VETOR

Efeito da proteção térmica na elevação da temperatura de elementos estruturais de aço em situação de incêndio

Effect of thermal protection on the temperature rise of steel structural elements under fire conditions

José Francisco Almeida de Souza[1], Márcio Wrague Moura[1,†], André Tremper Minasi[2], Carla Silva da Silva[1], Carolina Correa da Silva[1]

[1]*Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil*
[2]*Departamento de Tecnologia da Construção, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil*
[†]**Autor correspondente:** mwmoura@gmail.com

Resumo

O projeto de edifícios com vários pavimentos com estruturas de aço não é um procedimento usual no Brasil. Credita-se este fato, em parte, à preocupação dos projetistas com o comportamento destas estruturas, quando em situação de incêndio. Neste artigo são realizados alguns experimentos numéricos, em ambiente MATLAB, com o objetivo de avaliar a eficiência do uso de materiais de proteção térmica sobre o aquecimento de perfis de aço. É feita a comparação entre a resistência ao fogo de um perfil de aço com e sem proteção. Compara-se também o uso de diferentes materiais de proteção (argamassas) e o efeito da espessura da proteção no aumento do tempo de resistência ao fogo. Nos experimentos numéricos realizados, a aplicação da proteção térmica nos perfis de aço prolongou o tempo para atingir a temperatura crítica de 11,8 minutos (sem proteção) para valores entre 50 e 127 minutos, variando este tempo conforme o material e a espessura da proteção utilizada.

Palavras-chave

Estruturas de aço • Proteção térmica • Experimento numérico

Abstract

The design of tall buildings with steel structures is not a usual procedure in Brazil. This fact is partly credited to the designers' concern with the behavior of these structures under fire conditions. In this article, some numerical simulations are performed, on the MATLAB platform, with the objective of evaluating the efficiency using of thermal protection material on the heating of steel profiles. A comparison is made between the fire resistance of a steel profile with and without protection. The use of different protection materials (mortars) and the effect of the protection thickness on increasing the fire resistance time are also compared. In the numerical experiments carried out, the application of thermal protection to steel profiles prolonged the time to reach the critical temperature from 11.8 minutes (without protection) to values between 50 and 127 minutes, this time varying depending on the material and thickness of the protection used.

Keywords

Steel structures • Thermal protection • Numerical analysis

1 Introdução

O emprego de estruturas metálicas no projeto de edifícios altos (residenciais, comerciais, etc.), há décadas, é bastante difundido em países como Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido [1]. No Brasil, o emprego de estruturas metálicas em edifícios altos não é muito difundido. Estes autores destacam a escassez de mão de obra qualificada, tanto na fábrica (produção das peças), quanto no canteiro de obras (montagem), como fator relevante para o baixo emprego de estruturas de aço no projeto de edifícios no Brasil. Mesmo assim, a indústria de estruturas de aço vem crescendo consideravelmente nos últimos anos [1, 2]. O faturamento bruto estimado das empresas fabricantes de estruturas de aço, em 2020, cresceu 49,3 % em relação a 2019, e mais do que dobrou em relação a 2018, revelando um interesse crescente por estas estruturas, conforme revela Quintão [3]. As vantagens do uso de estruturas de aço no projeto de edifícios altos (com vários pavimentos) são notáveis, entre elas: a execução mais rápida quando comparada com estruturas de concreto, estrutura mais leve impondo menores cargas às fundações, racionalização no uso dos materiais com redução de custos, baixa relação peso/resistência o que permite vencer grandes vãos, entre muitas outras.

Entretanto, apesar das inúmeras vantagens das estruturas de aço, algumas mencionadas acima, seu emprego no projeto de edifícios altos ainda encontra muita relutância entre os projetistas. Acontece que, apesar da grande capacidade resistente do aço, quando submetido as elevadas temperaturas que se desenvolvem nos ambientes em situação de incêndio, perdem significativamente esta capacidade devido a degradação de suas propriedades mecânicas [2], especialmente a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade [4] como mostra a Fig. 1.

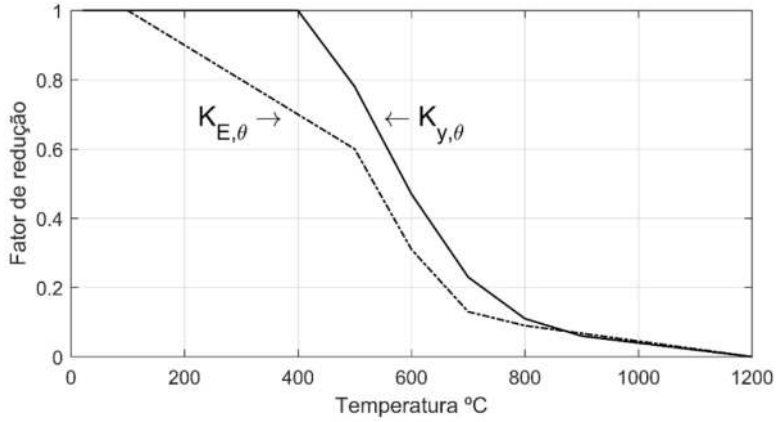

Figura 1: Curvas características dos fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade em função da temperatura.

A relação entre a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço em uma temperatura elevada θ_a, e os respectivos valores a 20 °C, $K_{y,\theta}$, e $K_{E,\theta}$, são dados por [5]:

$$K_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}, \tag{1}$$

$$K_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E}, \tag{2}$$

onde:

$f_{y,\theta}$: Limite de escoamento do aço a quente na temperatura θ_a;
f_y: Limite de escoamento do aço a temperatura de 20 °C;
E_θ: Módulo de elasticidade do aço a temperatura θ_a;
E: Módulo de elasticidade do aço a temperatura de 20 °C;

Pode ser observado na Fig. 1, que quando a temperatura do aço se eleva, a resistência ao escoamento permanece inalterada até 400 °C, diminuindo rapidamente a partir deste ponto. Em relação ao módulo de elasticidade acontece algo semelhante, porém sua redução começa a partir de 100 °C. Outras propriedades do aço estrutural, como o calor específico e a condutividade térmica, também variam em temperaturas elevadas. A Fig. 1 mostra que, a aproximadamente 550 °C, a resistência ao escoamento vale cerca de 60 % de seu valor a 20 °C, deixando evidente a forte degradação das propriedades do aço em temperaturas elevadas. É usual considerar $\theta_{cr} = 550$ °C como o valor crítico da temperatura do aço. Em relação a isso, a Instrução Técnica Nº 08 de 2011 do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo recomenda que a temperatura crítica do aço seja tomada como valor máximo de 550 °C.

De acordo com a NBR 14.323:2013 [6], o dimensionamento de uma estrutura de aço em situação de incêndio deve ser feito por meio de resultados de ensaios ou por meio de métodos analíticos. O dimensionamento por métodos analíticos, por sua vez, deve levar em consideração que estas propriedades do aço variam em temperaturas elevadas, da forma discutida acima, debilitando a capacidade resistente do aço, podendo levar a estrutura, ou elemento estrutural, ao colapso por incapacidade de resistir as ações aplicadas. Ainda de acordo com a norma, o método analítico pode ser abordado de forma simplificada ou de forma avançada. Ambas as formas de abordagem são descritas nesta norma. Neste artigo será abordada a metodologia simplificada.

Em resumo, deve ser lembrado que, por ocasião de um incêndio em um edifício com estrutura de aço, as altas temperaturas provocam a redução do valor da resistência mecânica, como discutido acima, além de induzir o surgimento de esforços solicitantes adicionais devidos a dilatação térmica dos elementos estruturais. A segurança estrutural em situação de incêndio, precisa ser verificada para evitar que a estrutura entre em colapso antes da desocupação da edificação [7]. De acordo com estes autores, a temperatura que provoca o colapso de um elemento estrutural é chamada temperatura crítica e pode ser determinada em função do nível de carregamento e das dimensões do elemento. De modo geral, quanto maior o carregamento, menor o valor da temperatura crítica. A segurança estrutural, em situação de incêndio, estará garantida se a temperatura no elemento estrutural ficar abaixo da temperatura crítica conforme Silva et al. [7]. A temperatura no elemento, por sua vez, pode ser determinada em função das características do incêndio (severidade, carga de incêndio, ventilação, etc.).

Considerando-se as características do incêndio, é possível determinar, matematicamente, uma curva Temperatura × Tempo, representativa do aquecimento dos gases do ambiente em chamas. Por se tratar de um modelo matemático, ele não representa exatamente um incêndio real, mas preserva algumas características do incêndio real, tal como a presença de um ramo ascendente e outro descendente, este representativo da fase de resfriamento. Esta curva é denominada incêndio natural [7].

De acordo com Silva et al. [7] é prática comum em normas nacionais e internacionais, a adoção de uma curva Temperatura × Tempo simplificada, denominada curva de incêndio padrão. Trata-se de uma curva que não depende das características do ambiente e por isso, não reflete um incêndio real. Ela possui apenas o ramo ascendente, significando que simula apenas a fase de aquecimento do incêndio. Esta curva é conhecida como curva ISO 834 e sua expressão é dada pela Eq. (3):

$$\theta_g = \theta_{go} + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1). \tag{3}$$

Na expressão anterior, t é o tempo em minutos decorrido desde o início do incêndio, θ_g é a temperatura dos gases do ambiente no instante t e θ_{go} representa a temperatura dos gases do ambiente no instante inicial (20 °C).

Uma resenha histórica da evolução das curvas de incêndio padronizadas é trazida por Costa e Silva [8] e chamam a atenção para a necessidade da adoção de uma curva padronizada, que permita comparação entre os resultados dos ensaios realizados em qualquer parte do mundo. Observe que a temperatura gerada pela curva padrão (ISO 834) cresce de forma indefinida, visto que esta curva só tem ramo ascendente. De acordo com Silva et al. [7], isso cria um problema em relação ao projeto das estruturas, o qual pode ser resolvido estabelecendo-se um tempo, ao fim do qual, a curva de incêndio é interrompida. Este tempo recebe a denominação de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

Deve ser observado que a temperatura no aço do elemento estrutural (T_a) é menor que a temperatura dos gases quentes do ambiente em chamas (T_g). A temperatura no elemento de aço pode ser determinada em função do tempo de exposição ao incêndio padrão, através de ensaios em fornos de laboratórios ou através de procedimentos analíticos, simplificados ou avançados, como discutido anteriormente. De acordo com a NBR 14.323:2013 [6], quando a segurança for verificada para cada um dos esforços solicitantes, isoladamente, a condição de segurança pode ser expressa por:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d}, \tag{4}$$

onde $S_{fi,d}$ é esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio, e $R_{fi,d}$ é capacidade resistente de cálculo do elemento estrutural, para o estado limite último em consideração, em situação de incêndio.

Observa-se que o colapso estrutural acontece quando a Eq. (4) deixa de ser verificada, fato que pode ser provocado pela redução da capacidade resistente do elemento quando submetido a uma situação de incêndio. De acordo com [9] é usual que as normas, nacionais e internacionais, ao invés de exigirem segurança a uma determinada temperatura, exigirem segurança por determinado período de tempo, associado com a curva padrão. Esse é o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), o qual é fixado pela NBR 14.432:2013 [10] em 30, 60, 90, 120, 150 ou 180 minutos, dependendo da severidade do incêndio e das características da edificação, tais como o tipo de ocupação, área de pavimento, altura, etc. Quando o risco de incêndio aumenta, seja pelo tipo de ocupação, seja pela maior altura ou pela existência de subsolo, o tempo requerido de resistência ao fogo aumenta, tornando a exigência mais rigorosa. Para uma estrutura de aço, que tenha sido adequadamente dimensionada à temperatura ambiente e não verifique os requisitos de resistência ao fogo em situação de incêndio, uma solução seria aumentar as dimensões da seção, especialmente a altura do perfil. Entretanto, como tal solução não é econômica, a alternativa mais utilizada é a

proteção térmica dos elementos estruturais com algum material que seja bom isolante térmico, mais barato do que o aço e que não sofra degradação com as elevadas temperaturas [9, 11].

Dentro deste contexto, e com o auxílio do software MATLAB, foi utilizado o método analítico simplificado, proposto na NBR 14.323:2013 [6], com o propósito de determinar a evolução da temperatura em perfis de aço em situação de incêndio e verificar se, com a proteção térmica adequada, as estruturas de aço podem ser consideradas no projeto de edifícios com vários pavimentos.

2 Materiais e métodos

Nesta etapa será discutida como ocorre a elevação da temperatura de perfis metálicos em situação de incêndio.

2.1 Aquecimento de um perfil de aço sem proteção térmica

Considere um perfil de aço, em meio a um incêndio generalizado, completamente imerso nos gases quentes do ambiente. Nesta condição o elemento estrutural receberá calor de duas maneiras: por radiação (Q_r) e por convecção (Q_c). O calor absorvido então pelo aço (Q_{abs}) provocará a elevação de sua temperatura.

Na sequência procura-se desenvolver um modelo para determinar a elevação da temperatura em um perfil de aço sujeito a um incêndio. O modelo se baseia nas seguintes hipóteses simplificadoras [12]:

a) Dentro do aço a propagação do calor é instantânea. Isso significa que a temperatura se distribui de modo uniforme no volume do elemento estrutural e;

b) O elemento estrutural fica totalmente imerso nos gases quentes do ambiente em chamas recebendo calor por todos os lados, sem irradiar calor para o ambiente.

O gradiente de temperatura entre o foco do incêndio e o elemento estrutural gera um fluxo de calor das maiores para as menores temperaturas, isto é, do foco do incêndio para o elemento estrutural, por radiação (irradiação) e por convecção dos gases aquecidos do ambiente.

A determinação da temperatura do elemento estrutural será feita considerando-se o equilíbrio térmico que envolve o fluxo de calor emitido pelo foco de incêndio, por radiação e convecção, e o fluxo de calor absorvido pelo elemento [12]:

$$\frac{dQ_a}{dt} = \frac{dQ_r}{dt} + \frac{dQ_c}{dt}. \tag{5}$$

Na Eq. (5), no lado esquerdo, dQ_a/dt representa o fluxo de calor absorvido pelo material do elemento estrutural, enquanto no lado direito, as parcelas representam, respectivamente, o fluxo radiante e convectivo de calor. Se os corpos se encontram em temperatura ambiente, ou abaixo dela, a troca de calor por radiação térmica é geralmente, desprezível [13]. Todavia, a 500 °C, ou mais, este é, frequentemente, o principal mecanismo de transporte de calor. De acordo com estes autores, a menos que a radiação aconteça no vácuo, ela geralmente, é acompanhada por transporte de calor por convecção, devendo cada uma destas formas receber o tratamento adequado.

Convecção:

A avaliação do transporte de calor em um ambiente em situação de incêndio é muito complicada, como complicada é esta avaliação em qualquer escoamento turbulento [13]. Em caso de incêndio, não é difícil imaginar a intensidade da turbulência dos gases do ambiente que ficam em contato com as chamas e, por consequência, a dificuldade em tentar quantificar o transporte de calor por convecção. Para contornar esta dificuldade é prática comum em engenharia escrever a velocidade de transporte de calor em termos de um coeficiente h_c, chamado coeficiente de transporte por convecção [13]. Desta forma, se θ_1 e θ_2 representam as temperaturas da superfície quente e a temperatura do meio fluido a uma certa distância da superfície ($\theta_1 > \theta_2$) ,respectivamente, então:

$$\frac{dQ_c}{dt} = h_c \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2). \tag{6}$$

Na expressão, dQ_c/dt representa o fluxo de calor em W e h_c é o coeficiente de transporte de calor por convecção ($W/m^2\,°C$). O valor do coeficiente h_c depende do tipo de fluido (ar, água, óleo, etc.), da sua velocidade (convecção natural ou forçada), da temperatura e geometria do sólido. Para o fluxo convectivo de calor, emanado por focos de incêndio, tem sido utilizado o valor $h_c = 25W/m^2\,°C$ que, de acordo com [14], é um valor adequado à situação de ar superaquecido e convecção natural.

Radiação:

É uma forma de transmissão de calor na qual a energia térmica se propaga de um corpo em temperatura mais alta para outro em temperatura mais baixa, através de ondas eletromagnéticas. O transporte de calor por radiação é

determinado pela equação de Stefan-Boltzmann com o uso de coeficientes apropriados. Esta equação, para o fluxo de calor emitido por um irradiador ideal (corpo negro), assume a forma [13],

$$\frac{dQ_r}{dt} = \sigma \cdot A \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right). \tag{7}$$

Na Eq. (7), a relação dQ_r/dt representa o fluxo de calor por radiação em W, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), A é a área do corpo irradiador ideal e, T_1 e T_2 são as temperaturas em Kelvin do irradiador e do receptor, respectivamente. Observe que $T = \theta + 273$, onde θ é a temperatura em graus Celsius. Com isso, a expressão também pode ser escrita na forma,

$$\frac{dQ_r}{dt} = \sigma \cdot A \cdot \left[(\theta_1 + 273)^4 - (\theta_2 + 273)^4\right]. \tag{8}$$

Destaca-se que uma situação de incêndio envolve corpos reais, emissor e receptor, bastante diferentes do corpo negro e, por isso, o calor irradiado representa apenas uma parcela do calor irradiado pelo corpo negro (ideal). Nesse caso, deve ser introduzido um coeficiente na relação acima que leve em consideração este fato. Assim, se o poder de emissão da superfície real é expresso como uma fração ε da emissividade do corpo negro, então a expressão para o fluxo de calor por irradiação apresenta-se como,

$$\frac{dQ_r}{dt} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right). \tag{9}$$

De acordo com [7] os valores de ε para a situação que envolve as chamas, os gases da combustão e a superfície de aço exposta às chamas, variam entre $0,30$ e $0,70$. A NBR 14.323:2013 [6] recomenda o valor $\varepsilon = 0,70$. Lembrando que o fluxo total de calor é a soma das contribuições dos dois mecanismos, radiação e convecção, de acordo com [13] a Eq. (9) deve ser escrita de forma similar à Eq. (6), introduzindo um coeficiente hipotético da transporte por radiação h_r, análogo ao coeficiente convectivo, usando o artifício matemático de multiplicar e dividir a Eq. (9) por $(\theta_1 - \theta_2)$. Com isso, tem-se:

$$\frac{dQ_r}{dt} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \frac{[T_1^4 - T_2^4]}{(\theta_1 - \theta_2)} \cdot (\theta_1 - \theta_2), \tag{10}$$

ou

$$\frac{dQ_r}{dt} = h_r \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2), \tag{11}$$

onde

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{[T_1^4 - T_2^4]}{(\theta_1 - \theta_2)}. \tag{12}$$

Na Eq. (12), h_r é o coeficiente de transporte por radiação ($W/m^2 \cdot^\circ C$) e seu valor depende da temperatura.

Calor absorvido:

O calor emanado pelo foco de incêndio (por radiação e convecção) durante um intervalo de tempo Δt é absorvido pelo elemento estrutural e provoca a elevação da temperatura do material. A relação entre o calor absorvido e a elevação da temperatura do aço é dada na Eq. (13),

$$Q_{abs} = m \cdot c_a \cdot \Delta\theta_a, \tag{13}$$

onde Q_{abs} é a quantidade de calor absorvida (J), m é a massa do elemento estrutural (kg), c_a é o calor específico do aço ($J/kg°C$) e $\Delta\theta_a$ representa a elevação na temperatura do aço ($°C$). A integração da Eq. (5) fornece a relação aproximada

$$Q_{abs} = \left(\frac{dQ_r}{dt} + \frac{dQ_c}{dt}\right) \cdot \Delta t \tag{14}$$

Substituindo a Eq. (6), Eq. (11) e a Eq. (13) na Eq. (14) vem,

$$m \cdot c_a \cdot \Delta\theta_{a,t} = [h_r \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2) + h_c \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2)] \cdot \Delta t. \tag{15}$$

Lembrando que o corpo quente (que emana calor) é representado pelos gases quentes do ambiente, enquanto o corpo frio (que recebe calor) é representado pela estrutura de aço, pode-se adaptar as variáveis na Eq. (15) para um ambiente em situação de incêndio, escrevendo

$$m \cdot c_a \cdot \Delta\theta_{a,t} = \left[h_r \cdot A \cdot \left(\theta_g - \theta_a\right) + h_c \cdot A \cdot \left(\theta_g - \theta_a\right)\right] \cdot \Delta t, \tag{16}$$

onde, agora, θ_g representa a temperatura em Celsius dos gases do ambiente em chamas e θ_a, a temperatura em Celsius da estrutura de aço. A massa de aço no lado esquerdo da Eq. (16) pode ser escrita como $m = \rho_a \cdot V$, onde ρ_a é a massa específica do aço e V é o volume do elemento estrutural. Assim,

$$\rho_a \cdot V \cdot c_a \cdot \Delta\theta_a = \left[h_r \cdot A \cdot \left(\theta_g - \theta_a\right) + h_c \cdot A \cdot \left(\theta_g - \theta_a\right)\right] \cdot \Delta t. \tag{17}$$

Na Eq. (17), as variáveis A (área da superfície lateral) e V (volume) são relacionadas com a forma do perfil de aço. A relação $F = A/V$, que também pode ser escrita como $F = u/S$ (u representa o perímetro e S a área da seção transversal do perfil, denomina-se "massividade", "fator de massividade" ou "fator de forma" do perfil. É um parâmetro relacionado com a área lateral exposta ao fogo. Quanto maior a massividade, maior a área de exposição para um mesmo volume de aço e, mais rápido será o aquecimento. Por norma, o valor mínimo do fator de massividade deve ser tomado maior ou igual a 10 m^{-1}, e o passo de tempo, Δt, não pode ser maior do que 5 segundos. A NBR 14.323:2013 [6], apresenta tabelas com o Fator de massividade para alguns tipos de perfis sem proteção e com proteção.

A manipulação matemática da Eq. (17) fornece:

$$\Delta\theta_a = \frac{F}{\rho_a \cdot c_a}\left(\theta_g - \theta_a\right)\left[h_r + h_c\right] \cdot \Delta t. \tag{18}$$

A Eq. (18) permite determinar a variação de temperatura em um elemento de aço, após um tempo Δt de exposição ao fogo. O valor de θ_g, a temperatura dos gases quentes do ambiente, é dado pela curva do incêndio Padrão (ver Eq. (3)). Deve ser observado que o modelo representado pela Eq. (18), ou Eq. (19), só é válido se a distribuição de temperatura na seção transversal do perfil for uniforme, como acontece, com muito boa aproximação, em um corpo de aço. Para Perfis I ou H, a NBR 14.323:2013 [6] introduz, na Eq. (18), o chamado fator de sombreamento k_{sh}, o qual não será discutido aqui. Para uma discussão detalhada sobre este fator, consultar a Ref. [5]. Assim, a Eq. (18) assume a forma:

$$\Delta\theta_a = k_{sh} \cdot \frac{F}{\rho_a \cdot c_a}\left(\theta_g - \theta_a\right) \cdot \left(h_r + h_c\right) \cdot \Delta t \tag{19}$$

A discretização da Eq. (19), com um esquema progressivo no tempo, fornece:

$$\theta_a^{t+\Delta t} - \theta_a^t = k_{sh} \cdot \frac{F}{\rho_a \cdot c_a}\left(\theta_g^t - \theta_a^t\right) \cdot \left(h_r + h_c\right) \cdot \Delta t, \tag{20}$$

onde $\theta_a^{t+\Delta t}$ e θ_a^t representam a temperatura do aço nos instantes posterior e atual, respectivamente, enquanto θ_g^t representa a temperatura dos gases quentes no instante atual. A NBR 14.323:2013 [6] recomenda que o passo de tempo seja menor ou igual a 5 segundos. As demais variáveis da Eq. (20), já foram definidas.

2.2 Aquecimento de um perfil de aço com proteção térmica

Uma estrutura de aço, em situação de incêndio, tem sua segurança garantida até o momento em que a temperatura de seus elementos alcance a chamada temperatura crítica (θ_{cr}), quando então a estrutura entra em colapso. A Fig. 1 deixa evidente que quando a temperatura dos elementos estruturais aumenta, as propriedades do aço, tais como a resistência ao escoamento e o modulo de elasticidade, se reduzem levando situação de perigo à estrutura. Como mostra a Fig. 1, a 550 °C o aço possui apenas 60 % da capacidade resistente que tinha à temperatura de 20 °C (ambiente), sendo essa a temperatura considerada crítica para estruturas de aço ($\theta_{cr} = 550\ ^\circ C$).

A solução mais utilizada para evitar o aquecimento excessivo das estruturas de aço em situação de incêndio é revesti-las com um material de proteção térmica. Esta proteção tem a finalidade de retardar o processo de aquecimento do elemento de aço, permitindo um maior tempo de exposição ao fogo, sem que seja atingida a temperatura crítica.

Em geral, os materiais de proteção térmica devem apresentar as seguintes características: baixa massa específica, baixa condutividade térmica, calor específico elevado, resistência mecânica quando sujeitos a impactos e custo compatível [7]. Os revestimentos podem ser do tipo caixa ou do tipo contorno.

De acordo com [5], para a proteção de perfis metálicos, são utilizados materiais e procedimentos especialmente desenvolvidos para esta finalidade, entre eles, a proteção com argamassa projetada contendo fibras minerais, argamassa projetada cimentícia, argamassa projetada de vermiculita, etc., a proteção com concreto, placas de concreto leve, com placas rígidas de gesso acartonado, placas de lã de rocha, etc. e as tintas intumescentes.

Os materiais mais empregados para a proteção de estruturas metálicas contra incêndios são as argamassas projetadas e as tintas intumescentes [15]. Destaca-se que os procedimentos descritos nesse artigo se aplicam à proteção

por argamassas projetadas e placas rígidas, mas não se aplicam às tintas intumescentes, as quais tem seu volume aumentado em situação de incêndio.

A maneira pela qual os materiais de revestimento atuam na proteção contra o fogo está diretamente relacionada com a resistência ao fluxo de calor por condução no interior do material isolante. Esta resistência gera um gradiente de temperatura através da espessura (t_p) do material de proteção, de modo que a sua face externa, em contato com os gases do ambiente, fica na temperatura θ_g, enquanto sua face interna, em contato com o perfil de aço, fica na temperatura θ_a, onde $\theta_g > \theta_a$.

No interior do material de proteção a temperatura é função, não apenas do tempo, como da posição, $\theta(x,t)$. Isso garante que a temperatura do aço seja sempre inferior a temperatura dos gases do ambiente. A Fig. 2 representa o modelo unidimensional de transferência de calor entre os gases do ambiente e um elemento de aço, protegido por uma camada de material isolante com espessura (t_p). De acordo com este modelo, agora é a face externa do isolante que é aquecida por radiação e convecção.

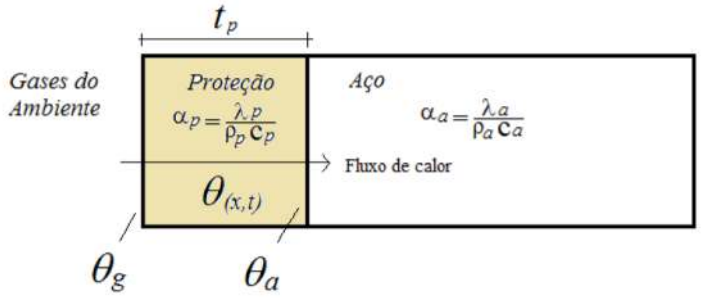

Figura 2: Modelo unidimensional de transferência de calor por condução através do material de proteção térmica de espessura t_p.

O elemento de aço é aquecido pelo calor que chega à face interna do isolante, por condução. O fluxo de calor através do material de proteção é regido por uma equação diferencial parcial de segunda ordem, expressa por,

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = \alpha_p \cdot \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2}. \tag{21}$$

Na Eq. (21), $\theta(x,t)$ representa a distribuição da temperatura no material de proteção, t é o tempo e x a distância à face externa da proteção. O coeficiente α_p representa a difusividade térmica do material de proteção e é dada por:

$$\alpha_p = \frac{\lambda_p}{\rho_p \cdot c_p}. \tag{22}$$

Na Eq. (22), λ_p, ρ_p e c_p representam a condutividade térmica, a massa específica e o calor específico do material de proteção, respectivamente. O modelo com proteção térmica é, obviamente, mais complexo do que aquele sem proteção, desenvolvido na Seção 2.1, e a solução da Eq. (21) foge aos objetivos deste artigo.

Algumas soluções para a Eq. (21) são sugeridas na literatura, mas será apresentada aqui a solução proposta na NBR 14.323:2013 [6], a qual tem a forma:

$$\Delta\theta_{\alpha,t} = \frac{\lambda_p \cdot F_p}{\rho_p \cdot c_a \cdot t_p} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{\alpha,t}) \cdot \Delta t}{1 + \left(\frac{\xi}{4}\right)} - \frac{\theta_{g,t}}{1 + \left(\frac{4}{\xi}\right)}, \tag{23}$$

onde $F_p = u_p/A$ é o fator de massividade do perfil envolvido por material de proteção, t_p e λ_p são a espessura e a condutividade do material de proteção, respectivamente, enquanto ξ é um parâmetro dado por:

$$\xi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot t_p \cdot F_p. \tag{24}$$

A forma discretizada da Eq. (23), utilizada aqui para o cálculo da temperatura no aço, é dada pela Eq. (25), onde o passo de tempo deve ser menor ou igual a 30 s.

$$\Delta\theta_{\alpha}^{t+\Delta t} = \frac{\lambda_p \cdot F_p}{\rho_a \cdot c_a \cdot t_p} \cdot \frac{\left(\theta_g^t - \theta_{\alpha}^t\right)}{1 + \left(\frac{\xi}{4}\right)} \cdot \Delta t - \frac{\theta_g^{t+\Delta t} - \theta_g^t}{1 + \left(\frac{4}{\xi}\right)}. \tag{25}$$

A análise numérica que será desenvolvida na próxima seção emprega a Eq. (20) para determinar a evolução da temperatura em um perfil de aço sem proteção térmica e a Eq. (25) com o mesmo propósito, para o mesmo perfil com revestimento de proteção.

Neves et al. [2] utilizaram um programa computacional específico para análise de estruturas em situação de incêndio, o qual é baseado em elementos finitos e foi desenvolvido em ambiente MATLAB. Este programa pode ou não, levar em consideração a variação das propriedades dos materiais de proteção com a temperatura (massa específica, condutividade térmica e calor específico), diferente do método simplificado da NBR 14323, o qual considera tais propriedades constantes. A variação de cada uma destas propriedades com a temperatura é baseada em dados experimentais fornecidos em [16].

Neves et al. [2] fizeram uma análise dos resultados da aplicação do programa computacional citado e da aplicação do método simplificado da norma, à um perfil de aço sem e com revestimento protetor de uma argamassa projetada tipo contorno, comercializada com o nome Blaze-Shield II. Eles consideraram a espessura da proteção variando de 12 mm a 30 mm e constataram que, particularmente a espessura mínima (12 mm) foi capaz de proteger o perfil por 90 minutos (T < 550 °C) quando considerando as propriedades constantes e, por apenas 30 minutos quando considerando as propriedades variáveis, como mostra a Tabela 1. Esta tabela apresenta os resultados da evolução da temperatura no perfil sem revestimento de proteção (SR) e com revestimento de proteção (CR) de 12 mm apenas.

Neves et al. [2] chamam a atenção, com base em seus resultados numéricos, que considerar as propriedades constantes pode superestimar a capacidade protetiva dos materiais.

Tabela 1: Evolução da temperatura em perfil de aço sem e com proteção térmica de espessura 12 mmm.

tempo (min)	Temperatura dos gases (°C)	SR (°C)	CRC (°C)	CRV (°C)
30	841,8	821,4	216,5	447,8
60	954,3	942,5	405,1	727,9
90	1006,0	1003,6	543,2	894,2
120	1049,0	1047,4	648,1	1006,7

SR: Perfil sem revestimento **CRC:** Perfil com revestimento/Propriedades constantes **CRV:** Perfil com revestimento/Propriedades variáveis com funções de [16]. Fonte: Adaptada de [2].

3 Resultados e discussões

A Eq. (20), juntamente com a Eq. (25), serão utilizadas para determinar a temperatura em um perfil de aço W 410 x 85, sem e com proteção térmica, respectivamente. A seção transversal deste perfil apresenta as seguintes características geométricas: Altura do perfil ($d = 410\,mm$), largura das mesas ($b_f = 181\,mm$), espessura das mesas ($t_f = 18,2\,mm$) e espessura da alma ($t_w = 10,9\,mm$). As características físicas do aço são a massa específica, igual a 7850 kg/m^3, e o calor específico $c_a = 600\,J/kg°C$. Nas análises descritas a seguir, o perfil será envolvido por proteção tipo contorno, e a exposição ao incêndio será suposta pelos quatro lados.

O fator de massividade do perfil é aproximadamente 145 m^{-1} e o fator de sombreamento considerado $k_{sh} = 1,00$. Em todos os experimentos realizados nesse artigo, este será o perfil utilizado (ver Fig. 3).

A Fig. 4 mostra a evolução da temperatura no perfil de aço em duas situações: sem proteção e com proteção por argamassa de gesso tipo contorno, com 20 mm de espessura. Algumas propriedades físicas da argamassa são mostradas na própria figura.

Deve ser observado que, no perfil sem proteção, a temperatura crítica de 550 °C é alcançada em aproximadamente 11,8 minutos, indicando que o tempo de resistência ao fogo desse elemento, sequer alcança TRRF = 30 minutos, tempo mínimo exigido para a maioria das edificações na NBR 14.432:2001 [10]. Entretanto, quando protegido, o tempo de resistência sobe para aproximadamente 74 minutos.

Destaca-se que no final de 30 e 60 minutos a temperatura do aço, no perfil protegido, alcançou 219 e 457 °C, respectivamente, significando que edificações com estruturas aço que exijam TRRF60, ficam perfeitamente protegidas com essa proteção.

Para avaliar a influência de diferentes materiais, com diferentes densidades, calores específicos e condutividades térmicas, foram realizadas análises cujos resultados são mostrados na Fig. 5. Neste experimento foi utilizado o mesmo perfil anterior (W410 x 85), envolvido por proteção tipo contorno, com três materiais diferentes, cada material com as seguintes características físicas:

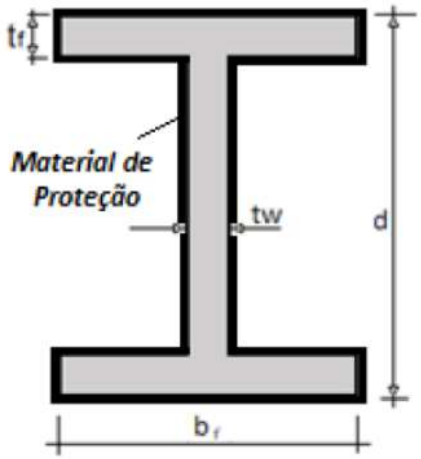

Figura 3: Seção transversal do perfil.

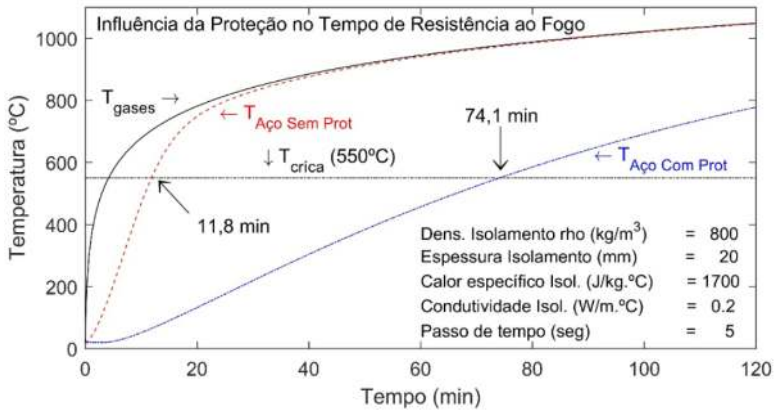

Figura 4: Evolução da temperatura em um perfil de aço sem proteção e com proteção térmica. Proteção tipo contorno de argamassa de gesso projetada.

- Material 1: Argamassa de gesso com massa específica de 800 kg/m^3, calor específico de 1700 $J/kg°C$ e condutividade térmica igual a 0,23 $W/m°C$.

- Material 2: Argamassa de vermiculita com massa específica de 600 kg/m^3, calor específico de 920 $J/kg°C$ e condutividade térmica igual a 0,12 $W/m°C$.

- Material 3: Argamassa com fibras minerais com massa específica de 300 kg/m^3, calor específico de 1050 $J/kg°C$ e condutividade térmica igual a 0,08 $W/m°C$.

A espessura do revestimento foi adotada 15 mm, para os três materiais, enquanto o passo de tempo adotado foi 5 segundos. Como esperado, materiais com menor condutividade térmica retardam mais o aquecimento do aço, aumentando o tempo de resistência ao fogo. A Fig. 5 apresenta o resultado da simulação com estes três materiais e mostra que a temperatura crítica é alcançada, aproximadamente, aos 50, 76 e 99 minutos, para os materiais 1, 2 e 3, respectivamente.

A simulação mostrou também que no final de 30, 60, 90 e 120 minutos, cada um dos materiais alcançou a temperatura indicada na Tabela 2. Deve ser observado que nenhuma destas proteções, com espessura de 15 mm, é capaz de proteger o aço pelo tempo de 120 minutos. Apenas o material 3 protege por 90 min, enquanto o material 1, com esta espessura, só oferece proteção por 30 minutos.

Foi investigada também a influência da espessura do revestimento protetivo na dinâmica de aquecimento do aço. Para este experimento foi utilizado o material 3, do experimento anterior, constituído por argamassa projetada de fibras minerais com massa específica de 300 kg/m^3, calor específico de 1050 $J/kg°C$ e condutividade térmica igual a 0,08 $W/m°C$. Foram ensaiadas proteções com as espessuras de 10 mm, 15 mm e 20 mm, e o resultado da simulação é mostrado na Fig. 6.

Na Fig. 6 pode ser observado que a temperatura crítica de 550 $°C$ foi alcançada aos 71, 99 e 127 minutos para as

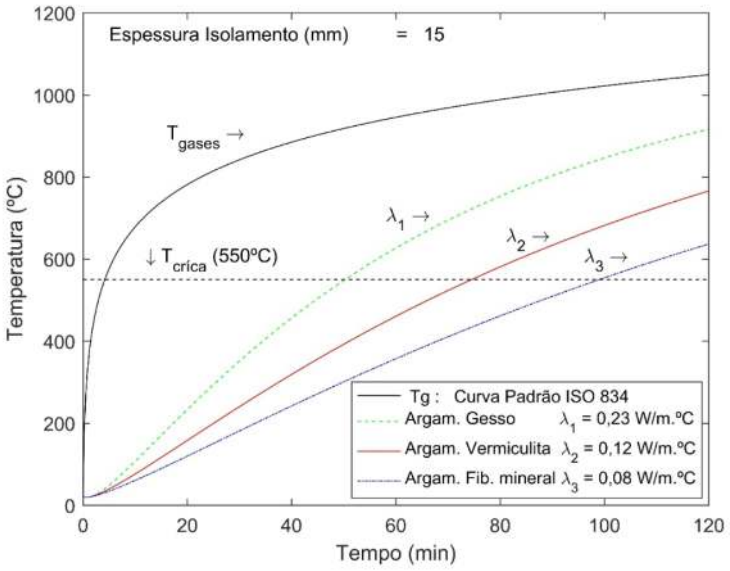

Figura 5: Evolução da temperatura em um perfil de aço protegido por diferentes materiais de proteção. Proteção tipo contorno de 15 mm.

Tabela 2: Temperatura ($°C$) alcançada pelo aço com proteção tipo contorno de 15 mm.

Material de proteção	TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
Material 1: Argamassa de gesso projetada	351,3	626,6	803,0	916,0
Material 2: Argamassa de vermiculita projetada	240,1	460,5	633,5	765,3
Material 3: Argamassa com fibras minerais projetada	181,2	357,0	509,1	636,2

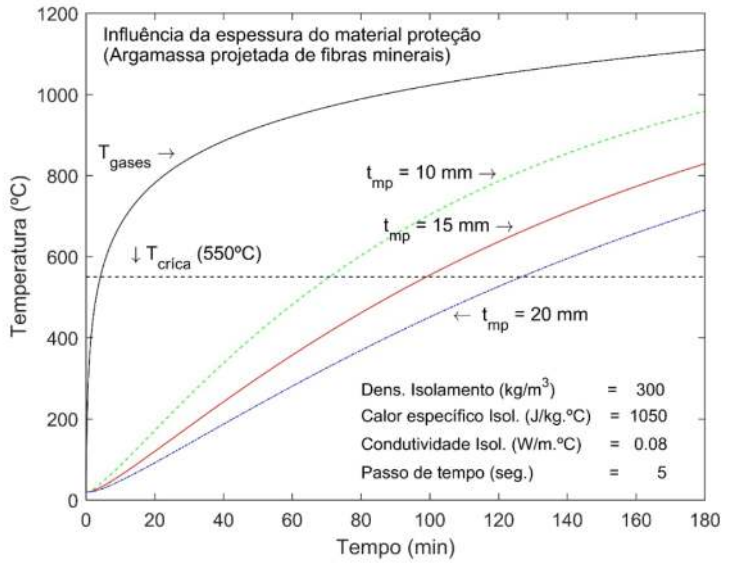

Figura 6: Evolução da temperatura em um perfil de aço ($F = 145\ m^{-1}$) revestido com argamassa de fibras minerais com espessuras de 10 mm, 15 mm e 20 mm.

espessuras de 10, 15 e 20 mm, respectivamente, mostrando que esse revestimento, com estas espessuras, é capaz de garantir TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta a espessura que a proteção com argamassa de fibras minerais precisa ter para garantir a segurança necessária aos elementos estruturais, para que atendam às exigências de TRRF da NBR 14.432:2001 [10], para algumas edificações selecionadas, em função de sua ocupação e altura. Destaca-se que um revestimento com espessura de 10 mm de argamassa com fibras minerais, é suficiente para garantir TRRF 60, tempo de resistência ao fogo exigido para a maioria das edificações com altura de até 23 m, enquanto 20 mm de espessura garante TRRF 120 ($H > 30$ m).

Tabela 3: TRRF exigido pela NBR 14432 em função da ocupação e altura das edificações e espessura da proteção por argamassa de fibras minerais, necessária para garantir este TRRF.

Ocupação	H ≤ 6 m	6 < H ≤ 12 m	12 < H ≤ 23 m	23 < H ≤ 30 m	H > 30m
Residencial	30 min/10 mm	30 min/10 mm	60 min/10 mm	90 min/15 mm	120 min/20 mm
Hospedagem	30 min/10 mm	60 min/10 mm	60 min/10 mm	90 min/15 mm	120 min/20 mm
Comercial	60 min/10 mm	60 min/10 mm	60 min/10 mm	90 min/15 mm	120 min/20 mm
Serviços profissionais	30 min/10 mm	60 min/10 mm	60 min/10 mm	90 min/15 mm	120 min/20 mm

De modo geral, foi observada uma boa aproximação entre os resultados obtidos neste trabalho, considerando as propriedades dos materiais de proteção constantes, e aqueles que aparecem na literatura, sob as mesmas condições.

A Tabela 2 mostra que, dos três materiais submetidos a análise numérica, apenas o material 3, com revestimento de 15 mm, alcançou um nível de segurança TRRF 90. Esse é o nível de proteção exigido pela NBR 14.432:2001 [10] para os elementos da estrutura metálica de um prédio com aproximadamente 10 andares como pode ser visto na Tabela 3. Neves *et al.* (2021) [2], já citado, também obtiveram o mesmo nível de segurança com seu perfil revestido com argamassa Blaze-Shield II, de espessura 12 mm (ver Tabela 1). A menor espessura da argamassa Blaze-Shield II, utilizada por [2], é explicada pela menor condutividade e maior calor específico desta argamassa, quando comparada com a argamassa de fibras minerais correspondente ao material 3.

4 Conclusões

Neste trabalho foi conduzido um estudo sobre o comportamento de três materiais de revestimento, utilizados para a proteção de perfis de aço em situação de incêndio, com a finalidade de avaliar a eficiência da proteção térmica destes materiais.

O estudo foi baseado na análise numérica da evolução da temperatura na seção transversal de um perfil de aço, sem e com proteção, com o emprego das equações simplificadas propostas pela NBR 14.323, considerando as propriedades destes materiais constantes com a temperatura. Um dos ensaios considerou o perfil de aço revestido com 15 mm de argamassa, de cada um dos três materiais de proteção. A análise numérica da evolução da temperatura mostrou que o material 1 alcançou um nível de segurança TRRF 30, o material 2, TRRF 60, e o material 3, TRRF 90. Chamou a atenção que, com essa espessura de revestimento, nenhum dos materiais alcançou nível de proteção TRRF 120.

Dos três materiais ensaiados, a argamassa de fibras minerais foi o que apresentou maior capacidade de proteção. Para este material específico, foram simulados revestimentos com 10, 15 e 20 mm de espessuras, resultando níveis de proteção TRRF 60 e TRRF 90 e TRRF 120, respectivamente.

A comparação dos resultados dos ensaios numéricos com as exigências de TRRF da NBR 14.432, indica que um revestimento de argamassa de fibras minerais de 10 mm poderia proteger a estrutura de aço de prédios residenciais com até 23 m de altura, enquanto a espessura de 15 mm protegeria a estrutura de edifícios com até 30 m, e 20 mm, estruturas com mais de 30 m de altura.

A análise conduzida neste trabalho mostrou que, pelo menos do ponto de vista da segurança contra incêndio, estruturas de aço podem ser empregadas no projeto de edifícios, desde que seus elementos sejam devidamente protegidos. Entretanto, os resultados obtidos devem ser interpretados com a devida precaução, tendo em vista que os procedimentos aqui adotados são puramente numéricos e baseados no método simplificado da norma, o qual não leva em consideração a variação das propriedades térmicas dos materiais de proteção com a temperatura.

Fica aqui a sugestão para que trabalhos futuros utilizem métodos que considerem a existência de gradientes de temperatura na seção transversal, que considerem a variação das propriedades dos materiais com a temperatura e mostrem a maneira como tudo isso influi na evolução da temperatura do perfil de aço.

Referências

[1] J. P. Faleiros, J. R. T. Junior, e B. M. Santana, *O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: 2001/2010*. Rio de Janeiro, Brasil: BNDES Setorial, 2012. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1517/1/A%20set.35_O%20crescimento%20da%20ind%c3%bastria%20brasileira%20de%20estruturas_P.pdf

[2] N. S. das Neves, R. S. Camargo, e M. S. de Azevedo, "Avaliação numérica da eficiência dos materiais de proteção térmica para estruturas de aço em situação de incêndio," *Revista da Estrutura de Aço*, vol. 10, no. 3, pp. 371–390, 2021. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/revista-da-estrutura-de-aco-rea/?p=edicoes-anteriores&bscRevista=off&slcBscProdSubcategoria=445&slcBscStatus=A&slcBscUnique=S

[3] C. Quintão, "Construção em aço cresce puxada pela busca por produtividade nos canteiros de obras," *Jornal Valor Econômico*, 2021. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticia/construcao-em-aco-cresce-puxada-pela-busca-por-produtividade-nos-canteiros-de-obras

[4] R. G. Pereira, H. A. S. Filho, R. M. C. Filho, F. A. Silva, e T. A. Pires, "Comportamento estrutural de pilares de aço formados a frio em situação de incêndio," *Revista da Estrutura de Aço*, vol. 8, no. 2, pp. 256–273, 2019.

[5] J. P. C. Rodrigues e R. L. G. de Oliveira, *Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio*, 1ª ed. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2021.

[6] ABNT, *NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

[7] V. P. e Silva, M. R. Vargas, e R. Ono, *Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura - Manual de Construção em Aço*. Rio de Janeiro, Brasil: CBCA, 2010.

[8] C. N. Costa e V. P. da Silva, *Revisão Histórica das Curvas Padronizadas de Incêndio*. São Paulo, Brasil: NUTAU, 2006. Disponível em: http://elibrary.tips/edoc/revisao-historica-das-curvas-padronizadas-de-incendio.html/

[9] M. R. Vargas e V. P. da Silva, *Resistência ao fogo das Estruturas de Aço - Manual de Construção em Aço*. Rio de Janeiro, Brasil: CBCA, 2005.

[10] ABNT, *NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações-Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

[11] A. I. Seito, A. A. Gill, F. D. Pannoni, R. Ono, S. B. da Silva, U. D. Carlo, e V. P. e Silva, *A Segurança contra Incêndio no Brasil*. São Paulo, Brasil: Projeto Editora, 2008.

[12] F. R. A. Landi, "Ação do fogo sobre estruturas metálicas," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, Relatório técnico B.T. 01-B/1986, 1986.

[13] C. O. Bennett e J. E. Myers, *Fenômenos de Transporte - Quantidade de Movimento, Calor e Massa.* Rio de Janeiro, Brasil: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.

[14] V. P. Silva, "Estruturas de aço em situação de incêndio," Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1997.

[15] G. F. Bernardes, "Dimensionamento em situação de incêndio de perfis em aços estruturais convencionais e aços resistentes ao fogo," Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

[16] N. J. Carino, M. A. Starnes, J. L. Gross, J. C. Yang, S. R. Kukuck, K. Prasad, e R. W. Bukowski, *Passive Fire Protection*. Gaithersburg, Alemanha: National Institute of Standards and Technology, 2005.