



ANÁLISE TÉRMICA DE SEÇÕES TRANSVERSAIS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dalilah Pires*

dalilah@ufsj.edu.br

Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação e Humanidades, Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto do Paraopeba Rod.: MG 443, KM 7, 36420-000 Ouro Branco, MG, Brasil

Rafael C. Barros*

Ígor J. M. Lemes*

Ricardo A. M. Silveira*

Paulo A. S. Rocha†

rafaelcesario@hotmail.com

igorjml@hotmail.com

ricardo@em.ufop.br

paulorocha@em.ufop.br

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PROPEC, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário s/n, Morro do Cruzeiro, 35400-000 Ouro Preto, MG, Brasil

†Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário s/n, Morro do Cruzeiro, 35400-000 Ouro Preto, MG, Brasil

Resumo. As estruturas, quando submetidas à situação de incêndio, são expostas a altas temperaturas e, conseqüentemente, os elementos estruturais tem sua capacidade resistente afetada. Os principais materiais empregados nas estruturas têm suas características físicas e de resistência mecânica deterioradas durante a exposição ao fogo e a perda de capacidade resistente e de rigidez aumenta consideravelmente com a elevação da temperatura. Sendo assim, torna-se necessário o conhecimento da distribuição de temperaturas no interior do elemento estrutural em função do tempo de exposição ao incêndio para dimensionamentos mais adequados nestas situações. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um módulo computacional capaz de realizar a análise térmica em regime permanente e transiente de seções transversais de elementos estruturais. A metodologia numérica adotada é descrita e, para uma maior abrangência da validação do módulo implementado e comprovar a sua eficiência, são analisadas seções transversais com diferentes características geométricas e físicas, e condições de contorno distintas.

Palavras-chave: Análise Térmica, Incêndio, Temperatura, Seção Transversal, MEF

1 INTRODUÇÃO

As perdas humanas e prejuízos materiais originados por incêndios fora de controle têm ressaltado ao longo da História a importância da consideração da segurança contra incêndio nos projetos de engenharia civil. A integridade da edificação em situação de incêndio envolve o conhecimento da influência de temperaturas elevadas no comportamento estrutural, o qual vem sendo alcançado através de modelos numéricos cada vez mais sofisticados que permitem um melhor conhecimento e entendimento do comportamento estrutural e dos materiais construtivos em situação de incêndio. Sabe-se que a temperatura elevada comum nos incêndios provoca alterações nas características físicas e de resistência mecânica dos materiais. Tanto no aço quanto no concreto, tais características se deterioram durante a exposição ao fogo, e a perda de capacidade resistente e de rigidez aumenta consideravelmente com a elevação da temperatura. Dessa forma, o tempo de exposição ao fogo é um parâmetro de controle muito importante na análise sob altas temperaturas, isto porque, a resistência ao fogo é definida como a capacidade de um material ou elemento estrutural permanecer, durante um tempo determinado, exercendo as funções para as quais foi projetado, sob a ação do incêndio. Esse tempo é denominado *Tempo Requerido de Resistência ao Fogo* (TRRF).

Através do TRRF é possível obter a temperatura fictícia dos gases do ambiente na curva de incêndio-padrão (entre outras curvas disponíveis em normas vigentes) e, por meio dessa temperatura, obter a temperatura no elemento estrutural que será usada no seu dimensionamento. As principais normas que tratam o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio no Brasil são: NBR 14323:2013 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio; NBR 15200:2012 - Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio; e NBR 14432:2000 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações. No entanto, as normas abordam a análise do elemento estrutural isolado e, portanto, conduzem, de modo geral, a projetos antieconômicos com pouca flexibilidade. Inicialmente, a solução comumente adotada na prática de projetos de engenharia para a consideração de ações relacionadas a incêndios em edificações, especialmente para estruturas de aço, resumia-se na especificação de uma determinada quantidade de material de revestimento térmico, a ser aplicada nos principais elementos estruturais potencialmente atingidos pelo fogo.

Atualmente, modelos analíticos, numéricos e experimentais cada vez mais sofisticados permitem um melhor conhecimento e entendimento do comportamento estrutural e dos materiais construtivos em situação de incêndio. Grande parte das pesquisas no Brasil relacionadas à análise das estruturas em situação de incêndio, tem tido caráter essencialmente numérico, onde se observam intensivos desenvolvimentos e avanços nos últimos anos (Landesmann, 2012; Caldas, 2008; Rigobello, 2011; Pierin e Silva, 2014; Pierin *et al.*, 2015).

No contexto numérico, a análise em situação de incêndio é possível através de duas fases fundamentais: análise térmica e análise estrutural, que se interligam. A primeira fase, análise térmica, é caracterizada pela determinação do campo de temperaturas ao longo da seção transversal dos elementos afetados pelo incêndio. Para cada instante estabelecido do incêndio postulado, a resposta térmica é obtida através de procedimento numérico de cálculo de transferência de calor, o que torna o tempo uma variável de controle fundamental na análise. Esse procedimento permite a consideração da variação das propriedades térmicas e mecânicas do material em função do aumento de temperatura. A segunda fase, análise estrutural, consiste em analisar a estrutura com as influências e efeitos oriundos da análise térmica devidamente considerados. Vale ressaltar que, em problema termo-estrutural, formulações numéricas eficientes e capazes de capturar os efeitos inelásticos e de segunda ordem são imprescindíveis.

No presente trabalho, atenção será direcionada à primeira fase: análise térmica. O objetivo é apresentar um módulo computacional, implementado com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) (Cook *et al.*, 1989), capaz de realizar a análise térmica em regime permanente e transiente de elementos estruturais, o CS-ASA/FA (*Computational System for Advanced Structural Analysis/Fire Analysis*). Tal módulo faz parte do programa CS-ASA (Silva, 2009). Esse programa, que foi desenvolvido também com base no MEF, realiza análises não lineares estática e dinâmica de estruturas de aço. Posteriormente, Lemes (2015) expandiu o CS-ASA com a análise avançada de estruturas mistas de aço e concreto. Para validar as implementações e a eficiência do CS-ASA/FA, estudam-se uma chaminé industrial em regime permanente e dois perfis metálicos sujeitos a diferentes condições de exposição ao fogo e tipos de revestimento térmico, em regime transiente. Os detalhes da metodologia usada para obtenção da equação de equilíbrio do problema de transferência de calor e a solução do problema não linear, caracterizada por um esquema de solução incremental simples, são apresentados na próxima seção. Na Seção 3, são apresentadas as análises dos exemplos numéricos já comentados.

Por fim, vale destacar algumas pesquisas envolvendo a análise térmica em estruturas encontradas na literatura. Landesmann (2003), por exemplo, apresentou um modelo não linear inelástico para análises de estruturas metálicas reticuladas em situação de incêndio. Esse autor implementou um modelo térmico unidimensional, via MEF, para análises não lineares transiente de transferência de calor. Mais recentemente, o mesmo autor, Landesmann (2012), realizou análise não linear transiente de transferência de calor na seção transversal de estruturas mistas de aço e concreto, através da discretização em fibras, sendo que cada fibra é definida pela coordenada de seu centroide e área. Portanto, assume-se que a temperatura, tensão e deformação associada a cada fibra seja uniforme, permitindo que a ação e deformação sejam calculadas no centroide do elemento. Pierin *et al.* (2015) apresentaram um programa que efetua a análise térmica de estruturas bidimensionais em regime transiente por meio do MEF utilizando elementos finitos lineares de 3 e 4 nós para a discretização da seção transversal.

2 ANÁLISE TÉRMICA

A primeira fase da análise de estruturas em situação de incêndio consiste na determinação da variação do campo de temperaturas dos elementos expostos ao fogo, em função do tempo decorrido de incêndio. Nesta etapa, no presente trabalho, admite-se que a distribuição de temperaturas ao longo de cada elemento estrutural é uniforme e igual àquela estimada para a seção transversal. Dessa forma, a análise térmica é realizada exclusivamente no plano da seção transversal através de modelos numéricos de transferência de calor que possibilitam a determinação da distribuição de temperaturas em diferentes pontos da seção.

A transferência de calor pode ser entendida como a propagação de energia de uma região para outra, devido à diferença de temperatura entre elas. Geralmente são considerados três mecanismos básicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Na condução, o calor é transmitido de uma região com elevada temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso), ou entre meios diferentes em contato físico direto. Na transmissão de calor por condução, a energia é transmitida por meio do movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas. Na convecção, o calor é transmitido entre as partes em movimento de um fluido (líquido ou gasoso) ou entre esse e superfícies sólidas com diferentes temperaturas. Diferentemente da condução e convecção, a radiação não necessita da presença de um meio material para que possa ocorrer. Na radiação térmica a

transmissão de calor entre corpos acontece por emissão ou absorção de radiações eletromagnéticas.

Existem diversas opções de modelos que descrevem a dinâmica de incêndio para uma análise térmica. Esses modelos são geralmente representados por curvas de aquecimento que são padronizadas e previstas pela normalização vigente, ou curvas específicas definidas para casos não convencionais de aquecimento. Em procedimentos prescritivos de projeto e em ensaios de laboratório em fornos para determinação da resistência ao fogo dos elementos estruturais, a temperatura dos gases é calculada segundo a curva de incêndio padrão (ISO 834-1:1999; ABNT NBR 14432:2001). Assim, essa curva de aquecimento é adotada neste trabalho e é dada por:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

em que θ_g é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos gases e t é o tempo de exposição ao fogo em minutos.

As demais curvas de aquecimento, embora tenham sido implementadas no CS-ASA/FA, não serão abordadas no presente trabalho. No entanto, maiores informações podem ser obtidas em Franssen *et al.* (2009) e Bailey (2011), bem como na norma europeia EN 1991-1-2:2002.

A análise térmica desenvolvida aqui visa basicamente determinar a distribuição de temperatura nos elementos estruturais em situação de incêndio através de um procedimento de solução de equações não lineares do tipo incremental simples. Tal procedimento permite a consideração da variação das propriedades térmicas do aço em função do aumento da temperatura, seguindo recomendações estabelecidas por normas para modelos de análise avançada. Além disso, preocupou-se em realizar a análise térmica de modo que uma análise estrutural tenha os subsídios necessários para a avaliação da resistência e da rigidez do material estrutural, pois, dentre os efeitos causados nas propriedades do material devido às altas temperaturas, os mais relevantes estão associados à modificação (degradação) da resistência e rigidez. A resistência está relacionada à tensão de escoamento, enquanto a rigidez está relacionada ao módulo de elasticidade do aço. A Figura 1 ilustra o comportamento dessas duas propriedades em função do aumento da temperatura.

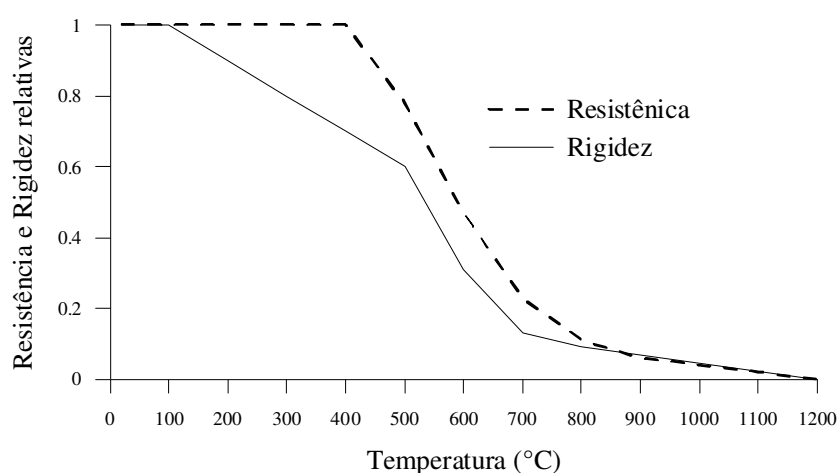


Figura 1. Variação da resistência e do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura

Aspectos relevantes a cerca da metodologia da análise térmica bidimensional são abordados na subseção seguinte.

2.1 Equação Diferencial da Condução de Calor em Sólidos

Partindo-se de um referencial cartesiano em duas dimensões, pode-se considerar que o fluxo de calor por condução é definido a partir da Lei de Fourier. Tal lei estabelece que o fluxo de calor depende da área da seção transversal do sólido, da condutividade térmica e do gradiente térmico. Assim, o fluxo de calor por unidade de área e por unidade de tempo é dado por (Bathe, 1996):

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y &= -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

sendo k_x e k_y as condutividades térmicas nas direções x e y ; e T é a temperatura.

Considerando agora um elemento infinitesimal bidimensional conforme Fig. 2, pode-se determinar a equação que governa o problema de condução de calor em um meio em equilíbrio aplicando-se a primeira lei da termodinâmica, Lei de Conservação da Energia (Fig. 2), no elemento infinitesimal bidimensional.

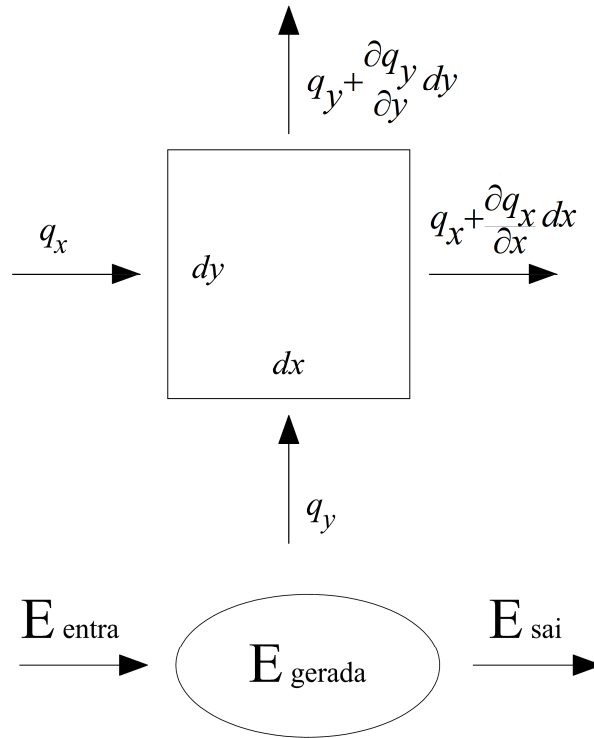


Figura 2. Princípio da conservação da energia aplicada ao elemento infinitesimal

A diferença entre o fluxo que entra e o que sai no elemento é dada por:

$$(q_x + q_y) - \left[\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) \right] \quad (3)$$

A energia interna gerada no sistema, considerando, sem perda de generalidade, que a espessura do corpo é unitária e a energia armazenada no corpo são definidas da seguinte forma, respectivamente:

$$Qdxdy(1) \quad (4)$$

$$\rho c dxdy \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

sendo Q o calor gerado no interior do elemento por unidade de volume e tempo, ρ é massa específica do material, c é o calor específico do material e $T(x,y,t)$ é a distribuição de temperatura.

Substituindo então as Eqs. (3), (4) e (5) na lei de conservação de energia e aplicando-se a lei de Fourier, Eq. (2), chega-se na equação correspondente à propagação de calor por condução, ou seja:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Supondo as hipóteses de homogeneidade térmica e isotropia, a condutividade térmica, k , é constante em qualquer ponto do material e em qualquer direção. Sendo assim, a equação anterior fica:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ou} \quad \nabla^2 T + \frac{Q}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

em que ∇ é o operador Laplaciano e $k/\rho c$ é a difusividade térmica do material. No caso particular de regime permanente (ou estacionário), a temperatura não varia com o tempo ($\partial T/\partial t = 0$) e a Eq. (7) transforma-se na *equação de Poisson* que governa vários dos problemas de campo importantes na engenharia. Além disso, em regime permanente e não havendo geração interna de calor ($Q = 0$), tem-se em (7) a equação conhecida como *equação de Laplace*.

2.2 Condições Iniciais e de Contorno

O campo de temperaturas que satisfaz a equação de condução de calor (6) deve satisfazer as condições iniciais e de contorno do problema, ou seja, para a obtenção da solução da Eq. (6), é necessário especificar condições iniciais (tempo $t = t_0$) no domínio, Ω , bem como condições de contorno associadas à superfície, Γ , para o problema de interesse. Para os corpos sólidos, as trocas de calor no volume do corpo (domínio) ocorrem apenas por condução. Estando um corpo sólido envolvido por um fluido, como mostra a Fig. 3, pode-se utilizar a convecção juntamente com a radiação como condição de contorno para o problema de domínio sólido (contorno convectivo radiativo), além de um fluxo de calor prescrito.

No que diz respeito às condições iniciais a serem consideradas, essas consistem de um campo de temperaturas no início da análise, especificadas conforme a seguir, partindo de um instante de tempo t_0 , isto é:

$$T = T_0(x, y, 0) \quad \text{em } \Omega, \text{ para } t = t_0 \quad (8)$$

Adicionalmente, as condições de contorno a serem estabelecidas podem ser divididas em essenciais ou naturais. As condições de contorno essenciais, ou também chamadas de Dirichlet, correspondem a temperaturas prescritas numa parte do contorno, e são dadas por:

$$T = T(x, y, t) \quad \text{em } \Gamma_T \quad (9)$$

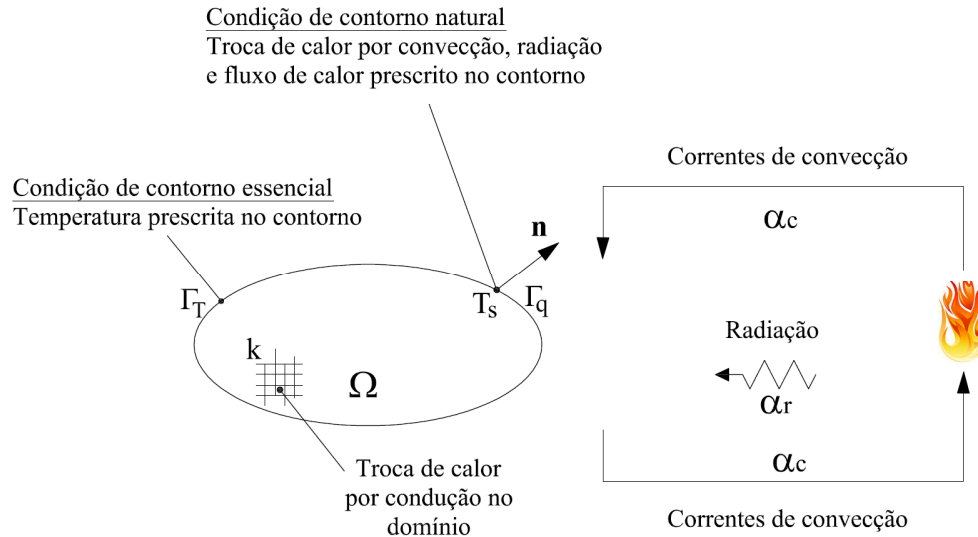


Figura 3. Condições de contorno em um problema de domínio sólido

Já as condições de contorno naturais, ou de Neumann, correspondem à troca de calor por convecção, radiação e fluxos de calor prescritos em uma parte do contorno, saindo do domínio na direção normal $\mathbf{n}$ ao contorno. Essas condições naturais são representadas genericamente a seguir:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = q_0(x, y, t) + h(T_s - T_\infty) \quad \text{em } \Gamma_q \quad (10)$$

com $q_0(x, y, t)$ sendo o fluxo de calor prescrito no instante t , h é o coeficiente combinado de transmissão de calor por convecção e radiação ($h = \alpha_c + \alpha_r$), T_s é a temperatura dos gases e T_∞ é a temperatura na superfície do elemento/estrutura. No caso de uma superfície perfeitamente isolada (ou adiabática), o fluxo de calor é tomado igual à zero.

Como destacado anteriormente, o módulo implementado para realizar a análise térmica, CS-ASA/FA, foi desenvolvido com base no MEF. Dessa forma, na subseção seguinte são apresentados os procedimentos para aplicação do MEF em problemas de condução de calor associados aos sólidos.

2.3 Equação de equilíbrio via MEF

O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico muito difundido na análise de estruturas e meios contínuo. Ele baseia-se no conceito de discretização da estrutura e meios contínuos e, a partir daí, na obtenção de soluções numéricas aproximadas. Assim, com essa técnica procura-se dividir o meio contínuo em subdomínios, referidos como elementos, que são interligados através dos pontos nodais onde são definidos os graus de liberdade a serem determinados. A ideia básica consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples.

O problema de condução de calor, conforme apresentado na seção anterior, consiste em resolver uma equação diferencial parcial, considerando a relação constitutiva do material (Lei de Fourier), e satisfazendo as condições de contorno. Muitos problemas de engenharia são regidos por uma equação diferencial válida em um domínio e sujeita a condições de contorno na superfície. Porém, de forma geral, só para alguns casos simples se conhecem soluções analíticas para essas equações diferenciais. No entanto, através da aplicação de métodos

numéricos, é possível obter os valores da função desconhecida (solução do problema) em alguns pontos pré-determinados. Soluções aproximadas para equações diferenciais podem ser obtidas através do Método dos Resíduos Ponderados (MRP). Tal método é aplicável a uma grande variedade de problemas e, por isso, se faz desnecessário buscar uma formulação variacional para aplicação do MEF nesses problemas.

No presente trabalho, o MRP é empregado juntamente com o método de Galerkin. A partir disso, no contexto do MEF, chega-se a equação de equilíbrio que governa o problema transiente de condução de calor, que é descrita a seguir na forma matricial:

$$C \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + K \{T\} = R \quad (11)$$

em que, $C = \int_{\Omega} \rho c N^T N d\Omega$ é a matriz de capacitância (capacidade térmica);

$K = \int_{\Omega} B^T D B d\Omega + h \int_{\Gamma} N^T N d\Gamma$ é a matriz de condutividade térmica;

$R = Q \int_{\Omega} N^T d\Omega + h T_{\infty} \int_{\Gamma} N^T d\Gamma - q_0 \int_{\Gamma} N^T d\Gamma$ é o vetor de fluxos de calor nodais; e

T é o vetor de temperaturas nodais que se deseja determinar.

As matrizes N , B e D nas equações anteriores são, respectivamente: a matriz de funções interpoladoras; a matriz que contém as derivadas em relação a x e y das funções interpoladoras; e matriz que contém as condutividades térmicas, k_x e k_y , ou simplesmente constante, k .

Os efeitos de ações térmicas podem ser analisados considerando os problemas térmicos em regime permanente, ou seja, as ações térmicas no contorno não variam com o tempo e, portanto, o campo de temperaturas resultante é constante. Assim, a equação de equilíbrio do problema estacionário de condução de calor é dada fazendo-se o termo $\partial T / \partial t$ em (11) igual à zero, portanto:

$$K \{T\} = R \quad (12)$$

Os elementos finitos implementados no módulo CS-ASA/FA e utilizados nas análises deste trabalho são apresentados na Fig. 4. Implementou-se dois elementos triangulares, T3 e T6, com 3 e 6 nós, respectivamente; e dois elementos quadrilaterais, Q4 e Q8, com 4 e 8 nós, respectivamente.

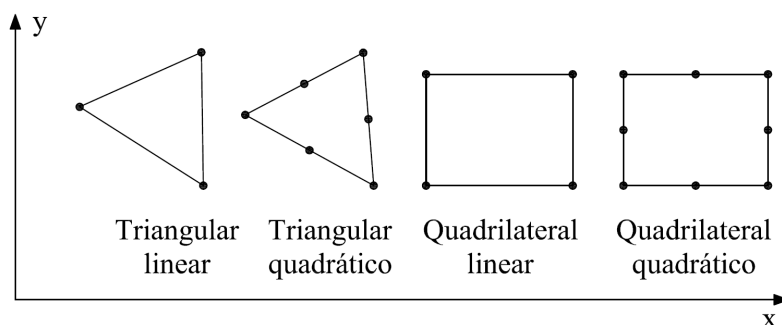


Figura 4. Elementos finitos implementados

2.4 Solução do Problema Transiente de Condução de Calor

Para obter a solução da Eq. (11) é adotada uma estratégia numérica de integração no tempo baseada no Método das Diferenças Finitas (MDF; Bathe, 1996). A Figura 5 mostra a variação de temperatura no intervalo de tempo Δt , logo, a equação de equilíbrio do problema transiente de condução de calor (11) pode ser reescrita na forma:

$$C \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_{n+\theta} + K \{T\}_{n+\theta} = R_{n+\theta} \quad (13)$$

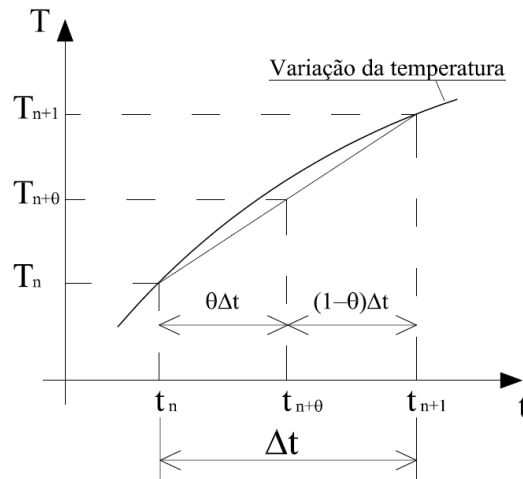


Figura 5. Variação da temperatura no intervalo de tempo Δt

A variação da temperatura em $t_{n+\theta}$ pode ser escrita através de uma expansão em série de Taylor e, após manipulações algébricas, a equação adotada para o cálculo das temperaturas a cada passo de tempo é dada por:

$$C \left\{ \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} \right\} + K \{ \theta T_{n+1} + (1-\theta) T_n \} = \theta R_{n+1} + (1-\theta) R_n \quad (14)$$

A equação anterior pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\{T_{n+1}\} = (C + \theta \Delta t K)^{-1} [C - (1-\theta) \Delta t K] T_n + \Delta t [\theta R_{n+1} + (1-\theta) R_n] \quad (15)$$

Ou ainda, de forma mais compacta, como:

$$\hat{K} \{T\}_{n+1} = \hat{R}$$

com

$$\hat{K} = (C + \theta \Delta t K)$$

$$\hat{R} = [C - (1-\theta) \Delta t K] T_n + \Delta t [\theta R_{n+1} + (1-\theta) R_n] \quad (16)$$

Os valores da temperatura no passo de tempo corrente, $n+1$ são encontrados usando as temperaturas calculadas no passo de tempo anterior (n) e usando os fluxos de calor nodais no passo de tempo corrente e anterior. O parâmetro θ define, dentro de cada intervalo de tempo, o instante em que a Eq. (15) será satisfeita. Através da variação do parâmetro θ , diferentes esquemas de integração no tempo podem ser obtidos. No presente trabalho, θ é adotado igual a 0.9 nas análises, conforme software SAFIR (Franssen, 2005). Mais informações sobre os

esquemas de integração no tempo e a solução detalhada do problema transiente de condução de calor podem ser encontradas em Bathe (1996), Lewis *et al.* (2004), Rigobello (2011) e Nunes (2014).

3 EXEMPLOS NUMÉRICOS

Nesta seção, o módulo computacional implementado para análise térmica, CS-ASA/FA, pertencente ao sistema computacional CS-ASA, é avaliado considerando resultados obtidos em outros trabalhos disponíveis na literatura e com a versão 2014.a.1 do software SAFIR (Franssen, 2005) desenvolvido na Universidade de Liege, que modela o comportamento não linear de edificações submetidas ao fogo. Para uma maior abrangência da validação do módulo implementado, são analisados três exemplos com diferentes características geométricas e físicas e condições de contorno distintas, considerando a análise térmica permanente e transiente. Para as análises transientes, considerou-se a curva de incêndio padrão e o parâmetro que define o esquema de integração no tempo (θ) foi tomado igual a 0.9, conforme mencionado anteriormente. Admitiu-se o incremento de tempo, Δt , sendo 10s. As propriedades térmicas do aço são aquelas dadas pela ABNT NBR 14323:2013 e consideradas variando com a temperatura. A emissividade resultante para o aço foi tomada igual a 0.7 (NBR 14323:2013). De acordo com Ribeiro (2009), bons resultados são obtidos quando a dimensão característica dos elementos finitos usados na modelagem da seção transversal é menor que 10 mm para o aço. Sendo assim, no presente trabalho, a discretização dos perfis metálicos seguiu tal recomendação.

3.1 Chaminé industrial

Este primeiro exemplo foi retirado de Moaveni (1999) e consiste na análise permanente (estacionária) de uma chaminé industrial feita de concreto (Fig. 6).

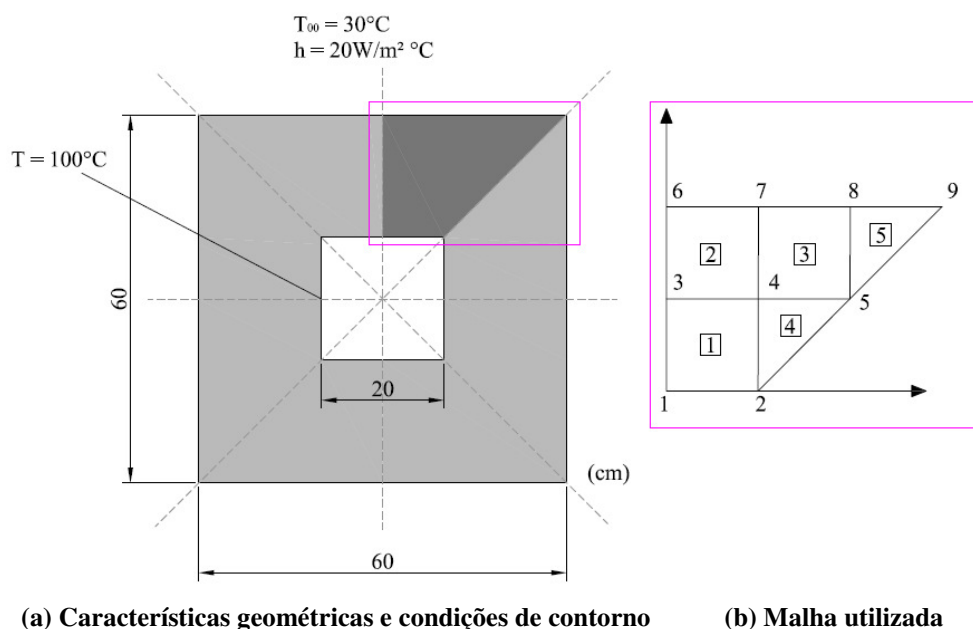


Figura 6. Chaminé Industrial

As características geométricas e condições de contorno dessa chaminé são apresentadas na Fig. 6a. Nessa figura, T_{∞} é a temperatura ambiente no contorno da chaminé, h é o

coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície e T é a temperatura interna da chaminé, que é assumida uniforme. Em função da simetria do problema, modelou-se apenas 1/8 da área da chaminé, conforme Fig.6b, com elementos finitos do tipo T3 e Q4. Para a análise, a condutividade térmica do concreto é assumida igual a $1.4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Os resultados alcançados através do CS-ASA/FA são mostrados na Tab.1, onde são comparados aos resultados obtidos em Moaveni (1999) e Rigobello (2011). Esse último utilizou um código para análise térmica também baseado no MEF. Nota-se que os resultados encontrados aqui praticamente coincidem com aqueles da literatura.

Tabela 1. Temperaturas nodais: Chaminé Industrial

Nó	Temperaturas ($^\circ\text{C}$)		
	CS-ASA/FA	Moaveni (1999)	Rigobello (2011)
1	100	100	100
2	100	100	100
3	70.95	70.83	70.95
4	67.12	67.02	67.12
5	51.64	51.56	51.64
6	45.94	45.88	45.94
7	43.73	43.67	43.73
8	40.13	40.10	40.13
9	32.72	32.73	32.72

3.2 Perfil I laminado sem revestimento e com revestimento tipo contorno

Apresenta-se agora a análise térmica transiente de um perfil I laminado do tipo IPE 360 conforme Fig. 7, baseado num exemplo apresentado por Rigobello (2011). O perfil foi considerado exposto ao fogo por todos os lados. Inicialmente, modelou-se o perfil sem proteção térmica (Fig.7a) com uma malha contendo os elementos lineares, Q4 e T3, e na sequência adotou-se outra malha contendo os elementos quadráticos, Q8 e T6. O objetivo é validar a implementação dos elementos finitos através dos resultados fornecidos pelo SAFIR 2014.a.1. Posteriormente, os elementos lineares foram utilizados para a modelagem do perfil com proteção térmica (Fig. 7b). O revestimento considerado foi do tipo contorno constituído por argamassa projetada, Blaze Shield II, de espessura igual a 12 mm. As propriedades térmicas do material de revestimento contra fogo foram consideradas constantes, sendo: calor específico igual a $2093 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, condutividade térmica igual a $0.043 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, massa específica igual a 240 kg/m^3 (fonte: Isolatek) e a emissividade resultante igual a 0.8 de acordo com recomendação do EN 1991-1-2:2002. A seção com e sem revestimento contra o fogo é exposta ao incêndio-padrão por todos os lados, sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção adotado igual a $25 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$. Para as análises do perfil, foram considerados os quatro pontos destacados na Fig. 7.

As curvas temperatura *versus* tempo obtidas para os pontos A, B, C e D considerando a situação do perfil sem revestimento são ilustradas na Fig. 8. Pode-se perceber que as respostas alcançadas neste trabalho apresentam uma concordância satisfatória com os resultados obtidos através do programa SAFIR 2014.a.1. Destaca-se uma pequena divergência no gráfico

relativo às temperaturas no ponto B (Fig. 8b) quando a malha é discretizada com elementos finitos lineares (T3 e Q4). Essa divergência pode estar relacionada com o processo de solução do problema transiente, visto que o módulo implementado neste trabalho utiliza o procedimento incremental simples enquanto o programa SAFIR 2014.a.1 utiliza um esquema incremental-iterativo baseado no método de Newton-Raphson. Ainda no ponto B, note que a malha discretizada pelos elementos quadráticos (T6 e Q8) apresenta resultados mais próximos aos do SAFIR 2014.a.1, o que pode ser justificado através da maior precisão dos elementos quadráticos. Vale ressaltar que convém estudos mais aprofundados sobre a utilização dos tipos de elementos finitos na análise térmica transiente.

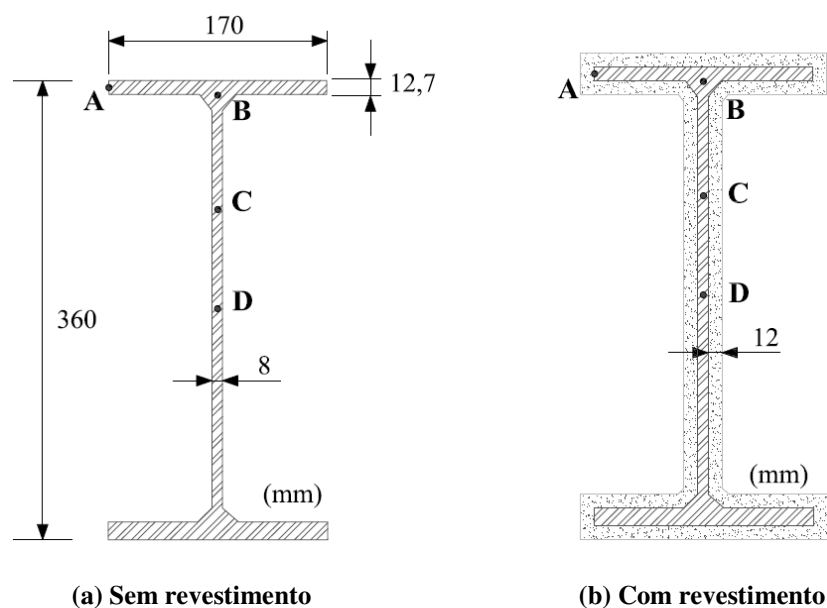
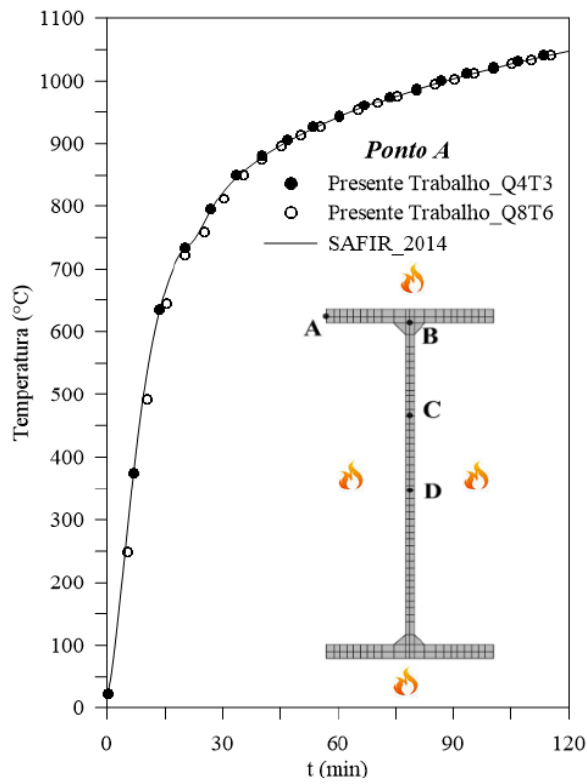


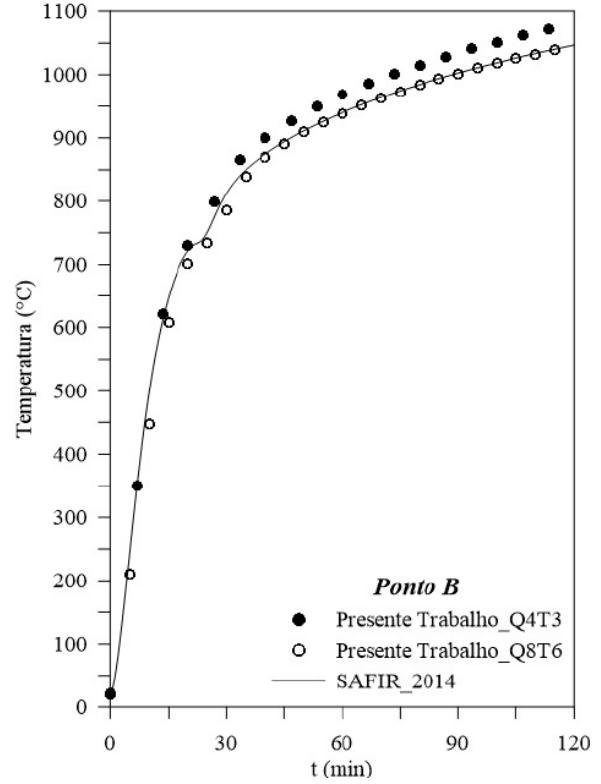
Figura 7. Perfil I Laminado IPE 360

Os resultados obtidos para a condição com revestimento tipo contorno são mostrados na Fig 9. Assim como na situação anterior, o presente trabalho obtém resultados satisfatórios se comparados aos resultados do SAFIR 2014.a.1.

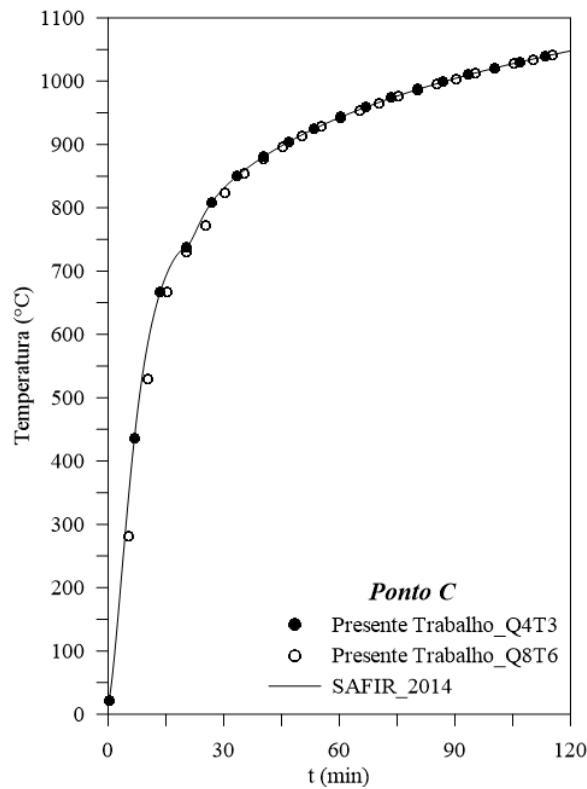
Os resultados obtidos para as situações sem revestimento e com revestimento tipo contorno são comparados e apresentados na Fig 10. Considerando apenas o ponto D para comparação, é possível observar o comportamento distinto do aquecimento da seção do perfil IPE 360 quando da utilização do material de proteção térmica. Nota-se claramente uma discrepância significativa na temperatura no ponto D. A utilização do revestimento térmico especificado reduziu em torno de 64% a temperatura nesse ponto, o que justifica uma alternativa cada vez mais comum na proteção do elemento estrutural metálico visando aumentar a sua resistência em situação de incêndio.



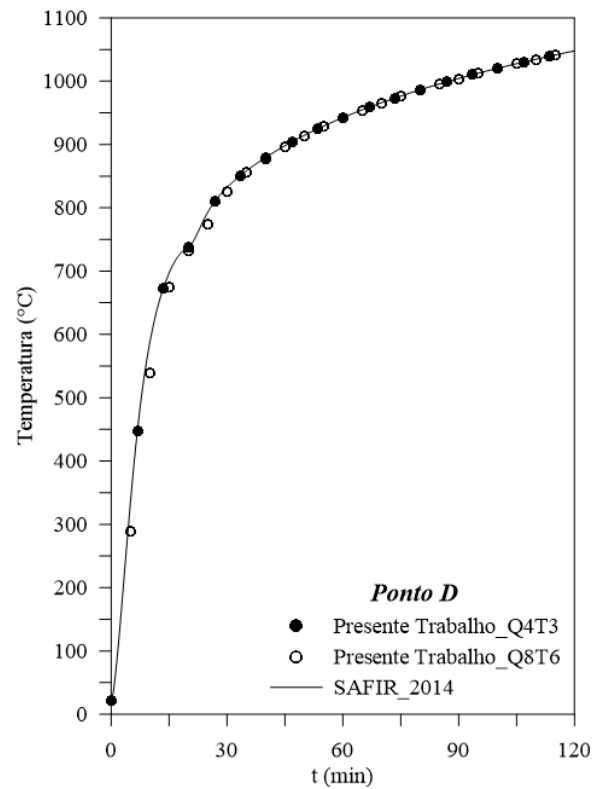
(a) Ponto A



(b) Ponto B

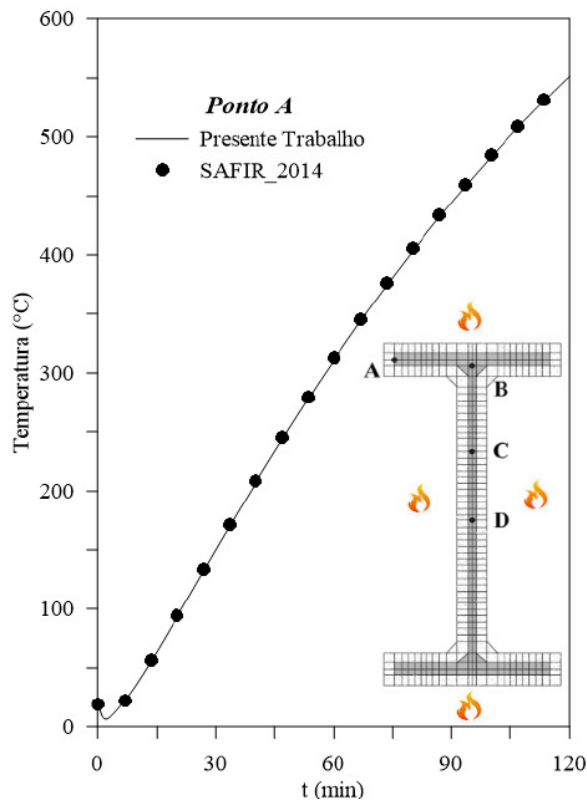


(c) Ponto C

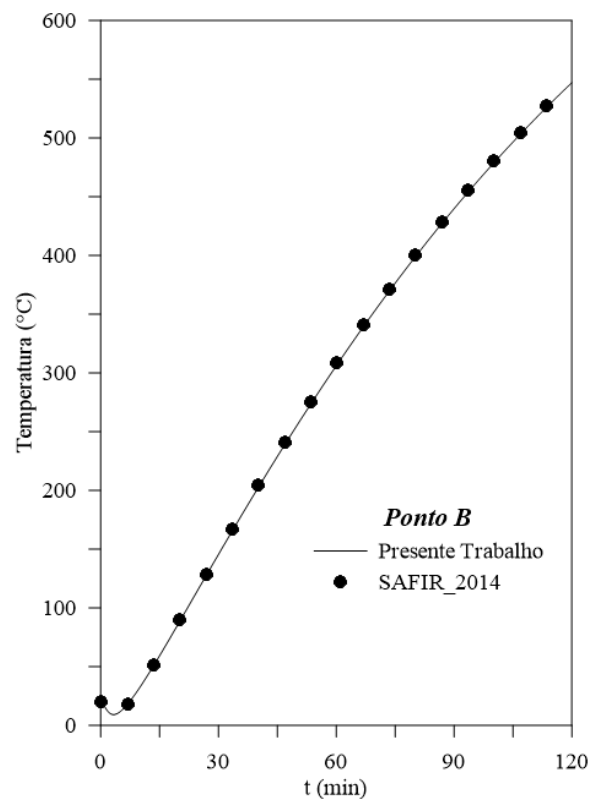


(d) Ponto D

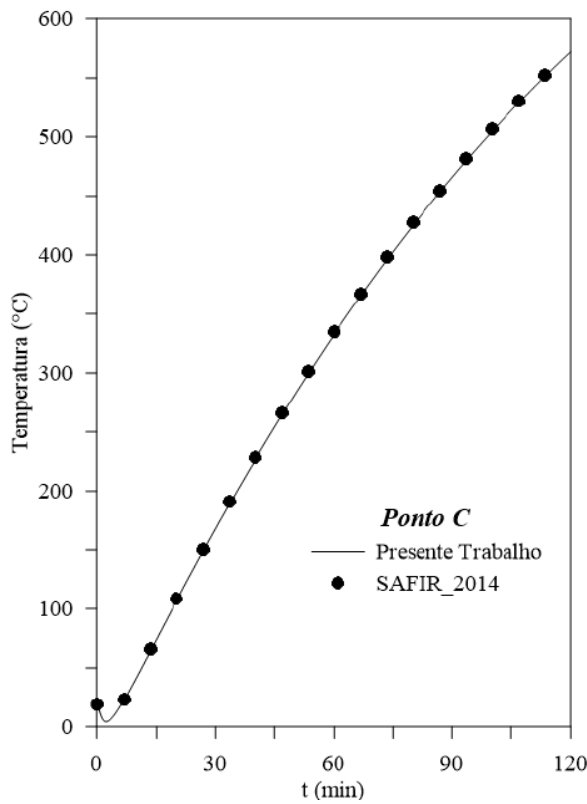
Figura 8. Curva Temperatura x tempo: sem revestimento



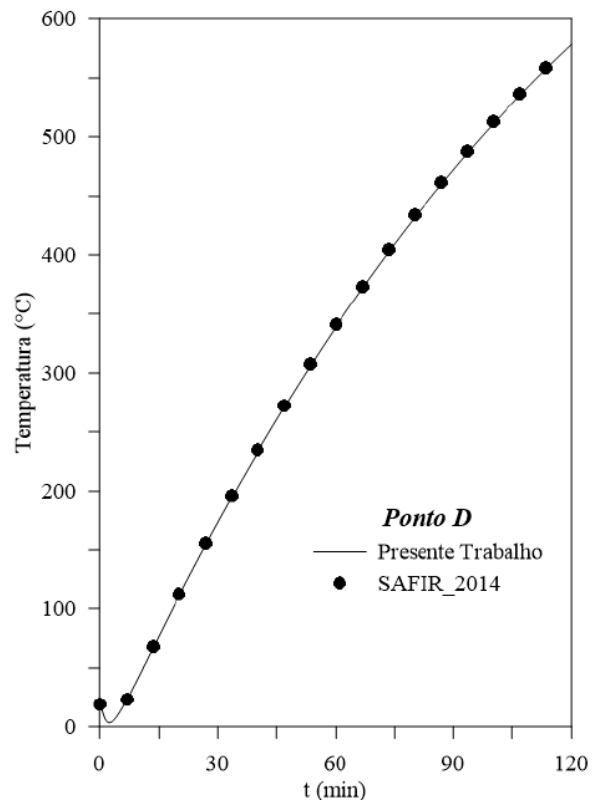
(a) Ponto A



(b) Ponto B



(c) Ponto C



(d) Ponto D

Figura 9. Curva Temperatura x tempo: com revestimento

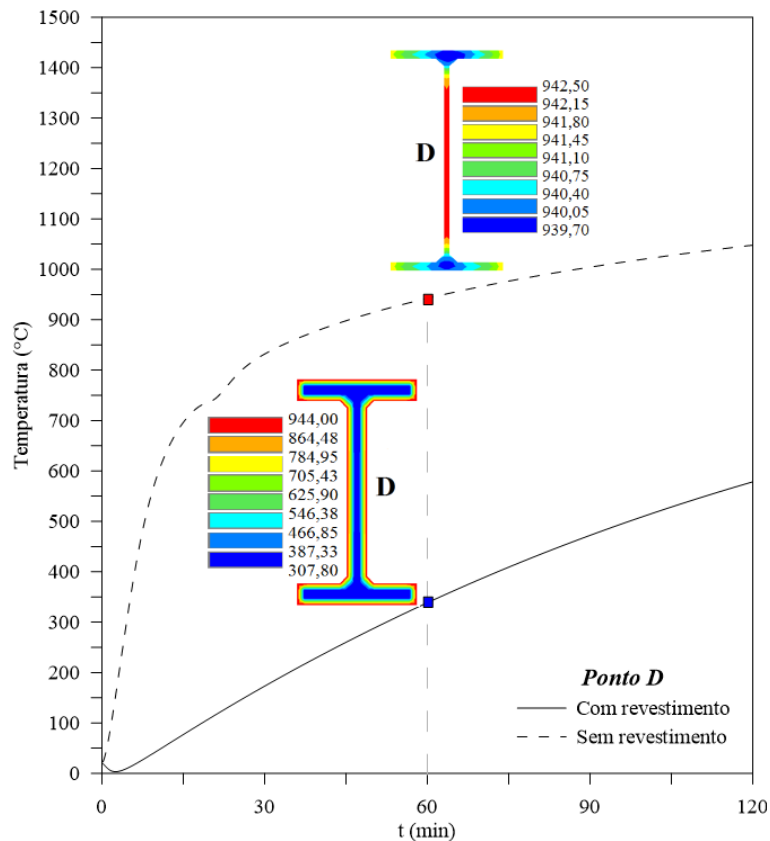


Figura 10. Curva Temperatura x tempo ponto D: com e sem revestimento

3.3 Perfil HE 360x132 pertencente à vedação

Um perfil laminado, HE360x132, pertencente à vedação constituída de concreto celular autoclavado é avaliado aqui através de uma análise térmica transiente, conforme estudo realizado por Ribeiro (2004). Os detalhes da seção são mostrados na Fig.11, onde constam suas dimensões e da vedação, bem como os pontos onde serão obtidas as curvas temperatura *versus* tempo. Para a análise, o perfil está sujeito ao incêndio apenas na parte superior da vedação, com coeficiente de transferência de calor por convecção adotado igual a $25\text{W/m}^2\text{°C}$.

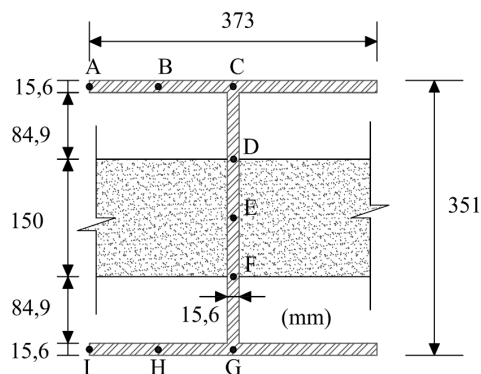


Figura 11. Perfil HE360x132 pertencente à vedação

As propriedades térmicas da vedação foram consideradas constantes, sendo: calor específico igual a 1008 J/kg°C , condutividade térmica igual a 0.13 W/m°C , massa específica igual a 430 kg/m^3 (fonte: catálogo Construtor) e a emissividade resultante igual a 0.7.

A evolução da temperatura dos pontos de A até I é apresentada na Fig. 12, onde, mais uma vez, é observada a boa concordância com os resultados obtidos pelo SAFIR 2014.a.1.

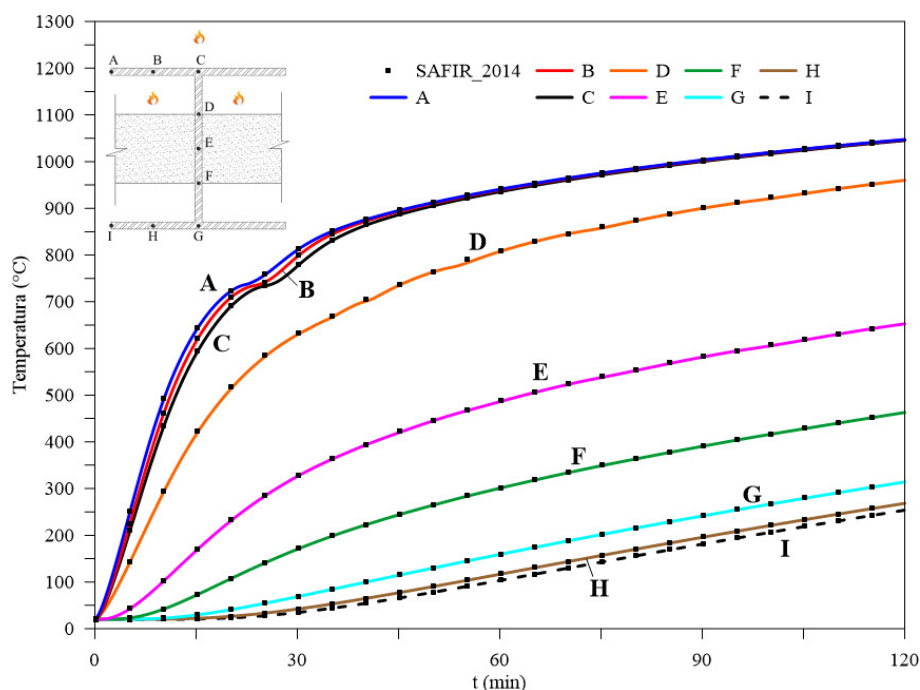


Figura 12. Curva Temperatura x tempo para os pontos de A até I

A distribuição de temperatura ao longo da seção é obtida com o auxílio do programa Diamond 2012.a.0 e mostrada na Fig. 13. Conforme destacou Ribeiro (2004), é importante observar o gradiente térmico entre as mesas do perfil. Mesmo para um tempo de exposição ao fogo, o gradiente é em torno de 700°C, o que pode causar deformações não previstas na estrutura.

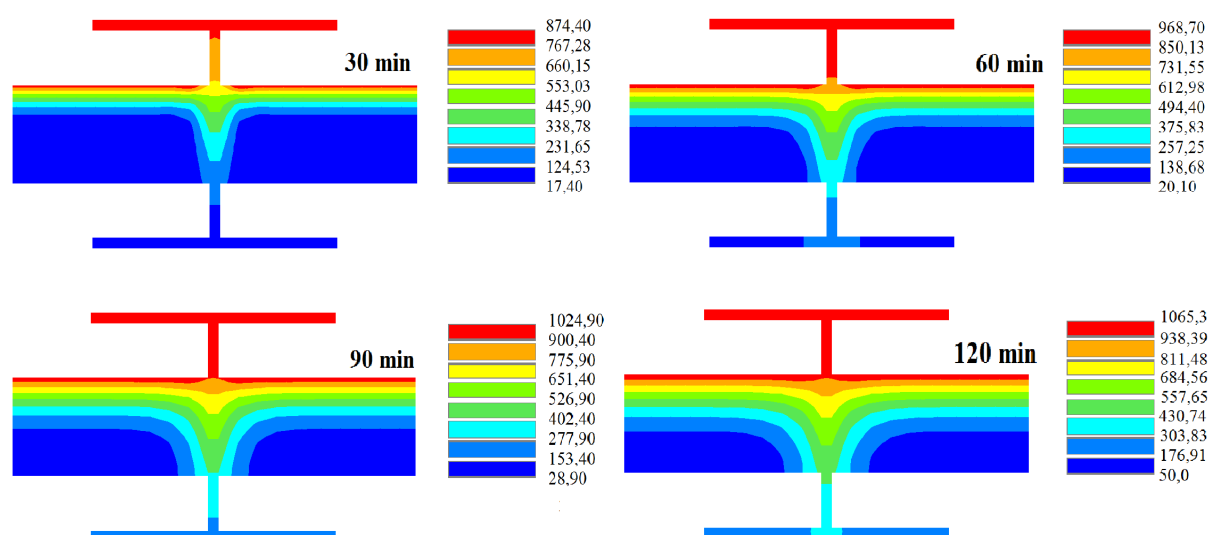
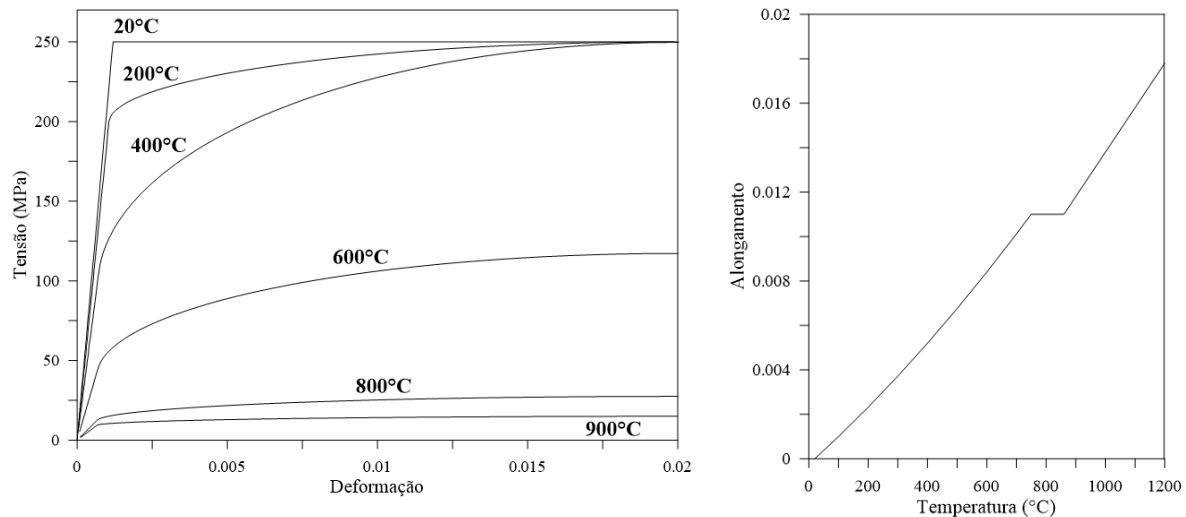


Figura 13. Distribuição de temperatura (°C) na seção do perfil

Como comentado anteriormente, é sabido que a temperatura elevada provoca alterações nas características físicas e de resistência mecânica dos materiais. No aço isso não é diferente,

onde tais características se deterioram rapidamente durante a exposição ao fogo, e como consequência, a perda de capacidade resistente e de rigidez aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura. Esse comportamento é ilustrado através do gráfico tensão *versus* deformação apresentado na Fig. 14a. O gráfico foi elaborado considerando a temperatura da seção do perfil HE360x132 calculada pela média da temperatura dos elementos da malha que discretizam o perfil. A temperatura do elemento, por sua vez, é calculada pela média da temperatura dos seus pontos nodais. A Figura 14b mostra a variação do alongamento do aço com a temperatura.



(a) Tensão x Deformação Perfil HE360x132

(b) Alongamento x Temperatura

Figura 14. Resistência e alongamento do aço variando com a temperatura

Deve-se destacar a importância da consideração, no cálculo de elementos estruturais/estruturas em aço submetidos à ação do fogo, do comportamento inelástico do material em função da temperatura e dos efeitos de segunda ordem devidos a mudanças de geometria, pois nota-se claramente a diminuição da capacidade resistente do perfil à medida que a temperatura avança (Fig.14a). E, além de modificar características da seção transversal, o acréscimo de temperatura acarreta ainda no surgimento de deformações térmicas em função do comportamento do alongamento do aço com o aumento da temperatura (Fig. 14b).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a determinação do campo de temperaturas em seções transversais, principalmente de elementos estruturais em aço, quando submetidas a altas temperaturas, através de uma análise térmica em regime permanente e transiente. Para isso, foi desenvolvido e implementado um novo módulo computacional no CS-ASA (Silva, 2009), denominado CS-ASA/FA.

A partir dos exemplos analisados na seção anterior, conclui-se que o módulo computacional CS-ASA/FA foi implementado com sucesso. Os resultados obtidos aqui se mostraram bem satisfatórios quando comparados com aqueles da literatura e do programa SAFIR 2014.a.1. Através desses exemplos numéricos foi possível explorar, com êxito, as várias funcionalidades do módulo, tais como: análises em regime permanente e transiente;

quatro tipos de elementos finitos para modelagem; utilização de diferentes elementos na mesma malha; emprego de diversos materiais e tipos de proteção térmica. Dessa forma, o CS-ASA/FA se mostrou eficiente na realização de uma análise térmica.

No entanto, é importante ressaltar que um estudo mais aprofundado acerca de alguns parâmetros, como, por exemplo, discretização da malha, tipo de elemento finito, esquema de integração no tempo (parâmetro θ) e incremento de tempo (Δt) pode ser realizado com o intuito de melhorar/otimizar a determinação do campo de temperaturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores do artigo agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG e PROPEC/UFOP o apoio recebido para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Bailey, C. G., 2011. *One Stop Shop in Structural Fire Engineering by Manchester University*. [online] Disponível: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/>.

Bathe, K. J., 1996. *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall. New Jersey, EUA.

Caldas, R.B., 2008. *Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFGM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Cook, R., Malkus, D., Plesha, M., 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.

European Committee For Standardization – CEN, 2002. EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures. Part 1-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire. Brussels.

Franssen, J. -M., Kodur, V., Zaharia, R., 2009. *Designing steel structures for fire safety*. CRC Press.

Franssen, J. -M., 2005. SAFIR - A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire. *Engineering Journal AISC*, 42(3):143–158.

ISO 834-1, 1999. Fire resistance tests – Elements of buildings construction, Part 1: General requirements. *ISO – International Organization for Standardization*. Geneva.

Landesmann, A., 2003. *Modelo Não-Linear Inelástico para Análise de Estruturas Metálicas Aporticadas em Condições de Incêndio*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Landesmann, A., 2012. Refined plastic-hinge model for analysis of steel-concrete structures exposed to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 71, pp. 202-209.

Lemes, I.J.M., 2015. *Análise Avançada via MRPR de Estruturas Mistas de Aço e Concreto*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

Lewis, R. W., Nithiarasu, P., Seetharamu, K. N., 2004. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Chichester: John Wiley & Sons.

Moaveni, S., 1999. *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. New Jersey: Prentice Hall.

NBR-14323, 2013. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.

NBR-14432, 2000. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações, *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.

NBR-15200, 2012. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.

Nunes, N. E. M., 2014. *Código Computacional para Análise Térmica Tridimensional de Estruturas em Situação de Incêndio*. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.

Pierin, I., Silva, V. P., La Rovere, H. L., 2015. Análise térmica de estruturas bidimensionais em situação de incêndio. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 8, pp. 25-48.

Pierin, I., Silva, V. P., 2014. Análise térmica de estruturas bidimensionais em situação de incêndio por meio do método dos elementos finitos. *Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*.

Ribeiro, J. C. L. 2009. *Desenvolvimento e aplicação de sistema computacional para simulação via método dos elementos finitos do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

Ribeiro, J. C. L. 2004. *Simulação via método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

Rigobello, R. 2011. *Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio*. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.

Silva, A.R.D. 2009. *Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.