
ANÁLISE ANALÍTICA DA ESTABILIDADE DE COLUNAS DE AÇO INOXIDÁVEL SUBMETIDAS A COMPRESSÃO AXIAL E SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

ANALYTICAL ANALYSIS OF THE STABILITY OF STAINLESS STEEL COLUMNS SUBJECTED TO AXIAL COMPRESSION AND FIRE SITUATION

Eric Guilherme Mendes ¹
Carlos Humberto Martins ²
Alexandre Rossi ³

Resumo: O aço estrutural do tipo inoxidável tem sido cada vez mais empregado na construção de grandes edifícios, devido às suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Diferentemente do aço carbono, o aço inoxidável apresenta boa retenção de rigidez em situação de altas temperaturas, dessa forma torna-se relevante o estudo do comportamento de colunas, bem como os parâmetros que influenciam na resistência ao calor e a compressão. Foram analisadas colunas feitas com 6 perfis do tipo H e comprimentos que variam de 3 a 7 metros, dentro do intervalo de 60 minutos de exposição ao incêndio descrito pela ISO 834:1999. Por meio de recomendações do EN 1993-1-2:2005 e EN 1993-1-4:2006, determinou-se a elevação de temperatura nos perfis e o esforço resistente das colunas. Através dos resultados obtidos, conclui-se que a elevação de temperatura é menor à medida que a relação A_m/V diminui. Após 60 minutos de exposição ao fogo, a capacidade resistente das colunas de aço inoxidável analisadas, diminuiu cerca de 85% em relação à resistência em temperatura ambiente.

Palavras-chave: Estabilidade de colunas; Aço inoxidável; Compressão; Situação de incêndio.

Abstract: *Stainless structural steel has been increasingly used in the construction of large buildings due to its physical, mechanical and thermal properties. Unlike carbon steel, stainless steel has good stiffness retention in a situation of high temperatures, thus it becomes relevant to study the behavior of columns, as well as the parameters that influence heat resistance and compression. Columns made with 6 H-type profiles and lengths ranging from 3 to 7 meters were analyzed, within the 60-minute interval of fire exposure described by ISO 834:1999. By means of recommendations of EN 1993-1-2:2005 and EN 1993-1-4:2006, the temperature increase in the profiles and the resistant stress of the columns were determined. Through the results obtained, it is concluded that the temperature increase is lower as the A_m/V ratio decreases. After 60 minutes of exposure to fire, the resistant capacity of the stainless steel columns analyzed decreased by about 85% in relation to the resistance at room temperature.*

Keywords: *Column stability; Stainless steel; Compression; Fire situation.*

¹Universidade Estadual de Maringá, e-mail: pg403863@uem.br

²Universidade Estadual de Maringá, e-mail: chmartins@uem.br

³Universidade Federal de Uberlândia, e-mail: alexandre-rossi@hotmail.com

1 Introdução

A construção civil está presente na vida do homem desde o princípio das civilizações, devido a necessidade de abrigo por parte do ser humano. Inicialmente, as construções eram feitas a partir de materiais naturais encontrados nas proximidades. Com a Revolução Industrial, novos materiais passaram a ser criados e descobertos, como por exemplo o ferro fundido, o aço, o concreto simples e armado, entre outros.

Atualmente, o aço carbono apresenta grande empregabilidade na construção devido sua alta resistência, durabilidade, segurança e versatilidade. No entanto, sua maior desvantagem está relacionada a corrosão, necessitando de um tratamento especial ou por meio do emprego do aço inoxidável de alta resistência física e mecânica.

Além das vantagens acima, o aço inoxidável também permite sua utilização em estruturas que apresentam risco de exposição ao fogo, devido sua maior resistência e retenção de rigidez, fatores imprescindíveis para garantir evacuação e segurança de pessoas em uma eventual situação de incêndio.

Sendo o foco deste trabalho, as colunas metálicas são elementos verticais submetidos a compressão axial ou excêntrica, sujeitos ao fenômeno de instabilidade denominado flambagem. A ocorrência da flambagem provoca deslocamentos laterais acentuados e afeta a resistência a compressão de colunas.

A norma ABNT NBR 14432:2001 apresenta exigências a serem cumpridas em estruturas com risco de exposição ao fogo, como:

- Garantir evacuação segura de pessoas do local submetido ao incêndio;
- Garantir segurança das operações de combate ao incêndio;
- Evitar propagação do incêndio na totalidade da estrutura;
- Minimizar danos as edificações adjacentes.

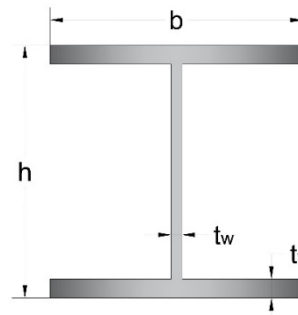
Além disso, a norma apresenta o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) para diversos tipos de estruturas, a fim de garantir as exigências citadas. Dessa forma, é fundamental estudar o comportamento da estrutura com risco de exposição ao fogo para prever a capacidade e o tempo resistente dos elementos.

Por fim, os principais objetivos do trabalho tratam da avaliação do comportamento de colunas de aço inoxidável e a influência de parâmetros do perfil na resistência de colunas ao longo do tempo em situação de incêndio.

2 Materiais e Métodos

O trabalho baseia-se na obtenção do esforço resistente analítico de colunas de aço inoxidável, com auxílio de planilhas eletrônicas elaborados no *software* Excel, no período de 1 hora em intervalos de 5 minutos, para diferentes geometrias de perfis e comprimentos de colunas, a fim de analisar a influência desses parâmetros no esforço resistente.

Serão analisados 6 perfis com geometria H, ideal para colunas. Os comprimentos variam de 3 a 7 metros em intervalos de 1 metro. A Figura 1 ilustra a seção transversal com as dimensões consideradas. A Tabela 1 apresenta as dimensões dos perfis em estudo.

**Figura 1** – Seção transversal perfis H

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 1 – Dimensões dos perfis

Perfil	h	b	t_w	t_f
	mm	mm	mm	mm
H 100	100	100	6.0	10.0
H 120	120	120	6.5	11.0
H 140	140	140	7.0	12.0
H 160	160	160	8.0	13.0
H 180	180	180	8.5	14.0
H 200	200	200	9.0	15.0

Fonte: Autoria própria (2022)

O aço inoxidável utilizado na pesquisa será do tipo austenítico grau 1.4301, cujas propriedades de interesse para cálculo são apresentadas no decorrer do texto.

Por se tratar de colunas de aço inoxidável, serão utilizadas as recomendações normativas prescritas na norma europeia Eurocode 3 (EN 1993). Os aspectos de cálculo utilizados na obtenção do esforço resistente são abordados nos tópicos seguintes.

2.1 Instabilidade de colunas

De acordo com Pfeil e Pfeil (2022), colunas são elementos estruturais submetidos a compressão axial centrada sujeitos ao fenômeno de flambagem. A flambagem é responsável pela redução da capacidade resistente da coluna e pode causar o colapso da estrutura. A flambagem pode ocorrer de duas maneiras: global, ao longo de todo o comprimento da coluna, e local, nas chapas que constituem o perfil. A Figura 2 ilustra os dois tipos de flambagem.

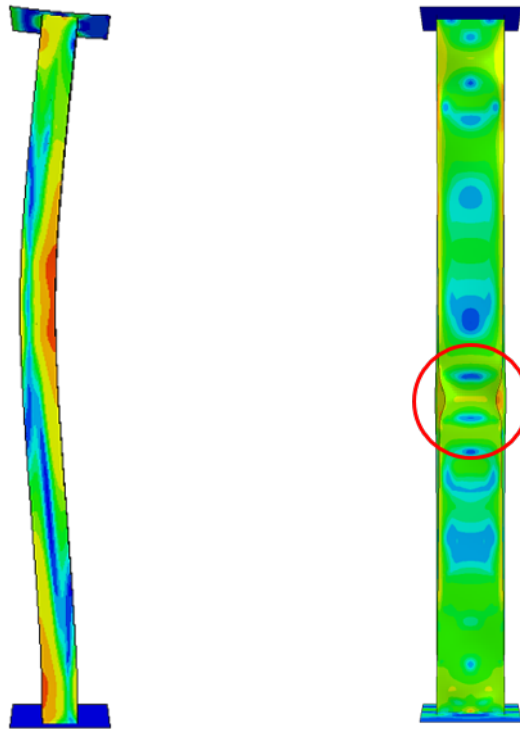


Figura 2. Tipos de flambagem em colunas

Fonte: Autoria própria (2022)

O fenômeno de flambagem foi estudado primeiramente pelo matemático suíço *Leonhard Euler*, que investigou o equilíbrio de uma coluna comprimida e desenvolveu uma equação que possibilita a obtenção da carga última suportada por uma coluna ideal, antes da ocorrência da falha. A carga de *Euler* é apresentada na Equação 1.

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (1)$$

P_{cr} : carga axial máxima na coluna imediatamente antes do início da flambagem (N);

n : número de ondas na forma defletida da coluna;

E : módulo de elasticidade do material (N/m²);

I : momento de inércia da seção transversal (m⁴);

k : fator de comprimento efetivo de flambagem;

L : comprimento total da coluna (m).

De forma simplificada, considera-se o parâmetro $n = 1$, ou seja, a primeira forma defletida da coluna que pode ocorrer na realidade. Considera-se também $k = 1$, onde as colunas são consideradas como bi apoiadas. Sendo assim, a carga de *Euler* simplificada é apresentada na Equação 2.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

A carga de *Euler* considera uma coluna ideal com as seguintes condições: isenta de imperfeições físicas e geométricas, produzida com material de comportamento elástico linear e

carga aplicada no centro geométrico da seção transversal. Entretanto, essas condições não existem na realidade, fazendo com que a carga resistente de uma coluna seja inferior a carga de *Euler*. A Figura 3 demonstra o comportamento de colunas com diferentes considerações.

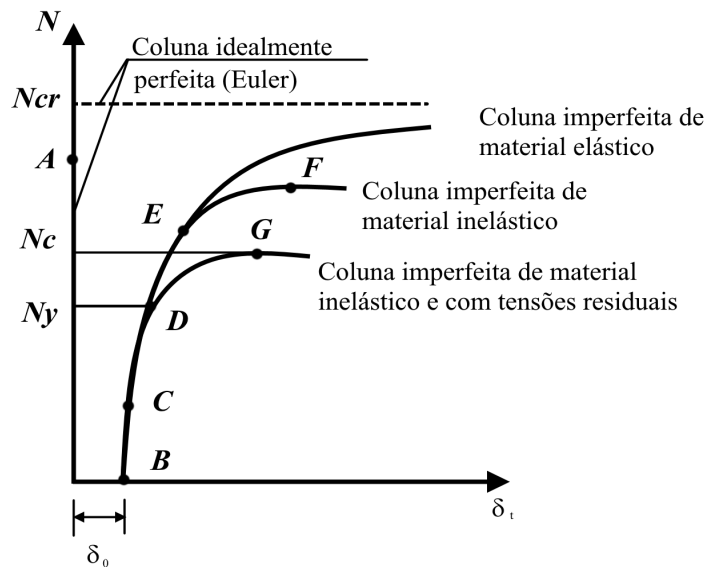


Figura 3. Comportamento de colunas com diferentes considerações

Fonte: Pfeil e Pfeil (2022)

Sabendo que a carga de *Euler* representa a carga aplicada na coluna na iminência da flambagem, a força resistente deve ser superior a carga última a fim de evitar a ocorrência da flambagem. Dessa forma, o dimensionamento estrutural deve ser realizado através de recomendações normativas que garantam a estabilidade e segurança da estrutura.

2.2 Dimensionamento ao fogo de colunas de aço inoxidável

O dimensionamento de elementos estruturais de aço inoxidável pode ser feito por meio de recomendações da EN 1993. As disposições da EN 1993-1-4:2006 são aplicadas apenas para elementos de aço inoxidável com limite de escoamento, $f_y \leq 480$ MPa. Na EN 1993-1-4:2006 são apresentados valores nominais de f_y e resistência a tração final, f_u , para os aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex. A Tabela 2 apresenta os valores de f_y e f_u para o aço inoxidável tipo austenítico, visto que esse será o aço a ser utilizado na análise.

Tabela 2 – Valores nominais de f_y e f_u para aço austenítico

Aço inoxidável		Forma do produto							
		Fita laminada a frio		Fita laminada a quente		Placa laminada a quente		Barras e seções	
		Espessura nominal t							
		$t \leq 6$ mm		$t \leq 12$ mm		$t \leq 75$ mm		$t \leq 250$ mm	
Grau		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Austenítico	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	460
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	450
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4539	240	530	220	530	220	520	230	530
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
	1.4432	240	550	220	550	220	520	200	500
	1.4435	240	550	220	550	220	520	200	500
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580
	1.4439	290	580	270	580	270	580	280	580
	1.4529	300	650	300	650	300	650	280	580
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-4 (2006)

Outros coeficientes relevantes ao aço inoxidável austenítico são apresentados a seguir, conforme recomendação da EN 1993-1-4:2006:

- Módulo de elasticidade (E):
 - $E = 195$ GPa, para os graus 1.4539, 1.4529 e 1.4547;
 - $E = 200$ GPa, exceto para os graus 1.4539, 1.4529 e 1.4547;
- Coeficiente de Poisson (ν):
 - $\nu = 0,3$.

As propriedades mecânicas do aço inoxidável são deterioradas em função do aumento de temperatura, sendo necessária a minoração dos valores para dimensionamento em temperatura elevada. O *Design manual for structural stainless steel* (2017), fornece fatores de redução da resistência e rigidez, em relação ao valor em temperatura ambiente (20°C), apresentados na Tabela 3, calculados pelas Equações de 3 a 7.

Tabela 3 - Fatores de redução em temperatura elevada

Temperatura (°C)	$k_{p0,2,\theta}$	$k_{2,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{Eu,\theta}$
Austenítico I (1.4301, 1.4307, 1.4318)					
20	1.00	1.31	1.00	1.00	1.00
100	0.78	1.02	0.81	0.96	0.56
200	0.65	0.88	0.72	0.92	0.42
300	0.60	0.82	0.68	0.88	0.42
400	0.55	0.78	0.66	0.84	0.42
500	0.50	0.73	0.61	0.80	0.42
600	0.46	0.68	0.54	0.76	0.33
700	0.38	0.54	0.40	0.71	0.24
800	0.25	0.35	0.25	0.63	0.15
900	0.15	0.18	0.13	0.45	0.15
1000	0.07	0.08	0.08	0.20	0.20
1100	0.05	0.06	0.05	0.10	-
Austenítico II (1.4401, 1.4404, 1.4541)					
20	1.00	1.19	1.00	1.00	1.00
100	0.86	1.13	0.87	0.96	0.56
200	0.72	0.98	0.80	0.92	0.42
300	0.67	0.92	0.78	0.88	0.42
400	0.62	0.85	0.77	0.84	0.42
500	0.60	0.82	0.74	0.80	0.42
600	0.56	0.75	0.67	0.76	0.33
700	0.50	0.68	0.51	0.71	0.24
800	0.41	0.50	0.34	0.63	0.15
900	0.22	0.26	0.19	0.45	0.15
1000	0.14	-	0.10	0.20	0.20
1100	0.07	-	0.07	0.10	-
Austenítico III (1.4571)					
20	1.00	1.31	1.00	1.00	1.00
100	0.89	1.16	0.88	0.96	0.56
200	0.82	1.07	0.81	0.92	0.42
300	0.77	1.01	0.79	0.88	0.42
400	0.72	0.95	0.79	0.84	0.42
500	0.69	0.91	0.77	0.80	0.42
600	0.65	0.85	0.71	0.76	0.33
700	0.59	0.76	0.57	0.71	0.24
800	0.51	0.63	0.38	0.63	0.15
900	0.29	0.38	0.23	0.45	0.15
1000	0.15	0.18	0.10	0.20	0.20

Fonte: Adaptado de SCI (2017)

$$k_{p0,2,\theta} = \frac{f_{p0,2,\theta}}{f_y} \quad (3)$$

$$k_{2,\theta} = \frac{f_{2,\theta}}{f_y} \quad (4)$$

$$k_{u,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_y} \quad (5)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (6)$$

$$k_{\varepsilon u,\theta} = \frac{\varepsilon_{u,\theta}}{\varepsilon_u} \quad (7)$$

$k_{p0,2,\theta}$: resistência ao escoamento a temperatura θ em relação a resistência ao escoamento em temperatura ambiente;

$k_{2,\theta}$: resistência a 2% da deformação total a temperatura θ em relação a resistência em temperatura ambiente;

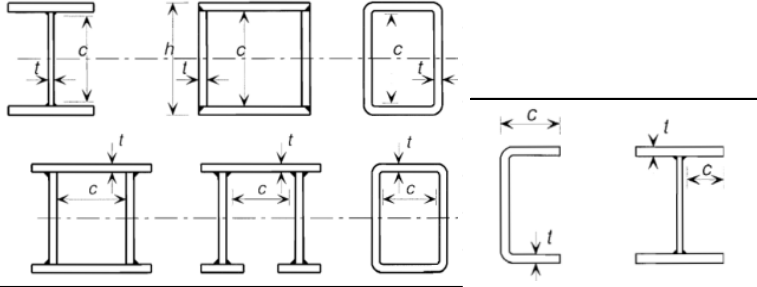
$k_{u,\theta}$: resistência máxima a temperatura θ em relação a resistência máxima em temperatura ambiente;

$k_{E,\theta}$: módulo de elasticidade linear a temperatura θ em relação ao módulo em temperatura ambiente;

$k_{\varepsilon u,\theta}$: deformação no limite de resistência a temperatura θ em relação a deformação no limite de resistência em temperatura ambiente.

Para o dimensionamento do esforço resistente, deve-se classificar a seção transversal conforme a esbeltez (c/t) das chapas que compõem o perfil. A Tabela 4 apresenta a esbeltez limite de diferentes seções, calculada em função da Equação 8.

Tabela 4 – Índice de esbeltez de diferentes perfis

			
Classe	Esbeltez limite	Classe	Esbeltez limite
1	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	1	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	2	$c/t \leq 9,4\varepsilon$
3	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	3	$c/t \leq 11\varepsilon$

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-4 (2006)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \quad (8)$$

Já para situação de incêndio, o SCI (2017) recomenda que a esbeltez limite seja calculada em função da Equação 9.

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{p0,2,\theta}}} \quad (9)$$

Para o presente trabalho, foram consideradas apenas as classes 1, 2 e 3, onde a flambagem local não é considerada nas chapas do perfil. Posterior a classificação da seção transversal, o esforço resistente a compressão, pode ser calculado por meio da Equação 10.

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (10)$$

χ_{fi} : fator de redução de flambagem em situação de incêndio;

A: área bruta (m²);

$\gamma_{M,fi}$: fator de segurança parcial do material, tomado como 1,0.

A determinação do fator χ_{fi} é feita pela Equação 11, cujas variáveis são calculadas pelas Equações 12 a 14.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (11)$$

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (12)$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (13)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{P_{cr}}} \quad (14)$$

Os fatores α e $\bar{\lambda}_0$, segundo EN 1993-1-4:2006, podem ser assumidos como segue na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de α e $\bar{\lambda}_0$

Tipo de membro	Eixo de flambagem	α	$\bar{\lambda}_0$
Seções abertas formadas a frio	Qualquer	0,49	0,40
Seções ocas	Qualquer	0,49	0,40
Seções abertas soldadas	Maior	0,49	0,20
	Menor	0,76	0,20

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-4 (2006)

2.3 Cálculo do aumento de temperatura em aço inoxidável

O cálculo do aumento de temperatura em aço inoxidável é semelhante para o aço carbono, feito através do incremento de temperatura na seção transversal aquecida uniformemente no intervalo de tempo Δt , conforme Equação 15.

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c\rho} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (15)$$

A_m : área da superfície do elemento por unidade de comprimento (m);

V : volume do elemento por unidade de comprimento (m²);

c : calor específico do aço inoxidável (J/kg°C);

ρ : densidade do aço inoxidável (kg/m³);

$\dot{h}_{net,d}$: fluxo de calor total por unidade de área.

Conforme SCI (2017), o calor específico pode ser determinado através da Equação 16.

$$c = 450 + 0,28 \cdot \theta - 2,91 \times 10^{-4} \cdot \theta^2 + 1,34 \times 10^{-7} \cdot \theta^3 \quad (16)$$

θ : temperatura uniforme da seção de aço (°C).

A densidade do aço inoxidável independe da temperatura e varia em função do tipo de aço. A Tabela 6 apresenta valores de densidade para diferentes graus de aço inoxidável.

Tabela 6 – Densidade do aço inoxidável

Grupo	Grau	Densidade (kg/m ³)
Austenítico	1.4301	7900
	1.4307	7900
	1.4401	8000
	1.4318	7900
	1.4404	8000
	1.4541	7900
	1.4571	8000
Ferrítico	1.4003	7700
	1.4016	7700
	1.4509	7700
	1.4521	7700
	1.4621	7700
Duplex	1.4062	7800
	1.4162	7700
	1.4362	7800
	1.4482	7800
	1.4462	7800
	1.4662	7700

Fonte: Adaptado de SCI (2017)

O fluxo de calor total é resultado da soma dos fluxos de calor convectivo e radiativo. O cálculo dos mesmos pode ser feito pelas Equações 17 e 18, respectivamente.

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta) \quad (17)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_{res} \cdot 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4] \quad (18)$$

α_c : coeficiente de transferência de calor por convecção (tomado como 25 W/m²°C);

θ_g : temperatura dos gases do ambiente exposto ao fogo (°C);

ϕ : fator de configuração da seção, tomado como 1,0;

ε_{res} : emissividade resultante.

De acordo com SCI (2017), o parâmetro ε_{res} expressa a radiação do fogo transmitida para a superfície do aço inoxidável e depende do grau de exposição do elemento ao fogo. Para elementos de aço inoxidável desprotegidos, a EN 1993-1-2:2005 recomenda o valor de $\varepsilon_{res} = 0,4$.

Segundo Rodrigues e Oliveira (2021), a determinação da elevação de temperatura no ambiente, em situação de incêndio, trata-se de um procedimento complexo, visto que depende de diversas variáveis. Dessa forma, as normas de cálculo fazem a consideração de curvas padronizadas para obter a elevação de temperatura dos gases quentes no ambiente em função do tempo. A curva de incêndio padrão é dada pela ISO 834:1999 por meio da Equação 19.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (19)$$

t: tempo, expresso em minutos.

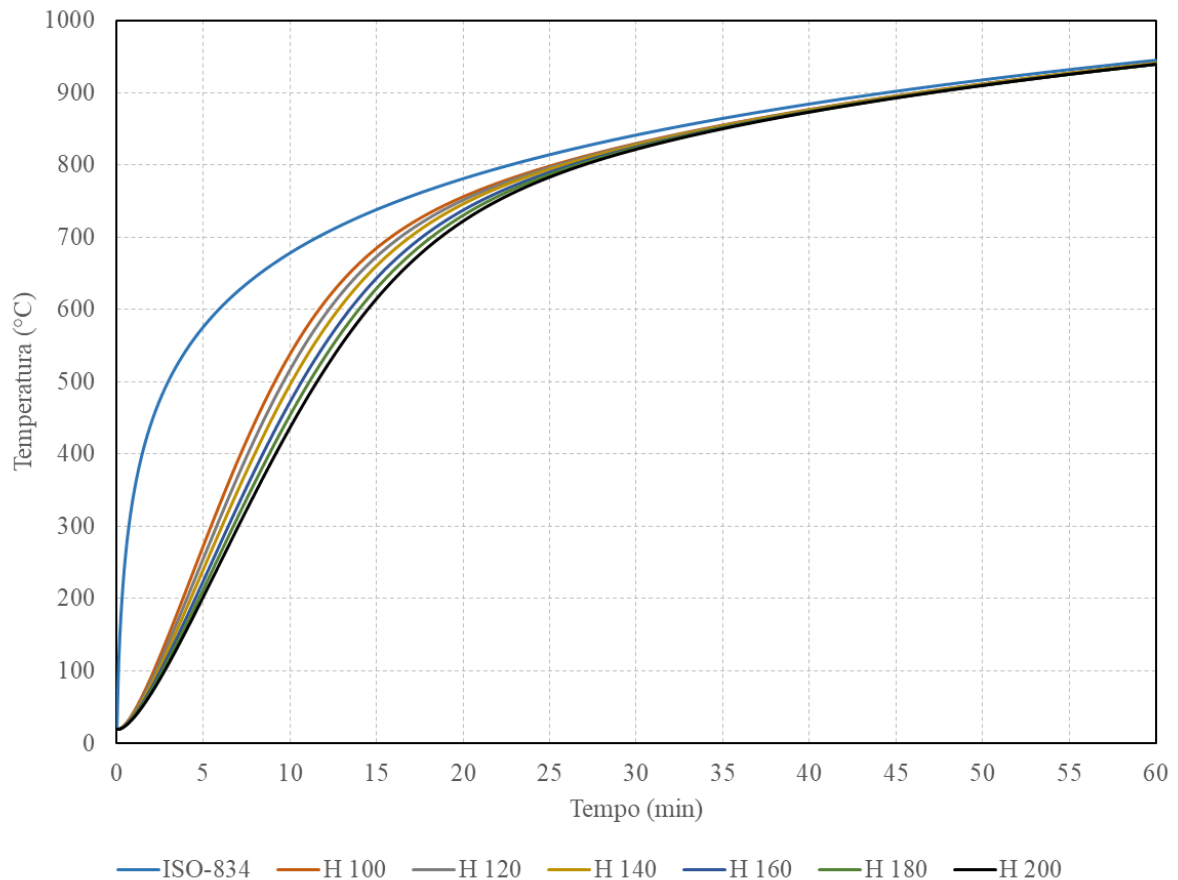
3 Resultados e discussões

Primeiramente, por meio da Equação 15, determinou-se a temperatura do aço para cada perfil do estudo. Na Tabela 7 encontra-se a temperatura desenvolvida nos perfis ao longo do tempo, ilustrada pela Figura 4.

Tabela 7 – Temperatura dos perfis ao longo do tempo

Tempo	H 100	H 120	H 140	H 160	H 180	H 200
	$\theta_{aço}$ (°C)	$\theta_{aço}$ (°C)	$\theta_{aço}$ (°C)	$\theta_{aço}$ (°C)	$\theta_{aço}$ (°C)	$\theta_{aço}$ (°C)
5.0	274.5	257.0	241.7	225.9	214.3	203.8
10.0	539.1	517.2	496.3	472.9	454.4	437.0
15.0	685.6	673.6	660.5	644.0	629.6	615.0
20.0	756.5	751.6	745.9	738.0	730.5	722.2
25.0	798.9	796.6	794.0	790.4	786.9	782.9
30.0	830.2	828.8	827.3	825.3	823.5	821.4
35.0	855.6	854.6	853.5	852.2	851.0	849.7
40.0	877.1	876.3	875.5	874.5	873.6	872.6
45.0	895.9	895.2	894.5	893.7	893.0	892.2
50.0	912.5	911.9	911.3	910.6	910.0	909.4
55.0	927.5	926.9	926.4	925.8	925.3	924.8
60.0	941.0	940.6	940.1	939.6	939.1	938.6

Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 4** – Elevação de temperatura nos perfis

Fonte: Autoria própria (2022)

Percebe-se que à medida que a seção transversal aumenta, menor é a temperatura desenvolvida no perfil, fato esse que pode ser explicado pela diminuição da relação A_m/V , como mostrado na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Relação A_m/V dos perfis

	H 100	H 120	H 140	H 160	H 180	H 200
A_m	0.588	0.707	0.826	0.944	1.063	1.182
V	0.002480	0.003277	0.004172	0.005232	0.006332	0.007530
$A_m/V \text{ (m}^{-1}\text{)}$	237.10	215.75	197.99	180.43	167.88	156.97

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da obtenção da temperatura do perfil em determinado tempo, antes do dimensionamento do esforço resistente, deve-se determinar os valores dos fatores de redução vistos na Tabela 3. Considerando que o valor de temperatura obtido se encontra, geralmente entre intervalos de temperatura pré-determinados na Tabela 3, segundo SCI (2017), os fatores de redução das propriedades mecânicas podem ser obtidos através da interpolação linear dos fatores do intervalo. A Tabela 9 apresenta fatores de redução para cálculo do perfil H 200, obtidos pela Tabela 3 e interpolação linear.

Tabela 9 – Fatores de redução do perfil H 200

θ (°C)	$k_{p0,2,\theta}$	$k_{2,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20.0	1.000	1.310	1.000	1.000
100	0.78	1.02	0.81	0.96
200	0.65	0.88	0.72	0.92
203.8	0.648	0.878	0.718	0.918
300	0.60	0.82	0.68	0.88
400	0.55	0.78	0.66	0.84
437.0	0.531	0.761	0.641	0.825
500	0.50	0.73	0.61	0.80
600	0.46	0.68	0.54	0.76
615.0	0.448	0.659	0.519	0.752
700	0.38	0.54	0.40	0.71
722.2	0.351	0.498	0.367	0.692
782.9	0.272	0.382	0.276	0.644
800	0.25	0.35	0.25	0.63
821.4	0.229	0.314	0.224	0.591
849.7	0.200	0.266	0.190	0.541
872.6	0.177	0.227	0.163	0.499
892.2	0.158	0.193	0.139	0.464
900	0.15	0.18	0.13	0.45
909.4	0.142	0.171	0.125	0.426
924.8	0.130	0.155	0.118	0.388
938.6	0.119	0.141	0.111	0.353
1000	0.07	0.08	0.08	0.20

Fonte: Autoria própria (2022)

Determinados os fatores de redução para cada intervalo de tempo, classifica-se as seções transversais, por meio das Equações 8 e 9. Vale ressaltar que todas as seções, independente do intervalo de tempo, enquadram-se na classe 1, conforme Tabela 4.

Por fim, o esforço resistente para cada intervalo de tempo é calculado com auxílio da Equação 10, cuja principal variável em estudo trata-se do comprimento de flambagem. A seguir, nas Figuras 5 a 9 apresenta-se a resistência de colunas ao longo do tempo para diferentes comprimentos.

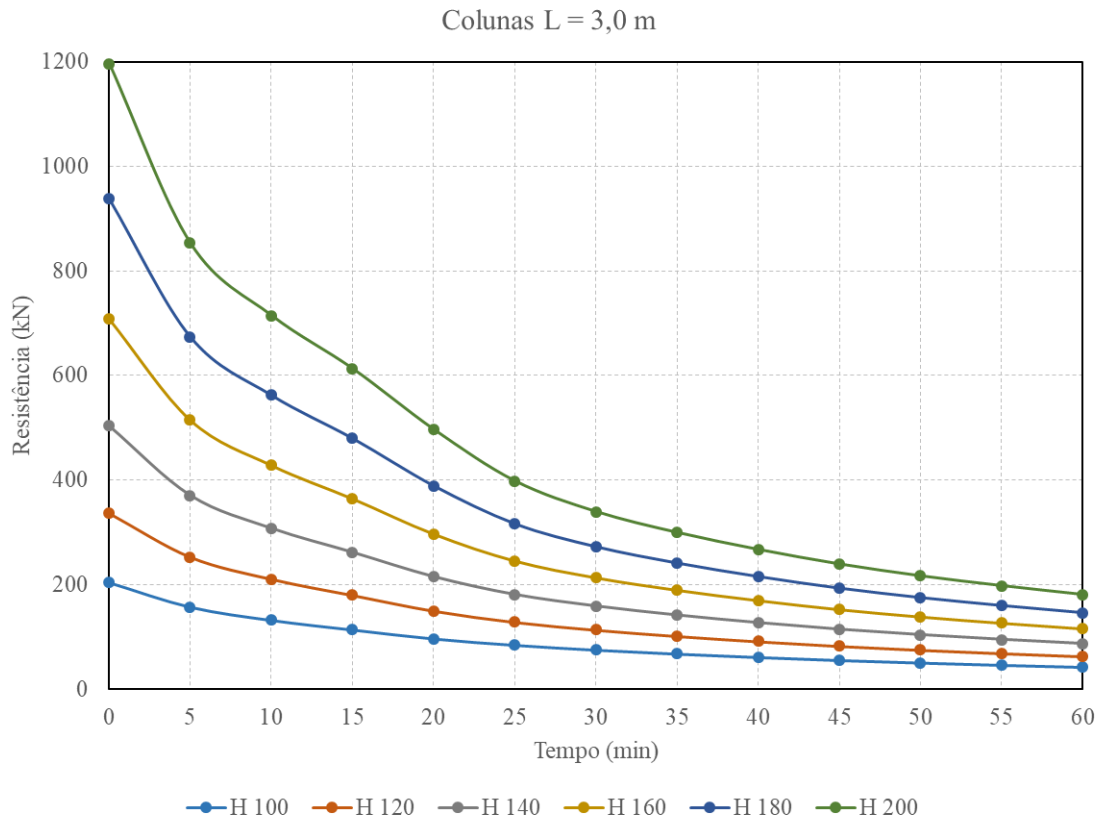


Figura 5 – Esforço resistente de colunas com L = 3,0 m

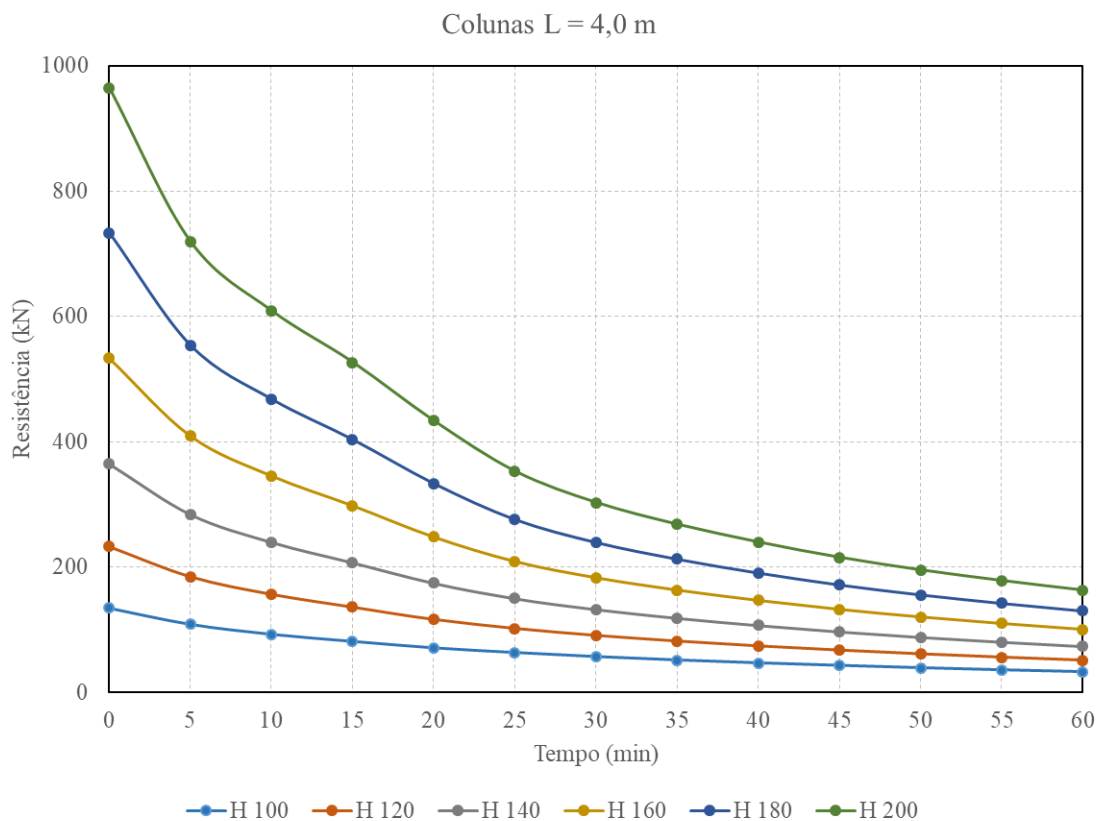


Figura 6 – Esforço resistente de colunas com L = 4,0 m

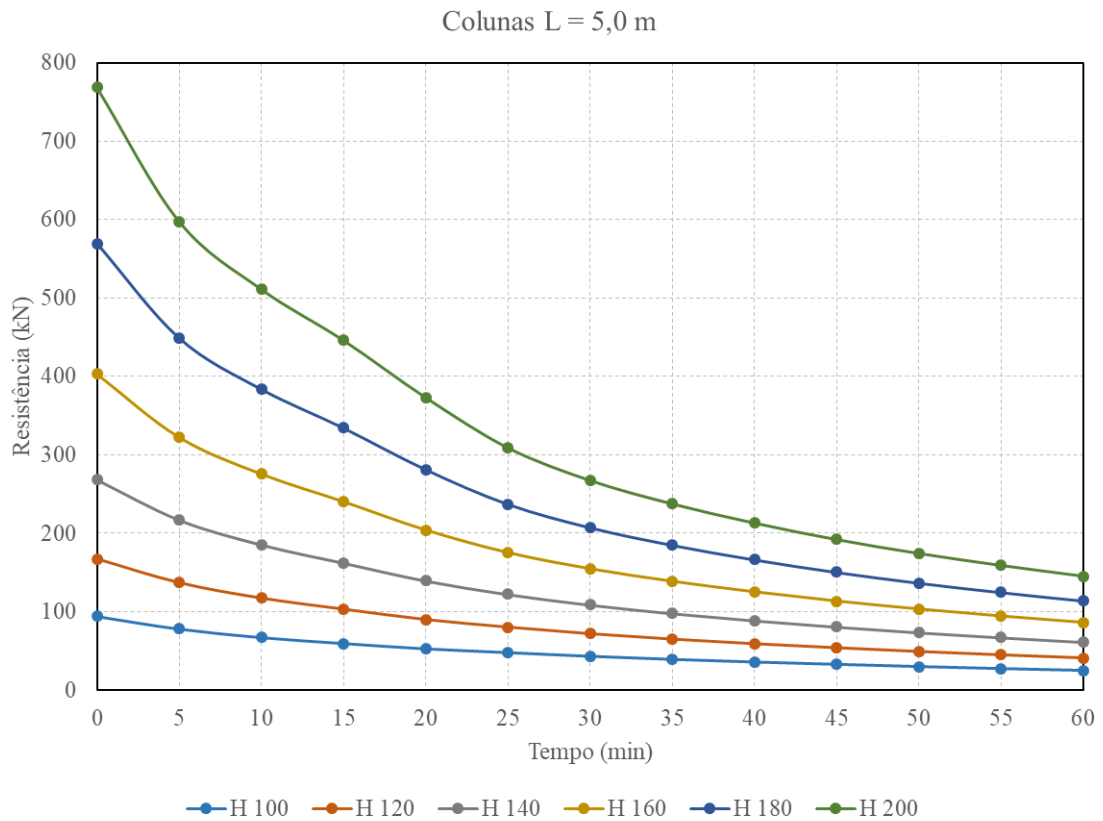


Figura 7 – Esforço resistente de colunas com L = 5,0 m

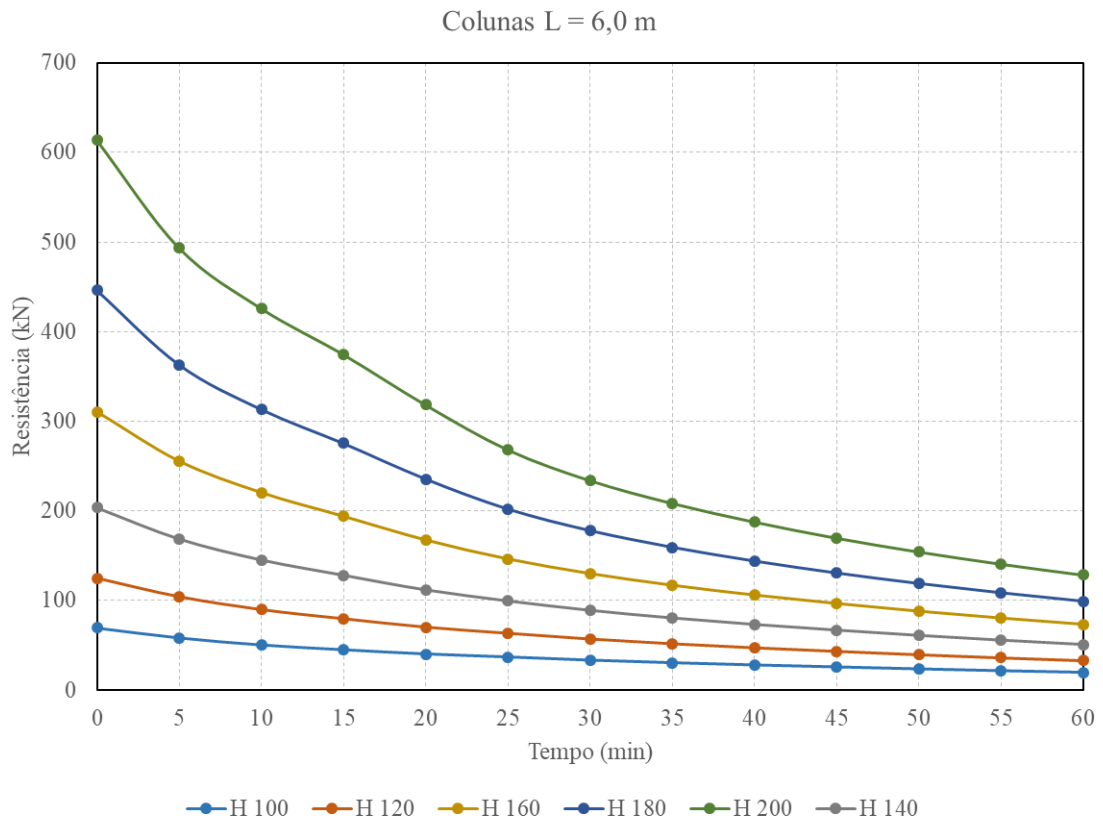
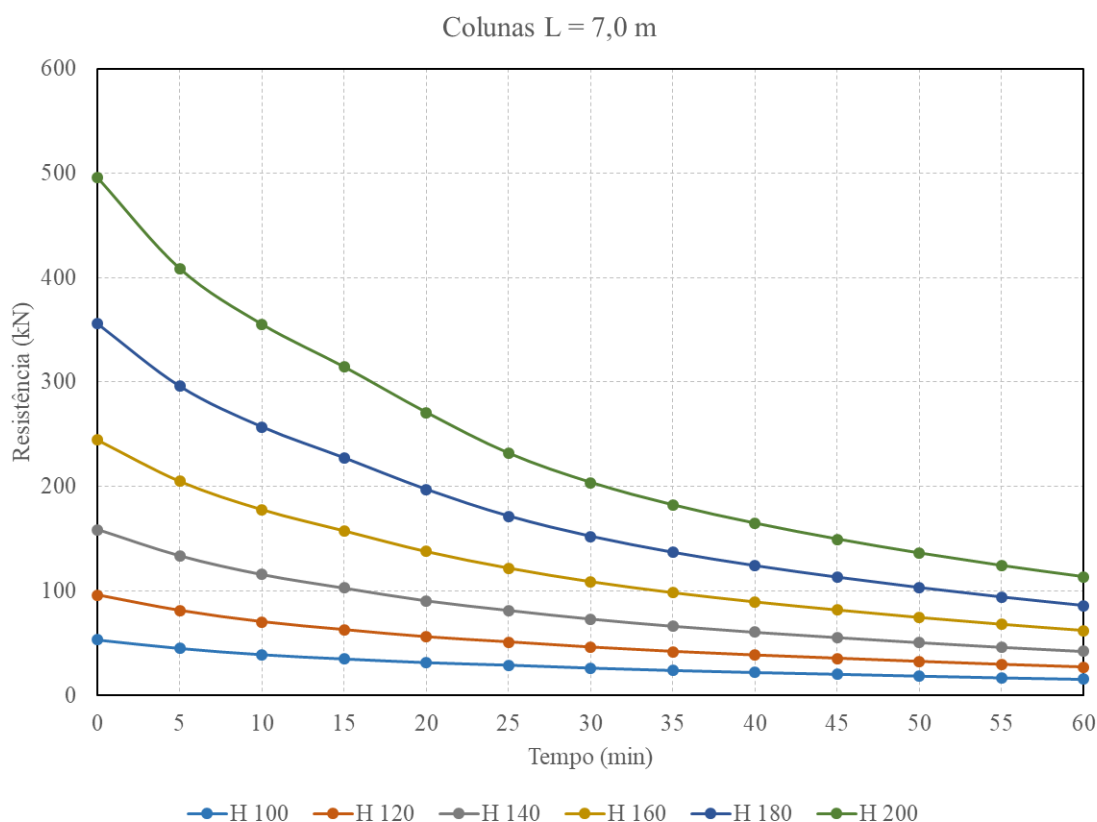


Figura 8 – Esforço resistente de colunas com $L = 6,0$ m**Figura 9** – Esforço resistente de colunas com $L = 7,0$ m

Como esperado, à medida que o comprimento das colunas aumenta, menor o esforço resistente delas. Por meio das figuras acima, percebe-se que em condições de temperatura ambiente, a resistência das colunas aumenta conforme maior a seção transversal. No entanto, para condições de incêndio no tempo de 60 minutos, a resistência das colunas, independente da seção, seguem uma mesma tendência de redução, alcançando sempre valores de resistência inferiores a 200 kN. Com auxílio de planilhas eletrônicas, determinou-se que a perda de resistência para 60 minutos de incêndio, varia de 70 a 85% aproximadamente.

4 Conclusões

Com base nos resultados abordados acima, é possível concluir que o comportamento de flambagem de colunas de aço inoxidável acontece conforme o esperado. Em relação a elevação de temperatura, foi possível perceber que os parâmetros geométricos do perfil das colunas influenciam diretamente na elevação de temperatura, de forma que quanto menor a relação perímetro sobre área, menor a temperatura desenvolvida no perfil e consequentemente maior tempo resistente para evacuação de pessoas no interior de ambientes suportados por colunas de aço inoxidável.

Outro parâmetro que possui grande influência no comportamento de flambagem e esforço resistente de colunas, trata-se do comprimento total. À medida que o comprimento aumenta, independente da seção, menor será o esforço resistente da coluna. Sabendo que o esforço resistente de colunas de aço inoxidável reduz cerca de 70 a 85% para 60 minutos de

incêndio, a determinação do TRRF deve ser feita de forma assertiva para que o dimensionamento de colunas garanta segurança, conforto e economia para a estrutura.

Por fim, conclui-se que o emprego do aço inoxidável em ambientes sujeitos a risco de incêndio, torna-se cada vez mais viável em relação a segurança de pessoas e operações de combate ao incêndio, pois o aço inoxidável proporciona maior resistência mecânica e térmica à edificação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo na execução da pesquisa.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1993-1-2: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design**. Brussels, 2005.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1993-1-4: Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels**. Brussels, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834: Fire resistance tests: elements of building construction: Part 1. General requirements**. Geneva, 1999.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

RODRIGUES, João Paulo Correia; OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão de. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio: Segundo as normas brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. **Design manual for structural stainless steel**. 4. ed. 2017.