

Análise Térmica de Perfil I Variando as Condições de Exposição ao Fogo e Comparando Métodos de Análises

Lavínia L. M. Damasceno¹, Dalilah Pires¹, Rafael C. Barros², Ricardo A. M. Silveira²

¹*Dept. de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação, Automação, Telemática e Humanidades (DTECH), Universidade Federal de São João Del-Rei*

Campus Alto do Paraopeba Rod.: MG 443, KM 7, 36420-000 Ouro Branco, MG, Brasil

lavinaluisa@aluno.ufsj.edu.br, dalilah@ufsj.edu.br

²*Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PROPEC, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)*

Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto/MG, Brasil

rafael.barros@ufop.edu.br, ricardo@em.ufop.br

Resumo. Quando uma estrutura está sob incêndio, as características físicas e de rigidez são afetadas provocando perda da capacidade resistente do sistema estrutural. No contexto numérico, informações provenientes da análise térmica são fundamentais para se alcançar o comportamento termoestrutural. Sabe-se que existe uma série de variáveis que podem influenciar na análise térmica. Assim, no presente trabalho é realizada a análise térmica de um perfil I variando as condições de exposição ao fogo bem como a utilização de material de revestimento térmico comparando métodos de análises: avançado e simplificado. A metodologia da análise pelo método avançado é realizada em regime transiente, considerando fatores relevantes como os mecanismos de transferência de calor, além da variação das propriedades térmicas dos materiais em função da temperatura através do módulo computacional CS-ASA/FA. O método simplificado de obtenção da temperatura no elemento estrutural em aço é definido pela NBR 14323. Os resultados mostraram que a forma como o elemento estrutural é exposto ao fogo influencia na temperatura que o elemento pode atingir e a importância da utilização de material de proteção térmica na redução da temperatura dos elementos de aço. Além disso, mostraram a importância de se considerar as propriedades térmicas dos materiais variando com a temperatura.

Palavras-chave: análise térmica, incêndio, seção transversal, MEF

1 Introdução

A integridade de uma edificação em situação de incêndio envolve o conhecimento das consequências da elevação das temperaturas nos elementos estruturais, o qual vem sendo alcançado através do uso de modelos numéricos cada vez mais sofisticados que permitem um melhor entendimento do comportamento estrutural em situação de incêndio. Sabe-se, por exemplo, que a temperatura elevada nos incêndios provoca alterações nas características físicas e mecânicas dos materiais. Tanto no aço quanto no concreto, tais características se deterioram durante a exposição ao fogo e a capacidade resistente e a rigidez dos elementos estruturais se reduzem consideravelmente com o aumento da temperatura.

No contexto da análise térmica, o objetivo principal é determinar a variação de temperatura ou o campo de temperaturas nos elementos estruturais de interesse, a partir das condições de contorno provenientes do modelo de incêndio adotado. Nos problemas de estruturas em situação de incêndio, a análise térmica envolve, basicamente, duas partes: a determinação do calor transferido por convecção e radiação, decorrente do incêndio, no contorno do elemento de interesse; e, a determinação da transferência de calor por condução no interior dos elementos estruturais [1]. A verificação de elementos estruturais em situação de incêndio pode ser feita considerando métodos simplificados e métodos avançados de cálculo. Nos modelos simplificados de cálculo, a elevação de temperatura

é considerada de forma homogênea para toda a seção transversal e ao longo do comprimento do elemento estrutural de interesse, empregando-se simples equações analíticas para o caso de elementos em aço. Já nos modelos avançados de cálculo, aplicam-se métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos para obter o campo de temperaturas no elemento estrutural de forma mais realista ao longo do processo de aquecimento.

Uma estrutura de aço, submetida a 600°C, pode chegar a perder cerca de 50% da sua capacidade resistente relativa e atingir o colapso rapidamente [1]. Atualmente como alternativas de proteção passiva ao fogo, pode-se envolver os perfis metálicos em material de proteção térmica. Diante disso, a análise térmica pode ser realizada considerando elementos estruturais sem ou com revestimento térmico. Em elementos sem revestimento, estudos realizados com perfis sem proteção, nota-se que o aumento rápido de temperatura está relacionado ao elevado fator de massividade. Contudo, em elementos com proteção térmica, o fator de massividade não é o único a ser avaliado para o aumento da temperatura. Características como a espessura, condutividade térmica, densidade e calor específico do material de proteção térmica devem estar presentes nas equações para a construção das curvas de temperatura *versus* tempo [2].

Seguindo essa mesma linha, o presente trabalho tem como objetivo determinar a variação de temperatura de elementos estruturais com seções transversais em aço, através da análise térmica via Método dos Elementos Finitos (MEF) e via método simplificado. A metodologia via MEF é realizada em regime transiente, considerando fatores relevantes como os mecanismos de transferência de calor, além da variação das propriedades térmicas dos materiais em função da temperatura usando o módulo computacional CS-ASA/FA (*Computational System for Advanced Structural Analysis/Fire Analysis*; [3,4]) e o pré-processador GID [5] para a modelagem das seções transversais em aço empregadas na construção civil. A análise via método simplificado de obtenção da temperatura no elemento estrutural em aço é feita de acordo com as prescrições da NBR 14323 [6]. O intuito é comparar o comportamento das curvas temperatura *versus* tempo para os dois métodos. Além disso, sabe-se que existe uma série de variáveis que podem influenciar significativamente na análise térmica. Dessa forma, são realizados estudos paramétricos relacionados às condições de exposição ao fogo, bem como a utilização de material de revestimento térmico.

2 Análise térmica

Obter a temperatura no elemento estrutural depende da temperatura provocada pelo incêndio, ou seja, da temperatura dos gases presentes em determinada compartimentação. Representar o desenvolvimento de incêndios reais e, conseqüentemente, os efeitos provocados pelo aumento de temperaturas nas estruturas não é uma tarefa simples. A curva temperatura *versus* tempo de incêndio depende da geometria do compartimento incendiado, das características térmicas dos materiais de vedação, da quantidade e disposição do material combustível e do grau de ventilação do ambiente. Sendo assim, simplificada, as normas e regulamentos vigentes apresentam algumas maneiras de modelar a temperatura dos gases em um compartimento incendiado por meio de curvas de incêndios nominais e paramétricas.

As curvas nominais, prescritas na NBR 14323 [6], podem ser definidas por uma expressão simples e independem da dimensão ou tipo dos edifícios ou compartimento afetado. A curva de incêndio adotada no presente trabalho, incêndio-padrão da ISO 834-1 [7], para a análise térmica é dada pela Eq. (1).

$$T_{gases} = T_0 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (1)$$

em que T_{gases} é a temperatura dos gases em °C, T_0 é a temperatura ambiente inicial, geralmente adotada igual a 20 °C, e t é o tempo de exposição ao fogo em minutos.

2.1 CS-ASA/FA

No presente trabalho, o módulo computacional CS-ASA/FA [3,4] é usado para realizar a análise térmica em regime transiente nas seções transversais formadas por perfil I em aço. Tal módulo foi desenvolvido com base no MEF [8] e faz parte de um amplo sistema computacional denominado CS-ASA [9]. Dentro do CS-ASA, o CS-ASA/FA é capaz de realizar a análise térmica de seções transversais em regime permanente e transiente bem como, a análise termoestrutural de estruturas quando acoplado ao módulo CS-ASA/FSA (*Fire Structural Analysis*; [10,11]).

A simulação numérica da análise térmica consiste na resolução da equação diferencial de condução de calor para corpos sólidos [3,4] e é dividida em três etapas: pré-processamento, análise e pós-processamento. O pré-processamento, que é a etapa inicial da análise computacional, consiste na definição completa do modelo numérico a ser analisado. Nessa fase são definidas as características geométricas e físicas da seção transversal, a discretização em elementos finitos (número e tipos de elementos adotados), as condições de contorno e o carregamento térmico atuante. Após a geração da malha de elementos finitos para a seção transversal, inicia-se a análise numérica propriamente dita. Como resultados do processo de análise, o campo de temperaturas na seção é determinado e estudado. Numa análise térmica, temperaturas nodais em cada instante de tempo e a temperatura média na seção são determinadas e observadas graficamente através de programas de visualização (pós-processamento).

2.2 A temperatura do aço segundo a NBR 14323 [6]

Pelo modelo térmico simplificado apresentado na NBR 14323 [6], a elevação de temperatura em elementos estruturais de aço, submetidos a uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e situado no interior da edificação é dada pela Equação (2), considerando a não utilização e a utilização de revestimento contra fogo, respectivamente:

$$\text{a) } \Delta T_{\text{aço,t}} = k_{\text{sh}} \frac{(u/A)}{c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}}} \varphi \Delta t \quad \text{b) } \Delta T_{\text{aço,t}} = \frac{\lambda_m (u_m/A) (T_{\text{gases,t}} - T_{\text{aço,t}}) \Delta t}{t_m c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}} [1 + (\xi/4)]} - \frac{\Delta T_{\text{gases,t}}}{(4/\xi) + 1} \quad (2)$$

$$\text{Mas } \Delta T_{\text{aço,t}} \geq 0 \text{ se } \Delta T_{\text{gases,t}} > 0, \text{ e ainda com: } \xi = \frac{c_m \rho_m}{c_{\text{aço}} \rho_{\text{aço}}} t_m (u_m/A) \quad (3)$$

em que, na Eq. (2a), k_{sh} é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que pode ser tomado como igual a 1; $c_{\text{aço}}$ é o calor específico do aço; $\rho_{\text{aço}}$ é a massa específica do aço considerada independente da temperatura igual a 7850 kg/m³; Δt é o intervalo de tempo em segundos, não podendo ser tomado como maior que 5s; u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural, em metros (m); e A é a área bruta da seção transversal do elemento estrutural em aço, em m². A relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal (u/A), para barras prismáticas de comprimento L , define o fator de massividade. Verifica-se claramente que, para elementos estruturais com seção transversal de mesma área, o aumento de temperatura ocorrerá mais rapidamente para aquele que possuir maior superfície exposta ao incêndio. Ainda da Equação (2a), φ é o fluxo de calor por unidade de área, expresso em Watts por m² (W/m²). Na Equação (2b), λ_m , t_m , c_m e ρ_m são a condutividade térmica, a espessura, o calor específico e a massa específica do material de revestimento contra fogo, respectivamente; $T_{\text{aço,t}}$ é a temperatura do elemento estrutural em aço, no passo de tempo corrente; $\Delta T_{\text{gases,t}}$ é a variação de temperatura dos gases, no passo de tempo corrente; u_m é o perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo em m; a relação u_m/A define o fator de massividade do elemento estrutural protegido; Δt , neste caso, não pode ser adotado maior que 30 s. Assim, para ambos os casos tratados, a temperatura no elemento estrutural em aço, no instante de tempo corrente, é dada da seguinte forma:

$$T_{\text{aço,t}} = T_{\text{aço,t-\Delta t}} + \Delta T_{\text{aço,t}} \quad (4)$$

O procedimento apresentado para a determinação da elevação de temperatura nos elementos estruturais de aço, com e sem proteção térmica, é do tipo incremental simples para quaisquer curvas de incêndio.

3 Exemplos numéricos

Nesta seção são apresentados dois exemplos. No primeiro é mostrada a influência do efeito térmico considerando quatro condições de exposição ao fogo: 4, 3, 2 e 1 faces expostas. No segundo exemplo é apresentada uma comparação entre a análise térmica realizada no CS-ASA/FA [3,4] e realizada seguindo o método simplificado da NBR 14323 [6]. São avaliadas as situações de perfil com e sem proteção térmica. Para todas as análises foi adotado o perfil VS 500 x 97. A seção transversal foi discretizada em 56 elementos finitos quadriláteros lineares (Figura 1b).

3.1 Análise do efeito térmico para 4, 3, 2 e 1 faces expostas ao fogo

Os gráficos apresentados na Figura 1 trazem os resultados da temperatura média na seção transversal através do CS-ASA/FA [3,4] para quatro condições de exposição ao fogo (Figura 1a). Adicionalmente, um ponto na mesa superior do perfil é analisado, conforme destacado na Figura 1b.

Os resultados mostram que quanto maior o perímetro exposto ao fogo, maior a temperatura. Ou seja, a forma como o elemento estrutural é exposto ao fogo influencia na sua temperatura.

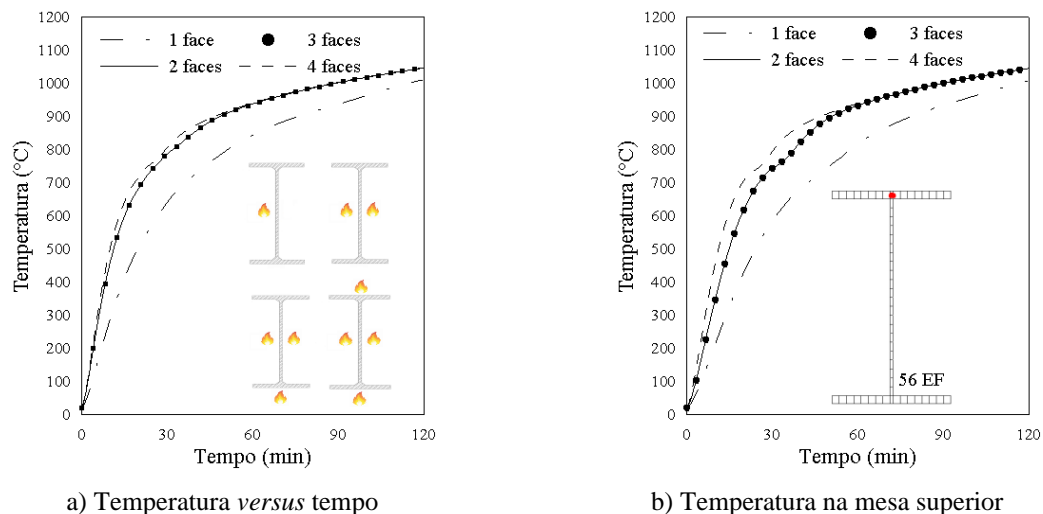


Figura 1. Análise térmica: 4, 3, 2 e 1 faces expostas ao fogo

3.2 Análise térmica: CS-ASA/FA [3,4] versus NBR 14323 [6]

Neste exemplo (Figura 2), o intuito é fazer uma comparação entre os métodos de análise: avançado e simplificado. Para isso, o perfil em aço é considerado com e sem proteção térmica.

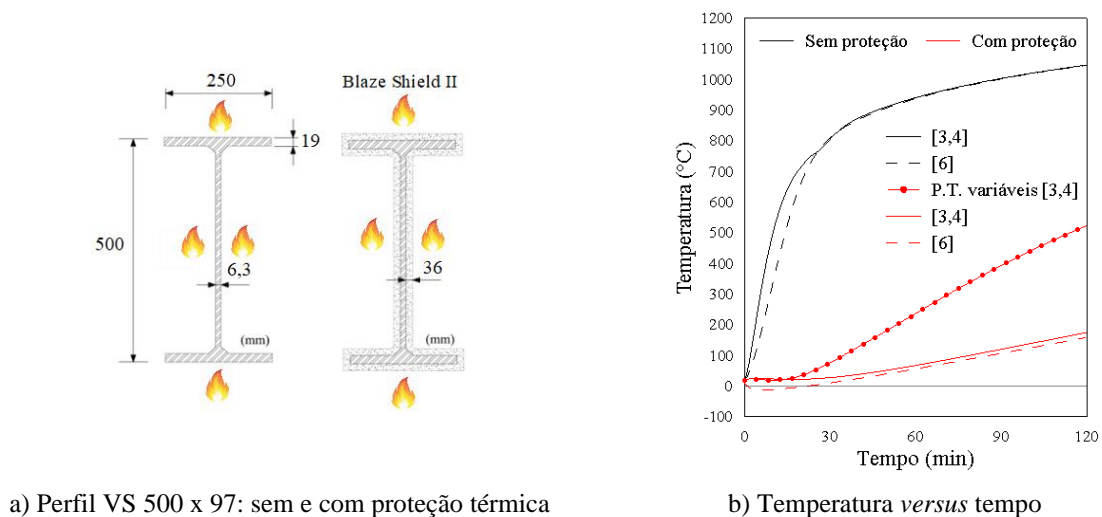


Figura 2. Análise térmica: CS-ASA/FA [3,4] versus NBR 14323 [6]

A proteção térmica adotada é do tipo contorno composta por argamassa projetada (Figura 2a), Blaze Shield II, com propriedades térmicas: densidade igual a 240 kg/m^3 , calor específico igual a $2093 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ e condutividade térmica igual a $0,043 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. É possível observar pelo gráfico da Figura 2b, que as curvas obtidas tanto pelo método avançado quanto pelo método simplificado apresentam o comportamento semelhante considerando as duas situações, sem e com proteção térmica. Observa-se a grande diferença de temperaturas entre as curvas sem e com

proteção térmica. Além disso, nota-se que nos primeiros 30 min de aquecimento, a curva obtida pelo CS-ASA/FA [3,4] apresentou valores maiores para a temperatura média na seção transversal. Isso pode ser justificado pelo fato de que as propriedades térmicas do aço são consideradas variando com a temperatura no método avançado, o que não ocorre no método simplificado. Adicionalmente, foi mostrada a curva da análise térmica considerando a variação das propriedades térmicas (P.T.) do material de revestimento em função da temperatura. Percebe-se uma diferença significativa na elevação da temperatura quando comparada às temperaturas atingidas pelas análises com as propriedades térmicas do revestimento permanecendo constantes. Por fim, é importante salientar uma vantagem da análise através do modelo avançado que é a possibilidade de se determinar a temperatura em um ponto qualquer da seção transversal.

4 Conclusão

No desenvolvimento do presente trabalho realizou-se a análise térmica de um perfil I variando condições de exposição ao fogo e comparando métodos de análises. Através do programa CSA-ASA/FA [3,4] definiu-se o campo de temperaturas do perfil sem e com proteção térmica pelo MEF (método avançado). Pelo método simplificado da NBR 14323 [6] foi possível obter a temperatura no perfil em aço também considerando uma proteção térmica tipo contorno e o perfil desprotegido. Diante dos resultados alcançados, pode-se concluir primeiramente que a forma como o elemento estrutural é exposto ao fogo influencia na temperatura que o elemento pode atingir. Como esperado, quanto maior o perímetro exposto ao incêndio, maior a temperatura. Outra conclusão importante é que a utilização de proteção térmica em perfis em aço é eficaz e importante pois reduz, de forma considerável, a temperatura dos elementos estruturais. Além disso, conclui-se também a importância de se considerar as propriedades térmicas dos materiais variando com a temperatura. Essa é uma conclusão importante pois reforça a atenção que se deve ter na análise em situação de incêndio pois os materiais apresentam profundas alterações em suas propriedades quando sujeitos às altas temperaturas, o que reflete na temperatura dos elementos estruturais e, conseqüentemente, na capacidade resistente.

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

Referências

- [1] Maximiano, D. P. “Análise numérica avançada de estruturas de aço e de concreto armado em situação de incêndio”, *Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*, 197f., Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2018.
- [2] Martins, M. “Dimensionamento de estruturas de aço em Situação de Incêndio” – *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Agosto, 2000.
- [3] Pires, D., Barros, R.C., Lemes, I.J.M., Silveira, R.A.M., Rocha, P.A.S., “Análise térmica de seções transversais via método dos elementos finitos”. *XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [4] Pires, D., Barros, R.C., Silveira, R.A.M., Rocha, P.A.S., “Behavior of steel-concrete composite cross sections exposed to fire”. *Revista Escola de Minas*, vol. 71(2), pp. 149-157, 2018.
- [5] CIMNE, Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia “GID Pré/pos Processador Gráfico – Versão 7.2”, Barcelona, 2004.
- [6] NBR 14323, “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, 2013.
- [7] ISO 834-1. “Fire resistance tests – Elements of buildings construction, Part 1: General requirements”. *ISO – International Organization for Standardization*, Geneva, 1999.
- [8] Cook, R., Malkus, D., Plesha, M., “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”. *New York: John Willey & Sons*, 3rd ed., 1989.
- [9] Silva, A.R.D., “Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas”. *Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP*, 2009.
- [10] Pires, D., Barros, R.C., Silveira, R.A.M., Lemes, I.J.M., Rocha, P.A.S., “An efficient inelastic approach using SCM/RPHM coupling to study reinforced concrete beams, columns and frames under fire conditions”. *Engineering Structures*, vol. 219, pp. 1-25, 2020.
- [11] Barros, R.C., “Avaliação numérica do comportamento não linear e resistência de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio”. *Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP*, 2021.