



ANÁLISE TERMO-HÍDRICA DO CONCRETO UTILIZANDO O CASTEM

Thaís Rossi Lopes Soares

Michèle Cristina Resende Farage

thais.soares@engenharia.ufjf.br

michele.farage@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora

Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário, Bairro São Pedro, CEP: 36036-900,
Juiz de Fora – MG, Brasil

Norbert Renault

norbert.renault@u-cergy.fr

Université de Cergy-Pontoise

Université de Cergy-Pontoise UFR Sciences et Techniques L2MGC 5 Mail Gay-Lussac,
Neuville-seur-Oise, Cergy-Pontoise 95031, França

Resumo. *O concreto é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil, devido a suas características como consistência e trabalhabilidade quando fresco. E depois de endurecido, por suas características mecânicas, onde destaca-se a sua resistência à tração e à compressão. A determinação de suas propriedades, entretanto, é complicada, pois o concreto, quando exposto a determinadas situações ambientais, sofre alterações em sua estrutura interna e em suas propriedades. Tais alterações microscópicas podem influenciar o comportamento macroscópico térmico e mecânico do material, chegando a comprometer a segurança de estruturas que os empreguem. Este trabalho consiste no estudo do comportamento do concreto quando sujeito a carregamentos térmicos, como é o caso de um incêndio, por exemplo. Foi utilizado um modelo existente termo-hídrico, a partir do qual, foi realizado um estudo paramétrico para situações de carregamentos distintos. Esse estudo foi feito em parceria com a Université de Cergy-Pontoise na França, utilizando o modelo desenvolvido pelo L2MGC no software livre de cálculo por elementos finitos, CASTEM. **Palavras-chave:** Concreto, Altas temperaturas, Modelagem, Cast3M.*

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na indústria da construção civil em todo o mundo. Nos últimos anos, seu consumo vem crescendo, por possuir ótima resistência à água, poder ser moldado em diferentes formas e tamanhos e ter materiais constituintes fáceis de ser encontrados com baixo custo, o que torna o concreto um material relativamente barato. Outro ponto importante é a baixa exigência de especialização da mão de obra e fácil execução.

Mesmo sendo um material de uso consolidado, muitos estudos são feitos com o objetivo de analisar o desempenho de estruturas em situações de exposição a ambientes agressivos, como locais de alta umidade, ambientes industriais (presença de substâncias corrosivas), poluídos e com temperaturas elevadas.

No presente trabalho, propõe-se analisar o comportamento termo-hídrico de estruturas feitas de concreto quando submetidas a altas temperaturas: como se dá a distribuição do calor na mesma e quais modificações e deteriorações o aquecimento acarreta. Há duas situações nas quais o concreto é exposto a temperaturas elevadas: acidentalmente, como é o caso de um incêndio, ou se estas fizerem parte de suas condições normais de trabalho, como em altos-fornos, churrasqueiras e repositórios de rejeitos radioativos, por exemplo.

Por ser um material poroso e altamente heterogêneo, composto por várias fases, o concreto, quando exposto a temperaturas elevadas, de qualquer natureza, sofre com a ocorrência de fenômenos complexos como o transporte de massa, de energia e reações químicas. Esses podem prejudicar a integridade da estrutura, através da degradação de suas características mecânicas, fator que pode impedir o bom desempenho de suas funções.

Neste trabalho, serão analisados os resultados de um modelo de comportamento acoplado, termo-hídrico de estruturas feitas de concreto quando submetidas a altas temperaturas. O modelo é aplicado ao problema de transporte de energia e massa em meios porosos de concreto. Os cálculos térmicos e hídricos, foram implementados no código para análise estrutural Cast3m (DMT/CEA – Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique). O modelo é validado a partir da comparação a resultados experimentais do trabalho de Plya (2010), e depois é realizada uma análise paramétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto resiste por longos períodos aos efeitos de altas temperaturas. É capaz de manter características de resistência, que mesmo inferiores ao padrão, são suficientes para garantir certa estabilidade ao local, até que providências para reestabelecer os critérios de segurança sejam adotadas.

A composição do concreto é um dos fatores que mais deve ser levado em consideração ao estudar a resposta desse material a solicitações térmicas, uma vez que tanto a pasta de cimento quanto os agregados são formados por constituintes que se decompõe e se alteram, em graus diferenciados, com a exposição ao calor. A umidade inicial, o tamanho da peça e a taxa de aumento da temperatura também são fatores influentes, uma vez que governam o desenvolvimento de pressões internas dos produtos gasosos de decomposição, Mehta & Monteiro (1994).

Serão abordados a composição do concreto e o comportamento de seus componentes com relação à temperatura. Também serão discutidas, as transformações físicas e químicas, o comportamento mecânico e os fenômenos de transferência de calor e massa no concreto quando submetido à um carregamento térmico.

2.1 Estruturas de concreto

O concreto é um material compósito, formado basicamente por uma mistura de cimento Portland com areia, brita e água. O cimento é o material que quando hidratado possui características coesivas, já a areia e a brita são os agregados, materiais granulares cuja dosagem é variada para obter diferentes tipos de concreto, os quais são classificados de acordo com a sua resistência à compressão, podendo essa classificação variar de baixa a alta resistência, ou desempenho.

Macroscopicamente, o comportamento do concreto é observado como um material heterogêneo composto por duas fases, agregados e pasta de cimento, distribuídas irregularmente no espaço. Contudo, segundo Mehta & Monteiro, (1994), para uma pasta de cimento bem hidratada, esta distribuição não homogênea pode ser ignorada na construção de um modelo de comportamento do material.

Por outro lado, microscopicamente, a complexidade do material é muito grande e não se deve generalizar essa simplificação. Isso porque, costuma ser justamente no elo entre o agregado e a pasta de cimento o ponto fraco do material quando solicitado por um carregamento. É por isso que, ainda segundo Mehta & Monteiro, (1994), a interface, ou zona de transição, entre os agregados graúdos e a pasta de cimento costuma ser considerada como a terceira fase da estrutura de concreto.

Pasta de cimento hidratado. O cimento Portland é um pó cinza, composto principalmente por clínquer, que quando misturado à água forma uma pasta que adquire resistência mecânica através de reações químicas e do processo de hidratação. Ela é formada, principalmente, por dois hidratos: o silicato de cálcio hidratado, CSH, ou $(CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O)$, que é responsável pela resistência do concreto, e o hidróxido de cálcio, ou $Ca(OH)_2$. A desidratação pela elevação de temperatura atinge ambos os compostos, produzindo anidros e adicionando vapor de água à fase fluida.

Água. A água pode estar presente em várias formas no concreto, sendo classificada de acordo com a dificuldade de retirá-la. No concreto, ela está presente nas seguintes formas, além do vapor presente nos vazios: água capilar, a qual permanece nos vazios após o fim da hidratação do concreto; água absorvida, que está fisicamente ligada a superfícies sólidas; água interlamelar, a qual está associada ao silicato de cálcio hidratado (CSH); e água quimicamente ligada, que faz parte da composição química dos hidratos da pasta de cimento.

Agregados. Existem diversos tipos de agregado, que se distinguem pela sua rocha de origem. Eles influenciam em características do concreto como a retração e resistência a abrasão, e, por isso, são responsáveis, em grande parte, pelo desempenho do concreto. São,

normalmente, materiais inertes, responsável predominantemente pelo peso e módulo de elasticidade do concreto.

Os agregados integram o esqueleto pelo qual os esforços são transmitidos, portanto a integridade física influi na qualidade do concreto. Com o aumento da temperatura, ocorrem expansões diferenciais em relação à pasta de cimento que podem ser destrutivas para o material. Segundo Ferreira (2011), essas expansões podem causar microfissuras e contribuir para o “spalling”, que é descrito no item 2.2.

2.2 Comportamento sob temperaturas elevadas

Por ser um material compósito heterogêneo, o concreto, quando submetido a temperaturas elevadas, comporta-se de maneira mais complexa. Para descrever bem esse comportamento, é preciso que, além das propriedades térmicas, sejam considerados também a fissuração e o fenômeno do “spalling”, ambos causados pelas tensões que a temperatura gera na fase sólida e pela pressão exercida pela fase fluida nos poros.

Faz-se então necessário, observar os fenômenos de transferência térmica, de escoamento das espécies fluidas (ar seco, água líquida, vapor d’água), de hidratação e desidratação da matriz e os efeitos termo-mecânicos, para que se possa compreender todas as modificações na microestrutura do concreto.

Fenômeno do lascamento ou “spalling”. “Spalling” é o processo de esfacelamento de fragmentos da superfície do concreto em resposta a exposição a altas temperaturas ou pressão. Ele pode levar a uma grande degradação do material, podendo prejudicar de modo significativo sua capacidade estrutural.

Esse fenômeno é atribuído a dois processos, Mindeguia et al.(2009):

Processo termo-mecânico: caracterizado pelos altos gradientes de temperatura, principalmente nos primeiros centímetros da superfície exposta. Estes gradientes podem ser muito importantes nos casos de aquecimento rápido, como no caso de um incêndio, e induzem à altas tensões de compressão próximo à superfície exposta. Estas tensões podem localmente ultrapassar a resistência do concreto e causar a ejeção de pedaços.

Processo termo-hídrico: os fluidos movem-se devido aos gradientes de pressão e concentração molar (Lei de Darcy e Lei de Fick). Os fluidos tendem a mover-se para as zonas mais internas e mais frias do concreto. Assim, o vapor d’água começa a condensar e uma obstrução da umidade (“moisture clog”) é gradualmente criada perto da superfície exposta. Esta obstrução é considerada uma região do concreto com grande teor de água. Como esta obstrução atua como uma barreira para o escoamento do fluido, a pressão nos poros aumenta. Estas pressões podem localmente ultrapassar a resistência à tração do concreto e iniciar o “spalling”.

Os concretos de alto desempenho sofrem mais com o “spalling” explosivo. Por possuírem menor permeabilidade e porosidade, desenvolvem pressões mais altas no interior dos poros, o que dificulta o escoamento dos fluidos.

Condutividade térmica do concreto. Em um meio sólido, quando há um gradiente de temperatura, o calor flui através da condução. Tal evento é representado pela Lei de Fourier

em que o fluxo de calor (q_λ) é proporcional ao gradiente de temperatura na direção considerada (x) multiplicada pela área através da qual o calor é transferido (A). A Eq. (1) mostra essa relação, onde λ é a propriedade do meio chamada condutividade térmica, que descreve a capacidade de um material de conduzir calor.

$$q_\lambda = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Existem diversas propostas de curvas teóricas. A norma Europeia para cálculo de estruturas em concreto fornece duas curvas técnicas, dadas pelas Eq. (2) e Eq. (3), que limitam a evolução da condutividade térmica em função da temperatura para concretos com densidade entre 2000 e 2600 kg/m³.

$$\lambda_{\text{inf}} = 1,36 - 0,136 \left(\frac{T}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{sup}} = 2 - 0,2451 \left(\frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (3)$$

Sendo λ_{inf} e λ_{sup} , os limites inferior e superior, em W/(mK), respectivamente. T é a temperatura em °C. As equações são válidas para temperaturas entre 20°C e 1200°C.

Calor específico do concreto. É uma grandeza que caracteriza cada substância e é determinada pela quantidade de energia necessária para elevar em um grau Kelvin a temperatura de uma unidade de massa do material.

Para o concreto seco de agregado silico-calcários tem-se a seguinte variação em função da temperatura dada pela norma Europeia, Eq. (4):

$$\begin{aligned} c_p(T) &= 900 && \text{se } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ c_p(T) &= 900 + (T - 100) && \text{se } 100^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \\ c_p(T) &= 900 + (T - 100)/2 && \text{se } 200^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ c_p(T) &= 1100 && \text{se } 400^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4)$$

Porosidade. Segundo Ferreira (2011), a porosidade do concreto tende a aumentar com a elevação da temperatura. Esse aumento pode ser devido à desidratação da pasta de cimento e consequente degradação da mesma, mas também pode ser gerado pela evolução da microfissuração. E no processo de aquecimento ambos os fenômenos costumam acontecer juntos.

Neste trabalho, no domínio termo-hídrico, a porosidade do concreto é função da desidratação, como será mostrado adiante.

Permeabilidade. No concreto, ela mensura a facilidade com a qual o material poroso é capaz de transferir fluidos sob um gradiente de pressão. Ocorre um fluxo de fluido por uma rede porosa que compreende a porosidade inicial do material e as fissuras que aparecem devido às solicitações termo-mecânicas. (Rostasy et al., 1980) Normalmente, a fissuração e o

aumento da porosidade, interconectam canais de fluxo, o que resulta no aumento da permeabilidade.

3 MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA

Neste item é apresentado o modelo termo-hídrico estudado, o qual descreve o transporte acoplado de umidade e calor no concreto submetido a temperaturas elevadas. Tal modelo foi desenvolvido no CEA por Sercombe (2001) e concluído no L2MGC – Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil.

3.1 Hipóteses gerais

As hipóteses principais do modelo são:

Hipótese 1. O concreto é considerado um meio poroso, homogêneo não saturado e isotrópico Ω . O volume total é dividido em três fases:

- i. A fase sólida – representada por S
- ii. A fase líquida – representada por L
- iii. A fase gasosa – representada por V

Massas específicas volumétricas aparentes. A porosidade (ϕ), definida pela Eq. 5 com relação ao volume de vazios (V_{vazios}) e o volume total (V_t), permite uma descrição global do meio poroso, livre de detalhes sobre a distribuição e conectividade dos poros.

Segundo Ferreira (2011), a porosidade do concreto tende a aumentar com a elevação da temperatura. Esse aumento pode ser devido à desidratação da pasta de cimento e consequente degradação da mesma, mas também pode ser gerado pela evolução da microfissuração. E no processo de aquecimento ambos os fenômenos costumam acontecer juntos.

$$\phi = \frac{V_{\text{vazios}}}{V_t} \quad (5)$$

A saturação (S_l) é a relação entre o volume ocupado pela fase líquida (V_l) e o volume de vazios e é dada pela Eq. (6).

$$S_l = \frac{V_l}{V_{\text{vazios}}} \quad (6)$$

Sendo $V_{\text{vazios}} = V_v + V_l$, onde V_v é o volume de vapor, tem-se a E.(7):

$$S_l = \frac{V_l}{V_v + V_l} \quad (7)$$

Relacionando as Eq. (5) e Eq. (7), obtém-se as frações do volume poroso ocupadas pela fase líquida (ϕ_l) e pela fase vapor (ϕ_v), respectivamente:

$$\phi_l = \phi S_l \quad (8)$$

$$\phi_v = \phi(1 - S_l) \quad (9)$$

Utilizando essas relações, deduzem-se as massas de cada fase fluida por unidade de volume do meio poroso (massa volumétrica aparente), massa de água líquida, vapor de água e água total, respectivamente:

$$m_l = \rho_l \phi(d) S_l \quad (10)$$

$$m_v = \rho_v \phi(d)(1 - S_l) \quad (11)$$

$$m_f = m_l + m_v \quad (12)$$

O parâmetro d se refere à desidratação da matriz sólida. A evolução da porosidade possui como principal parâmetro a perda de água ligada para a fase fluida, e por isso, ela é proporcional à desidratação, a qual depende diretamente da evolução da temperatura.

A Fig. (1) abaixo, ilustra todos os pontos da Hipótese 1.

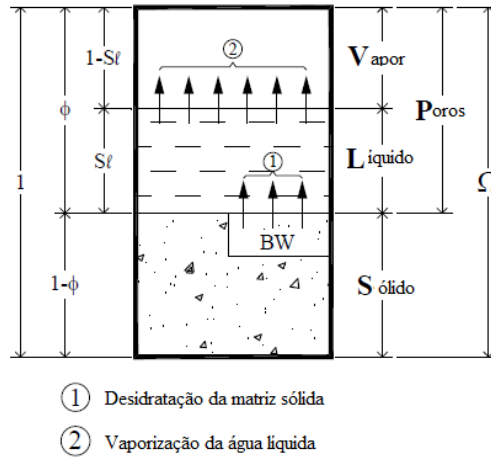


Figura 1. Repartição volumétrica das fases do concreto

Hipótese 2. A evolução do sistema é muito lenta. Logo as acelerações (termos de segunda ordem das equações diferenciais) serão desconsideradas e o estado do meio poroso será quase estático.

Hipótese 3. O fenômeno de histerese das curvas de adsorção e dessorção não é considerado. A relação entre a saturação e a umidade relativa é:

$$h_r = S_l \quad (13)$$

Hipótese 4. As transformações hídricas que ocorrem no concreto são ilustradas por duas mudanças de estado:

- i. A transformação de fase de água ligada em água líquida, a qual é causada pela desidratação da fase sólida (variação de d).
- ii. A transformação de fase de água líquida em vapor de água causada pela vaporização da água (variação de S_l).

3.2 Formulação matemática

Para desenvolver o modelo termo-hídrico será utilizada uma forma macroscópica da lei de conservação, Eq. (14), aplicada a massa líquida e de vapor, e a energia.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S \quad (14)$$

Considerando as hipóteses gerais e desenvolvendo a equação de conservação considerando as leis de Darcy e Clapeyron, obtém-se a Eq. (15).

$$\phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} = \nabla \left[D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l \right] + \frac{\partial d}{\partial t} \quad (15)$$

Aplicando a lei da conservação da energia, considerando a energia que entra, sai, a energia interna e a gerada, tem-se a seguinte Eq. (16).

$$c(S_l, d, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [\lambda(S_l, d, T) \nabla T] + \left(-L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} - L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \right) \quad (16)$$

O sistema final a ser resolvido está ilustrado, juntamente com a definição de seus termos na Fig. (2) abaixo.

Capacidade hídrica

Darcy + Clapeyron

Desidratação da fase sólida

Calor específico volumétrico do concreto: lei de misturas

Condutividade térmica do concreto

Mudanças de fase

Figura 2. Sistema de equações do modelo

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 O código Cast3M

Cast3M é um código livre desenvolvido pelo DM2S/CEA (Département de modélisation des systèmes et structures/Commissariat français à l'Energie Atomique) na França. Ele utiliza o Método dos Elementos Finitos para realizar análises de estruturas e modelar situações de mecânica dos fluidos, entre outros problemas.

4.2 Implementação do modelo termo-hídrico

O algoritmo usado neste trabalho foi desenvolvido no L2MGC (Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil – Université de Cergy-Pontoise) e é utilizado para simular fenômenos termo-hídricos em meios porosos. Este trabalho é resultado de um estágio

de pesquisa realizado pela autora nesse laboratório e propõe um estudo paramétrico do modelo.

A rotina para o cálculo termo-hídrico de estrutura de concreto, denominada THYD, resolve as equações do modelo térmico acoplado ao modelo hídrico por meio de dois laços, *theriter* e *hyditer*. Para a resolução das equações não-lineares, é utilizada a rotina denominada *tather*, a qual é chamada tanto no laço térmico quanto no hídrico, para resolver a equação de saturação. O laço denominado *boucpic* é responsável pela verificação da convergência simultânea dos dois cálculos.

A estrutura da rotina THYD pode ser mais bem compreendida através da Fig. (3).

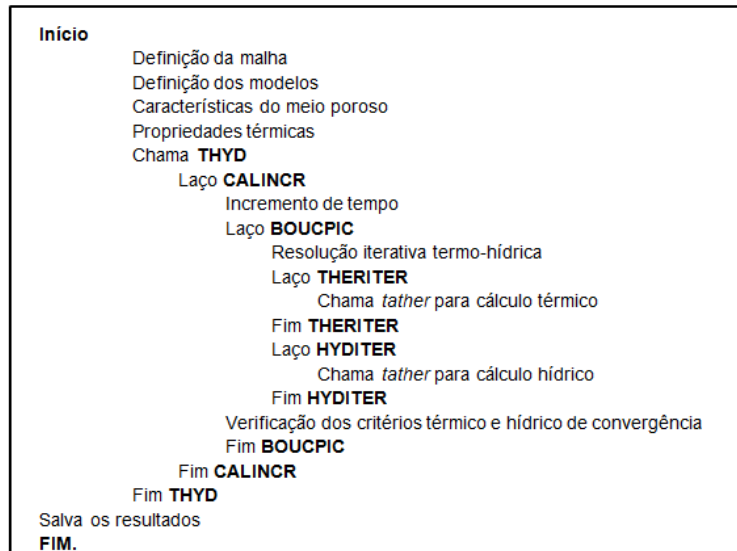


Figura 3. Esquema de cálculo do algoritmo termo-hídrico

4.3 Aplicação do modelo termo-hídrico

Para o modelo termo-hídrico (TH), empregando o programa Cast3M, serão analisados os problemas abaixo:

Aplicação 1. Validação do modelo teórico a partir da comparação com resultados experimentais.

Aplicação 2. Análise paramétrica: influência da velocidade de aquecimento nos resultados para um corpo de prova cilíndrico.

4.4 Aplicação 1 – Validação do modelo teórico

Esta aplicação consiste na validação do funcionamento do modelo através da comparação entre os resultados numéricos da análise com resultados experimentais do extraídos do trabalho de Pliya (2011).

Foram estudados dois traços de concreto, um deles que gera um material classificado como intermediário e outro de alto desempenho. Os dados necessários para a implementação do cálculo de ambos estão nas Tab. (1) e Tab. (2):

Tabela 1. Dados para o modelo – Formulação dos concretos em kg/m³.

Dosagem	Concreto intermediário (CI)	Concreto de alto desempenho (CAD)
Cimento (kg)	400	500
Água (kg)	181	150
Brita 2 Silico-calcária (kg)	1105	1102
Areia média Silico-calcária (kg)	668	667
Densidade (kg/m ³)	2355	2421
Fator água/cimento (A/C)	0,45	0,3
Resistência à compressão em 28 dias (Mpa)	46 ± 2,2	70,2 ± 0,5

Tabela 2. Dados para o modelo –Parâmetros auxiliares.

Parâmetros auxiliares	Concreto intermediário (CI)	Concreto de alto desempenho (CAD)
Porosidade inicial	0,139	0,107
Permeabilidade inicial (m ²)	3,5 x 10-16	0,7 x 10-16

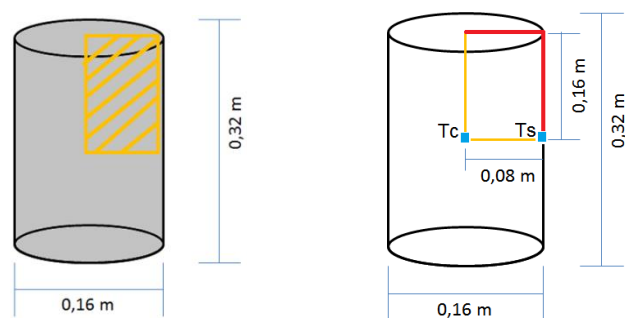


Figura 4. Esquema do corpo de prova estudado

A estrutura a ser representada é um corpo de prova cilíndrico como o mostrado na Fig. (4). Por se tratar de uma geometria simétrica, o estudo foi feito de forma axissimétrica,

utilizando a face de um quarto do corpo de prova. O carregamento é aplicado em todo o entorno do corpo, o que na geometria adotada representa as bordas externas em vermelho da Fig. (4). Já as linhas as bordas centrais, em amarelo, possuem fluxo nulo, respeitando as condições de simetria. Como condição de contorno, a pressão de vapor nas superfícies exteriores é mantida constante durante toda a análise.

O corpo de prova está inicialmente a uma temperatura de 20°C e é aquecido até 600°C, temperatura na qual é mantido por um intervalo de tempo de 30 min. A velocidade do carregamento escolhido é de 1°C/min. As condições iniciais de saturação adotadas são: 39% na superfície e 95% no restante do corpo.

Análise de resultados. A seguir, será apresentada a comparação entre os resultados obtidos para o modelo TH usando o código Cast3M e os resultados experimentais.

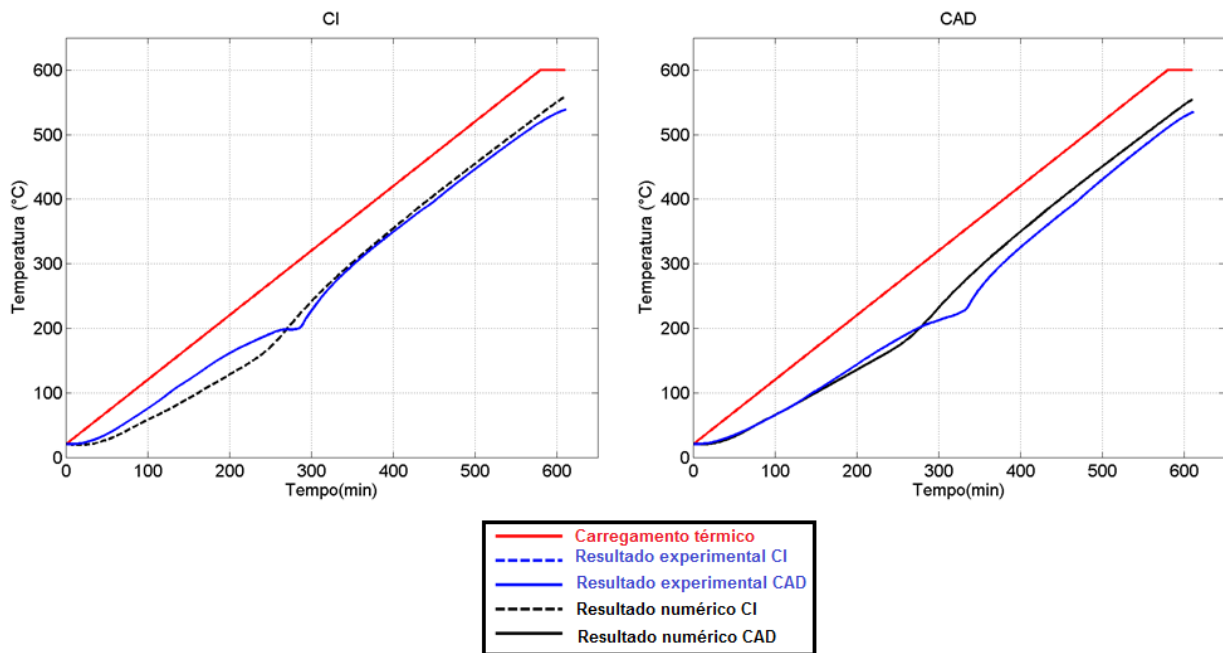


Figura 5. Temperaturas experimentais e numéricas para o CI e o CAD no centro do corpo de prova

Na Fig. (5), tem-se as evoluções de temperatura experimentais e numéricas para o concreto intermediário, CI e o concreto de alto desempenho, o CAD. Ela mostra que ambas as curvas numéricas respeitam a tendência de evolução das temperaturas medidas. Existem, entretanto, regiões onde há uma maior discrepância entre os resultados. Essas perturbações ocorrem, uma vez que a velocidade do aumento da temperatura dos pontos internos não é constante e pode diminuir devido ao consumo da energia calorífica nos fenômenos de extração da água física ou quimicamente ligada, e de evaporação da água livre.

Existem três pontos onde as perturbações são mais pronunciadas:

O primeiro deles, a uma temperatura aproximada de 130°C na superfície, é causado pela evaporação da água livre nos poros.

O segundo, por volta de 250°C na superfície, onde há um patamar, é explicado por um grande consumo de calor pela evaporação da água.

E o terceiro, em torno de 530°C na superfície, acarretado pela desidratação da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Assim, o modelo é capaz de reproduzir os resultados de temperaturas esperados, com pequenas variações que são facilmente justificadas.

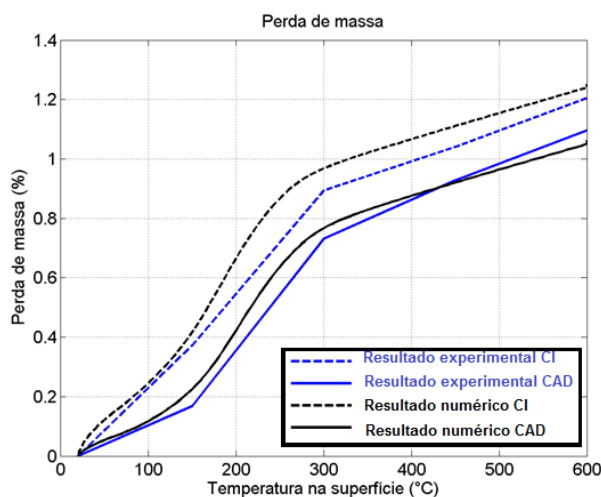


Figura 6. Perda de massa experimental e numérica para o CI e o CAD

O comparativo dos resultados de perda de massa entre os concretos CI e CAD está representado na Fig. (6). Mais uma vez, observa-se que os valores numéricos seguem a mesma tendência de evolução dos medidos experimentalmente.

As evoluções possuem três domínios distintos. Inicialmente, a perda de massa ocorre a uma taxa mais lenta. Próximo à temperatura de 130°C acontece a primeira inflexão, após a qual a perda de massa se acelera até o momento que ocorre a segunda, em torno de 300°C, onde Δm continua a aumentar, contudo com uma velocidade mais baixa.

De forma geral, a proximidade entre as curvas demonstra que o modelo descreve bem a transferência de massa através da cinemática de desidratação experimental introduzida.

Apresenta-se na Fig(7), os resultados de pressão de vapor calculados no centro do corpo de prova. Aqui, não existe a comparação com os resultados experimentais, entretanto, são resultados importantes para caracterizar as diferenças entre os dois tipos de concreto: o intermediário e de alto desempenho.

Da Fig. (7) pode-se extrair que a fase de baixa temperatura interna coincide com o pico da pressão de vapor, que para o CI é em torno de 250°C e para o CAD 270°C. Depois de 300°C, o concreto passa a estar danificado de forma significativa, logo, existe uma rede de fissuras que gera a diminuição da pressão a um valor próximo a zero.

O concreto de alto desempenho (CAD), em relação ao CI, possui fator água cimento, permeabilidade e porosidade mais baixas, como pode ser verificado nas Tabelas (1) e (2), respectivamente. Essas características levam a ocorrência de pressões mais altas, pois o escoamento dos fluidos nos poros é dificultado.

É importante ainda, deixar claro que o desenvolvimento de fissuras não é considerado na modelagem numérica.

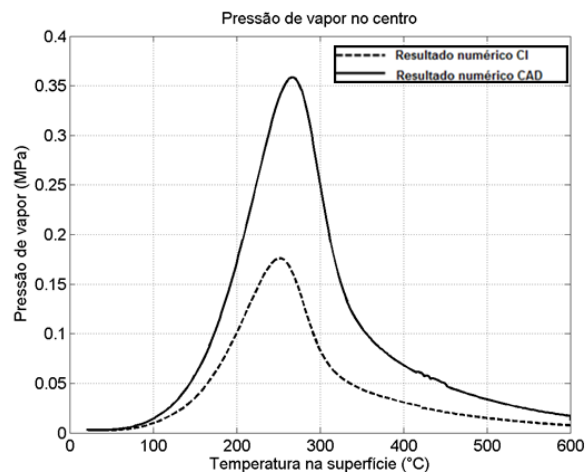


Figura 7. Pressão de vapor numérica para o CI e o CAD

4.5 Aplicação 2 – Análise paramétrica

Depois da validação do funcionamento do modelo pela comparação dos resultados numéricos com experimentais, foi realizada uma análise paramétrica na qual utilizando o mesmo modelo para o caso do concreto intermediário (CI) descrito na Aplicação 1, com a mesma geometria, condições de contorno e iniciais, a velocidade de aquecimento será variada.

A Fig. (8) a seguir ilustra as curvas de aquecimento empregadas.

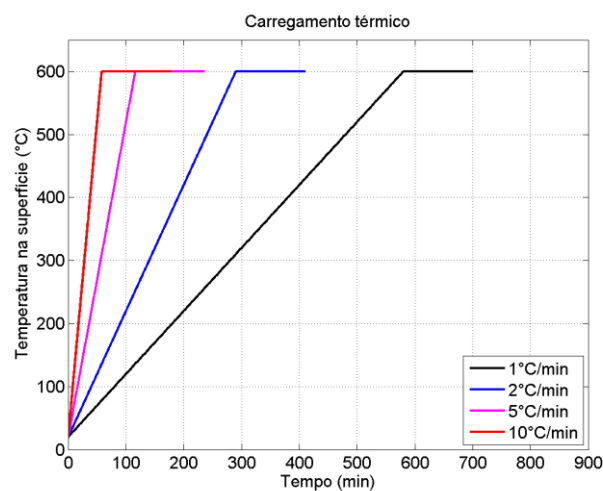


Figura 8. Curvas de aquecimento

Análise de resultados. Pode-se observar na Fig. (9) que as evoluções têm tendências semelhantes, comparáveis as da Fig. (5). Como pode ser esperado, o gradiente de temperatura entre um ponto no centro e outro na superfície cresce com o aumento da velocidade da

solicitação térmica. Isso ocorre, pois o processo de transferência de calor por condução é proporcional ao tempo, como pode ser observado através da Eq. (1). E como para um carregamento mais rápido o tempo de análise é menor, o intervalo para a ocorrência do fenômeno é menor. Mesmo com a existência do patamar de 2h no qual a temperatura é mantida constante, ao final da análise, a variação de temperatura entre os pontos estudados ainda cresce proporcionalmente a intensidade da carga.

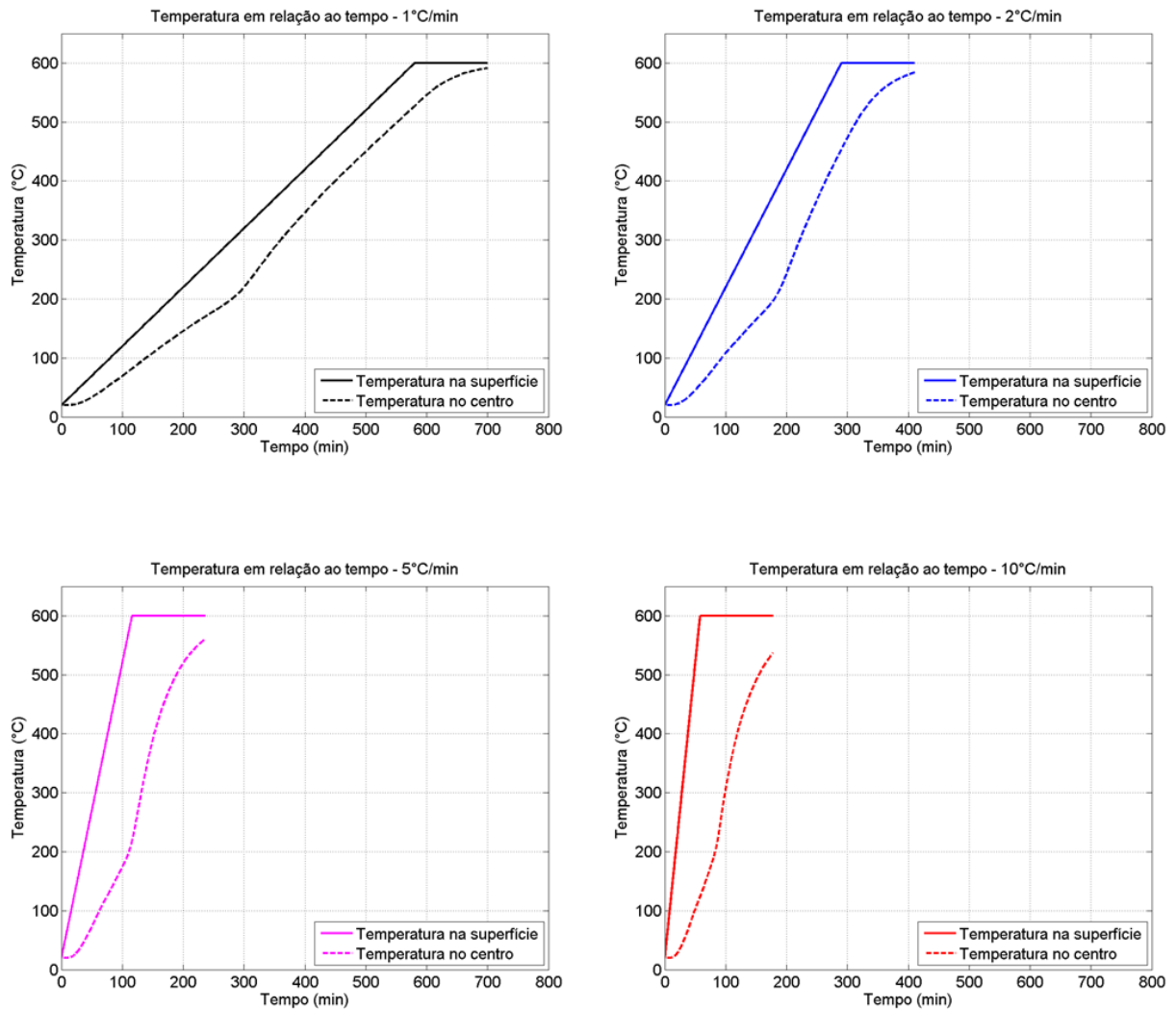


Figura 9. Comparação das curvas de aquecimento com as respectivas temperaturas no centro

Os resultados da Fig. (10), demonstram que a perda de massa final dos corpos de prova modelados é aproximadamente a mesma, visto a temperatura máxima atingida é quase a mesma. O que as diferencia é a velocidade com a que ocorre o fenômeno de desidratação, a qual aumenta proporcionalmente a intensidade do carregamento.

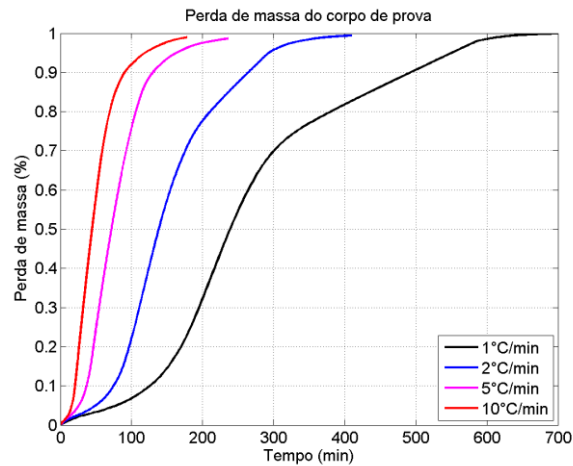


Figura 10. Perda de massa em relação ao tempo de análise

Apresenta-se agora, os resultados de pressão de vapor, Fig. (11):

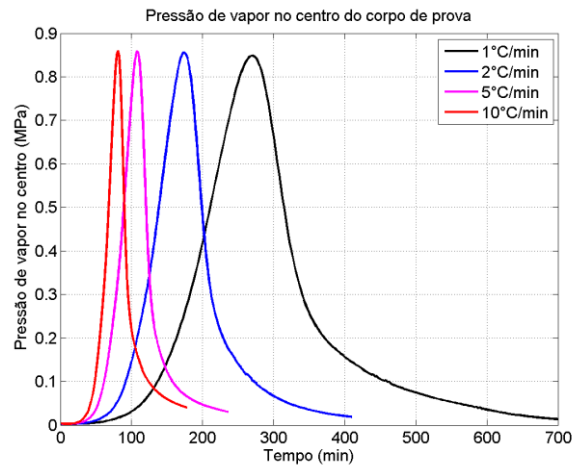


Figura 11. Pressão de vapor em relação ao tempo de análise

Aqui, é possível notar que o carregamento influi principalmente na velocidade em que o pico de pressão é atingido. Quanto mais rápido o processo de aquecimento, mais abrupta é a ascensão e o declínio ao valor máximo de pressão. Por outro lado, as pressões máximas aumentam de maneira praticamente insignificante, fato que parece contradizer o previsto de que quando mais violento o aquecimento, maiores as pressões geradas, pois o material não tem tempo de entrar em equilíbrio, dissipando o vapor de água gerado durante o processo de mudança de temperatura. Porém, o importante é que há a tendência de aumento da pressão de vapor. A diferença mínima entre os valores de pico é justificada na Fig. (12).

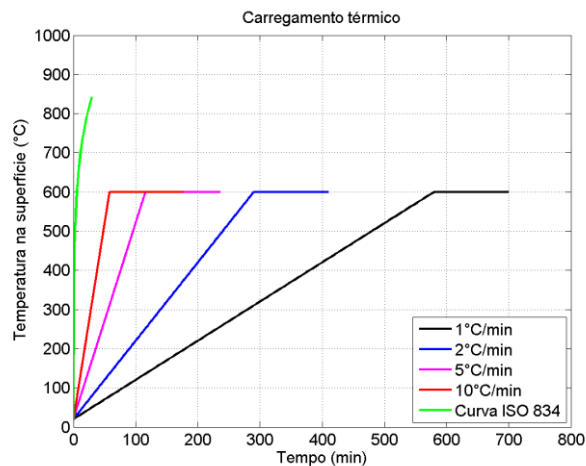


Figura 12. Comparação dos carregamentos aplicados com os valores dados pela curva ISO 834 – Curva de incêndio padrão

A curva ISO 834, é a curva de incêndio padrão da Norma Europeia. Esta é dada pela Eq. (17).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log_{10}(8t + 1). \quad (17)$$

Onde θ_g é a temperatura do fogo, θ_0 é a temperatura ambiente, nesse caso considerada com 20°C e t é o tempo em minutos.

Como é possível observar, comparado aos carregamentos aqui estudados, em situação de incêndio, a temperatura sobe muito mais rapidamente. Logo, faz sentido, que a diferença entre as pressões de vapor sejam irrisórias.

Os resultados de saturação, apresentados na Fig. (13), trazem o esperado, com as concentrações de saturação que diminuem com o aumento da temperatura. Entretanto, os valores de saturação que ultrapassam 100% mostram que o modelo termo-hídrico carece de aprimoramentos.

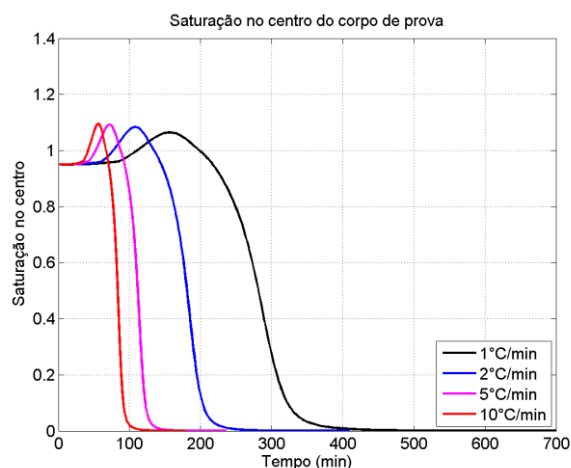


Figura 13. Saturação em relação ao tempo de análise

5. CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu de um estudo numérico da evolução da temperatura e dos seus efeitos em um elemento de concreto. Os fundamentos teóricos apresentados nos itens 2 e 3 foram utilizados para a implementação do modelo em um código livre de elementos finitos – O Cast3M. Os resultados obtidos numericamente foram comparados resultados de um programa experimental de referência e resultados presentes na literatura.

O concreto é considerado como um meio bifásico e poroso, que no modelo TH utilizado, é representado através das equações de balanço de massa para as fases fluidas e energia.

O modelo foi empregado à análise de estruturas de concretos submetidas a temperaturas elevadas para o cálculo da distribuição de temperaturas e saturação. O uso de resultados experimentais possibilitou a validação qualitativa dos valores numéricos obtidos e para o prognóstico de falhas e melhorias necessárias.

De forma geral, o modelo foi capaz de apresentar a tendência de resultados esperados. Entretanto, existem limitações. O modelo de desidratação começando aos 60°C adotado, por exemplo, interfere na qualidade dos resultados. A hipótese de tratar-se de um corpo indeformável influi diretamente nos resultados de saturação, uma vez que não é considerado no cálculo da porosidade.

Espera-se aprimorações na formulação e implementação do problema de conservação da massa líquida e de vapor (Equação 3.22) com o objetivo de solucionar as discrepâncias observadas na equação de saturação que resulta em alguns momentos em valores maiores que um. Espera-se ainda aperfeiçoar os cálculos das propriedades, principalmente em relação a porosidade e a pressão de vapor.

Agradecimentos

Esse trabalho foi financiado pelas seguintes agências: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Universidade Federal de Juiz de Fora (Brasil) e Université de Cergy-Pontoise (França).

REFERENCES

- Ferreira, A., 2011. *Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevadas: Aplicação a uma Bicamada Rocha-Concreto*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional - UFJF, Juiz de Fora. MG, Brazil.
- Pliya, Bidossessi A. Prosper, 2010. *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*. Tese (Doutorado), Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. , 1994. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. IBRACON.
- Mindeguia, J.-C., Pimenta, P., Noumowé, A., Kanema, M. , 2009. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature - Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 477-487.
- European Committee For Standardisation, 2005. "Eurocode 2: calcul des structures en béton/ Part 1-2: règles générales – calcul du comportement au feu".
- Rostasy, F. S., Weiss, R., Wiedmann, G., 1980. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, N. 2, pp. 157-164.
- Sercombe, J., Galle, C., Ranc, G., 2000. Modélisation du comportement du béton à haute température: transferts de uides et de chaleur et déformations pendant les transitoires thermiques. *Note technique CEA SCCME*, référence: NTSCCME 081.
- Ferreira, Anna Paula G., Farage, Michèle C. R., Barbosa, Flávio S., Noumowé, Albert, Renault, Norbert, 2013. Thermo-hydric analysis of concrete-rock bilayers under fire conditions. *Engineering Structures*, vol. 59, pp. 765-775.