

Tema: Proteção das estruturas: corrosão e incêndio

## **DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA CRÍTICA EM PILARES DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Thayná Couto dos Santos Marcelino<sup>1</sup>  
Macksuel Soares de Azevedo<sup>2</sup>  
Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani<sup>3</sup>

### **Resumo**

As alterações nas propriedades mecânicas do aço, devidas às altas temperaturas em incêndio, podem levar ao colapso da estrutura. A utilização de materiais de proteção passiva é uma maneira de proteger o elemento estrutural, aumentando seu tempo de resistência ao fogo e evitando que ele alcance a temperatura de colapso, denominada de temperatura crítica. Para a determinação da espessura de material de proteção, na ausência do cálculo da temperatura crítica, a indústria de proteção passiva utiliza valores fixos de temperatura, como 550 °C para pilares e 620 °C para vigas. Esses valores são utilizados para todos os elementos, sem considerar suas especificidades. Com isso, este trabalho visa comparar, para pilares de aço, os valores fixos de temperatura com valores calculados por uma ferramenta computacional desenvolvida em Linguagem VBA. Um estudo paramétrico foi realizado de forma a avaliar a influência de algumas variáveis. Os resultados mostraram, para os casos estudados, que os valores fixos podem ser conservadores, sendo 28,33% menor que o valor calculado através da ferramenta, mas também podem estar contra a segurança, com a temperatura fixa aproximadamente 30% maior que a calculada. Tais resultados influenciam na segurança e nos custos de proteção, evidenciando a importância do cálculo da temperatura crítica.

**Palavras-chave:** Pilares de aço; Temperatura crítica; Situação de incêndio; Ferramenta computacional.

## **DETERMINATION OF CRITICAL TEMPERATURE IN STEEL COLUMNS IN FIRE SITUATIONS**

### **Abstract**

Changes in the mechanical properties of steel, due to high temperatures in a fire, can cause the collapse of the structure. The use of passive fire protection materials is a way of protecting the structural element by increasing its fire resistance time and preventing it from reaching the collapse temperature, called critical temperature. In the absence of calculating the critical temperature, the passive protection industry uses fixed temperature values, such as 550 °C for columns and 620 °C for beams, to determine the thickness of the protection material. These values are applied to all elements, without considering their specificities. Therefore, this work aims to compare the fixed temperature values for steel columns with the values calculated by a computational tool developed in VBA language. In order to assess the impact of some variables, a parametric study was done. The results demonstrated, for the analyzed cases, that the fixed values can be conservative, being 28,33% lower than the value calculated by the computational tool, but they can also be unfavorable to security, with the fixed temperature



30% higher than the calculated value. Such results have an impact on structural safety and on protection costs, emphasizing the significance of calculating the critical temperature.

**Keywords:** Steel columns; Fire situations; Critical temperature; Computational tool.

<sup>1</sup> Engenheira Civil, Mestranda em Engenharia Civil, Pesquisadora, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira Civil, Doutora em Engenharia de Estruturas, Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

## **1 INTRODUÇÃO**

Durante um incêndio, os materiais que compõem a estrutura de uma edificação sofrem alterações em suas propriedades térmicas e mecânicas, perdendo resistência e rigidez, o que pode ocasionar o colapso da estrutura. A temperatura na qual ocorre o colapso é denominada de temperatura crítica e sua determinação é muito importante, porém pode ser bastante trabalhosa.

Devido a isso, ao longo dos anos, diversos autores se dedicaram ao assunto. Rupert e Schaumann [1] apresentaram uma metodologia para estimar a temperatura crítica em pilares expostos ao fogo e Neves [2] estudou a influência da dilatação térmica também na temperatura crítica de pilares. Já Mesquita et al. [3] apresentaram uma pesquisa numérica e experimental a respeito da temperatura crítica em vigas sem contenção lateral, enquanto Maia et al. [4] estudaram a temperatura crítica de seções sujeitas à flambagem local.

Além disso, Jowsey e Scott [5] explicam que, na ausência de uma determinação adequada da temperatura crítica e com a intenção de simplificar o projeto de estruturas em situação de incêndio, a indústria de proteção passiva ao redor do mundo utiliza valores padronizados de temperatura crítica, tais como: 550 °C para pilares, 620 °C para vigas com três lados expostos ao fogo e 520 °C para perfis tubulares. Esses valores fixos são utilizados para todos os elementos, sem levar em consideração fatores relevantes, como o carregamento da estrutura, flambagem local, o comprimento do elemento e as suas condições de contorno.

Somado a isso, quando se fala dos materiais de revestimento contrafogo, especialmente das tintas intumescentes, atualmente, a espessura a ser aplicada nos elementos estruturais de aço é estabelecida com base nesses valores fixos de temperatura. Essa especificação não é feita por meio de um dimensionamento, o que pode levar a um aumento nos custos de proteção ou fazer com que o elemento fique contra a segurança.

Nesse trabalho, a fim de contribuir com o assunto em questão, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que realiza o cálculo da temperatura crítica de pilares de aço em seção I e H. Um estudo paramétrico foi proposto, alguns exemplos de cálculo foram rodados e os resultados obtidos para esses exemplos foram comparados com os valores fixos de temperatura adotados usualmente.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Ferramenta computacional**

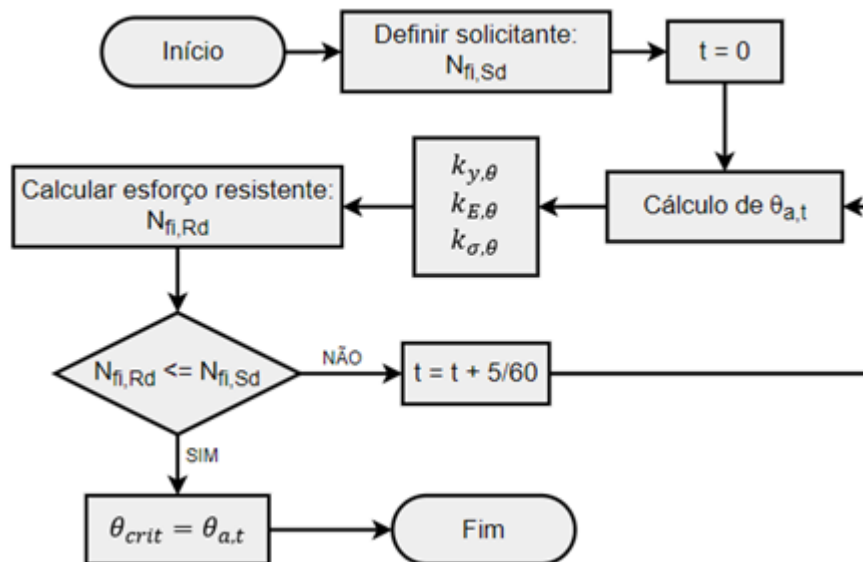
Para realizar o cálculo da temperatura crítica de elementos de aço em situação de incêndio foi desenvolvida uma ferramenta computacional em linguagem Visual Basic for Application (VBA) no ambiente do Microsoft Excel. Essa ferramenta apresenta três módulos: um módulo para verificação em temperatura ambiente, um módulo para verificação em situação de incêndio, conforme procedimentos da ABNT NBR 14323:2013 [6], e um módulo de dimensionamento de material de proteção contra fogo.

Toda a implementação computacional foi feita com base nos procedimentos da ABNT NBR 14323:2013, sendo possível realizar a verificação e o dimensionamento do material de

proteção para elementos comprimidos, flexo-comprimidos e fletidos em torno dos eixos de maior e menor inércia.

No último módulo, uma das etapas que o programa realiza é o cálculo da temperatura crítica do elemento estrutural. Nesse caso o usuário fornece os valores dos esforços solicitantes e a temperatura é calculada através de um processo incremental, considerando-se que o colapso da estrutura ocorre quando o esforço solicitante de cálculo em incêndio se iguala ao esforço resistente de cálculo também em incêndio. Esse procedimento pode ser melhor compreendido na forma de fluxograma de cálculo, conforme Figura 1. A partir dessa temperatura crítica calculada o programa possibilita que o usuário encontre uma espessura de material de proteção para aplicar no elemento.

Figura 1. Fluxograma de cálculo para a obtenção da temperatura crítica (autores).



## 2.2 Estudo paramétrico

A fim de realizar uma análise comparativa entre os valores de temperatura crítica calculados pelo programa computacional e os valores fixos prescritos por normas foi realizado um estudo paramétrico. Para isso, algumas variáveis de estudo foram definidas e sua influência sobre a temperatura crítica do elemento estrutural foi observada.

As variáveis do estudo paramétrico foram o índice de esbeltez reduzido em temperatura ambiente ( $\lambda_0$ ), o nível de carregamento e o fator de massividade do perfil, sendo que também foi analisada a influência da flambagem local nos perfis. Na Tabela 1 são apresentados os modelos de parametrização, obtidos a partir das variáveis do estudo em relação aos modelos considerados padrões (modelo Nº 1 de perfil compacto e modelo Nº 17 de perfil não compacto), de acordo com os seguintes intervalos:

- Índice de esbeltez reduzido: intervalo de 0,5 a 1,75, em incrementos de 0,25;

- Nível de carregamento, definido como a relação entre o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio e o esforço resistente de cálculo em temperatura ambiente: intervalo de 20 até 70%, em incrementos de 10%;
- Fator de massividade: intervalo de 104,50 m<sup>-1</sup> até 268,08 m<sup>-1</sup>;
- Flambagem local: perfil compacto (W200 x 35,9) e perfil com possibilidade de ocorrência de flambagem local (W310 x 44,5).

Tabela 1. Modelos de pilares para o estudo paramétrico.

Nº	Índ. Esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ )	Nível de carregamento (%)	Fator de massividade (4 lados expostos)	
1	1,00	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
2	0,50	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
3	0,75	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
4	1,25	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
5	1,50	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
6	1,75	50	W 200 x 35,9 (H)	226,09
7	1,00	20	W 200 x 35,9 (H)	226,09
8	1,00	30	W 200 x 35,9 (H)	226,09
9	1,00	40	W 200 x 35,9 (H)	226,09
10	1,00	60	W 200 x 35,9 (H)	226,09
11	1,00	70	W 200 x 35,9 (H)	226,09
12	1,00	50	W 250 x 115,0 (H)	104,50
13	1,00	50	W 250 x 80,0 (H)	146,52
14	1,00	50	HP 200 x 53,0 (H)	175,54
15	1,00	50	W 150 x 37,1 (H)	189,76
16	1,00	50	W 200 x 26,6	268,08
17	1,00	50	W 310 x 44,5	220,36
18	0,50	50	W 310 x 44,5	220,36
19	0,75	50	W 310 x 44,5	220,36
20	1,25	50	W 310 x 44,5	220,36
21	1,50	50	W 310 x 44,5	220,36
22	1,75	50	W 310 x 44,5	220,36
23	1,00	20	W 310 x 44,5	220,36
24	1,00	30	W 310 x 44,5	220,36
25	1,00	40	W 310 x 44,5	220,36
26	1,00	60	W 310 x 44,5	220,36
27	1,00	70	W 310 x 44,5	220,36
28	1,00	50	W 610 x 174,0	111,17
29	1,00	50	W 530 x 109,0	133,90
30	1,00	50	W 530 x 85,0	157,18
31	1,00	50	W 530 x 82,0	177,19
32	1,00	50	W 410 x 38,8	263,18

Ao todo, 32 modelos numéricos foram rodados na ferramenta computacional. Em todos eles, foram mantidos constantes o tipo de aço (ASTM A572 Gr.50) e as condições de contorno dos pilares (extremidades rotuladas), permitindo que apenas os parâmetros selecionados fossem avaliados.

### **2.3 Valores fixos de temperatura prescritos por entidades e normas**

Alguns valores fixos de temperatura são usualmente sugeridos pela indústria de proteção passiva para a determinação da espessura do material de proteção. A Association for Specialist Fire Protection em suas primeiras edições do “Yellow Book” [7] especifica valores limites de 550 °C para pilares e 620 °C para vigas com um dos lados suportando uma laje de concreto ou uma laje mista.

Outras normas ao redor do mundo prescrevem diferentes valores fixos de temperatura. A Loss Prevention Standard LPS 1107: Issue 1.2 [8] determina que esse valor pode ser assumido como de 550 °C para vigas e pilares. A IT08 do Corpo de Bombeiros de São Paulo [9] adota esse mesmo valor, porém especifica que não pode ser considerado para perfis cujo estado limite último em temperatura ambiente seja o de instabilidade local elástica.

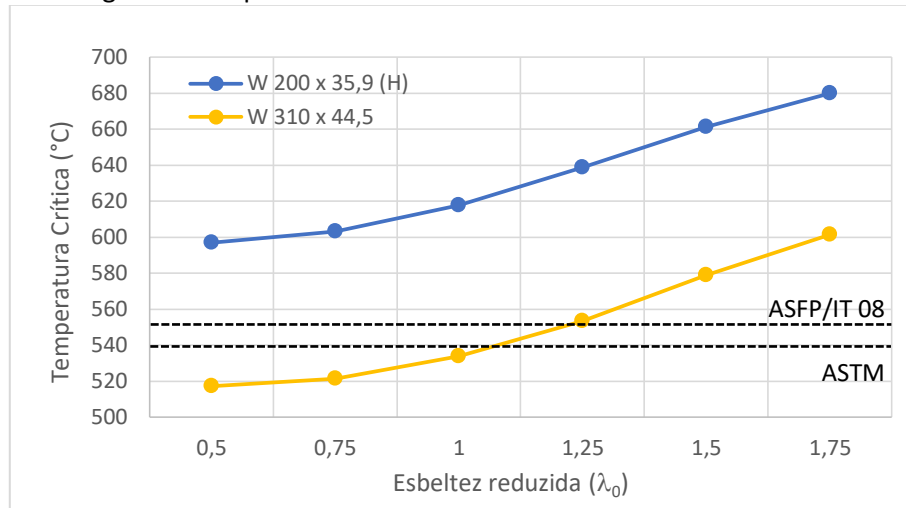
O Underwriters Laboratories (UL) [10], responsável pela certificação de diversos materiais de proteção passiva, prescreve um valor fixo de 538 °C para pilares e 593 °C para vigas. Além disso, o Eurocódigo EN 1993-1-2 [11] também apresenta, em seus anexos nacionais de Portugal, Luxemburgo, Finlândia e outro países, valores fixos de temperatura que também podem ser utilizados. O anexo de Portugal, por exemplo, determina que, para elementos tracionados e vigas sem flambagem lateral com torção, pode ser utilizada uma temperatura de 540 °C ou 525 °C, dependendo da categoria do edifício, ou 500 °C para qualquer outra situação.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1 Índice de esbeltez reduzido**

A Figura 2 mostra o gráfico de temperatura crítica em função da esbeltez reduzida, mantendo-se constante os demais parâmetros. As curvas, em ambos os casos, são crescentes para o intervalo analisado. Com isso, observa-se a tendência de aumento da temperatura crítica com o aumento do índice de esbeltez reduzida do perfil. A taxa de utilização foi mantida fixa em 50% nesta análise, dessa maneira, o valor do esforço solicitante diminui na mesma proporção que o esforço resistente.

Figura 2. Temperatura crítica versus índice de esbelteza reduzido.



As Tabelas 2 e 3 exibem as diferenças percentuais entre o valor calculado de temperatura crítica e os valores prescritos, para os perfis compacto e não compacto, respectivamente. Constam também nas tabelas, o índice de esbelteza reduzido, a taxa de aproveitamento, o perfil analisado, o esforço resistente em temperatura ambiente e o esforço solicitante em situação de incêndio e a temperatura crítica calculada pelo programa computacional. Ao comparar os valores de temperatura crítica obtidos através da ferramenta computacional com os valores fixos prescritos, encontrou-se diferenças percentuais significativas, como pode ser observado.

No caso do perfil compacto, as temperaturas encontradas para todos os valores de índice de esbelteza reduzido foram maiores que as temperaturas fixas consideradas pela ASFP, ASTM e IT08, com uma máxima diferença percentual de 20,89%. Esse resultado indica que os valores fixos usuais são mais conservadores que os valores encontrados ao realizar o cálculo da temperatura crítica através da ferramenta computacional.

Tabela 2. Diferenças entre os valores calculados de temperatura crítica e os prescritos para  $\lambda_0$  (perfil compacto).

$\lambda_0$	Nível de carreg. (%)	Perfil	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp. Crítica (°C)	ASFP/IT08 (550 °C)	ASTM (538 °C)
0,50	50	W 200 x 35,9 (H)	1290,28	645,14	597,05	7,88%	9,89%
0,75	50	W 200 x 35,9 (H)	1132,55	566,28	603,24	8,83%	10,81%
1,00	50	W 200 x 35,9 (H)	943,82	471,91	617,83	10,98%	12,92%
1,25	50	W 200 x 35,9 (H)	744,26	372,13	638,75	13,89%	15,77%
1,50	50	W 200 x 35,9 (H)	558,46	279,23	661,16	16,81%	18,63%
1,75	50	W 200 x 35,9 (H)	410,80	205,40	680,09	19,13%	20,89%

Já considerando o perfil não compacto, os resultados mostram que metade das temperaturas calculadas foram menores que os valores fixos, indicando que algumas situações de carregamento, perfis e condições de contorno podem estar contra a segurança. Já a outra

metade das temperaturas calculadas foram maiores que as temperaturas fixas, estando a favor da segurança, como para  $\lambda_0 = 1,75$ , em que a temperatura foi 601,44 °C.

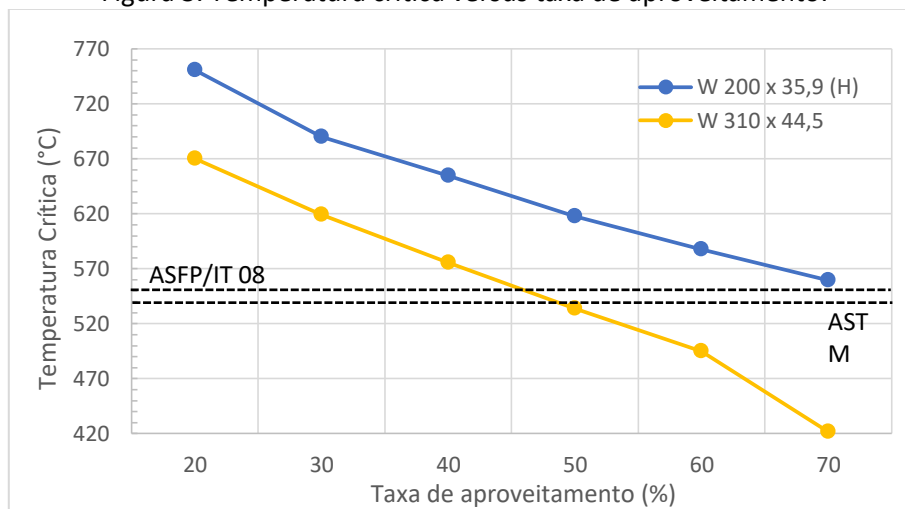
Tabela 3. Diferenças entre os valores calculados da temperatura crítica e os das prescrições para diferentes  $\lambda_0$  (perfil não compacto).

$\lambda_0$	Nível de carreg. (%)	Perfil	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp. Crítica (°C)	ASFP/IT08 (550 °C)	ASTM (538 °C)
0,50	50	W 310 x 44,5	1564,91	782,46	517,11	-6,36%	-4,04%
0,75	50	W 310 x 44,5	1373,36	686,68	521,37	-5,49%	-3,19%
1,00	50	W 310 x 44,5	1144,24	572,12	533,81	-3,03%	-0,78%
1,25	50	W 310 x 44,5	905,09	452,55	553,48	0,63%	2,80%
1,50	50	W 310 x 44,5	676,45	338,23	578,74	4,97%	7,04%
1,75	50	W 310 x 44,5	497,62	248,81	601,44	8,55%	10,55%

### 3.2 Nível de carregamento

No caso da taxa de aproveitamento, considerou-se valores de 20 a 70%, em incrementos de 10%. Observa-se na Figura 3 o gráfico da temperatura crítica versus taxa de aproveitamento. Com já foi dito, a taxa de aproveitamento é considerada como sendo a relação entre o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio e o esforço resistente de cálculo em temperatura ambiente. As curvas obtidas, tanto para o perfil compacto quanto para o não compacto, são decrescentes, evidenciando que, quanto maior é o nível de solicitação, menor é a temperatura crítica. Esse resultado se mostra coerente, visto que, quanto mais solicitado está um perfil, menor será a sua temperatura de colapso.

Figura 3. Temperatura crítica versus taxa de aproveitamento.



A Tabela 4 e a Tabela 5 exibem as diferenças percentuais encontradas entre os valores de temperatura crítica. No caso dos perfis compactos, o cálculo via ferramenta computacional encontrou valores maiores e, para o nível de carregamento de 20%, essa temperatura foi aproximadamente 30% maior que a temperatura crítica fixa de 538 °C.

No caso do perfil suscetível à flambagem local, novamente, metade dos pontos tiveram temperatura crítica maior e a outra metade teve temperatura crítica menor do que as prescritas por normas. Esse resultado é importante, pois evidencia a relevância de se considerar a flambagem local dos elementos. Para o ASFP e para a IT08, a maior diferença percentual encontrada foi de 17,91% em um nível de solicitação de 20%, enquanto a temperatura calculada passa a ser 30,48% menor que a temperatura fixa para o nível de solicitação de 70%, algo que exige atenção.

Tabela 4. Diferenças entre os valores calculados da temperatura crítica e os das prescrições para diferentes  $\mu$  (perfil compacto).

Nível de carregamento $\mu$ (%)	Perfil	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp. Crítica (°C)	ASFP/IT08 (550 °C)	ASTM (538 °C)
20	W 200 x 35,9 (H)	943,82	188,76	750,66	26,73%	28,33%
30	W 200 x 35,9 (H)	943,82	283,15	690,06	20,30%	22,04%
40	W 200 x 35,9 (H)	943,82	377,53	654,83	16,01%	17,84%
50	W 200 x 35,9 (H)	943,82	471,91	617,83	10,98%	12,92%
60	W 200 x 35,9 (H)	943,82	566,29	587,39	6,37%	8,41%
70	W 200 x 35,9 (H)	943,82	660,67	559,26	1,66%	3,80%

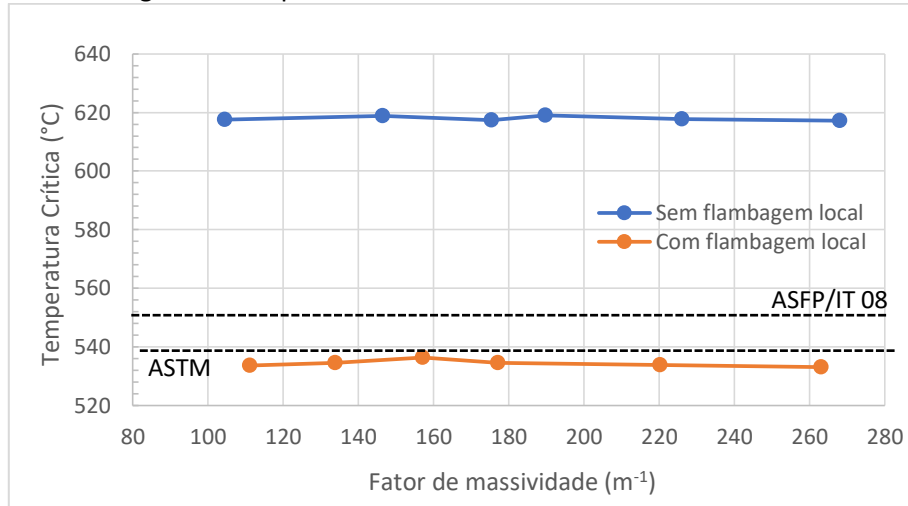
Tabela 5. Diferenças entre os valores calculados da temperatura crítica e os das prescrições para diferentes  $\mu$  (perfil não compacto).

Nível de carregamento $\mu$ (%)	Perfil	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp. Crítica (°C)	ASFP/IT08 (550 °C)	ASTM (538 °C)
20	W 310 x 44,5	1144,24	228,85	670,02	17,91%	19,70%
30	W 310 x 44,5	1144,24	343,27	618,96	11,14%	13,08%
40	W 310 x 44,5	1144,24	457,70	575,29	4,40%	6,48%
50	W 310 x 44,5	1144,24	572,12	533,81	-3,03%	-0,78%
60	W 310 x 44,5	1144,24	686,54	495,04	-11,10%	-8,68%
70	W 310 x 44,5	1144,24	800,97	421,53	-30,48%	-27,63%

### 3.3 Fator de massividade

A Figura 4 exibe as curvas de temperatura crítica versus fator de massividade. É possível observar que, para todos os fatores de massividade considerados, a temperatura crítica se mantém em valores bem próximos, formando uma reta quase constante. Esse comportamento se repete tanto para os perfis compactos quanto para os não compactos. Além disso, esse resultado mostra que, apesar de o fator de massividade ser uma variável muito importante quando se fala em estruturas em situação de incêndio, ele não exerce tanta influência sobre a temperatura crítica como os demais fatores analisados.

Figure 4. Temperatura crítica versus fator de massividade.



No caso dos perfis compactos, as temperaturas críticas obtidas por meio da ferramenta computacional foram, em todos os casos, maiores que as temperaturas prescritas, com a menor diferença percentual sendo 10,89%. Esse resultado pode ser visto na Tabela 6. Na Tabela 7 observa-se que, para os perfis não compactos, os resultados foram contrários. Todos os perfis apresentaram temperatura crítica menor que as temperaturas fixas, com a maior diferença percentual sendo de -3,18%.

Tabela 6. Diferenças entre valores calculados de temperatura crítica e prescritos, para diferentes fatores de massividade (perfil compacto).

$\lambda_0$	Nível de carreg. (%)	Fator de massividade (4 lados expostos)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp Crítica (°C)	ASFP/IT18 550 °C	ASTM 538 °C	
1	50	W 250 x 115,0	104,50	3014,25	1507,13	617,55	10,94%	12,88%
1	50	W 250 x 80,0	146,52	2103,31	1051,66	618,87	11,13%	13,07%
1	50	HP 200 x 53,0	175,54	1405,12	702,56	617,31	10,90%	12,85%
1	50	W 150 x 37,1	189,76	986,19	493,10	619,09	11,16%	13,10%
1	50	W 200 x 35,9	226,09	943,82	471,91	617,83	10,98%	12,92%
1	50	W 200 x 26,6	268,08	705,70	352,85	617,22	10,89%	12,83%

Tabela 7. Diferenças entre valores calculados de temperatura crítica e prescritos, para diferentes fatores de massividade (perfil não compacto).

$\lambda_0$	Nível de carreg. (%)	Fator de massividade (4 lados expostos)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{fi,Sd}$ (kN)	Temp Crítica (°C)	ASFP/IT08 550 °C	ASTM 538 °C	
1	50	W 610 x 174,0	111,17	4510,41	2255,21	533,55	-3,08%	-0,83%
1	50	W 530 x 109,0	133,90	2782,99	1391,50	534,50	-2,90%	-0,65%
1	50	W 530 x 85,0	157,18	2042,47	1021,24	536,34	-2,55%	-0,31%
1	50	W 530 x 82,0	177,19	1942,71	971,36	534,56	-2,89%	-0,64%
1	50	W 310 x 44,5	220,36	1144,24	572,12	533,81	-3,03%	-0,78%
1	50	W 410 x 38,8	263,18	900,71	450,36	533,04	-3,18%	-0,93%

#### **4 CONCLUSÃO**

O objetivo principal desse trabalho foi automatizar o cálculo da temperatura crítica de pilares de aço por meio de elaboração de um programa computacional e comparar o seu resultado com valores prescritos de temperatura usualmente utilizados no dimensionamento de materiais de proteção contra fogo. Para essa comparação, foi proposto um estudo paramétrico que levou em consideração quatro fatores: índice de esbeltez reduzido, nível de carregamento do perfil, fator de massividade e a possibilidade de ocorrência ou não de flambagem local no perfil.

Todos esses fatores foram variados a fim de observar sua influência na temperatura crítica de pilares de aço. Notou-se que, no caso do índice de esbeltez reduzido, a maior temperatura crítica calculada foi 20,89% maior que a temperatura prescrita pela ASTM, para o perfil compacto, e a menor temperatura calculada foi 6,36% menor que a temperatura prescrita pela ASFP e pela IT08/CB-SP, para o perfil não compacto.

No caso do nível de carregamento, observou-se uma temperatura calculada 28,33% maior do que a temperatura crítica prescrita pela ASTM e, em contrapartida, também se obteve uma temperatura cerca de 30,48% menor que os valores fixos usuais, para perfis compactos e não compactos, respectivamente.

Já o fator de massividade foi o parâmetro que menos exerceu influência sobre a temperatura crítica. Para todos os valores de fator de massividade considerados, a temperatura crítica se manteve praticamente constante, sendo que para os perfis compactos os valores foram maiores que as temperaturas padrões e para os perfis não compactos esses valores foram menores.

Ressalta-se que esse comportamento foi observado em todos os casos: as temperaturas calculadas por meio do programa computacional só foram menores que as temperaturas prescritas no caso de perfis não compactos. É importante ressaltar essa conclusão, pois os valores fixos de temperatura são considerados para todos os perfis, sem levar em conta os fenômenos de instabilidade local e, em alguns casos, essa prática pode levar a um resultado contra a segurança.

Da mesma maneira, observa-se que essa prática também pode levar a valores bastante conservadores, visto que para os perfis compactos, todos os valores encontrados por meio do programa computacional foram maiores que os valores prescritos para essa temperatura.

Assim, é possível concluir que o cálculo adequado da temperatura crítica é de suma importância, visto que leva em consideração todos os fatores que influenciam o comportamento em situação de incêndio, evitando que ocorra situações que estejam contra a segurança ou que estejam demasiadamente conservadoras, o que poderia aumentar os custos de proteção e de obra.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e à CAPES pelo apoio prestado durante o desenvolvimento desta pesquisa, e também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O segundo autor também agradece à Agência do Governo Federal do Brasil, CNPq, pela bolsa de produtividade em pesquisa número 309741/2020-3.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Rubert, A. & Schaumann, P. Critical temperatures of steel columns exposed to fire. Fire Safety Journal. 1998; v. 13, no. 1, p. 39-44.
- 2 Neves, I. C. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. Fire Safety Journal. 1995; vol. 25, no. 3, p. 211-227.
- 3 Mesquita, L. M. R; Piloto, P. G. A.; Vaz, M. A. P. & Vila Real, P. M. M. Experimental and numerical research on the critical temperature of laterally unrestrained steel I beams. Journal of Constructional Steel Research. 2005; vol. 61, no. 10, p. 1435-1446.
- 4 Maia, E.; Couto, C.; Vila Real, P. M. M. & Lopes, N. Critical temperatures of class 4 cross-sections, Journal of Constructional Steel Research. 2016; vol. 121, p. 370-382.
- 5 Jowsey, A. & Scott, P. An overview of optimizing passive fire protection using a limiting temperature by structural assessment. Journal Of Structural Fire Engineering. 2014; vol. 5, no. 1, p. 25-33.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.
- 7 Association for Specialist Fire Protection. Fire protection for structural steel in buildings. ASFP, 93 p, 2010.
- 8 Loss Prevention Standard: LPS 1107: Issue 1.2: Requirements, tests and methods of assessment of passive fire protection systems for structural steelwork. BRE Group Ltd., 2014.
- 9 Instrução Técnica N° 8/2018: Segurança estrutural contra incêndio. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2019.
- 10 UL LLC (2018). Best Practice Guide for Passive Fire Protection for Structural Steelwork. UL LLC, 24 p.
- 11 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. 2005.