

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ELEMENTOS DE AÇO SOB ELEVADAS TEMPERATURAS AO XXVII CREEM

Natan Sian das Neves, natan.neves@coc.ufrj.br¹

¹PEC/COPPE/UF RJ - Programa de Engenharia Civil. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão - Cidade Universitária, 21941-594 - RJ, Brasil.

Resumo. O presente artigo concentra-se em apresentar conceitos iniciais acerca do comportamento de estruturas de aço em condição de incêndio, visando investigar a redução da capacidade de resistência plástica efetiva de perfis I de aço sob ação de elevados gradientes térmicos. Os cálculos são direcionados para determinação da distribuição de temperatura na seção transversal do elemento estrutural e para os limites plásticos de um perfil I de aço sujeito as condições térmicas simétricas e assimétricas. Sendo assim, os testes e verificações são baseados em simulações numéricas realizadas pelo módulo específico do programa computacional para análise térmica não linear bidimensional em regime transiente no contexto de estruturas expostas ao fogo. A implementação computacional é realizada no ambiente Matlab e o programa é denominado pelo autor de NASEN. Aplica-se os fundamentos dos procedimentos numéricos de elementos finitos de Galerkin e as malhas são constituídas por elementos finitos triangulares lineares. Em síntese, os resultados obtidos são divididos em duas classes, destinados as curvas de temperatura-tempo e as curvas de interação da seção, onde observa-se que os perfis em contato com fogo, atingem altas temperaturas e significativas reduções nos limites plásticos dos elementos de aço.

Palavras chave: Elementos Finitos. Incêndio. Estruturas de Aço. Superfície Plástica.

Abstract. This article focuses on presenting initial concepts about the behavior of steel structures in fire conditions, aiming to investigate the reduction of the effective plastic strength capacity of steel profiles I under the action of high thermal gradients. The calculations are directed to determine the temperature distribution in the cross-section of the structural element and to the plastic limits of a steel profile I subject to symmetrical and asymmetric thermal conditions. Thus, the tests and verifications are based on numerical simulations performed by the specific module of the computer program for two-dimensional nonlinear thermal analysis in transient regime in the context of exposed structures to fire. The computational implementation is carried out in the Matlab environment and the program is called by the author of NASEN. The fundamentals of Galerkin's finite element numerical procedures are applied and the meshes are made up of linear triangular finite elements. In summary, the results obtained are divided into two classes, intended for temperature-time curves and section interaction curves, where it is observed that the profiles in contact with fire, reach high temperatures and significant reductions in the plastic limits of the elements of steel.

Keywords: Finite Elements. Fire. Steel Structures. Plastic Surface.

1. INTRODUÇÃO

A utilização das estruturas de aço em países como Alemanha, Reino Unido e Estados Unidos é amplamente difundida há décadas. No Brasil, o emprego das estruturas de aço se expande consideravelmente nas últimas décadas. Além da construção civil, os elementos de aço são aplicados em diferentes áreas da engenharia e afins, como o setor industrial e automotivo.

Esses tipos de estruturas apresentam benefícios para os projetistas, arquitetos e engenheiros na concepção de projetos, por exemplo, redução do tempo da construção, maior produtividade, racionalização de mão-de-obra e de materiais, bem como a liberdade na criação de projetos arquitetônicos. Embora os elementos de aço apresentem elevados níveis de capacidade de suporte-carga, esses quando submetidos as condições de elevadas temperaturas, perdem significativamente sua capacidade resistente devido as severas alterações nas propriedades termomecânicas do material. Diversas pesquisas foram desenvolvidas para estimar a redução da capacidade resistente de estruturas envolvendo aço em situação de incêndio, destaca-se os trabalhos de Landesmann (2003), Lemes *et al.* (2017), Barros (2016) e Neves (2019).

Desta maneira, o presente artigo apresenta um estudo inicial acerca dos elementos de aço sob altas temperaturas,

ênfatizando a análise para redução da capacidade resistente de perfis I de aço. Para realizar as investigações, utiliza-se o módulo específico do programa computacional, desenvolvido pelo autor em ambiente MATLAB, para análise térmica de estruturas bidimensionais sob elevadas temperaturas, denominado de NASEN/TA-FIRE. O programa NASEN (*Numerical Analysis System for Engineering*) é um código construído para análise inicial de inúmeros problemas físicos de interesse para engenharia, como análise térmica, estrutural (linear e não linear), dentre outros (Neves, 2019). No atual estudo, emprega-se o módulo de análise térmica do programa, devidamente já validado com a literatura clássica, conforme pode ser visto em Neves *et al.* (2019), Neves *et al.* (2020) e Neves (2020).

A metodologia adotada no estudo tem como base quatro fases de processamento: (i) entrada de dados e informações iniciais da geometria e do material (condições de contorno, tensão de escoamento, temperatura ambiente, intervalo temporal, tempo total de exposição ao fogo e demais parâmetros); (ii) obter o campo de temperatura não linear na seção transversal dos elementos estruturais de aço com base nos procedimentos numéricos de elementos finitos; (iii) determinar as curvas de interação em função do tempo de exposição ao fogo, e (iv) avaliar os resultados obtidos e a perda de capacidade de carga dos elementos de aço.

2. TEORIA FÍSICA-MATEMÁTICA E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

Para obter as curvas de interação de elementos de aço em condição de incêndio, primeiramente, deve-se conhecer o campo de temperatura na seção transversal do perfil de aço. A equação diferencial de governo do problema físico de difusão de calor em regime transiente e não linear é baseada nos princípios da conservação de energia (Bergman *et al.*, 2011), resultando na Eq. (1).

$$k(\theta)\nabla^2\theta + f = c\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (1)$$

Onde θ é a temperatura, f é a geração de energia interna, ρ é a massa específica, c é o calor específico e k é conhecido como condutividade térmica do material, considerando o caso de um material isotrópico. Além disso, a Eq. (1) exibe um comportamento não linear pelo fato que as propriedades físicas do aço estão variando com a temperatura.

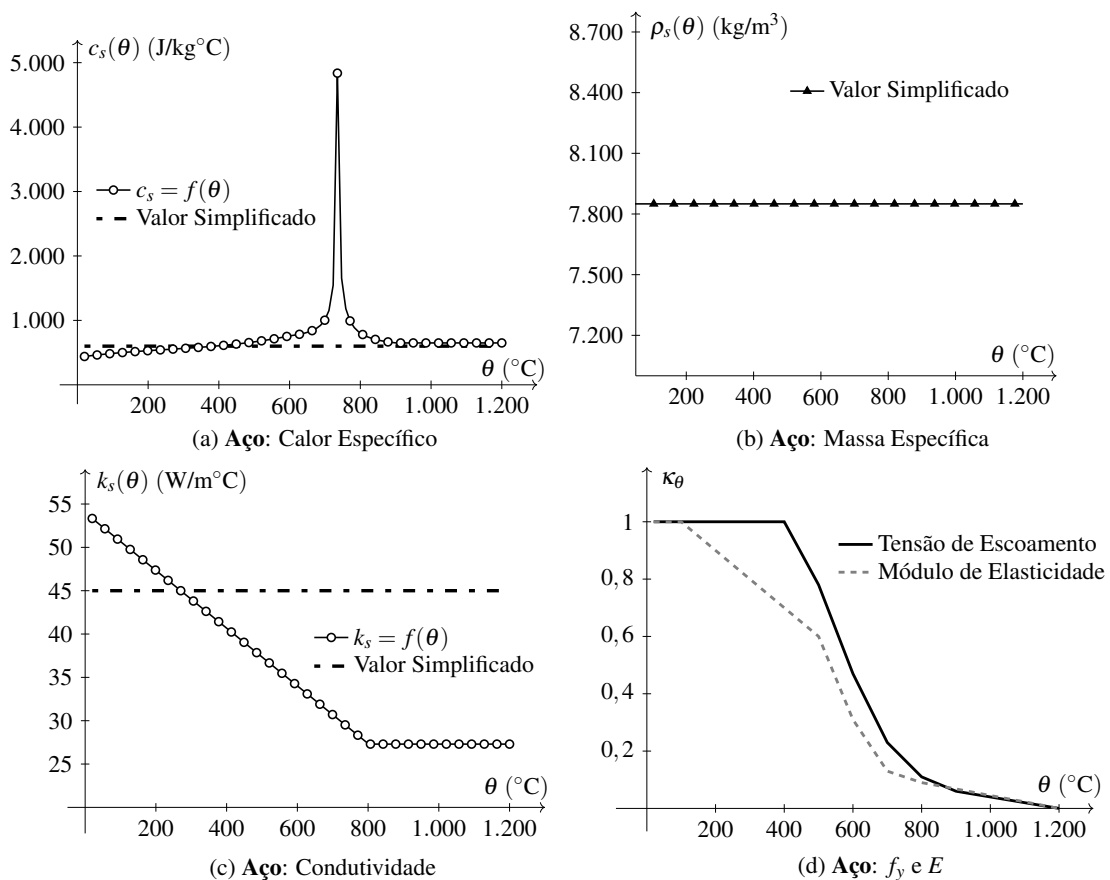


Figura 1. Propriedades térmicas e mecânicas do aço em função do aumento de temperatura

A Fig. 1 apresenta os comportamentos das propriedades termofísicas e mecânicas do aço sob elevadas temperaturas, conforme as recomendações descritas no EN 1993-1-2 (2005). A massa específica do aço é considerada constante e igual

a 7850 kg/m³. Além disso, nas Figs. 1(a)-(c), apresentam-se valores simplificados para descrever as propriedades termo-físicas do aço, onde essas não variam com a temperatura, contudo, o emprego delas podem proporcionar comportamentos simplificados para análise e verificação das estruturas.

As condições de contorno do problema são fundamentadas nos modelos de transmissão de calor por convecção e radiação (condição de contorno do tipo de Neumann). A equação da taxa de transferência de calor total, expressa na forma linear, é apresentada na Eq. (2).

$$\mathbf{q}_n = \alpha_c(\theta - \theta_g) + \alpha_r(\theta - \theta_g) \quad (2)$$

$$\alpha_r = \epsilon\sigma(\theta + \theta_g)(\theta^2 + \theta_g^2) \quad (3)$$

Onde θ_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 a transferência de calor por convecção coeficiente e α_r é o coeficiente de radiação, dado pela Eq. (3). Segundo a ISO 834 (1999), a temperatura dos gases quentes provocados pelo fogo pode ser descrita pela Eq. (4).

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

A solução da equação diferencial de governo (ver Eq. 1) tem como base os procedimentos numéricos de elementos finitos de Galerkin, considerando neste trabalho os elementos finitos do tipo triangular linear. Sendo assim, a formulação do método dos elementos finitos para problemas de difusão de calor parte das premissas do método de resíduos ponderados. Escrevendo a Eq. (1) como uma sentença integral associada a uma função de peso, w , e aplicando as relações do cálculo diferencial-integral, chega-se na formulação variacional fraca do problema, conforme posto a seguir:

$$k \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{dw}{dx} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{dw}{dy} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} w d\Omega = \int_{\Omega} f w d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{q}_n w d\Gamma \quad (5)$$

Escrevendo, de forma aproximada, a variável primal do problema (campo de temperatura, θ) como uma combinação de coeficientes e funções de interpolação ϕ , conforme mostrado na Eq. (6).

$$\theta \approx \sum_{i=1}^N \phi_i \theta_i = \{\phi\}^T \{\theta\} \quad (6)$$

Utilizando a proposta de elementos finitos (ver Eq. (6)) e aplicando a técnica de diferenças finitas para a aproximação do operador temporal, pode-se chegar no sistema linear efetivo representativo da temperatura no instante de tempo $n + 1$, conforme mostra a Eq. (7). Além disso, os detalhes matemáticos acerca dessa formulação podem ser encontrados em Neves (2019), Reddy (1993) e Bhatti (2005).

$$\left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} + \beta \mathbf{K} \right] \{\theta\}_{n+1} = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} - (1 - \beta) \mathbf{K} \right] \{\theta\}_n + (1 - \beta) \mathbf{F}_n + \beta \mathbf{F}_{n+1} \quad (7)$$

Onde Δt é o intervalo de tempo e o parâmetro β varia de 0 a 1, que representa o esquema de integração de tempo. No presente trabalho, adota-se o esquema de Galerkin ($\beta = 2/3$) incondicionalmente estável.

O processo de solução numérica geral adotado no desenvolvimento computacional do módulo específico do programa NASEN para análise não linear da condução de calor de estruturas em situação de incêndio é mostrado na Fig. 2. Por causa da natureza não linear do problema físico, faz necessário acrescentar uma rotina iterativa para convergir o campo de temperatura em cada passo de tempo.

Em segundo momento, após determinar o campo térmico na seção transversal dos elementos de aço expostos aos elevados gradientes térmicos por meio do emprego dos procedimentos numéricos de elementos finitos, define-se os limites de resistência plástica efetiva associado à rigidez axial ($P_{y\theta}$) e flexional ($M_{y\theta}$), conforme apresentado, respectivamente, na Eq. (8) e na Eq. (9). Em cada passo de tempo, as propriedades físicas e mecânicas são atualizadas em função da temperatura média em cada elemento finito triangular.

$$P_{y\theta} = \int_A f_{y,\theta} dA = \sum_{k=1}^N f_{y,\theta}^k A^k \quad (8)$$

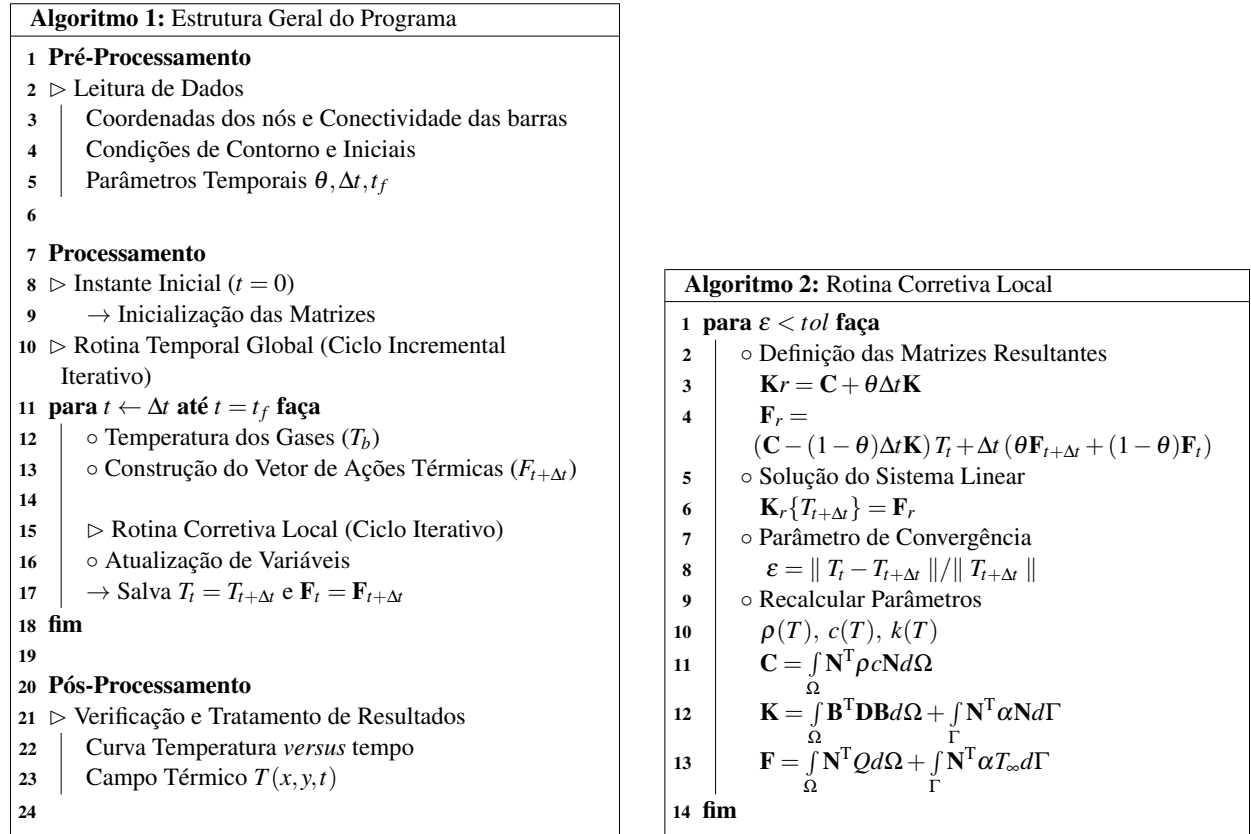


Figura 2. Lógica geral de programação dos procedimentos numéricos de elementos finitos para a solução do problema não linear de condução de calor bidimensional

$$M_{y\theta} = \int_A f_{y,\theta} |y| dA = \sum_{k=1}^N f_{y,\theta}^k |y^k| A^k \quad (9)$$

Onde $f_{y,\theta} = \kappa_{y,\theta} f_{y20}$ e $E_{\theta} = \kappa_{E,\theta} E_{20}$ são denominados como limite de resistência e módulo de elasticidade do aço em função da temperatura, descritos no texto do EN 1993-1-2 (2005). Além disso, em temperatura ambiente, defini-se $P_{y20} = f_{y20} A$ e $M_{y20} = f_{y20} Z$, onde Z é o módulo plástico e A é a área da seção transversal do perfil de aço.

3. EXEMPLO NUMÉRICO DE APLICAÇÃO

A experimentação numérica é direcionada pela análise de um perfil I de aço do tipo IPE 360 com 3 e 4 faces expostas ao fogo, seguindo a curva de aquecimento de incêndio-padrão ISO 834 (1999). As dimensões e a malha de elementos finitos utilizadas na simulação computacional são apresentadas na Fig. 3(a).

Inicialmente, realiza-se uma análise numérica na seção transversal para avaliar a temperatura do perfil até 30 min de exposição ao fogo. O programa computacional NASEN é utilizado para os testes numéricos (Neves, 2019). As Figs. 3(b)-(c) mostram as curvas temperatura-tempo para a condição térmica simétrica (4 faces expostas ao fogo) e assimétrica (3 faces expostas ao fogo). Para a configuração onde todas as faces estão expostas ao fogo, a temperatura na alma atinge maiores valores em comparação com as medidas nas mesas do perfil de aço, uma vez que esse elemento apresenta menor dimensão.

Todavia, para a condição térmica simétrica, 3 faces em contato com fogo, por causa da face superior do perfil está isolada termicamente, os valores de temperaturas na mesa superior do perfil diminuem. Mesmo para essa configuração, as temperaturas na alma do perfil apresentam os maiores valores. Para representar, qualitativamente, o comportamento térmico do problema, a Fig. 3(d) mostra a distribuição bidimensional de temperatura para 10, 20 e 30 min de exposição ao fogo, onde pode-se observar uma temperatura quase uniforme ao longo da seção devido aos altos valores de condutividade térmica do aço em situação de incêndio.

Após a avaliação do campo de temperatura do perfil, pode-se determinar a capacidade resistente do perfil IPE 360 sob altas temperaturas para cada configuração térmica estudada. Na Fig. 3(e), nota-se a redução da superfície plástica de resistência em função do tempo de exposição. Além disso, o perfil de aço com 4 faces expostas ao fogo apresenta ligeiramente uma maior redução, uma vez que essa condição atinge maiores valores de temperatura. A partir da curva de

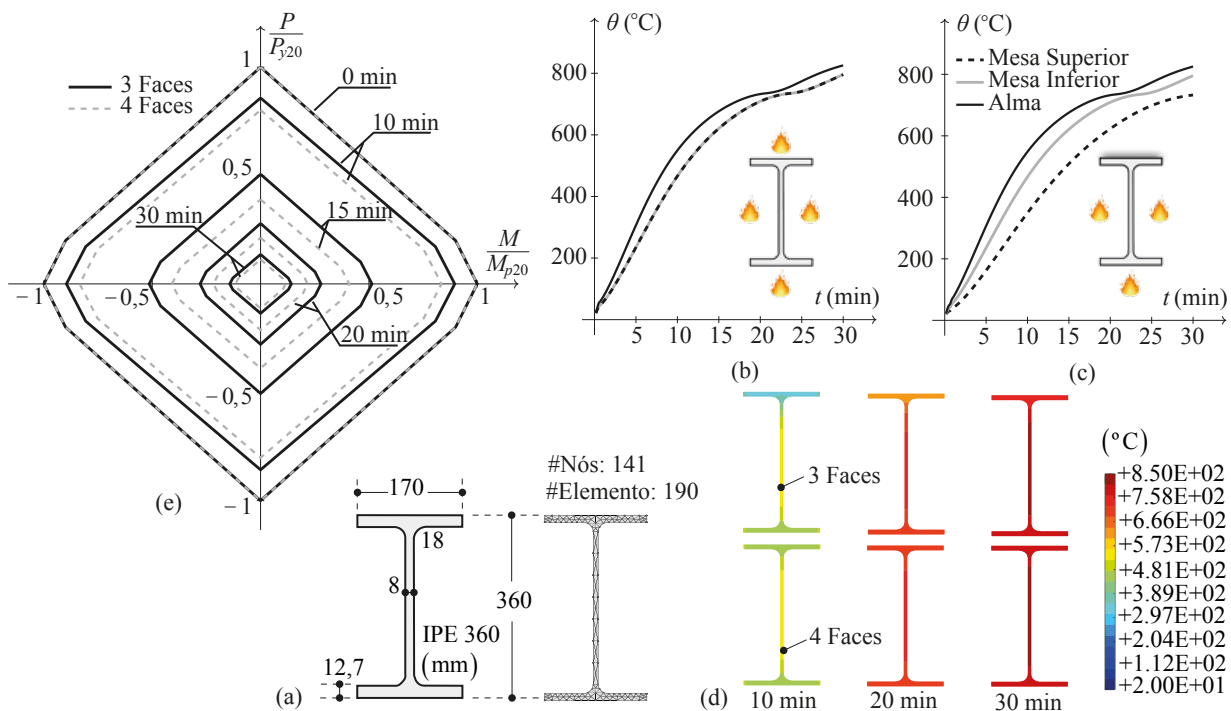


Figura 3. (a) Dimensões e malha numérica; Curva temperatura-tempo para (b) 4 faces e (c) 3 faces expostas ao fogo; (d) Campo térmico na seção transversal para 10, 20 e 30 min; (e) Curvas de interação do perfil em situação de incêndio para cada condição térmica

interação P-M, é possível estimar e verificar as regiões de segurança que atendem os requisitos mínimos de projeto dos elementos estruturais de aço. Caso os perfis de aço expostos ao fogo não atendam as exigências de segurança e resistência, deve-se reavaliar as dimensões e características dos elementos analisados, ou aplicar materiais de revestimento contra fogo, como argamassas projetadas, mantas, tintas intumescentes, placas de gesso, painéis de lã de rocha, dentre outros tipos de proteção térmica de estruturas, conforme prescrito na norma brasileira ABNT NBR 14323 (2013).

4. CONCLUSÃO

Esse artigo buscou realizar uma discussão acerca dos procedimentos de cálculo para estimar a capacidade resistente de um perfil I de aço em condição de incêndio, sendo que as análises e resultados foram baseadas em simulações computacionais. Após os testes e avaliações iniciais, os perfis de aço estudados apresentam uma elevada redução da sua capacidade resistente, requerendo aplicação de técnicas para proteção dos elementos estruturais de aço contra fogo, por exemplo, uso de revestimento, como a argamassa projetada, a fim minimizar as perdas contra a vida humana e o patrimônio. Além disso, em relação as configurações térmicas testadas, ressalta-se que a condição térmica simétrica apresenta significativos níveis de reduções dos limites plásticos e um aumento de temperatura excessivo, uma vez que todas as faces do perfil estão em contato com fogo.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14323, 2013. "Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio." Rio de Janeiro.
- Barros, R.C., 2016. *Avaliação numérica avançada do desempenho de estruturas de aço sob temperaturas elevadas*. Master's thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- Bergman, T.L., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. and Lavine, A.S., 2011. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Bhatti, M.A., 2005. "Fundamental finite element analysis and applications: with mathematica and matlab computations".
- EN 1993-1-2, 2005. "Eurocode 3: Design of steel structures: General rules - structural fire design." European Standards.
- ISO 834, 1999. "Fire resistance tests-elements of building construction." International Organization for Standardization.
- Landesmann, A., 2003. *Modelo não-linear inelástico para análise de estruturas metálicas apertadas em condições de incêndio*. Ph.D. thesis, COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Lemes, Í.J., Silva, A.R.D.d., Silveira, R.A.d.M. and Rocha, P.A.S., 2017. "Determinação da capacidade resistente de elementos estruturais mistos através do método da rótula plástica refinado". *Revista Internacional de Métodos Numéricos*

para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 33, No. 1-2, pp. 24–34.

MATLAB, 2015. *version 8.5.0 (R2015a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.

Neves, N.S., 2019. *Modelo computacional avançado para análise de estruturas sob ação de gradientes térmicos*. Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.

Neves, N.S., 2020. "Application of the finite element method for two-dimensional thermal analysis of steel-concrete composite structures in fire". In *Anais... 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, ABCM, Online.

Neves, N.S., Azevedo, M.S., Filho, C.B.B., Silva, V.P. and Pierin, I., 2020. "Estudo térmico de pilares mistos de aço e concreto de seção circular em situação de incêndio". *REA - Revista da Estrutura de Aço*, Vol. 9, No. 2, pp. 122–140.

Neves, N., Azevedo, M., Camargo, R. and Pinheiro, V., 2019. "Análise térmica bidimensional de perfil de aço sujeita a elevadas temperaturas". In *Anais... X Encontro Científico de Física Aplicada*, São Paulo: Blucher, Vitória, pp. 71–73.

Reddy, J.N., 1993. "An introduction to the finite element method". *New York*.

Rocha, P.A.S. and Silva, K., 2015. "Construction of the interaction curve of concrete-encased composite columns based on the deformation domains of reinforced concrete sections". *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Vol. 8, No. 4, pp. 447–466.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.