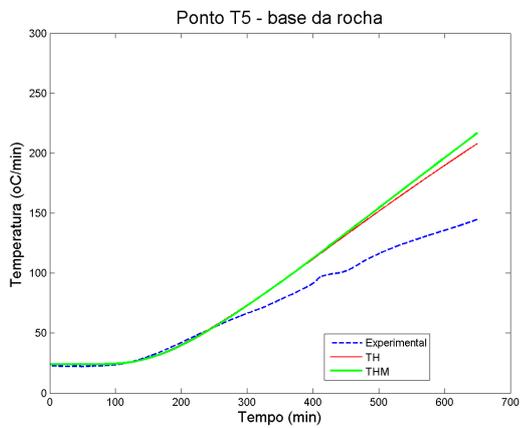
(a) CAD (T2).



(b) CAD (T3).



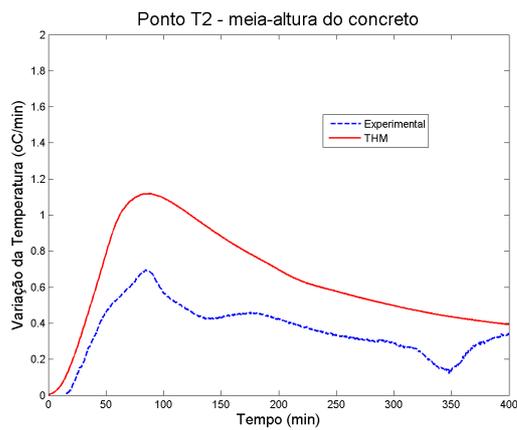
(c) CAD (T4).



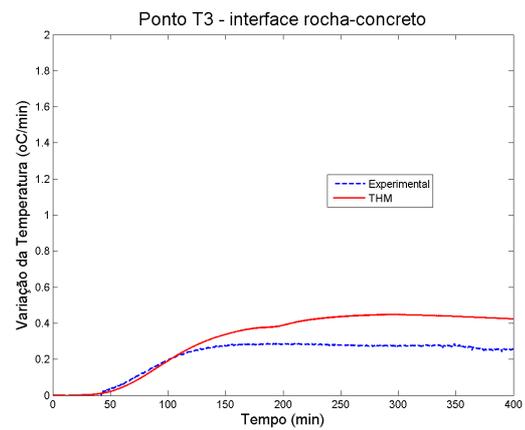
(d) CAD (T5).

Figura 11: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD.

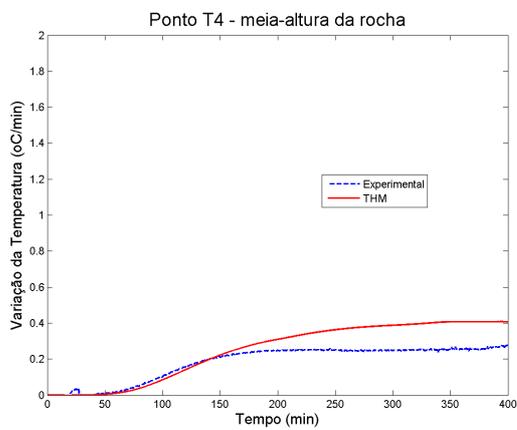
Observando a curva da taxa de temperatura no tempo, Fig. 12 e 13, para os resultados numérico e experimental para os concretos CC e CAD, respectivamente, percebe-se que existe uma clara correspondência entre os resultados numérico e experimental, apesar das discrepâncias observadas na comparação das curvas de temperatura absoluta.



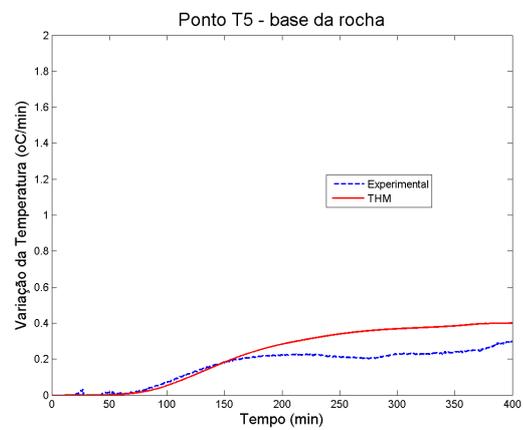
(a) CC (T2).



(b) CC (T3).

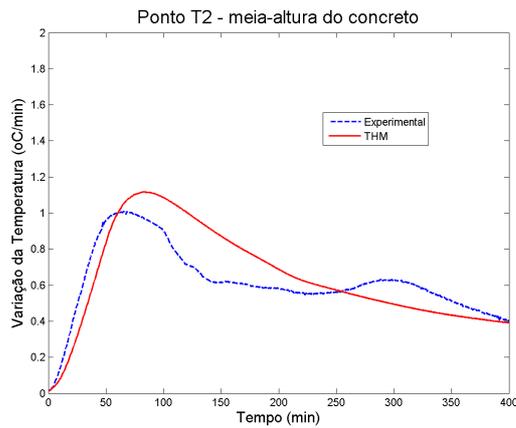


(c) CC (T4).

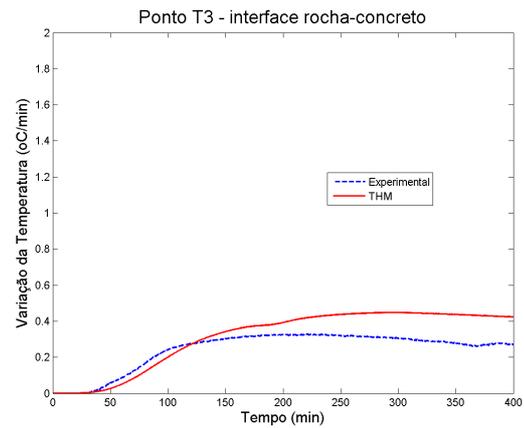


(d) CC (T5).

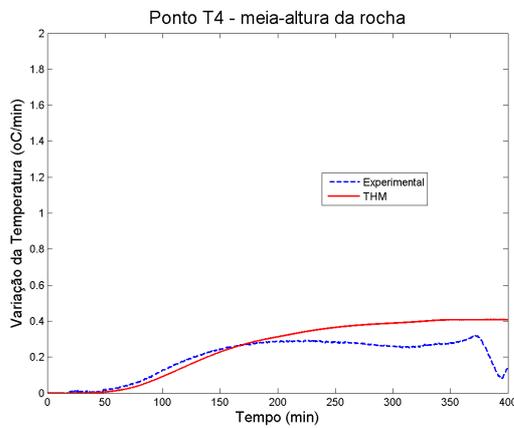
Figura 12: Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC.



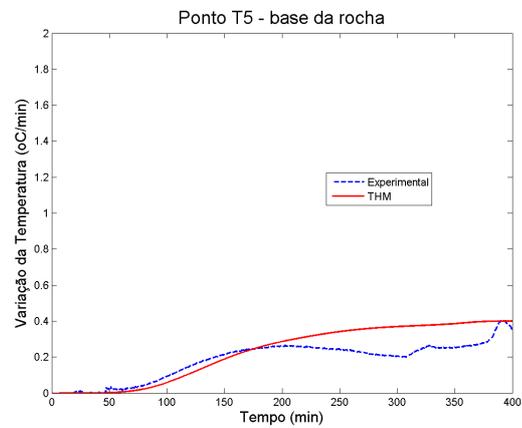
(a) CAD (T2).



(b) CAD (T3).



(c) CAD (T4).



(d) CAD (T5).

Figura 13: Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD.

Através dessa aplicação, obteve-se, também, como resultado o gráfico que descreve a saturação ao longo da altura do corpo-de-prova, sendo cada curva desse gráfico obtida para uma dada temperatura na superfície, Fig. 14 e 15. Observa-se que foram encontrados valores da saturação maiores que 100%. Provavelmente, isso ocorreu devido a porosidade está sendo considerada apenas em função dos aspectos químicos. Percebe-se que houve um aumento da saturação na camada rochosa, isso se deve por causa da tendência da migração da água para as zonas mais frias.

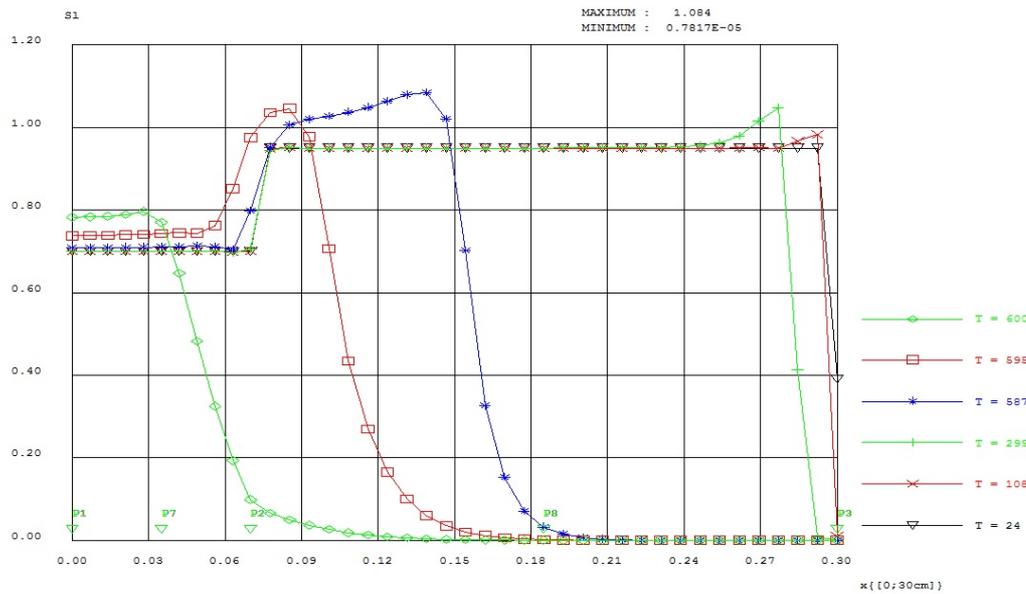


Figura 14: Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CC.

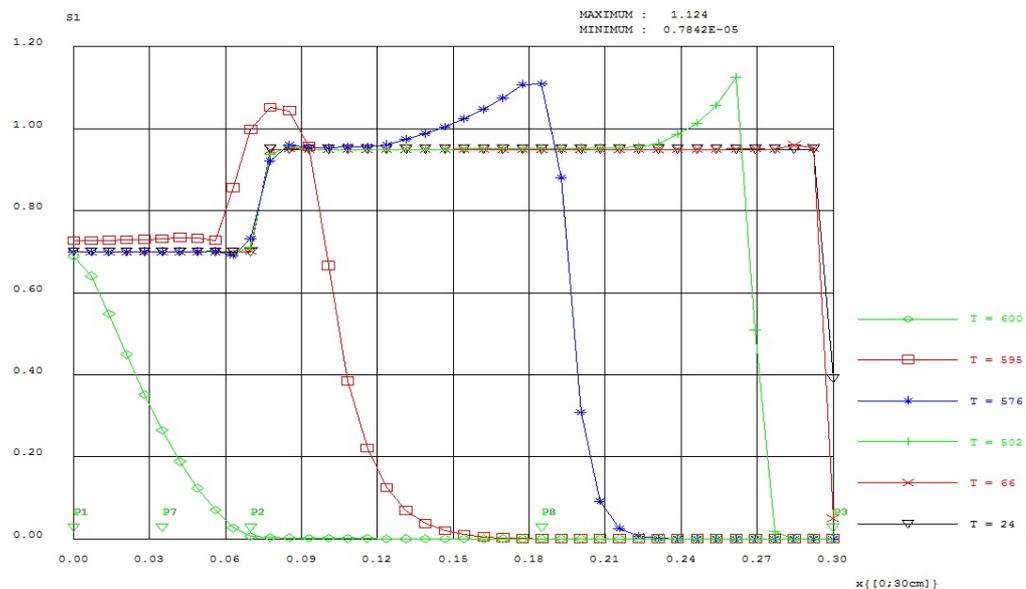


Figura 15: Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CAD.

As Fig. 16 e 17 mostram a curva de pressão de vapor em função da altura do corpo-de-prova obtida para uma certa temperatura na superfície. Com o aumento da temperatura e a distância da superfície aquecida, os picos de pressão crescem. Eles ocorreram nas regiões com alto teor de água, este fato é verificado pela coincidência entre os picos de pressão e saturação.

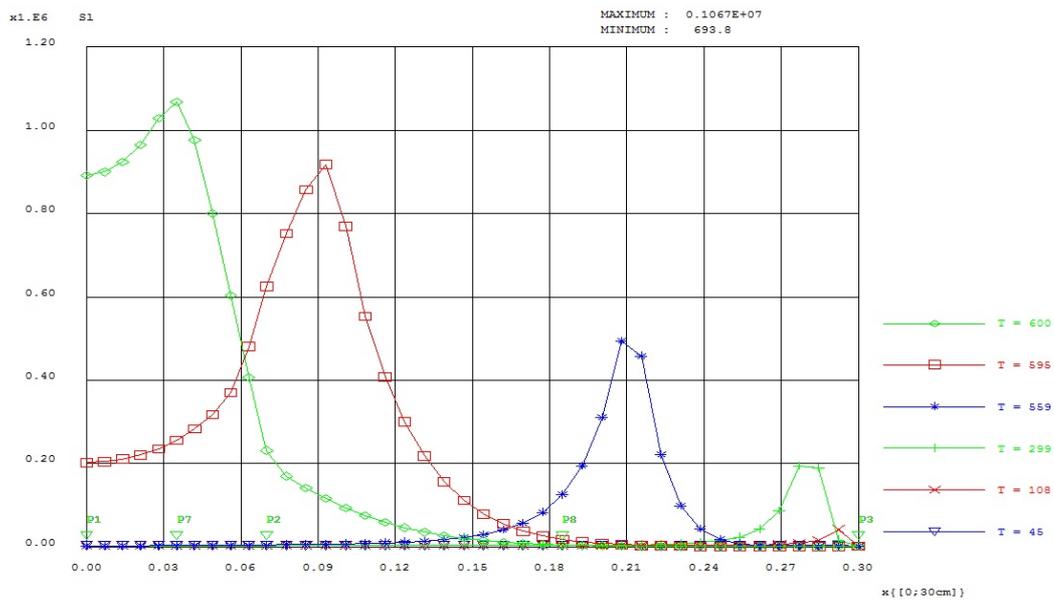


Figura 16: Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CC.

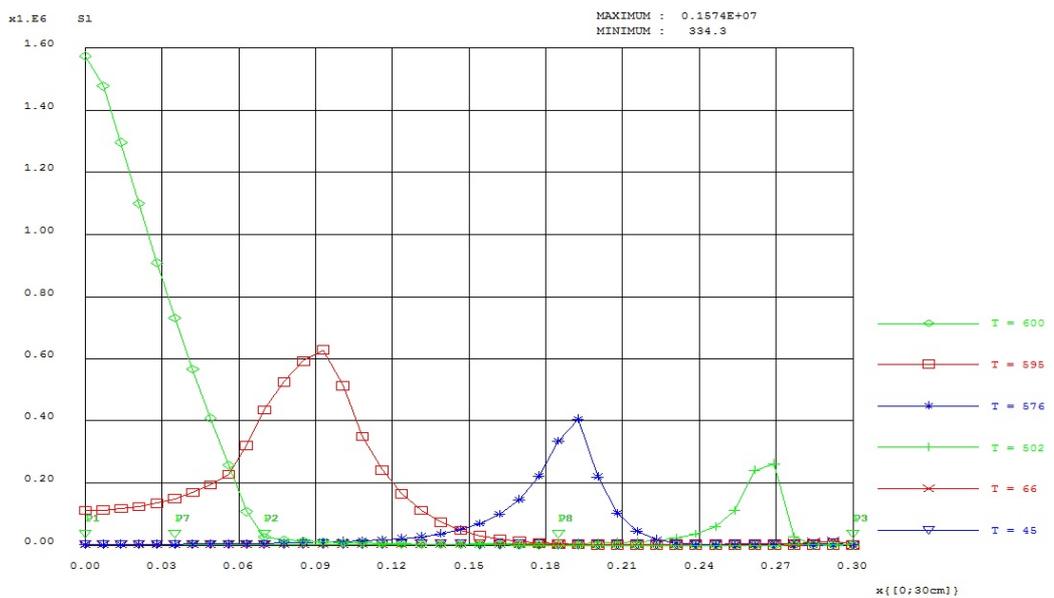


Figura 17: Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CAD.

4.2 Aplicação 2: parede de concreto da casa de força de uma usina hidrelétrica

Devido à boa eficiência das paredes de concreto que, além de fornecerem uma função de suporte de carga, são resistentes ao fogo e satisfazem os três requisitos de segurança de incêndio que são a integridade, o isolamento e adequação estrutural, em altas temperaturas. Muitas das construções optam na utilização de paredes de concreto para suas obras, como é o exemplo de muitas usinas hidrelétricas no Brasil: Usina de Itaipu em Foz do Iguaçu, Usina Hidrelétrica Santo Antônio em Porto Velho (que está em construção), Usina Hidrelétrica de Tucuruí em Belém, dentre outras.

Com o intuito de analisar o efeito do fogo em uma obra de grande porte, inspirado nessas usinas, foi criado um modelo fictício de uma usina hidrelétrica para ser analisado através do modelo THM no código Cast3m. O modelo possui dimensões realistas. A situação analisada aqui é representada na Fig. 4.2 trata-se do modelo da casa-de-força de uma usina sujeito a um fogo acidental na galeria onde se encontraria uma das turbinas. Simulou-se um incêndio com 2 horas de aquecimento - representado pela curva de incêndio padrão, proposta pela norma Europeia (EUROCODE, 2005), descrita pela Eq. (24), com temperatura ambiente inicial de $30^{\circ}C$. A Fig. 18 mostra a geometria plana usada para modelar o problema da casa de força.

$$T_g = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (24)$$

Onde: T_g é a temperatura do fogo; T_0 é a temperatura inicial (ambiente) e t é o tempo (min).

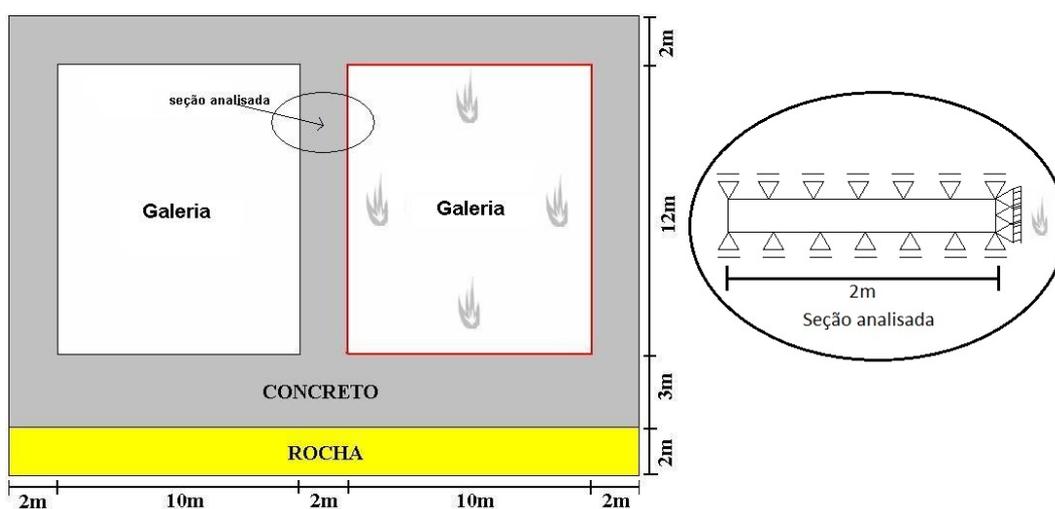
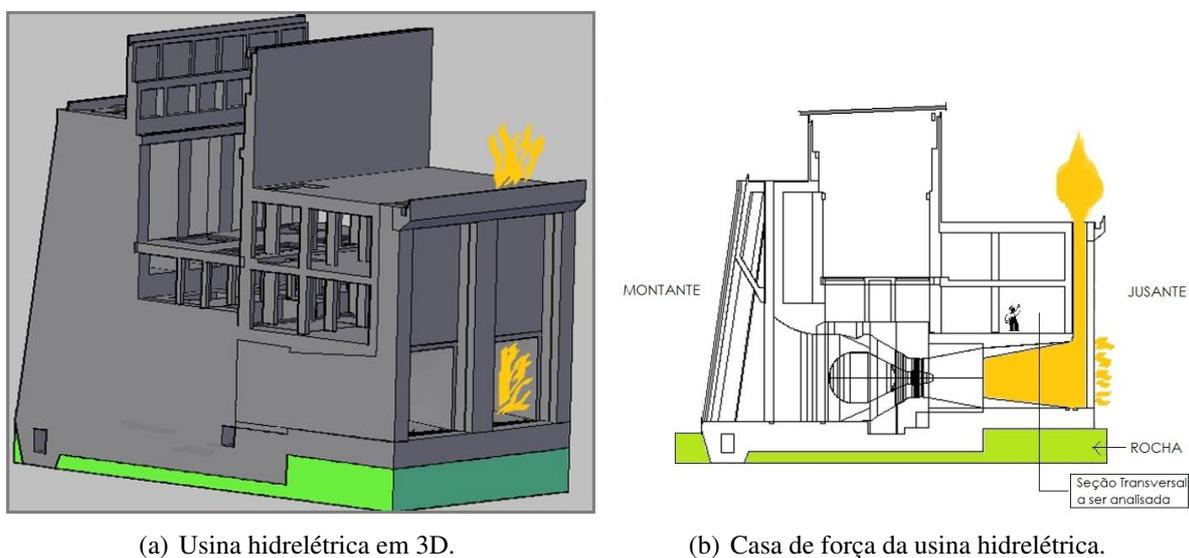


Figura 18: Modelo da Geometria usada para a análise da casa de força.

As propriedades térmicas e mecânicas adotadas para o concreto foram as mesma adotadas para o concreto comum da aplicação 1.

Obteve-se como resultado, para essa análise, a curva da temperatura no tempo, Fig. 19, para o ponto definido a 5cm da aresta aquecida mostrada na Fig. 18, para o modelo TH e THM. Observa-se que o resultado para os dois modelos foram praticamente coincidentes, demonstrando pouca influência, nesta aplicação, do efeito mecânico ao efeito térmico.

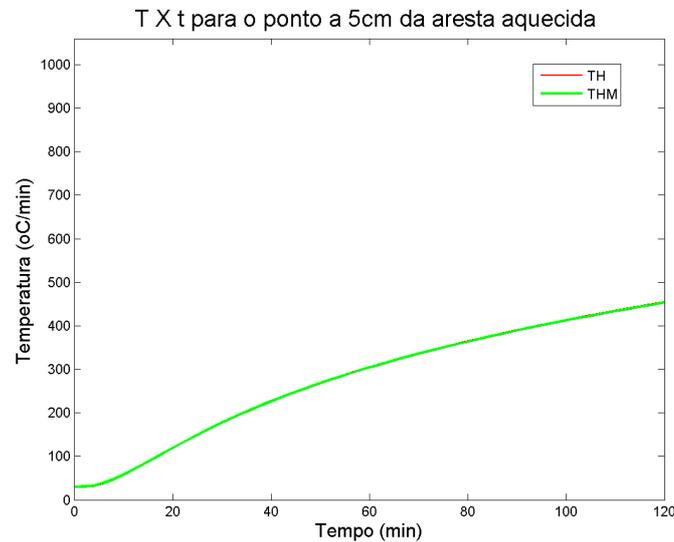


Figura 19: Evolução da temperatura para o ponto definido a 5cm da aresta aquecida na seção.

A Fig. 20 apresenta o gráfico que descreve a temperatura ao longo da altura da seção analisada com o modelo THM, sendo cada curva desse gráfico obtida para uma dada temperatura na superfície. É notável a propriedade isolante do concreto, uma vez que, ao longo de 2 metros, a temperatura cai de 1059°C para cerca de 30°C na outra extremidade da seção, o que é uma pequena alteração em relação à temperatura inicial da estrutura.

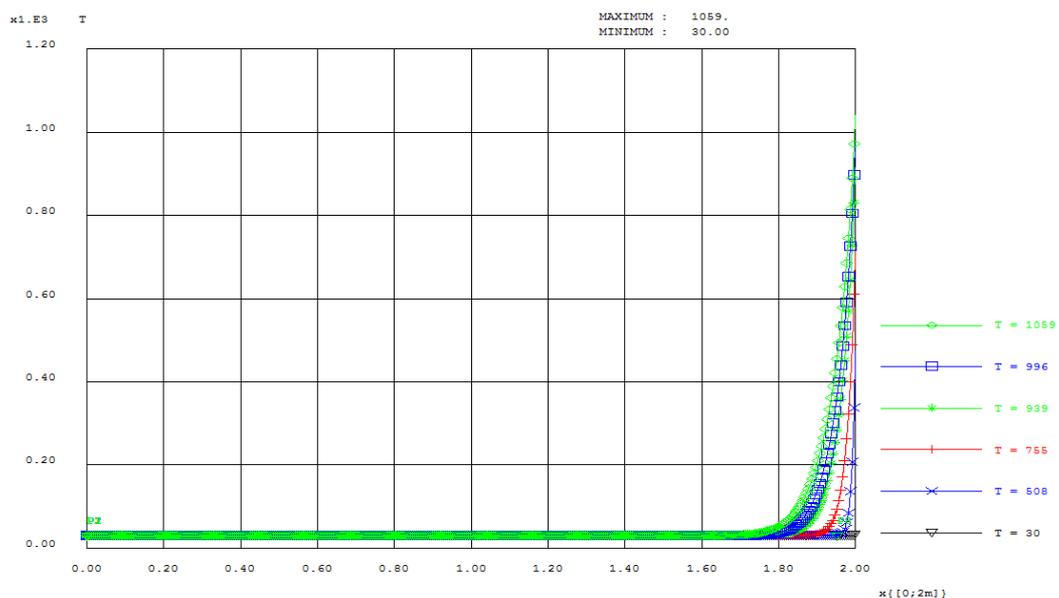


Figura 20: Perfil da evolução da temperatura ao longo da altura do corpo para o concreto.

Trata-se aqui de uma estrutura fictícia, porém pode-se afirmar que a simulação resulta em valores realistas -a ordem de grandeza das temperaturas calculadas é condizente com uma situação real-. Esta afirmação se baseia nos resultados obtidos no Aplicação 1 (bicamada rocha-concreto), em que os valores numéricos obtidos com o modelo empregado foram comparados com valores medidos em laboratório, apresentando uma boa concordância.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo incorporar o modelo mecânico, através da teoria do dano de Mazars, ao modelo termo-hídrico (Ferreira, 2011) para analisar a evolução da temperatura na bicamada rocha-concreto a fim de aprimorar as análises através do Cast3m. Observou-se que, de fato, houve influência dos efeitos mecânicos nos resultados térmicos aproximando os resultados experimentais e numéricos. Apesar das discrepâncias observadas para as temperaturas em valor absoluto, empregados para fins de validação, existe uma clara correspondência entre os valores numéricos e as medições experimentais. Notou-se que o mapa de dano apresentou alguma correspondência com o efeito “spalling” no corpo-de-prova. Cabe ressaltar que foi observada a dependência deste resultado com o grau de refinamento da malha de Elementos Finitos. Para uma análise mais conclusiva, faz-se necessário um estudo mais aprofundado acerca da influência da discretização sobre a distribuição de dano. Para a análise da seção da parede feita em concreto com 2m de comprimento da casa de força de uma usina hidrelétrica, ficou claro a propriedade isolante térmica do concreto.

6 AGRADECIMENTOS

A UFJF, ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, ao departamento de Mecânica Aplicada Computacional, a Engenheira Rosângela Santarem (Themag Engenharia), a FAPEMIG, a CAPES, ao CNPq, aos organizadores do XXI Congresso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones e a todos que contribuíram com este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bazant Z. e Kaplan M. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*. Concrete design and construction series. Longman Group Limited, 1996.
- Bonifácio A. e Barbosa C. *Manual para utilização da ferramenta SWADE*. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- Cülfik M. e Özturan T. Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations. *Constr Build Mater.*, 24 (8):1486–1493, 2010.
- Ervine A., Gillie M., Stratford T., e Pankaj P. Thermal propagation through tensile cracks in reinforced concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 24:516–522, 2012.
- EUROCODE. 2005.
- Ferreira A. *Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevadas: Aplicação a uma Bicamada Rocha-Concreto*. Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, UFJF, 2011.
- Gawin D., Pesavento F., e Schrefler B. Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation. *Comput Methods Appl Mech Eng.*, 13-14:1731–1771, 2003.
- Gawin D., Pesavento F., e Schrefler B. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete. *Comput Methods Appl Mech Eng.*, 195(41-

- 43)[John H. Argyris Memorial Issue.Part II].:1486–1493, 2006.
- Kanema M., Pliya P., Noumowe A., e Gallias J. Spalling, thermal, and hydrous behavior of ordinary and high-strength concrete subjected to elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 7:921–930, 2011.
- Lemaitre J. e Chaboche J. *Mechanics of solid materials*. FOREWORD TO THE ENGLISH EDITION BY FRED LECKIE, 1994.
- Álvares M. *Um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos*. Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EESC - USP, 1993.
- Mehta P.K. e Monteiro P. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. IBRACON, 2008.
- Xing Z. *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*. These de doctorat, UNIVERSITÉ DE CERGY-PONTOISE, Spécialité: Génie Civil, 2011.