

Estimativa do campo térmico de estruturas em situação de incêndio

Neves, N. S.^{1*}

1 Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* e-mail: natan.neves@coc.ufrj.br

Resumo

Na área de estruturas em incêndio, os elementos estruturais sob a ação de altos gradientes térmicos, as propriedades termofísicas dos materiais se degradam e, conseqüentemente, a resistência do elemento é reduzida. Nesse contexto, o campo de temperatura na seção transversal torna-se importante para análise e verificação de projeto. Este artigo aplicou uma ferramenta computacional desenvolvida em ambiente MATLAB, chamada NASEN, para realizar análises térmicas bidimensionais da natureza não linear de elementos estruturais em condição de incêndio. A teoria básica do programa é baseada nos procedimentos de elementos finitos de Galerkin, tornando possível simular geometrias variadas com diferentes propriedades físicas em função da temperatura. Além disso, diferentes curvas de incêndio, como a ISO 834, paramétricas ou experimentais, podem ser inseridas no programa. Os casos de teste são baseados em estruturas de aço e/ou concreto. Para avaliar o desempenho do programa, soluções numéricas e dados experimentais disponíveis na literatura são utilizados. Em resumo, os resultados mostram uma boa correlação com as soluções de referência, direcionando uma boa calibração do programa desenvolvido para resolver os problemas propostos.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos, Incêndio, Análise térmica, Aço, Concreto.

Abstract

In the area of structures in fire, the structural elements under the action of high thermal gradients, the thermophysical properties of the materials degrade, and, consequently, the strength of the element is reduced. In this context, the temperature field in the cross-section becomes important for analysis and design verifications. This article applied a computational tool developed in MATLAB environment, called NASEN, to perform two-dimensional thermal analysis of the nonlinear nature of structural elements under fire condition. The basic theory of the program is based on Galerkin finite element procedures, making it possible to simulate varied geometries with different physical properties as a function of temperature. Also, different fire curves, such as ISO 834, parametric or experimental, can be inserted into the program. The test cases are based on steel and/or concrete structures. To evaluate the performance of the program, numerical solutions, and experimental data available in the literature are used. In summary, the results show a good correlation with the reference solutions, directing a good calibration of the program developed to solve the proposed problems.

Keywords: Finite element method, Fire, Thermal analysis, Steel, Concrete.

1. Introdução

Em projetos de estruturas de concreto e/ou aço em situação de incêndio, são considerados métodos simplificados de análise, geralmente destinados a sistemas com configurações simples e restritas. No entanto, existem problemas práticos que não se aplicam às premissas e considerações simplificadas da norma, exigindo métodos avançados de análise. Por exemplo, peças estruturais com seções não convencionais, elementos compósitos com

diferentes materiais, comportamento mecânico avançado dos elementos em altas temperaturas, grandes estruturas, entre outros. Assim, independentemente da análise realizada, o conhecimento do campo de temperaturas no interior das estruturas é uma etapa inevitável e importante no projeto de estruturas em situação de incêndio.

Modelos numéricos são amplamente aplicados em pesquisas acadêmicas, bem como em projetos práticos da indústria, devido à sua versatilidade e desempenho da solução. Diversas pesquisas foram desenvolvidas nessa área [1-4], que desenvolveram

programas computacionais para análise térmica em situação de incêndio baseados no método dos elementos finitos ou das diferenças finitas. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um módulo computacional específico para análise térmica de estruturas em situação de incêndio, desenvolvido em ambiente MATLAB e denominado NASEN/TA-FIRE (*Numerical Analysis System for Engineering/Thermal Analysis - Fire*). Em Neves [5], são apresentados detalhes sobre a implementação e as características específicas do código computacional.

2. Formulação Numérica

O primeiro passo na formulação de elementos finitos é o conhecimento prévio da diferencial do modelo do fenômeno físico. Este artigo analisa um problema de condução de calor em um corpo sólido. Assim, com base no princípio da conservação de energia e considerando o fluxo de calor descrito pela Lei de Fourie, a equação governante é apresentada na Eq. (1).

$$\nabla^T \mathbf{D} \nabla T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo que T é a temperatura, Q é a geração interna de calor, ρ é a massa específica do material, c é o calor específico, $\mathbf{D}$ é a matriz de condutividade térmica do material, para o caso de um material isotrópico bidimensional, a matriz é dada pelo seguinte.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} = k(T) \mathbf{I} \quad (2)$$

Em situação de incêndio, as propriedades dos materiais são função da temperatura, tornando o problema não linear. As expressões matemáticas das propriedades termofísicas do aço e do concreto baseiam-se nas normas europeias [6, 7].

Em relação às condições de contorno, utilizando os modelos de transmissão de calor por convecção e radiação, a equação da taxa total de transferência de calor, expressa de forma linear, pode ser escrita pela Eq. (3)

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_n &= \alpha_c (T - T_g) + \alpha_r (T - T_g) \\ &= \left\{ \alpha_c + \left[\epsilon \sigma (T + T_g)(T^2 + T_g^2) \right] \right\} (T - T_g) \end{aligned} \quad (3)$$

Onde T_g é a temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo, σ é a constante de Stephan Boltzmann, ϵ é a emissividade, α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção e α_r é o coeficiente de radiação. De acordo com a norma

ISO 834 [8], a temperatura dos gases é descrita pela Eq. (4)

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (4)$$

O segundo passo na formulação do método dos elementos finitos para problemas de difusão de calor é escrever a Eq. (1) como uma sentença integral associada a uma função peso, w . Em seguida, aplicando relações do cálculo diferencial-integral e com algumas manipulações algébricas, resultando na Eq. (5).

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \nabla^T w (\mathbf{D} \nabla T) d\Omega + \int_{\Omega} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} w d\Omega \\ = \int_{\Omega} f w d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{q}_n w d\Gamma \end{aligned} \quad (5)$$

A Eq. (5) é conhecida como uma formulação variacional fraca, que não possui aproximação numérica. Escreva a função de resposta aproximada como uma combinação de coeficientes e N funções de interpolação, conforme fornecido pela Eq. (6).

$$T \approx \sum_{i=1}^N N_i T_i = \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{T}} \quad (6)$$

O problema da condução de calor em condições de incêndio é caracterizado pela natureza transitória, com o campo de temperatura variando com o tempo. O método das diferenças finitas é aplicado para aproximar o operador temporal diferencial [5]. Assim, é possível escrever a temperatura em $n + 1$, conforme mostrado na Eq. (7).

$$\hat{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{T}}_{n+1} = \hat{\mathbf{B}} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} + \theta \mathbf{K} \right] \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} - (1 - \theta) \mathbf{K} \right] \tilde{\mathbf{T}}_n + (1 - \theta) \mathbf{F}_n + \theta \mathbf{F}_{n+1}$$

Onde Δt é o intervalo de tempo e o parâmetro θ varia de 0 a 1, o que representa o esquema de integração temporal. No presente trabalho, adota-se 2/3, o que caracteriza o esquema de Galerkin, sendo incondicionalmente estável.

3. Discussão dos resultados

O primeiro caso estudado neste trabalho é constituído por um perfil I de aço em contato com alvenaria revestida. Considere a ação do incêndio somente em um lado da alvenaria, atuando em um comprimento de 940 mm, conforme ilustra a Figura 1.

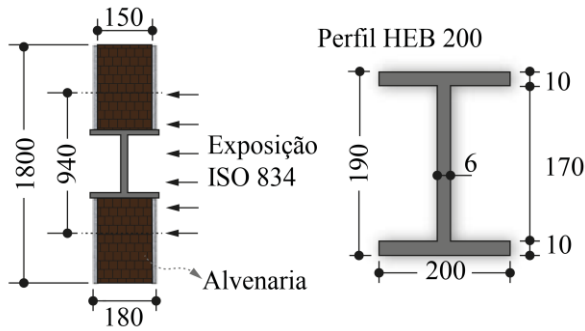


Figura 1: Modelo estrutural e dimensões (em mm) do perfil I

Como condição de contorno adota-se, simplificada, que a face não exposta ao fogo é considerada isolada termicamente. A alvenaria tem uma largura de 150 mm e possui um revestimento de largura igual a 15 mm. A análise via elementos finitos é direcionada pelo teste de dois tipos de elementos, sendo elementos triangulares lineares de 3 nós e quadriláteros de 4 nós. Os resultados do programa STC são utilizados para comparação.

Em relação à variação das propriedades físicas dos materiais com a temperatura, tem-se que o aço e concreto são modelados pelas expressões normativas apresentadas em [6, 7]. Em específico, para a alvenaria, as propriedades são consideradas constantes, sendo a condutividade igual a $0,7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, o calor específico igual a $840 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$ e a massa específica assume o valor de 1600 Kg/m^3 .

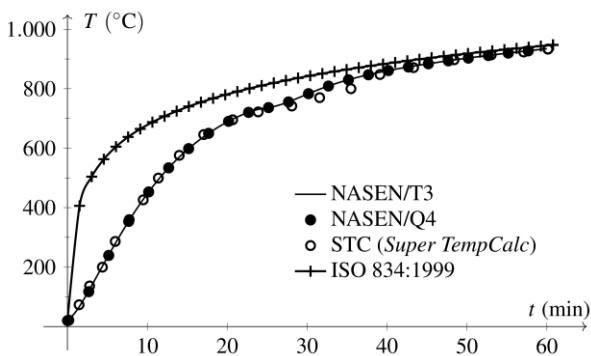


Figura 2: Curva de temperatura referente ao ponto central da alma do perfil

Em relação aos parâmetros temporais, inicialmente considera-se o esquema de discretização de Galerkin. Utilizou-se um incremento de 10 segundos para cada passo de tempo, o tempo final de simulação é 3600 segundos e o processo inicia-se no tempo zero com temperatura ambiente igual a 20°C . Para as malhas numéricas utilizadas nas simulações computacionais, referentes aos dois tipos de elementos testados, foram utilizados para os elementos triangulares 932 nós e 1582 elementos, e para os elementos quadriláteros 3180 nós e 2877 elementos.

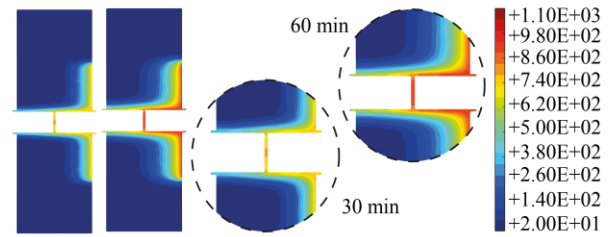


Figura 3: Campo térmico para 30 e 60 minutos de exposição ao incêndio (em $^\circ\text{C}$)

A Figura 2 ilustra a variação de temperatura *versus* tempo, onde é possível visualizar que em relação aos tipos de elementos finitos testados, os resultados apresentam boa concordância. Em relação à comparação com o programa STC, o programa desenvolvido na presente pesquisa apresenta uma boa performance, destacando que por volta de 30 min existe uma leve separação entre as curvas, onde a solução via MEF apresenta uma diferença percentual de, aproximadamente, 3% em comparação ao programa STC nesta região. A Figura 3 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do perfil I de aço em contato com a alvenaria para 30 e 60 min de exposição ao fogo.

O segundo caso estudado neste trabalho é uma viga mista de concreto e aço em condição de incêndio. Um perfil I de aço trabalhando em conjunto com uma laje de concreto. Nesse problema estudado, não são considerados os conectores de cisalhamento localizados usualmente na mesa superior do perfil. Em específico, o perfil VS 650x114 mm e uma laje maciça com largura efetiva de 1000 mm e espessura igual 100 mm. A laje está exposta à ação da curva padrão de incêndio na parte inferior, sendo que as bordas laterais da laje são consideradas adiabáticas, conforme ilustra a Figura 4.

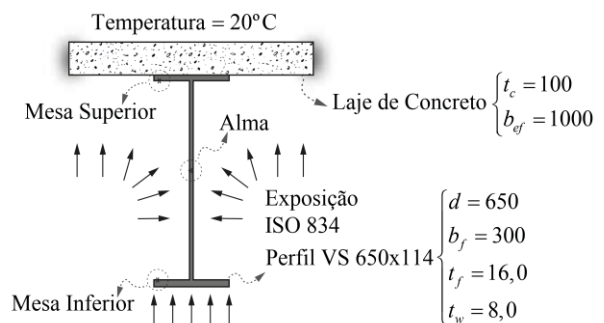


Figura 4: Viga mista de aço e concreto sob ação da curva padrão de incêndio (em mm)

Nas faces expostas, considera-se um coeficiente de convecção e uma emissividade resultante de $25 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ e 0,522, respectivamente. No instante inicial, a viga mista é mantida à temperatura ambiente de 20°C . Utilizam-se elementos triangulares lineares de três nós para a simulação desse problema

e os resultados obtidos são comparados com os dados obtidos pelo programa ANSYS e PFEM2D.

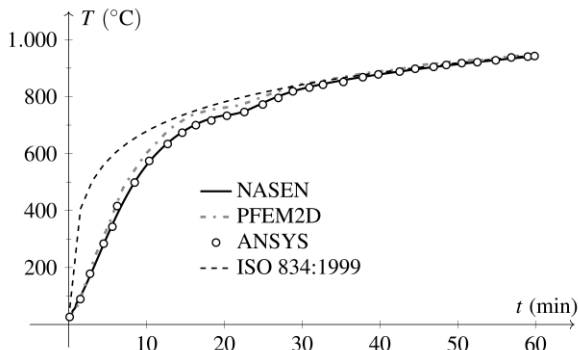


Figura 5: Curva de temperatura referente ao ponto no centro da alma do perfil I de aço da viga mista de aço-concreto

Os resultados do ponto contido na alma do perfil são mostrados na Figura 5, onde observa-se que os resultados obtidos com o programa NASEN apresentam uma resposta com um melhor ajuste aos resultados via ANSYS, evidenciando o bom desempenho do código desenvolvido.

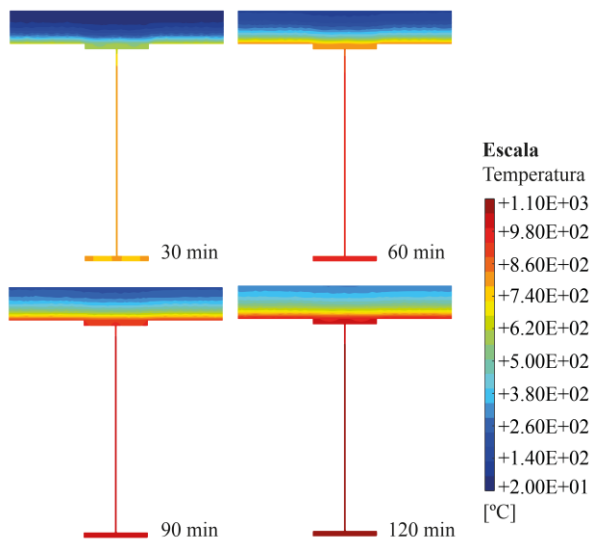


Figura 6: Campo de temperatura da seção transversal da viga mista em 30, 60, 90, 120 min de exposição ao fogo

Adicionalmente, a Figura 6 apresenta o campo térmico bidimensional na seção transversal da viga mista de concreto e aço em condição de incêndio. Os campos são apresentados para 30, 60, 90 e 120 min de exposição ao fogo. Nota-se que o perfil de aço apresenta uma temperatura praticamente constante devido a alta condutividade térmica do material, diferenciando do comportamento da laje de concreto que apresenta bem definida as isotérmicas ao longo da espessura da laje.

4. Conclusão

O presente trabalho realizou uma análise térmica bidimensional em estruturas em situação de incêndio com base no programa NASEN/TA-FIRE. Dois casos são testados, em cada caso o desempenho do programa foi verificado em relação aos resultados obtidos na literatura. O trabalho se concentrou na análise de estruturas compostas por aço e/ou concreto. Os resultados obtidos nos casos analisados pelo programa computacional desenvolvido são consistentes com as soluções de referência, apresentando um bom desempenho do módulo para a análise térmica bidimensional transiente não linear de estruturas em condição de incêndio. Além disso, observa-se com este estudo que as propriedades físicas do modelo térmico têm uma influência significativa nos resultados.

5. Referências

- [1] Yin, J., Zha, X.x. and Li, L.y. Fire resistance of axially loaded concrete filled steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, No. 7, pp. 723–729. 2006.
- [2] NEVES, Natan Sian das; CAMARGO, Rodrigo Silveira; AZEVEDO, Macksuel Soares de. Advanced computer model for analysis of reinforced concrete and composite structures at elevated temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 4, p. e14410, 2021.
- [3] Ribeiro, J.C.L. *Desenvolvimento e aplicação de um sistema computacional para simulação via Método dos Elementos Finitos do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2009.
- [4] Pierin, I., Silva, V. and La Rovere, H. “Thermal analysis of two-dimensional structures in fire”. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Vol. 8, No. 1, pp. 25–36. 2015.
- [5] Neves, N.S.. *Modelo computacional avançado para análise de estruturas sob ação de gradientes térmicos*. Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2019.
- [6] EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-2: General rules-structural fire design. European Standards, London. 2004.
- [7] EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-2: General rules - structural fire design. European Standards, London. 2005.
- [8] ISO 834. Fire resistance tests-elements of building construction. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 1999.