



**GUSTAVO PEDROSO BERNARDES  
LYNOLN ALLYSON FERREIRA COSTA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA VIGA DE AÇO  
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM E SEM  
REVESTIMENTO**

**LAVRAS –MG**

**2022**

**GUSTAVO PEDROSO BERNARDES  
LYNCOLN ALLYSON FERREIRA COSTA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO COM E SEM REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do Curso  
de Engenharia Civil, para a obtenção do  
título de Bacharel.

Prof. Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

**GUSTAVO PEDROSO BERNARDES  
LYNCOLN ALLYSON FERREIRA COSTA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA VIGA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO COM E SEM REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do Curso  
de Engenharia Civil, para a obtenção do  
título de Bacharel.

APROVADO em 12/09/2022

Prof. Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues UFLA

Prof. Dr. Ígor José Mendes Lemes UFLA

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges UFLA

Prof. Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

## RESUMO

As estruturas em aço são cada vez mais utilizadas na construção civil, por apresentar maior capacidade resistente e capacidade de vencer grandes vãos e também proporcionam mais organização e limpeza no canteiro de obras, por outro lado, esse material apresenta perda de rigidez e resistência quando exposto a altas temperaturas. O incêndio tem se tornado uma preocupação comum na construção civil, principalmente quando se fala sobre segurança à vida humana, a edificação e aos bens materiais. Em vista disso, o presente trabalho propõe uma análise estrutural de uma viga de aço em situação de incêndio, onde também é estudado um revestimento em argamassa de vermiculita para proteger o aço e reduzir a taxa de elevação de temperatura da viga analisada. O desempenho estrutural da viga analisada em situação de incêndio foi baseado nos procedimentos normativos propostos pela norma ABNT NBR 14323:2013, onde foi realizada a avaliação da resistência ao momento fletor e ao esforço cortante da viga de aço em decorrência da elevação da temperatura do aço durante o incêndio. Com os resultados obtidos foi possível perceber a importância da proteção a elementos estruturais que estão sujeitos a ser expostos a altas temperaturas, visto que, o revestimento utilizado aumentou em 45 minutos o tempo necessário até que o momento fletor resistente e o esforço cortante resistente atingissem a temperatura crítica, levando a estrutura ao colapso. Sendo assim, a argamassa de vermiculita possibilita maior tranquilidade ao realizar a evacuação do edifício.

**Palavras-chave:** Proteção. Temperatura. Estruturas.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Incêndio.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelo de incêndio padrão .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Propriedades mecânicas das estruturas de aço .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>Propriedades térmicas das estruturas de aço .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Calor específico (<math>ca</math>) .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Alongamento.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Condutividade térmica (<math>\lambda a</math>).....</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Fator de massividade .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Temperatura crítica .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Elevação da temperatura do aço em estruturas sem revestimento contra fogo .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Elevação da temperatura do aço em estruturas com revestimento contra fogo .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4</b>	<b>Material de revestimento contra fogo .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5</b>	<b>Resistências do elemento estrutural de aço em situação de incêndio .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço sob incêndio.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Barras submetidas à momento fletor .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Barras submetidas à esforço cortante .....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Fator de massividade .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Curvas de elevação de temperatura do aço .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Curva de elevação da temperatura do aço sem revestimento .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Curva de elevação da temperatura do aço com revestimento .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Custos da aplicação de revestimento contra fogo .....</b>	<b>32</b>

<b>4.3</b>	<b>Fatores de redução do aço .....</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Temperatura Crítica .....</b>	<b>36</b>
<b>4.5</b>	<b>Curvas das resistências ao momento fletor durante incêndio.....</b>	<b>36</b>
<b>4.6</b>	<b>Curvas das resistências ao esforço cortante durante incêndio .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aço é um material amplamente utilizado na construção civil, se apresentando como uma das melhores alternativas construtivas da atualidade e demonstrando sua importância econômica e sustentável para o mundo todo. Sua utilização permite inovações tecnológicas no ramo da construção civil, como grandes vãos livres e fundações de estacas metálicas, além de permitir obras mais limpas, eficientes e com menor geração de resíduos de impacto ambiental no canteiro de obras. Além disso, o uso de perfis de aço, que possuam seções transversais com áreas reduzidas, apresenta uma vantajosa relação entre sua capacidade resistente, quando comparado ao seu peso.

Em vista desse aumento na utilização do aço como principal elemento estrutural de diversos edifícios, este material necessita apresentar boa margem de segurança quando exposto a altas temperaturas, como durante um incêndio. Pois, assim como todos os outros materiais estruturais, o aço apresenta perda de resistência e rigidez quando submetido ao aumento de temperatura.

Nesse sentido, os revestimentos de proteção térmica surgem como uma alternativa para reduzir o aumento de temperatura das estruturas de aço durante um incêndio, e assim, atrasar a queda de suas principais propriedades mecânicas. Em vista disso, para que se diminua o risco de um colapso que venha afetar diretamente a vida de pessoas e a perda patrimonial, as estruturas de aço necessitam de uma proteção passiva contra incêndio. Sendo assim, tal material de revestimento busca auxiliar na manutenção da integridade do elemento estrutural por um maior período de tempo, possibilitando assim a evacuação dos ocupantes do edifício, a segurança dos operadores de equipamentos no combate ao incêndio e, conseqüentemente, menores danos às edificações vizinhas.

O objetivo desse trabalho é analisar o comportamento estrutural de uma viga de aço, composta por aço ASTM A572 Grau 50, perfil W 150x13,0, sem revestimento e com revestimento de argamassa de vermiculita, quando exposta a altas temperaturas oriundas de um possível incêndio com duração de 60 minutos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Incêndio

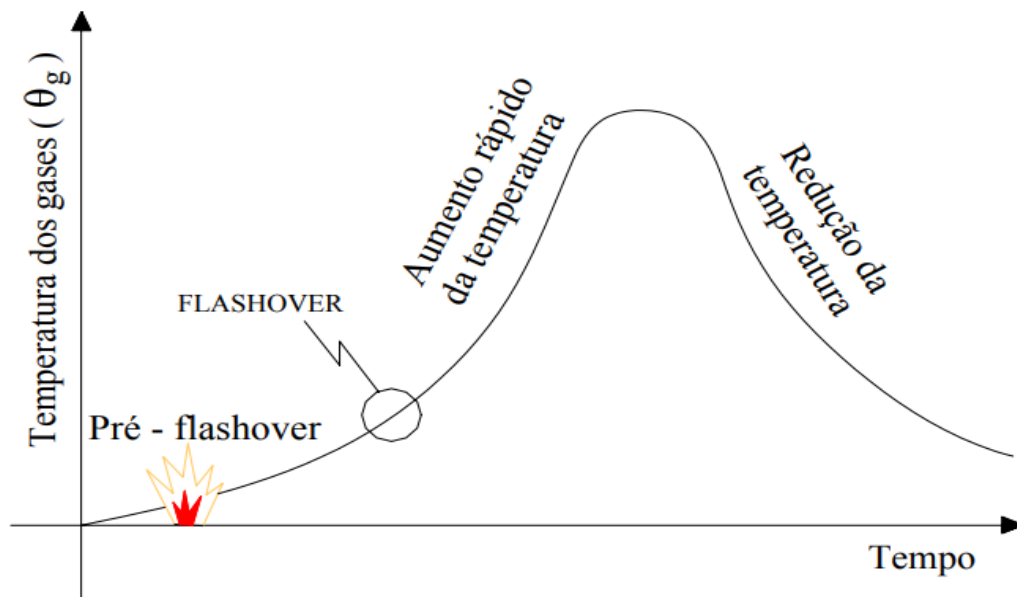
Segundo Campêlo (2008), o incêndio é definido como o acontecimento de um processo de combustão em um local que não foi preparado ou não está preparado para este acontecimento. A reação química de combustão compreende na oxidação da matéria que está em aquecimento e sendo o combustível pelo agente oxidante, normalmente o próprio oxigênio presente no ar, havendo emissão de calor, fumaça, luz e outros gases que também servirão como combustível, colaborando para o aumento do incêndio.

De acordo com Paiva (2018), a transferência de calor para a estrutura acontece por convecção e radiação, sendo a convecção um processo em que existe a movimentação dos gases dentro do ambiente e ao aquecer esses gases, sua densidade diminui, fazendo com que esses gases subam e troquem calor com a estrutura. Já a radiação é um processo no qual a fonte de calor passa a emitir ondas eletromagnéticas para a estrutura, aumentando a sua temperatura. A transferência de calor também pode ocorrer por condução, onde as moléculas expostas ao ambiente elevam sua temperatura e transfere o calor para moléculas vizinhas que estejam com temperatura mais baixa.

O aumento da temperatura em elementos estruturais causa perdas de resistência, que podem ser reversíveis ou não, dependendo da intensidade deste aumento. A principal característica de um incêndio, relacionado a um elemento estrutural, de acordo com Martins (2000), é a relação entre a temperatura dos gases e o tempo de duração do incêndio, com essa relação gera-se uma curva, ilustrada na Figura 1, onde é possível calcular a máxima temperatura alcançada pelas peças estruturais e conseqüentemente sua capacidade resistente a altas temperaturas.



**Figura 1** – Curva Temperatura dos gases x Tempo.



Fonte: MARTINS (2000).

A curva real de incêndio, ainda segundo Martins (2000), apresenta um trecho inicial indicado pelo início da inflamação, onde a temperatura cresce gradualmente. Essa fase é nomeada como *pré-flashover* e não apresenta riscos à vida humana e nem para a estrutura. Com a continuação do incêndio, tem-se um crescimento brusco na inclinação da curva, onde a inflamação é generalizada e toda carga combustível do ambiente entra em ignição, este instante é denominado de *flashover*. A partir deste instante a temperatura dos gases se eleva rapidamente até que se alcance a temperatura máxima do incêndio, após toda a carga combustível ser consumida, a temperatura dos gases começa a reduzir gradativamente.

## 2.2 Modelo de incêndio padrão

A curva de incêndio padrão, segundo Silva (2001), tem a característica de possuir apenas um ramo ascendente, considerando-se um crescimento contínuo da temperatura dos gases, sendo assim, ela não depende de características da carga de incêndio ou do ambiente, enquanto uma curva real de incêndio depende de características específicas de um determinado ambiente.

Ainda que a curva de incêndio padrão não corresponda a uma curva de incêndio real, ela pode ser utilizada para o fornecimento de padrões de projeto. A ABNT NBR 14432:2001, juntamente com Azevedo (2007), trazem de forma simplificada um método de dimensionamento para estruturas de aço, em que a temperatura dos gases é dada pela Equação 1:

$$\theta_{g,t} = \theta_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Sendo:

$\theta_{g,t}$  é a temperatura dos gases em graus Celsius para um instante  $t$  (°C);

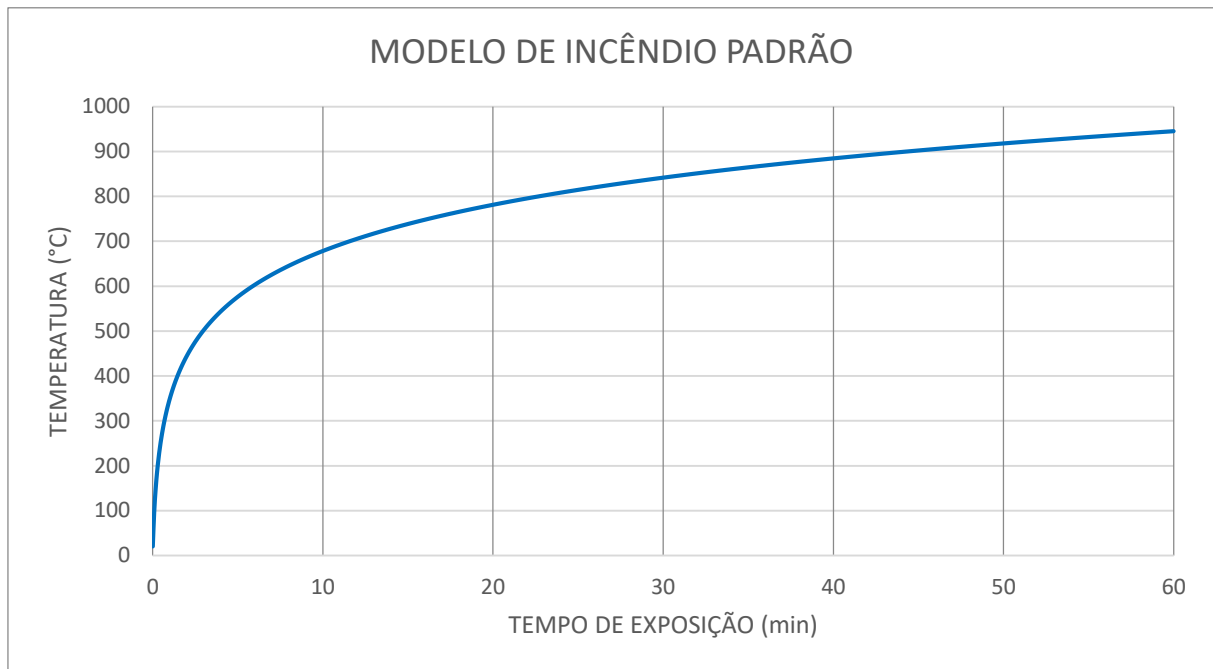
$\theta_0$  é a temperatura ambiente inicial (20°C);

$t$  é o tempo decorrido em minutos (min).

A Tabela 1 demonstra alguns valores obtidos de acordo com a equação anterior. A curva do modelo de incêndio padrão com duração de 60 minutos é apresentada na Figura 2.

**Tabela 1** – Temperatura dos gases para incêndio padrão.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_g</math> (°C)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>20,00</b>
<b>120</b>	<b>2</b>	<b>444,50</b>
<b>240</b>	<b>4</b>	<b>543,89</b>
<b>360</b>	<b>6</b>	<b>603,12</b>
<b>480</b>	<b>8</b>	<b>645,46</b>
<b>600</b>	<b>10</b>	<b>678,43</b>
<b>720</b>	<b>12</b>	<b>705,44</b>
<b>840</b>	<b>14</b>	<b>728,31</b>
<b>960</b>	<b>16</b>	<b>748,15</b>
<b>1080</b>	<b>18</b>	<b>765,67</b>
<b>1200</b>	<b>20</b>	<b>781,35</b>
<b>1320</b>	<b>22</b>	<b>795,55</b>
<b>1440</b>	<b>24</b>	<b>808,52</b>
<b>1560</b>	<b>26</b>	<b>820,45</b>
<b>1680</b>	<b>28</b>	<b>831,50</b>
<b>1800</b>	<b>30</b>	<b>841,80</b>
<b>1920</b>	<b>32</b>	<b>851,43</b>
<b>2040</b>	<b>34</b>	<b>860,48</b>
<b>2160</b>	<b>36</b>	<b>869,01</b>
<b>2400</b>	<b>40</b>	<b>884,74</b>
<b>2520</b>	<b>42</b>	<b>892,03</b>
<b>2640</b>	<b>44</b>	<b>898,98</b>
<b>2760</b>	<b>46</b>	<b>905,62</b>
<b>2880</b>	<b>48</b>	<b>911,98</b>
<b>3000</b>	<b>50</b>	<b>918,08</b>
<b>3120</b>	<b>52</b>	<b>923,95</b>
<b>3240</b>	<b>54</b>	<b>929,59</b>
<b>3360</b>	<b>56</b>	<b>935,02</b>
<b>3480</b>	<b>58</b>	<b>940,27</b>
<b>3600</b>	<b>60</b>	<b>945,34</b>

**Figura 2** – Curva modelo de incêndio padrão.

Fonte: Dos autores (2022).

### 2.3 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

A norma ABNT NBR 14432:2001 é responsável por apresentar as orientações para elementos estruturais e de compartimentação em situação de incêndio para evitar o colapso estrutural da edificação. Para isso, as definições presentes na norma para resistência ao fogo de elementos estruturais, são baseadas no modelo de incêndio padrão, mostrando a importância do conceito de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) é o tempo mínimo de resistência ao fogo, em minutos, de um elemento construtivo, quando sujeito ao incêndio padrão. Esse tempo mínimo impede a propagação das chamas sem comprometer a função estrutural, além proporcionar mais segurança aos usuários durante evacuação, diminuição dos impactos relacionados à ação térmica nas edificações vizinhas, e também mais segurança no combate ao incêndio.

A norma também traz em seu anexo A uma tabela com valores definidos de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), apresentado na Figura 3, onde esses valores variam em função do tipo de uso e ocupação, área, altura da edificação, profundidade do subsolo, facilidade de acesso para combate ao incêndio.

**Figura 3** – Tempos requeridos de resistência ao fogo, em minutos.

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S <sub>2</sub> h <sub>s</sub> 10 m	Classe S <sub>1</sub> h <sub>s</sub> 10 m	Classe P <sub>1</sub> h 6 m	Classe P <sub>2</sub> 6 m h 12 m	Classe P <sub>3</sub> 12 m h 23 m	Classe P <sub>4</sub> 23 m h 30 m	Classe P <sub>5</sub> h 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: ABNT NBR 14432:2001.

## 2.4 Propriedades mecânicas das estruturas de aço

O trabalho com estruturas de aço se mostra consideravelmente seguro, segundo Bellei (2008), pois tendo em vista sua homogeneidade e alto controle de produção, o material apresenta módulo de elasticidade, limites de escoamento e ruptura muito bem definidos. Além disso, a utilização de estruturas de aço se mostra vantajosa em relação a outros materiais devido a seu baixo peso e alta resistência a impactos, apesar de possuir massa específica maior do que o concreto, por exemplo.

Por outro lado, o aço quando exposto ao ambiente se mostra suscetível à corrosão e à perda de resistência em altas temperaturas. Mesmo que todos os materiais sofram com essas situações adversas, a perda de resistência se mostra mais acentuada no aço, além de atingir o colapso em menores temperaturas, quando comparado a outros materiais utilizados na construção civil, como, por exemplo, o concreto armado.

Sendo assim, A ABNT NBR 14323:2013 adota de forma definida algumas propriedades mecânicas para o aço em temperatura ambiente (20 °C):

- Massa específica ( $\rho_a$ ): 7.850 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Elasticidade (E): 200.000 MPa

Já a tabela de bitolas da fabricante de aços GERDAU, outras propriedades mecânicas de interesse para o aço ASTM A572 Grau 50 são expressas em temperatura ambiente (20 °C):

- Limite de escoamento ( $f_y$ ): 345 MPa
- Limite de ruptura ( $f_u$ ): 450 MPa

## 2.5 Propriedades térmicas das estruturas de aço

A ABNT NBR 14323:2013 mostra em seu anexo E as variações de calor específico, alongamento e condutividade térmica do aço, de acordo com a elevação da temperatura.

### 2.5.1 Calor específico ( $c_a$ )

O calor específico ( $c_a$ ) é dado pela relação entre a capacidade térmica e a massa de um corpo, sendo que essa relação pode sofrer variação de valor, dependendo da temperatura em que esse corpo é exposto. O calor específico ( $c_a$ ) é expresso em joules por quilograma e por grau Celsius [J/(kg°C)], e pode ser determinado de acordo com as seguintes expressões apresentadas:

- Para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 1,69 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad (2)$$

- Para  $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (3)$$

- Para  $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (4)$$

- Para  $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 650 \quad (5)$$

$\theta_a$  é a temperatura do aço em grau Celsius (°C).

A norma autoriza também adotar um valor de calor específico simplificado igual a 600 J/(kg °C), que independe da temperatura do aço, podendo ser utilizado em cálculos de projeto.

### 2.5.2 Alongamento

O alongamento do aço ( $\Delta la/la$ ) pode ser determinado de acordo com as expressões apresentadas:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$ :

$$\frac{\Delta la}{la} = 1,2 \times 10^{-5}\theta_a + 0,4 \times 10^{-8}\theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (6)$$

- Para  $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$ :

$$\frac{\Delta la}{la} = 1,1 \times 10^{-2} \quad (7)$$

- Para  $860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$ :

$$\frac{\Delta la}{la} = 2 \times 10^{-5}\theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (8)$$

Sendo:

$la$  é o comprimento da peça de aço a  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta la$  é a expansão térmica da peça causada pela temperatura;

$\theta_a$  é a temperatura do aço em grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A norma técnica também autoriza a simplificação do alongamento do aço considerando a temperatura constante. Nesse caso é possível considerar o valor da expressão a seguir:

$$\frac{\Delta la}{la} = 14 \times 10^{-6}(\theta_a - 20) \quad (9)$$

### 2.5.3 Condutividade térmica ( $\lambda_a$ )

A condutividade térmica também é influenciada pelo aumento da temperatura do aço, e pode ser determinado de acordo com as expressões a seguir:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$ :

$$\lambda_a = 540 - 3,33 \times 10^{-2}\theta_a \quad (10)$$

- Para  $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$ :

$$\lambda_a = 27,3 \quad (11)$$

Sendo:

$\lambda_a$  é a condutividade térmica do aço [(W/(m °C))];

$\theta_a$  é a temperatura do aço em grau Celsius (°C).

De forma análoga ao calor específico, a norma permite a simplificação para um valor constante que independe da temperatura do aço igual a 45 W/(m °C).

## 2.6 Fator de massividade

De acordo com Bellei (2008), a temperatura que uma estrutura de aço pode alcançar em uma situação de incêndio, se dá, pela relação que existe entre a área superficial que fica exposta ao calor e a massa do perfil utilizado, sendo essa relação denominada fator de massividade. O fator de massividade se apresenta, pela relação do perímetro do perfil que se expõe ao fogo, pela área de sua seção transversal, de acordo com a Equação 12.

$$f = u/A \quad (12)$$

Sendo:

u - perímetro da seção transversal do perfil exposta ao fogo (cm)

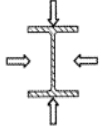
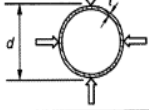
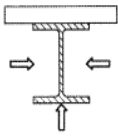
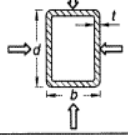
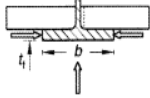
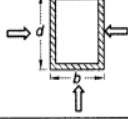
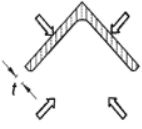
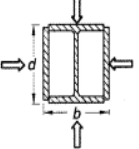
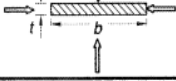
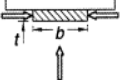
A - área da seção transversal do perfil (cm<sup>2</sup>)

Ainda segundo Bellei (2008), quanto menor for esta relação, maior será a capacidade resistente do perfil de aço em variadas temperaturas.

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 estabelece que, para realizar o cálculo do fator de massividade, a área a ser considerada é a área bruta da seção transversal, sendo que pequenos furos podem ser desprezados.

A ABNT NBR 14323:2013, ainda mostra como deve ser calculado o fator de massividade, para variadas situações de exposição ao fogo e diferentes perfis sem revestimento contra incêndio e também com revestimento contra incêndio, como apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

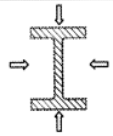
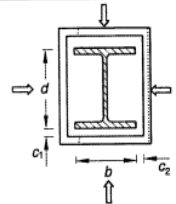
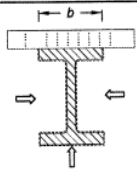
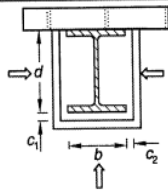
**Figura 4** – Fator de massividade para alguns elementos estruturais sem revestimento contra fogo.

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção-caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$ 
<p>Mesa de seção I ou H exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t_1}{b t_1}$ 	<p>Seção-caixão soldada exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Cantoneira exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2}{t}$ 	<p>Seção I ou H com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Chapa exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{2(b+t)}{b t}$ 	<p>Chapa exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A_g} = \frac{b+2t}{b t}$ 

Fonte: ABNT NBR 14323:2013



**Figura 5** – Fator de massividade para alguns elementos estruturais com revestimento contra fogo.

Situação	Descrição	Fator de massividade ( $u_m/A_g$ )
	Seção com revestimento tipo contorno, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa <sup>a)</sup> , de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b+d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo contorno de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa <sup>a)</sup> de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d+b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

<sup>a</sup> Válido apenas para  $c_1$  e  $c_2$  inferiores ou iguais a  $d/4$ .

Fonte: ABNT NBR 14323:2013

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Temperatura crítica

De acordo com Fakury (2016), embora o aço seja um material não combustível, suas principais propriedades mecânicas degradam-se em altas temperaturas. Tendo como exemplo, a 600 °C, observa-se que o limite para a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço se apresentam com valores 47% e 31%, respectivamente, menores do que os valores em temperatura ambiente. Em uma situação de incêndio, a temperatura do aço é capaz de atingir elevados valores, e conseqüentemente, perder resistência e rigidez, sendo assim a estrutura pode perder sua aptidão de suportar as cargas atuantes e vir a sofrer o colapso parcial ou total.

Ainda segundo Fakury (2016), uma estrutura em situação de incêndio em que se verifica o colapso, a temperatura do aço é denominada como temperatura crítica. Caso essa estrutura tenha sido projetada para total aproveitamento de seu material, a temperatura crítica normalmente situa-se entre 550 °C e 600 °C.

De acordo com Bellei (2008), os aços mais utilizados nas construções de edificações sofrem perda de 50% de sua capacidade resistente ao atingir 550 °C, considerada como temperatura limite. Tal redução significa que o fator de segurança usualmente utilizado nos cálculos já se apresenta inexistente, logo a estrutura corre riscos e atua sem segurança. Em vista disso, se mostra necessário a utilização de materiais que sirvam como proteção e evitem que a temperatura da estrutura atinja esse valor crítico.

Conforme Shakil (2018), a temperatura crítica apresentada pelos diversos tipos de aço, depende também da relação entre a carga aplicada sobre o elemento estrutural e sua capacidade resistente, variando de 177 °C até 755 °C. Logo, conforme definido anteriormente, para o desenvolvimento do presente trabalho optou-se por desprezar qualquer carga atuante na viga de aço. Sendo assim, o valor encontrado para a temperatura crítica onde o aço se encontra com metade da sua capacidade de resistência ao escoamento será adotado como valor de referência para as análises em seguida.

### 3.2 Elevação da temperatura do aço em estruturas sem revestimento contra fogo

De acordo com a ABNT NBR 14323:2013, uma seção transversal onde a temperatura é uniformemente distribuída, a elevação da temperatura,  $\Delta\theta_{a,t}$ , de um elemento de aço sem proteção contra fogo, durante um período de tempo  $\Delta t$ , pode ser determinada de acordo com a Equação 13 a seguir:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/Ag)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (13)$$

Sendo:

$k_{sh}$  é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que pode ser utilizado o valor igual a 1,0, que é o caso desse estudo, ou pode ser estabelecido conforme o item 8.5.1.1.2 da ABNT NBR 14323:2013;

$u/Ag$  é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra fogo, em metros a menos ( $m^{-1}$ );

$u$  é o perímetro do perfil metálico exposto ao incêndio, expresso em metros (m);

$Ag$  é a área bruta da seção transversal do perfil de aço, expressa em metros quadrados ( $m^2$ );

$\rho_a$  é a massa específica do aço, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $kg/m^3$ ), igual a 7850  $kg/m^3$  conforme o item 2.1.3 deste trabalho;

$c_a$  é o calor específico do aço, expresso em joules por quilograma por grau Celsius [ $J/(kg^\circ C)$ ];

$\varphi$  é o valor do fluxo de calor por unidade de área, expresso em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ );

$\Delta t$  é o intervalo de tempo em segundos (s).

A norma também recomenda que o valor de  $\Delta t$  não seja maior do que 5 segundos. Além disso, ela demonstra, com base na Equação 14, como deve ser feito o cálculo do fluxo de calor  $\varphi$ , que é dado pela soma da parcela relativa à convecção, calculada pela Equação 15,  $\varphi_c$  (W/m<sup>2</sup>), e a parcela da radiação, calculada pela Equação 16,  $\varphi_r$  (W/m<sup>2</sup>):

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (14)$$

sendo

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \quad (15)$$

e

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 + (\theta_a + 273)^4] \quad (16)$$

Sendo:

$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser adotado para efeitos práticos igual a 25 W/(m<sup>2</sup> °C), para incêndio padrão ou 35 W/(m<sup>2</sup> °C) para caso de incêndio natural;

$\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante, podendo ser adotada para efeitos práticos igual a 0,7.

### 3.3 Elevação da temperatura do aço em estruturas com revestimento contra fogo

De acordo com a ABNT NBR 14323:2013, uma seção transversal onde a temperatura é uniformemente distribuída, a elevação da temperatura,  $\Delta\theta_{a,t}$ , de um de aço metálico com proteção contra fogo, durante um período de tempo  $\Delta t$ , pode ser determinada de acordo com a Equação 17 a seguir:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(\frac{u_m}{A_g})}{t_m \rho_a c_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t}{1 + (\frac{\xi}{4})} - \frac{\Delta\theta_{a,t}}{(\frac{4}{\xi}) + 1} \quad (17)$$

com o termo  $\xi$  sendo definido pela Equação 18:

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m \left( \frac{u_m}{A_g} \right) \quad (18)$$

Sendo:

$\theta_{a,t}$  é a temperatura do aço no tempo t, expressa em graus Celsius (°C);

$\theta_{g,t}$  é a temperatura dos gases no tempo t, expressa em graus Celsius (°C);

$u_m/Ag$  é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra fogo, em metros a menos um ( $m^{-1}$ );

$u_m$  é o perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo, igual ao perímetro da face interna do material de revestimento, expresso em metros (m);

$c_a$  é o calor específico do material de revestimento contra fogo, expresso em joules por quilograma e por grau Celsius [ $J/(kg \text{ } ^\circ C)$ ];

$t_m$  é a espessura do material de revestimento contra fogo, expressa em metros (m);

$\rho_a$  é a massa específica do material de revestimento contra fogo, expressa em quilograma por metro cúbico ( $kg/m^3$ );

$\lambda_a$  é a condutividade térmica do material de revestimento contra fogo, expressa em watts por metro por grau Celsius [ $W/(m \text{ } ^\circ C)$ ];

$\Delta t$  é o intervalo de tempo, expresso em segundos (s).

### 3.4 Material de revestimento contra fogo

De acordo com Paiva (2018), ao realizar o dimensionamento de uma estrutura composta por elementos de aço, é possível a utilização de materiais de revestimento para resistir a altas temperaturas, evitando assim o colapso prematuro da edificação em situação de incêndio.

Sendo assim, Vargas & Silva (2005), definiram as propriedades fundamentais que um material de revestimento para proteção térmica necessita apresentar:

- Alto calor específico;
- Baixa massa específica;
- Baixa condutividade térmica;
- Resistência mecânica compatível com o material da estrutura;
- Custo compatível com o mercado e possível utilização.

Portanto, segundo Paiva (2018), analisando essas informações em acordo com a Equação (15), a utilização de materiais para proteção térmica com alto calor específico e baixa condutividade térmica culminaram num aumento mais controlado da temperatura do aço durante o incêndio.

Embasado nas informações apresentadas em Real (2003), é possível construir a Tabela 2 com as principais propriedades dos materiais comumente utilizados como revestimento de proteção térmica:

**Tabela 2** – Propriedades dos materiais de revestimento contra fogo.

<b>Material</b>	<b>Calor Específico [J/(kg °C)]</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade Térmica [W/(m °C)]</b>
<b>Placas</b>			
<b>Placas de gesso</b>	1700	600	0,20
<b>Silicato fibroso</b>	1200	600	0,15
<b>Fibrocimento</b>	1200	800	0,15
<b>Vermiculita e cimento</b>	1200	800	0,20
<b>Materiais projetados</b>			
<b>Argamassa de vermiculita</b>	<b>1200</b>	<b>350</b>	<b>0,12</b>
<b>Perlita</b>	1200	350	0,12
<b>Fibra mineral</b>	1200	300	0,12
<b>Materiais projetados de alta densidade</b>			
<b>Vermiculita e gesso</b>	1100	650	0,12
<b>Vermiculita e cimento</b>	1100	550	0,12

Fonte: REAL (2003).

A vermiculita, segundo Bellei (2008), se apresenta como um mineral esponjoso que pode armazenar uma enorme quantidade de água, quando misturado com o cimento ou gesso para produção de argamassa de proteção contra fogo, possuindo ponto de fusão de aproximadamente 1370°C.

Ainda de acordo com Bellei (2008), a argamassa de vermiculita pode possuir espessuras variando entre 10 a 50mm, podendo ser feita na obra ou adquirida de fabricantes e pode ser aplicada por meio de espátula ou jato. A superfície do elemento estrutural de aço não necessita de pintura, porém é necessário a colocação de telas para melhorar a aderência do produto à superfície lisa do metal.

Assim sendo, para o desenvolvimento do presente trabalho, será definido como material para revestimento passivo contra a ação do fogo, a argamassa de vermiculita com 20mm de espessura.

### 3.5 Resistências do elemento estrutural de aço em situação de incêndio

#### 3.5.1 Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço sob incêndio

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 traz uma tabela com fatores de redução das propriedades mecânicas que devem ser levadas em consideração ao se projetar uma estrutura em aço que poderá trabalhar em situação de incêndio. Esses fatores de redução se relacionam diretamente com a resistência ao escoamento ( $K_{y,\theta}$ ); com o módulo de elasticidade ( $KE_{,\theta}$ ); e com a possibilidade de flambagem local em decorrência do aumento de temperatura ( $K_{\sigma,\theta}$ ), apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Fatores de redução para o aço.

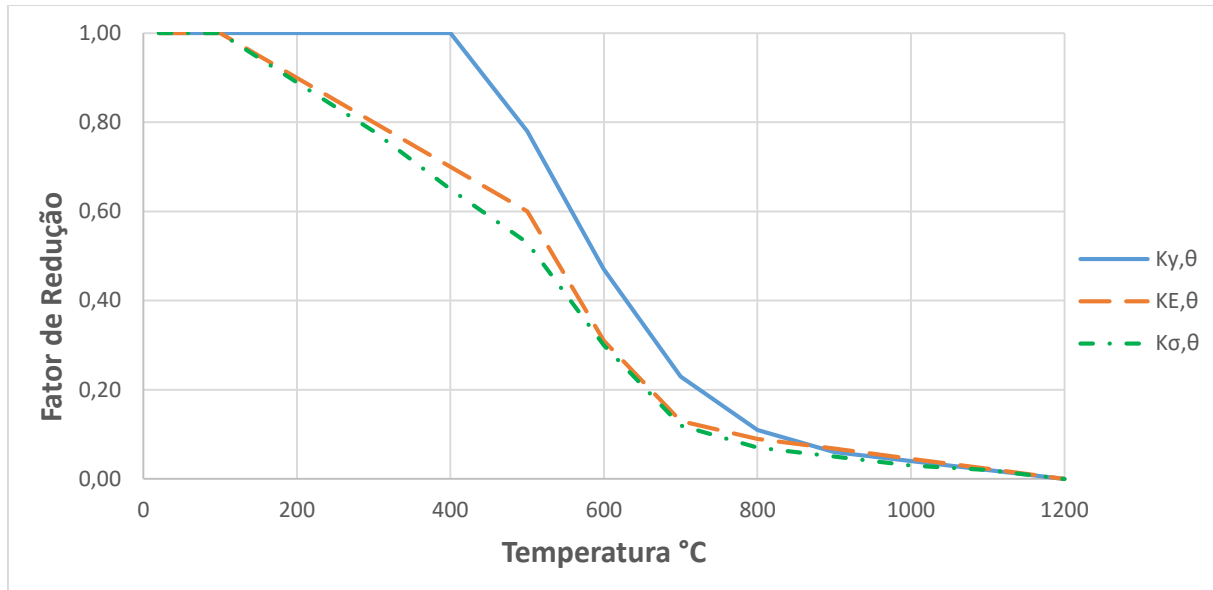
Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento $K_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $KE_{,\theta}$	Fator de redução se houver flambagem local $K_{\sigma,\theta}$
<b>20</b>	1,000	1,000	1,000
<b>100</b>	1,000	1,000	1,000
<b>200</b>	1,000	0,900	0,890
<b>300</b>	1,000	0,800	0,780
<b>400</b>	1,000	0,700	0,650
<b>500</b>	0,780	0,600	0,530
<b>600</b>	0,470	0,310	0,300
<b>700</b>	0,230	0,130	0,120
<b>800</b>	0,110	0,090	0,070
<b>900</b>	0,060	0,068	0,050
<b>1.000</b>	0,040	0,045	0,030
<b>1.100</b>	0,020	0,023	0,020
<b>1.200</b>	0,000	0,000	0,000

**\* Para valores intermediários da temperatura de aço, pode ser feita interpolação linear.**

Fonte: ABNT NBR 14323:2013.

Nota-se, de acordo com a Tabela 3, a influência da elevação da temperatura nas estruturas de aço em suas propriedades mecânicas, como a resistência ao escoamento que já começa a reduzir a partir de 400 °C, e chegando a ser praticamente nula em temperaturas acima de 1100 °C. Tal fato demonstra a atenção que deve ser dada, em caso de dimensionamento de estruturas que possam vir a atuar sob situação de incêndio. Para melhor visualização da redução desses fatores em relação a elevação da temperatura é apresentado na Figura 6.

**Figura 6** – Variação da resistência e rigidez de acordo com a variação da temperatura.



Fonte: Dos autores (2022).

### 3.5.2 Barras submetidas à momento fletor

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta as orientações para realizar a determinação do momento fletor resistente de cálculo, dividindo sua metodologia de acordo com os perfis previstos na ABNT NBR 8800:2008 e os perfis previstos da ABNT NBR 14762:2010.

Para os perfis previstos na ABNT NBR 8800:2008, caso a relação entre a altura e espessura da alma ( $h/t_w$ ) for superior a  $4,84 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , o momento fletor resistente de cálculo deve ser dimensionado conforme a ABNT NBR 8800:2008, anexo H. Os demais perfis devem ser dimensionados conforme os itens 8.4.3.2.2 a 8.4.3.2.5 da ABNT NBR 14323:2013. Além disso, deve ser feito a comparação do índice de esbeltez  $\lambda$  com o índice de esbeltez equivalente a plastificação e ao início do escoamento em situação de incêndio, são representados respectivamente  $\lambda_{p,fi}$  e  $\lambda_{r,fi}$ , sendo este procedimento detalhado no anexo G da ABNT NBR 8800:2008. Logo, tem-se o momento fletor resistente de cálculo  $M_{fi,Rd}$  em situação de incêndio, definido pelas Equações (18 a 26), a depender do tipo de flambagem que o aço venha a sofrer.

- Para os estados-limites aplicáveis de flambagem local:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl}, \text{ se } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad (18)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y, \text{ se } \lambda_{p,fi} \leq \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad (19)$$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{\sigma,\theta} M_y, \text{ se } \lambda \geq \lambda_{r,fi} \quad (20)$$

\*: Exceto para flambagem local da alma.

Sendo:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (21)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (22)$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (23)$$

$M_{pl}$  é o momento de plastificação da seção transversal em temperatura ambiente;

$\kappa$  é o fator de correção que leva em conta o efeito benéfico de uma distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal;

$M_y$  é o momento fletor no início do escoamento à temperatura ambiente.

- Para os estados limite de flambagem lateral com torção:

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (24)$$

Sendo:

$\chi_{fi}$  é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio.

Deve-se fazer a alteração do índice de esbeltez reduzido  $\lambda_{0fi}$  que também se encontra detalhado na ABNT NBR 14323:2013.

Para os perfis previstos na ABNT NBR 14762:2010, o momento fletor resistente de cálculo é apresentado da seguinte forma:

- Para barras de aço sujeitas à flambagem local sob flexão em situação de incêndio

$$M_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} W_{c,eff} f_y \quad (25)$$

Sendo:

$W_{c,eff}$  é o módulo resistente elástico da seção transversal efetiva em relação às fibras extremas comprimidas, determinado de acordo com a NBR 14762:2010 e o fator de redução  $\chi_{fi}$  conforme a ABNT NBR 14323:2013.

- Para barras de aço que possuem flambagem local e sujeitas à flambagem distorcional:

$$M_{fi,Rd} = \chi_{dist} k_{y,\theta} W f_y \quad (26)$$

Sendo:



$\chi_{dist}$  é o fator de redução do momento fletor resistente, relacionado à flambagem distorcional, calculado de acordo com a ABNT NBR 14762:2010.

$W$  é o módulo resistente elástico mínimo da seção bruta em relação ao eixo de flexão.

Para o caso dos perfis que não apresentam flambagem local, deve-se substituir o fator de redução  $k_{\sigma,\theta}$  por  $k_{y,\theta}$  nas equações anteriores.

### 3.5.3 Barras submetidas à esforço cortante

A ABNT NBR 14323:2013 traz que o esforço cortante resistente de cálculo em situação de incêndio,  $V_{fi,Rd}$ , deve ser calculado usando-se o indicado na ABNT NBR 8800:2008 ou na ABNT NBR 14762:2010, a depender do tipo de aço envolvido no projeto, adotando-se as seguintes proposições:

- Coeficiente  $\gamma_{a1}$  igual a 1,0;
- Multiplica-se os valores de  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  por 0,85, para obter-se  $\lambda_{p,fi}$  e  $\lambda_{r,fi}$ , respectivamente;
- Multiplica-se o valor do módulo de elasticidade (E) por  $K_{E,\theta}$ ;
- Multiplica-se, nas seções em que  $\lambda$  não seja maior que  $\lambda_{r,fi}$ , a resistência ao escoamento  $f_y$  pelo coeficiente  $k_{y,\theta}$ , e nas seções em que  $\lambda$  seja maior que  $\lambda_{r,fi}$ , a resistência ao escoamento  $f_y$  pelo coeficiente  $k_{y,\theta}$ .

Assim sendo, para os aços prescritos pela ABNT NBR 8800:2008, a referida norma traz em seu tópico 5.4.3 as diretrizes para determinação da força cortante resistente de cálculo. Tratando especificamente de seções I, H e U fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma, o item 5.4.3.1 da norma supracitada indica que a força cortante resistente de cálculo,  $V_{Rd}$ , é definida pelas Equações 27 a 34:

- Para  $\lambda \leq \lambda_p$  :

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (27)$$

- Para  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ :

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (28)$$

- Para  $\lambda > \lambda_r$  :

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (29)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (30)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (31)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (32)$$

$$V_{pt} = 0,60 A_w f_y \quad (33)$$

$$A_w = d t_w \quad (34)$$

Sendo:

$d$  é a altura total da seção transversal;

$t_w$  é a espessura da alma;

$h$  é a altura da alma, sendo correspondente à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados.

Já para os aços prescritos pela ABNT NBR 14762:2010, a referida norma traz em seu item 9.8.3 a regulamentação para a determinação do esforço cortante resistente de cálculo,  $V_{Rd}$ , é definido pelas Equações 35 a 37:

- Para  $h/t \leq 1,08 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$ :

$$V_{Rd} = 0,60 f_y \frac{ht}{\gamma} \quad (\gamma = 1,10) \quad (35)$$

- Para  $1,08 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} < h/t \leq 1,40 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$ :

$$V_{Rd} = 0,65 \frac{t^2}{\gamma} \sqrt{k_v f_y E} \quad (\gamma = 1,10) \quad (36)$$

- Para  $h/t > 1,40 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$ :

$$V_{Rd} = [0,905 E k_v t^3 / h] / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (37)$$

Sendo:

$t$  é a espessura da alma;

$h$  é a altura da parte plana da alma;

$k_v = 5,0$ , para almas sem enrijecedores transversais;

A ABNT NBR 14762:2010 ainda define que para seções que possuam duas ou mais almas, a análise deve ser executada para cada alma separadamente, ou seja, cada alma deve ser analisada como um elemento distinto e resistindo à sua parcela de esforço cortante.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Fator de massividade

A fabricante de aços Gerdau traz em sua tabela de bitolas, diversos parâmetros e características para os perfis de aço produzidos em sua fábrica. Dentre esses parâmetros, é possível destacar o perímetro do perfil e sua área de seção transversal.

Sendo assim, para o perfil de aço de interesse no presente trabalho, W 150 x 13,0, o perímetro ( $u$ ) apresentado é igual 0,67m e sua área de seção transversal ( $A$ ) é igual a 16,6cm<sup>2</sup>. Portanto, para se encontrar o valor do fator de massividade, propriedade de extrema importância na sequência dos cálculos a seguir, primeiramente é necessário adequar as unidades para m e m<sup>2</sup>, ou seja, a área da seção transversal ( $A$ ) deverá ser utilizada com valor igual a 0,00166m<sup>2</sup>. Logo, utilizando-se da Equação 12, tem-se o fator de massividade:

$$f = u/a$$

$$f = \frac{0,67}{0,00166} \frac{m}{m^2}$$

$$f = 404 m^{-1}$$

### 4.2 Curvas de elevação de temperatura do aço

Em busca dos objetivos apresentados, utilizou-se da ferramenta computacional *Excel*® para cálculos e criação de gráficos que representam a relação entre a temperatura do aço e o tempo decorrente de incêndio. Em vista disso, foram realizadas as análises para duas situações distintas:

- Sem revestimento e com as 4 faces expostas ao calor;
- Com revestimento de 20 mm de argamassa de vermiculita com as 4 faces expostas ao calor.

#### 4.2.1 Curva de elevação da temperatura do aço sem revestimento

Inicialmente, fez-se os cálculos da elevação da temperatura do aço de acordo com a Equação 13, para uma viga sem revestimento em situação de incêndio, com as seguintes características:

- Fator de massividade igual a  $404 m^{-1}$  conforme 4.1;
- Calor específico igual a  $600 J / (kg \text{ } ^\circ C)$ ;
- Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\varphi_c$ ) igual a  $25 W/m^2$ ;
- Massa específica do aço igual a  $7850 kg/m^3$ ;
- Emissividade resultante igual a 0,7;
- Duração do incêndio 60 minutos;
- $\Delta t$  igual a 5 segundos.

O valor de calor específico e coeficiente de transferência de calor por convecção adotados, foram simplificados de acordo com a ABNT NBR 14323:2013, conforme apresentado no tópico 2.4.

A Tabela 4 apresenta alguns valores dos resultados obtidos, já a Figura 7 apresenta a curva temperatura - tempo, comparando os resultados da elevação da temperatura dos gases e do aço.

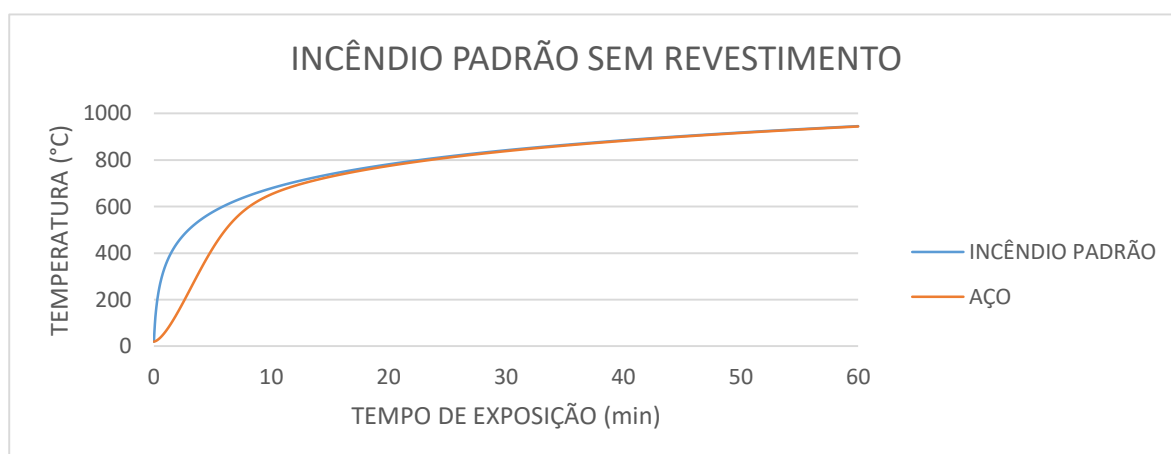
**Tabela 4** – Temperatura do aço em incêndio padrão.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_g</math> (<math>^\circ C</math>)</b>	<b><math>\phi</math> (<math>W/m^2</math>)</b>	<b><math>\Delta\theta_a</math> (<math>^\circ C</math>)</b>	<b><math>\theta_a</math> (<math>^\circ C</math>)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>20,00</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>20,00</b>
<b>120</b>	<b>2</b>	<b>444,50</b>	<b>17128,55</b>	<b>7,35</b>	<b>143,14</b>
<b>240</b>	<b>4</b>	<b>543,89</b>	<b>18119,81</b>	<b>7,77</b>	<b>331,93</b>
<b>360</b>	<b>6</b>	<b>603,12</b>	<b>12941,79</b>	<b>5,55</b>	<b>493,65</b>
<b>480</b>	<b>8</b>	<b>645,46</b>	<b>7361,84</b>	<b>3,16</b>	<b>595,14</b>
<b>600</b>	<b>10</b>	<b>678,43</b>	<b>4321,52</b>	<b>1,85</b>	<b>652,56</b>
<b>720</b>	<b>12</b>	<b>705,44</b>	<b>3001,85</b>	<b>1,29</b>	<b>689,04</b>
<b>840</b>	<b>14</b>	<b>728,31</b>	<b>2374,11</b>	<b>1,02</b>	<b>716,23</b>
<b>960</b>	<b>16</b>	<b>748,15</b>	<b>2003,41</b>	<b>0,86</b>	<b>738,55</b>
<b>1080</b>	<b>18</b>	<b>765,67</b>	<b>1745,80</b>	<b>0,75</b>	<b>757,72</b>
<b>1200</b>	<b>20</b>	<b>781,35</b>	<b>1550,91</b>	<b>0,67</b>	<b>774,60</b>
<b>1320</b>	<b>22</b>	<b>795,55</b>	<b>1396,70</b>	<b>0,60</b>	<b>789,71</b>
<b>1440</b>	<b>24</b>	<b>808,52</b>	<b>1271,14</b>	<b>0,55</b>	<b>803,39</b>
<b>1560</b>	<b>26</b>	<b>820,45</b>	<b>1166,73</b>	<b>0,50</b>	<b>815,90</b>
<b>1680</b>	<b>28</b>	<b>831,50</b>	<b>1078,45</b>	<b>0,46</b>	<b>827,43</b>
<b>1800</b>	<b>30</b>	<b>841,80</b>	<b>1002,78</b>	<b>0,43</b>	<b>838,11</b>

<b>1920</b>	32	851,43	937,15	0,40	<b>848,07</b>
<b>2040</b>	34	860,48	879,69	0,38	<b>857,41</b>
<b>2160</b>	36	869,01	828,93	0,36	<b>866,18</b>
<b>2280</b>	38	877,08	783,76	0,34	<b>874,47</b>
<b>2400</b>	40	884,74	743,30	0,32	<b>882,32</b>
<b>2520</b>	42	892,03	706,84	0,30	<b>889,77</b>
<b>2640</b>	44	898,98	673,81	0,29	<b>896,86</b>
<b>2760</b>	46	905,62	643,76	0,28	<b>903,63</b>
<b>2880</b>	48	911,98	616,28	0,26	<b>910,11</b>
<b>3000</b>	50	918,08	591,07	0,25	<b>916,32</b>
<b>3120</b>	52	923,95	567,85	0,24	<b>922,28</b>
<b>3240</b>	54	929,59	546,39	0,23	<b>928,00</b>
<b>3360</b>	56	935,02	526,50	0,23	<b>933,52</b>
<b>3480</b>	58	940,27	508,02	0,22	<b>938,84</b>
<b>3600</b>	60	945,34	490,80	0,21	<b>943,98</b>

Fonte: Dos autores (2022).

**Figura 7** – Curva de temperatura - tempo dos gases e aço em incêndio padrão.



Fonte: Dos autores (2022).

Analisando a Tabela 4 e a Figura 7, é possível perceber que nos minutos iniciais do incêndio a temperatura do aço não acompanha a temperatura dos gases. Entretanto, ao se passar 8 minutos de duração do incêndio, já é possível notar que a temperatura do aço atinge 595 °C ao longo da seção transversal, ou seja, ultrapassa o valor da temperatura crítica, comprometendo a resistência ao escoamento do aço do elemento estrutural.

#### 4.2.2 Curva de elevação da temperatura do aço com revestimento

Posteriormente, fez-se os cálculos da elevação da temperatura do aço de acordo com a Equação 17, para uma viga revestida com argamassa de vermiculita em situação de incêndio, com as seguintes características:

- Fator de massividade igual a  $404 \text{ m}^{-1}$  conforme 4.1;
- Calor específico do aço igual a  $600 \text{ J / kg } ^\circ\text{C}$ ;
- Massa específica do aço igual a  $7850 \text{ kg/m}^3$ ;
- Calor específico da vermiculita igual a  $1200 \text{ J / (kg } ^\circ\text{C)}$ ;
- Massa específica da vermiculita igual a  $350 \text{ kg/m}^3$ ;
- Condutividade térmica da vermiculita igual a  $0,12 \text{ W/ (m } ^\circ\text{C)}$ ;
- Espessura do revestimento igual a  $20\text{mm}$ ;
- Duração do incêndio  $60$  minutos;
- $\Delta t$  igual a  $5$  segundos.

De acordo com a Equação 18, tem-se a constante  $\xi$  igual a:

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m \left( \frac{u_m}{A_g} \right)$$

$$\xi = \frac{1200 \times 350}{600 \times 7850} 0,02 \left( \frac{0,67}{0,00166} \right)$$

$$\xi = 0,72$$

A Tabela 5 apresenta alguns valores dos resultados obtidos, já a Figura 8 apresenta a curva temperatura - tempo, comparando os resultados da elevação da temperatura dos gases e do aço.

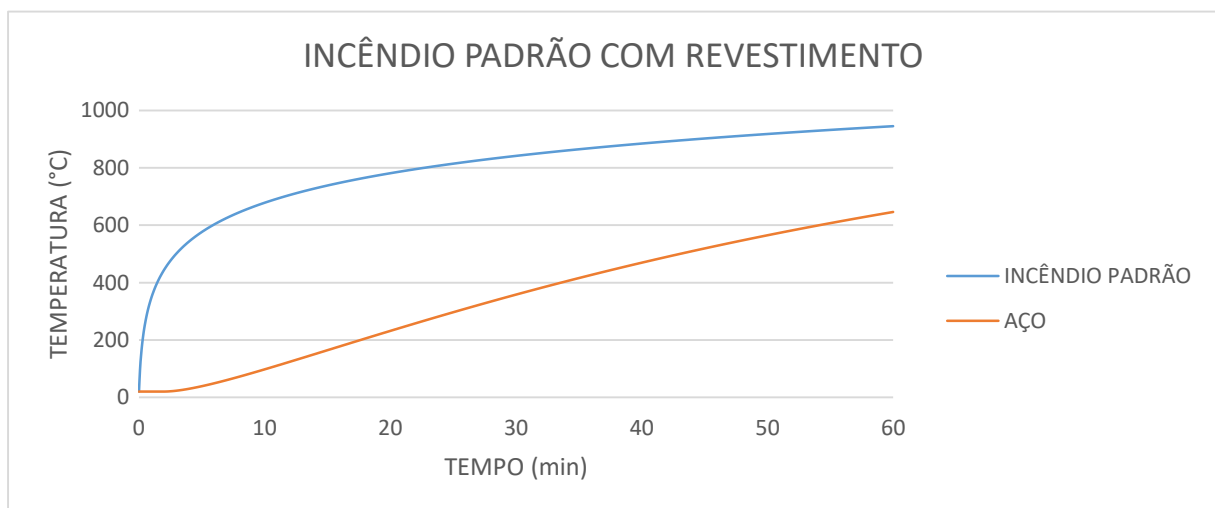
**Tabela 5** – Temperatura do aço em incêndio padrão.

Tempo (s)	Tempo (min)	$\theta_g$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta\theta_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\theta_a$ ( $^\circ\text{C}$ )
<b>0</b>	0	20,00	0,00	<b>20,00</b>
<b>120</b>	2	444,50	0,06	<b>20,01</b>
<b>240</b>	4	543,89	0,67	<b>29,87</b>
<b>360</b>	6	603,12	0,90	<b>48,99</b>
<b>480</b>	8	645,46	1,02	<b>72,16</b>
<b>600</b>	10	678,43	1,08	<b>97,43</b>
<b>720</b>	12	705,44	1,11	<b>123,81</b>
<b>840</b>	14	728,31	1,13	<b>150,72</b>
<b>960</b>	16	748,15	1,13	<b>177,79</b>

<b>1080</b>	18	765,67	1,12	<b>204,78</b>
<b>1200</b>	20	781,35	1,11	<b>231,50</b>
<b>1320</b>	22	795,55	1,09	<b>257,84</b>
<b>1440</b>	24	808,52	1,07	<b>283,71</b>
<b>1560</b>	26	820,45	1,04	<b>309,04</b>
<b>1680</b>	28	831,50	1,02	<b>333,80</b>
<b>1800</b>	30	841,80	0,99	<b>357,95</b>
<b>1920</b>	32	851,43	0,97	<b>381,47</b>
<b>2040</b>	34	860,48	0,94	<b>404,36</b>
<b>2160</b>	36	869,01	0,91	<b>426,60</b>
<b>2280</b>	38	877,08	0,89	<b>448,19</b>
<b>2400</b>	40	884,74	0,86	<b>469,15</b>
<b>2520</b>	42	892,03	0,83	<b>489,48</b>
<b>2640</b>	44	898,98	0,81	<b>509,18</b>
<b>2760</b>	46	905,62	0,78	<b>528,26</b>
<b>2880</b>	48	911,98	0,76	<b>546,75</b>
<b>3000</b>	50	918,08	0,73	<b>564,65</b>
<b>3120</b>	52	923,95	0,71	<b>581,97</b>
<b>3240</b>	54	929,59	0,69	<b>598,74</b>
<b>3360</b>	56	935,02	0,66	<b>614,96</b>
<b>3480</b>	58	940,27	0,64	<b>630,66</b>
<b>3600</b>	60	945,34	0,62	<b>645,84</b>

Fonte: Dos autores (2022).

**Figura 8** – Curva de temperatura - tempo dos gases e aço em incêndio padrão.



Fonte: Dos autores (2022).

De acordo com a Tabela 5 e a Figura 8, percebe-se uma disparidade entre a temperatura dos gases e a temperatura do aço ao longo do tempo analisado. Assim sendo, é possível observar que aos 8 minutos, a temperatura do aço ainda se encontra em 78 °C, ou seja, valor abaixo do

encontrado na análise do elemento estrutural sem revestimento, onde a temperatura chega a 595 °C, já ultrapassando a temperatura crítica.

De acordo com Guilherme (2020), essa diferença na taxa de aumento da temperatura do aço ocorre devido a vermiculita se expandir em até 30 vezes o seu volume original, quando aquecido a altas temperaturas, fazendo com que a estrutura formada após o aquecimento possua alta porosidade e grande quantidade de vazios preenchido por ar, sendo um bom isolante térmico.

No entanto, é possível notar que somente aos 53 minutos, a temperatura do aço ultrapassa os 590 °C, ou seja, comparando com o aço sem revestimento, tem-se uma margem de mais 45 minutos até atingir a temperatura crítica.

Sendo assim os resultados encontrados para curva de incêndio padrão sem revestimento e com revestimento, se assemelham aos resultados obtidos por Martins (2000), onde a metodologia desenvolvida também tem como base as recomendações propostas pela ABNT NBR 14323.

#### **4.2.3 Custos da aplicação de revestimento contra fogo**

Tendo em vista que a aplicação da argamassa gerou resultados satisfatórios de proteção contra incêndio, busca-se então a viabilidade econômica de sua utilização com base no mercado nacional.

Para extrair o custo da argamassa de vermiculita, tomou-se como base a planilha de custos SETOP (abril de 2022), onde 1 m<sup>3</sup> de argamassa de vermiculita custa 895,00 reais. Para efeito prático, calcula-se o custo por metro linear de aplicação para o perfil W 150 x 13,0, da seguinte maneira:

- Perímetro (u) igual 0,67 m;
- Espessura (e) igual a 0,02 m;
- Comprimento (L) igual a 1,00m.

$$V = L \times e \times u$$

$$V = 1 \times 0,02 \times 0,67$$

$$V = 0,0134 \text{ m}^3$$

Logo:

$$\text{Custo} = 0,0134 \times 895$$

$$\text{Custo} = 12,00$$



Portanto, tem-se o custo do metro linear de aplicação da argamassa de vermiculita sendo de R\$12,00/m.

Por outro lado, a utilização da argamassa de vermiculita se mostra não condizente em situações onde os elementos estruturais também exercem as funções estéticas e arquitetônicas, como por exemplo, estruturas que ficam expostas em fachadas ou aparentes no interior da edificação, como representado na Figura 9.

**Figura 9** – Argamassa de vermiculita aplicada em viga de aço.



Fonte: GHR ENGENHARIA (2019).

#### **4.3 Fatores de redução do aço**

Como visto no item 3.5.1 a ABNT NBR 14323:2013 apresenta uma tabela com os fatores de redução para alguns valores definidos de temperatura que devem ser considerados ao realizar um projeto em estrutura de aço. Para os valores que não são definidos, a norma recomenda ser feito a interpolação linear para obter um melhor resultado.

Em vista disso, realizou-se a interpolação linear para as temperaturas encontradas no aço sem revestimento, e através do software Excel® gerou-se a Tabela 6 com os resultados:

**Tabela 6** – Fatores de redução do aço sem proteção contra incêndio.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b>Fator de redução da resistência ao escoamento <math>K_{y,\theta}</math></b>	<b>Fator de redução do módulo de elasticidade <math>K_{E,\theta}</math></b>	<b>Fator de redução se houver flambagem local <math>K_{\sigma,\theta}</math></b>
<b>0</b>	0	<b>20,00</b>	1,000	1,000	1,000
<b>120</b>	2	<b>143,14</b>	1,000	0,957	0,953
<b>240</b>	4	<b>331,93</b>	1,000	0,768	0,738
<b>360</b>	6	<b>493,65</b>	0,794	0,606	0,538
<b>480</b>	8	<b>595,14</b>	0,485	0,324	0,311
<b>600</b>	10	<b>652,56</b>	0,344	0,215	0,205
<b>720</b>	12	<b>689,04</b>	0,256	0,150	0,140
<b>840</b>	14	<b>716,23</b>	0,211	0,124	0,112
<b>960</b>	16	<b>738,55</b>	0,184	0,115	0,101
<b>1080</b>	18	<b>757,72</b>	0,161	0,107	0,091
<b>1200</b>	20	<b>774,60</b>	0,140	0,100	0,083
<b>1320</b>	22	<b>789,71</b>	0,122	0,094	0,075
<b>1440</b>	24	<b>803,39</b>	0,108	0,089	0,069
<b>1560</b>	26	<b>815,90</b>	0,102	0,087	0,067
<b>1680</b>	28	<b>827,43</b>	0,096	0,084	0,065
<b>1800</b>	30	<b>838,11</b>	0,091	0,082	0,062
<b>1920</b>	32	<b>848,07</b>	0,086	0,079	0,060
<b>2040</b>	34	<b>857,41</b>	0,081	0,077	0,059
<b>2160</b>	36	<b>866,18</b>	0,077	0,075	0,057
<b>2280</b>	38	<b>874,47</b>	0,073	0,074	0,055
<b>2400</b>	40	<b>882,32</b>	0,069	0,072	0,054
<b>2520</b>	42	<b>889,77</b>	0,065	0,070	0,052
<b>2640</b>	44	<b>896,86</b>	0,062	0,069	0,051
<b>2760</b>	46	<b>903,63</b>	0,059	0,067	0,049
<b>2880</b>	48	<b>910,11</b>	0,058	0,066	0,048
<b>3000</b>	50	<b>916,32</b>	0,057	0,064	0,047
<b>3120</b>	52	<b>922,28</b>	0,056	0,063	0,046
<b>3240</b>	54	<b>928,00</b>	0,054	0,062	0,044
<b>3360</b>	56	<b>933,52</b>	0,053	0,060	0,043
<b>3480</b>	58	<b>938,84</b>	0,052	0,059	0,042
<b>3600</b>	60	<b>943,98</b>	0,051	0,058	0,041

Fonte: Dos autores (2022).

Realizou-se também a interpolação linear para as temperaturas encontradas no aço com revestimento de proteção contra incêndio, de acordo com a Tabela 7, com os seguintes resultados:

**Tabela 7** – Fatores de redução do aço com proteção contra incêndio.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b>Fator de redução da resistência ao escoamento <math>K_{y,\theta}</math></b>	<b>Fator de redução do módulo de elasticidade <math>K_{E,\theta}</math></b>	<b>Fator de redução se houver flambagem local <math>K_{\sigma,\theta}</math></b>
<b>0</b>	0	<b>20,00</b>	1,000	1,000	1,000
<b>120</b>	2	<b>20,01</b>	1,000	1,000	1,000
<b>240</b>	4	<b>29,87</b>	1,000	1,000	1,000
<b>360</b>	6	<b>48,99</b>	1,000	1,000	1,000
<b>480</b>	8	<b>72,16</b>	1,000	1,000	1,000
<b>600</b>	10	<b>97,43</b>	1,000	1,000	1,000
<b>720</b>	12	<b>123,81</b>	1,000	0,976	0,974
<b>840</b>	14	<b>150,72</b>	1,000	0,949	0,944
<b>960</b>	16	<b>177,79</b>	1,000	0,922	0,914
<b>1080</b>	18	<b>204,78</b>	1,000	0,895	0,885
<b>1200</b>	20	<b>231,50</b>	1,000	0,869	0,855
<b>1320</b>	22	<b>257,84</b>	1,000	0,842	0,826
<b>1440</b>	24	<b>283,71</b>	1,000	0,816	0,798
<b>1560</b>	26	<b>309,04</b>	1,000	0,791	0,768
<b>1680</b>	28	<b>333,80</b>	1,000	0,766	0,736
<b>1800</b>	30	<b>357,95</b>	1,000	0,742	0,705
<b>1920</b>	32	<b>381,47</b>	1,000	0,719	0,674
<b>2040</b>	34	<b>404,36</b>	0,990	0,696	0,645
<b>2160</b>	36	<b>426,60</b>	0,941	0,673	0,618
<b>2280</b>	38	<b>448,19</b>	0,894	0,652	0,592
<b>2400</b>	40	<b>469,15</b>	0,848	0,631	0,567
<b>2520</b>	42	<b>489,48</b>	0,803	0,611	0,543
<b>2640</b>	44	<b>509,18</b>	0,752	0,573	0,509
<b>2760</b>	46	<b>528,26</b>	0,692	0,518	0,465
<b>2880</b>	48	<b>546,75</b>	0,635	0,464	0,422
<b>3000</b>	50	<b>564,65</b>	0,580	0,413	0,381
<b>3120</b>	52	<b>581,97</b>	0,526	0,362	0,341
<b>3240</b>	54	<b>598,74</b>	0,474	0,314	0,303
<b>3360</b>	56	<b>614,96</b>	0,434	0,283	0,273
<b>3480</b>	58	<b>630,66</b>	0,396	0,255	0,245
<b>3600</b>	60	<b>645,84</b>	0,360	0,227	0,217

Fonte: Dos autores (2022).

#### 4.4 Temperatura Crítica

Conforme apresentado no item 3.1, Fakury determinou que a temperatura crítica indica a temperatura limite em que o aço ainda possui suas propriedades bem definidas, chegando ao colapso após atingir tais temperaturas.

Assumindo que ao perder 50% de sua capacidade o aço irá trabalhar sem a margem de segurança de cálculo, calculou-se por interpolação linear, através da tabela dos fatores de redução apresentada anteriormente, a temperatura correspondente ao fator de redução da resistência ao escoamento igual a 0,500.

Dessa forma, o valor da temperatura crítica para o aço estudado é definido como sendo de 590,32 °C, conforme apresentado através da Tabela 8 gerada pelo software Excel®:

**Tabela 8** – Temperatura crítica.

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento $K_{y,\theta}$
500	0,780
590,32	0,500
600	0,470

Fonte: Dos autores (2022).

#### 4.5 Curvas das resistências ao momento fletor durante incêndio

Conforme exposto no item 3.5.2, a ABNT NBR 14323:2013 faz distinção de análise entre os aços contemplados nas normas ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 14762:2010 para análise de cálculo do momento fletor resistente durante incêndio. Sendo assim, a ABNT NBR 8800 traz como requisitos básicos que os perfis de aço sejam laminados ou soldados, ou de seção tubular, já os perfis estruturais de aços formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono serão contemplados na ABNT NBR 14762:2010.

Dessa maneira, o aço analisado no seguinte trabalho, A572 Grau 50, se apresenta com as características definidas pela ABNT NBR 8800:2008, segundo a qual serão desenvolvidos os cálculos subsequentes.

Inicialmente fez-se a análise relacionada à altura e espessura da alma ( $h/t_w$ ), se essa relação for superior a  $4,84 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$  deve-se dimensionar de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, caso contrário, os procedimentos de cálculo são realizados conforme os itens 8.4.3.2.2 ao 8.4.3.2.5 da ABNT NBR 14323:2013.

Em vista disso, para o perfil W 150 x 13,0, de acordo com a tabela de perfis da fabricante de aços Gerdau, tem-se a seguinte relação de características de interesse para os cálculos a seguir:

- $h = 13,8$  cm;
- $bf = 10,0$  cm;
- $tf = 0,49$  cm;
- $W_x = 85,8$  cm<sup>3</sup>;
- $tw = 0,43$  cm;
- $E = 200000$  MPa;
- $f_y = 345$  MPa.

$$\frac{h}{tw} = \frac{13,8}{0,43} = 32,093$$

$$4,84 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4,84 \sqrt{\frac{200000}{345}} = 116,53$$

Tem-se então que  $32,093 < 116,53$ .

Logo, os procedimentos para o cálculo de momento fletor resistente foram realizados de acordo com os itens 8.4.3.2.2 ao 8.4.3.2.5 da ABNT NBR 14323:2013. Sendo assim, os valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  devem ser determinados conforme exposto no anexo G da ABNT NBR 8800:2008, de acordo com as Equações 21 a 23. Posteriormente, a ABNT NBR 14323:2013 determina que seja realizado a multiplicação dos valores encontrados para  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  por 0,85, para que se encontre os parâmetros  $\lambda_{p,fi}$  e  $\lambda_{r,fi}$ . Tais serão utilizados para determinar a equação utilizada, conforme exposto no item 3.5.2.

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$$\lambda = \frac{10}{2 \times 0,49}$$

$$\lambda = 10,20$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200000}{345}}$$

$$\lambda_p = 9,14$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{fy}}$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{200000}{345}}$$

$$\lambda_r = 24,07$$

Logo:

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \times 9,14 = 7,77$$

$$\lambda_{r,fi} = 0,85 \times 24,07 = 20,46$$

Sendo assim  $\lambda_{p,fi} \leq \lambda \leq \lambda_{r,fi} = 7,77 \leq 9,14 \leq 20,46$

Com esse resultado define-se a equação a ser utilizada para o cálculo do momento fletor resistente de uma viga em situação de incêndio,  $M_{fi,Rd}$ , com a Equação 19 tem –se:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y$$

Sendo:

$$\kappa = 1$$

e

$$M_y = W_x f_y$$

$$M_y = 85,8 \times 34,5$$

$$M_y = 2960,1 \text{ kN.cm} = 29,601 \text{ kN.m}$$

Tendo em vista que o valor do fator de redução da resistência ao escoamento,  $k_{y,\theta}$ , reduz com o aumento da temperatura, o momento fletor resistente para cada temperatura e em cada situação de interesse foi determinado via Excel®. Primeiramente, serão expostos na Tabela 9 os valores encontrados para o aço sem revestimento.

**Tabela 9** – Momento fletor resistente de uma viga em situação de incêndio sem revestimento.

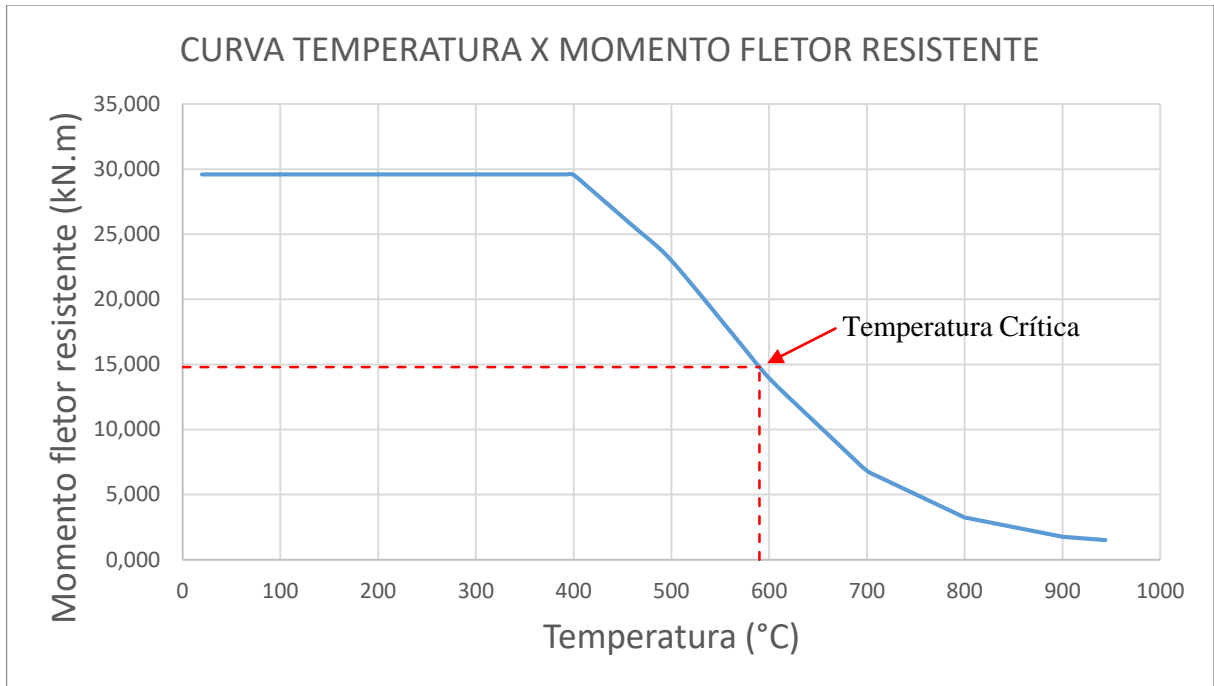
Tempo (s)	Tempo (min)	$\theta_a$ (°C)	$K_{y,\theta}$	$M_{fi,Rd}$ (kN.m)
0	0	20,00	1,000	29,601
120	2	143,14	1,000	29,601
240	4	331,93	1,000	29,601
360	6	493,65	0,794	23,502
480	8	595,14	0,485	14,359
600	10	652,56	0,344	10,179

<b>720</b>	12	689,04	0,256	7,587
<b>840</b>	14	716,23	0,211	6,232
<b>960</b>	16	738,55	0,184	5,439
<b>1080</b>	18	757,72	0,161	4,758
<b>1200</b>	20	774,60	0,140	4,158
<b>1320</b>	22	789,71	0,122	3,622
<b>1440</b>	24	803,39	0,108	3,206
<b>1560</b>	26	815,90	0,102	3,021
<b>1680</b>	28	827,43	0,096	2,850
<b>1800</b>	30	838,11	0,091	2,692
<b>1920</b>	32	848,07	0,086	2,545
<b>2040</b>	34	857,41	0,081	2,406
<b>2160</b>	36	866,18	0,077	2,277
<b>2280</b>	38	874,47	0,073	2,154
<b>2400</b>	40	882,32	0,069	2,038
<b>2520</b>	42	889,77	0,065	1,928
<b>2640</b>	44	896,86	0,062	1,822
<b>2760</b>	46	903,63	0,059	1,755
<b>2880</b>	48	910,11	0,058	1,716
<b>3000</b>	50	916,32	0,057	1,679
<b>3120</b>	52	922,28	0,056	1,644
<b>3240</b>	54	928,00	0,054	1,610
<b>3360</b>	56	933,52	0,053	1,578
<b>3480</b>	58	938,84	0,052	1,546
<b>3600</b>	60	943,98	0,051	1,516

Fonte: Dos autores (2022).

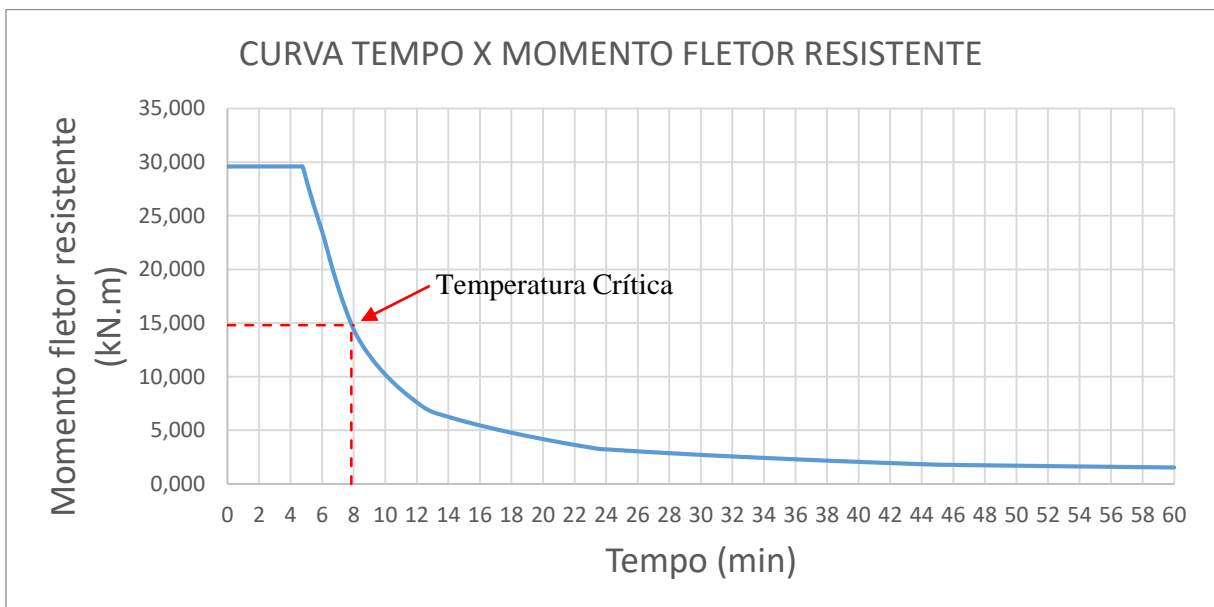
Com os resultados obtidos na Tabela 9, gerou-se as curvas expostas nas Figuras 10 e 11 respectivamente, com destaque para o ponto onde se encontra a temperatura crítica.

**Figura 10** – Curva Temperatura x Momento fletor resistente sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

**Figura 11** – Curva Tempo x Momento fletor resistente sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Sendo assim, de acordo com a Figura 10, é possível perceber que para a temperatura crítica de 590°C, o momento fletor resistente se encontra na metade do seu valor em temperatura ambiente, aproximadamente 14,8 kN.m. Analisando esse valor em relação ao tempo decorrido



até atingir a temperatura crítica, verifica-se que o elemento estrutural se encontra em situação de risco apenas 8 minutos após o início do incêndio.

Em vista disso, foi realizada a análise do momento fletor resistente para o aço com revestimento de argamassa de vermiculita, sendo os valores apresentados na Tabela 10.

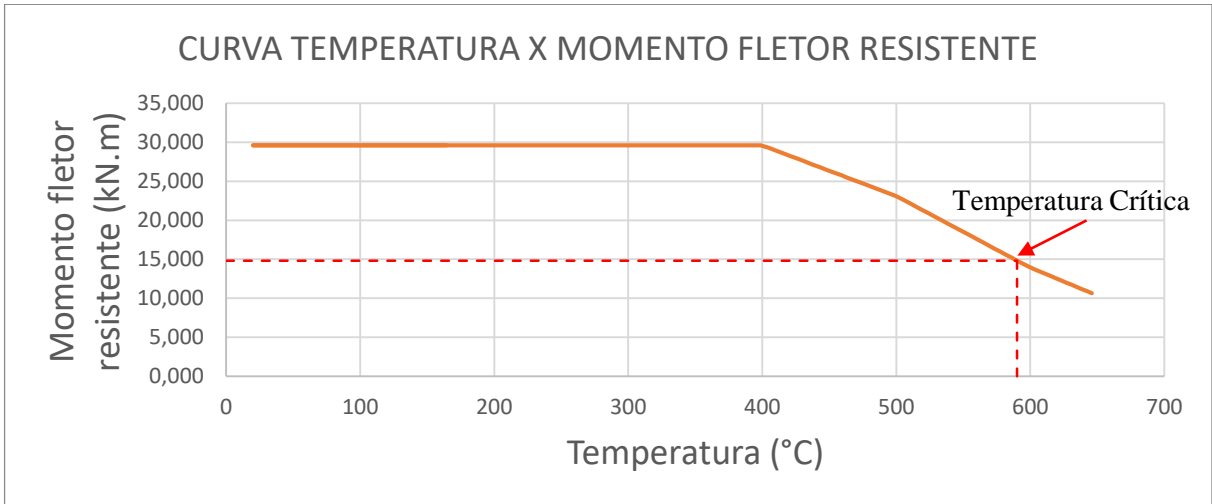
**Tabela 10** – Momento fletor resistente de uma viga em situação de incêndio com revestimento.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b><math>K_y, \theta</math></b>	<b>M<sub>fi,Rd</sub> (kN.m)</b>
<b>0</b>	0	20,00	1,000	29,601
<b>120</b>	2	20,01	1,000	29,601
<b>240</b>	4	29,87	1,000	29,601
<b>360</b>	6	48,99	1,000	29,601
<b>480</b>	8	72,16	1,000	29,601
<b>600</b>	10	97,43	1,000	29,601
<b>720</b>	12	123,81	1,000	29,601
<b>840</b>	14	150,72	1,000	29,601
<b>960</b>	16	177,79	1,000	29,601
<b>1080</b>	18	204,78	1,000	29,601
<b>1200</b>	20	231,50	1,000	29,601
<b>1320</b>	22	257,84	1,000	29,601
<b>1440</b>	24	283,71	1,000	29,601
<b>1560</b>	26	309,04	1,000	29,601
<b>1680</b>	28	333,80	1,000	29,601
<b>1800</b>	30	357,95	1,000	29,601
<b>1920</b>	32	381,47	1,000	29,601
<b>2040</b>	34	404,36	0,990	29,317
<b>2160</b>	36	426,60	0,941	27,869
<b>2280</b>	38	448,19	0,894	26,463
<b>2400</b>	40	469,15	0,848	25,098
<b>2520</b>	42	489,48	0,803	23,774
<b>2640</b>	44	509,18	0,752	22,247
<b>2760</b>	46	528,26	0,692	20,495
<b>2880</b>	48	546,75	0,635	18,799
<b>3000</b>	50	564,65	0,580	17,157
<b>3120</b>	52	581,97	0,526	15,567
<b>3240</b>	54	598,74	0,474	14,028
<b>3360</b>	56	614,96	0,434	12,850
<b>3480</b>	58	630,66	0,396	11,734
<b>3600</b>	60	645,84	0,360	10,656

Fonte: Dos autores (2022).

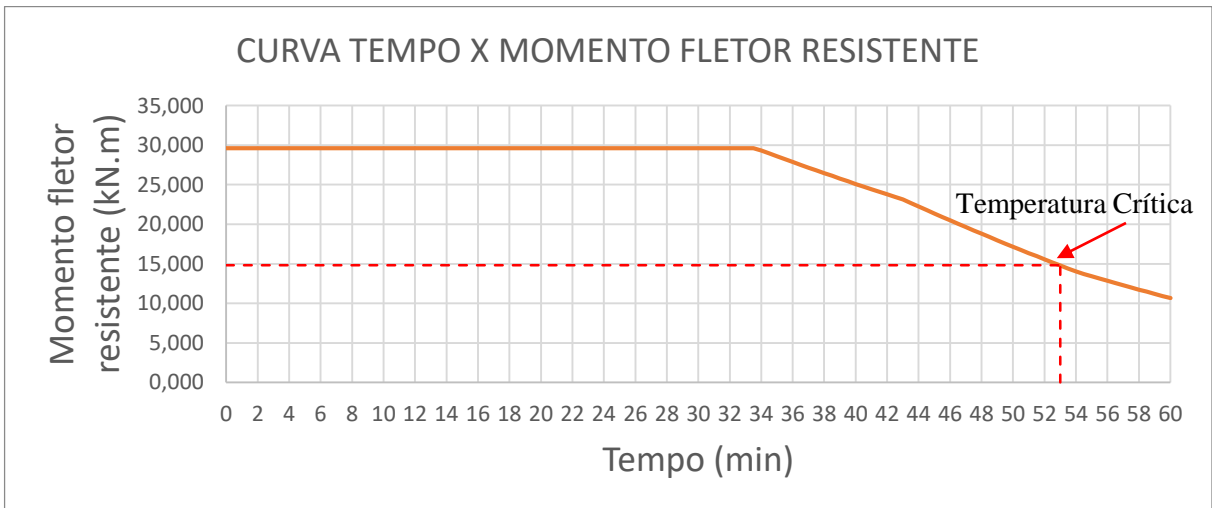
Com os resultados obtidos na Tabela 10, gerou-se também as curvas em relação ao tempo e a temperatura, apresentadas nas Figuras 12 e 13 respectivamente, com destaque para o ponto onde se encontra a temperatura crítica.

**Figura 12** – Curva Temperatura x Momento fletor resistente com revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

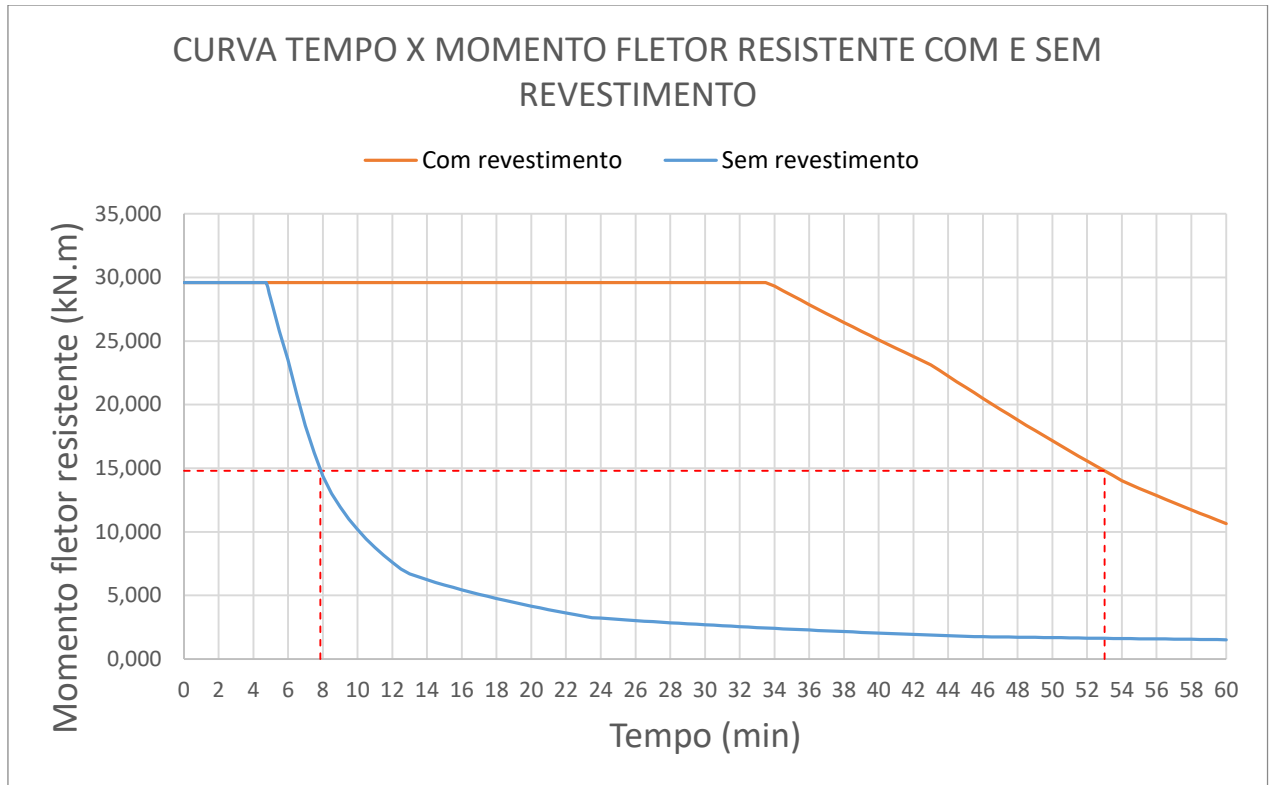
**Figura 13** – Curva Tempo x Momento fletor resistente com revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Com base nos dados obtidos, a Figura 14 traz uma comparação dos resultados do momento fletor resistente do aço sem revestimento e com revestimento, evidenciando o aumento do tempo necessário até que a temperatura crítica do aço seja atingida.

**Figura 14** – Curva Tempo x Momento fletor resistente com e sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Dessa maneira, para que o aço possa atingir a mesma temperatura crítica de 590 °C, percebe-se que seria necessário um tempo decorrido de aproximadamente 53 minutos de incêndio, cerca de 45 minutos a mais do que quando analisado sem revestimento. Esse acréscimo de tempo proporcionado pelo revestimento de argamassa de vermiculita, possibilita maior tranquilidade para evacuação do edifício, e também, mais segurança para a equipe envolvida no combate ao incêndio.

#### 4.6 Curvas das resistências ao esforço cortante durante incêndio

De acordo com o item 3.5.3 apresentado, a NBR 14323:2013 traz que o esforço cortante resistente de cálculo em situação de incêndio,  $V_{fi,Rd}$ , deve ser calculado usando-se o indicado na NBR 8800 ou na NBR 14762, a depender do tipo de aço envolvido no projeto.

Dessa maneira o aço analisado no presente trabalho se apresenta com as características definidas pela NBR 8800, segundo a qual serão desenvolvidos os cálculos subsequentes.

Para o perfil W 150 x 13,0, de acordo com a tabela de perfis da fabricante de aços Gerdau, tem-se a seguinte relação de características de interesse para os cálculos a seguir:

- $h = 13,8$  cm;

- $d = 14,80$  cm;
- $t_w = 0,43$  cm;
- $k_v = 5$  para almas sem enrijecedores transversais;
- $E = 200000$  Mpa;
- $f_y = 345$  Mpa.

Inicialmente, os procedimentos para o cálculo do esforço cortante resistente foram realizados de acordo com o tópico 5.4.3 da NBR 8800:2008. Sendo assim, os valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  devem ser determinados conforme exposto no item 3.5.3, de acordo com as Equações 30 a 32, e é necessário a utilização das proposições expostas no referido tópico. Tais valores serão utilizados para determinar a sequência de cálculos a ser utilizada na determinação do esforço cortante resistente,  $V_{Rd}$ .

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda = \frac{13,8}{0,43}$$

$$\lambda = 32,093$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 200000}{345}}$$

$$\lambda_p = 59,22$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{5 \times 200000}{345}}$$

$$\lambda_r = 73,76$$

Logo:

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \times 59,22 = 50,34$$

$$\lambda_{r,fi} = 0,85 \times 73,76 = 62,69$$

Conforme proposto no item 3.5.3, o valor do módulo de elasticidade (E) deve ser multiplicado pelo coeficiente de redução  $k_{E,\theta}$ . Já o valor da resistência ao escoamento (fy) deve ser multiplicado pelo fator de redução,  $k_{y,\theta}$ , em casos em que  $\lambda$  não apresenta valores maiores que  $\lambda_{r,fi}$ , e caso apresente valores superiores a  $\lambda_{r,fi}$ , fy deve ser multiplicado por  $k_{\sigma,\theta}$ .

Novamente, dividiu-se a análise em duas etapas, sendo a primeira com o aço sem revestimento, e posteriormente, com revestimento de argamassa de vermiculita.

Em vista disso, primeiramente, utilizou-se o software Excel como ferramenta de cálculo para o desenvolvimento da Tabela 11, onde buscou-se a aplicação das proposições anteriores para determinação dos parâmetros de interesse nos cálculos do esforço cortante em que aço não possua revestimento de proteção contra incêndio:

**Tabela 11** – Parâmetros de cálculo sem revestimento.

<b>E</b> <b>(kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Fy</b> <b>(kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\lambda_p</math></b>	<b><math>\lambda_{p,fi}</math></b>	<b><math>\lambda_r</math></b>	<b><math>\lambda_{r,fi}</math></b>	<b>Tempo</b> <b>(min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b><math>K_{y,\theta}</math></b>	<b><math>K_{E,\theta}</math></b>	<b><math>K_{\sigma,\theta}</math></b>
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	0	<b>20,00</b>	1,000	1,000	1,000
<b>19137,22</b>	34,50	57,93	49,24	72,15	61,33	2	<b>143,14</b>	1,000	0,957	0,953
<b>15361,36</b>	34,50	51,90	44,12	64,64	54,95	4	<b>331,93</b>	1,000	0,768	0,738
<b>12126,99</b>	27,39	51,75	43,99	64,46	54,79	6	<b>493,65</b>	0,794	0,606	0,538
<b>6481,97</b>	16,73	48,41	41,15	60,29	51,25	8	<b>595,14</b>	0,485	0,324	0,311
<b>4308,00</b>	11,86	46,87	39,84	58,38	49,62	10	<b>652,56</b>	0,344	0,215	0,205
<b>2994,66</b>	8,84	45,26	38,47	56,37	47,92	12	<b>689,04</b>	0,256	0,150	0,140
<b>2470,13</b>	7,26	45,36	38,56	56,50	48,02	14	<b>716,23</b>	0,211	0,124	0,112
<b>2291,61</b>	6,34	46,77	39,75	58,25	49,51	16	<b>738,55</b>	0,184	0,115	0,101
<b>2138,23</b>	5,55	48,30	41,05	60,15	51,13	18	<b>757,72</b>	0,161	0,107	0,091
<b>2003,17</b>	4,85	50,01	42,51	62,28	52,94	20	<b>774,60</b>	0,140	0,100	0,083
<b>1882,30</b>	4,22	51,94	44,15	64,69	54,99	22	<b>789,71</b>	0,122	0,094	0,075
<b>1785,06</b>	3,74	53,76	45,70	66,96	56,91	24	<b>803,39</b>	0,108	0,089	0,069
<b>1730,03</b>	3,52	54,52	46,35	67,91	57,72	26	<b>815,90</b>	0,102	0,087	0,067
<b>1679,32</b>	3,32	55,30	47,01	68,88	58,55	28	<b>827,43</b>	0,096	0,084	0,065
<b>1632,31</b>	3,14	56,10	47,69	69,87	59,39	30	<b>838,11</b>	0,091	0,082	0,062
<b>1588,48</b>	2,97	56,92	48,39	70,90	60,26	32	<b>848,07</b>	0,086	0,079	0,060
<b>1547,42</b>	2,80	57,77	49,11	71,96	61,16	34	<b>857,41</b>	0,081	0,077	0,059
<b>1508,80</b>	2,65	58,65	49,86	73,05	62,09	36	<b>866,18</b>	0,077	0,075	0,057
<b>1472,34</b>	2,51	59,57	50,63	74,19	63,06	38	<b>874,47</b>	0,073	0,074	0,055
<b>1437,81</b>	2,38	60,52	51,44	75,37	64,07	40	<b>882,32</b>	0,069	0,072	0,054
<b>1405,02</b>	2,25	61,51	52,29	76,61	65,12	42	<b>889,77</b>	0,065	0,070	0,052
<b>1373,80</b>	2,12	62,55	53,17	77,91	66,22	44	<b>896,86</b>	0,062	0,069	0,051
<b>1343,28</b>	2,04	63,04	53,58	78,51	66,74	46	<b>903,63</b>	0,059	0,067	0,049
<b>1313,49</b>	2,00	63,03	53,58	78,50	66,73	48	<b>910,11</b>	0,058	0,066	0,048

<b>1284,94</b>	1,96	63,02	53,57	78,49	66,72	50	<b>916,32</b>	0,057	0,064	0,047
<b>1257,53</b>	1,92	63,01	53,56	78,48	66,70	52	<b>922,28</b>	0,056	0,063	0,046
<b>1231,18</b>	1,88	63,00	53,55	78,46	66,69	54	<b>928,00</b>	0,054	0,062	0,044
<b>1205,81</b>	1,84	62,99	53,54	78,45	66,68	56	<b>933,52</b>	0,053	0,060	0,043
<b>1181,34</b>	1,80	62,98	53,53	78,44	66,67	58	<b>938,84</b>	0,052	0,059	0,042
<b>1157,71</b>	1,77	62,97	53,52	78,42	66,66	60	<b>943,98</b>	0,051	0,058	0,041

Fonte: Dos autores (2022).

Portanto, como o valor de  $\lambda$  se mostra constantemente menor que  $\lambda_{r,fi}$ , utilizou-se sempre o fator de redução  $k_{y,\theta}$  como multiplicador da resistência ao escoamento  $f_y$ .

Na sequência, realizou-se a comparação do valor de  $\lambda$  com o parâmetro  $\lambda_{p,fi}$ , foi possível notar que para todos os valores de  $\lambda_{p,fi}$  encontrados  $\lambda$  é sempre menor que o mesmo, logo será utilizado a Equação 27 conforme 3.5.3, para determinar o esforço cortante resistente de cálculo.

$$\lambda \leq \lambda_{p,fi} : V_{Rd} = \frac{V_{Pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo:

$$V_{Pl} = 0,60 A_w f_y$$

E

$$A_w = d t_w$$

$$A_w = 14,8 \times 0,43$$

$$A_w = 6,36 \text{ cm}^2$$

Logo, utilizou-se novamente a ferramenta Excel para cálculo de  $V_{Pl}$  e conseqüentemente o cálculo de  $V_{Rd}$ , sendo  $\gamma_{a1} = 1,0$ , conforme apresentado no item 3.5.3. Os resultados estão apresentados na Tabela 12:

**Tabela 12** – Esforço cortante resistente sem revestimento.

<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b>Vpl (kN)</b>	<b>VRd (kN)</b>
<b>0</b>	<b>20,00</b>	131,73	131,73
<b>2</b>	<b>143,14</b>	131,73	131,73
<b>4</b>	<b>331,93</b>	131,73	131,73
<b>6</b>	<b>493,65</b>	104,59	104,59
<b>8</b>	<b>595,14</b>	63,90	63,90
<b>10</b>	<b>652,56</b>	45,30	45,30
<b>12</b>	<b>689,04</b>	33,77	33,77
<b>14</b>	<b>716,23</b>	27,73	27,73
<b>16</b>	<b>738,55</b>	24,21	24,21

---

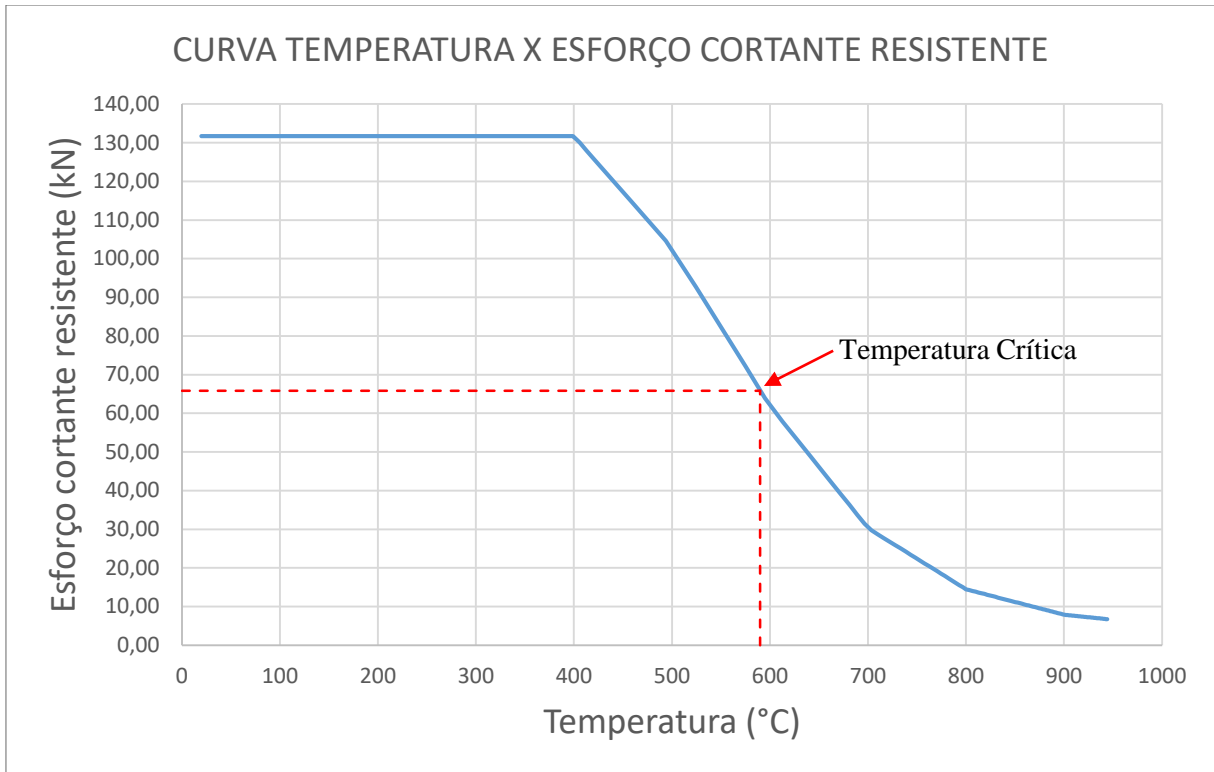
<b>18</b>	<b>757,72</b>	21,17	21,17
<b>20</b>	<b>774,60</b>	18,51	18,51
<b>22</b>	<b>789,71</b>	16,12	16,12
<b>24</b>	<b>803,39</b>	14,27	14,27
<b>26</b>	<b>815,90</b>	13,44	13,44
<b>28</b>	<b>827,43</b>	12,68	12,68
<b>30</b>	<b>838,11</b>	11,98	11,98
<b>32</b>	<b>848,07</b>	11,32	11,32
<b>34</b>	<b>857,41</b>	10,71	10,71
<b>36</b>	<b>866,18</b>	10,13	10,13
<b>38</b>	<b>874,47</b>	9,59	9,59
<b>40</b>	<b>882,32</b>	9,07	9,07
<b>42</b>	<b>889,77</b>	8,58	8,58
<b>44</b>	<b>896,86</b>	8,11	8,11
<b>46</b>	<b>903,63</b>	7,81	7,81
<b>48</b>	<b>910,11</b>	7,64	7,64
<b>50</b>	<b>916,32</b>	7,47	7,47
<b>52</b>	<b>922,28</b>	7,32	7,32
<b>54</b>	<b>928,00</b>	7,17	7,17
<b>56</b>	<b>933,52</b>	7,02	7,02
<b>58</b>	<b>938,84</b>	6,88	6,88
<b>60</b>	<b>943,98</b>	6,75	6,75

---

Fonte: Dos Autores (2022).

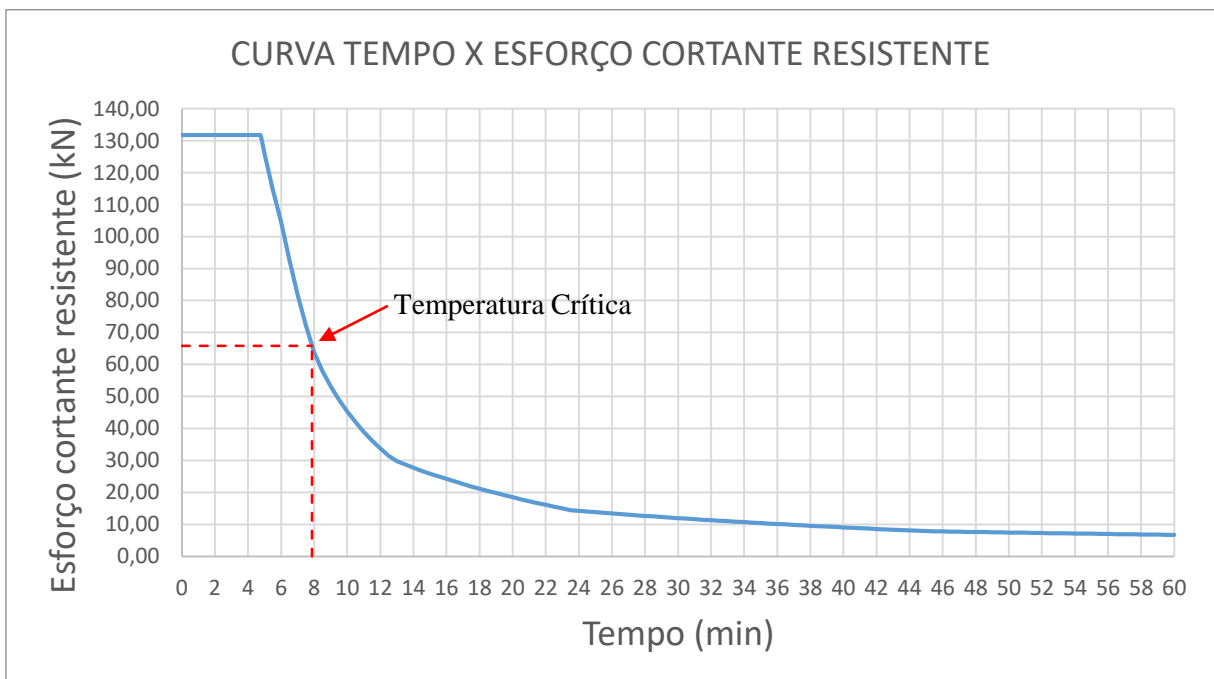
Com os resultados obtidos na Tabela 12, gerou-se as curvas expostas nas Figuras 15 e 16, com destaque para o ponto onde se encontra a temperatura crítica:

**Figura 15** – Curva Temperatura x Esforço cortante resistente sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

**Figura 16** – Curva Tempo x Esforço cortante resistente sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Sendo assim, de acordo com a Figura 15, é possível perceber que para a temperatura crítica de 590°C, o esforço cortante resistente se encontra na metade do seu valor em



temperatura ambiente, aproximadamente 65,86 kN. Analisando esse valor em relação ao tempo decorrido até atingir a temperatura crítica, verifica-se que o elemento estrutural se encontra em situação de risco apenas 8 minutos após o início do incêndio.

De modo análogo, foi realizada a análise dos parâmetros de interesse nos cálculos do esforço cortante em que o aço possua revestimento de argamassa de vermiculita para proteção contra incêndio, apresentado na Tabela 13:

**Tabela 13** – Parâmetros de cálculo com revestimento.

<b>E</b> <b>(kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>F<sub>y</sub></b> <b>(kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>λ<sub>p</sub></b>	<b>λ<sub>p,fi</sub></b>	<b>λ<sub>r</sub></b>	<b>λ<sub>r,fi</sub></b>	<b>Tempo</b> <b>(min)</b>	<b>θ<sub>a</sub> (°C)</b>	<b>K<sub>y,θ</sub></b>	<b>KE,θ</b>	<b>Kσ,θ</b>
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	0	<b>20,00</b>	1,000	1,000	1,000
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	2	<b>20,01</b>	1,000	1,000	1,000
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	4	<b>29,87</b>	1,000	1,000	1,000
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	6	<b>48,99</b>	1,000	1,000	1,000
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	8	<b>72,16</b>	1,000	1,000	1,000
<b>20000,00</b>	34,50	59,22	50,34	73,76	62,69	10	<b>97,43</b>	1,000	1,000	1,000
<b>19523,75</b>	34,50	58,51	49,74	72,87	61,94	12	<b>123,81</b>	1,000	0,976	0,974
<b>18985,53</b>	34,50	57,70	49,05	71,86	61,08	14	<b>150,72</b>	1,000	0,949	0,944
<b>18444,11</b>	34,50	56,87	48,34	70,83	60,21	16	<b>177,79</b>	1,000	0,922	0,914
<b>17904,45</b>	34,50	56,03	47,63	69,79	59,32	18	<b>204,78</b>	1,000	0,895	0,885
<b>17370,01</b>	34,50	55,19	46,91	68,74	58,43	20	<b>231,50</b>	1,000	0,869	0,855
<b>16843,24</b>	34,50	54,35	46,20	67,69	57,53	22	<b>257,84</b>	1,000	0,842	0,826
<b>16325,89</b>	34,50	53,51	45,48	66,64	56,64	24	<b>283,71</b>	1,000	0,816	0,798
<b>15819,20</b>	34,50	52,67	44,77	65,60	55,76	26	<b>309,04</b>	1,000	0,791	0,768
<b>15324,05</b>	34,50	51,84	44,06	64,56	54,88	28	<b>333,80</b>	1,000	0,766	0,736
<b>14841,05</b>	34,50	51,02	43,36	63,54	54,01	30	<b>357,95</b>	1,000	0,742	0,705
<b>14370,59</b>	34,50	50,20	42,67	62,52	53,14	32	<b>381,47</b>	1,000	0,719	0,674
<b>13912,89</b>	34,17	49,63	42,19	61,82	52,54	34	<b>404,36</b>	0,990	0,696	0,645
<b>13468,07</b>	32,48	50,09	42,57	62,38	53,02	36	<b>426,60</b>	0,941	0,673	0,618
<b>13036,12</b>	30,84	50,57	42,98	62,98	53,53	38	<b>448,19</b>	0,894	0,652	0,592
<b>12616,97</b>	29,25	51,08	43,42	63,62	54,08	40	<b>469,15</b>	0,848	0,631	0,567
<b>12210,49</b>	27,71	51,63	43,89	64,31	54,66	42	<b>489,48</b>	0,803	0,611	0,543
<b>11467,84</b>	25,93	51,73	43,97	64,43	54,76	44	<b>509,18</b>	0,752	0,573	0,509
<b>10360,82</b>	23,89	51,23	43,54	63,80	54,23	46	<b>528,26</b>	0,692	0,518	0,465
<b>9288,65</b>	21,91	50,64	43,05	63,07	53,61	48	<b>546,75</b>	0,635	0,464	0,422
<b>8250,55</b>	20,00	49,96	42,47	62,23	52,89	50	<b>564,65</b>	0,580	0,413	0,381
<b>7245,69</b>	18,14	49,15	41,78	61,22	52,04	52	<b>581,97</b>	0,526	0,362	0,341
<b>6273,21</b>	16,35	48,18	40,95	60,01	51,00	54	<b>598,74</b>	0,474	0,314	0,303
<b>5661,38</b>	14,98	47,82	40,65	59,56	50,63	56	<b>614,96</b>	0,434	0,283	0,273
<b>5096,30</b>	13,68	47,48	40,36	59,14	50,26	58	<b>630,66</b>	0,396	0,255	0,245
<b>4549,65</b>	12,42	47,08	40,02	58,63	49,84	60	<b>645,84</b>	0,360	0,227	0,217

Fonte: Dos autores (2022).

Fazendo-se a comparação do valor de  $\lambda$  com o parâmetro  $\lambda_{p,fi}$ , foi possível notar que para todos os valores de  $\lambda_{p,fi}$  encontrados,  $\lambda$  é sempre menor que o mesmo, portanto, utilizou-se novamente a ferramenta Excel para cálculo de  $V_{pl}$  e conseqüentemente o cálculo de  $V_{Rd}$ , sendo  $\gamma_{a1} = 1,0$ , conforme apresentado no item 3.5.3. Os resultados estão apresentados na Tabela 14:

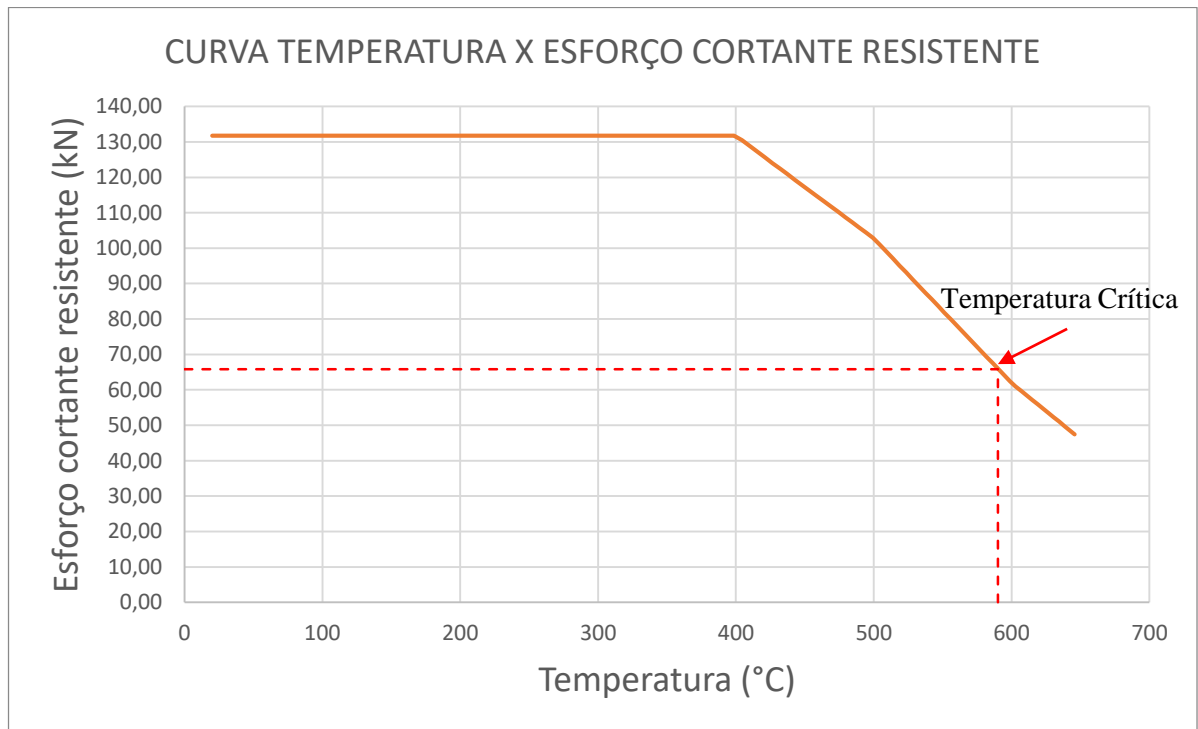
**Tabela 14** – Esforço cortante resistente com revestimento.

<b>Tempo (min)</b>	<b><math>\theta_a</math> (°C)</b>	<b><math>V_{pl}</math> (kN)</b>	<b><math>V_{Rd}</math> (kN)</b>
0	20,00	131,73	131,73
2	20,01	131,73	131,73
4	29,87	131,73	131,73
6	48,99	131,73	131,73
8	72,16	131,73	131,73
10	97,43	131,73	131,73
12	123,81	131,73	131,73
14	150,72	131,73	131,73
16	177,79	131,73	131,73
18	204,78	131,73	131,73
20	231,50	131,73	131,73
22	257,84	131,73	131,73
24	283,71	131,73	131,73
26	309,04	131,73	131,73
28	333,80	131,73	131,73
30	357,95	131,73	131,73
32	381,47	131,73	131,73
34	404,36	130,47	130,47
36	426,60	124,03	124,03
38	448,19	117,77	117,77
40	469,15	111,69	111,69
42	489,48	105,80	105,80
44	509,18	99,01	99,01
46	528,26	91,21	91,21
48	546,75	83,66	83,66
50	564,65	76,35	76,35
52	581,97	69,28	69,28
54	598,74	62,43	62,43
56	614,96	57,18	57,18
58	630,66	52,22	52,22
60	645,84	47,42	47,42

Fonte: Dos autores (2022).

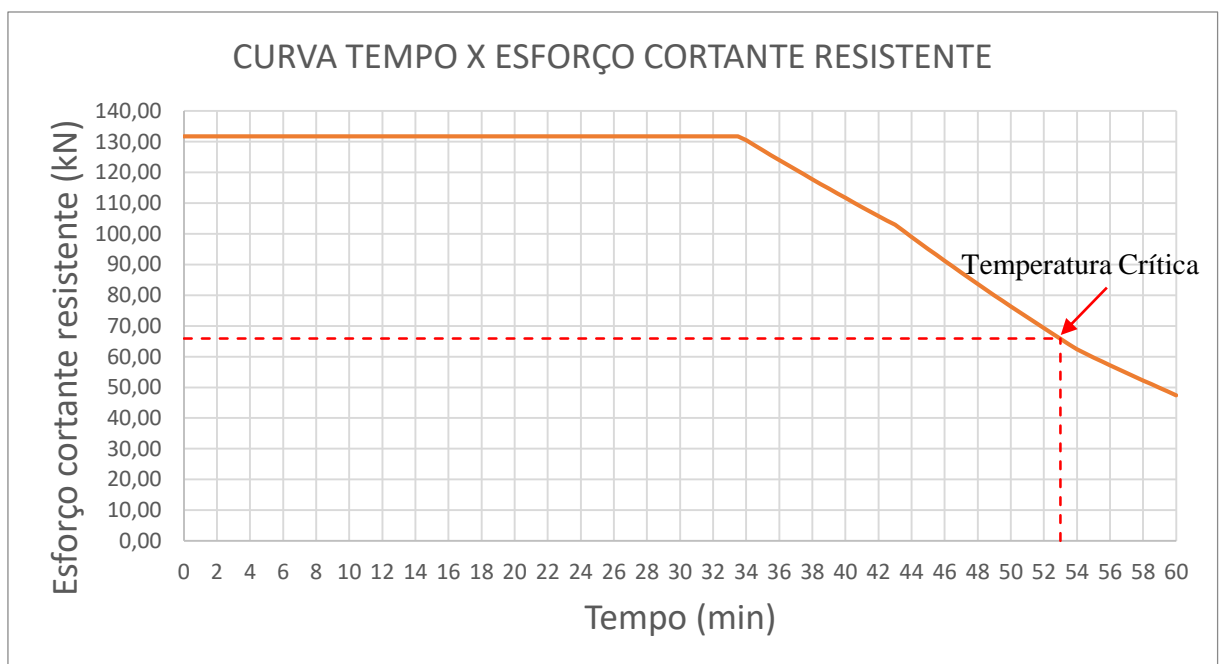
Com os resultados obtidos na Tabela 14, gerou-se as curvas expostas nas Figuras 17 e 18, com destaque para o ponto onde se encontra a temperatura crítica:

**Figura 17** – Curva Temperatura x Esforço cortante resistente com revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

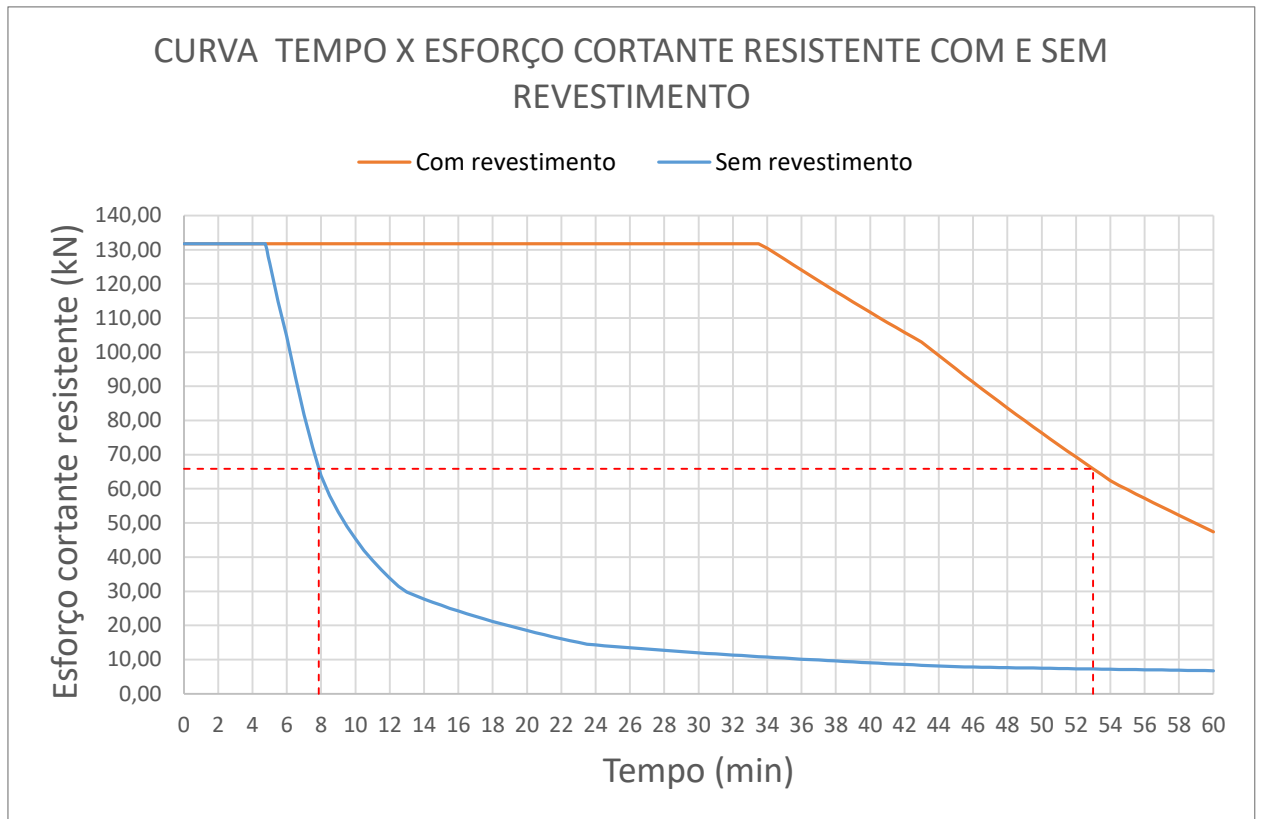
**Figura 18** – Curva Tempo x Esforço cortante resistente com revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Com base nos dados obtidos, a Figura 19 traz uma comparação dos resultados do esforço cortante resistente do aço sem revestimento e com revestimento, evidenciando o aumento do tempo necessário até que a temperatura crítica do aço seja atingida.

**Figura 19** – Curva Tempo x Esforço cortante resistente com e sem revestimento.



Fonte: Dos autores (2022).

Dessa maneira, para que o aço possa atingir a mesma temperatura crítica de 590 °C, percebe-se que seria necessário um tempo decorrido de aproximadamente 53 minutos de incêndio, cerca de 45 minutos a mais do que quando analisado sem revestimento, resultado coincidente com a análise realizada para o momento fletor resistente.

Sendo assim, o ganho de 45 minutos até que o elemento estrutural atinja a temperatura crítica e, conseqüentemente, o colapso da estrutura, justifica o uso da argamassa de vermiculita como material de proteção contra incêndio. Este material, além de possuir um baixo custo, conforme apresentado no tópico 4.2.3, possui também fácil aplicação e seu efeito se mostrou com grande eficácia. Portanto, esse acréscimo de tempo proporcionado pelo revestimento faz com que se atinja o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) para diversas classes de edifícios, conforme exposto na Figura 3. Além disso, faz com que o combate ao incêndio seja

realizado de forma mais segura, aumentando a segurança da vida dos integrantes do edifício, como também a integridade da edificação em chamas e construções adjacentes.

## 5 CONCLUSÕES

Em vista dos resultados e das discussões apresentados, a análise realizada a partir das normas técnicas brasileiras apresenta que o comportamento estrutural de uma viga metálica composta por aço ASTM A572 Grau 50, perfil W 150 x 13,0 durante incêndio, tem um melhor desempenho em relação a sua resistência e rigidez, quando revestido por argamassa de vermiculita, comparado a mesma sem revestimento.

Tendo em vista os aspectos apresentados, a viga revestida com argamassa de vermiculita possibilita aumentar o tempo que o aço leva para atingir sua temperatura crítica em 45 minutos, permitindo assim a evacuação dos ocupantes de uma edificação com maior tranquilidade e segurança.

Portanto, para que se possa refinar os resultados, seria importante aplicar os procedimentos teóricos desenvolvidos no presente trabalho de maneira prática, através de simulações em laboratório, para que se possa comparar os resultados e conseqüentemente viabilizar a aplicação desse e outros tipos de revestimentos contra incêndio que ainda são poucos estudados no Brasil. Outra forma de comparar esses resultados seria aplicar as propriedades do material em aço, e do revestimento, em softwares que sejam capazes de reproduzir uma situação de incêndio.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323 – Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- AZEVEDO, Macksuel Soares de; MURAKAMI, Almir; SILVA, Valdir Pignatta. Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, p. 295-301, 2007.
- BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. Pini, 2008.
- CAMPÊLO, Liris Silveira. Estudo numérico e analítico para determinação em situação de incêndio natural da carga crítica de vigas de aço com carga concentrada. **Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**. 2008.
- FAKURY, Ricardo H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, Rodrigo B. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. **São Paulo: Person Education do Brasil**, 2016.
- GHR ENGENHARIA. Argamassa projetada. **GHR ENGENHARIA**. 2019. Disponível em: < <https://www.ghrenharia.com/project-2> >. Acesso em: 11 ago. 2022.
- GUILHERME, Deize Daiane Pinto; CABRAL, Kleber Cavalcanti; SOUZA, Wendell Rossine Medeiros de. Estudo do uso de vermiculita expandida nas propriedades mecânicas de argamassas leves. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020
- MARTINS, Michele Mendonça. Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio. **Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**. 2000.
- PAIVA, Álvaro Teixeira de. Análise da resistência de elementos metálicos em situação de incêndio pela norma NBR 14323: 2013. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília**. 2018.
- PASTORELLO, Ana Paula. Desempenho de estruturas de aço, em situação de incêndio, com diferentes proteções passivas. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Caxias do Sul - UCS**. 2020.

REAL, Paulo Vila. **Incêndio em Estruturas Metálicas: cálculo estrutural**. 2003.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MOBILIDADE. Preços SETOP: Região Sul – sem desoneração (mês de referência – abril/2022). **Secretaria de Infraestrutura e Mobilidade**. 2022.

SHAKIL, Saani; LU, Wei; PUTTONEN, Jari. Response of high-strength steel beam and single-storey frame in fire: Numerical simulation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 148, p. 551-561, 2018.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. Resistência ao fogo das estruturas de aço: IBS/CBCA. 2005.