

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DETERMINAÇÃO NUMÉRICA E ANALÍTICA DA CARGA  
CRÍTICA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA DE VIGAS DE  
AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL**

**LARISA DANIELE TELES RODRIGUES**

**ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA**  
**CO-ORIENTADOR: WILLIAM TAYLOR MATIAS SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM - 007 A/13**  
**BRASÍLIA/DF: MAIO – 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DETERMINAÇÃO NUMÉRICA E ANALÍTICA DA CARGA  
CRÍTICA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA DE VIGAS DE AÇO  
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL**

**LARISA DANIELE TELES RODRIGUES**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. José Manoel Morales Sánchez, DSc (FAU-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Antônio Maria Claret de Gouvêia, DSc (UFOP)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 23 DE MAIO DE 2013**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, LARISA DANIELE TELES

Determinação Numérica e Analítica da Carga Crítica Uniformemente Distribuída de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural [Distrito Federal] 2013. xviii, 219 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estrutura de Aço

3. Análise Térmica

I. ENC/FT/UnB

2. Incêndio

4. Carga Crítica

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, L. D. T. (2013). Determinação Numérica e Analítica da Carga Crítica Uniformemente Distribuída de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-007A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 219 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Larisa Daniele Teles Rodrigues.

TÍTULO: Determinação Numérica e Analítica da Carga Crítica Uniformemente Distribuída de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Larisa Daniele Teles Rodrigues  
SQN 216, Bloco B, Apt. 611, Asa Norte – CEP 70.875-020.  
Brasília – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar sempre em direção ao caminho certo, pela força e orientação que me dá para as minhas decisões. Sem ele, não sou ninguém.

Aos meus pais Maria Lucineide e Francisco Teles que sempre me deram o apoio necessário para tudo em minha vida. Sem a base, amor e educação que eles me deram, com certeza eu não estaria hoje com a formação que eu tenho. E também agradeço ao meu irmão George, que mesmo de longe me passa muita força e energias positivas. Eu amo muito vocês!

Ao meu querido marido Carlos Eduardo, que é meu melhor amigo, meu amor e companheiro. Sem o apoio dele com certeza eu não teria chegado até aqui. Eu te amo infinitamente e para sempre, meu amor! Você é meu companheiro de todas as horas!

Ao querido orientador, Professor Luciano Mendes Bezerra, pela orientação e apoio de sempre! Com certeza seus ensinamentos foram de vital importância para minha formação. Uma pessoa que admiro muito por sua inteligência e por estar sempre disposto a colaborar e incentivar seus alunos. Agradeço por ter confiado em mim para o desenvolvimento e sucesso desse trabalho.

A todos os meus professores da Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, pelos ensinamentos e apoio dados para que meus objetivos fossem alcançados.

Aos amigos Marília Marcy, Ramon Saleno, Andrea Nataly, Alejandro Pérez, Anderson Silva, Yina Muñoz e Tatiana Lopez pela amizade e incentivo de sempre. Vocês me ajudaram muito, tanto nos estudos de fato, como nas risadas do dia-a-dia, tornando tudo muito mais prazeroso.

Ao engenheiro Frederico Donagemma, que foi um grande incentivador para que eu me apaixonasse pelo universo das estruturas metálicas. Agradeço pela oportunidade de ter trabalhado com esse grande mestre das estruturas de aço.

Aos meus professores de graduação da UFRJ, em especial ao querido Professor Sérgio Hampshire, que sempre me deu todo apoio e incentivo necessário para crescer profissionalmente. Um grande exemplo a ser seguido de profissional competente!

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro ao longo dessa jornada de mestrado.



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Lucineide e Francisco,  
Ao meu marido, Carlos Eduardo,  
E ao meu irmão, George.*

## **RESUMO**

### **DETERMINAÇÃO NUMÉRICA E ANALÍTICA DA CARGA CRÍTICA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA DE VIGAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL**

**Autora: Larisa Daniele Teles Rodrigues**

**Orientador: Luciano Mendes Bezerra**

**Co-orientador: William Taylor Matias Silva**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, 23 de maio de 2013**

Quando o fenômeno do incêndio ocorre em estruturas de aço, com o aumento da temperatura, ocorre uma debilitação das propriedades mecânicas do aço, provocando colapsos estruturais. Para se evitar efeitos catastróficos durante a ação do fogo, é importante e necessário o conhecimento sobre o comportamento dessas estruturas em situação de incêndio. O interessante, porém, não é que essa prevenção seja apenas feita, mas sim, que seja realizada de uma forma não tão conservadora e mais próxima da realidade. Ou seja, o objetivo é que essa prevenção seja otimizada e que se tenham menos gastos possíveis. Com esse intuito, nesse trabalho é feito um estudo numérico e analítico sobre o comportamento de vigas de aço, em perfil I, submetidas a situações de incêndio natural e com carga uniformemente distribuída. É feito um estudo sobre o fenômeno do incêndio, seus tipos de modelos, a degradação das propriedades do aço com o aumento da temperatura, a segurança contra o incêndio, isolamento térmico de estruturas e os mecanismos de transmissão de calor. É proposta uma formulação analítica através do método da energia para determinação da carga crítica nominal uniformemente distribuída na viga de aço, levando-se em conta a instabilidade lateral com flexo-torção. Esta formulação leva em consideração o aquecimento desigual das mesas do perfil I. Também é estudada a formulação desenvolvida por Silva em sua dissertação, mas considerando o fenômeno do incêndio, e é apresentado como a Norma Brasileira determina a carga crítica para esse caso. São apresentados quatro casos de estudo com perfis de aço diferentes e cada caso subdividido em análises com proteção térmica e sem proteção térmica. Esses casos possuem diferentes cargas de incêndio e graus de ventilação, resultando em diferentes incêndios naturais. As cargas críticas nominais resultantes da formulação proposta são maiores que aquelas calculadas pela Norma Brasileira.

## **ABSTRACT**

### **NUMERICAL AND ANALYTICAL DETERMINATION OF UNIFORMLY DISTRIBUTED CRITICAL LOAD ON STEEL BEAMS UNDER A NATURAL FIRE SITUATION**

**Author: Larisa Daniele Teles Rodrigues**

**Supervisor: Luciano Mendes Bezerra**

**Second Supervisor: William Taylor Matias Silva**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, May 23th, 2013**

When the fire phenomenon happens on steel structures, with increasing temperature, there is a weakening of steel mechanical properties causing structural collapses. To avoid catastrophic effects during the fire action, it is important and necessary to know about these structures behavior under fire conditions. However, the interesting thing is not that such prevention is merely done. Rather, it is performed in such a way that is not so conservative and it is closer to reality. In other words, the aim is that this prevention be optimized and that do not spend so much on the budget. With this aim, in this work it is done an analytical and numerical study about steel I-beams behavior under natural fire situations and with uniformly distributed load. It is done a study about fire phenomenon, its model types, the weakening of steel properties with temperature increase, the safety against fire, thermal insulation of structures and the mechanisms of heat transfer. It is proposed an analytical formulation, based on the energy method, for determination of uniformly distributed critical load on steel beam, taking into account the lateral flexural-torsional buckling (LTB). This formulation considers the unequal heating of flanges. The formulation developed by Silva on his dissertation is also studied, but considering fire phenomenon, and it is shown how Brazilian standard determines the critical load for this case. Four study cases are presented with different steel sections and each case is subdivided into analyses with and without heat protection. These cases have different fire loads and different aeration ratios, resulting in different natural fires. The resulting nominal critical loads from the proposed formulation are higher than those calculated by Brazilian Standard.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 - ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 - OBJETIVOS DESTE TRABALHO .....</b>	<b>6</b>
<b>1.5 - ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....</b>	<b>7</b>
<b>2 - INCÊNDIO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 - CONCEITO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 - EVOLUÇÃO DE UM INCÊNDIO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 - SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO BRASIL .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 - MODELOS DE INCÊNDIO .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1 - Incêndio-Padrão .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2 - Incêndio Natural.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 - PROPRIEDADES DO AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.1 - Resistência ao Escoamento dos Aços – Propriedade mecânica .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2 - Módulo de elasticidade – Propriedade mecânica .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.3 - Massa específica – Propriedade mecânica .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.4 - Condutividade térmica – Propriedade térmica .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.5 - Calor específico – Propriedade térmica .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6 - DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA PARA PERFIS I EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO A NBR 14323 (1999) E NBR 8800 (1986).....</b>	<b>38</b>
<b>3 - ISOLAMENTO TÉRMICO.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.1 - Material constituinte .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2 - Morfologia .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3 - Técnica de montagem.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 - REVESTIMENTO UTILIZADO.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.1 - Vermiculita.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.2 - Concreto leve com vermiculita.....</b>	<b>50</b>

<b>4 - FENÔMENO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 - TRANSMISSÃO DE CALOR.....</b>	<b>51</b>
4.1.1 - Condução.....	53
4.1.2 - Convecção.....	55
4.1.3 - Radiação .....	57
<b>4.2 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA FÍSICA MATEMÁTICA.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3 - PROBLEMA TÉRMICO .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4 - TRANSMISSÃO DE CALOR TRANSIENTE EM SÓLIDOS.....</b>	<b>64</b>
<b>4.5 - ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO .....</b>	<b>65</b>
4.5.1 - Modelo simplificado de cálculo: estrutura de aço sem proteção.....	66
4.5.2 - Modelo simplificado de cálculo: estrutura de aço com proteção .....	68
4.5.3 - Fator de massividade.....	69
4.5.4 - Modelo simplificado de cálculo: aplicações.....	73
<b>5 - FORMULAÇÃO ANALÍTICA DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....</b>	<b>78</b>
5.1 - INTRODUÇÃO .....	78
5.2 - DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA, PELO MÉTODO DA ENERGIA, PARA VIGAS DE AÇO COM CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA.....	82
5.2.1 - Determinação da energia interna de deflexão e de torção da viga .....	86
5.2.2 - Determinação do trabalho externo .....	97
5.2.3 - Determinação da carga crítica uniformemente distribuída $q_{cr}$ .....	106
<b>6 - GENERALIZAÇÃO DA FORMULAÇÃO DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I” .....</b>	<b>111</b>
6.1 - FORMULAÇÃO ANALÍTICA.....	111
6.2 - COMPARAÇÕES .....	114
6.2.1 - Caso de momento uniforme.....	114
6.2.2 - Caso de carga concentrada no meio do vão .....	116
6.2.3 - Caso de carga uniformemente distribuída.....	117
<b>7 - ANÁLISE NUMÉRICA – ANSYS .....</b>	<b>120</b>
7.1 - O PROGRAMA .....	120

7.2 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	122
7.3 - DISCRETIZAÇÃO DA MALHA .....	126
7.4 - ELEMENTO UTILIZADO .....	126
7.5 - CARGA TÉRMICA UTILIZADA .....	129
7.6 - MÉTODO DA CONVERGÊNCIA .....	130
8 - APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS .....	131
8.1 - INTRODUÇÃO .....	131
8.2 - CASO 1: PERFIL “I” CVS 300 X 85 – INCÊNDIO 1 .....	133
8.2.1 - Perfil sem proteção térmica .....	134
8.2.2 - Perfil com proteção térmica .....	143
8.2.3 - Influência do isolamento .....	151
8.3 - CASO 2: PERFIL “I” VS 400 X 68 – INCÊNDIO 2 .....	153
8.3.1 - Perfil sem proteção térmica .....	154
8.3.2 - Perfil com proteção térmica .....	163
8.3.3 - Influência do isolamento .....	171
8.4 - CASO 3: PERFIL “I” VS 550 X 88 – INCÊNDIO 2 .....	172
8.4.1 - Perfil sem proteção térmica .....	173
8.4.2 - Perfil com proteção térmica .....	182
8.4.3 - Influência do isolamento .....	189
8.5 - CASO 4: PERFIL “I” CVS 600 X 210 – INCÊNDIO 3 .....	191
8.5.1 - Perfil sem proteção térmica .....	192
8.5.2 - Perfil com proteção térmica .....	200
8.5.3 - Influência do isolamento .....	208
9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	210
9.1 - ANÁLISE DE RESULTADOS.....	210
9.2 - CONCLUSÕES.....	211
9.3 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	214
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	215

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Principais pontos de alguns combustíveis.....	13
Tabela 2.2 - Valores da curva temperatura x tempo – ASTM 119 (1988).....	22
Tabela 2.3 - Valores de potencial calorífico específico – NBR 14432 (2000).....	25
Tabela 2.4 - Valores de carga de incêndio específica – NBR 14432 (2000).....	26
Tabela 2.5 - Fatores de redução: limite de escoamento dos aços – NBR 14323 (1999).....	32
Tabela 2.6 - Fatores de redução: módulo de elasticidade dos aços – NBR 14323 (1999) ..	34
Tabela 3.1 - Propriedades do concreto leve com vermiculita .....	50
Tabela 4.1 - Problemas físicos relacionados a equações diferenciais harmônicas.....	60
Tabela 4.2 - Fator de massividade dos perfis utilizados sem proteção térmica.....	72
Tabela 4.3 - Fator de massividade dos perfis utilizados com proteção térmica .....	72
Tabela 7.1 - Perfis adotados e propriedades geométricas.....	123
Tabela 7.2 - Casos de estudo .....	123
Tabela 7.3 - Elementos planos para análise térmica.....	126
Tabela 7.4 - Resumo de entrada – PLANE55. ....	129
Tabela 8.1 - Casos de estudo: sem proteção térmica.....	132
Tabela 8.2 - Casos de estudo: com proteção térmica. ....	132
Tabela 8.3 - Propriedades geométricas do perfil CVS 300 x 85 .....	133
Tabela 8.4 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.....	142
Tabela 8.5 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.....	150
Tabela 8.6 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.....	152
Tabela 8.7 - Propriedades geométricas do perfil VS 400 X 68 .....	153
Tabela 8.8 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 .....	162
Tabela 8.9 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 .....	170
Tabela 8.10 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 .....	172
Tabela 8.11 - Propriedades geométricas do perfil VS 550 X 88 .....	172
Tabela 8.12 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 .....	181
Tabela 8.13 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 .....	188
Tabela 8.14 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 .....	190
Tabela 8.15 - Propriedades geométricas do perfil CVS 600 X 210 .....	191
Tabela 8.16 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.....	200
Tabela 8.17 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.....	207
Tabela 8.18 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.....	209

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Triângulo do Fogo. ....	11
Figura 2.2 - Tetraedro do Fogo.....	11
Figura 2.3 - Curva de desenvolvimento de um incêndio (ISO/TR3814: 1989) .....	14
Figura 2.4 - Curvas temperatura x tempo de incêndio-padrão: EUROCODE 1 (1995), ASTM 119 (1988), ISO 834 (1999) e NBR 14432 (2000).....	23
Figura 2.5 - Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ( $q_{fi} = 500 \text{ MJ/m}^2$ ).....	30
Figura 2.6 - Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ( $O = 0,08 \text{ m}^{1/2}$ ).....	30
Figura 2.7 - Curvas características dos fatores de redução para o limite de escoamento dos aços – NBR 14323 (1999) .....	33
Figura 2.8 - Curvas características dos fatores de redução para o módulo de elasticidade dos aços – NBR 14323 (1999).....	34
Figura 2.9 - Condutividade térmica dos aços em função da temperatura.....	36
Figura 2.10 - Calor específico dos aços em função da temperatura .....	37
Figura 3.1 - Proteções clássicas de estruturas de aço contra incêndio .....	45
Figura 3.2 - Revestimento tipo contorno para pilares e vigas .....	46
Figura 3.3 - Revestimento tipo caixa para pilares e vigas .....	46
Figura 3.4 - Aplicação manual com colher e desempenadeira .....	47
Figura 3.5 - Massa moldada com o uso de forma.....	47
Figura 3.6 - Montagem de placas de gesso.....	48
Figura 3.7 - Aplicação por jateamento .....	48
Figura 3.8 - Fixação de manta cerâmica com dispositivos adequados .....	49
Figura 4.1 - Mecanismos de transferência de calor .....	53
Figura 4.2 - Fluxo térmico.....	63
Figura 4.3 - Fator de massividade – Elementos estruturais sem proteção.....	70
Figura 4.4 - Fator de massividade – Elementos estruturais com proteção .....	71
Figura 4.5 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 1 .....	74
Figura 4.6 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 2 .....	75
Figura 4.7 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 3 .....	75



Figura 4.8 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 1 .....	76
Figura 4.9 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 2 .....	76
Figura 4.10 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 3 .....	77
Figura 5.1 - Gráfico qualitativo referente ao comportamento do módulo de elasticidade devido o aquecimento desigual dos flanges durante um incêndio.....	79
Figura 5.2 - Seção transversal das vigas I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetidas à situação de incêndio.....	80
Figura 5.3 - Viga I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetida à situação de incêndio – Perfil sem revestimento.....	81
Figura 5.4 - Viga I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetida à situação de incêndio – Perfil com revestimento .....	81
Figura 5.5 - Centro de flexão e centróide da seção transversal da viga I .....	83
Figura 5.6 - Viga I sob flambagem lateral com torção (FLT) e vista da seção transversal deformada .....	86
Figura 5.7 - Rotação da seção transversal da viga I após a FLT .....	87
Figura 5.8 - Vista frontal da viga I submetida à carga uniformemente distribuída e seus deslocamentos.....	97
Figura 5.9 - Seção transversal da viga I submetida à carga uniformemente distribuída e seus deslocamentos .....	97
Figura 6.1 - Sistemas de coordenadas adotado por Silva (1992).....	112
Figura 7.1 - Esquema geral do modelo adotado para análise via ANSYS (2007) - Perfis sem revestimento .....	125
Figura 7.2 - Esquema geral do modelo adotado para análise via ANSYS (2007) - Perfis com revestimento.....	125
Figura 7.3 - Elemento finito PLANE55 .....	127
Figura 8.1 - Incêndio natural 1 .....	133
Figura 8.2 - Localização dos elementos selecionados para o perfil CVS 300 x 85.....	134
Figura 8.3 - Temperaturas do elemento 8321 ao longo do incêndio .....	135
Figura 8.4 - Temperaturas do elemento 8664 ao longo do incêndio .....	135
Figura 8.5 - Temperaturas do elemento 8414 ao longo do incêndio .....	136
Figura 8.6 - Temperaturas do elemento 8607 ao longo do incêndio .....	136

Figura 8.7 - Temperaturas do elemento 8550 ao longo do incêndio .....	136
Figura 8.8 - Temperaturas do elemento 8675 ao longo do incêndio .....	137
Figura 8.9 - Temperaturas do elemento 8494 ao longo do incêndio .....	137
Figura 8.10 - Temperaturas do elemento 8340 ao longo do incêndio .....	137
Figura 8.11 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 85 .....	138
Figura 8.12 - Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 85 - ANSYS (2007) .....	139
Figura 8.13 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 300 x 85 .....	140
Figura 8.14 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1 .....	141
Figura 8.15 - Temperaturas do elemento 8321 ao longo do incêndio .....	144
Figura 8.16 - Temperaturas do elemento 8664 ao longo do incêndio .....	144
Figura 8.17 - Temperaturas do elemento 8414 ao longo do incêndio .....	144
Figura 8.18 - Temperaturas do elemento 8607 ao longo do incêndio .....	145
Figura 8.19 - Temperaturas do elemento 8550 ao longo do incêndio .....	145
Figura 8.20 - Temperaturas do elemento 8675 ao longo do incêndio .....	145
Figura 8.21 - Temperaturas do elemento 8494 ao longo do incêndio .....	146
Figura 8.22 - Temperaturas do elemento 8340 ao longo do incêndio .....	146
Figura 8.23 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 85 .....	147
Figura 8.24 - Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 85 - ANSYS (2007) .....	148
Figura 8.25 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 300 x 85 .....	149
Figura 8.26 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1 .....	150
Figura 8.27 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1 - Formulação Analítica .....	152
Figura 8.28 - Incêndio natural 2 .....	153
Figura 8.29 - Localização dos elementos selecionados para o perfil VS 400 X 68 .....	154
Figura 8.30 - Temperaturas do elemento 1875 ao longo do incêndio .....	155
Figura 8.31 - Temperaturas do elemento 1792 ao longo do incêndio .....	155
Figura 8.32 - Temperaturas do elemento 1834 ao longo do incêndio .....	156
Figura 8.33 - Temperaturas do elemento 1751 ao longo do incêndio .....	156
Figura 8.34 - Temperaturas do elemento 1674 ao longo do incêndio .....	156
Figura 8.35 - Temperaturas do elemento 1597 ao longo do incêndio .....	157
Figura 8.36 - Temperaturas do elemento 1576 ao longo do incêndio .....	157
Figura 8.37 - Temperaturas do elemento 1554 ao longo do incêndio .....	157

Figura 8.38 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 400 X 68 .....	158
Figura 8.39 - Evolução térmica (°C) - Perfil VS 400 X 68 - ANSYS (2007).....	159
Figura 8.40 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 400 X 68 .....	160
Figura 8.41 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 – Incêndio 2 .....	161
Figura 8.42 - Temperaturas do elemento 1875 ao longo do incêndio .....	163
Figura 8.43 - Temperaturas do elemento 1792 ao longo do incêndio .....	164
Figura 8.44 - Temperaturas do elemento 1834 ao longo do incêndio .....	164
Figura 8.45 - Temperaturas do elemento 1751 ao longo do incêndio .....	164
Figura 8.46 - Temperaturas do elemento 1674 ao longo do incêndio .....	165
Figura 8.47 - Temperaturas do elemento 1597 ao longo do incêndio .....	165
Figura 8.48 - Temperaturas do elemento 1576 ao longo do incêndio .....	165
Figura 8.49 - Temperaturas do elemento 1554 ao longo do incêndio .....	166
Figura 8.50 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 400 X 68 .....	166
Figura 8.51 - Evolução térmica (°C) - Perfil VS 400 X 68 - ANSYS (2007).....	168
Figura 8.52 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 400 X 68 .....	169
Figura 8.53 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 – Incêndio 2 .....	170
Figura 8.54 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68– Incêndio 2 - Formulação Analítica .....	171
Figura 8.55 - Localização dos elementos selecionados para o perfil VS 550 X 88 .....	173
Figura 8.56 - Temperaturas do elemento 855 ao longo do incêndio .....	174
Figura 8.57 - Temperaturas do elemento 2597 ao longo do incêndio .....	174
Figura 8.58 - Temperaturas do elemento 2699 ao longo do incêndio .....	175
Figura 8.59 - Temperaturas do elemento 1530 ao longo do incêndio .....	175
Figura 8.60 - Temperaturas do elemento 6171 ao longo do incêndio .....	175
Figura 8.61 - Temperaturas do elemento 7826 ao longo do incêndio .....	176
Figura 8.62 - Temperaturas do elemento 7932 ao longo do incêndio .....	176
Figura 8.63 - Temperaturas do elemento 8033 ao longo do incêndio .....	176
Figura 8.64 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 550 X 88 .....	177
Figura 8.65 - Evolução térmica (°C) - Perfil VS 550 X 88 - ANSYS (2007).....	178
Figura 8.66 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 550 X 88 .....	179
Figura 8.67 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2 .....	180

Figura 8.68 - Temperaturas do elemento 855 ao longo do incêndio .....	182
Figura 8.69 - Temperaturas do elemento 2597 ao longo do incêndio .....	183
Figura 8.70 - Temperaturas do elemento 2699 ao longo do incêndio .....	183
Figura 8.71 - Temperaturas do elemento 1530 ao longo do incêndio .....	183
Figura 8.72 - Temperaturas do elemento 6171 ao longo do incêndio .....	184
Figura 8.73 - Temperaturas do elemento 7826 ao longo do incêndio .....	184
Figura 8.74 - Temperaturas do elemento 7932 ao longo do incêndio .....	184
Figura 8.75 - Temperaturas do elemento 8033 ao longo do incêndio .....	185
Figura 8.76 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 550 X 88 .....	185
Figura 8.77 - Evolução térmica (°C) - Perfil VS 550 X 88 - ANSYS (2007) .....	186
Figura 8.78 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 550 X 88 .....	187
Figura 8.79 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2 .....	188
Figura 8.80 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2 - Formulação Analítica .....	189
Figura 8.81 - Incêndio natural 3 .....	191
Figura 8.82 - Localização dos elementos selecionados para o perfil CVS 600 X 210.....	192
Figura 8.83 - Temperaturas do elemento 5964 ao longo do incêndio .....	193
Figura 8.84 - Temperaturas do elemento 5802 ao longo do incêndio .....	193
Figura 8.85 - Temperaturas do elemento 5922 ao longo do incêndio .....	193
Figura 8.86 - Temperaturas do elemento 5544 ao longo do incêndio .....	194
Figura 8.87 - Temperaturas do elemento 5361 ao longo do incêndio .....	194
Figura 8.88 - Temperaturas do elemento 4415 ao longo do incêndio .....	194
Figura 8.89 - Temperaturas do elemento 4618 ao longo do incêndio .....	195
Figura 8.90 - Temperaturas do elemento 4816 ao longo do incêndio .....	195
Figura 8.91 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 X 210.....	196
Figura 8.92 - Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600 X 210 - ANSYS (2007) .....	197
Figura 8.93 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 600 X 210.....	198
Figura 8.94 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3 .....	199
Figura 8.95 - Temperaturas do elemento 5964 ao longo do incêndio .....	201
Figura 8.96 - Temperaturas do elemento 5802 ao longo do incêndio .....	202
Figura 8.97 - Temperaturas do elemento 5922 ao longo do incêndio .....	202
Figura 8.98 - Temperaturas do elemento 5544 ao longo do incêndio .....	202

Figura 8.99 - Temperaturas do elemento 5361 ao longo do incêndio .....	203
Figura 8.100 - Temperaturas do elemento 4415 ao longo do incêndio .....	203
Figura 8.101 - Temperaturas do elemento 4618 ao longo do incêndio .....	203
Figura 8.102 - Temperaturas do elemento 4816 ao longo do incêndio .....	204
Figura 8.103 - Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 X 210.....	204
Figura 8.104 - Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600 X 210 - ANSYS (2007) .....	205
Figura 8.105 - Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 600 X 210.....	206
Figura 8.106 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3 .....	207
Figura 8.107 - Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3 - Formulação Analítica .....	208

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Salvo indicação contrária, a seguinte notação é utilizada em todo este trabalho.

## 1. Escalares

$a$	Distância entre o ponto de aplicação do carregamento e o centro de torção
$A$	Área da seção transversal do elemento estrutural de aço
$A_{fc}$	Área da seção através da qual o calor flui por condução
$A_i$	Área da abertura “i”
$A_q$	Área da superfície do material combustível que pode participar da combustão
$A_r$	Área do piso do compartimento
$A_t$	Área total (pisos, paredes, teto e aberturas)
$A_v$	Área total das aberturas para o exterior do compartimento
$A_1$	Área da mesa superior
$A_2$	Área da mesa inferior
$b_{f1}$	Largura da mesa superior
$b_{f2}$	Largura da mesa inferior
$b_w$	Comprimento da alma
$c$	Calor específico;
$c_a$	Calor específico do aço
$c_m$	Calor específico do material de proteção contra incêndio
$c_1$	Distância do meio da mesa superior ao centro de flexão
$c_2$	Distância do meio da mesa inferior ao centro de flexão
$C$	Centro de flexão (ou centro de cisalhamento) da seção transversal da viga
$C_b$	Fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme
$C_i$	Constante torcional reduzida
$C_k$	Coefficiente associado à monossimetria da seção
$C_p$	Coefficiente associado à posição do carregamento
$C_w$	Constante de empenamento
$\hat{C}$	Rigidez torcional
$d$	Altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão
$D$	Distancia do ponto P ao ponto C
$e$	Excentricidade (distância do centro de flexão ao centroide)
$E$	Módulo de elasticidade do aço

$E_0$	Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente
$E_1$	Módulo de elasticidade do aço da mesa superior
$E_2$	Módulo de elasticidade do aço da mesa inferior
$E_\theta$	Módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura $\theta_a$
$(EI)_t$	Rigidez total equivalente do perfil
$f$	Distância do ponto de aplicação da carga crítica uniformemente distribuída ao eixo horizontal da mesa inferior
$f_y$	Limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C
$f_{y0}$	Limite de escoamento dos aços trefilados a 20°C
$f_{y0,\theta}$	Limite de escoamento dos aços trefilados a uma temperatura $\theta_a$
$f_{y,\theta}$	Limite de escoamento dos aços laminados a quente a uma temperatura $\theta_a$
$G$	Módulo de elasticidade transversal
$h$	Distância do meio da mesa superior ao meio da mesa inferior
$h_i$	Altura da abertura “i”
$H$	Coefficiente de troca térmica entre o corpo e o ambiente
$H_c$	Corrente térmica de convecção
$H_i$	Potencial calorífico de cada componente “i” do material combustível
$I_t$	Constante torcional
$I_T$	Momento de inércia à torção
$I_x$	Momento de inércia total da seção transversal, em relação ao eixo x local
$I_1$	Momento de inércia, em relação ao eixo z local, referente à mesa superior
$I_2$	Momento de inércia, em relação ao eixo z local, referente à mesa inferior
$(I)_t$	Somatório dos momentos de inércia, em relação ao eixo z local, referente às mesas
$J$	Constante torcional
$k$	Coefficiente de monossimetria
$k_1$	Fator de correção para a temperatura não uniforme na seção transversal da barra
$k_2$	Fator de correção para a temperatura não uniforme no comprimento da barra;
$K$	Coefficiente associado ao tipo de vinculação (restrição a deslocamentos)
$K_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço
$K_n$	Condutividade térmica na direção n
$K_{y0,\theta}$	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços trefilados
$K_{y,\theta}$	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços laminados a quente
$l$	Comprimento do vão da viga

$L_b$	Comprimento da viga sem travamento lateral
$m$	Massa
$m_a$	Massa do aço
$m_i$	Coefficiente que indica a eficiência da combustão do material combustível
$M$	Momento fletor referente à posição $x$
$M_{cr}$	Momento fletor de flambagem elástica em temperatura ambiente
$M_{fi,Rd}$	Resistência de cálculo ao momento fletor
$M_i$	Massa total de cada componente “ $i$ ” do material combustível
$M_n$	Resistência nominal
$M_{pl}$	Momento de plastificação da seção transversal de projeto em temperatura ambiente
$M_r$	Momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal para projeto em temperatura ambiente
$M_T$	Momento de torção
$M_1$	Menor dos dois momentos fletores de cálculo nas extremidades do trecho não contido lateralmente
$M_{1z}$	Momento de flexão na mesa superior
$M_2$	Maior dos dois momentos fletores de cálculo nas extremidades do trecho não contido lateralmente
$M_{2z}$	Momento de flexão na mesa inferior
$n$	Direção normal externa à superfície no ponto considerado
$O$	Grau de ventilação ou fator de abertura;
$P$	Centro de rotação
$P_{cr}$	Carga crítica para uma carga concentrada no meio do vão da viga
$q_{cr}$	Carga crítica uniformemente distribuída
$q_{fi}$	Carga de incêndio específica
$q_{fi,d}$	Valor de cálculo da carga de incêndio específica
$q_o$	Fluxo de calor absorvido ou emanado pelo corpo
$Q$	Geração de calor por unidade de volume
$r_y$	Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia
$R_A$	Reação na extremidade A
$R_B$	Reação na extremidade B
$t$	Tempo
$t_f$	Espessura da mesa



$t_{f1}$	Espessura da mesa superior
$t_{f2}$	Espessura da mesa inferior
$t_m$	Espessura do material de proteção contra incêndio
$t_w$	Espessura da alma
$u$	Perímetro da seção transversal do elemento exposto ao incêndio
$u_m$	Perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio
$U$	Energia potencial dos esforços internos
$V$	Energia potencial total
$V_0$	Energia potencial inicial
$W$	Energia potencial dos esforços externos
$W_e$	Trabalho das forças externas
$W_i$	Energia interna de deflexão
$x$	Eixo x local
$X$	Eixo x global
$y$	Eixo y local
$y_c$	Distância entre o centro de torção e o centro geométrico
$y_1$	Deslocamento da mesa superior em relação ao centro de flexão
$y_2$	Deslocamento da mesa inferior em relação ao centro de flexão
$Y$	Eixo y global
$z$	Eixo z local
$z_1$	Distância do meio da mesa superior ao centróide
$z_2$	Distância do meio da mesa inferior ao centroide
$Z$	Eixo z global
$\alpha_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$\gamma_n$	Fator que considera a existência de medidas de proteção ativa da estrutura
$\gamma_s$	Fator que considera o risco de incêndio e as consequências de um colapso estrutural
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Delta Q_{abs}$	Quantidade de calor absorvida pelo elemento estrutural
$\Delta T$	Diferença de temperatura entre os corpos
$\Delta V$	Energia potencial adicional
$\Delta_1$	Deslocamento vertical do ponto de aplicação da carga crítica uniformemente distribuída em relação ao centro de flexão

$\Delta_2$	Deslocamento vertical do centro de flexão dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga
$\Delta_2'$	Deslocamento vertical do centro de flexão, no centro do vão, dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga
$\Delta_2''$	Diferença de entre o deslocamento $\Delta_2'$ e o deslocamento de uma seção que está a uma distância $\bar{X}$ da origem
$\Delta\theta_a$	Varição da temperatura experimentada pelo elemento do aço
$\Delta\theta_{a,t}$	Varição da temperatura no elemento estrutural de aço, durante um intervalo de tempo $\Delta t$
$\Delta\theta_{g,t}$	Varição da temperatura nos gases, durante um intervalo de tempo $\Delta t$
$\epsilon_{res}$	Emissividade
$\theta_a$	Temperatura do aço
$\theta_g$	Temperatura dos gases do incêndio
$\theta_{max}$	Máxima temperatura alcançada pelos gases quentes
$\theta_{\infty}$	Temperatura do ambiente
$\lambda$	Condutividade térmica;
$\lambda_a$	Condutividade térmica do aço
$\lambda_m$	Condutividade térmica do material de proteção contra incêndio
$\lambda_p$	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação para temperatura ambiente
$\lambda_{p,fi}$	Parâmetro de esbeltez, em situação de incêndio, correspondente à plastificação
$\lambda_r$	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento para temperatura ambiente
$\lambda_{r,fi}$	Parâmetro de esbeltez, em situação de incêndio, correspondente ao início do escoamento
$\mu$	Capacidade térmica específica
$\xi$	Fator de relação entre a quantidade de material combustível e o grau de ventilação
$\rho$	Massa específica
$\rho_a$	Massa específica do aço
$\rho_m$	Massa específica do material de proteção contra incêndio
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman de valor $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$
$\tau$	Transmitância
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\varphi$	Fluxo de calor por unidade de área

$\varphi_c$	Fluxo de calor convectivo por unidade de área
$\varphi_r$	Fluxo de calor radiante
$\phi$	Ângulo de rotação da seção em FLT
$\phi_{fi,a}$	Coefficiente de resistência do aço
$\chi$	Absortância
$\psi$	Refletividade
$\psi_i$	Coefficiente adimensional que indica o grau de proteção do combustível ao fogo

## 2. Índices

$c_a(\theta)$	Calor específico do aço em função da temperatura
$p(z)$	Carregamento em função de $z$
$\theta()$	Temperatura em um ponto

## 3. Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Analysis System (Software)
ASTM	American Specification of Testing and Materials
CVS	Coluna-viga Soldada
DENS	Densidade do material
EUROCODE	Comitato Europeo di Normazione (Eurocodice)
FA	Formulação Analítica (proposta na presente dissertação)
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Flexo-torção
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PECC	Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
TEMP	Temperatura
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
VS	Viga Soldada

# **1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O fogo é uma das conquistas que a humanidade adquiriu ao longo dos anos. A princípio, na época pré-histórica, o fogo serviu para que o homem se protegesse contra os predadores e para que caçasse suas presas. Também serviu como fonte de aquecimento para ambientes em dias frios e para cozimento de alimentos em fogueiras.

Porém, o fogo é um fenômeno que pode escapar do controle humano e acarretar consequências desastrosas. Se o fogo não for dominado nos instantes iniciais, ele pode se propagar ainda mais e virar um incêndio, provocando grandes catástrofes. Isso pode gerar consequências como danos e perdas materiais, prejuízos financeiros e culturais e, principalmente, perda de vidas. Dessa forma, é necessário que se desenvolvam estudos e técnicas para minimizar e extinguir incêndios. É interessante que se possa avaliar por quanto tempo uma estrutura submetida a um incêndio pode ser considerada segura para que seus usuários saiam do local e para que as equipes de salvamento façam seu trabalho em segurança. Além disso, o ideal é que também se possa manter esse fenômeno em níveis toleráveis para serem combatidos e minimizar danos às edificações adjacentes.

É importante que se conheça o comportamento das estruturas em situação de incêndio para que se possa garantir a prevenção contra colapsos estruturais. E, como tudo na engenharia, isso deve ser feito da forma mais otimizada possível para que não se tenham gastos desnecessários. O estudo sobre segurança das estruturas contra incêndios não é trivial e envolve áreas complexas.

## 1.2 – MOTIVAÇÃO

As faculdades de arquitetura e engenharia no Brasil seguem um programa bem extenso em seus cursos, priorizando alguns temas. Mas se verifica que a formação dos profissionais dessas áreas fica bastante deficitária em relação ao estudo de estruturas em situação de incêndio. Atualmente, o quadro de profissionais envolvidos no ensino e em pesquisas deste tema é mínimo, tendo-se poucos pesquisadores envolvidos nesse tipo de estudo. Não há laboratórios experimentais adequados para simular o comportamento de estruturas submetidas a situações de incêndio, nem em protótipos, nem em escala real. Isso resulta em projetos de engenharia e arquitetura com baixa exigência em relação ao combate e controle do risco de incêndio.

Além disso, sendo o incêndio um carregamento excepcional e com baixa probabilidade de ocorrência, geralmente, os engenheiros projetistas não dão a devida importância a tal carregamento, desprezando o fenômeno do incêndio. Convém lembrar que em altas temperaturas, as propriedades mecânicas dos materiais estruturais se debilitam rapidamente sofrendo acentuada perda de resistência, e isso pode provocar o colapso dos elementos estruturais em um tempo reduzido.

Apenas recentemente foram publicadas no Brasil, pela ABNT, as normas NBR 14323:1999 e NBR 14432:2000, que tratam da análise e dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio. A NBR 14323:1999 se baseia nos estados limites e verifica se a temperatura atingida pelos elementos estruturais não ultrapassa a temperatura crítica (temperatura de colapso da estrutura) e obedece ao Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) recomendado para determinada construção. Nota-se que o TRRF é definido pela NBR 14432:2000 e deve ser respeitado pelos elementos estruturais (pilares, vigas e lajes). Esse tempo deve permitir a saída em segurança das pessoas que ocupam o local de incêndio, assim como a ação das equipes de combate ao fogo, sem risco de colapso estrutural.

A NBR 14323:1999 considera uma distribuição uniforme de temperatura nos elementos estruturais em situação de incêndio. Ela parte da hipótese simplificadora de distribuição uniforme da temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento da peça, sendo a não uniformidade desta distribuição térmica compensada por meio de fatores de correção.

Na prática, no entanto, o aquecimento de um elemento estrutural não ocorre de forma uniforme, pois esse possui regiões com diferentes massividades, além de que o perfil pode não estar totalmente imerso ao fogo. Essas diferenças de temperaturas na seção transversal do elemento estrutural fazem com que suas propriedades sejam depreciadas de forma desigual e em tempos diferentes. Isso gera diferentes valores de resistência e, dependendo da situação, fenômenos de instabilidades não previstos em norma podem se desenvolver na estrutura.

Devido à desigualdade na depreciação das propriedades do aço durante o incêndio e ao fato de que as regiões do perfil vão, conseqüentemente, apresentar gradientes térmicos, nesse trabalho é considerada a diferença de temperatura entre as mesas do perfil “I” de aço. O objetivo principal é fazer um estudo mais detalhado do efeito das altas temperaturas nas estruturas em aço levando-se em conta uma maior precisão dos gradientes térmicos nos perfis e a influência disso na resistência dos elementos estruturais, especificamente em vigas “I” que possam estar sujeitas a instabilidades laterais em situações de incêndio.

### **1.3 – ESTADO DA ARTE**

A fim de situar o tema deste trabalho no contexto técnico atual, será apresentado um breve histórico sobre como vem evoluindo os estudos em relação à instabilidade lateral de vigas de aço em situação de incêndio. Esse assunto apresenta-se na literatura de forma restrita e com poucos trabalhos desenvolvidos.

Os primeiros estudos a respeito do fenômeno de flambagem em regime elástico foram feitos em 1759 por Euler, mas considerando pilares sob forças axiais de compressão para uma temperatura ambiente (Bogolyubov et al., 2007). Já as primeiras pesquisas relacionadas à flambagem lateral com torção de vigas foram feitas por Fairban em 1854. Esse constatou em seus resultados que se as dimensões da seção transversal da mesa comprimida de uma viga “I” forem maiores que as dimensões da mesa tracionada, então a resistência à flambagem lateral com torção (FLT) dessa viga aumenta.

Em 1884, Burr realizou ensaios experimentais em vigas de aço que mostraram a relação da resistência nominal ao momento fletor e do índice de esbeltez da mesa comprimida na

direção de menor inércia. Mais tarde, em 1909 e 1910, respectivamente, Marburg e Moore fizeram ensaios que só comprovaram e reafirmaram o que Burr já havia constatado.

Em 1899, Michell realizou estudos sobre flambagem elástica de vigas simplesmente apoiadas, submetidas à flexão pura e com seção transversal retangular (Michell, 1899 apud Fruchtengarten, 2005, p. 7). Ainda em 1899, Prandtl (1899) realizou o mesmo estudo que Michell, mas para várias condições de carregamento e de vínculo.

Por volta de 1910, Timoshenko obteve resultados para o caso de flambagem lateral com torção de vigas “I” em regime elástico. Logo depois surgiram várias publicações de diversos autores contribuindo para o surgimento de uma primeira teoria geral para a flambagem lateral de vigas. Dentre eles, Vlasov e Winter buscaram soluções para vigas “I” submetidas à flambagem lateral com torção, em regime elástico, considerando essas vigas simplesmente apoiadas e para várias condições de contorno. Também nesta época, surgiram os pesquisadores interessados em obter soluções numéricas para o problema de flambagem lateral com torção, como Winter (1941), Massonet (1947), Flint (1951), Poley (1954), Horne (1954), Austin et al (1955), Salvadori (1955 e 1956) e Galambos (1963).

Aos poucos, houve uma evolução no uso de técnicas computacionais permitindo, então, uma análise mais acurada nos métodos de resolução dos problemas. Em 1970, Barsoum e Gallagher propuseram a aplicação do Método dos elementos Finitos (MEF) à análise da flambagem por flexo-torção, trazendo uma nova dinâmica aos futuros trabalhos (Barsoum e Gallagher, 1970 apud Fruchtengarten, 2005, p. 8). Utilizando adequadamente essa teoria, cada caso poderia, então, ser estudado isoladamente em um programa específico de computador. Nesse sentido, os estudos foram divididos se fazendo as seguintes considerações:

- Condições de carregamento: Não apenas considerar flexão pura, mas poderiam também se considerar diferentes posições de aplicação de carregamento, com consequentes variações no diagrama de momento fletor;
- Condições de vínculo: Diferentes tipos de vinculação nos apoios e ao longo do vão da viga;
- Tipo da seção da viga: Qualquer tipo de seção, inclusive vigas com seção variável (recortes e mudança de altura);

- Tipo de análise: Análise em regime elástico ou não-elástico.

Nesse aspecto, muitos foram os trabalhos publicados nessa época considerando as condições mencionadas anteriormente.

Até então, esses estudos, referentes à flambagem lateral com torção (FLT) em vigas, foram feitos apenas para uma situação de temperatura ambiente. Não eram considerados os efeitos que um aumento de temperatura pode gerar no fenômeno de instabilidade lateral de uma viga. No Brasil, apenas na década de 90, depois de terem ocorridos muitos incêndios com graves perdas, se teve um considerável avanço dos estudos sobre o comportamento das estruturas diante de uma situação de incêndio. Houve uma preocupação maior em relação à capacidade das estruturas de suportar altas temperaturas, fazendo com que alguns pesquisadores se interessassem mais nesse assunto.

Para se considerar a flambagem lateral com flexo-torção (FLT) em vigas em uma situação de incêndio, deve-se considerar a variação das propriedades mecânicas e térmicas que ocorrem com o aumento da temperatura. Logo, todos os estudos feitos por Winter (1941), Salvadori (1955 e 1956), Galambos (1963), etc. tiveram que ser reconsiderados para a nova situação. No Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB), alguns trabalhos já foram estudados e desenvolvidos, de forma pioneira e inédita, com a orientação do Professor Luciano Mendes Bezerra na área de conhecimento sobre vigas de aço em situação de incêndio:

- Em 2005, a Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil desenvolvida por Nunes (2005), “Uma Abordagem Numérica e Analítica para Determinação da Temperatura e do Momento Fletor Crítico em Vigas de Aço em Situação de Incêndio”: Na qual foi feito um estudo propondo-se uma formulação analítica para o cálculo do momento nominal da instabilidade de vigas metálicas com flexo-torção lateral para o caso de uma viga de seção I, submetida à flexão pura em situação de incêndio. Nessa formulação é considerado o aquecimento desigual das mesas do perfil I;
- Em 2006, o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação desenvolvido por Souza e Moraes (2006), “Uma Formulação para a Determinação Simplificada do Momento Crítico FLT de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural”: No qual



foi desenvolvido, em plataforma excel, um programa para determinação das cargas críticas de flexão de estruturas de aço em situação de incêndio natural através de uma formulação simplificada;

- Em 2008, a Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil desenvolvida por Campêlo (2008), “Estudo Numérico e Analítico para a Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada”: Na qual foi feito um estudo propondo-se uma formulação analítica para o cálculo da carga crítica da instabilidade de vigas metálicas com flexo-torção lateral para o caso de uma viga de seção I, submetida à uma carga concentrada no meio do vão em situação de incêndio. Nessa formulação também é considerado o aquecimento desigual das mesas do perfil I;

Atualmente no Brasil, também existem alguns pesquisadores na área de Engenharia de Estruturas em Situação de Incêndio, como o Professor Antonio Maria Claret de Gouveia, que atua na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Na Universidade de São Paulo (USP), existe um grupo de pesquisadores liderado pelo Professor Valdir Pignatta e Silva que ajudou a desenvolver uma nova abordagem tecnológica sobre a segurança das estruturas em situação de incêndio (Fonte: <http://www.cnpq.br/>, acessado em Março/2013).

Como se percebe, os estudos e pesquisas desenvolvidos na área de Estruturas em Situação de Incêndio vêm crescendo aos poucos, mas ainda há muito a se esclarecer e aprimorar. O presente trabalho tem a intenção de dar continuidade à linha de pesquisa referente à determinação de cargas críticas em vigas de aço em situação de incêndio natural.

#### **1.4 – OBJETIVOS DESTE TRABALHO**

Nessa dissertação, desenvolve-se uma formulação analítica, através do método da energia, para a determinação da carga crítica em vigas “I” submetidas a situações de incêndio com carga uniformemente distribuída. Essa formulação matemática tem uma solução fechada que leva em consideração o aquecimento desigual das mesas superior e inferior das vigas de perfil “I”. Consequentemente, ela leva em conta a degradação desigual do módulo de elasticidade dessas mesas, a cada instante, no decorrer do incêndio. Tendo em vista que as normas e trabalhos científicos consideram, nessa determinação, a evolução térmica ao longo do incêndio com um aquecimento uniforme do perfil, tal formulação representa uma

inovação na determinação destas cargas críticas. Para considerar a existência deste gradiente térmico entre as mesas, as normas apenas utilizam fatores de correção empíricos.

Neste estudo, também são feitas simulações de vigas em perfil “I” de aço que sofrem esforço de uma carga uniformemente distribuída e com possibilidade de Flambagem Lateral com Flexo-Torção (FLT), estando essas vigas sob lajes e, em alguns casos, com um isolamento térmico de concreto leve tipo caixa. E para isso, através do programa computacional ANSYS (2007), foram feitas simulações térmicas com o intuito de se fazer uma análise mais detalhada, considerando os gradientes térmicos, a variação na distribuição de temperatura na seção transversal do perfil e a sua influência na resistência dos elementos da estrutura metálica.

Nessa área de conhecimento sobre vigas de aço em situação de incêndio, outros trabalhos (Nunes, 2005; Souza e Morais, 2006; Campêlo, 2008) já foram desenvolvidos no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da universidade de Brasília (UnB), orientados pelo Professor Luciano Mendes Bezerra. O presente trabalho dá prosseguimento a essa linha de pesquisa referente a estruturas em situação de incêndio.

## **1.5 – ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS**

Esta dissertação de mestrado é composta por nove capítulos. Neste primeiro capítulo, é abordada a importância do estudo sobre o comportamento das estruturas em situação de incêndio, seguida das motivações que levaram à escolha deste tema e dos objetivos dessa pesquisa. É feita uma breve revisão bibliográfica apresentando o histórico sobre o tema estudado. Também é apresentado o resumo do conteúdo de cada capítulo desse trabalho.

Através de revisão bibliográfica de livros e normas técnicas, no segundo capítulo, é apresentado como ocorre o fenômeno e a dinâmica de um incêndio e como a segurança contra incêndio no Brasil vem sendo abordada ao longo dos anos. Também são relatados os modelos de incêndio padrão e natural, os parâmetros que influenciam o incêndio e um estudo sobre como as propriedades do aço se comportam com o aumento da temperatura. Ao final desse capítulo, é revisado como as normas brasileiras (NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986) determinam o momento crítico e a carga crítica uniformemente distribuída para perfis de aço numa situação de incêndio.

No terceiro capítulo, é feita uma abordagem sobre o isolamento térmico em estruturas de aço, de forma a aumentar sua resistência em situação de incêndio. São apresentados os revestimentos que hoje em dia são utilizados e como eles se classificam quanto ao seu material constituinte, morfologia e técnica de aplicação. O material isolante que foi utilizado para alguns casos de estudo nesse trabalho também é mencionado, assim como suas propriedades.

O quarto capítulo traz os conceitos dos fundamentos da transferência de calor, com suas equações diferenciais da física matemática e com seus mecanismos de condução, convecção e radiação. É falado sobre a transmissão de calor em sólidos submetidos a um regime transiente térmico e também é apresentado como ocorre o desenvolvimento da temperatura nos perfis de aço, em situação de incêndio, através de modelos teóricos de análise descritos na NBR 14323:1999.

No capítulo cinco é apresentada uma formulação analítica original, com solução fechada, que determina a carga crítica em vigas “I” submetidas a situações de incêndio com carga uniformemente distribuída. É falado sobre o método utilizado (método da energia) e sobre como essa formulação considera a forma de aquecimento na seção transversal do perfil de aço em comparação com a NBR 14323:1999.

Foram feitas análises térmicas em alguns perfis de aço, submetidos a situações de incêndio, através do programa computacional ANSYS (2007). É feita uma abordagem sobre esse programa no capítulo seis, apresentando alguns tipos de problemas que o mesmo resolve, os regimes que podem ser utilizados para o caso do problema térmico, a discretização adotada, os elementos e as cargas disponíveis. É também abordado o critério utilizado pelo programa, que é o Critério da Convergência.

O capítulo sete apresenta a formulação para a instabilidade lateral de vigas “I” relatada por Silva (1992) em sua dissertação de mestrado. Além de se comparar a formulação analítica proposta nesse trabalho com as recomendações normativas, também se compara com a formulação similar apresentada por Silva (1992). Em sua dissertação, ele desenvolveu a formulação através do método da energia e não considerou a condição de incêndio, ou seja, ele considerava os módulos de elasticidade iguais para ambas as mesas. Nesse capítulo, é

desenvolvida essa formulação para o caso de uma viga com carga uniformemente distribuída e em situação de incêndio.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos pela formulação simplificada recomendada pelas normas brasileiras com a formulação mais exata desenvolvida nessa dissertação, no capítulo oito, são feitas aplicações para diferentes casos, sempre buscando simular situações reais de incêndio. São estudados quatro casos, cada um possuindo um tipo de perfil metálico com seção I e um tipo de incêndio. Na verdade, esses quatro casos são estudados para a situação com e sem proteção térmica, totalizando oito casos de estudo. As análises térmicas, ao longo do tempo de duração do incêndio, são feitas através do programa computacional ANSYS (2007), considerando um aquecimento desigual entre as mesas do perfil. Com as temperaturas resultantes dessa análise, determina-se a carga crítica para cada caso de estudo, comparando esses resultados com os valores encontrados pelas recomendações normativas (NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986) e pela formulação de Silva (1992).

No capítulo nove são tratadas as conclusões referentes à formulação analítica desenvolvida nesse trabalho, aos resultados obtidos através das análises computacionais e às comparações feitas. Também são sugeridas ideias para o desenvolvimento de trabalhos futuros com o intuito de dar continuidade a essa linha de pesquisa.

As referências bibliográficas, que foram utilizadas para se ter conhecimento sobre os assuntos tratados nessa pesquisa, são citadas no final desta dissertação.

## **2 - INCÊNDIO**

### **2.1 – CONCEITO**

Um incêndio pode ser definido como um processo de combustão rápida que se dissemina de forma descontrolada no tempo e no espaço, ou seja, ele ocorre quando o processo de combustão acontece em um ambiente que não foi idealizado para suportar tal reação. Quando um incêndio ocorre, ele pode gerar consequências drásticas, como sequelas físicas e psicológicas nas pessoas. Para se compreender como se inicia um incêndio, é necessário que se entenda primeiramente como o processo de combustão ocorre.

O fogo é o resultado de uma reação química que desprende, entre outros produtos, calor e luz devido à combustão de diversos materiais. A combustão é uma reação química que se processa entre uma substância combustível e um agente oxidante ao sofrer uma decomposição por aquecimento. Os processos de combustão produzem basicamente as chamas, gases quentes (fumaça), luz e calor, gerando uma reação. A quantidade de calor gerada em um processo de combustão depende apenas da quantidade e da qualidade dos reagentes envolvidos nessa reação.

A reação da combustão ocorre em um espaço inflamável e todo o sistema fica submetido a uma temperatura superior a um valor mínimo característico, que depende de cada material, chamada de temperatura de auto ascensão. Esta se refere à temperatura em que o combustível começa a queimar espontaneamente, sem a necessidade de injeção de calor inicial.

O processo de combustão se finaliza com o término do combustível, com a ausência de oxigênio ou com a queda da temperatura a um valor inferior ao da temperatura de auto ascensão.

Antigamente acreditava-se que para ocorrer o fenômeno do fogo, deveriam coexistir três componentes que formavam o Triângulo do Fogo: o combustível, o comburente (oxigênio) e o calor. Essa teoria explicava que com a retirada de pelo menos um desses elementos era possível se extinguir o fogo. A Figura 2.1 mostra essa composição.

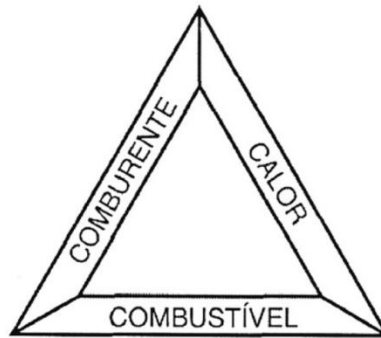


Figura 2.1 - Triângulo do Fogo (CPNSP, 2005).

Com a descoberta da reação em cadeia (quarto componentes) através de estudos científicos, foi necessário mudar essa teoria para o Tetraedro do Fogo, como é exemplificado na Figura 2.2. A interpretação desta figura geométrica espacial é que cada uma das quatro faces representa um elemento do fogo (combustível, comburente, calor e reação em cadeia) e devem coexistir ligados para que o fogo se mantenha (CPNSP, 2005).

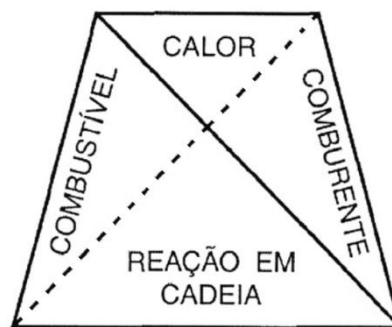


Figura 2.2 - Tetraedro do Fogo (CPNSP, 2005).

- Combustível: Qualquer substância capaz de produzir calor por meio de reação química, ou seja, todo material que queima. São sólidos, líquidos ou gasosos, sendo que os sólidos e os líquidos se transformam primeiramente em gás pelo calor e depois inflamam;
- Comburente: É o elemento que alimenta a reação química (elemento ativador do fogo), sendo mais comum o oxigênio. Essa substância é combinada com os vapores inflamáveis dos combustíveis, dando vida às chamas e possibilitando a expansão do fogo. Compõe o ar atmosférico na porcentagem de 21%, sendo que o mínimo exigível para sustentar a combustão é de 16% (CPNSP, 2005). Os demais

componentes são o nitrogênio com 78% e outros gases (CO<sub>2</sub>, Ar, H<sub>2</sub>, He, Ne, Kr) com 1% (MCIHP, 2006);

- Calor: É uma forma de energia que se transfere de um sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura. É o elemento que dá início ao fogo e o faz se propagar. Ele pode ter como fonte uma faísca, uma chama, a energia elétrica, um cigarro aceso, a fricção, o aquecimento excessivo de aparelhos energizados ou até mesmo a concentração da luz solar através de uma lente;
- Reação em Cadeia: Em relação a esse componente (também denominado transformação em cadeia), foi comprovado que existe uma reação química contínua entre o comburente e o combustível, liberando mais calor para a reação e mantendo a combustão em um processo sustentável. Esse calor é o responsável por fornecer continuamente mais gases ou vapores combustíveis que permitem o desenvolvimento da combustão.

Uma vez iniciado o fogo, são considerados e utilizados três mecanismos de transmissão de energia. São eles: a condução do calor, a convecção do calor e a irradiação de energia (Seito et al., 2008).

- Condução: É a forma pela qual se transmite o calor através do próprio material, de molécula a molécula (material sólido);
- Convecção: É o mecanismo no qual a energia se transmite pela movimentação do meio fluido aquecido (líquido ou gás). Em outras palavras, é quando o calor é transmitido através de uma massa de ar aquecida, que se desloca do local em chamas, levando para outros locais quantidade de calor suficiente para que os materiais combustíveis aí existentes atinjam seu ponto de combustão, originando outro foco de fogo;
- Irradiação: É o mecanismo no qual a energia se transmite por ondas eletromagnéticas, ou seja, quando o calor é transmitido por ondas caloríficas através do espaço, sem utilizar qualquer meio material, gerando calor pela absorção na superfície de um corpo.

No incêndio, durante o processo de combustão, os materiais combustíveis atingem três pontos diferentes de temperatura à medida que vão sofrendo aquecimento. Esses pontos são classicamente conhecidos na literatura sobre incêndios como (CPNSP, 2005):

- Ponto de Fulgor: Também conhecido como *flashpoint*, é a temperatura mínima necessária para que um combustível (sólido ou líquido) libere vapores ou gases inflamáveis que, combinados com o oxigênio do ar e em contato com uma chama, começam a se queimar. Entretanto, a combustão não se sustenta, pois a quantidade dos gases produzidos é ainda insuficiente. Ao se aproximar uma chama junto ao combustível, ele se queima momentaneamente e, logo a seguir, a chama do combustível se apaga, por falta de vapor inflamável;
- Ponto de Combustão: Também conhecido como *firepoint*, é a temperatura mínima necessária para que um combustível (sólido ou líquido) libere vapores ou gases inflamáveis que, combinados com o oxigênio do ar e em contato com uma chama, começam a se queimar. Já nesse caso, a quantidade de gases produzidos é suficiente para manter o processo de queima. Ao se aproximar uma chama junto ao combustível, ele se queima continuamente mesmo que se retire a chama inicial;
- Ponto de ignição: É a temperatura mínima em que um combustível (sólido ou líquido), liberando vapores ou gases inflamáveis, entra em combustão ao simples contato com o oxigênio do ar, independentemente de qualquer fonte de calor (chama inicial).

Na Tabela 2.1 são citados os principais pontos de alguns combustíveis.

Tabela 2.1 – Principais pontos de alguns combustíveis (CPNSP, 2005).

Pontos de alguns combustíveis inflamáveis (°C)		
Combustíveis Inflamáveis	Ponto de Fulgor	Ponto de Ignição
Álcool Etílico	12,6	371,0
Gasolina	42,0	257,0
Querosene	38,0 a 73,5	254,0
Parafina	199,0	245,0



## 2.2 – EVOLUÇÃO DE UM INCÊNDIO

Em geral, o incêndio é iniciado em pequenas proporções e seu desenvolvimento dependerá da influência de vários fatores. Alguns deles são citados abaixo (Seito et al., 2008):

- Quantidade, tipo e espaçamento dos materiais combustíveis no local;
- Tamanho e situação das fontes de combustão (fonte de ignição);
- Área e locação das janelas e aberturas em geral;
- A forma geométrica e a dimensão do local;
- Condições climáticas (temperatura e umidade relativa);
- Projeto arquitetônico do local;
- Medidas de proteção contra incêndio existentes.

A evolução de um incêndio em um compartimento pode ser representada por quatro fases de desenvolvimento características: fase de pré-ignição, fase de crescimento, fase de incêndio desenvolvido e fase de extinção. A Figura 2.3 ilustra a evolução de um incêndio através de um gráfico que relaciona o tempo com a temperatura no interior do compartimento. Para a construção deste gráfico, adotou-se a suposição de que em cada instante o calor gerado pelo incêndio é uniforme em todo o compartimento.

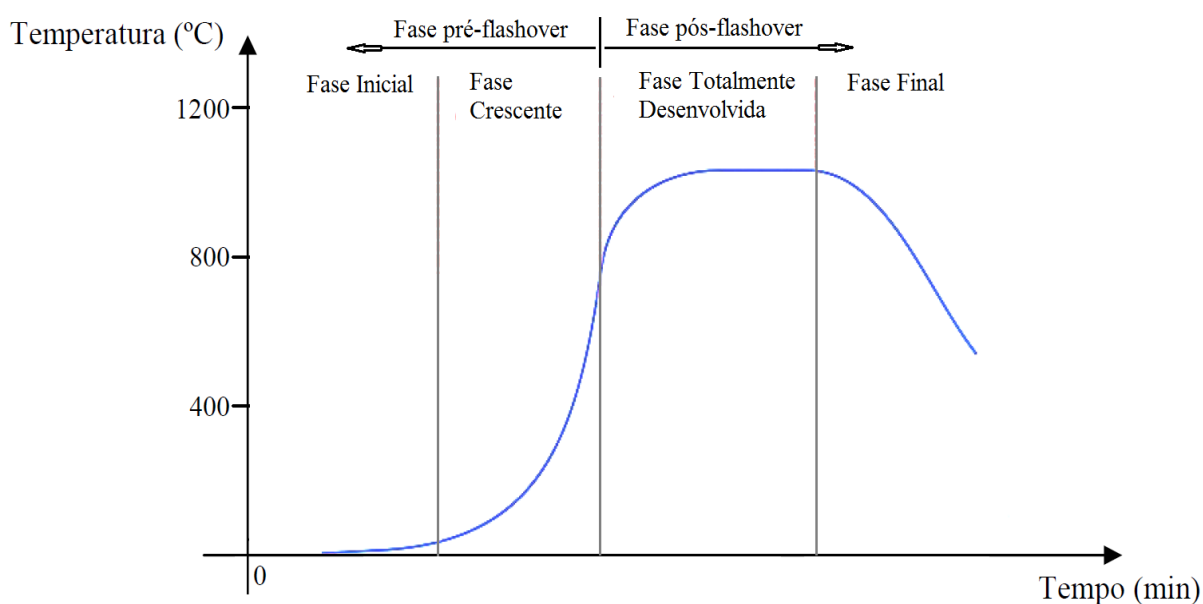


Figura 2.3 - Curva de desenvolvimento de um incêndio (Campêlo, 2008).

A primeira fase é a fase inicial onde o incêndio é incipiente, tendo-se um crescimento lento até a ignição. A combustão é lenta, sem chama e com pouca produção de calor, mas com potencial para preencher o compartimento com gases combustíveis e fumaça. Devido a essa produção de pouco calor, a força de flutuação da fumaça e ou dos gases gerados é pequena e seus movimentos são determinados pelo fluxo do ar ambiente. Nessa fase, a temperatura dos gases do incêndio permanece relativamente baixa em um espaço de tempo maior, aumentando gradualmente a uma velocidade baixa.

A segunda fase se desenvolve em um período de tempo relativamente curto com um aumento rápido na quantidade de calor. É a fase de crescimento do fogo e acontece após a ignição de algum material combustível. Isso só ocorre se a soma do calor gerado pelo processo de combustão dos materiais e do calor da fonte externa for maior do que as perdas de calor do ambiente. Se isso acontece, os materiais se incendeiam, há a continuação da queima e a propagação do calor para o ambiente por convecção, aumentando a temperatura progressivamente e gerando gases quentes que se acumularão na parte mais alta do local. O volume das chamas aumenta e a concentração de oxigênio começa a baixar. A temperatura dos gases inflamáveis na camada superior atinge cerca de 600°C. O tempo gasto para o incêndio alcançar o ponto de inflamação generalizada (também conhecido como *flashover*) é relativamente curto e depende dos fatores mencionados no início dessa seção. Este ponto de inflamação generalizada é o repentino espalhamento das chamas a todo o material combustível existente no compartimento e é usado para descrever o crescimento do incêndio até o ponto onde o mesmo se torna totalmente desenvolvido.

Na fase totalmente desenvolvida, que começa logo após o aparecimento do *flashover*, todos os materiais combustíveis do local já estão em combustão, sendo a taxa de queima limitada pela quantidade de oxigênio remanescente. Nessa terceira fase, atinge-se a temperatura máxima do incêndio. O incêndio pode se propagar por meio das aberturas internas, coberturas e fachadas da edificação e as temperaturas do ambiente podem atingir valores acima de 1000°C. A duração dessa fase fica em função da carga de incêndio do ambiente que passa de 80% para 30% do valor inicial. A concentração de oxigênio diminui ainda mais e é mais intensa no nível do piso se comparado ao nível do teto. Se o incêndio ainda não foi extinto até esse momento, dificilmente ele será exterminado nesse estágio ou pelo menos sua extinção será bem mais complicada.

No começo dessa quarta e última fase, quase todo oxigênio e material combustível já foram consumidos pelo incêndio e este começa a ser exterminado. Nesse estágio, a concentração de oxigênio diminui muito e, dependendo da concentração que ela atingir, as chamas podem se extinguir, permanecendo somente brasas. O ambiente tem uma alta concentração de gases quentes e fumaça e a temperatura no nível do teto ainda é muito elevada. O tempo de esgotamento do incêndio varia de acordo com a diferença de temperatura entre os gases quentes do local e as superfícies de vedação, com as características de condutividade da estrutura e com o fluxo de ar. Segundo Martines (1997), o incêndio é eliminado quando sua temperatura cai novamente a cerca de 300°C.

Em alguns casos específicos, após a extinção do incêndio, pode ocorrer o fenômeno do *backdraft*, que é quando ocorre o reaparecimento do fogo. Como já foi dito, nessa última fase, a queima de todo o material combustível do local produz muitos gases inflamáveis e fumaça, diminuindo a concentração de oxigênio. Se algum tipo de abertura do compartimento é usado e este recebe uma pequena ventilação, o oxigênio (comburente) mistura-se aos gases inflamáveis, em uma temperatura específica, fechando o triângulo de fogo. É então gerada uma combustão repentina em direção ao oxigênio, como se o fogo buscasse seu terceiro elemento para poder existir.

Seja qual for a fonte de energia (térmica, elétrica ou mecânica) e tipo de fator (carga de incêndio, ventilação do ambiente, geometria e compartimentação do local, etc.) que influenciam, respectivamente, no início e na evolução do incêndio, este geralmente tem consequências trágicas. Perda de bens materiais, perda de vidas humanas, prejuízos financeiros e a agressão contra o meio ambiente são apenas alguns dos tristes resultados provocados por esse fenômeno. Dependendo da severidade do incêndio, pode ser que ocorra sua propagação no sentido horizontal ou vertical para compartimentos adjacentes. A propagação horizontal geralmente ocorre de forma parecida com o comportamento do incêndio inicial. Já a propagação vertical pode ser provocada pelas chamas e gases quentes oriundos do incêndio inicial e pode ocorrer no interior ou exterior do compartimento inicialmente incendiado. Esse incêndio pode ser projetado para compartimentos superiores através de corredores, escadas, poços de ventilação, janelas externas, etc. Ou seja, independente da natureza de um incêndio, o mesmo não deve ser ignorado, mas sim, deve-se levar em conta a importância da sua gravidade.

## 2.3 – SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO BRASIL

Até o meio do século XIX, os incêndios eram combatidos por voluntários e milicianos. Na maioria das vezes, eles perdiam essa batalha pelo fato das construções serem feitas de madeira, e se o incidente acontecia à noite, o prejuízo era ainda maior devido à precária iluminação para se evacuar o local.

No ano de 1763, no Rio de Janeiro, foi criada uma repartição com homens da Marinha para extinguir os incêndios (Fonte: <http://historica.com.br/hoje-na-historia/bombeiros-no-brasil>, acessado em Novembro/2012). Isso porque a Marinha era a única corporação com mão de obra qualificada para isso, já que naquela época havia altos índices de incêndios nos navios feitos de madeira. Mesmo assim, foram muitos os incêndios ocorridos no Rio de Janeiro, alguns deles citados a seguir:

- 1710 – Incêndio causado pelo invasor francês Duclerc destruindo a Alfândega do Porto da cidade;
- 1732 – Incêndio que acabou com parte do Mosteiro de São Bento, na Praça Mauá, que tinha acabado de ser reconstruído;
- 1789 – Grande incêndio que consumiu todo o Recolhimento do Parto (atual Praça São José);
- 1790 – Incêndio de grandes proporções que aconteceu no Largo do Paço (Atual Praça XV), destruindo o sobrado onde funcionavam o Tribunal da Relação e o Arquivo Municipal;
- 1824 – Incêndio que deixou o Teatro São João (atual João Caetano) em cinzas;
- 1825 – Incêndio na Casa da Moeda;
- 1851 – Um segundo incêndio destruiu novamente o Teatro São João (que tornaria a sofrer um outro incêndio em 1856).

Foi então no ano de 1856 que o inspetor do Arsenal da Marinha fez necessária a existência de um grupo dedicado exclusivamente ao combate de incêndios. Os fatos apresentados fizeram o Ministério da Justiça elaborar um Decreto Imperial que foi assinado por Dom Pedro II no dia 2 de Julho de 1856, organizando o Corpo Provisório de Bombeiros da Corte. No mesmo ano da sua criação, o Corpo de Bombeiros recebeu a primeira bomba a

vapor, especialmente destinada aos incêndios à beira mar e que podia ser também usada para a extinção de fogo a bordo de navios.

Em 1889, com a chegada da República, a Corporação passou a se chamar Corpo de Bombeiros do Distrito Federal, atingindo um desenvolvimento profissional na capital e recebendo organização e regulamentos.

Com a expansão das cidades, houve um aumento brutal no risco de incêndios. Porém, apesar de já existir o Corpo de Bombeiros, nas décadas de 30 a 90 ainda não existiam medidas eficazes quanto à prevenção e extinção do fogo. Grandes incêndios aconteceram nessa época no Brasil, como por exemplo, os citados a seguir (Fonte: <http://www.defesacivil.rj.gov.br/>, acessado em Novembro/2012):

- 1930 – Incêndio nos jornais da cidade, no Rio de Janeiro, devido à revolução que implantava o Governo Provisório;
- 1954 – Incêndio devido a uma explosão na Ilha do Braço Forte, Rio de Janeiro;
- 1955 – Incêndio no Hotel e Boate Vogue em Copacabana, Rio de Janeiro;
- 1961 – Grande incêndio no Gran Circus norte americano em Niterói, Rio de Janeiro;
- 1963 – Incêndio no edifício Astória na Cinelândia, Centro do Rio de Janeiro;
- 1972 – Grande incêndio no edifício Andraus, São Paulo;
- 1974 – Incêndio de grandes proporções no edifício Joelma na região central de São Paulo. Foram 198 mortos;
- 1976 – Incêndio no edifício das Lojas Renner em Porto Alegre, Rio Grande do Sul;
- 1981 – Incêndio no edifício Vale do Rio Doce no Centro do Rio de Janeiro;
- 1981 – Incêndio no edifício da Caixa Econômica Federal, Rio de Janeiro;
- 1981 – Incêndio no Edifício Grande Avenida, São Paulo;
- 1984 – Explosão na Plataforma de Enchova em Macaé, Rio de Janeiro;
- 1986 – Incêndio no edifício Andorinhas no centro do Rio de Janeiro;
- 1987 – Incêndio no edifício da CESP, São Paulo;
- 1988 – Incêndio no Banco do Brasil no Centro do Rio de Janeiro;
- 1991 – Explosão de uma casa de fogos em Niterói, Rio de Janeiro;

- 1998 – Incêndio no prédio da administração no Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro.

Essas tragédias causaram muitos danos e algumas dessas estruturas precisaram ser reparadas ou até reconstruídas após os incêndios. Após estas catástrofes, percebeu-se a grande importância de se estudar melhor o comportamento do incêndio e a segurança nas estruturas para suportar altas temperaturas. Com isso, houve algumas mudanças na legislação, nas corporações de bombeiros, nos institutos de pesquisas e foi iniciado um processo de formação de técnicos e pesquisadores preocupados com essa área de conhecimento. Após vários estudos de profissionais qualificados no assunto, duas normas referentes à análise e dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio foram publicadas pela ABNT. Estas normas surgiram a partir de estudos feitos em universidades brasileiras sobre recomendações adotadas pelas normas de outros países. São elas:

- NBR 14323:1999 – Editada em junho de 1999 sob o título “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento”, contem partes sobre a variação das propriedades do aço com a temperatura, a elevação da temperatura do aço e os métodos para se efetuar o dimensionamento;
- NBR 14432:2000 – Editada em janeiro de 2000 sob o título “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento”, contem os critérios para a determinação do tempo que as estruturas devem resistir antes do colapso, denominado TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo).

Com o avanço e progresso dessas normas, se comparado ao histórico que temos em relação à segurança contra incêndio no Brasil, constata-se que houve melhoria. Mas ainda há muito a ser feito, pois os riscos continuam a aumentar em todo território nacional devido à complexidade da sociedade que implanta edifícios cada vez maiores, complexos de petróleo, programas de álcool e biodiesel, etc. Alguns exemplos de incêndios recentes estão citados a seguir:

- 2002 – Incêndio no edifício do Ministério do Trabalho, Rio de Janeiro;
- 2004 – Incêndio no edifício da Eletrobrás no Centro do Rio de Janeiro;
- 2005 – Incêndio no edifício do INSS, Distrito Federal;

- 2007 – Queda do avião da TAM, no aeroporto de Congonhas, que se chocou contra um depósito de cargas da própria TAM causando 199 mortes, São Paulo.
- 2013 – Incêndio na boate Kiss em Santa Maria, causando 241 mortes, Rio Grande do Sul.

Com esses grandes incêndios ao longo dos anos, aos poucos, o Brasil está mudando sua postura diante desse problema, melhorando as regulamentações e normas em função do combate e prevenção de incêndios. Esse esforço tem exigido dos projetistas melhora nas condicionantes de SCI (Segurança Contra Incêndio) nas edificações. O próximo passo nas edificações complexas deve ser a exigência de projetos de engenharia de SCI, nos quais são calculados e assumidos os riscos de maneira a evitar os grandes incêndios. São necessárias mudanças desde o planejamento urbano, como a garantia de acesso de viaturas de bombeiros, existência de hidrantes urbanos, conjunto de meios ativos (detecção de calor ou fumaça, chuveiros automáticos, brigada contra incêndio, etc.) e passivos (resistência das estruturas ao fogo, saídas de emergência, compartimentações, etc.). Ao contrário de muitos países, no Brasil não há curso de engenharia de SCI. Apesar de termos evoluído muito em relação à segurança contra incêndios, ainda há muito por ser feito.

## **2.4 – MODELOS DE INCÊNDIO**

### **2.4.1 – Incêndio-Padrão**

A determinação da curva temperatura x tempo para um incêndio real é difícil de ser obtida, pois ela depende de fatores tais como a carga de incêndio, grau de ventilação e espessura dos elementos de vedação do compartimento. Como esses parâmetros se alteram para cada situação estudada, convencionou-se adotar uma curva padronizada como modelo para a análise experimental de estruturas e materiais de proteção térmica em fornos, denominada curva de incêndio-padrão. Nesse modelo de incêndio se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeita as curvas padronizadas para ensaios (Pannoni, 2004).

Na ausência de estudos mais precisos, essas curvas padronizadas são adotadas como modelo, mas é importante lembrar que essa curva não representa e não tem relação alguma com o incêndio real. A curva de incêndio-padrão tem apenas um ramo ascendente, o que

significa que a temperatura dos gases está sempre crescente e que independe da quantidade de material combustível e das características do ambiente. Qualquer tipo de conclusão obtida com base nessa curva deve ser analisada e estudada com cautela, pois não corresponde ao comportamento real do incêndio ou das estruturas expostas ao fogo.

Existem alguns tipos de curvas padronizadas citadas em bibliografias, mas nesse trabalho serão apresentadas apenas as mais utilizadas em ensaios de incêndios: EUROCODE 1:1995, ASTM E 119:1988 e ISO 834:1999.

#### 2.4.1.1 – EUROCODE 1:1995

O EUROCODE 1:1995, que representa as curvas padronizadas da norma europeia, apresenta duas curvas temperatura x tempo distintas para incêndio-padrão. A primeira curva se refere ao incêndio que possui material combustível predominantemente composto por materiais celulósicos e é expressa pela Equação (2.1). A segunda curva se refere ao incêndio que possui material combustível predominantemente composto por hidrocarbonetos e é dada pela Equação (2.2):

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (2.2)$$

onde  $\theta_g$  representa a temperatura dos gases e  $t$  representa o tempo em minutos. A temperatura ambiente que é considerada no instante inicial é geralmente adotada como 20°C. Os gráficos referentes às Equações (2.1) e (2.2) estão representados na Figura 2.4.

#### 2.4.1.2 – ASTM E 119:1988

A *American Society for Testing and Materials*, através da norma ASTM E 119:1988, recomenda valores tabelados para a temperatura dos gases quentes ao longo do tempo, de modo a se construir a curva de incêndio-padrão. Esses valores são apresentados na Tabela 2.2 e seu gráfico correspondente está demonstrado na Figura 2.4.



Tabela 2.2 – Valores da curva temperatura x tempo – ASTM 119:1988.

t (min)	$\theta_g$ (°C)	t (min)	$\theta_g$ (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

#### 2.4.1.3 – ISO 834:1999

A *International Organization for Standardization*, através da norma ISO 834:1999, recomenda a mesma curva temperatura x tempo adotada pelo EUROCODE 1:1995 para incêndios com materiais combustíveis compostos predominantemente por materiais celulósicos: Equação (2.1) que está representada na Figura 2.4.

Para incêndios que possuem material combustível predominantemente composto por hidrocarbonetos, a curva sugerida por essa norma é a mesma curva temperatura x tempo adotada pelo EUROCODE 1:1995, como pode ser visto na Equação (2.2) e na Figura 2.4.

A ISO 834:1999 recomenda a curva temperatura x tempo que está apresentada na Equação (2.3) para o caso de incêndios compartimentados, porém com efeitos sobre um outro compartimento (aberturas de um compartimento para o outro).

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2.3)$$

Onde  $\theta_g$  representa a temperatura dos gases e t representa o tempo em minutos. A temperatura ambiente que é considerada no instante inicial é geralmente considerada 20°C. A Equação (2.3) também está ilustrada na Figura 2.4.

#### 2.4.1.4 – NBR 14432:2000

Assim como o EUROCODE 1:1995 e a ISO 834:1999, para os casos em que o incêndio tem material combustível composto principalmente por materiais celulósicos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 14432:2000, adota a mesma Equação (2.1) para definir a curva de incêndio-padrão.

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

Na Figura 2.4 é feita a comparação entre todas essas curvas adotadas pelas normas citadas anteriormente.

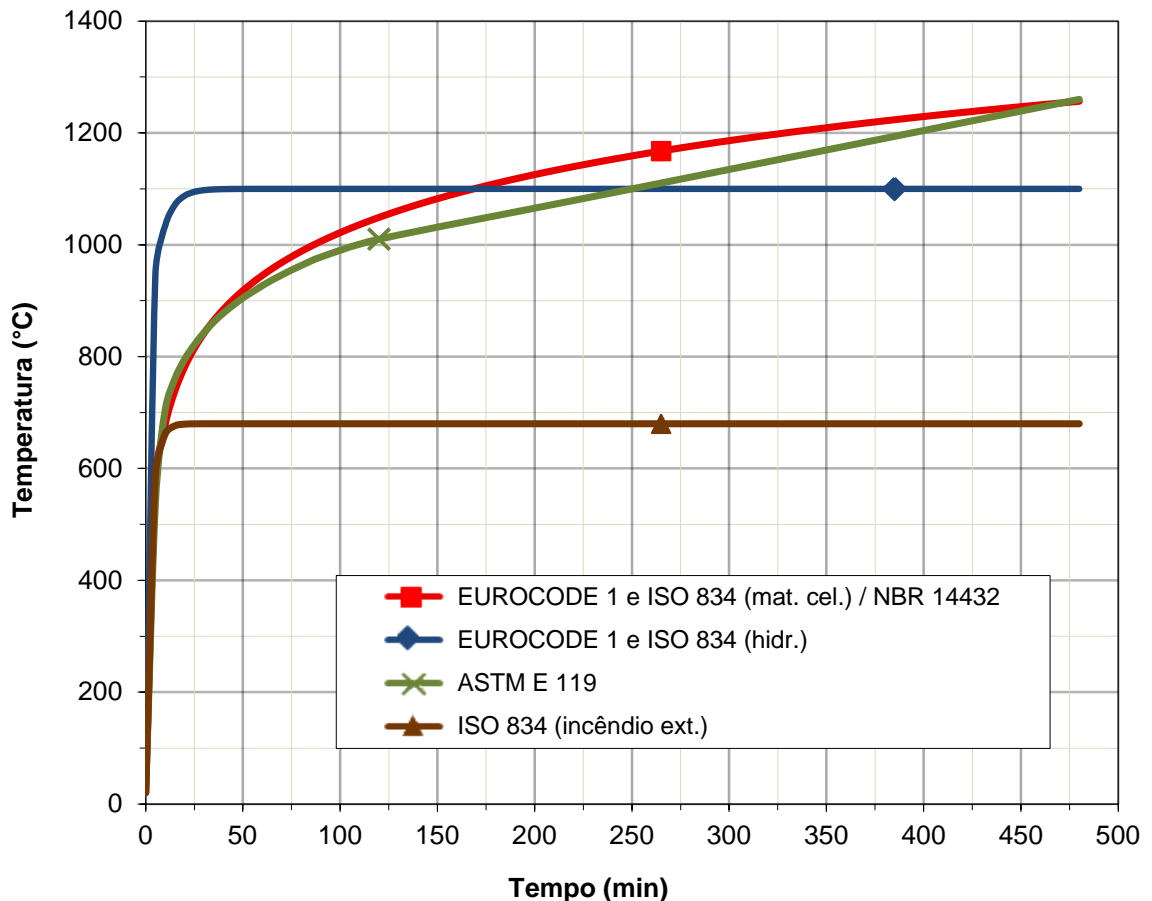


Figura 2.4 - Curvas temperatura x tempo de incêndio-padrão: EUROCODE 1:1995, ASTM 119:1988, ISO 834:1999 e NBR 14432:2000.

## 2.4.2 – Incêndio Natural

O modelo mais preciso para se determinar a temperatura dos gases no interior de um compartimento em chamas é o modelo do incêndio natural. Esse método propõe curvas de temperatura x tempo simulando as fases de um incêndio real, com os ramos ascendente (aquecimento) e descendente (resfriamento), uma vez que a temperatura dos gases quentes não é sempre ascendente ao longo do tempo.

O incêndio natural pode ser modelado através de curvas paramétricas e sua curva é interferida diretamente por fatores como a carga de incêndio específica, o grau de ventilação, a geometria, os tipos dos elementos de vedação e suas características térmicas.

Este modelo é aferido por ensaios experimentais que simulam situações reais de incêndio e que são realizados em compartimentos com isolamento térmico (estanqueidade), ou seja, o incêndio não se propaga para o exterior do compartimento. Os resultados obtidos por esses ensaios demonstram que a curva temperatura x tempo de um incêndio natural depende dos parâmetros carga de incêndio, grau de ventilação e características dos materiais componentes da vedação.

### 2.4.2.1 – Carga de incêndio

É a soma das energias caloríficas que podem ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis de um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos (NBR 14432:2000).

Além da carga de incêndio, existe também a carga de incêndio específica que é o valor da carga de incêndio dividido pela área de referência, que pode ser a área do piso do espaço considerado ou a área total (pisos, paredes, teto e aberturas), expresso em MJ/m<sup>2</sup>. A carga de incêndio específica é expressa pela Equação (2.4):

$$q_{fi} = \frac{\sum_i M_i H_i m_i \psi_i}{A_r} \quad (2.4)$$

Onde:

$q_{fi}$  – Carga de incêndio específica (MJ/m<sup>2</sup>);

$M_i$  – Massa total de cada componente “i” do material combustível (kg);

$H_i$  – Potencial calorífico de cada componente “i” do material combustível (MJ/kg);

$A_r$  – Área de referência do compartimento (m<sup>2</sup>);

$m_i$  – Coeficiente adimensional que indica a eficiência da combustão de cada componente “i” do material combustível ( $0 \leq m_i \leq 1$ );

$\psi_i$  – Coeficiente adimensional indicando o grau de proteção do combustível ao fogo ( $0 \leq \psi_i \leq 1$ ).

É comum serem adotados  $m_i = 1$  e  $\psi_i = 1$  que representam, respectivamente, combustão completa e nenhuma proteção do combustível ao fogo.

Como na prática é bastante difícil se determinar o valor da carga de incêndio específica através da equação (2.4), é usual adotar valores tabelados por normas técnicas de acordo com a finalidade das edificações. A NBR 14432:2000 recomenda valores de potencial calorífico específico para alguns materiais, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de potencial calorífico específico – NBR 14432:2000.

Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)
Acrílico	28	Lã	23	Poliéster	31
Algodão	18	Lixo de cozinha	18	Polietileno	44
Borracha	Espuma - 37 Tiras - 32	Madeira	19	Polipropileno	43
Couro	19	Palha	16	Poliuretano	23
Epóxi	34	Papel	17	PVC	17
Grãos	17	Petróleo	41	Resina melamínica	18
Graxa, lubrificante	41	Policarbonato	29	Seda	19

A NBR 14432:2000 também recomenda valores de carga de incêndio específica em função do tipo de ocupação das edificações. Alguns deles são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valores de carga de incêndio específica – NBR 14432:2000.

Ocupação/uso	$q_{fi}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	Ocupação/uso	$q_{fi}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
Residências	300	Bibliotecas	2000
Hotéis	500	Cinemas	600
Floricultura	80	Igrejas	200
Supermercados	300	Restaurantes	300
Agências bancárias	300	Estacionamentos	200
Escritórios	700	Hospitais	300
Escolas	300	Indústria de roupas	500

Existe também o valor de cálculo da carga de incêndio específica ( $q_{fi,d}$ ) que consiste na multiplicação da carga de incêndio específica obtida na Equação (2.4) por coeficientes adimensionais que consideram diversos fatores. Esses fatores podem ser a existência de chuveiros automáticos, dispositivos automáticos de detecção e alarme contra incêndio e também a avaliação do nível de segurança contra um incêndio e das consequências de um possível colapso estrutural. O valor de cálculo da carga de incêndio específica está expresso na Equação (2.5).

$$q_{fi,d} = q_{fi} \frac{A_f}{A_t} \quad (2.5)$$

Onde:

$A_f$  – Área de piso do compartimento (m<sup>2</sup>);

$A_t$  – Área total (pisos, paredes, teto e aberturas).

#### 2.4.2.2 – Grau de ventilação

O oxigênio é um fator importante para que ocorra o incêndio, pois ele é um dos elementos (o comburente) do tetraedro do fogo, como foi visto no item 2.1. Sendo assim, para se analisar a intensidade de um incêndio, leva-se também em consideração a quantidade de oxigênio que existe no local afetado e isso é feito através do grau de ventilação (ou fator de abertura). Esse fator indica a quantidade de ventilação em relação às aberturas existentes no compartimento e às alturas dessas aberturas, tendo como base a área total do ambiente.

O grau de ventilação de um compartimento em situação de incêndio é expresso pela Equação (2.6).

$$O = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t} \quad (2.6)$$

$$h = \frac{\sum_i h_i A_i}{A_v} \quad (2.7)$$

Onde:

- O – Grau de ventilação ou fator de abertura;
- $A_v$  – Área total das aberturas para o exterior do compartimento;
- h – Altura média das aberturas;
- $h_i$  – Altura da abertura “i”;
- $A_i$  – Área da abertura “i”.

Existe um fator que relaciona a quantidade de material combustível com o grau de ventilação do compartimento, e ele é apresentado na Equação (2.8).

$$\xi = \frac{A_q}{A_v \sqrt{h}} \quad (2.8)$$

Onde:

- $\xi$  – Fator de relação entre a quantidade de material combustível e o grau de ventilação;
- $A_q$  – Área da superfície do material combustível que pode participar da combustão;

Se o fator  $\xi$  tiver um valor alto, ou seja, um incêndio natural tiver a quantidade de material combustível suficientemente alta ou tiver um grau de ventilação suficientemente baixo, a temperatura dos gases quentes será função apenas do grau de ventilação, sendo um incêndio de ventilação controlada (Silva, 2001 apud Nunes, 2005, p. 18). Frequentemente adota-se que na fase de aquecimento o incêndio é de ventilação controlada, por questões de

segurança e simplificação. Por outro lado, quando o fator  $\xi$  apresenta valores baixos, assume-se que a temperatura depende apenas da carga de incêndio (incêndio controlado pelo combustível).

#### 2.4.2.3 – Curvas parametrizadas: EUROCODE 1:1995

A EUROCODE 1:1995 propõe curvas parametrizadas para representarem os incêndios naturais com suas fases de aquecimento e resfriamento. Para isso, ela considera os parâmetros descritos anteriormente para as equações de cada fase.

Utiliza-se a Equação (2.9) para calcular a fase de aquecimento (curva ascendente) do incêndio natural:

$$\theta_g = 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (2.9)$$

$$t^* = t\Gamma \quad (2.10)$$

$$\Gamma = \frac{(0/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad (2.11)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (2.12)$$

Para a fase de resfriamento (curva descendente) do incêndio natural, é adotada a Equação (2.13):

$$\begin{cases} \theta_g = \theta_{\max} - 625(t^* - t_d^*) & \text{para } t_d^* \leq 0,5 \\ \theta_g = \theta_{\max} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*) & \text{para } 0,5 < t_d^* \leq 2 \\ \theta_g = \theta_{\max} - 250(t^* - t_d^*) & \text{para } t_d^* > 2 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$t_d^* = 0,13 \cdot 10^{-3} \frac{q_{fi,d}}{0} \Gamma \quad (2.14)$$

Onde:

$t$  – Tempo em horas;

$\rho$  – Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ) do material de vedação do compartimento;

$c$  – Calor específico ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ) do material de vedação do compartimento;

$\lambda$  – Condutividade térmica ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) do material de vedação do compartimento;

$\theta_{\text{max}}$  – Máxima temperatura alcançada pelos gases quentes ( $^\circ\text{C}$ ), que ocorre quando

$t^* = t_d^*$ .

Alguns limites devem ser atendidos na aplicação dessas equações:

- Grau de ventilação:  $0,02\text{m}^{1/2} \leq O \leq 0,20\text{m}^{1/2}$ ;
- Valor de cálculo da carga de incêndio específica:  $50\text{MJ/m}^2 \leq q_{\text{fi,d}} \leq 1000\text{MJ/m}^2$ ;
- Área de piso do compartimento  $\leq 100\text{m}^2$ ;
- Valor de  $b$ :  $1000\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}^\circ\text{C} \leq b \leq 2000\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}^\circ\text{C}$ .

Para fins de comparação e de se comprovar alguns fatos, utilizando as curvas propostas pela EUROCODE 1:1995, foram traçados gráficos onde se mantém a carga de incêndio específica  $q_{\text{fi}}$  constante, variando-se os graus de ventilação  $O$  e onde se mantém o grau de ventilação  $O$  constante, variando-se as cargas de incêndio específicas  $q_{\text{fi}}$ . Foi considerado o valor de  $b$  constante e igual a  $1160\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}^\circ\text{C}$  para todos os casos.

O gráfico da Figura 2.5 mostra o caso em que a carga de incêndio específica é constante ( $q_{\text{fi}} = 500\text{MJ/m}^2$ ) para três situações com valores diferentes de grau de ventilação ( $O = 0,04\text{m}^{1/2}$ ,  $O = 0,08\text{m}^{1/2}$  e  $O = 0,12\text{m}^{1/2}$ ):



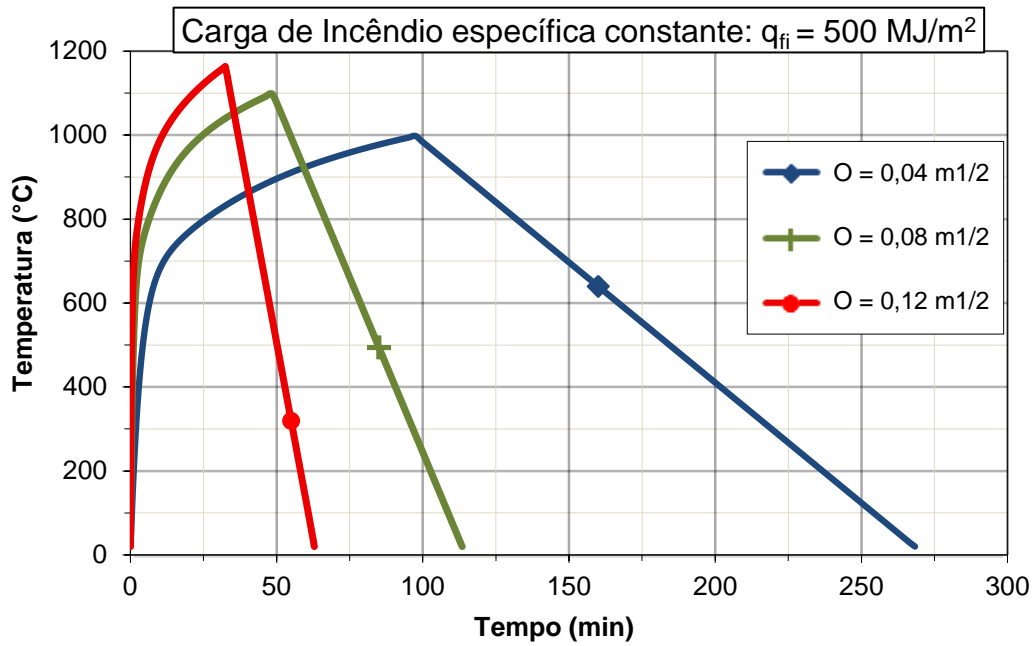


Figura 2.5 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ( $q_{fi} = 500 \text{ MJ/m}^2$ ).

Já o gráfico da Figura 2.6 apresenta o caso em que o grau de ventilação  $O$  é constante ( $O = 0,08 \text{ m}^{1/2}$ ) para três situações com valores diferentes de carga de incêndio específica ( $q_{fi} = 300 \text{ MJ/m}^2$ ,  $q_{fi} = 500 \text{ MJ/m}^2$  e  $q_{fi} = 600 \text{ MJ/m}^2$ ):

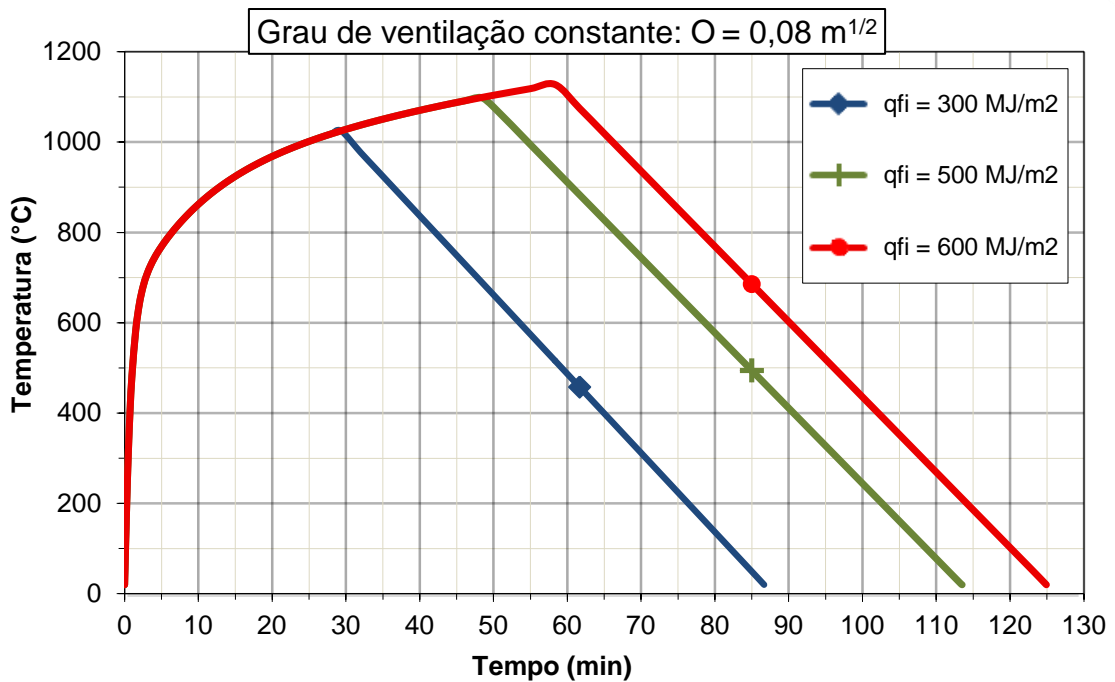


Figura 2.6 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ( $O = 0,08 \text{ m}^{1/2}$ ).

Analisando os dois gráficos anteriores, é possível tirar as seguintes conclusões:

- Quando se mantém constante a carga de incêndio específica, quanto maior for o grau de ventilação, maior será a temperatura máxima alcançada, menor será o tempo necessário para se atingir essa temperatura máxima e menor será o tempo de duração do incêndio;
- Quando se mantém constante o grau de ventilação, quanto maior for a carga de incêndio específica, maior será a temperatura máxima alcançada, maior será o tempo necessário para se atingir essa temperatura máxima e maior será o tempo de duração do incêndio;

## **2.5 – PROPRIEDADES DO AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

O aço, quando submetido a uma situação de incêndio, sofre algumas alterações em suas propriedades mecânicas e térmicas que devem ser levadas em consideração nos projetos de modo a garantir a segurança requerida. Nessa seção, serão apresentadas algumas dessas propriedades e como elas variam de acordo com o aumento da temperatura, lembrando que esses valores não são absolutos, uma vez que as características dependem de vários fatores, como a composição química dos aços (NBR 14323:1999).

### **2.5.1 – Resistência ao Escoamento dos Aços – Propriedade mecânica**

O aço, em exposição a altas temperaturas, sofre uma depreciação nas suas características físicas e químicas, o que leva à redução da rigidez e da resistência. A NBR 14323:1999 apresenta uma tabela com fatores de redução do limite de escoamento dos aços, relativos aos valores a 20°C, para taxas de aquecimento entre 2°C/min e 50°C/min. Esses fatores de redução são apresentados na Tabela 2.5, de modo que:

$$K_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y \quad (2.15)$$

$$K_{y0,\theta} = f_{y0,\theta}/f_{y0} \quad (2.16)$$

Onde:

- $f_{y,\theta}$  – Limite de escoamento dos aços laminados a quente a uma temperatura  $\theta_a$ ;
- $f_y$  – Limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C;
- $K_{y,\theta}$  – Fator de redução para o limite de escoamento dos aços laminados a quente;
- $f_{y0,\theta}$  – Limite de escoamento dos aços trefilados a uma temperatura  $\theta_a$ ;
- $f_{y0}$  – Limite de escoamento dos aços trefilados a 20°C;
- $K_{y0,\theta}$  – Fator de redução para o limite de escoamento dos aços trefilados.

Tabela 2.5 – Fatores de redução para o limite de escoamento dos aços – NBR 14323:1999.

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	$K_{y,\theta}$	$K_{y0,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	1,000
300	1,000	1,000
400	1,000	0,940
500	0,780	0,670
600	0,470	0,400
700	0,230	0,120
800	0,110	0,110
900	0,060	0,080
1000	0,040	0,050
1100	0,020	0,030
1200	0,000	0,000

A Figura 2.7 apresenta as curvas características de cada um desses fatores de redução.

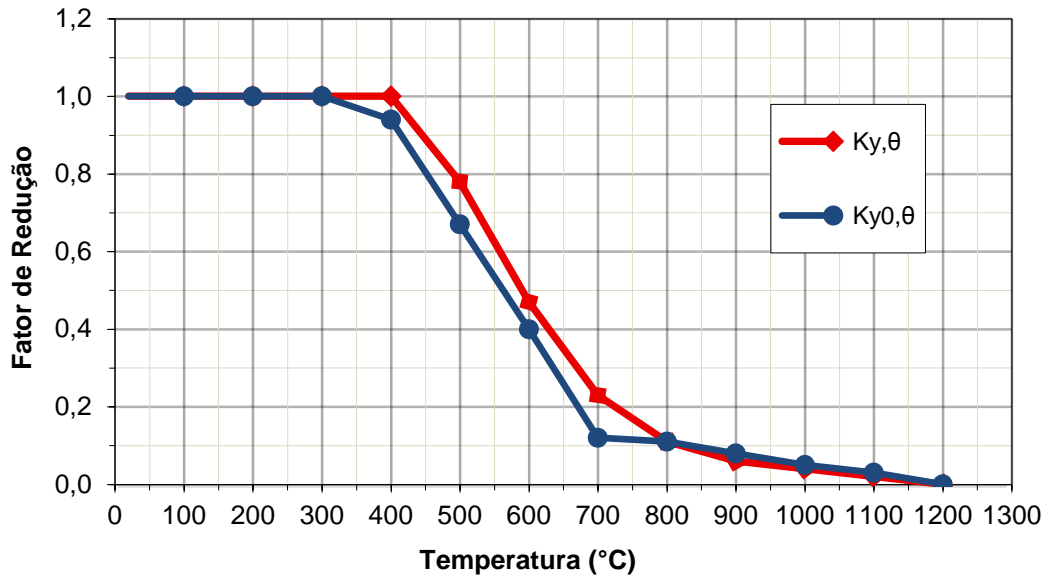


Figura 2.7 – Curvas características dos fatores de redução para o limite de escoamento dos aços – NBR 14323:1999.

### 2.5.2 – Módulo de elasticidade – Propriedade mecânica

Assim como a resistência ao escoamento, o módulo de elasticidade do aço também sofre uma degeneração de acordo com o aumento da temperatura. Para esse caso, a NBR 14323:1999 também apresenta uma tabela com fatores de redução relativos a 20°C. A Tabela 2.6 apresenta esses valores de acordo com a Equação (2.17):

$$K_{E,\theta} = E_{\theta}/E \quad (2.17)$$

Onde:

$E_{\theta}$  – Módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$E$  – Módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a 20°C;

$K_{E,\theta}$  – Fator de redução para o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço.

Tabela 2.6 – Fatores de redução do módulo de elasticidade dos aços – NBR 14323:1999.

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	$K_{E,\theta}$
20	1,0000
100	1,0000
200	0,9000
300	0,8000
400	0,7000
500	0,6000
600	0,3100
700	0,1300
800	0,0900
900	0,0675
1000	0,0450
1100	0,0225
1200	0,0000

Na Figura 2.8 é apresentada a curva característica desses fatores de redução.

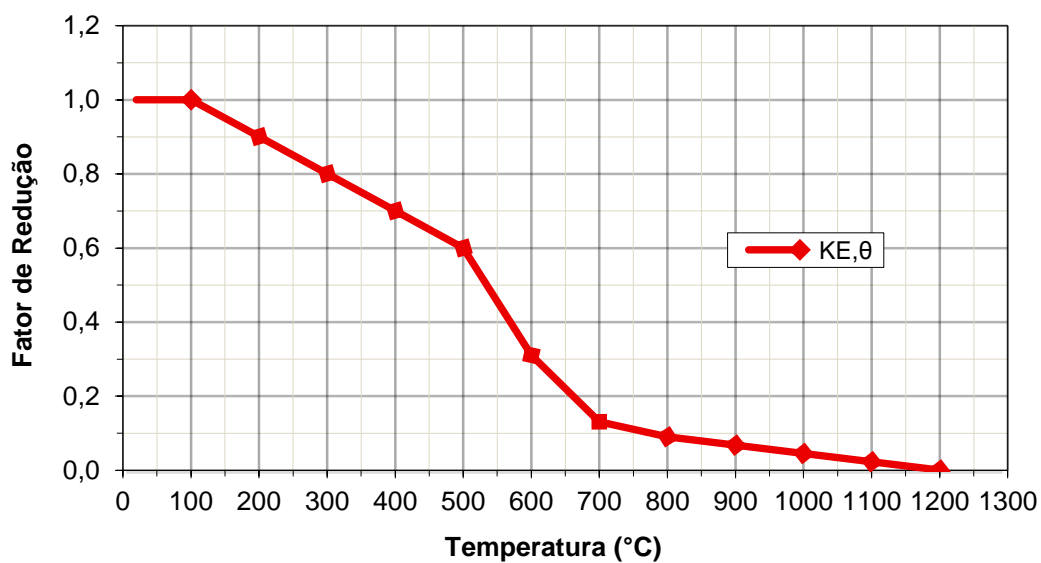


Figura 2.8 – Curvas características dos fatores de redução para o módulo de elasticidade dos aços – NBR 14323:1999.

### 2.5.3 – Massa específica – Propriedade mecânica

Em qualquer temperatura, a massa específica do aço pode ser considerada constante e com o valor mostrado na Equação (2.18), de acordo com a NBR 14323:1999.

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad (2.18)$$

### 2.5.4 – Condutividade térmica – Propriedade térmica

A condução térmica é um dos meios de transferência de calor que geralmente ocorre em materiais sólidos, ou seja, é a propagação do calor por meio do contato de moléculas de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes.

Essa propriedade varia com o aumento da temperatura, sendo determinada de acordo com a Equação (2.19).

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \\ \lambda_a = 27,3 \quad \text{para } 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Onde:

$\theta_a$  – Temperatura do aço ( $^\circ\text{C}$ );

$\lambda_a$  – Condutividade térmica do aço ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ).

Essa variação da condutividade térmica do aço está representada graficamente como pode ser visto na Figura 2.9.

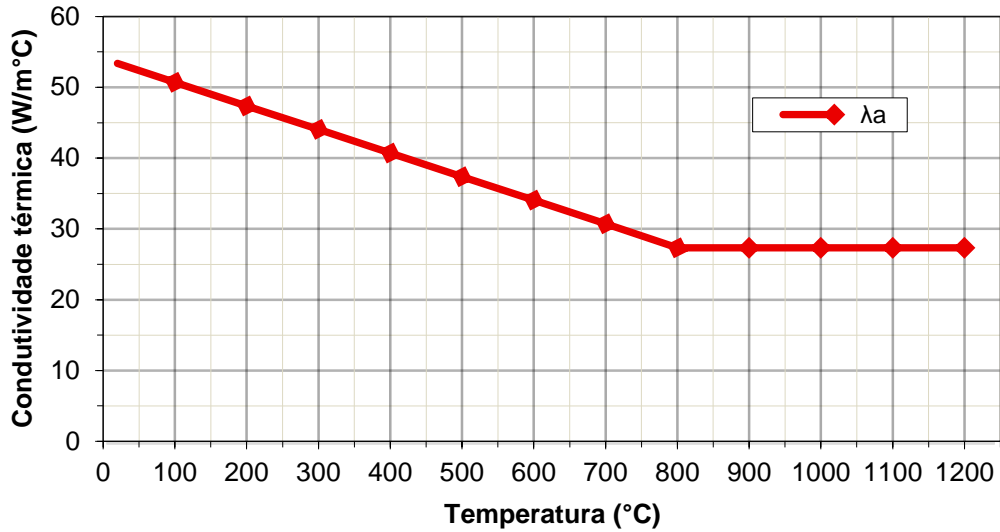


Figura 2.9 – Condutividade térmica dos aços em função da temperatura.

O valor da condutividade térmica do aço ( $\lambda_a$ ) pode ser considerado constante, independentemente da temperatura, caso se empreguem métodos simplificados de cálculo. Esse valor é igual a:

$$\lambda_a = 40 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (2.20)$$

Para o estudo nesse trabalho, a condutividade térmica ( $\lambda_a$ ) foi considerada variando de acordo com o aumento da temperatura, conforme a Equação (2.19).

### 2.5.5 – Calor específico – Propriedade térmica

Calor específico é a quantidade necessária de calor a ser fornecida à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura de um grau. A NBR 14323:1999 determina como essa propriedade sofre variação de acordo com a temperatura do aço, como pode ser visto na Equação (2.21).

$$\left\{ \begin{array}{l} c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C} \\ c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad \text{para } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C} \\ c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{para } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C} \\ c_a = 650 \quad \text{para } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Onde:

$\theta_a$  – Temperatura do aço (°C);

$c_a$  – Calor específico do aço (J/kg°C).

A variação do calor específico dos aços com a temperatura pode ser vista graficamente na Figura 2.10.

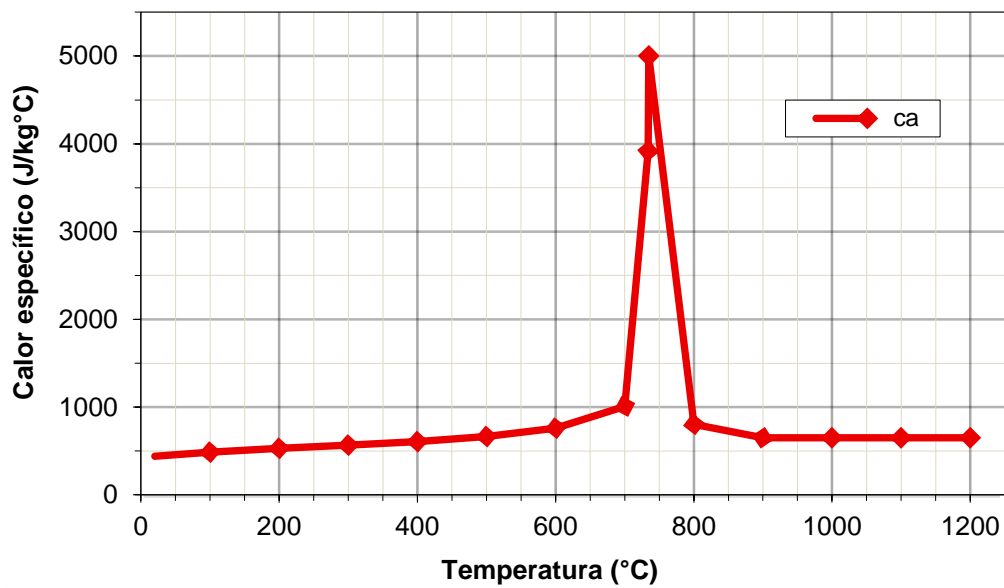


Figura 2.10 – Calor específico dos aços em função da temperatura.

Assim como para a condutividade térmica, o calor específico do aço também pode ser considerado constante, independentemente da temperatura, caso se empreguem métodos simplificados de cálculo. Nesse caso, ele é considerado igual a:

$$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (2.22)$$

Nos cálculos utilizados no presente trabalho, o calor específico foi considerado variando em função da temperatura.

Todas essas propriedades mecânicas e térmicas foram consideradas, nesse estudo, exatamente como foram mostradas nessa seção.



## **2.6 – DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA PARA PERFIS I EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO A NBR 14323:1999 E NBR 8800:1986**

Primeiramente será revisado o que é sugerido e adotado atualmente pela norma técnica brasileira NBR 14323:1999 para a determinação da carga crítica uniformemente distribuída em perfis “I” de aço sob situação de incêndio, uma vez que o objetivo principal desse trabalho é se fazer um estudo mais detalhado sobre esse assunto.

Como já foi dito na seção 2.3, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) publicou as normas NBR 14323:1999 e NBR 14432:2000 que são referentes ao procedimento que deve ser adotado em relação ao comportamento de estruturas de aço em situação de incêndio.

A NBR 14323:1999 é baseada nos estados limites, no qual se compara a solicitação de cálculo com a resistência de cálculo dos elementos estruturais de aço em situação de incêndio. Nessa norma, também é possível fazer a verificação de que a temperatura atingida pelos elementos estruturais não ultrapassa a temperatura crítica (temperatura de colapso estrutural) no TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo), que é obtido na NBR 14432:2000.

De acordo com a NBR 14323:1999, para se determinar o valor do parâmetro de esbeltez  $\lambda$  para os estados limites últimos de flambagem local da mesa comprimida (FLM), flambagem local da alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT) em situação de incêndio para barras fletidas, deve-se sempre considerar o anexo D da NBR 8800:1986. É considerada NBR 8800:1986 e não a mais recente (NBR 8800:2008), pois a NBR 14323:1999 se baseia na norma mais antiga. O anexo D se aplica a vigas não esbeltas sujeitas à flexão normal simples com diversas seções e eixos de flexão.

O anexo D da NBR 8800:1986 define vigas não esbeltas como sendo aquelas cujos elementos (almas e mesas) perpendiculares ao eixo de flexão têm índice de esbeltez  $\lambda$  inferior ou igual a  $\lambda_r$  ( $\lambda \leq \lambda_r$ ), sendo  $\lambda_r$  o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento para temperatura ambiente.

Para o caso de vigas biapoiadas sobrepostas por material refratário, os valores dos parâmetros de esbeltez, em situação de incêndio, correspondentes à plastificação  $\lambda_{p,fi}$  e ao início do escoamento  $\lambda_{r,fi}$  devem ser determinados de acordo com o anexo D da NBR 8800:1986 para a mesmo caso, mas para temperatura ambiente (sem incêndio). Nesse caso de temperatura ambiente, os parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação e ao início do escoamento são dados, respectivamente, por  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ . Para o caso de vigas fletidas que não são biapoiadas,  $\lambda_{p,fi}$  e  $\lambda_{r,fi}$  devem ser calculados pelo mesmo procedimento anterior, mas multiplicando-se o valor do módulo de elasticidade E pelo fator de redução do módulo de elasticidade  $K_{E,\theta}$  apresentado na Tabela 2.6.

A NBR 14323:1999 recomenda para a determinação da resistência de cálculo ao momento fletor  $M_{fi,Rd}$ , para uma viga de aço com seção transversal I em situação de incêndio, as seguintes expressões:

- Flambagem local da mesa comprimida (FLM) e Flambagem local da alma (FLA):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} M_{pl} \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \\ M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \quad \text{para } \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \end{array} \right. \quad (2.23)$$

- Flambagem lateral com flexo-torção (FLT):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} M_{pl} \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \\ M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{K_{y,\theta}}{1,2} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \quad \text{para } \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \\ M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{K_{E,\theta} M_{cr}}{1,2} \quad \text{para } \lambda > \lambda_{r,fi} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Onde:

$\phi_{fi,a}$  – Coeficiente de resistência do aço;

$k_1$  – Fator de correção para a temperatura não uniforme na seção transversal;

$k_2$  – Fator de correção para a temperatura não uniforme ao longo do comprimento da barra;

$M_{pl}$  – Momento de plastificação da seção transversal para projeto em temperatura ambiente;

$M_r$  – Momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal para projeto em temperatura ambiente;

$M_{cr}$  – Momento fletor de flambagem elástica em temperatura ambiente;

1,2 – Fator de correção empírico da resistência da barra em temperatura elevada.

Analisando as Equações (2.23) e (2.24), percebe-se que para os casos de FLM, FLA e FLT, quando  $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$ , são utilizados os fatores de correção  $k_1$  e  $k_2$  para se compensar (corrigir) a consideração feita de uma distribuição de temperatura uniforme. O fator de correção  $k_1$ , que se refere à correção na seção transversal, assume o valor de 1,00 para o caso de uma viga com todos os quatro lados expostos, e assume o valor de 1,40 para uma viga com três lados expostos e uma laje incorporada no quarto lado (lado superior da viga). Já o fator de correção  $k_2$ , que se refere à correção ao longo do comprimento da barra, assume o valor de 1,15 nos apoios de uma viga estaticamente indeterminada, e assume o valor de 1,00 em todos os outros casos. Já para os casos de FLT, quando  $\lambda > \lambda_{r,fi}$ , é utilizado o fator de correção empírico 1,2 para se fazer essa compensação (correção) na distribuição de temperatura uniforme, na tentativa de se tornar uma distribuição de temperatura não uniforme. Como já mencionado anteriormente, a análise a ser desenvolvida nesse trabalho considera que as temperaturas nos flanges da viga são não uniformes, enquanto as normas brasileiras propõem fatores de correção.

De acordo com o anexo D da NBR 8800:1986, a resistência de cálculo ao momento fletor de vigas não esbeltas vale  $\phi_b M_n$ , sendo  $M_n$  a resistência nominal e  $\phi_b = 0,9$ . A resistência nominal  $M_n$ , para o caso de perfis I, é obtida adotando-se o menor dos três valores calculados, considerando os estados limites FLM, FLA e FLT:

$$\begin{cases} M_n = M_{pl} & \text{para } \lambda \leq \lambda_p \\ M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} & \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ M_n = M_{cr} & \text{para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável a FLA)} \end{cases} \quad (2.25)$$

O principal objetivo desse trabalho é determinar a carga crítica uniformemente distribuída de vigas I de aço em situação de incêndio natural. Como se pretende fazer a comparação

entre esses resultados encontrados e as recomendações normativas para o estado limite de FLT (vigas que se incluem no caso  $\lambda > \lambda_r$ ), é necessária a determinação do momento crítico dos perfis de aço de acordo com as normas aqui apresentadas, e a posterior transformação desse momento para carga crítica uniformemente distribuída.

Portanto, calcula-se o momento crítico, de acordo com a NBR 8800:1986, para vigas de perfil I com dois eixos de simetria e fletidas em torno do eixo de maior inércia:

$$M_{cr} = \frac{C_b \beta_1}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda^2}} \quad (2.26)$$

Onde:

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2,3 \quad (2.27)$$

$$\beta_1 = \pi \sqrt{GE} \cdot \sqrt{I_T A} \quad (2.28)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi^2 E}{4G} \frac{A(d - t_f)^2}{I_T} \quad (2.29)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (2.30)$$

$C_b$  – Fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme;

$M_1$  – Menor dos dois momentos fletores de cálculo nas extremidades do trecho não contido lateralmente;

$M_2$  – Maior dos dois momentos fletores de cálculo nas extremidades do trecho não contido lateralmente;

$E$  – Módulo de elasticidade;

$G$  – Módulo de elasticidade transversal;

$I_T$  – Momento de inércia à torção;

$A$  – Área da seção transversal;

$d$  – Altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

$t_f$  – Espessura da mesa;

$L_b$  – Distância entre duas seções contidas lateralmente;

$r_y$  – Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia, perpendicular ao eixo de flexão.

Na Equação (2.26), o menor valor para o coeficiente  $C_b$  foi deduzido para o caso de uma viga submetida à flexão pura. Com o intuito de corrigir esse valor para situações com outros tipos de carregamentos, a NBR 8800:1986 utiliza o clássico coeficiente de correção  $C_b$  sugerido por Salvadori (1955), como pode ser visto na Equação (2.27).

A relação  $M_1/M_2$  da Equação (2.27) é positiva se esses momentos provocarem curvatura reversa e é negativa se a curvatura for simples. Se o momento fletor em alguma seção intermediária for, em valor absoluto, superior a  $M_1$  e  $M_2$  ou se a viga estiver em balanço,  $C_b$  deve ser adotado igual a 1,0.

Já tendo obtido o momento crítico  $M_{cr}$ , transforma-se o mesmo no momento gerado por uma carga crítica uniformemente distribuída ( $q_{cr}$ ), considerando que o comprimento total da viga é  $L_b$ . Para isso, adota-se a formulação utilizada por Winter (1941):

$$-\frac{M\phi}{EI} = -\frac{q_{cr}}{2} \left( \frac{L_b^2}{4} - x^2 \right) \frac{\phi}{EI} \quad \text{para } \left\{ -\frac{L_b}{2} \leq x \leq \frac{L_b}{2} \right\} \quad (2.31)$$

$$q_{cr} = \frac{8M}{(L_b^2 - 4x^2)} \quad \text{para } \left\{ -\frac{L_b}{2} \leq x \leq \frac{L_b}{2} \right\} \quad (2.32)$$

O momento crítico  $M_{cr}$  ocorre no meio do vão ( $x = 0$ ), logo:

$$q_{cr} = \frac{8M_{cr}}{L_b^2} \quad (2.33)$$

Onde:

$L_b$  – Comprimento da viga sem travamento lateral;

$M$  – Momento fletor referente à posição  $x$ .

### 3 – ISOLAMENTO TÉRMICO

Como já visto anteriormente, as altas temperaturas decorrentes de um incêndio reduzem a resistência mecânica e a rigidez dos elementos estruturais de uma edificação e promovem expansões térmicas diferenciais, podendo levar essa estrutura ao colapso.

Independentemente da maneira como progride o processo de um colapso estrutural devido a altas temperaturas, o importante é que se deve evitar esse tipo de fenômeno. Para isso, existem as medidas de segurança e proteção contra incêndio que se classificam em ativas e passivas (Fonte: <http://www.metallica.com.br/protecao-de-estruturas-metalicas-frente-ao-fogo>, acessado em Novembro/2012):

- **Proteção Passiva:** Conjunto de medidas incorporadas ao edifício (projeto arquitetônico) e que não necessitam de um acionamento para desempenharem sua função num incêndio. Ou seja, essas medidas previnem o surgimento e controle da propagação do incêndio, independentemente da sua ocorrência. Ex: saídas de emergência, elevador de emergência, compartimentação vertical e horizontal, acesso de viatura, etc.;
- **Proteção Ativa:** Conjunto de medidas e instalações que necessitam de um acionamento manual ou automático para garantir seu funcionamento num incêndio. São medidas de combate ao fogo que respondem aos estímulos provocados pelas chamas. Ex: Controle de fumaça, detecção de incêndio, alarme de incêndio, chuveiros automáticos, etc.

A capacidade resistente da estrutura depende fortemente do comportamento do material estrutural utilizado, ou seja, do grau de variação de suas propriedades físicas e mecânicas com a temperatura. O aço sofre reduções progressivas em sua resistência mecânica quando submetido a condições de trabalho em temperaturas superiores à temperatura ambiente. Nesse aspecto, na construção metálica, a utilização de aços menos sensíveis às altas temperaturas ou de mecanismos adequados também constituem medidas de proteção passiva. Esses mecanismos podem ser, por exemplo, a utilização de películas protetoras nos elementos estruturais para a melhoria de sua capacidade de isolamento térmico, controlando assim o processo de redução da sua resistência mecânica.

A aplicação de materiais isolantes térmicos sobre a superfície dos componentes estruturais também é utilizada como forma de se aumentar o tempo necessário para que a temperatura crítica seja alcançada, evitando ou prorrogando o colapso da estrutura.

Como pode ser observado, revestir as estruturas de aço com materiais de proteção térmica é a solução mais frequentemente utilizada para se evitar o aumento excessivo de sua temperatura em situação de incêndio. De uma forma geral, para serem bons isolantes, esses materiais de proteção térmica devem apresentar as seguintes características (Silva e Vargas, 2005):

- Baixa massa específica: Um bom isolante precisa ser leve para não sobrecarregar desnecessariamente o elemento isolado, principalmente no caso onde o material ficará suspenso;
- Baixa condutividade térmica: Quanto menor a condutividade térmica ( $k$ ), maior a capacidade de isolamento térmico e menor a espessura necessária para uma mesma capacidade isolante;
- Alto calor específico: Um material com calor específico elevado pode absorver grandes quantidades de energia sem que haja grandes aumentos de sua temperatura;
- Resistência mecânica adequada: Quanto maior a resistência mecânica do material isolante, menor a sua fragilidade. Se esse isolamento for exposto a impactos, essa característica é importante;
- Custo compatível: O custo do material isolante deve ser economicamente viável no orçamento da obra.

Antigamente, era usual o emprego de materiais e técnicas já existentes para se isolar termicamente os elementos estruturais, como por exemplo, a execução de alvenarias contornando pilares ou o embutimento de vigas em concreto (Ver Figura 3.1).

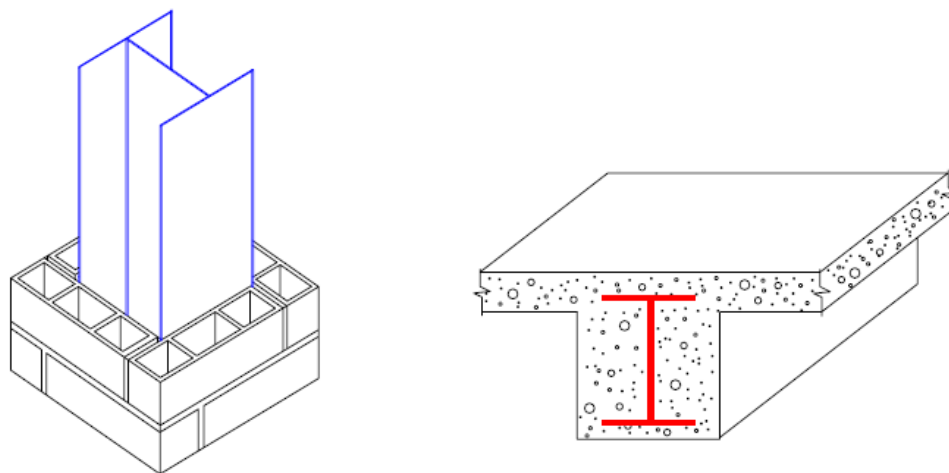


Figura 3.1 – Proteções clássicas de estruturas de aço contra incêndio (Martins, 2000).

Além dessas técnicas clássicas, atualmente, vários são os materiais especialmente desenvolvidos para esta finalidade. Os mais usuais e utilizados na construção civil são: argamassa projetada, fibra projetada, placas, tinta intumescente, manta cerâmica, gesso acartonado, etc.

### **3.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS**

Os revestimentos utilizados como isolantes térmicos podem ser classificados segundo seu material constituinte, sua morfologia e sua técnica de montagem (Martins, 2000).

#### **3.1.1 – Material constituinte**

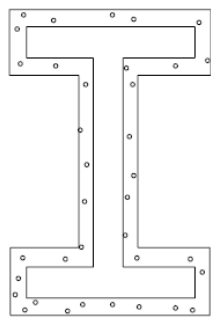
Em relação ao material que constitui o isolamento térmico, pode-se citar: concreto de cimento Portland, concreto leve (de agregados leves ou concreto celular), argamassa (a base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso), alvenarias, mantas (de fibras minerais, de fibras cerâmicas ou de lã de rocha), tintas intumescentes e muitos outros materiais.



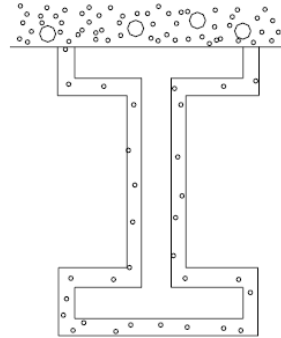
### 3.1.2 – Morfologia

Em relação à sua morfologia, os revestimentos podem se classificar em:

- Revestimento tipo contorno: O isolante térmico envolve o elemento estrutural de acordo com seus desvios;



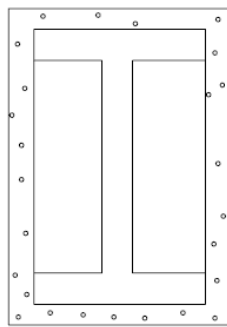
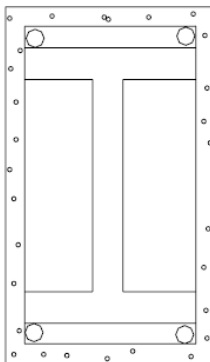
a) Pilar



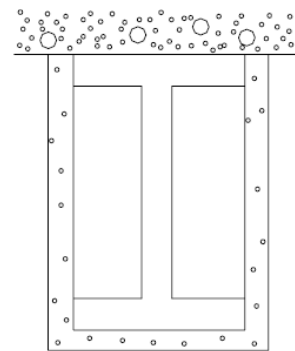
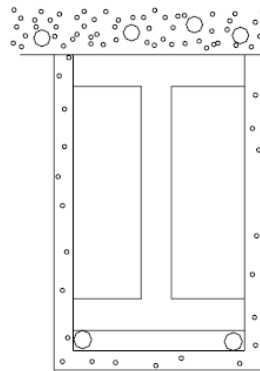
b) Viga sobreposta por laje de concreto

Figura 3.2 – Revestimento tipo contorno para pilares e vigas (Martins, 2000).

- Revestimento tipo caixa: Podem se apresentar com ou sem vãos entre o elemento estrutural e o isolante térmico.



a) Pilar com e sem vãos



b) Viga com e sem vãos

Figura 3.3 – Revestimento tipo caixa para pilares e vigas (Martins, 2000).

### 3.1.3 – Técnica de montagem

Quanto à técnica de montagem, os revestimentos geralmente são aplicados das seguintes formas:

- Aplicados manualmente:

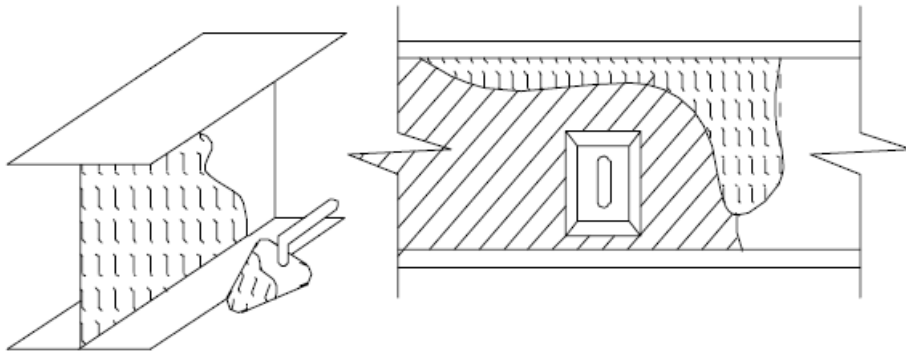


Figura 3.4 – Aplicação manual com colher e desempenadeira (MARTINS, 2000).

- Moldados com o uso de formas:

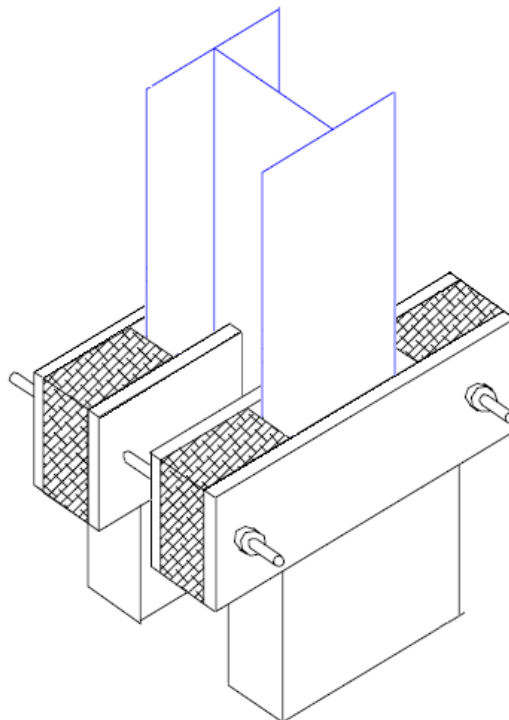


Figura 3.5 – Massa moldada com o uso de forma (Modificado de MARTINS, 2000).

- Montados:

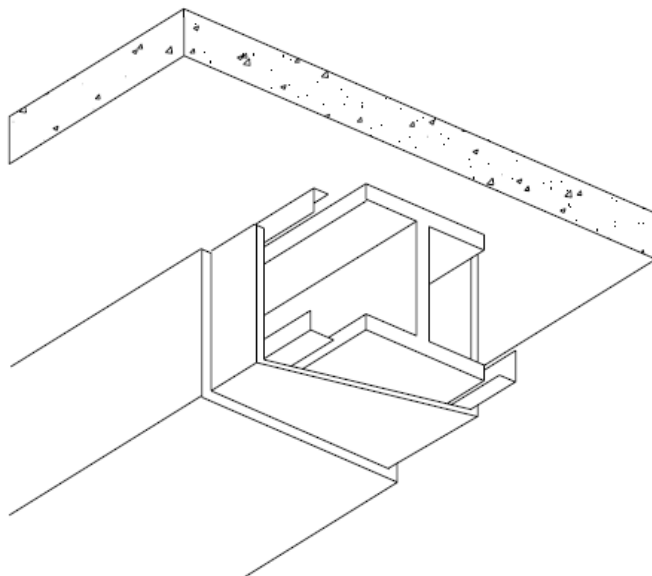


Figura 3.6 – Montagem de placas de gesso (Martins, 2000).

- Aplicados por jateamento:

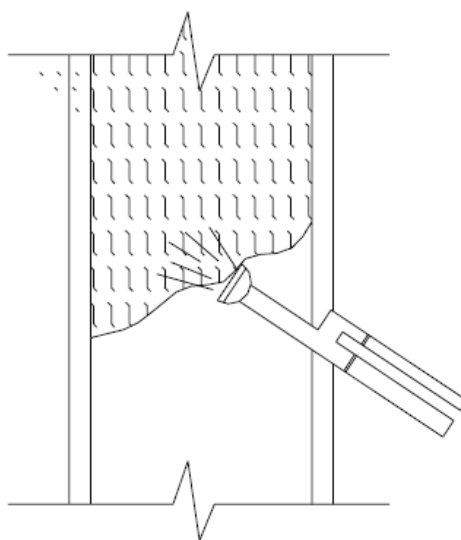


Figura 3.7 – Aplicação por jateamento (Martins, 2000).

- Fixados por dispositivos:

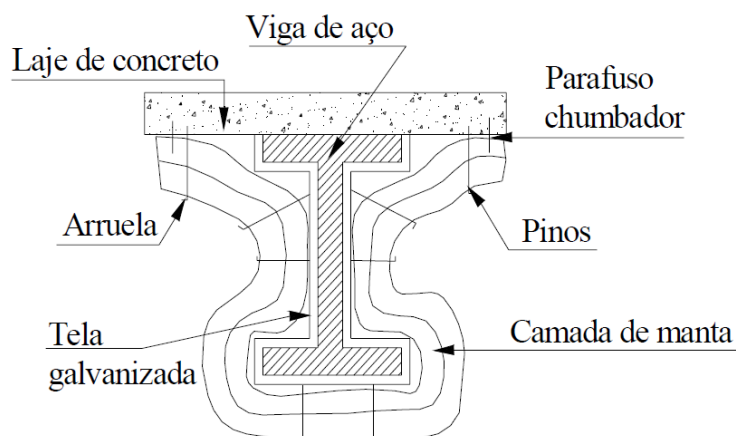


Figura 3.8 – Fixação de manta cerâmica com dispositivos adequados (Martins, 2000).

### 3.2 – REVESTIMENTO UTILIZADO

Um dos objetivos dessa pesquisa é comparar vigas com e sem revestimento, de forma a se analisar a importância e a diferença que o isolamento térmico em elementos estruturais gera no resultado final da carga crítica.

Para a escolha de qual revestimento utilizar nesse estudo, foi adotado o concreto leve com vermiculita, apenas para fins de se fazer a devida comparação de casos com e sem um isolante térmico. Embora tenha sido feita uma pesquisa para se escolher esse isolante térmico, é importante deixar claro que não houve uma preocupação maior em se escolher um revestimento que fosse o mais utilizado. O que prevaleceu na escolha desse revestimento foi a facilidade de simular geometricamente esse isolamento térmico no estudo numérico. O formato de caixa feito com placas de concreto leve tem uma geometria fácil de se modelar no ANSYS (2007).

#### 3.2.1 – Vermiculita

Quando a vermiculita é aquecida, perde água e se expande, adquirindo a forma de um verme. Tem massa específica de  $100 \text{ kg/m}^3$  a  $130 \text{ kg/m}^3$  e é encontrada no mercado na forma de blocos, para dosagem na obra, ou pré-misturada a seco com aditivos e cimento, para posterior adição de água.

A vermiculita pode ser usada como agregado fino (substituindo a areia) para concretos ou argamassas aplicadas sobre lajes ou revestimentos, normalmente como “massa grossa” com espessuras de 3 cm a 10 cm. A vermiculita é utilizada em concretos e argamassas com o objetivo de leveza e isolamento térmico e acústico.

### 3.2.2 – Concreto leve com vermiculita

Enquanto os concretos normais têm sua densidade variando entre 2300 kg/m<sup>3</sup> a 2500 kg/m<sup>3</sup>, os concretos leves chegam a atingir densidades próximas a 500 kg/m<sup>3</sup>. Cabe lembrar que a diminuição da densidade afeta diretamente a resistência do concreto.

O concreto leve adotado como isolamento térmico neste trabalho é um concreto onde o principal agregado é a vermiculita. Ele consegue compatibilizar um baixíssimo peso com boa resistência mecânica, o que outros agregados não conseguem, e uma elevada capacidade de isolamento térmico e acústico. Na Tabela 3.1 estão apresentados as propriedades do concreto leve com vermiculita adotado nesse estudo (Fonte: vermiculita2p.webs.com, acessado em Novembro/2012).

Tabela 3.1 – Propriedades do concreto leve com vermiculita.

Concreto leve com vermiculita			
Condutividade térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Espessura (cm)
0,17	920	500	3,0

## **4 – FENÔMENO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

Transferência de calor é um fenômeno no qual há energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura entre meios (ou corpos), tendendo à atingir o equilíbrio térmico (Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Propagação\\_térmica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Propagação_térmica), acessado em Março/2013).

Como nessa dissertação se pretende trabalhar com a elevação de temperatura em elementos estruturais de aço em situação de incêndio, é necessário primeiramente se compreender como ocorrem esses fenômenos de transferência de calor. É importante que se conheça os mecanismos pelo o qual o calor é gerado num ambiente qualquer e, conseqüentemente, o modo como ele é propagado dentro do mesmo.

Portanto, nessa sessão são apresentados conceitos fundamentais de transferência de calor que regem as ações térmicas em situação de incêndio, suas leis físicas e como o aço responde à variação de temperatura.

### **4.1 – TRANSMISSÃO DE CALOR**

É importante se compreender como o calor produzido por um incêndio pode se propagar em um ambiente e atingir as estruturas, uma vez que se pretende, nesse trabalho, analisar a carga crítica em vigas de aço em situação de incêndio.

Antes de falar sobre os mecanismos de transmissão de calor, é importante esclarecer a diferença entre a termodinâmica e a transmissão de calor:

- Termodinâmica: Lida com os estados que delimitam o processo no qual uma interação ocorre, não estudando nem a natureza, nem a taxa da mesma. Ou seja, se dois corpos com diferentes temperaturas entram em contato, pode-se determinar a temperatura inicial dos corpos e a temperatura final do equilíbrio térmico. Porém, não se sabe a temperatura dos corpos durante esse processo e nem quanto tempo se leva para alcançar esse equilíbrio (Fonte: <http://conceito.de/termodinamica>, acessado em Novembro/2012);

- Transmissão de calor: É a transferência de energia entre dois corpos devido a uma diferença de temperatura. Novamente, se dois corpos com diferentes temperaturas entram em contato, pode-se determinar a temperatura dos corpos ao longo do processo, e não apenas no início e fim.

Quando uma estrutura de aço é submetida a um incêndio, esta fica sujeita a uma variação térmica provocada por um fluxo de calor devido à diferença de temperatura entre as chamas e a própria estrutura. Essa variação térmica em cada elemento da estrutura pode ser calculada através do equilíbrio térmico entre o calor emitido pelo incêndio e o absorvido pelo elemento estrutural.

Outra diferença importante de conceitos é a definição de temperatura e calor (Fonte: <http://www.brasilecola.com/fisica/temperatura-calor>, acessado em Novembro/2012):

- Temperatura: É a grandeza termodinâmica intensiva comum a todos os corpos que estão em equilíbrio térmico. Essa grandeza está associada ao estado de movimento ou à agitação das partículas que compõem os corpos;
- Calor: É a energia que transita da região de maior temperatura para a de menor temperatura num dado sistema. Ou seja, para que haja a transferência de calor, é necessário que haja diferença de temperaturas.

$$Q = mc(\Delta T) \quad (4.1)$$

Onde:

Q – Calor;

m – Massa;

c – Calor específico;

$\Delta T$  – Diferença de temperatura entre os corpos;

Quando o calor é trocado por dois corpos, mas sem mudar a forma de ligação de suas moléculas (sólida, líquida ou gasosa), o calor é definido como sendo calor sensível. Caso haja mudança na forma de ligação de suas moléculas (mudança de estado), mas sem mudar

a temperatura, dá-se o nome de calor latente. O calor estudado nesse trabalho é o calor sensível.

Os mecanismos de transmissão de calor associados à troca de calor sensível são a condução, a convecção e a radiação. Na verdade, a distribuição de temperatura em um dado sistema é controlada pelos efeitos combinados dessas três formas de transferência de calor. Porém, para uma análise simplificada, pode-se considerar a condução separadamente sempre que a transferência de calor por convecção e radiação possa ser desprezada e vice-versa. A decisão de qual mecanismo de transferência de calor que deve ser levado em conta fica a cargo do bom senso de quem for fazer a análise. Na Figura 4.1 são exemplificados os mecanismos de transferência de calor.

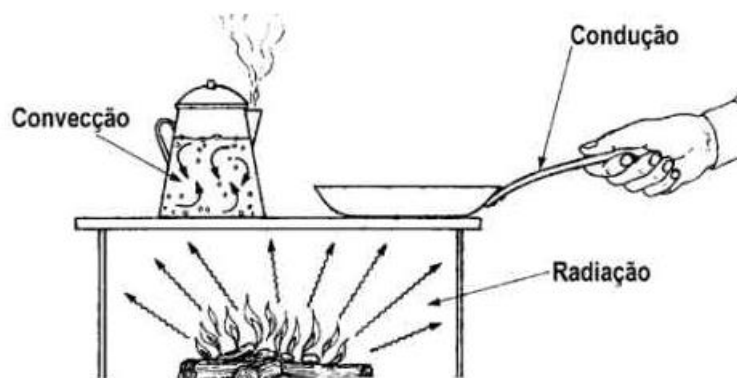


Figura 4.1 – Mecanismos de transferência de calor (Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9>, acessado em Novembro/2012).

#### 4.1.1 – Condução

Condução é um processo pelo qual o calor flui, num corpo qualquer, das moléculas com maior temperatura para as moléculas com menor temperatura em contato físico direto, sem que ocorra transferência de massa. O calor (energia) do corpo que possui temperatura mais elevada agita as moléculas do corpo que tem temperatura mais baixa, de forma que a energia cinética média das moléculas deste se eleve, aumentando sua energia interna. Assim, a temperatura do corpo que recebe a energia em forma de calor se eleva até atingir o estado de equilíbrio.

Entre corpos sólidos opacos, este tipo de transferência de calor é a única maneira na qual o calor pode ser transmitido. Já em meios líquidos, a condução também tem grande



importância, mas quase sempre está combinada com outras formas de transmissão de calor. Os sólidos são geralmente melhores condutores do que líquidos e esses são melhores do que gases. Isso porque a concentração das moléculas constituintes nos materiais sólidos é maior do que nos materiais líquidos e gasosos. Exemplificando, metais são excelentes condutores de calor e o ar é um péssimo condutor de calor. Os materiais que têm alta condutibilidade térmica são chamados de condutores, enquanto os que têm baixa condutibilidade são chamados de isolantes.

A quantidade de calor transmitida por condução através de uma área é definida pela Lei de Fourier na Equação (4.2). Como o calor flui da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, adota-se o sinal negativo para o produto.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda_a A_{fc} \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

$\Delta Q/\Delta t$  – Taxa de calor transmitido por condução através de uma área (W);

$\lambda_a$  – Condutividade térmica do material (W/m°C);

$A_{fc}$  – Área da seção através da qual o calor flui por condução (m<sup>2</sup>);

$\Delta T/\Delta x$  – Gradiente de temperatura na seção (°C/m).

A condutividade térmica de cada material pode variar para acentuadas mudanças de temperatura. Na Figura 2.9 foi apresentada essa propriedade do aço variando em função do aumento da temperatura.

Quando uma estrutura de aço é submetida a um incêndio, se dois ou mais elementos estruturais estão em contato entre si, o calor é conduzido por meio deles como se este conjunto fosse um único elemento. Sendo assim, esse fluxo de calor respeita a condutividade do material de cada elemento. A transferência de calor em um elemento ocorre simultaneamente em todas as direções e é instável (regime transiente).

#### 4.1.2 – Convecção

Convecção é um processo de transporte de massa caracterizado pelo movimento de um fluido devido à sua diferença de densidade entre moléculas quentes e frias. É um mecanismo de transferência de calor que ocorre somente em líquidos e gases, onde o fluido mais aquecido tende a migrar para locais onde as temperaturas são mais baixas, acarretando uma transferência de energia de uma posição para outra. E isso ocorre devido ao fluido aquecido sofrer uma maior agitação em suas moléculas, aumentando o número de colisões entre as mesmas (CPNSP, 2005).

O fluxo de calor convectivo é maior em ambientes que são confinados, devido à delimitação de espaço que faz com que a fumaça se acumule. O modo de transferência de calor por convecção abrange dois tipos de mecanismos: a advecção, que é a transmissão de energia devido ao movimento global ou macroscópico do fluido, e a difusão, que é a transmissão de energia devido ao movimento molecular aleatório, assim como na condução.

Quando o fluido se movimenta livremente (de uma forma natural) devido às forças resultantes da diferença de temperatura entre camadas de um mesmo fluido, trata-se de convecção livre. Por exemplo, quando se aquece água em uma chaleira e as moléculas de água mais aquecidas tornam-se mais leves e tendem a subir na massa líquida. As moléculas de água mais aquecidas vão tomando o lugar das moléculas das camadas superiores, resultando em um movimento convectivo livre.

Quando são utilizados agentes externos para aumentar a velocidade do fluido, trata-se de convecção forçada. Por exemplo, quando se utiliza equipamentos como bombas ou ventiladores.

A Lei de Resfriamento de Newton (Incropera e DeWitt, 1998) governa a taxa de transferência de calor por convecção. De acordo com a NBR 14323:1999, quando essa taxa é aplicada a problemas de elementos estruturais em aço que estão submetidos à situações de incêndio, ela pode ser chamada de fluxo de calor convectivo, como pode ser visto na Equação (4.3).

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \quad (4.3)$$

Onde:

$\varphi_c$  – Fluxo de calor convectivo por unidade de área ( $W/m^2$ );

$\theta_g$  – Temperatura dos gases ( $^{\circ}C$ );

$\theta_a$  – Temperatura na superfície do aço ( $^{\circ}C$ );

$\alpha_c$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

A determinação de valores numéricos de  $\alpha_c$  é feita através de análise dimensional e uma série elaborada de experiências. Em cálculos práticos, se define o coeficiente  $\alpha_c$  como mostrado na Equação (4.4).

$$\alpha_c = \frac{H_c}{A \Delta T} \quad (4.4)$$

Onde:

$H_c$  – Corrente térmica de convecção (W);

$A$  – Área da superfície exposta a troca de calor ( $m^2$ );

$\Delta T$  – Diferença de temperaturas entre a superfície e a massa do fluido ( $^{\circ}C$ ).

O coeficiente  $\alpha_c$  é geralmente tomado como um valor médio de  $\alpha_c = 25 W/m^2^{\circ}C$  no uso de modelos simplificados. Isso ocorre porque o mecanismo de transferência de calor por convecção é complexo e depende de muitos fatores, além da diferença de temperatura já mencionada. Dentre esses fatores referentes ao fluido, tem-se a velocidade de deslocamento, a densidade, a viscosidade, o calor específico, a condutividade térmica, a natureza, a forma, o tipo e geometria da superfície, a rugosidade e as dimensões do corpo.

Em um incêndio, conforme o ar é aquecido pelas chamas, as moléculas de ar da região aquecida se tornam menos densas e tendem a subir. Com isso, elas se chocam com a superfície dos elementos estruturais, ocorrendo a transferência de calor por convecção.

### 4.1.3 – Radiação

Analisando os itens anteriores, observa-se que a transmissão de calor pode ocorrer através de um meio material estático (condução) ou através de um meio material em movimento (convecção). Já a transmissão de calor por radiação é um mecanismo que dispensa a existência do meio material, na medida em que a energia é transportada através de ondas eletromagnéticas. Com isso, a transferência de calor é mais eficiente no vácuo, já que a existência de um meio material a ser atravessado implica na dissipação da energia trocada entre os dois corpos afastados (Martins, 2000).

Esse mecanismo é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo com temperatura elevada para um de temperatura mais baixa, quando tais corpos estão separados no espaço. As ondas eletromagnéticas podem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas por uma superfície. Diante disso, são empregados os termos refletividade  $\psi$ , absorvância  $\chi$  e transmitância  $\tau$  como fatores que permitem representar as frações de radiação que um corpo, respectivamente, reflete, absorve e transmite, como é mostrado na Equação (4.5). Essa forma de energia se assemelha ao fenômeno da radiação da luz, diferindo-se apenas nos comprimentos de onda.

$$\psi + \chi + \tau = 1 \quad (4.5)$$

Um caso extremo é quando toda a radiação térmica, proveniente de uma fonte de calor qualquer e incidente na superfície de um dado corpo, é absorvida pelo mesmo, ou seja  $\chi = 1$ . Este corpo é considerado ideal e denomina-se corpo negro. O corpo negro também é um perfeito emissor, ou seja, nenhum outro corpo pode emitir mais radiação térmica que ele com uma dada temperatura. Entretanto, é importante lembrar que, na prática, nenhum material real emite e absorve radiação de acordo com as leis do corpo negro. Na verdade, todos os corpos que estejam a uma temperatura absoluta diferente de zero emitem calor sob a forma de radiação. Entretanto, dependendo da temperatura e de outros fatores (por exemplo, geometria, cor e composição desse corpo) esta quantidade pode ser maior ou menor.

Entende-se como fluxo de calor por radiação, a troca global de calor entre um meio que emite radiação térmica e um corpo que absorve essa energia através de sua superfície. A Equação (4.6) descreve esse fluxo:

$$\varphi_r = \varepsilon_{res} \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (4.6)$$

Onde:

$\varphi_r$  – Fluxo de calor radiante ( $W/m^2$ );

$\varepsilon_{res}$  – Emissividade;

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzman de valor  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot C^4$ ;

$\theta_g$  – Temperatura dos gases ( $^{\circ}C$ );

$\theta_a$  – Temperatura na superfície do aço ( $^{\circ}C$ ).

A emissividade quantifica a energia emitida pela superfície de um corpo qualquer. Em geral, a emissividade de uma superfície depende do comprimento de onda da energia radiante, do ângulo de radiação e da temperatura da superfície. Por simplificação, se a emissividade for admitida não dependente desses fatores, a superfície radiante é chamada de superfície de corpo cinzento. A radiação de corpo cinzento é adotada nos cálculos de engenharia de segurança contra incêndio.

A emissividade para cada tipo de material pode variar entre  $0 \leq \varepsilon_{res} \leq 1$  e no caso em que o modelo simplificado de análise é utilizado,  $\varepsilon_{res} = 0,5$ . Apenas para temperaturas elevadas um objeto pode irradiar uma grande quantidade de calor, devido à baixa ordem de grandeza da constante.

Para se determinar o equilíbrio térmico entre os fluxos de calor emitido e absorvido, deve-se, então, calcular o fluxo absorvido pelo elemento estrutural. Como pode ser visto na Equação (4.7), a partir da fórmula da variação da quantidade de calor, obtém-se esse fluxo.

$$\Delta Q_{abs} = m_a c_a (\Delta \theta_a) \quad (4.7)$$

Onde:

$\Delta Q_{abs}$  – Quantidade de calor absorvida pelo elemento estrutural;

$m_a$  – Massa do aço aquecida;

$c_a$  – Calor específico do aço;

$\Delta\theta_a$  – Variação da temperatura experimentada pelo elemento do aço.

Em um incêndio, o calor é irradiado em todas as direções e o elemento estrutural que estiver em seu caminho o absorve, tendo sua temperatura elevada. Isso pode fazer com que este elemento atinja seu ponto de ignição.

Nesse trabalho, para o estudo numérico e análise da variação da temperatura nos elementos estruturais de aço, considerou-se os mecanismos de transferência de calor de condução e de convecção para o ar. Mas é importante lembrar que de elemento para elemento, estando eles distantes um do outro (não havendo contato), também existe a transferência de calor através da radiação. Entretanto, a não consideração da radiação gera diferenças de temperatura maiores entre as faces que emitem essa radiação, levando a uma situação mais conservadora. Sendo assim, optou-se por não considerar a radiação nesse estudo.

## **4.2 – EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA FÍSICA MATEMÁTICA**

As equações diferenciais são uma ferramenta matemática muito importante para as ciências físicas. A maior parte dos fenômenos físicos existentes na natureza pode ser deduzida através de formulações que envolvem equações diferenciais.

Essa seção apresenta uma rápida recapitulação de equações diferenciais relacionadas a fenômenos térmicos e seus referentes tipos de problemas, uma vez que a resolução de alguns fenômenos físicos pode se estender para problemas com equações análogas. Para o caso de problemas térmicos, a equação de Fourier é a equação diferencial que permite calcular a distribuição de temperatura em um corpo.

A transferência de calor e a maioria dos fenômenos físicos em regime estacionário são regidas pelas seguintes três equações diferenciais: equação harmônica de Poisson, equação bi-harmônica e equação de Helmholtz (Cesari, 1996 apud Campêlo, 2008, p. 42).

A equação harmônica de Poisson está apresentada na Equação (4.8) e, para  $Q = 0$ , ela se transforma na equação de Laplace.

$$\lambda \nabla^2 \phi(x, y, z) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.8)$$

Onde:

$\lambda$  – Condutividade térmica;

$\phi$  – Temperatura;

$Q$  – Geração de calor por unidade de volume.

A Equação (4.8) resolve as análises de trocas térmicas em sólidos e vários outros problemas físicos, como pode ser visto na Tabela 4.1 (Cesari, 1996 apud Campêlo, 2008, p. 43).

Tabela 4.1 – Problemas físicos relacionados a equações diferenciais harmônicas.

Problema	$\phi$	$\lambda$	$Q$
Condução térmica	Temperatura	Condutividade térmica	Geração de calor
Filtração	Pressão	Permeabilidade	Fonte de fluxo
Torção	Função de Airy	Inverso do módulo de cisalhamento	Momento torçor
Membrana	Deslocamento transversal	Tensão no bordo	Carga distribuída
Magnetostática	Potencial magnético	Relutância magnética	Densidade de corrente
Difusão de matéria	Concentração	Difusividade da matéria	-
Escoamento de fluidos ideais	Potencial de velocidade	Densidade	-

Quando  $\lambda$  depende das coordenadas espaciais  $x$ ,  $y$  e  $z$  (considerando  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ ), a Equação (4.8) se transforma na Equação (4.9), tornando-se uma equação quase harmônica.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.9)$$

A equação bi-harmônica é a base para a resolução de problemas estruturais e está apresentada na Equação (4.10)

$$\lambda \nabla^4 \phi(x, y, z) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.10)$$

A terceira e última equação é a de Helmholtz, que serve para se estudar os fenômenos que envolvem propagação de ondas e vibração. Essa expressão é apresentada na Equação (4.11).

$$\lambda \nabla^2 \phi(x, y, z) + \gamma \phi(x, y, z) = 0 \quad (4.11)$$

### 4.3 – PROBLEMA TÉRMICO

Sabe-se que, nos sólidos, a transmissão de calor ocorre através de condução pura, como já foi dito no item 4.1.1, e que a equação diferencial que calcula a distribuição de temperatura em um corpo é a equação do tipo harmônica (Equação 4.8). Se o meio for isotrópico e o problema for tridimensional, essa equação se transforma na Equação (4.12).

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.12)$$

Já para problemas bidimensionais, a Equação (4.12) assume a forma da Equação (4.13).

$$K \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + Q(x, y) = 0 \quad (4.13)$$

Onde:

K – Condutividade térmica para problemas bidimensionais (planos x e y).

As condições de contorno para o problema da Equação (4.13) estão representadas nas Equações (4.14) e (4.15) (Cesari, 1996 apud Campêlo, 2008, p. 45):



- Condição de contorno de acordo com Dirichlet (Butkov, 1983; Hildebrand, 1976), do tipo essencial e que significa a imposição de uma temperatura fixa igual  $\theta_0$  para os pontos de contorno  $S_0$ :

$$\theta = \theta_0 \quad \text{sobre o contorno } S_0 \quad (4.14)$$

- Condição de contorno do tipo natural conhecida como condição de Cauchy.

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = q_0 + H(\theta - \theta_\infty) \quad \text{sobre o contorno } S_1 + S_2 \quad (4.15)$$

Onde:

$K_n$  – Condutividade térmica na direção  $n$ ;

$n$  – Direção normal externa à superfície no ponto considerado;

$\partial\theta / \partial n$  – Gradiente de temperatura na direção normal;

$q_0$  – Fluxo de calor absorvido ou emanado pelo corpo;

$H$  – Coeficiente de troca térmica entre o corpo e o ambiente;

$\theta_\infty$  – Temperatura do ambiente.

Essas condições de contorno encontram-se representadas na Figura (4.2). O fluxo térmico  $q_0$  é positivo quando tem o sentido da normal externa à superfície, ou ainda se é normal às isotermas e orientado no sentido das temperaturas decrescentes. Quando  $\theta_0$ ,  $q_0$  e  $\theta_\infty$  são nulos, as condições de contorno são ditas homogêneas.

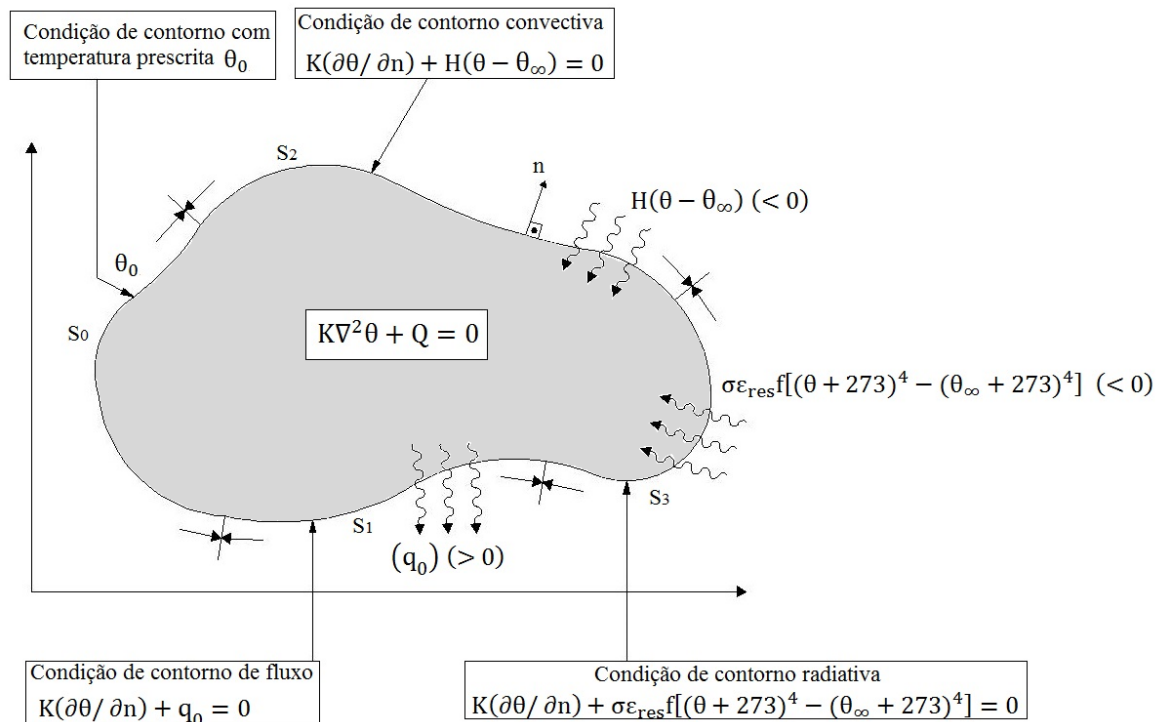


Figura 4.2 – Fluxo térmico.

Em problemas térmicos, frequentemente a condição de contorno referente à Equação (4.15) se divide em:

- Condição de Neumann ou Condição de Fluxo, do tipo natural, fornecendo o valor de fluxo térmico em um ponto do contorno  $S_1$ ;

$$-K_n \frac{\partial\theta}{\partial n} = q_0 \quad \text{sobre o contorno } S_1 \quad (4.16)$$

- Condição Mista, do tipo natural e convectiva, com a condição de que o fluxo de calor em um ponto do contorno  $S_2$  seja proporcional à diferença entre a temperatura  $\theta$  do ponto e  $\theta_\infty$  do ambiente ( $\theta - \theta_\infty$ ).

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = H(\theta - \theta_\infty) \quad \text{sobre o contorno } S_2 \quad (4.17)$$

Caso ocorra transmissão de calor por radiação, pode ser que exista também uma condição não-linear do tipo radioativo, conforme Equação (4.18) (Cesari, 1996 apud Campêlo, 2008, p. 46):

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = \sigma \varepsilon_{\text{res}} f [(\theta + 273)^4 - (\theta_\infty + 273)^4] \quad \text{sobre o contorno } S_3 \quad (4.18)$$

Onde:

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzman de valor  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$ ;

$\varepsilon_{\text{res}}$  – Emissividade;

$f$  – Fator geométrico;

$\theta$  – Temperatura da superfície radiante;

$\theta_\infty$  – Temperatura do ambiente.

#### 4.4 – TRANSMISSÃO DE CALOR TRANSIENTE EM SÓLIDOS

O tempo influencia a maioria dos fenômenos térmicos que se encontram na natureza e a modificação das propriedades dos materiais que estão submetidos a esses fenômenos. Este tipo de problema não se encontra mais em um regime estacionário, mas sim, em um regime transiente térmico (Campêlo, 2008).

Uma análise térmica transiente possibilita determinar as grandezas térmicas em função do tempo, como em problemas de tratamento térmico, mudanças de fase, estruturas em situação de incêndio, etc.

As análises térmicas estacionárias são as precursoras das análises térmicas transientes, sendo frequentemente utilizadas como condições iniciais do problema ou como passos temporais nas análises transientes. Nesse último caso, a diferença mais marcante é o fato de que as propriedades dos materiais e as cargas térmicas variam de acordo com o tempo.

Para regimes transientes térmicos em sólidos, a equação de Fourier pode ser escrita conforme a seguinte equação (Kaplan, 1981):

$$K\nabla^2\theta + Q = \mu \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (4.19)$$

Onde:

$\mu$  – Capacidade térmica específica;

$t$  – Tempo.

A capacidade térmica específica  $\mu$  é dada pelo produto da Equação (4.20):

$$\mu = \rho c \quad (4.20)$$

Onde:

$\rho$  – Massa específica;

$c$  – Calor específico.

#### **4.5 – ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO**

Para a obtenção da elevação de temperatura nos perfis estruturais de aço, envolvidos ou não por revestimento contra o fogo, pode-se recorrer a ensaios experimentais ou a modelos teóricos de análise. Esses modelos são definidos por meio de formulações físicas e matemáticas para o problema de transferência de calor. Eles consideram o equilíbrio térmico entre o calor proveniente do incêndio e o calor absorvido pelo perfil de aço, determinando assim, o acréscimo de temperatura (Silva e Vargas, 2005).

Os modelos que permitem obter a evolução da temperatura em perfis de aço são divididos em duas categorias:

- Modelos avançados de cálculo: Modelos que têm métodos numéricos como base (diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno, por exemplo). Eles permitem obter a evolução da temperatura no elemento de acordo com o aquecimento, mas através de computadores, diante da complexidade numérica em relação à resolução do problema;
- Modelos simplificados de cálculo: Modelos que têm equações analíticas como base. Eles permitem obter a evolução da temperatura no elemento, mas considerando a distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do comprimento.

No estudo de casos dessa dissertação, como modelo avançado de cálculo, foi utilizado o programa ANSYS (2007) para se fazer o estudo numérico, obtendo assim, a evolução da temperatura nos elementos de aço de acordo com os incêndios naturais escolhidos. No capítulo sete, serão explicados os princípios de aplicação desse programa computacional e todos os critérios e parâmetros, referentes a ele, adotados nesse trabalho.

Em relação aos modelos simplificados de cálculo, a NBR 14323:1999 apresenta equações simplificadas, que serão explicadas a seguir.

#### **4.5.1 – Modelo simplificado de cálculo: estrutura de aço sem proteção**

Segundo a NBR 14323:1999, para uma distribuição uniforme de temperatura, a elevação da temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  de um elemento estrutural de aço sem proteção térmica, situado no interior de um compartimento em chamas, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , pode ser determinada pela Equação (4.21).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(u/A)}{c_a(\theta_{a,t})\rho_a} \varphi\Delta t \quad (4.21)$$

Onde:

$(u/A)$  – Fator de massividade (sem proteção térmica), que será explicado no item 4.5.3;  
 $\Delta\theta_{a,t}$  – Variação da temperatura no elemento estrutural de aço, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (°C);  
 $c_a(\theta_{a,t})$  – Calor específico do aço em função da temperatura (J/kg°C);  
 $\rho_a$  – Massa específica do aço (kg/m<sup>3</sup>);  
 $\varphi$  – Fluxo de calor por unidade de área (W/m<sup>2</sup>);  
 $\Delta t$  – Intervalo de tempo (s).

O valor de  $\Delta t$  não pode ser tomado maior que  $25000 (u/A)^{-1}$ , no entanto, a NBR 14323:1999 recomenda que este valor não seja superior a 5 segundos.

O fluxo de calor  $\varphi$  é gerado pela diferença de temperatura entre as chamas do incêndio e os elementos estruturais, e é composto pelas parcelas de radiação e de convecção. Esse fluxo calorífico é definido através da Equação (4.22):

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (4.22)$$

Onde:

$\varphi_c$  – Componente referente ao fluxo de calor convectivo por unidade de área (W/m<sup>2</sup>);  
 $\varphi_r$  – Componente referente ao fluxo de calor radiante por unidade de área (W/m<sup>2</sup>).

Essas parcelas já foram definidas nas seções 4.1.2 (Convecção) e 4.1.3 (Radiação) com as Equações (4.3) e (4.6), respectivamente.

Para casos práticos, os seguintes parâmetros podem ser adotados da seguinte forma:

- $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ;
- $\varepsilon_{res} = 0,5$ ;
- $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\Delta t = 5 \text{ s}$ .

Expandindo a Equação (4.21), ela se torna:

$$\theta_{a,t}(t + \Delta t) - \theta_{a,t}(t) = \frac{(u/A)}{c_a(\theta_{a,t})\rho_a} \left\{ \alpha_c [\theta_g(t) - \theta_a(t)] + 5,67 \times 10^{-8} \epsilon_{res} \left( [\theta_g(t) + 273]^4 - [\theta_a(t) + 273]^4 \right) \right\} \Delta t \quad (4.23)$$

#### 4.5.2 – Modelo simplificado de cálculo: estrutura de aço com proteção

Para os casos de elementos estruturais de aço protegidos, a condutividade térmica também passa a ser um fator importante, uma vez que o calor que chega ao metal depende fundamentalmente da sua condução através do revestimento. Além disso, passam a ser considerados também o calor específico, a massa específica e a espessura do material de proteção contra incêndio.

Segundo a NBR 14323:1999, para uma distribuição uniforme de temperatura, a elevação da temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  de um elemento estrutural de aço com proteção térmica, situado no interior de um compartimento em chamas, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , pode ser determinada pela Equação (4.24).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(u_m/A)}{t_m c_a(\theta_{a,t})\rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \xi/3} \Delta t - (e^{\xi/10} - 1)\Delta\theta_{g,t} \quad (4.24)$$

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a(\theta_{a,t})\rho_a} t_m (u_m/A) \quad (4.25)$$

Onde:

- $(u_m/A)$  – Fator de massividade (com proteção térmica), que será explicado no item 4.5.3;
- $\Delta\theta_{a,t}$  – Variação da temperatura no elemento estrutural de aço, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (°C);
- $\Delta\theta_{g,t}$  – Variação da temperatura nos gases, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  (°C);
- $\lambda_m$  – Condutividade térmica do material de proteção contra incêndio (W/m°C);
- $t_m$  – Espessura do material de proteção contra incêndio (m);
- $c_m$  – Calor específico do material de proteção contra incêndio (J/kg°C);
- $\rho_m$  – Massa específica do material de proteção contra incêndio (kg/m<sup>3</sup>);

A variação da temperatura no elemento estrutural de aço  $\Delta\theta_{a,t}$  deve ser maior ou igual a zero ( $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ ). O valor de  $\Delta t$  não pode ser tomado maior que  $25000 (u_m/A)^{-1}$ , no entanto, a NBR 14323:1999 recomenda que este valor não seja superior a 30 segundos.

#### 4.5.3 – Fator de massividade

É necessário o conhecimento do fator de massividade da peça em estudo, pois o aumento da temperatura do elemento estrutural de aço é proporcional a esse fator, como foi mostrado anteriormente nas equações do método simplificado recomendado pela NBR 14323:1999.

Para os elementos estruturais sem proteção contra o fogo, o fator de massividade é considerado igual a:

$$\text{Fator de massividade (sem proteção)} = \frac{u}{A} \quad (4.26)$$

Onde:

$u$  – Perímetro da seção transversal do elemento exposto ao incêndio;

$A$  – Área da seção transversal do elemento estrutural de aço.

Para os elementos estruturais com proteção contra o fogo, o fator de massividade passa a ser considerado igual a:

$$\text{Fator de massividade (com proteção)} = \frac{u_m}{A} \quad (4.27)$$

Onde:

$u_m$  – Perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio;

$A$  – Área da seção transversal do elemento estrutural de aço.



Percebe-se que entre elementos com mesma área, aquele que possuir a menor superfície exposta ao incêndio, terá seu aquecimento de forma mais lenta em relação aos outros elementos. E para os elementos com a mesma superfície exposta ao incêndio, aquele que possuir maior massa, terá seu aquecimento de forma mais lenta também.

A NBR 14323:1999 apresenta algumas seções de perfis estruturais empregados na construção civil, sem e com isolante térmico, como pode ser visto na Figura 4.3 e 4.4, respectivamente.

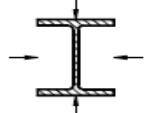
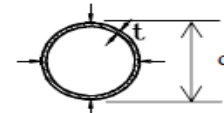
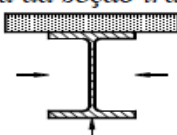
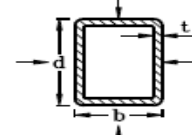
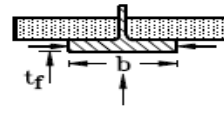
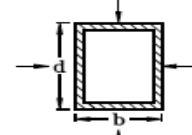
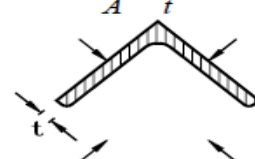
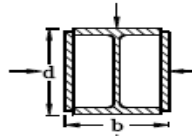
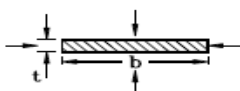
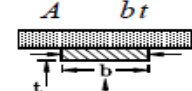
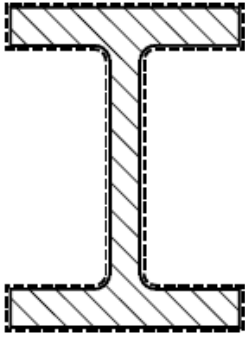
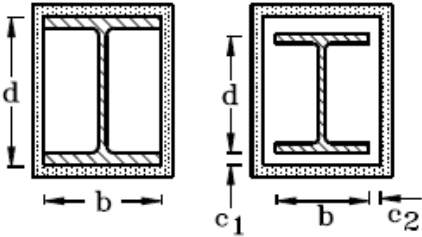
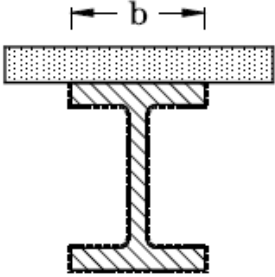
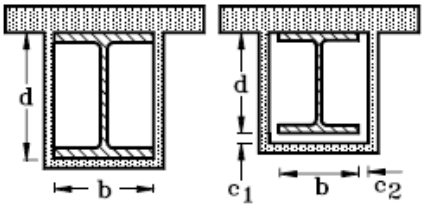
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p>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

Figura 4.3 – Fator de massividade – Elementos estruturais sem proteção (NBR 14323:1999).

Situação	Descrição	Fator de massividade ( $u_m/A$ )
	Proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa <sup>1</sup> de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b + d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da peça aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa <sup>1</sup> de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d + b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

<sup>1</sup> Para  $c_1$  e  $c_2$  superior a  $d/4$ , deve-se utilizar bibliografia especializada

Figura 4.4 – Fator de massividade – Elementos estruturais com proteção (NBR 14323:1999).

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 são apresentados os fatores de massividade referentes aos perfis utilizados nos casos de estudo dessa dissertação, sem e com proteção térmica, respectivamente. A NBR 14323:1999 recomenda, para efeito de cálculo, que o fator de massividade não seja inferior a  $10 \text{ m}^{-1}$ .

Tabela 4.2 – Fator de massividade dos perfis utilizados sem proteção térmica.

Perfis sem proteção contra incêndio					
Propriedades Geométricas		CVS 300x85	VS 400x68	VS 550x88	CVS 600x210
Altura total	h (mm)	300	400	550	600
Largura da mesa	bf (mm)	200	200	250	400
Espessura da mesa	tf (mm)	19,0	16,0	16,0	22,4
Espessura da alma	tw (mm)	12,5	6,3	6,3	16,0
Perímetro exposto ao incêndio	u (m)	1,175	1,387	1,837	2,368
Área da seção transversal do aço	A (cm <sup>2</sup> )	109,0	87,2	113,0	268,0
Massa	m (kg/m)	85,4	68,4	88,4	210,0
<b>Fator de massividade</b>	<b>u/A (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>107,8</b>	<b>159,1</b>	<b>162,6</b>	<b>88,3</b>

Tabela 4.3 – Fator de massividade dos perfis utilizados com proteção térmica.

Perfis com proteção contra incêndio					
Propriedades Geométricas		CVS 300x85	VS 400x68	VS 550x88	CVS 600x210
Altura total	h (mm)	300	400	550	600
Largura da mesa	bf (mm)	200	200	250	400
Espessura da mesa	tf (mm)	19,0	16,0	16,0	22,4
Espessura da alma	tw (mm)	12,5	6,3	0,3	16,0
Perímetro efetivo do revestimento	u <sub>m</sub> (m)	0,8	1,0	1,35	1,6
Área da seção transversal do aço	A (cm <sup>2</sup> )	109,0	87,2	113,0	268,0
Massa	m (kg/m)	85,4	68,4	88,4	210,0
<b>Fator de massividade</b>	<b>u<sub>m</sub>/A (m<sup>-1</sup>)</b>	<b>73,4</b>	<b>114,7</b>	<b>119,5</b>	<b>59,7</b>

#### 4.5.4 – Modelo simplificado de cálculo: aplicações

Com o intuito de se fazer um estudo das Equações (4.21) e (4.24), analisando a influência dos fatores de massividade nas mesmas, foram feitas comparações utilizando os casos de estudo desse trabalho.

No capítulo oito serão apresentadas aplicações numéricas e analíticas referentes a oito casos de estudo, sendo que quatro deles consideram perfis de aço sem proteção contra incêndio, e os outros quatro restantes consideram os mesmos casos iniciais, mas agora com proteção térmica. São quatro tipos de perfis I de aço (com e sem isolante térmico) submetidos a diferentes incêndios, sendo estes divididos em três tipos de incêndios. As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os perfis de aço utilizados nesta dissertação.

Foram então feitas comparações relativas à temperatura do elemento estrutural de aço para diferentes fatores de massividade e à temperatura dos diferentes tipos de incêndio natural. Para isso, foram adotadas as seguintes considerações:

- Para quatro casos, os perfis estão totalmente imersos ao fogo, com exceção apenas da face superior da mesa superior, que é sobreposta por um material refratário (uma laje, por exemplo);
- Para os outros quatro casos, além da mesa superior ser sobreposta por um material refratário, os perfis estão protegidos por um revestimento tipo caixa de proteção contra incêndio;
- A temperatura ambiente é considerada como  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- O valor de  $b$  é constante e igual a  $b = 1160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{C}$  para todos os casos;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção é igual  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{C}$ ;
- A emissividade é igual a  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,5$ ;
- O isolante adotado é o concreto leve com vermiculita;
- A condutividade térmica do material isolante é  $\lambda_m = 0,17 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ;
- O calor específico do isolante é  $c_m = 920 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ;
- A massa específica do isolante é  $\rho_m = 500 \text{ kg/m}^3$ ;
- A espessura do isolante é  $t_m = 3 \text{ cm}$ ;

- Para a obtenção da temperatura no elemento estrutural, é adotado um intervalo para cada passo de tempo de 5 segundos.

Com essas considerações e adotando-se os perfis e incêndios já mencionados, a partir das equações (4.21) e (4.24), foram obtidos os gráficos de temperatura x tempo que estão apresentados nas Figuras 4.5 a 4.10.

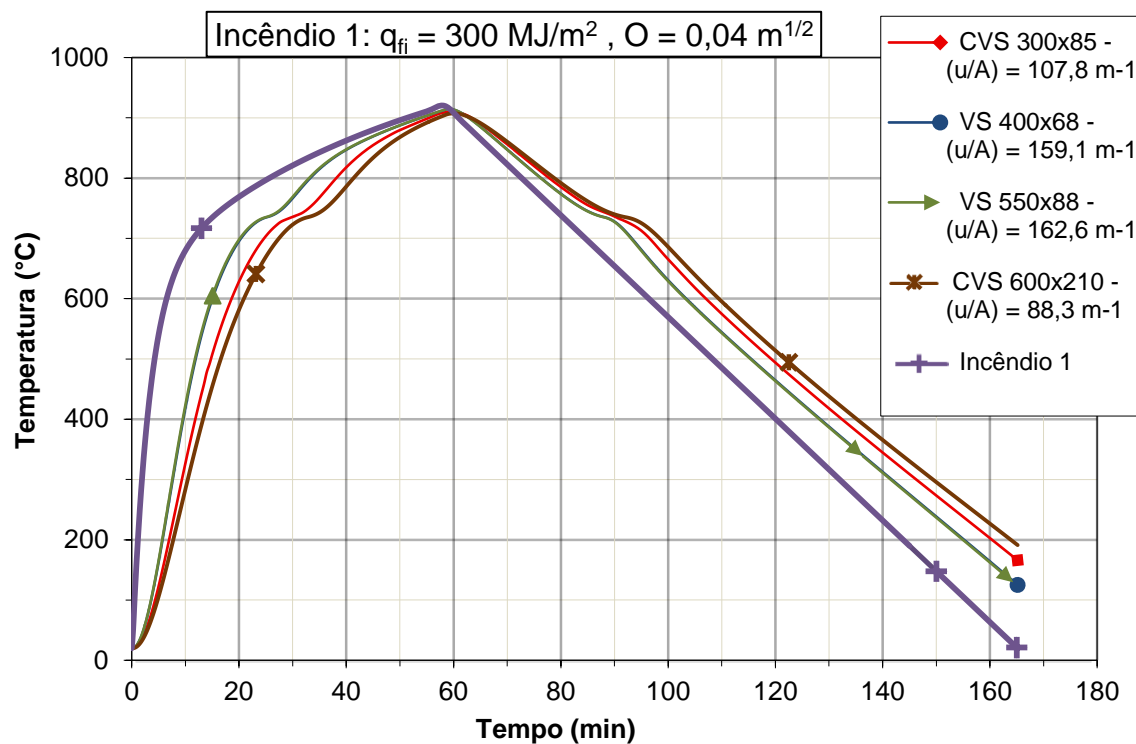


Figura 4.5 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 1.

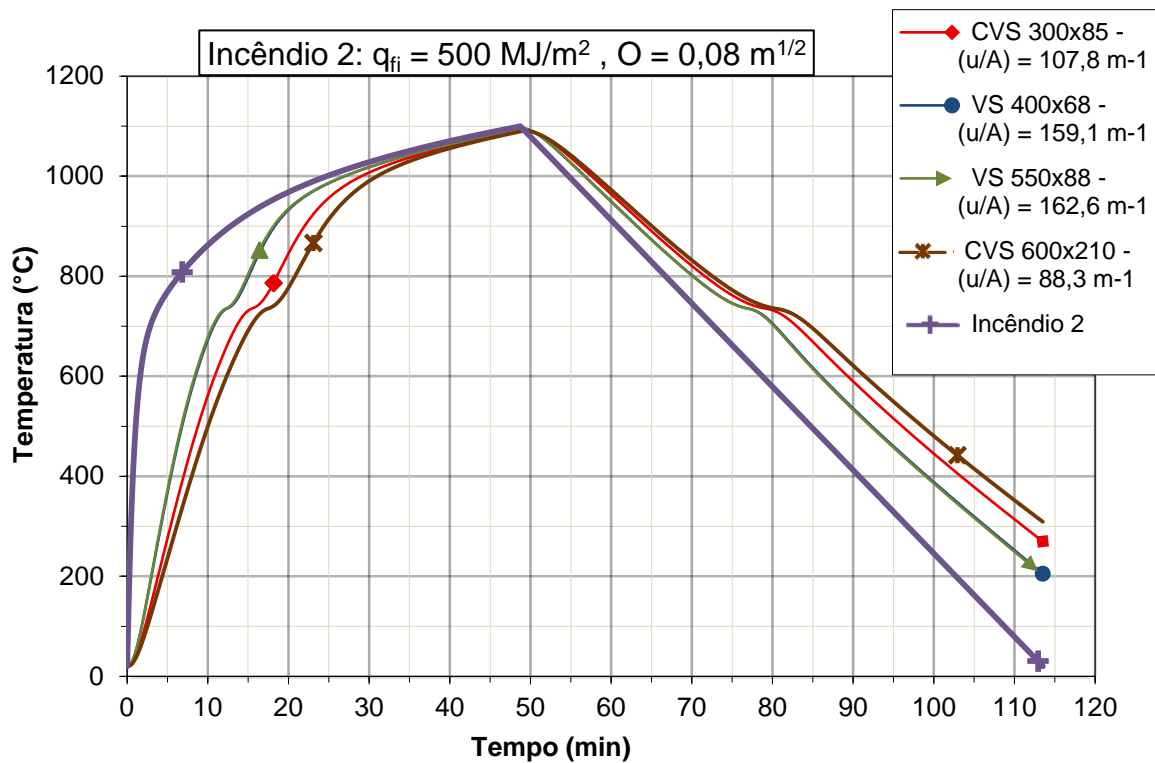


Figura 4.6 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 2.

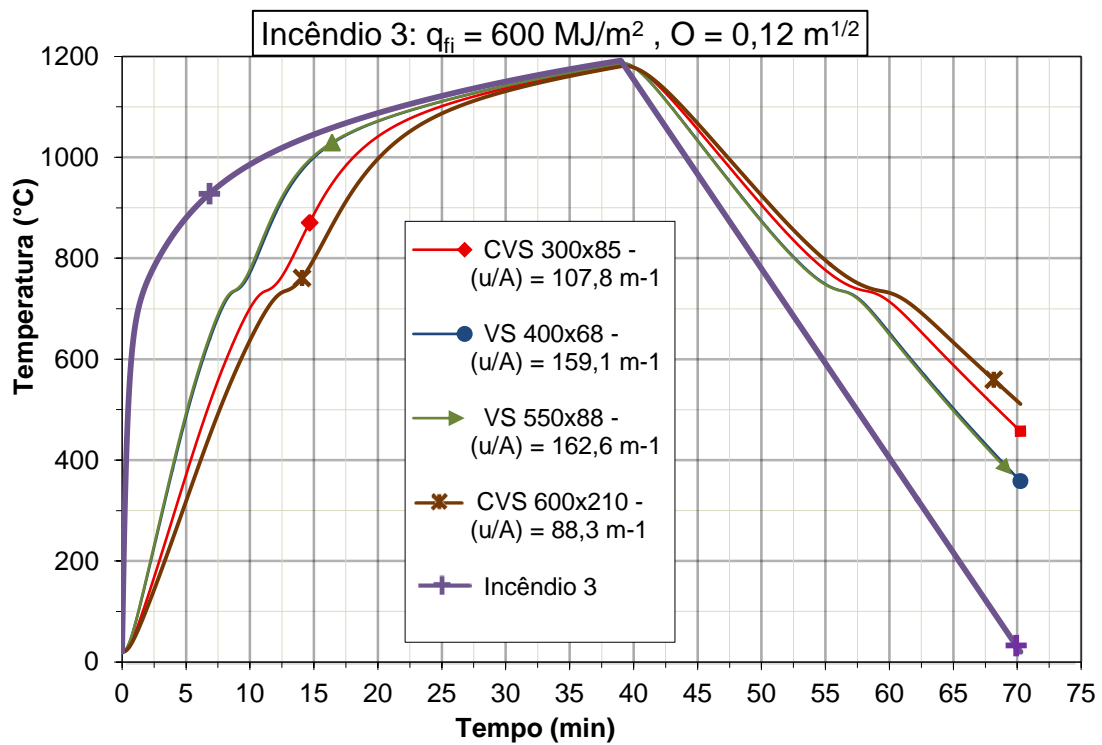


Figura 4.7 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço sem revestimento - Incêndio 3.

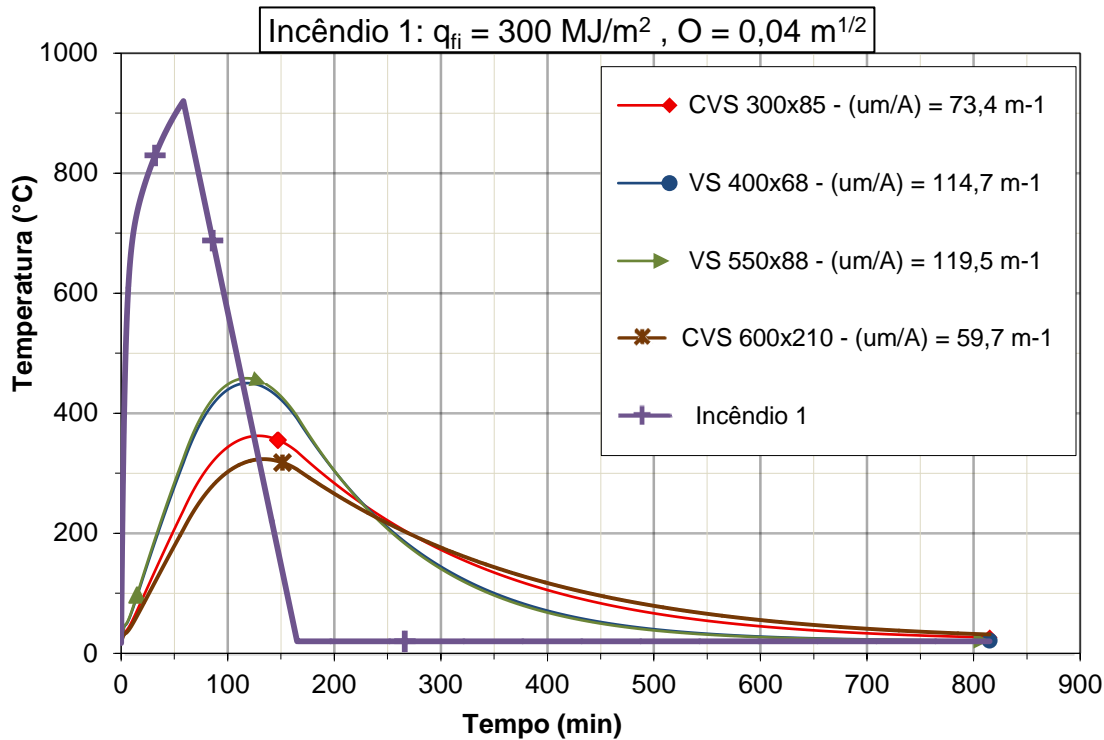


Figura 4.8 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 1.

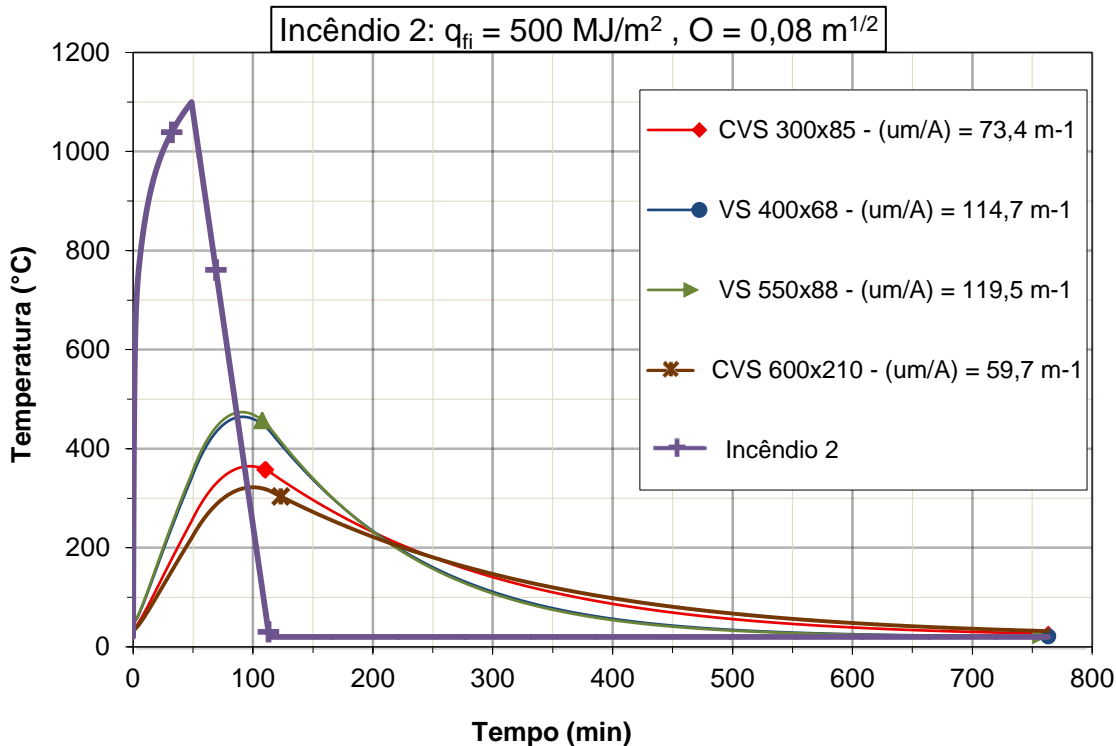


Figura 4.9 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 2.

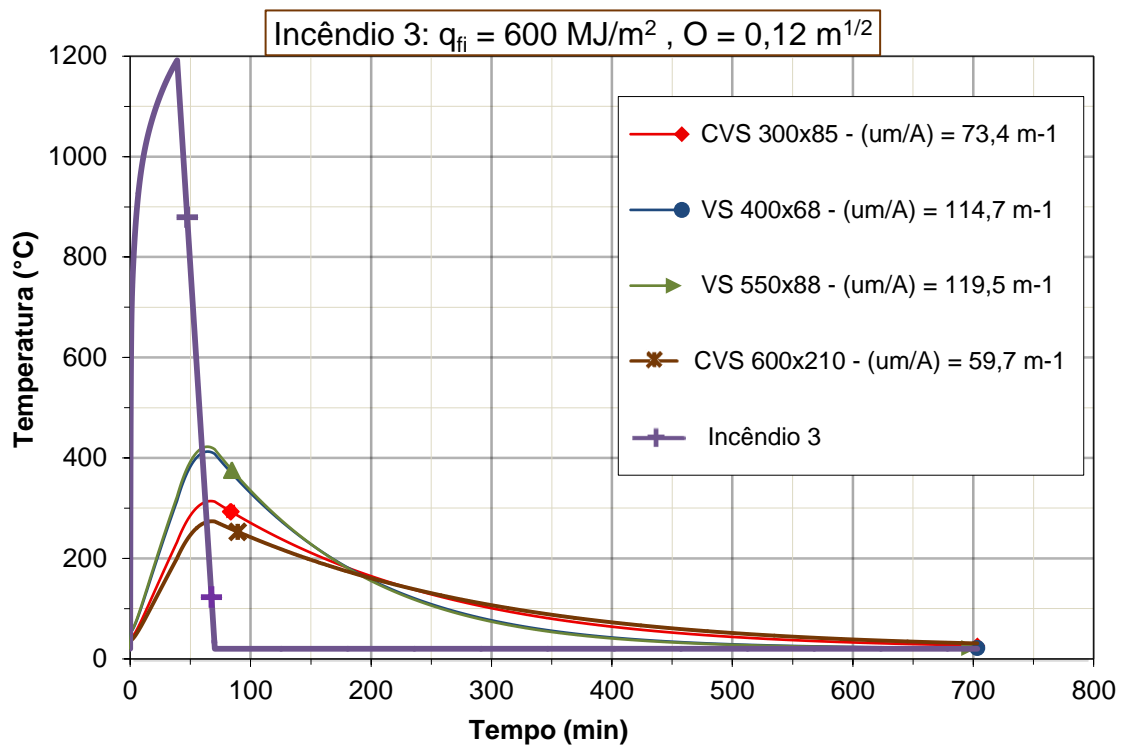


Figura 4.10 – Influência do fator de massividade na temperatura do aço com revestimento - Incêndio 3.

Analisando as figuras anteriores, percebe-se que, em um incêndio, quanto maior for o fator de massividade do perfil, maior será a temperatura alcançada pelo elemento estrutural e em um menor período de tempo. Além disso, essas temperaturas caem mais rapidamente na fase de resfriamento do incêndio. Essas diferenças são notadas com maior clareza nos gráficos referentes aos perfis sem revestimentos, uma vez que a variação térmica nesses elementos estruturais é maior. Isso ocorre, porque o isolante térmico, como o nome já diz, isola e protege o perfil das chamas do incêndio, fazendo com que o elemento estrutural sofra um aquecimento menor.

Os perfis VS 400 x 68 e VS 550 x 88 têm seus fatores de massividade tão próximos (nos casos com e sem revestimento) que é praticamente imperceptível a diferença entre eles nos gráficos anteriores.



## **5 – FORMULAÇÃO ANALÍTICA DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

### **5.1 – INTRODUÇÃO**

Como já foi dito no início desse trabalho, o estudo sobre estruturas em situação de incêndio não tem recebido a devida atenção por parte da comunidade científica. Existem poucas pesquisas, para esse tipo de problema, que investigam soluções de cunho analítico. Se essa é uma questão que já não tem despertado muito interesse ao longo dos anos, atualmente, esse problema se intensifica devido ao habitual uso de métodos numéricos computacionais. Mesmo para problemas de fácil solução, muitas vezes são utilizados esses métodos numéricos computacionais, ao invés de soluções analíticas.

Dentre muitos problemas referentes à engenharia de incêndio, alguns são representados por situações em que uma viga “I” de perfil metálico está submetida a um incêndio. E sabe-se que uma viga de aço nessas condições exige uma verificação da instabilidade lateral, sendo que o ideal é se buscar soluções mais próximas da realidade. Considerar a influência da diferença de temperatura na seção transversal na viga (entre os flanges superior e inferior), para obtenção das soluções, é uma forma de se ter essa resposta mais próxima da realidade. Frequentemente a verificação da instabilidade lateral de vigas submetidas a uma situação de incêndio é feita sem que se considere essa influência da diferença de temperatura. A NBR 14323:1999 considera essa diferença de temperatura apenas através de fatores de correção.

O comportamento do módulo de elasticidade do aço  $E$  nos flanges, durante uma situação de incêndio natural, ocorre de modos diferentes, já que estes flanges não recebem o aquecimento de forma igual. Para o caso de estudo desse trabalho, o flange superior possui um material refratário sobreposto, o que impede que esse flange receba o aquecimento da mesma forma que o flange inferior recebe. Além disso, essa mesa inferior também terá um sombreamento que a mesa inferior não terá. Como o flange inferior está mais exposto às chamas do incêndio, este será mais aquecido que o flange superior, que está mais isolado. Como o módulo de elasticidade  $E$  é uma propriedade que varia de acordo com o aumento da temperatura (ver Figura 2.8), a seção transversal dessa viga não terá um  $E$  constante.

Existirá, então, um  $E$  maior para o flange superior e um  $E$  menor para o flange inferior, como pode ser visto na Figura 5.1, segundo Nunes (2005).

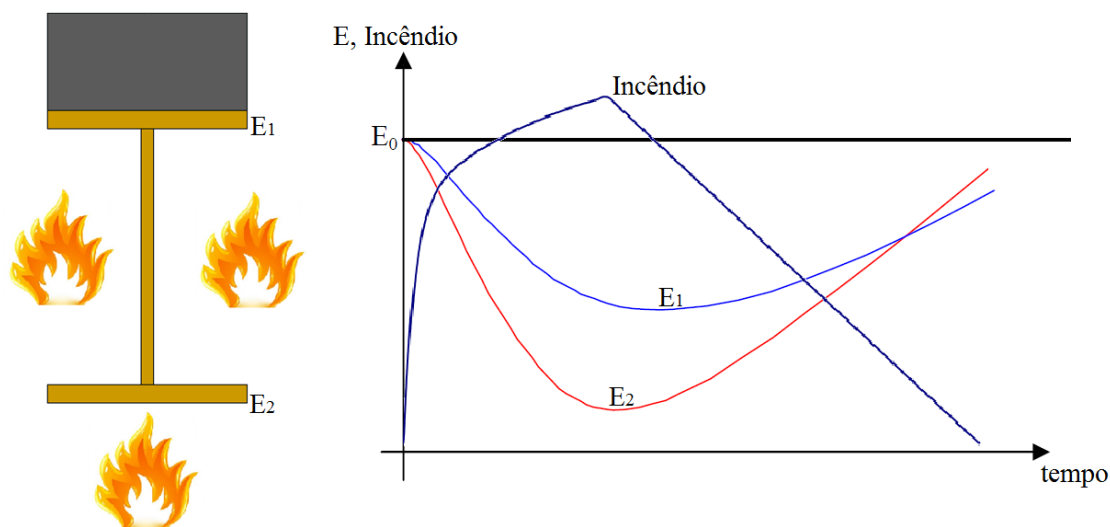


Figura 5.1 – Gráfico qualitativo referente ao comportamento do módulo de elasticidade devido o aquecimento desigual dos flanges durante um incêndio.

Onde:

$E_0$  – Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente (MPa);

$E_1$  – Módulo de elasticidade do aço da mesa 1 – flange superior (MPa);

$E_2$  – Módulo de elasticidade do aço da mesa 2 – flange inferior (MPa).

No Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da universidade de Brasília (UnB), outros trabalhos já foram desenvolvidos nessa área de conhecimento. Em 2005, Nunes (2005) desenvolveu sua tese de doutorado fazendo uma abordagem numérica e analítica para determinar o momento fletor crítico em vigas I de aço em situação de incêndio. No seu estudo, ele considerava uma viga biapoiada submetida à flexão pura e desenvolveu uma formulação analítica para obter o momento crítico. Já em 2008, Campêlo (2008) desenvolveu sua dissertação de mestrado fazendo um estudo numérico e analítico para determinar a carga crítica em vigas I de aço em situação de incêndio. Ela considerou uma viga biapoiada submetida a uma carga concentrada no meio do vão e desenvolveu uma formulação analítica para obter a carga crítica.

Este trabalho é mais um a ser realizado na UnB, dando prosseguimento a essa linha de pesquisa. Um dos objetivos dessa dissertação também é desenvolver uma formulação analítica, mas para a determinação da instabilidade lateral de vigas I de aço com carga uniformemente distribuída em situação de incêndio. Esse estudo também considera essas vigas com e sem proteção contra incêndio (caixa de concreto leve), percebendo a influência que esses revestimentos proporcionam na resposta final da carga crítica. Além disso, considera-se que a instabilidade da viga esteja em regime elástico, tendendo o perfil a se flexionar lateralmente em relação ao eixo de menor inércia. Ao final da formulação analítica, obtém-se a carga crítica  $q_{cr}$  que causa a flambagem lateral com flexo-torção da viga.

Na Figura 5.2 estão ilustrados os casos típicos de estudo dessa dissertação. São vigas I de perfil metálico sobrepostas por material refratário em situação de incêndio. Essas vigas são consideradas com e sem revestimento térmico e submetidas a uma carga uniformemente distribuída.

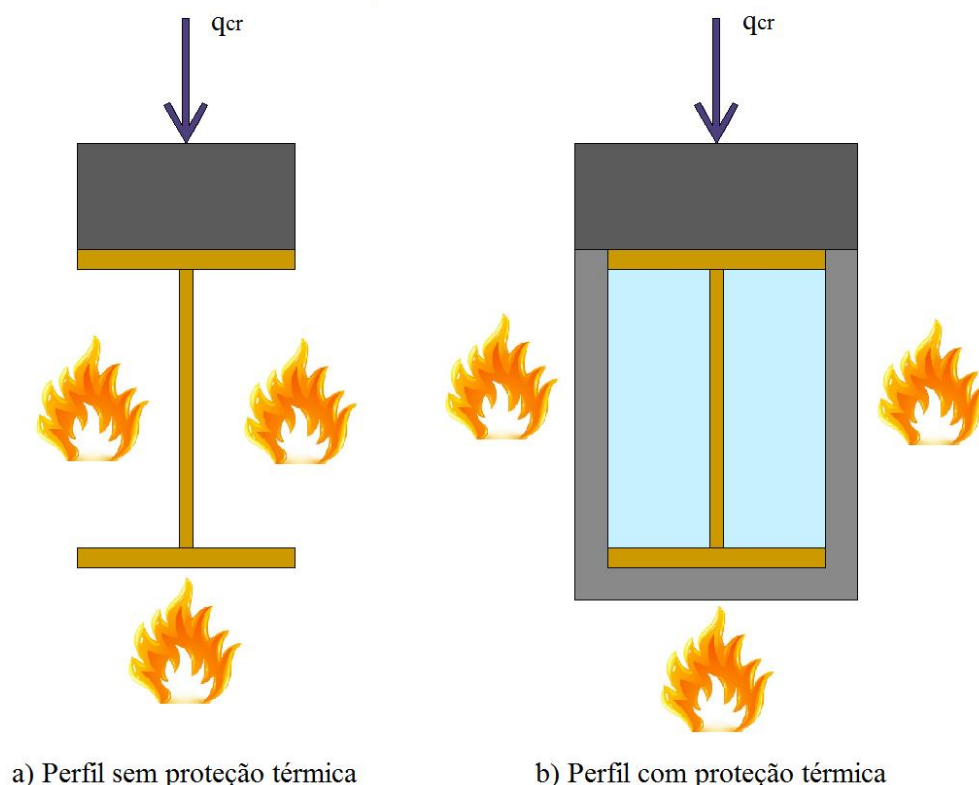


Figura 5.2 – Seção transversal das vigas I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetidas à situação de incêndio.

São consideradas as seguintes condições de contorno para a viga isolada:

- Nos apoios, não é possível ocorrer deflexão lateral, pois a fixação não permite;
- Nos apoios, não é possível ocorrer rotação no sentido do eixo da viga, pois a fixação não permite;
- Nos apoios, não ocorre empenamento da seção transversal durante a deformação da viga.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram uma forma geral dos casos estudados em perspectiva.

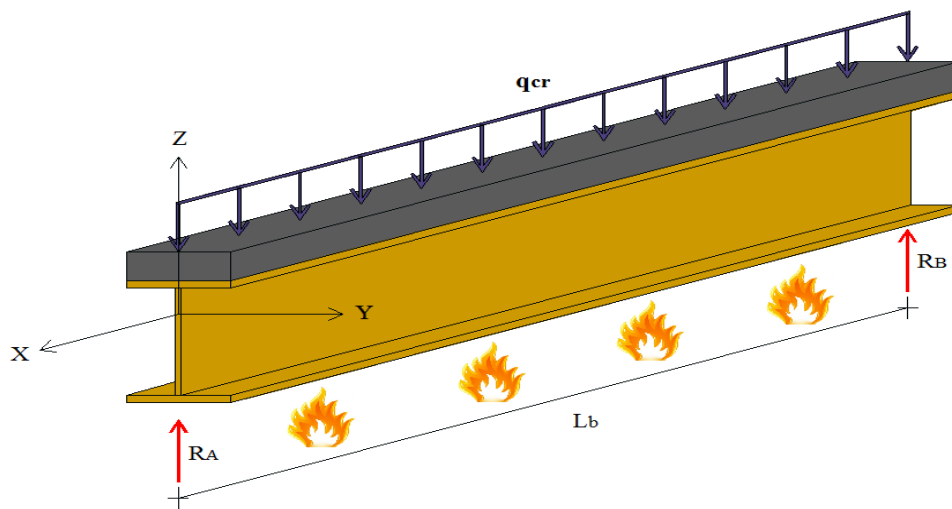


Figura 5.3 – Viga I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetida à situação de incêndio – Perfil sem revestimento.

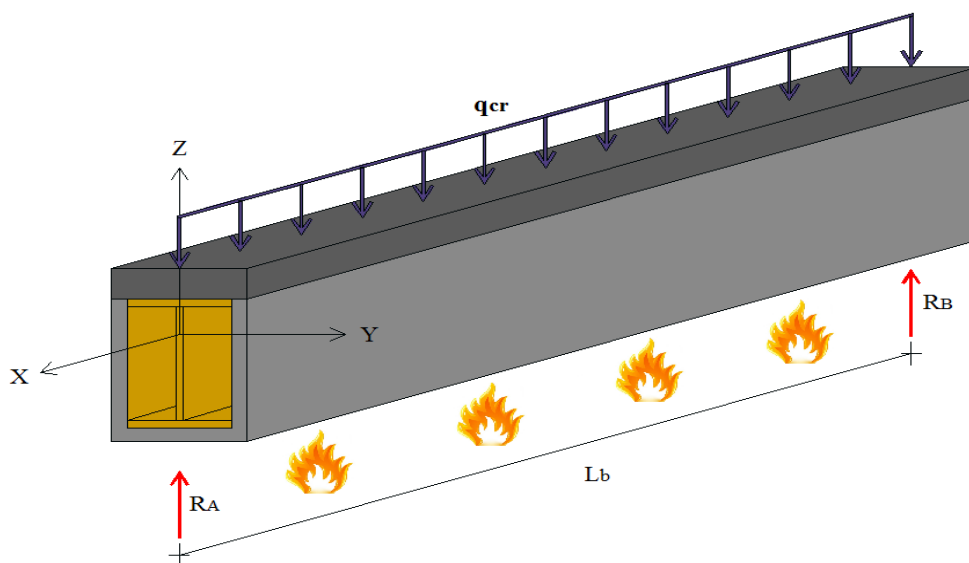


Figura 5.4 – Viga I em perfil metálico, com carga uniformemente distribuída, submetida à situação de incêndio – Perfil com revestimento.

Onde:

$q_{cr}$  – Carga crítica uniformemente distribuída;

$R_A$  – Reação na extremidade A;

$R_B$  – Reação na extremidade B;

$L_b$  – Comprimento da viga sem travamento lateral;

X – Eixo x global;

Y – Eixo y global;

Z – Eixo z global.

Não sendo trivial a determinação da carga crítica (devido a uma carga uniformemente distribuída) que gera flambagem lateral com flexo-torção, neste capítulo apresenta-se, então, uma formulação analítica com solução fechada para esse caso em situação de incêndio. Nessa formulação foi considerada a diferença de temperatura entre as mesas superior e inferior do perfil. A distribuição de temperatura na seção transversal dos perfis foi obtida através das modelagens feitas no programa computacional ANSYS (2007).

A formulação analítica proposta nesse trabalho foi desenvolvida baseada no método da energia.

## **5.2 – DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA, PELO MÉTODO DA ENERGIA, PARA VIGAS DE AÇO COM CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA**

Quando uma viga com carga uniformemente distribuída está em situação de incêndio, ela pode sofrer uma instabilidade elástica denominada Flambagem Lateral com Flexo-Torção (FLT). A formulação analítica proposta nesse trabalho tem por objetivo determinar a carga crítica que pode gerar essa FLT.

O método utilizado para desenvolver essa formulação, foi o método da energia, onde a energia interna deve ser igual ao trabalho externo. Ou seja, o valor da carga crítica  $q_{cr}$ , que gera a FLT, é determinado a partir da condição de que o trabalho efetuado pela carga externa seja igual à energia de deformação acumulada no interior da viga elástica.

Quando uma viga sofre instabilidade lateral (FLT), a energia de deformação da mesma cresce, pois há flexão na direção lateral (flexão em torno do eixo  $z$  local) e torção em torno do eixo  $x$  local.

Apesar de os perfis escolhidos, para os casos de estudo dessa dissertação, terem seus flanges superior e inferior idênticos geometricamente, eles poderiam apresentar diferenças de largura e espessura. Quando os flanges possuem diferenças de material, geometria e/ou rigidez, o centróide da seção transversal da viga não coincide com o centro de flexão da mesma. O centróide e o centro de flexão só coincidem quando o perfil é totalmente simétrico (material, geometria e rigidez) em relação aos dois eixos passando pela seção transversal do perfil (nesse estudo, eixos  $Y$  e  $Z$ ). Nos casos aqui estudados, em situação de incêndio, os perfis possuem seus flanges com mesmo material, mesma geometria, mas suas rigidezes podem variar devido ao aquecimento desigual dos mesmos. Sendo assim, o centro de flexão ficará posicionado entre o centróide da seção transversal e a mesa que possuir maior rigidez (mesa superior). Como, nesse estudo, o incêndio é o único fator que interfere no deslocamento do centro de flexão, no início e no fim desse incêndio o centro de flexão estará na mesma posição do centróide. Essas posições são apresentadas na Figura 5.5:

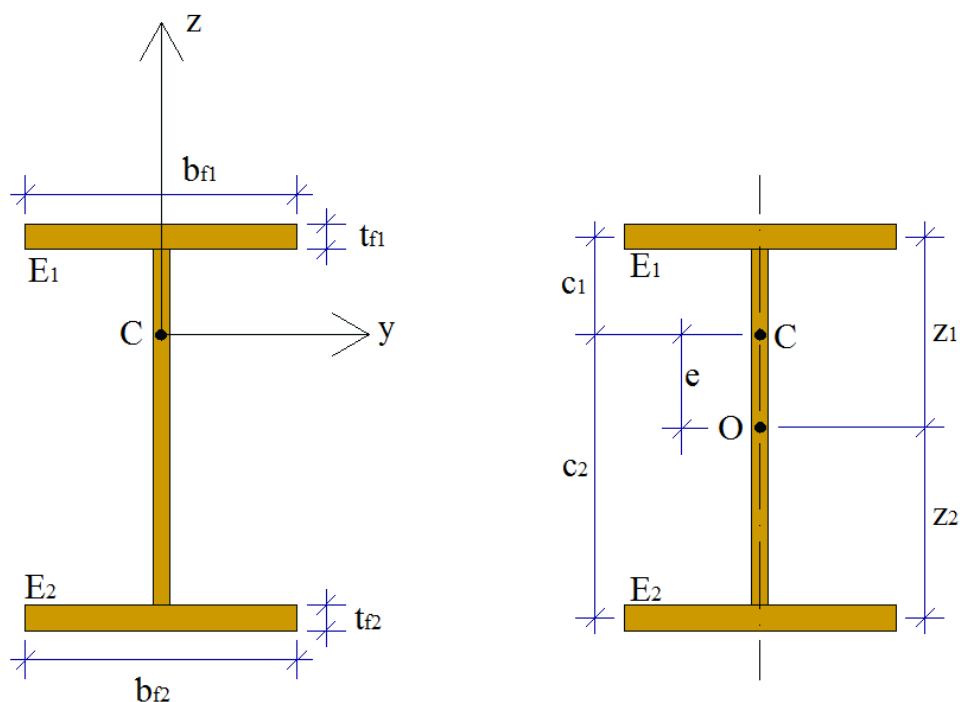


Figura 5.5 – Centro de flexão e centróide da seção transversal da viga I.

Onde:

$b_{f1}$  – Largura da mesa superior;

$b_{f2}$  – Largura da mesa inferior;

$t_{f1}$  – Espessura da mesa superior;

$t_{f2}$  – Espessura da mesa inferior;

$E_1$  – Módulo de elasticidade do aço da mesa superior;

$E_2$  – Módulo de elasticidade do aço da mesa inferior;

$C$  – Centro de flexão (ou centro de cisalhamento) da seção transversal da viga;

$O$  – Centro geométrico (centróide) da seção transversal da viga;

$c_1$  – Distância do meio da mesa superior ao centro de flexão  $C$ ;

$c_2$  – Distância do meio da mesa inferior ao centro de flexão  $C$ ;

$z_1$  – Distância do meio da mesa superior ao centróide  $O$ ;

$z_2$  – Distância do meio da mesa inferior ao centróide  $O$ ;

$e$  – Excentricidade (distância do centro de flexão  $C$  ao centróide  $O$ ).

Como já foi dito, nos casos de estudo dessa dissertação, as mesas superior e inferior de uma mesma viga têm dimensões idênticas. Mas se elas tivessem suas geometrias diferentes, ainda assim, poderiam ter o centróide da seção transversal da viga bem próximo do centróide da alma, bastando apenas que as mesas tivessem áreas iguais.

Em relação à excentricidade entre o centro de flexão  $C$  e o centróide  $O$ , quando a mesa que estiver sofrendo compressão for a de maior área (e/ou maior rigidez), a excentricidade terá valor positivo ( $e > 0$ ). Se a mesa que estiver sendo comprimida for a de menor área (e/ou menor rigidez), então a excentricidade será negativa ( $e < 0$ ).

Tendo em vista que a espessura da alma elevada ao cubo é um valor insignificante, considera-se que a sua contribuição para a flexão lateral da viga é desprezível. Pode-se, então, dizer que o momento de inércia em relação ao eixo  $z$  local (eixo de menor inércia) é dado pela soma das contribuições das mesas 1 (mesa superior) e 2 (mesa inferior). As Equações (5.1) e (5.2) mostram o momento de inércia de cada mesa.

$$I_1 = \frac{t_{f1} b_{f1}^3}{12} \quad (5.1)$$

$$I_2 = \frac{t_{f2} b_{f2}^3}{12} \quad (5.2)$$

Onde:

$I_1$  – Momento de inércia, em relação ao eixo z local, referente à mesa superior;

$I_2$  – Momento de inércia, em relação ao eixo z local, referente à mesa inferior.

Segundo Roark e Young (1975) e Duncan (1953), as posições do centro de flexão C e do centróide O são achadas através das Equações (5.3) a (5.6).

$$c_1 = \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \quad (5.3)$$

$$c_2 = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \quad (5.4)$$

$$z_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} h \quad (5.5)$$

$$z_2 = \frac{A_1}{A_1 + A_2} h \quad (5.6)$$

Onde:

$h$  – Distância do meio da mesa superior ao meio da mesa inferior ( $h = c_1 + c_2 = z_1 + z_2$ );

$A_1$  – Área da mesa 1 (mesa superior);

$A_2$  – Área da mesa 2 (mesa inferior).

O termo  $E_1 I_1 + E_2 I_2$  aparece não só nas expressões de  $c_1$  e  $c_2$ , mas também irá aparecer com frequência no desenvolvimento da formulação analítica. Para facilitar a apresentação



dos cálculos, considera-se uma rigidez equivalente total do perfil, em relação ao eixo z local, que está expressa na Equação (5.7):

$$E_{eq}I_{eq} = E_1I_1 + E_2I_2 = (EI)_{total} \quad (5.7)$$

### 5.2.1 – Determinação da energia interna de deflexão e de torção da viga

Na determinação da energia interna de deflexão com torção da viga é necessário analisar o momento de flexão em torno do eixo z local:

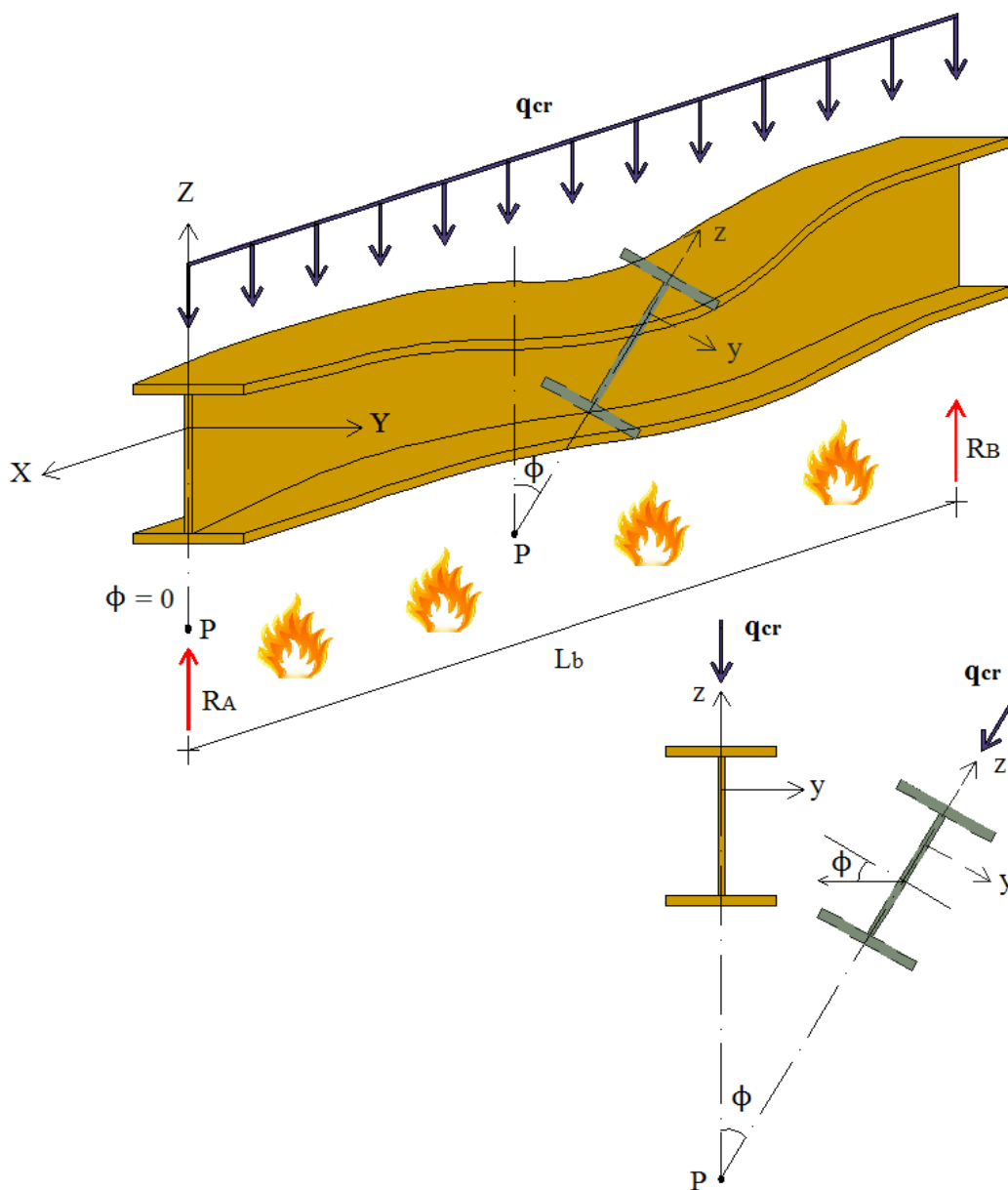


Figura 5.6 – Viga I sob flambagem lateral com torção (FLT) e vista da seção transversal deformada.

Como já mencionado, a fixação nos apoios não permite gerar rotação no sentido do eixo da viga, sendo, portanto,  $\phi = 0$ . O deslocamento lateral (no sentido do eixo global Y) também está impedido nos apoios. Já no comprimento destravado se verifica a existência de deslocamentos da mesa superior, do centro de flexão e da mesa inferior, como pode ser visto na Figura 5.6. Na Figura 5.7 estão ilustrados esses deslocamentos, mostrando que os deslocamentos das mesas ocorrem em função da rotação do ângulo  $\phi$  e do deslocamento lateral do centro de flexão  $y$ :

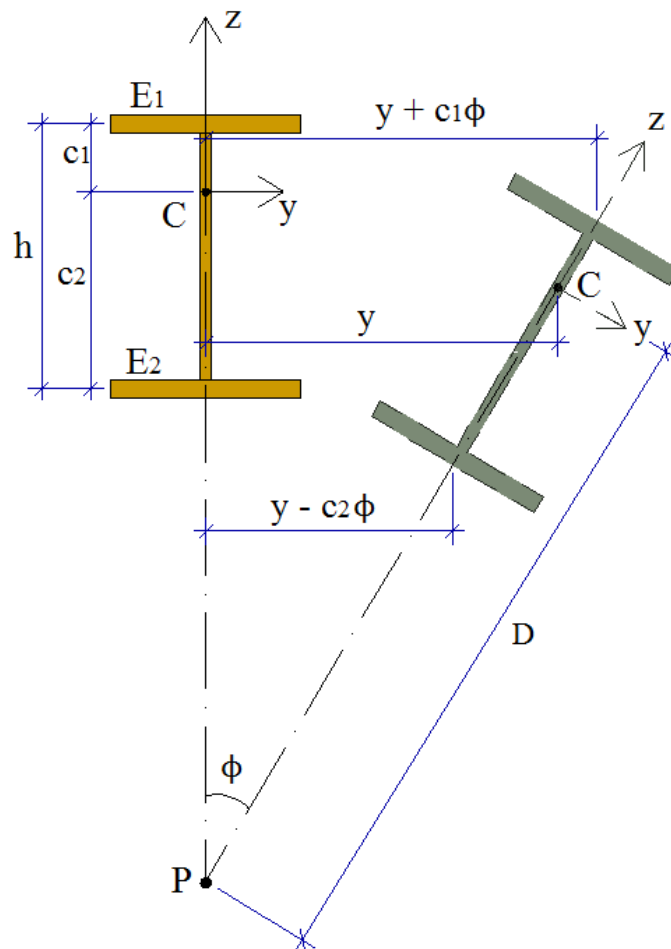


Figura 5.7 – Rotação da seção transversal da viga I após a FLT.

Nas Figura 5.7, observa-se que o centro de rotação (ponto P) está situado a uma distância D fixa do centro de flexão C. Logo, o deslocamento  $y$  do centro de flexão C, após a flambagem lateral com flexo-torção, pode ser admitido como tendo a seguinte forma senoidal:

$$y = D \text{ sen } \phi \quad (5.8)$$

O ângulo  $\phi$  está ilustrado de uma forma exagerada nas figuras anteriores para uma melhor visualização da flambagem lateral da viga, mas sabe-se que essa rotação é muito pequena na prática. Considerando, então, o ângulo  $\phi$  muito pequeno, tem-se:

$$\text{sen } \phi \cong \phi \quad (5.9)$$

Consequentemente a Equação (5.8) se transforma na seguinte equação:

$$y = D\phi \quad (5.10)$$

Também é observado, na Figura 5.7, que a deflexão do centro da mesa superior é indicado pela distância  $y + c_1\phi$ , que a deflexão do centro da mesa inferior é indicado pela distância  $y - c_2\phi$  e que a deflexão do centro de flexão C se dá pela distância  $y$ .

Conforme a indicação de Timoshenko e Gere (1961) e Winter (1941), os deslocamentos laterais da viga em FLT seguem aproximadamente uma curva senoidal:

$$y = A \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (5.11)$$

Igualando as Equações (5.10) e (5.11), chega-se à seguinte expressão:

$$y = D\phi = A \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \Rightarrow \phi = \left(\frac{A}{D}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (5.12)$$

Para simplificar a expressão anterior, considera-se que  $a = A/D$ :

$$\phi = a \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (5.13)$$

Na realidade, a deformada não é exatamente senoidal, pois se considera que a distância  $D$  é constante e isso gera um erro de aproximação. Mas, segundo Winter (1941), essa aproximação é válida, pois o erro gerado é irrisório.

Como já dito, a contribuição da alma do perfil é desprezível para a flexão lateral da viga. Sendo assim, a energia de flexão é dada apenas pelo momento de flexão em torno do eixo z devido às mesas 1 (superior) e 2 (inferior).

$$M_z = M_{1z} + M_{2z} \quad (5.14)$$

Sabendo que o deslocamento da mesa superior é  $y_1 = y + c_1\phi$  e que o deslocamento da mesa inferior é  $y_2 = y - c_2\phi$ , de acordo com a resistência dos materiais, obtém-se, respectivamente, os momentos de flexão nas mesas superior e inferior das vigas:

$$\begin{cases} M_{1z} = E_1 I_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} \Rightarrow M_{1z} = E_1 I_1 \frac{d^2 (y + c_1 \phi)}{dx^2} \\ M_{2z} = E_2 I_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} \Rightarrow M_{2z} = E_2 I_2 \frac{d^2 (y - c_2 \phi)}{dx^2} \end{cases} \quad (5.15)$$

O ângulo  $\phi$  vale zero nos apoios, mas ele vai variando ao longo do comprimento destravado da viga, ou seja, ele se dá em função de x. A variação desse ângulo está relacionada à torção que atua na seção transversal da viga. Essa torção ocorre devido ao momento de torção  $M_T$  que está expresso na Equação (5.16):

$$M_T = \hat{C} \left( \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (5.16)$$

$$\hat{C} = GJ \quad (5.17)$$

Onde:

$\hat{C}$  – Rigidez torcional;

G – Módulo de elasticidade transversal:  $G = E/[2(1 + \nu)]$ ;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

J – Constante torcional.

A Equação (5.18) apresenta a constante torcional para perfis abertos do tipo I:

$$J = \frac{b_{f1}t_{f1}^3}{3} + \frac{b_{f1}t_{f1}^3}{3} + \frac{b_w t_w^3}{3} \quad (5.18)$$

Onde:

$b_w$  – Comprimento da alma;

$t_w$  – Espessura da alma.

Como pode ser visto na Equação (5.18), cada parte da viga (mesas e alma) contribui separadamente para o cálculo da constante torcional. Já que se pretende considerar a diferença de temperaturas das mesas para a formulação analítica aqui proposta, é interessante que essas parcelas estejam realmente separadas. Em situação de incêndio, cada uma das partes do perfil I está submetida à determinada temperatura e, conseqüentemente, cada uma delas terá um módulo de elasticidade transversal  $G_i$ . Então, a Equação (5.16) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$M_T = \sum_{i=1}^2 G_i J_i \left( \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (5.19)$$

A princípio, o somatório da Equação (5.19) deve ser das três partes do perfil I (mesa superior, mesa inferior e alma). Entretanto, a alma do perfil não está sendo considerada, nos cálculos desse estudo, uma vez que a contribuição da mesma é desprezível para a flexão lateral da viga.

Segundo Popov (1982) e Timoshenko e Gere (1961), a energia interna para peças com energia de flexão e torção é expressa de acordo com a Equação (5.20):

$$W_i = \frac{1}{2} \left[ \int_0^{L_b} \left( \frac{M_{1z}^2}{E_1 I_1} \right) dx + \int_0^{L_b} \left( \frac{M_{2z}^2}{E_2 I_2} \right) dx + \int_0^{L_b} \left( \frac{M_T^2}{GJ} \right) dx \right] \quad (5.20)$$

Substituindo as Equações (5.14), (5.15) e (5.19), que são respectivamente os valores do momento de flexão lateral da mesa 1, momento de flexão lateral da mesa 2 e momento de torção, na Equação (5.20), obtém-se:

$$W_i = \frac{1}{2} \left\{ E_1 I_1 \int_0^{L_b} \left[ \frac{d^2(y + c_1 \phi)}{dx^2} \right]^2 dx + E_2 I_2 \int_0^{L_b} \left[ \frac{d^2(y - c_2 \phi)}{dx^2} \right]^2 dx + \sum_{i=1}^2 G_i J_i \int_0^{L_b} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \right\} \quad (5.21)$$

Para facilitar os cálculos, desenvolvem-se as parcelas da Equação (5.21):

$$\left[ \frac{d^2(y + c_1 \phi)}{dx^2} \right]^2 = \left( \frac{d^2 y}{dx^2} + c_1 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 = \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + 2c_1 \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_1^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \quad (5.22)$$

$$\left[ \frac{d^2(y - c_2 \phi)}{dx^2} \right]^2 = \left( \frac{d^2 y}{dx^2} - c_2 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 = \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2c_2 \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_2^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \quad (5.23)$$

Substituindo, na Equação (5.21), os termos desenvolvidos acima, obtém-se:

$$W_i = \frac{E_1 I_1}{2} \int_0^{L_b} \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + 2c_1 \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_1^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \\ + \frac{E_2 I_2}{2} \int_0^{L_b} \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2c_2 \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_2^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \int_0^{L_b} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.24)$$

Substituindo os valores de  $c_1$  e  $c_2$ , obtidos respectivamente nas Equações (5.3) e (5.4), na Equação (5.24), tem-se:

$$W_i = \frac{E_1 I_1}{2} \int_0^{L_b} \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + \frac{2E_2 I_2}{(EI)_{total}} h \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + \frac{E_2^2 I_2^2}{(EI)_{total}^2} h^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \\ + \frac{E_2 I_2}{2} \int_0^{L_b} \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2 \frac{E_1 I_1}{(EI)_{total}} h \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + \frac{E_1^2 I_1^2}{(EI)_{total}^2} h^2 \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \int_0^{L_b} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.25)$$

Desenvolvendo a Equação (5.25):

$$W_i = \frac{(EI)_{total}}{2} \int_0^{L_b} \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \left[ \frac{E_1 I_1}{2} \frac{E_2^2 I_2^2}{(EI)_{total}^2} h^2 + \frac{E_2 I_2}{2} \frac{E_1^2 I_1^2}{(EI)_{total}^2} h^2 \right] \int_0^{L_b} \left( \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 dx + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \int_0^{L_b} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.26)$$

Simplificando a Equação (5.26), obtém-se:

$$W_i = \frac{(EI)_{total}}{2} \int_0^{L_b} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{total}} h^2 \int_0^{L_b} \left( \frac{d^2\phi}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i I_i \int_0^{L_b} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.27)$$

A expressão da Equação (5.28) se dá segundo Winter (1941):

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M\phi}{EI} = -\frac{q_{cr}}{2} \left( \frac{L_b^2}{4} - x^2 \right) \frac{\phi}{EI} \quad \text{para } \left\{ -\frac{L_b}{2} \leq x \leq \frac{L_b}{2} \right\} \quad (5.28)$$

Resolve-se a Equação (5.28) de forma a simplificar a Equação (5.27):

$$\left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 = \frac{q_{cr}^2}{4} \left( \frac{L_b^2}{4} - x^2 \right)^2 \frac{\phi^2}{E^2 I^2} \quad \text{para } \left\{ -\frac{L_b}{2} \leq x \leq \frac{L_b}{2} \right\} \quad (5.29)$$

$$\left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 = \frac{q_{cr}^2}{4} \left( \frac{L_b^4}{16} - 2 \frac{L_b^2}{4} x^2 + x^4 \right) \frac{\phi^2}{E^2 I^2} \quad \text{para } \left\{ -\frac{L_b}{2} \leq x \leq \frac{L_b}{2} \right\} \quad (5.30)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx = \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \frac{q_{cr}^2}{4} \left( \frac{L_b^4}{16} - \frac{L_b^2 x^2}{2} + x^4 \right) \frac{\phi^2}{(EI)_{total}^2} \right] dx \quad (5.31)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx = \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \frac{q_{cr}^2 L_b^4 \phi^2}{64(EI)_{total}^2} - \frac{q_{cr}^2 L_b^2 x^2 \phi^2}{8(EI)_{total}^2} + \frac{q_{cr}^2 x^4 \phi^2}{4(EI)_{total}^2} \right] dx \quad (5.32)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{q_{cr}^2 L_b^4}{64(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \phi^2 dx - \frac{q_{cr}^2 L_b^2}{8(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \phi^2 dx + \frac{q_{cr}^2}{4(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^4 \phi^2 dx \quad (5.33)$$

$$\int_0^{L_b} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx = 2 \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx \quad (5.34)$$

$$\int_0^{L_b} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{q_{cr}^2 L_b^4}{32(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \phi^2 dx - \frac{q_{cr}^2 L_b^2}{4(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \phi^2 dx + \frac{q_{cr}^2}{2(EI)_{total}^2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^4 \phi^2 dx \quad (5.35)$$

Já resolvida uma das parcelas da Equação (5.27), desenvolve-se um outro termo de forma a simplificar essa equação. Chega-se à primeira e à segunda derivadas da Equação (5.13) [ $\phi = a \cos(\pi x/L_b)$ ]:

$$\phi' = -\left(\frac{a\pi}{L_b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (5.36)$$

$$\phi'' = -\left(\frac{a\pi^2}{L_b^2}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (5.37)$$

Substituindo as Equações (5.35), (5.36) e (5.37) na Equação (5.27), obtém-se:

$$\begin{aligned} W_i = \frac{(EI)_{\text{total}}}{2} \left\{ \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^4}{32(EI)_{\text{total}}^2} \int_0^{L_b/2} \phi^2 dx - \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^2}{4(EI)_{\text{total}}^2} \int_0^{L_b/2} x^2 \phi^2 dx + \frac{q_{\text{cr}}^2}{2(EI)_{\text{total}}^2} \int_0^{L_b/2} x^4 \phi^2 dx \right\} + \\ + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{\text{total}}} h^2 \int_0^{L_b} \left[ -\frac{a\pi^2}{L_b^2} \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \int_0^{L_b} \left[ -\frac{a\pi}{L_b} \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx \end{aligned} \quad (5.38)$$

Desenvolvendo a equação anterior:

$$\begin{aligned} W_i = \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^4}{64(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} \phi^2 dx - \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^2}{8(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} x^2 \phi^2 dx + \frac{q_{\text{cr}}^2}{4(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} x^4 \phi^2 dx + \\ + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{\text{total}}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L_b^4} \int_0^{L_b} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L_b^2} \int_0^{L_b} \left[ \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx \end{aligned} \quad (5.39)$$

Substituindo Equação (5.13) na Equação (5.39):

$$\begin{aligned} W_i = \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^4}{64(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} a^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \frac{q_{\text{cr}}^2 L_b^2}{8(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} a^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 x^2 dx + \\ + \frac{q_{\text{cr}}^2}{4(EI)_{\text{total}}} \int_0^{L_b/2} a^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 x^4 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{\text{total}}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L_b^4} \int_0^{L_b} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L_b^2} \int_0^{L_b} \left[ \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx \end{aligned} \quad (5.40)$$

Rearranjando a equação anterior:



$$\begin{aligned}
W_i = & \frac{q_{cr}^2 L_b^4 a^2}{64(EI)_{total}} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \frac{q_{cr}^2 L_b^2 a^2}{8(EI)_{total}} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \\
& + \frac{q_{cr}^2 a^2}{4(EI)_{total}} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^4 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L_b^4} \int_0^{L_b} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + \\
& + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 G_{i|j} \frac{a^2 \pi^2}{L_b^2} \int_0^{L_b} \left[ \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx
\end{aligned} \tag{5.41}$$

As integrais da Equação (5.41) são desenvolvidas separadamente de forma a facilitar os cálculos:

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b}{4} \tag{5.42}$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b^3}{48\pi^2} (\pi^2 - 6) \tag{5.43}$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} x^4 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b^5}{320\pi^4} (\pi^4 - 20\pi^2 + 120) \tag{5.44}$$

$$\int_0^{L_b} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b}{2} \tag{5.45}$$

$$\int_0^{L_b} \left[ \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b}{2} \tag{5.46}$$

Substituindo as integrais resolvidas anteriormente na Equação (5.41), obtém-se:

$$\begin{aligned}
W_i = & \frac{q_{cr}^2 L_b^4 a^2}{64(EI)_{total}} \frac{L_b}{4} - \frac{q_{cr}^2 L_b^2 a^2}{8(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^3}{48\pi^2} (\pi^2 - 6) \right] + \\
& + \frac{q_{cr}^2 a^2}{4(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^5}{320\pi^4} (\pi^4 - 20\pi^2 + 120) \right] + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2(EI)_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L_b^4} \frac{L_b}{2} + \sum_{i=1}^2 G_{i|j} \frac{a^2 \pi^2}{L_b^2} \frac{L_b}{2}
\end{aligned} \tag{5.47}$$

Simplificando a Equação (5.47):

$$W_i = \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2}{256(EI)_{total}} - \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2 (\pi^2 - 6)}{384(EI)_{total} \pi^2} + \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2 (\pi^4 - 20\pi^2 + 120)}{1280(EI)_{total} \pi^4} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 a^2 \pi^4}{4(EI)_{total} L_b^3} + \frac{a^2 \pi^2}{4L_b} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \quad (5.48)$$

O termo  $a^2$  é posto em evidência:

$$W_i = a^2 \left[ \frac{q_{cr}^2 L_b^5}{256(EI)_{total}} - \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^2 - 6)}{384(EI)_{total} \pi^2} + \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 - 20\pi^2 + 120)}{1280(EI)_{total} \pi^4} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{4(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{4L_b} \sum_{i=1}^2 G_i J_i \right] \quad (5.49)$$

Define-se uma constante torcional reduzida  $C_i$ :

$$C_i = \frac{J_i}{2(1 + \nu)} \quad (5.50)$$

Através da Equação (5.50) e do módulo de elasticidade transversal  $G = E/[2(1 + \nu)]$ , o somatório  $\sum_{i=1}^2 G_i J_i$  da Equação (5.49) pode sofrer a seguinte transformação:

$$\sum_{i=1}^2 G_i J_i = \sum_{i=1}^2 \frac{E_i}{2(1 + \nu)} J_i = \sum_{i=1}^2 E_i C_i \quad (5.51)$$

Substituindo a Equação (5.51) na (5.49), obtém-se:

$$W_i = a^2 \left[ \frac{q_{cr}^2 L_b^5}{256(EI)_{total}} - \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^2 - 6)}{384(EI)_{total} \pi^2} + \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 - 20\pi^2 + 120)}{1280(EI)_{total} \pi^4} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{4(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{4L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right] \quad (5.52)$$

Desenvolvendo a Equação (5.52):

$$W_i = \frac{a^2}{4} \left\{ q_{cr}^2 L_b^5 \left[ \frac{1}{64(EI)_{total}} - \frac{(\pi^2 - 6)}{96\pi^2(EI)_{total}} + \frac{(\pi^4 - 20\pi^2 + 120)}{320\pi^4(EI)_{total}} \right] + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right\} \quad (5.53)$$

$$W_i = \frac{a^2}{4} \left\{ q_{cr}^2 L_b^5 \left[ \frac{15\pi^4 - 10\pi^4 + 60\pi^2 + 3\pi^4 - 60\pi^2 + 360}{960\pi^4(EI)_{total}} \right] + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right\} \quad (5.54)$$

$$W_i = \frac{a^2}{4} \left[ q_{cr}^2 L_b^5 \left( \frac{8\pi^4 + 360}{960\pi^4(EI)_{total}} \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right] \quad (5.55)$$

É obtida, então, a equação final da energia interna de deflexão para uma viga I sob flexão lateral:

$$W_i = \frac{a^2}{4} \left[ \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120\pi^4(EI)_{total}} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right] \quad (5.56)$$

### 5.2.2 – Determinação do trabalho externo

O que influencia na determinação do trabalho externo é o tipo de solicitação que está agindo na viga em questão e seu tipo de vinculação. Nessa dissertação, a viga I de aço é considerada biapojada sofrendo ação externa de uma carga uniformemente distribuída.

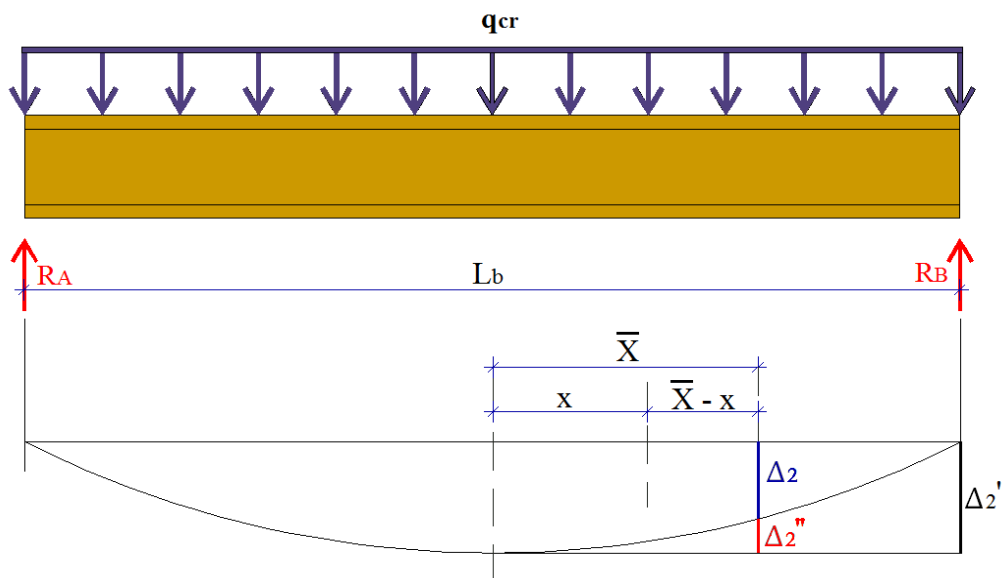


Figura 5.8 – Vista frontal da viga I submetida à carga uniformemente distribuída e seus deslocamentos.

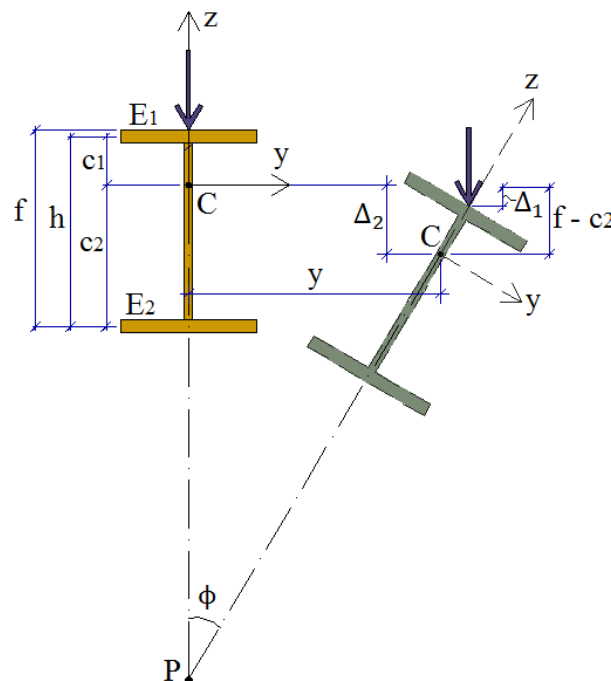


Figura 5.9 – Seção transversal da viga I submetida à carga uniformemente distribuída e seus deslocamentos.

Onde:

$\Delta_2$  – Deslocamento vertical do centro de flexão C dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga;

$\Delta_2'$  – Deslocamento vertical do centro de flexão C, no centro do vão, dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga;

$\Delta_2''$  – Diferença de entre o deslocamento  $\Delta_2'$  e o deslocamento de uma seção que está a uma distância  $\bar{X}$  da origem;

f – Distância do ponto de aplicação da carga crítica  $Q_{cr}$  ao eixo horizontal da mesa inferior;

$\Delta_1$  – Deslocamento vertical do ponto de aplicação da carga crítica  $Q_{cr}$  em relação ao centro de flexão C.

Como pode ser visto na Figura 5.9, o deslocamento vertical da carga crítica  $q_{cr}$  é composto por duas componentes:  $\Delta_1$  e  $\Delta_2$ . Analisando geometricamente essa figura, conclui-se que o deslocamento vertical  $\Delta_1$  vale:

$$\Delta_1 = (f - c_2) - (f - c_2) \cos \phi \Rightarrow \Delta_1 = (f - c_2)(1 - \cos \phi) \quad (5.57)$$

Expandindo o  $\cos \phi$  em Série de Potência:

$$\cos \phi = 1 - \frac{\phi^2}{2!} \Rightarrow 1 - \cos \phi = \frac{\phi^2}{2} \quad (5.58)$$

Substituindo o valor obtido anteriormente na Equação (5.57), obtém-se:

$$\Delta_1 = \frac{\phi^2}{2} (f - c_2) \quad (5.59)$$

Substituindo o valor de  $c_2$ , obtido na Equação (5.4), na Equação (5.59):

$$\Delta_1 = \frac{\phi^2}{2} \left[ f - \frac{E_1 I_1}{(EI)_{total}} h \right] \quad (5.60)$$

Desenvolvendo a Equação (5.60), obtém-se:

$$\Delta_1 = \frac{\phi^2}{2(EI)_{\text{total}}} [f(EI)_{\text{total}} - E_1 I_1 h] \quad (5.61)$$

Substituindo o valor de  $\phi$ , obtido na Equação (5.13), na Equação (5.61),  $\Delta_1$  é resolvido através da seguinte equação:

$$\Delta_1 = \frac{a^2}{2(EI)_{\text{total}}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 [f(EI)_{\text{total}} - E_1 I_1 h] \quad (5.62)$$

A segunda componente  $\Delta_2$ , representa o deslocamento vertical do centro de flexão C (de uma seção qualquer) devido ao deslocamento lateral da viga e vale:

$$\Delta_2 = \Delta_2' - \Delta_2'' \quad (5.63)$$

Como já dito, o deslocamento  $\Delta_2'$  se refere ao centro do vão da viga. Assim:

$$\Delta_2' = - \int_0^{\frac{L_b}{2}} \frac{d^2 y}{dx^2} \phi \left( \frac{L_b}{2} - x \right) dx \quad (5.64)$$

Substituindo o valor de  $d^2 y/dx^2$ , obtido na Equação (5.28), na Equação (5.64), obtém-se:

$$\Delta_2' = - \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ - \frac{q_{cr}}{2} \left( \frac{L_b^2}{4} - x^2 \right) \frac{\phi}{(EI)_{\text{total}}} \right] \phi \left( \frac{L_b}{2} - x \right) dx \quad (5.65)$$

Resolvendo a Equação (5.65):

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{\text{total}}} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{L_b^2 \phi}{4} - x^2 \phi \right) \left( \frac{L_b \phi}{2} - x \phi \right) dx \quad (5.66)$$

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{\text{total}}} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left( \frac{L_b^3 \phi^2}{8} - \frac{L_b^2 x \phi^2}{4} - \frac{L_b x^2 \phi^2}{2} + x^3 \phi^2 \right) dx \quad (5.67)$$

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left( \frac{L_b^3}{8} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \phi^2 dx - \frac{L_b^2}{4} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x \phi^2 dx - \frac{L_b}{2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \phi^2 dx + \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^3 \phi^2 dx \right) \quad (5.68)$$

Substituindo o valor de  $\phi$ , obtido na Equação (5.13), na Equação (5.68), chega-se a:

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^3 a^2}{8} \int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \frac{L_b^2 a^2}{4} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \right. \\ \left. - \frac{L_b a^2}{2} \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + a^2 \int_0^{\frac{L_b}{2}} x^3 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx \right] \quad (5.69)$$

Desenvolvendo as integrais da Equação (5.69):

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b}{4} \quad (5.70)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} x \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b^2}{16\pi^2} (\pi^2 - 4) \quad (5.71)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b^3}{48\pi^2} (\pi^2 - 6) \quad (5.72)$$

$$\int_0^{\frac{L_b}{2}} x^3 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{L_b^4}{128\pi^4} (\pi^4 - 12\pi^2 + 48) \quad (5.73)$$

Substituindo esses valores na Equação (5.69), encontra-se:

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^3 a^2}{8} \frac{L_b}{4} - \frac{L_b^2 a^2}{4} \frac{L_b^2}{16\pi^2} (\pi^2 - 4) - \right. \\ \left. - \frac{L_b a^2}{2} \frac{L_b^3}{48\pi^2} (\pi^2 - 6) + a^2 \frac{L_b^4}{128\pi^4} (\pi^4 - 12\pi^2 + 48) \right] \quad (5.74)$$

Desenvolvendo matematicamente a Equação (5.74):

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^4 a^2}{32} - \frac{L_b^4 a^2}{64\pi^2} (\pi^2 - 4) - \frac{L_b^4 a^2}{96\pi^2} (\pi^2 - 6) + \right. \\ \left. + a^2 \frac{L_b^4}{128\pi^4} (\pi^4 - 12\pi^2 + 48) \right] \quad (5.75)$$

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left( \frac{12L_b^4 a^2 \pi^4 - 6L_b^4 a^2 \pi^4 + 24L_b^4 a^2 \pi^2 - 4L_b^4 a^2 \pi^4}{384\pi^4} + \right. \\ \left. + \frac{24L_b^4 a^2 \pi^2 + 3L_b^4 a^2 \pi^4 - 36L_b^4 a^2 \pi^2 + 144L_b^4 a^2}{384\pi^4} \right) \quad (5.76)$$

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left( \frac{5L_b^4 a^2 \pi^4 + 12L_b^4 a^2 \pi^2 + 144L_b^4 a^2}{384\pi^4} \right) \quad (5.77)$$

A Equação (5.78) determina o deslocamento  $\Delta_2'$ :

$$\Delta_2' = \frac{q_{cr} L_b^4 a^2}{768(EI)_{total}} \left( \frac{5\pi^4 + 12\pi^2 + 144}{\pi^4} \right) \quad (5.78)$$

O deslocamento  $\Delta_2''$  é calculado assim como na Equação (5.64):

$$\Delta_2'' = - \int_0^{\bar{x}} \frac{d^2 y}{dx^2} \phi(\bar{x} - x) dx \quad (5.79)$$

Substituindo o valor de  $d^2 y/dx^2$ , obtido na Equação (5.28), na Equação (5.79), obtém-se:

$$\Delta_2'' = - \int_0^{\bar{x}} \left[ - \frac{q_{cr}}{2} \left( \frac{L_b^2}{4} - x^2 \right) \frac{\phi}{(EI)_{total}} \right] \phi(\bar{x} - x) dx \quad (5.80)$$

Resolvendo a Equação (5.80):

$$\Delta_2'' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \int_0^{\bar{x}} \left( \frac{L_b^2 \phi}{4} - x^2 \phi \right) (\bar{x} \phi - x \phi) dx \quad (5.81)$$



$$\Delta_2'' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \int_0^{\bar{X}} \left( \frac{L_b^2 \phi^2 \bar{X}}{4} - \frac{L_b^2 \phi^2 x}{4} - \phi^2 x^2 \bar{X} + \phi^2 x^3 \right) dx \quad (5.82)$$

$$\Delta_2'' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left( \frac{L_b^2 \bar{X}}{4} \int_0^{\bar{X}} \phi^2 dx - \frac{L_b^2}{4} \int_0^{\bar{X}} x \phi^2 dx - \bar{X} \int_0^{\bar{X}} x^2 \phi^2 dx + \int_0^{\bar{X}} x^3 \phi^2 dx \right) \quad (5.83)$$

Substituindo o valor de  $\phi$ , obtido na Equação (5.13), na Equação (5.83), chega-se a:

$$\Delta_2'' = \frac{q_{cr}}{2(EI)_{total}} \left[ \frac{L_b^2 \bar{X} a^2}{4} \int_0^{\bar{X}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \frac{L_b^2 a^2}{4} \int_0^{\bar{X}} x \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx - \right. \\ \left. - \bar{X} a^2 \int_0^{\bar{X}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx + a^2 \int_0^{\bar{X}} x^3 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx \right] \quad (5.84)$$

Desenvolvendo as integrais da Equação (5.84):

$$\int_0^{\bar{X}} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{\cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) L_b + \pi \bar{X}}{2\pi} \quad (5.85)$$

$$\int_0^{\bar{X}} x \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{-L_b^2 + 2\pi \bar{X} \cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) L_b + \pi^2 \bar{X}^2 + \left(\cos\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right)^2 L_b^2}{4\pi^2} \quad (5.86)$$

$$\int_0^{\bar{X}} x^2 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{6\pi^2 \bar{X}^2 \cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) L_b + 2\pi^3 \bar{X}^3 + 6\pi \bar{X} \left(\cos\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right)^2 L_b^2}{6\pi^3} - \\ - \frac{3 \cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) L_b^3 + 3\pi \bar{X} L_b^2}{6\pi^3} \quad (5.87)$$

$$\int_0^{\bar{X}} x^3 \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \right]^2 dx = \frac{3L_b^4 + 4\pi^3 \bar{X}^3 \cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) L_b + \pi^4 \bar{X}^4 + 6\pi^2 \bar{X}^2 \left(\cos\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right)^2 L_b^2}{8\pi^4} - \\ - \frac{6\pi \bar{X} L_b^3 \cos\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right) + 3\pi^2 \bar{X}^2 L_b^2 + 3 \left(\cos\frac{\pi \bar{X}}{L_b}\right)^2 L_b^4}{8\pi^4} \quad (5.88)$$

Substituindo esses valores na Equação (5.84) e desenvolvendo-se matematicamente, obtém-se o valor do deslocamento  $\Delta_2''$ :

$$\begin{aligned} \Delta_2'' = & \frac{-q_{cr}a^2}{96\pi^4(EI)_{total}} \left[ -3L_b^4\pi^2 - 18L_b^4 + 18L_b^4 \left( \cos \frac{\pi\bar{X}}{L_b} \right)^2 + \right. \\ & + 6L_b^2\pi^2\bar{X}^2 + 2\pi^4\bar{X}^4 + 3L_b^4\pi^2 \left( \cos \frac{\pi\bar{X}}{L_b} \right)^2 + 24L_b^3\pi\bar{X} \cos \left( \frac{\pi\bar{X}}{L_b} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{\pi\bar{X}}{L_b} \right) - \\ & \left. - 12L_b^2\pi^2\bar{X}^2 \left( \cos \frac{\pi\bar{X}}{L_b} \right)^2 - 3L_b^2\pi^4\bar{X}^2 \right] \end{aligned} \quad (5.89)$$

Já tendo obtidas todas as parcelas referentes ao deslocamento vertical devido à deformação horizontal da viga, pode-se calcular a energia das forças externas que é dada pela Equação (5.90):

$$W_e = \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} q_{cr}(\Delta_1 + \Delta_2)dx \quad (5.90)$$

Desenvolvendo a Equação (5.90):

$$W_e = \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} q_{cr}(\Delta_1 + \Delta_2' - \Delta_2'')dx \quad (5.91)$$

$$W_e = \underbrace{q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_1 dx}_{W_{e1}} + \underbrace{q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_2' dx}_{W_{e2}} - \underbrace{q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_2'' dx}_{W_{e3}} \quad (5.92)$$

Separando a Equação (5.92) em parcelas  $W_{e1}$ ,  $W_{e2}$  e  $W_{e3}$  de forma a facilitar os cálculos, primeiramente é desenvolvida a parcela  $W_{e1}$ :

$$W_{e1} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_1 dx \quad (5.93)$$

Substituindo o valor de  $\Delta_1$ , obtido na Equação (5.62), na Equação (5.93), tem-se:

$$W_{e1} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \frac{a^2}{2(EI)_{total}} \left( \cos \frac{\pi x}{L_b} \right)^2 [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h] dx \quad (5.94)$$

$$W_{e1} = \frac{q_{cr} a^2 [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{2(EI)_{total}} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \left( \cos \frac{\pi x}{L_b} \right)^2 dx \quad (5.95)$$

A parcela  $W_{e1}$  é, então, obtida na Equação (5.96):

$$W_{e1} = \frac{q_{cr} a^2 L_b [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{4(EI)_{total}} \quad (5.96)$$

A parcela  $W_{e2}$  é dada por:

$$W_{e2} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_2' dx \quad (5.97)$$

Substituindo o valor de  $\Delta_2'$ , obtido na Equação (5.78), na Equação (5.97), tem-se:

$$W_{e2} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \frac{q_{cr} L_b^4 a^2}{768(EI)_{total}} \left( \frac{5\pi^4 + 12\pi^2 + 144}{\pi^4} \right) dx \quad (5.98)$$

$$W_{e2} = \frac{q_{cr}^2 L_b^4 a^2}{768(EI)_{total}} \left( \frac{5\pi^4 + 12\pi^2 + 144}{\pi^4} \right) \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} dx \quad (5.99)$$

A parcela  $W_{e2}$  é, então, obtida na equação (5.100):

$$W_{e2} = \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2}{768(EI)_{total}} \left( \frac{5\pi^4 + 12\pi^2 + 144}{\pi^4} \right) \quad (5.100)$$

A última parcela  $W_{e3}$  é dada por:

$$W_{e3} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \Delta_2'' dx \quad (5.101)$$

Substituindo o valor de  $\Delta_2''$ , obtido na Equação (5.89), na Equação (5.101), tem-se:

$$\begin{aligned}
 W_{e3} = q_{cr} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} \frac{-q_{cr} a^2}{96\pi^4 (EI)_{total}} \left[ -3L_b^4 \pi^2 - 18L_b^4 + 18L_b^4 \left( \cos \frac{\pi \bar{X}}{L_b} \right)^2 + \right. \\
 \left. + 6L_b^2 \pi^2 \bar{X}^2 + 2\pi^4 \bar{X}^4 + 3L_b^4 \pi^2 \left( \cos \frac{\pi \bar{X}}{L_b} \right)^2 + 24L_b^3 \pi \bar{X} \cos \left( \frac{\pi \bar{X}}{L_b} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{\pi \bar{X}}{L_b} \right) - \right. \\
 \left. - 12L_b^2 \pi^2 \bar{X}^2 \left( \cos \frac{\pi \bar{X}}{L_b} \right)^2 - 3L_b^2 \pi^4 \bar{X}^2 \right] d\bar{X} \quad (5.102)
 \end{aligned}$$

Desenvolvendo-se matematicamente a Equação (5.102), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 W_{e3} = \frac{-q_{cr}^2 a^2}{96\pi^4 (EI)_{total}} \left[ -3L_b^5 \pi^2 - 18L_b^5 + \frac{18L_b^5}{2} + \frac{6\pi^2 L_b^5}{12} + \frac{2\pi^4 L_b^5}{80} + \right. \\
 \left. + \frac{24L_b^5}{4} - \frac{12L_b^5 (\pi^2 - 6)}{24} - \frac{3\pi^4 L_b^5}{12} \right] \quad (5.103)
 \end{aligned}$$

$$W_{e3} = \frac{-q_{cr}^2 a^2}{96\pi^4 (EI)_{total}} \left( -\frac{3}{2} L_b^5 \pi^2 - 3L_b^5 - \frac{9\pi^4 L_b^5}{40} + 3L_b^5 \right) \quad (5.104)$$

$$W_{e3} = \frac{-q_{cr}^2 a^2 L_b^5 \pi^2}{96\pi^4 (EI)_{total}} \left( -\frac{3}{2} - \frac{9\pi^2}{40} \right) \quad (5.105)$$

$$W_{e3} = \frac{-q_{cr}^2 a^2 L_b^5}{96\pi^2 (EI)_{total}} \frac{3}{40} (-20 - 3\pi^2) \quad (5.106)$$

A parcela  $W_{e3}$  é obtida conforme a seguinte equação:

$$W_{e3} = \frac{q_{cr}^2 a^2 L_b^5}{1280 (EI)_{total}} \frac{(3\pi^2 + 20)}{\pi^2} \quad (5.107)$$

Retornando as parcelas  $W_{e1}$ ,  $W_{e2}$  e  $W_{e3}$  para a Equação (5.92), obtém-se:

$$W_e = \frac{q_{cr} a^2 L_b [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{4(EI)_{total}} + \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2}{768(EI)_{total}} \left( \frac{5\pi^4 + 12\pi^2 + 144}{\pi^4} \right) - \frac{q_{cr}^2 a^2 L_b^5}{1280(EI)_{total}} \frac{(3\pi^2 + 20)}{\pi^2} \quad (5.108)$$

$$W_e = \frac{q_{cr} a^2 L_b [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{4(EI)_{total}} - \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2}{3840(EI)_{total}} \left( \frac{-16\pi^4 - 720}{\pi^4} \right) \quad (5.109)$$

$$W_e = \frac{q_{cr} a^2 L_b [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{4(EI)_{total}} + \frac{q_{cr}^2 L_b^5 a^2}{240(EI)_{total}} \left( \frac{\pi^4 + 45}{\pi^4} \right) \quad (5.110)$$

A Equação (5.111) apresenta o trabalho das forças externas:

$$W_e = \frac{q_{cr} a^2 L_b}{4(EI)_{total}} \left[ f(EI)_{total} - E_1 I_1 h + \frac{q_{cr} L_b^4}{60} \left( \frac{\pi^4 + 45}{\pi^4} \right) \right] \quad (5.111)$$

### 5.2.3 – Determinação da carga crítica uniformemente distribuída $q_{cr}$

Igualando a energia interna de deflexão  $W_i$ , obtida na Equação (5.56), ao trabalho das forças externas  $W_e$ , obtido na Equação (5.111), determina-se a carga crítica uniformemente distribuída  $q_{cr}$  para o perfil I no estado de FLT.

$$W_i = W_e \Rightarrow \frac{a^2}{4} \left[ \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120\pi^4 (EI)_{total}} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right] = \frac{q_{cr} a^2 L_b}{4(EI)_{total}} \left[ f(EI)_{total} - E_1 I_1 h + \frac{q_{cr} L_b^4}{60} \left( \frac{\pi^4 + 45}{\pi^4} \right) \right] \quad (5.112)$$

Organizando a Equação (5.112):

$$\frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120 \pi^4 (EI)_{total}} - \frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 + 45)}{60 \pi^4} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i - \frac{[f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{(EI)_{total}} q_{cr} L_b = 0 \quad (5.113)$$

$$-\frac{q_{cr}^2 L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120 \pi^4 (EI)_{total}} - q_{cr} L_b \frac{[f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{(EI)_{total}} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i = 0 \quad (5.114)$$

A Equação (5.114) assume a forma de uma equação quadrática:

$$A q_{cr}^2 + B q_{cr} + C = 0 \quad (5.115)$$

Onde:

$$A = -\frac{L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120 \pi^4 (EI)_{total}} \quad (5.116)$$

$$B = -L_b \frac{[f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{(EI)_{total}} \quad (5.117)$$

$$C = \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \quad (5.118)$$

O discriminante  $\Delta = B^2 - 4AC$  dessa equação do segundo grau vale:

$$\Delta = L_b^2 \frac{[-f(EI)_{total} + E_1 I_1 h]^2}{(EI)_{total}^2} + 4 \frac{L_b^5 (\pi^4 + 45)}{120 \pi^4 (EI)_{total}} \left[ \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^4}{(EI)_{total} L_b^3} + \frac{\pi^2}{L_b} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right] \quad (5.119)$$

$$\Delta = \frac{1}{(EI)_{total}^2} \left\{ L_b^2 [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{4 L_b^2 (\pi^4 + 45) E_1 I_1 E_2 I_2 h^2}{120} + \frac{4 L_b^4 (\pi^4 + 45) (EI)_{total}}{120 \pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right\} \quad (5.120)$$

A carga crítica uniformemente distribuída é obtida através da equação seguinte:

$$q_{cr} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A} = \frac{-B}{2A} \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2A} \quad (5.121)$$

Substituindo-se as Equações (5.116), (5.117) e (5.120) na Equação (5.121), obtém-se:

$$q_{cr} = -\frac{60\pi^4 L_b [f(EI)_{total} - E_1 I_1 h]}{L_b^5 (\pi^4 + 45)} \pm \frac{-60\pi^4 (EI)_{total}}{L_b^5 (\pi^4 + 45)} \left[ \frac{1}{(EI)_{total}} \right] \times$$

$$\times \sqrt{L_b^2 [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{4L_b^2 (\pi^4 + 45) E_1 I_1 E_2 I_2 h^2}{120} + \frac{4L_b^4 (\pi^4 + 45) (EI)_{total}}{120\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i}$$

$$q_{cr} = \frac{60\pi^4}{L_b^4 (\pi^4 + 45)} \left\{ -[f(EI)_{total} - E_1 I_1 h] + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (EI)_{total}}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]} \right\} \quad (5.123)$$

Após simplificações algébricas, finalmente, chega-se à determinação da carga crítica uniformemente distribuída  $q_{cr}$  em vigas de aço no estado de FLT. A Equação (5.124) é válida para os casos em que as mesas são diferentes, do ponto de vista geométrico, e possuem diferentes módulos de elasticidade devido ao incêndio:

$$q_{cr} = \frac{60\pi^4}{L_b^4 (\pi^4 + 45)} \left\{ E_1 I_1 h - f(EI)_{total} + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (EI)_{total}}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]} \right\} \quad (5.124)$$

Partindo dessa fórmula geral, pode-se simplificar para o caso em que o módulo de elasticidade das mesas são iguais ( $E_1 = E_2 = E$ ), ou seja, nesse caso não é considerado o fenômeno do incêndio. Conseqüentemente, o somatório  $\sum_{i=1}^2 E_i C_i$  da Equação (5.124) se transforma em  $EC$ , sendo  $C = \sum_{i=1}^2 C_i$ . Nesse caso, a Equação (5.124) passa a ser:

$$q_{cr} = \frac{60\pi^4 E}{L_b^4 (\pi^4 + 45)} \left\{ I_1 h - f(I)_{total} + \sqrt{[I_1 h - f(I)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ I_1 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (I)_{total} C}{\pi^2} \right]} \right\} \quad (5.125)$$

Onde:

$(I)_{total}$  – Somatório dos momentos de inércia, em relação ao eixo z local, referente às mesas inferior e superior:  $(I)_{total} = I_1 + I_2$ .

No caso anterior, no qual não se considera o fenômeno de incêndio, a Equação (5.125) coincide com a fórmula deduzida por Winter (1941) para o caso particular de vigas I de mesmo material, com mesas geometricamente assimétricas e com carga uniformemente distribuída.

Pode-se, também, simplificar a Equação (5.124) para o caso em que as mesas são iguais, do ponto de vista geométrico ( $I_1 = I_2$ ), mantendo o fenômeno de incêndio:

$$q_{cr} = \frac{30\pi^4 (I)_{total}}{L_b^4 (\pi^4 + 45)} \left\{ E_1 h - f(E_1 + E_2) + \sqrt{[E_1 h - f(E_1 + E_2)]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 E_2 h^2 + \frac{2L_b^2 (E_1 + E_2)}{(I)_{total} \pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]} \right\} \quad (5.126)$$

Embora se tenha achado uma fórmula geral para estudo (Equação 5.124), a Equação (5.126) representa o caso típico estudado nessa dissertação: perfis geometricamente simétricos (mesas iguais) e módulos de elasticidades diferentes, devido ao aquecimento desigual do perfil durante a situação de incêndio.



Em um caso ainda mais particularizado, considerando as mesas iguais ( $I_1 = I_2 = I$ ) e os módulos de elasticidade das mesas também iguais ( $E_1 = E_2 = E$ ), a Equação (5.124) pode se transformar em:

$$q_{cr} = \frac{30\pi^4 E(I)_{total}}{L_b^4 (\pi^4 + 45)} \left\{ h - 2f + \sqrt{[h - 2f]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ h^2 + \frac{4L_b^2 C}{(I)_{total} \pi^2} \right]} \right\} \quad (5.127)$$

Nesse capítulo foi obtido uma solução fechada para o cálculo da carga crítica uniformemente distribuída  $q_{cr}$  em perfis I no estado de FLT, considerando o fenômeno de incêndio. No capítulo oito, serão apresentadas algumas aplicações feitas para essa solução fechada, comparando-as com as recomendações normativas e com a formulação apresentada por Silva (1992).

## **6 – GENERALIZAÇÃO DA FORMULAÇÃO DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I”**

Silva (1992), em sua dissertação, com o intuito de demonstrar o formulário para a determinação do momento crítico à flambagem lateral por flexo-torção apresentado pela NBR 8800:1986, desenvolveu uma formulação analítica através do método da energia para um caso geral. Ele analisou a influência da variação do momento fletor ao longo do eixo da viga, da assimetria da seção, da posição do carregamento e das condições de vínculo.

Por se tratar de um trabalho de outro autor relacionado à instabilidade de vigas sem a consideração do fenômeno de incêndio, esse capítulo pretende fazer um breve estudo dessa formulação, mas a adaptando para o caso de incêndio, comparando-a aos resultados obtidos através da solução fechada proposta no capítulo anterior.

### **6.1 – FORMULAÇÃO ANALÍTICA**

Para desenvolver sua formulação, Silva (1992) teve como base o Teorema de Lagrange-Dirichlet, o qual diz que para que haja estabilidade de equilíbrio de uma configuração de um sistema, basta que a energia potencial total seja mínima:

$$V = U - W \Rightarrow 0 = U - W \Rightarrow U = W \quad (6.1)$$

Onde:

V – Energia potencial total;

U – Energia potencial dos esforços internos;

W – Energia potencial dos esforços externos.

Como já foi mencionado, Nunes (2005) e Campêlo (2008) também desenvolveram pesquisas nessa área de conhecimento. Tanto nos estudos de ambos, quanto na presente dissertação, a formulação analítica foi desenvolvida baseada no método da energia. Porém, apesar de Silva (1992), Nunes (2005), Campêlo (2008) e o atual trabalho terem usado o

mesmo método (método da energia) para a resolução de suas respectivas formulações, Silva (1992) adotou outro enfoque. Ele partiu do princípio que:

$$V = V_0 + \Delta V \quad (6.2)$$

Onde:

$V_0$  – Energia potencial inicial;

$\Delta V$  – Energia potencial adicional.

A energia potencial inicial  $V_0$  se mantém constante após a ocorrência da flambagem ( $\delta V_0 = 0$ ). A equação geral para o cálculo do momento crítico foi determinada a partir de  $\Delta V = 0$ , seguida de minimização da solução.

Silva (1992) começou seu desenvolvimento determinando a relação entre os deslocamentos adicionais associados à configuração de equilíbrio pós-crítico. Ele analisou os deslocamentos devidos a cada tipo de esforço (torção, flexão lateral e flexão no plano perpendicular ao eixo  $x$ ). Na Figura 6.1 se encontra o referencial adotado:

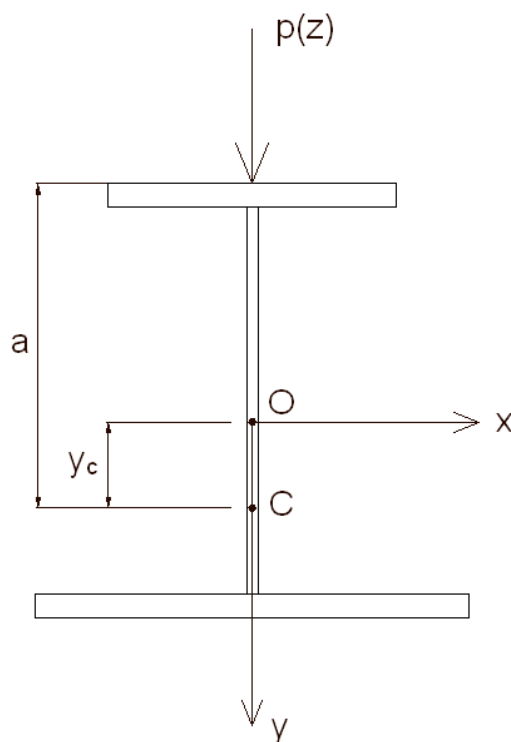


Figura 6.1 – Sistemas de coordenadas adotado por Silva (1992).

Onde:

O – Centro geométrico;

C – Centro de torção;

$y_c$  – Distância entre o centro de torção e o centro geométrico;

$p(z)$  – Carregamento;

a – Distância entre o ponto de aplicação do carregamento e o centro de torção.

Em seguida, ele fez a compatibilidade entre deformação e deslocamentos, fez o equilíbrio dos esforços, achou a energia potencial adicional  $\Delta V$  e finalmente determinou a equação geral do momento crítico (Silva, 1992):

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi^2 E I_y}{(Kl)^2} \left[ -(C_p a + C_k k) + \sqrt{(C_p a + C_k k)^2 + \frac{C_w}{I_y} \left( 1 + \frac{G I_t}{E C_w} \frac{(Kl)^2}{\pi^2} \right)} \right] \quad (6.3)$$

Onde:

$C_b$  – Coeficiente associado ao diagrama de momentos fletores;

$C_p$  – Coeficiente associado à posição do carregamento;

$C_k$  – Coeficiente associado à monossimetria da seção;

K – Coeficiente associado ao tipo de vinculação (restrição a deslocamentos);

k – Coeficiente de monossimetria;

l – Comprimento do vão da viga e corresponde ao  $L_b$  adotado nessa dissertação;

$I_t$  – Constante torcional corresponde ao J adotado nessa dissertação;

$C_w$  – Constante de empenamento;

$E I_y$  – Corresponde ao  $(EI)_{total}$  adotado nessa dissertação.

O coeficiente de monossimetria k é calculado de acordo com a Equação (6.4):

$$k = y_c - \frac{1}{2I_x} \int_A (x^2 + y^2) y dA \quad (6.4)$$

Onde:

$I_x$  – Momento de inércia total da seção transversal, em relação ao eixo x local;

A – Área total da seção transversal;

## 6.2 – COMPARAÇÕES

Com o intuito de já se ter uma base de estudo para se fazer a comparação entre a formulação desenvolvida por Silva (1992) e a formulação proposta nesse trabalho, foi feito um estudo para se comparar a formulação proposta por Silva (1992) com as formulações propostas por Nunes (2005) e Campêlo (2008). Ou seja, a consideração do incêndio foi adaptada na formulação apresentada por Silva (1992), considerando a variação do módulo de elasticidade entre as mesas superior e inferior. E para cada caso foram considerados os devidos parâmetros, respeitando as condições de vínculo, o tipo e a posição do carregamento. O resultado foi satisfatório, tendo em vista que as comparações feitas tiveram, no máximo, uma discrepância de 3%. As comparações feitas estão apresentadas ao final do trabalho (Anexo).

### 6.2.1 – Caso de momento uniforme

O caso de estudo do Nunes (2005) se tratava de uma viga I de aço biapojada submetida à flexão pura em situação de incêndio. Desenvolvendo a sua formulação analítica para obter o momento crítico, Nunes (2005) obteve a seguinte solução fechada:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 h}{2L_b^2} \left[ (E_1 I_1 - E_2 I_2) + \sqrt{(E_1 I_1 + E_2 I_2)^2 + \frac{4L^2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)}{\pi^2 h} \sum_{i=1}^2 E_i C_i} \right] \quad (6.5)$$

Para comparar com a formulação apresentada por Silva (1992), foi feita a particularização da equação (6.5), de modo a não se considerar o fenômeno de incêndio inicialmente. Considerando, então,  $E_1 = E_2 = E$  e  $I_1 = I_2$ , a equação (6.5) passa a ser:

$$M_{cr} = \frac{E\pi^2}{L_b^2} \sqrt{\frac{I_2 h^2}{4} + CI \frac{L_b^2}{\pi^2}} \quad (6.6)$$

De acordo com Silva (1992), para se fazer a adaptação da equação (6.3), para esse caso de estudo (caso de flexão pura), devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- $C_b = 1$ ;
- $C_p = 0$ ;
- $C_k = 1$ ;
- $K = 1$ .

Sendo assim, a equação (6.3) passa a ser:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2(EI)_{total}}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{(I)_{total}} \left( 1 + \frac{GJ}{EC_w} \frac{L_b^2}{\pi^2} \right)} \quad (6.7)$$

É importante lembrar que o coeficiente de monossimetria  $k$  foi anulado na equação (6.7), pois se trata de um perfil totalmente simétrico e com o módulo de elasticidade constante. Comparando-se a equação (6.6) com a (6.7), foi achada uma diferença de 0,7% (ver anexo), concluindo-se que as formulações, apesar de terem sido desenvolvidas por caminhos diferentes, são praticamente iguais.

Uma vez que Silva (1992) não considerou a situação de incêndio em sua formulação, a equação (6.7) deve ser adaptada para esse caso, obtendo-se:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2(EI)_{total}}{L_b^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi}}{\sum_{i=1}^2 I_i} + \frac{L_b^2}{\pi^2} \left( \frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi} G_i I_i}{\sum_{i=1}^2 I_i E_i C_{wi}} \right)} \quad (6.8)$$

Comparando-se a equação (6.8) com a equação (6.5), foi achada uma diferença de 1,6% (ver anexo). Ou seja, a solução fechada desenvolvida por Nunes (2005) e a formulação desenvolvida segundo Silva (1992) estão muito próximas em seus resultados, mesmo considerando uma situação de incêndio.

### 6.2.2 – Caso de carga concentrada no meio do vão

Já o caso de estudo de Campêlo (2008) se tratava de uma viga I de aço biapoiada submetida a uma carga concentrada no meio do vão em situação de incêndio. Desenvolvendo a sua formulação analítica para obter a carga crítica, Campêlo (2008) obteve a seguinte solução fechada:

$$P_{cr} = \frac{48\pi^2}{L_b^3(6 + \pi^2)} \{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}] + \sqrt{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \left[ \frac{L_b^2(6 + \pi^2)}{48} \right] \left[ (EI)_{total} \sum_{i=1}^2 E_i C_i + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L_b^2} \right] } \quad (6.9)$$

Transformando a equação (6.9) de carga crítica para o momento fletor correspondente, obtém-se:

$$M_{cr} = \frac{12\pi^2}{L_b^2(6 + \pi^2)} \{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}] + \sqrt{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \left[ \frac{L_b^2(6 + \pi^2)}{48} \right] \left[ (EI)_{total} \sum_{i=1}^2 E_i C_i + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L_b^2} \right] } \quad (6.10)$$

Para comparar com a formulação proposta por Silva (1992), foi feita a particularização da equação (6.10), de modo a não se considerar o fenômeno de incêndio inicialmente. Considerando, então,  $E_1 = E_2 = E$  e  $I_1 = I_2$ , a equação (6.10) passa a ser:

$$M_{cr} = \frac{6\pi^2(EI)_{total}}{L_b^2(6 + \pi^2)} \left\{ (h - 2f) + \sqrt{ (h - 2f)^2 + \left[ \frac{L^2(6 + \pi^2)}{48} \right] \left[ \frac{4C}{(I)_{total}} + \frac{h^2 \pi^2}{L_b^2} \right] } \right\} \quad (6.11)$$

De acordo com Silva (1992), para se fazer a adaptação da equação (6.3), para esse caso de estudo (carga concentrada no meio do vão), devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- $C_b = 1,35$ ;
- $C_p = 0,55$ ;
- $C_k = 1$ ;
- $K = 1$ .

Sendo assim, a equação (6.3) passa a ser:

$$M_{cr} = \frac{1,35\pi^2(EI)_{total}}{L_b^2} \left[ -0,55a + \sqrt{(0,55a)^2 + \frac{C_w}{(I)_{total}} \left( 1 + \frac{GJ}{EC_w} \frac{L_b^2}{\pi^2} \right)} \right] \quad (6.12)$$

Comparando-se a equação (6.11) com a (6.12), foi achada uma diferença de 1,1% (ver anexo), concluindo-se novamente que as formulações, apesar de terem sido desenvolvidas por caminhos diferentes, são praticamente iguais.

A equação (6.12) deve ser adaptada para o caso de ocorrência de um incêndio, obtendo-se:

$$M_{cr} = \frac{1,35\pi^2(EI)_{total}}{L_b^2} \left[ -0,55a + \sqrt{(0,55a)^2 + \frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi}}{\sum_{i=1}^2 I_i} + \frac{L_b^2}{\pi^2} \left( \frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi} G_i J_i}{\sum_{i=1}^2 I_i E_i C_{wi}} \right)} \right] \quad (6.13)$$

Comparando-se a equação (6.13) com a equação (6.10), foi achada uma diferença de 2,8% (ver anexo). Ou seja, a solução fechada desenvolvida por Campêlo (2008) também está muito próxima do resultado obtido através da formulação desenvolvida segundo Silva (1992), mesmo considerando uma situação de incêndio.

### 6.2.3 – Caso de carga uniformemente distribuída

O atual trabalho se trata de uma viga I de aço biapoiada submetida a uma carga uniformemente distribuída em situação de incêndio. Como já foi apresentado no capítulo cinco, a formulação analítica obtida para se determinar a carga crítica uniformemente distribuída se dá através da equação (5.124).



Transformando a equação (5.124) de carga crítica uniformemente distribuída para o momento fletor correspondente, obtém-se:

$$M_{cr} = \frac{15\pi^4}{2L_b^2(\pi^4 + 45)} \{E_1 I_1 h - f(EI)_{total} + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (EI)_{total}}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]} \} \quad (6.14)$$

Particularizando a equação (6.14), considerando  $E_1 = E_2 = E$  e  $I_1 = I_2$ , obtém-se:

$$M_{cr} = \frac{15\pi^4 (EI)_{total}}{4L_b^2(\pi^4 + 45)} \left\{ (h - 2f) + \sqrt{(h - 2f)^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ h^2 + \frac{4L_b^2 C}{\pi^2 (I)_{total}} \right]} \right\} \quad (6.15)$$

Segundo Silva (1992), para esse caso de estudo (carga uniformemente distribuída), a equação (6.3) passa a ter os seguintes parâmetros:

- $C_b = 1,13$ ;
- $C_p = 0,45$ ;
- $C_k = 1$ ;
- $K = 1$ .

Sendo assim, a equação (6.3) passa a ser:

$$M_{cr} = \frac{1,13\pi^2 (EI)_{total}}{L_b^2} \left[ -0,45a + \sqrt{(0,45a)^2 + \frac{C_w}{(I)_{total}} \left( 1 + \frac{GJ}{EC_w} \frac{L_b^2}{\pi^2} \right)} \right] \quad (6.16)$$

Comparando-se a equação (6.15) com a (6.16), foi achada uma diferença de 0,4%, comprovando-se novamente que as formulações são praticamente iguais. Transformando a equação (6.16) de momento fletor crítico para a carga crítica uniformemente distribuída correspondente e considerando o fenômeno do incêndio, obtém-se:

$$q_{cr} = \frac{9,04\pi^2(EI)_{total}}{L_b^4} \left[ -0,45a + \sqrt{(0,45a)^2 + \frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi}}{\sum_{i=1}^2 I_i} + \frac{L_b^2}{\pi^2} \left( \frac{\sum_{i=1}^2 C_{wi} G_i I_i}{\sum_{i=1}^2 I_i E_i C_{wi}} \right)} \right] \quad (6.17)$$

Como esta situação (carga uniformemente distribuída) é o assunto de estudo dessa dissertação, a comparação entre a equação (5.124) com a equação (6.17) será mais bem exemplificada no capítulo oito, onde os casos de estudo serão aplicados para cada uma dessas formulações. Essa comparação será melhor visualizada através de gráficos, e não apenas através das equações.

## **7 – ANÁLISE NUMÉRICA – ANSYS**

As simulações numéricas são muito utilizadas atualmente como base nos cálculos em projetos de engenharia através de programas computacionais. Também nesse trabalho, o estudo numérico foi realizado com a ajuda de um software, o ANSYS (2007), para a simulação de perfis metálicos submetidos a situações de incêndio. Essas simulações foram feitas pelo MEF (Método dos Elementos Finitos).

### **7.1 – O PROGRAMA ANSYS**

O programa é um software baseado em elementos finitos, que foi desenvolvido a partir de 1970 pelo Dr. John Swanson e sua empresa Swanson Analysis System Incorporated (Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_A.\\_Swanson](http://en.wikipedia.org/wiki/John_A._Swanson), acessado em Março/2013).

Como esse software tem uma vasta aplicabilidade em diversos campos da engenharia, ele tem sido muito utilizado para fins de pesquisa acadêmica. O ANSYS (2007) resolve problemas de:

- Análise estrutural (estática ou dinâmica);
- Análise térmica;
- Eletromagnéticos;
- Mecânica da fratura;
- Mecânica dos fluidos;
- Engenharia biomédica
- Etc.

O ANSYS (2007) na versão 11 foi utilizado para resolver as análises térmicas necessárias para esta pesquisa. As análises térmicas podem ser lineares, com as propriedades dos materiais constantes, ou não lineares, com essas propriedades variando com o aumento da temperatura. Para os problemas térmicos, esse programa permite realizar análises em dois tipos de regimes:

- Regime estacionário: Quando é determinada a distribuição de temperaturas e outras grandezas térmicas sob condições de carregamento estacionário. Um carregamento é considerado estacionário quando os efeitos da retenção de calor, que variam num período de tempo, podem ser ignorados. Esse tipo de análise pode ser empregado para determinar temperaturas, gradientes térmicos, taxas de fluxos de calor em objetos causados por cargas térmicas constantes ao longo do tempo. A análise térmica estacionária é utilizada como precursora (para estabelecer as condições iniciais do problema) ou como último passo (após os efeitos transientes se tornarem desprezíveis) de análises transientes;
- Regime transiente: Quando é determinada a distribuição de temperatura e outras grandezas térmicas em condições que variam num dado período de tempo. A grande maioria dos problemas que envolvem transferência de calor implica em análises neste regime. Em pesquisas, os engenheiros costumam utilizar temperaturas calculadas por meio de análises térmicas transientes como parâmetro inicial para análises estruturais que visam determinar a evolução de tensões térmicas em situações diversas.

No ANSYS (2007), uma análise transiente térmica segue três etapas básicas:

- Elaboração do modelo: Etapa na qual se definem os tipos e as constantes reais dos elementos, as propriedades dos materiais envolvidos, a geometria e a geração de malha em elementos finitos do modelo;
- Aplicação das cargas e obtenção da solução: Etapa em que há a definição do tipo de análise (estacionária ou transiente), o estabelecimento das condições iniciais do problema (imposição de temperaturas em determinados nós, por exemplo) e a especificação das opções de passos de carga (opções de não-linearidade e controle de saída de resultados);
- Análise da solução: Etapa de visualização das respostas desejadas, de acordo com o interesse do usuário. Essas respostas podem ser dados primários, como temperaturas nodais, ou dados derivados (demais grandezas calculadas a partir das temperaturas), como gradientes térmicos, fluxos térmicos, temperaturas em elementos, taxas de geração de calor, etc. O usuário define quais variáveis ele

deseja visualizar (nos nós, elementos, passos de tempo ou instante de tempo) e os resultados se expressam em forma de valores, gráficos ou tabelas.

De acordo com a natureza da análise a ser desenvolvida, o ANSYS (2007) disponibiliza diversas plataformas de trabalho. As disponíveis para as análises térmicas são ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Thermal e ANSYS/Flotran. Para esse estudo, escolheu-se a plataforma ANSYS/Mechanical.

O ANSYS (2007) tem como base para suas análises térmicas a equação de balanço térmico, obtida a partir do princípio da conservação de energia. A solução obtida em elementos finitos determina as temperaturas nodais e utiliza essas para calcular as outras variáveis térmicas em questão (quantidade de calor, gradientes térmicos, fluxos térmicos, geração ou dissipação de calor, etc.).

## **7.2 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram realizadas simulações numéricas, em MEF, de perfis I de aço com um material refratário sobreposto e submetidos a situações de incêndio natural. Esses perfis, em alguns casos, foram considerados com uma proteção térmica tipo caixa de concreto leve com vermiculita. Foram consideradas a geometria da estrutura, as propriedades dos materiais e uma tabela de temperatura para a definição das propriedades que variam com a temperatura. Foram realizadas análises das temperaturas ao longo do tempo de incêndio em cada parte da seção transversal da viga.

Para a escolha dos perfis a serem utilizados nessas simulações, foi feita uma pesquisa no livro “Estruturas de Aço no Brasil” (Dias, 1999). Foi feito um levantamento dos perfis com seção I (adotados como vigas) mais utilizados nas obras em estruturas de aço conhecidas no Brasil. Assim, foram escolhidos os quatro perfis que estão apresentados na Tabela 7.1. Na simulação numérica, cada um desses perfis foi considerado com e sem revestimento térmico.

Tabela 7.1 – Perfis adotados e propriedades geométricas.

Perfil	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	M (kg/m)
CVS 300x85	300	200	19,0	12,5	109,0	85,4
VS 400x68	400	200	16,0	6,3	87,2	68,4
VS 550x88	550	250	16,0	6,3	113,0	88,4
CVS 600x210	600	400	22,4	16,0	268,0	210,0

Para simular os incêndios naturais, foram escolhidos três tipos de incêndios, baseados em cargas de incêndio específicas e graus de ventilação mais comuns:

- Incêndio natural 1:  $q_{fi} = 300\text{MJ/m}^2$  e  $O = 0,04\text{m}^{1/2}$ ;
- Incêndio natural 2:  $q_{fi} = 500\text{MJ/m}^2$  e  $O = 0,08\text{m}^{1/2}$ ;
- Incêndio natural 3:  $q_{fi} = 600\text{MJ/m}^2$  e  $O = 0,12\text{m}^{1/2}$ .

Para cada perfil (com e sem revestimento) foi atribuído um tipo de incêndio, resultando em oito casos a serem estudados:

Tabela 7.2 – Casos de estudo.

Caso	Perfil	Incêndio	Carga de Incêndio (MJ/m <sup>2</sup> )	Grau de Ventilação (m <sup>1/2</sup> )
1	CVS 300x85 (sem revestimento)	1	300	0,04
2	VS 400x68 (sem revestimento)	2	500	0,08
3	VS 550x88 (sem revestimento)	2	500	0,08
4	CVS 600x210 (sem revestimento)	3	600	0,12
5	CVS 300x85 (com revestimento)	1	300	0,04
6	VS 400x68 (com revestimento)	2	500	0,08
7	VS 550x88 (com revestimento)	2	500	0,08
8	CVS 600x210 (com revestimento)	3	600	0,12

Como já foi dito, as análises térmicas podem ser lineares (propriedades dos materiais constantes) ou não lineares (propriedades dos materiais variando com o aumento da temperatura). Nesse aspecto, as propriedades consideradas constantes foram:

- Densidade do aço;
- Densidade do concreto (material refratário);
- Densidade do concreto (material isolante);

- Densidade do ar;
- Calor específico do concreto (material refratário);
- Calor específico do concreto (material isolante);
- Calor específico do ar;
- Condutividade térmica do concreto (material isolante);

Já as propriedades consideradas variando de acordo com a evolução da temperatura foram:

- Calor específico do aço;
- Condutividade térmica do aço;
- Condutividade térmica do concreto (material refratário);
- Condutividade térmica do ar.

No programa, uma malha fina de ar (de 1mm de espessura) foi discretizada em torno do perfil metálico, do material refratário e da proteção térmica. Aos nós dessa malha foi atribuída a temperatura variável do incêndio natural a cada passo de tempo, por meio de curvas temporais que o programa disponibiliza para variar carregamentos térmicos no tempo. Os nós da camada de ar ao redor do perfil metálico (ou da proteção térmica, dependendo do caso em questão) sofrem a influência do incêndio, logo acompanham sua temperatura a cada passo de tempo. Já os nós extremos da camada de ar ao redor da face superior da laje e em seu bordo limite assumem a temperatura ambiente de 20°C. As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam os modelos aplicados na análise dos perfis via ANSYS (2007).

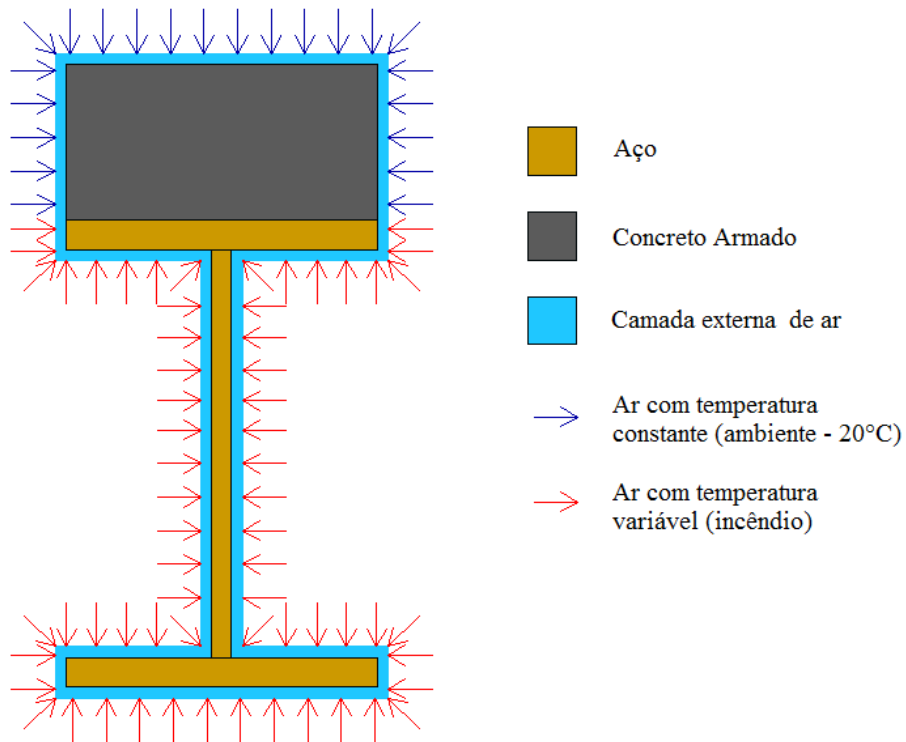


Figura 7.1 – Esquema geral do modelo adotado para análise via ANSYS (2007) - Perfis sem revestimento.

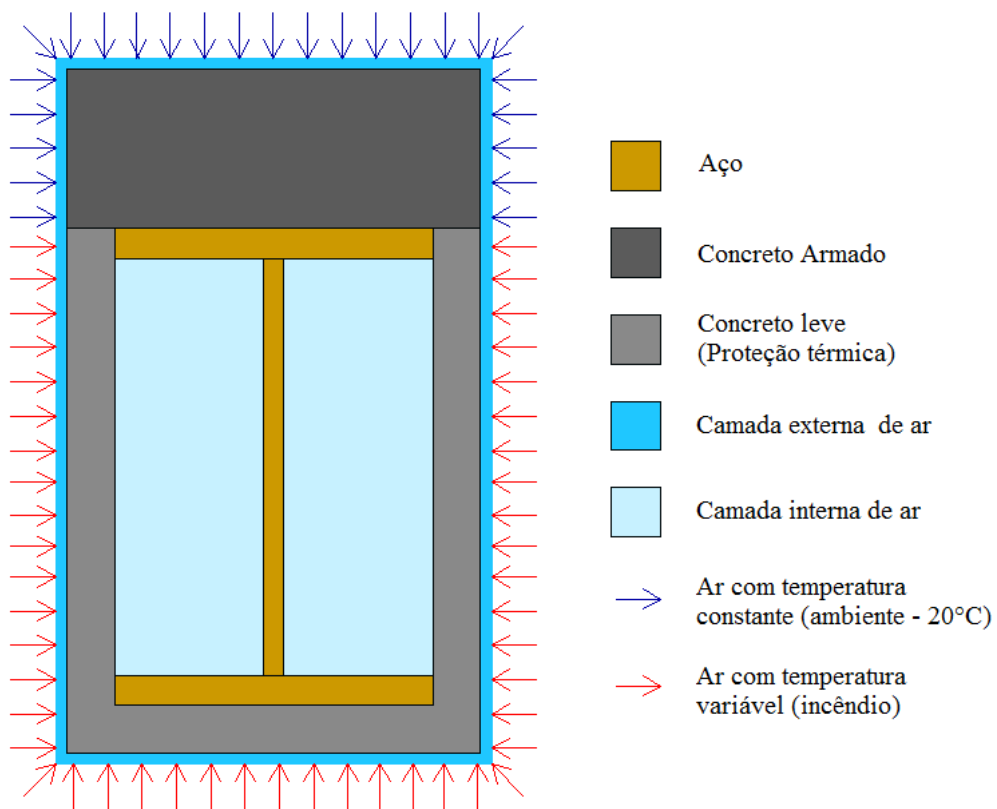


Figura 7.2 – Esquema geral do modelo adotado para análise via ANSYS (2007) - Perfis com revestimento.



### 7.3 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

Para gerar a malha, foi feito um arquivo de entrada (tipo txt), com as coordenadas referentes aos modelos estruturais, para ser lido pelo programa ANSYS (2007).

Com o intuito de facilitar a definição dos nós da geometria da estrutura, todos os casos foram modelados manualmente no programa computacional STAAD.Pro (2007), que é um programa de modelagem de estruturas de aço. Esse programa tem a opção de se extrair, no arquivo de saída, as coordenadas da estrutura já modelada. Esse arquivo de saída se tornou, então, parte do arquivo de entrada do ANSYS (2007), já com todos os nós definidos. Além desse arquivo de entrada do ANSYS (2007) possuir toda a geometria da estrutura (perfis de aço, concreto, proteção térmica e camadas de ar interna e externa), ele também contém as propriedades dos materiais (variando ou não com a temperatura) e os passos de tempo com suas respectivas temperaturas.

Com esse arquivo de entrada, já com as coordenadas definidas, ficou muito mais fácil controlar possíveis erros de geometria, fazer mudanças necessárias e localizar nós estratégicos para aplicação das temperaturas do incêndio.

### 7.4 – ELEMENTO FINITO UTILIZADO

O software ANSYS (2007) possui uma grande quantidade de elementos 1-D, 2-D e 3-D para serem utilizados nos diversos tipos de análises, de acordo com o objetivo do usuário. Para as aplicações de análise térmica (estacionária ou transiente), esse programa computacional oferece ao usuário aproximadamente quarenta elementos.

A Tabela 7.3 apresenta os principais elementos finitos utilizados no ANSYS (2007) para análises térmicas (estacionária ou transiente) bidimensionais. Esses elementos possuem um único grau de liberdade que corresponde à temperatura em cada nó.

Tabela 7.3 – Elementos planos para análise térmica.

Elemento	Característica
PLANE35	Triangular - 6 nós
PLANE55	Quadrilateral - 4 nós
PLANE77	Quadrilateral - 8 nós

Dentre opções de elementos, para as análises térmicas feitas nesse estudo, foi escolhido o elemento PLANE55. Essa escolha foi feita para facilitar a geometria da malha e de modo que o modelo em elementos finitos não se tornasse muito carregado. Esse elemento, além de ser definido por quatro nós com um grau de liberdade em cada (temperatura nodal), também é determinado pela área transversal e pelas seguintes propriedades do material:

- Densidade do material – DENS;
- Condutividade térmica – KXX;
- Calor específico – C.

O PLANE55 pode ser utilizado como elemento plano ou com simetria axial, nesse último caso, tendo capacidade térmica bidimensional em análises térmicas estacionárias ou transientes. A Figura 7.3 ilustra a geometria, os nós e o sistema de coordenadas do elemento PLANE55. Ele tem a opção de geometria triangular que é permitida quando dois nós coincidem.

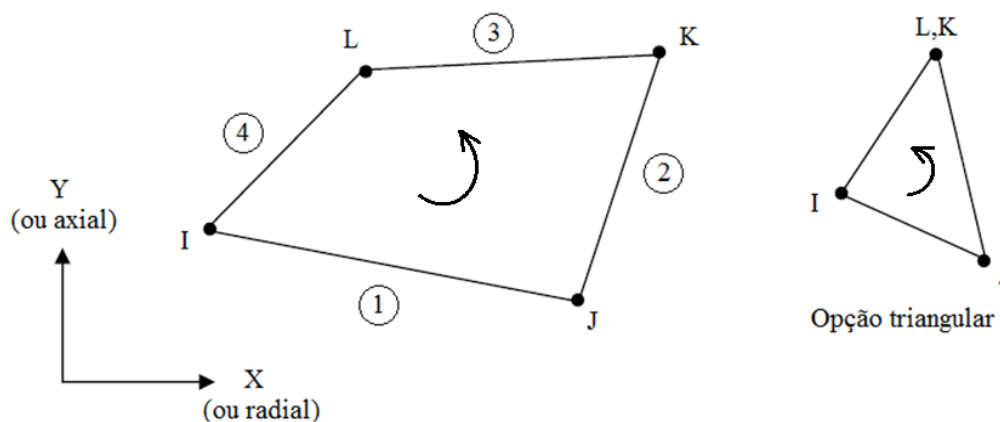


Figura 7.3 – Elemento finito PLANE55.

No sistema de coordenadas local, o eixo x é orientado ao longo do elemento com sentido do nó I para o nó J. Já nos casos em que o elemento for utilizado com simetria axial, deve-se considerar o eixo y como o eixo de simetria. Para se utilizar esse elemento, algumas restrições devem ser assumidas, como:

- O elemento deve ter sua área diferente de zero;
- O elemento deve situar-se em um plano xy;

- Um elemento triangular pode ser gerado a partir do elemento quadrangular se dois de seus nós forem iguais.

As características do problema em análise são definidas através de chaves de opção (KEYOPT) que estão disponíveis no ANSYS (2007). Os KEYOPTs disponíveis para o elemento PLANE55 são:

- KEYOPT (1): Avalia o coeficiente de convecção de acordo com as temperaturas da superfície ambiente;
  - 0 – Coeficiente de convecção ligado à média de temperaturas;
  - 1 – Coeficiente de convecção ligado à temperatura da superfície;
  - 2 – Coeficiente de convecção ligado à temperatura do ambiente;
  - 3 – Coeficiente de convecção ligado à diferença de temperaturas.
- KEYOPT (3): Define se o elemento é plano ou simétrico axialmente;
  - 0 – Plano;
  - 1 – Simetria axial.
- KEYOPT (4): Define se o sistema de coordenadas é local ou global;
  - 0 – Sistema de coordenadas do elemento paralelo ao global;
  - 1 – Sistema de coordenadas do elemento baseado no lado I-J.
- KEYOPT (8): Permite levar em consideração a ocorrência de fluxos de calor com transporte de massa em um campo de velocidades constantes;
  - 0 – Não há efeitos de transporte de massa;
  - 1 – Transporte de massa nas direções x e /ou y;
  - 2 – Fluxo de calor com transporte de massa.
- KEYOPT (9): Altera o elemento do modelo de transferência de calor convencional para um sistema análogo a um fluxo estacionário não-linear de fluido, onde o grau de liberdade de temperatura é interpretado como pressão.
  - 0 – Elemento com transferência de calor convencional;
  - 1 – Elemento com características de fluxo de fluido em regime estacionário não linear.

A Tabela 7.4 apresenta um esquema de entrada de dados do elemento PLANE55.

Tabela 7.4 – Resumo de entrada – PLANE55.

Propriedades	Especificação
Nome do elemento	PLANE55
Nós	I,J,K,L
Graus de liberdade	TEMP = temperatura
Forças nodais	Inexistentes
Forças de superfície	Convecção nas faces 1 (J-I), 2 (K-J), 3 (L-K), 4 (I-L)
	Fuxo de calor nas faces 1 (J-I), 2 (K-J), 3 (L-K), 4 (I-L)
Forças no corpo	Geração de calor HG (I), HG (J), HG (K), HG (L)
Propriedades dos materiais	DENS = Densidade (de todos os materiais)
	KXX, KYY = Condutividade térmica (de todos os materiais)
	C = Calor específico (de todos os materiais)

## 7.5 – CARGA TÉRMICA UTILIZADA

Em suas análises térmicas, o ANSYS (2007) disponibiliza cargas que podem ser aplicadas nos nós ou nos elementos:

- Cargas Nodais: Cargas térmicas diretamente associadas ao grau de liberdade dos nós;
- Cargas nos elementos: Cargas térmicas definidas como forças de superfície, de corpo ou de inércia sempre ligadas ao elemento. Este tipo de carga pode ser especificada em diferentes tipos, como por exemplo:
  - Temperaturas constantes: graus de liberdade restritos, especificados nas condições de contorno como nós com temperatura imposta fixa;
  - Convecção: Cargas de superfície aplicadas na face externa do modelo para levar em consideração o calor ganho ou perdido em relação a um fluido externo;
  - Fluxos de calor: Cargas de superfície utilizadas quando o montante de calor trocado por uma superfície é conhecido ou calculado por meio de uma análise FLOTRAN CFD;

- Taxa de geração de calor: Forças de corpo que representam o calor gerado dentro de um elemento, como por exemplo, uma reação química ou corrente elétrica.

Nas simulações numéricas desse trabalho foram consideradas as cargas nodais. Se as duas condições (cargas nodais e cargas nos elementos) forem inseridas no mesmo problema em análise, o programa irá considerar apenas a última condição especificada.

## **7.6 – CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA**

No ANSYS (2007), alterando o grau de precisão desejado na solução, é possível se determinar as condições de não linearidade do problema. Assim sendo, o número de iterações de equilíbrio e a tolerância de convergência podem ser modificadas. Em relação à tolerância de convergência, o ANSYS (2007) considera que uma solução não linear convergiu, quando um determinado critério de convergência foi atingido. Esta verificação pode se basear na temperatura, no fluxo de calor ou em ambos, desde que seja especificado um valor característico para a grandeza em questão e uma tolerância sobre o mesmo. Com isso, o critério de convergência é dado pelo produto deste valor característico e a sua tolerância.

Para o critério de convergência ser atingido baseado na temperatura, o ANSYS (2007) compara a variação de temperatura de um passo para o passo imediatamente anterior em todos os nós. Somente após esta variação ser menor que o critério de convergência em todos os nós, considera-se, então, que a solução do problema convergiu.

## 8 – APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS

### 8.1 – INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, serão apresentados estudos feitos no programa computacional ANSYS (2007), simulando diversos casos de perfis I de aço, com e sem proteção térmica, em situações de incêndio. As temperaturas obtidas, em cada passo de tempo do incêndio em questão, foram atribuídas e relacionadas à formulação analítica proposta nesse trabalho, à formulação proposta por Silva (1992) e às recomendações normativas, de modo a se comparar as cargas críticas resultantes. Ou seja, são feitas as comparações entre as seguintes equações:

- Equação (5.124): Formulação analítica com solução fechada proposta no presente trabalho. Determina a carga crítica em vigas “I” submetidas a situações de incêndio com carga uniformemente distribuída, considerando o aquecimento desigual das mesas superior e inferior;
- Equação (6.17): Formulação analítica proposta por Silva (1992) inicialmente para um caso de temperatura ambiente, porém agora, adaptada para um caso de incêndio. Determina a carga crítica em vigas “I” com carga uniformemente distribuída, considerando o aquecimento desigual das mesas superior e inferior;
- Equação (2.33): Equação formulada e recomendada pelas normas brasileiras NBR 8800:1986 e NBR 14323:1999 para o estado limite de FLT. Determina a carga crítica em vigas “I” com carga uniformemente distribuída, considerando uma distribuição uniforme de temperatura nos elementos estruturais em situação de incêndio.

Os perfis selecionados para estudo já foram apresentados na Tabela 7.1, assim como todos os casos de simulação também foram apresentados na Tabela 7.2. Esses casos serão apresentados novamente nas Tabelas 8.1 e 8.2, respectivamente, sem e com proteção contra incêndio:

Tabela 8.1 – Casos de estudo: sem proteção térmica.

Caso	Perfil	Incêndio	Carga de Incêndio (MJ/m <sup>2</sup> )	Grau de Ventilação (m <sup>1/2</sup> )
1.a	CVS 300x85 (sem revestimento)	1	300	0,04
2.a	VS 400x68 (sem revestimento)	2	500	0,08
3.a	VS 550x88 (sem revestimento)	2	500	0,08
4.a	CVS 600x210 (sem revestimento)	3	600	0,12

Tabela 8.2 – Casos de estudo: com proteção térmica.

Caso	Perfil	Incêndio	Carga de Incêndio (MJ/m <sup>2</sup> )	Grau de Ventilação (m <sup>1/2</sup> )
1.b	CVS 300x85 (com revestimento)	1	300	0,04
2.b	VS 400x68 (com revestimento)	2	500	0,08
3.b	VS 550x88 (com revestimento)	2	500	0,08
4.b	CVS 600x210 (com revestimento)	3	600	0,12

Para se obter a temperatura da mesa superior e inferior, em cada passo de tempo, foram escolhidos três elementos estratégicos de cada mesa, fazendo a média entre os mesmos. Para cada temperatura média obtida, foi determinado o fator de redução  $K_{E,\theta}$  do módulo de elasticidade correspondente e inserido no cálculo da carga crítica referente às equações (5.124) e (6.17).

No caso da equação (2.33), para se obter a temperatura uniforme do aço, foram utilizadas as equações (4.23) e (4.24) para os perfis sem proteção térmica e com proteção térmica, respectivamente. Para cada temperatura obtida, em cada passo de tempo, também foi determinado o fator de redução  $K_{E,\theta}$  do módulo de elasticidade correspondente e inserido no cálculo da carga crítica.

## 8.2 – CASO 1: PERFIL “I” CVS 300 X 85 – INCÊNDIO 1

O incêndio natural adotado para o Caso 1 foi o Incêndio 1, cujo o grau de ventilação vale  $0 = 0,04 \text{ m}^{1/2}$  e a carga de incêndio específica vale  $300 \text{ MJ/m}^2$ . A duração desse incêndio é de 9910 segundos (165,17 minutos) e sua curva está apresentada na Figura 8.1:

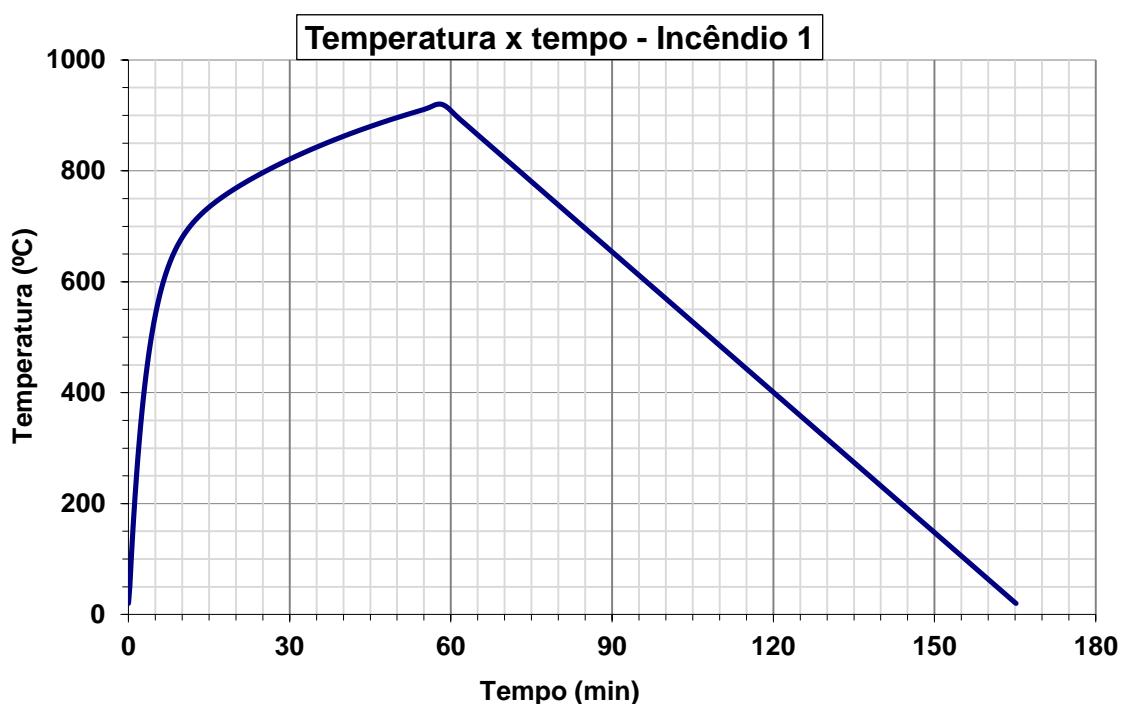


Figura 8.1 – Incêndio natural 1.

A duração do Incêndio 1 foi dividida em 87 passos com intervalos variando de 10 a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas. Para se testar a convergência da resposta a cada instante, foram utilizados subpassos de até 0,5 segundo.

A Tabela 8.3 apresenta as propriedades geométricas do perfil de aço CVS 300 x 85 adotado para esse caso:

Tabela 8.3 – Propriedades geométricas do perfil CVS 300 x 85.

Perfil	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	M (kg/m)
CVS 300x85	300	200	19,0	12,5	109,0	85,4



Foram escolhidos elementos estratégicos de cada mesa e da alma de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média de cada trecho, em cada passo de tempo. Para o perfil CVS 300 x 85 foram escolhidos os elementos: 8321, 8664 e 8414 (mesa inferior); 8607 e 8550 (alma); 8675, 8494 e 8340 (mesa superior). A Figura 8.1 apresenta esses elementos selecionados:

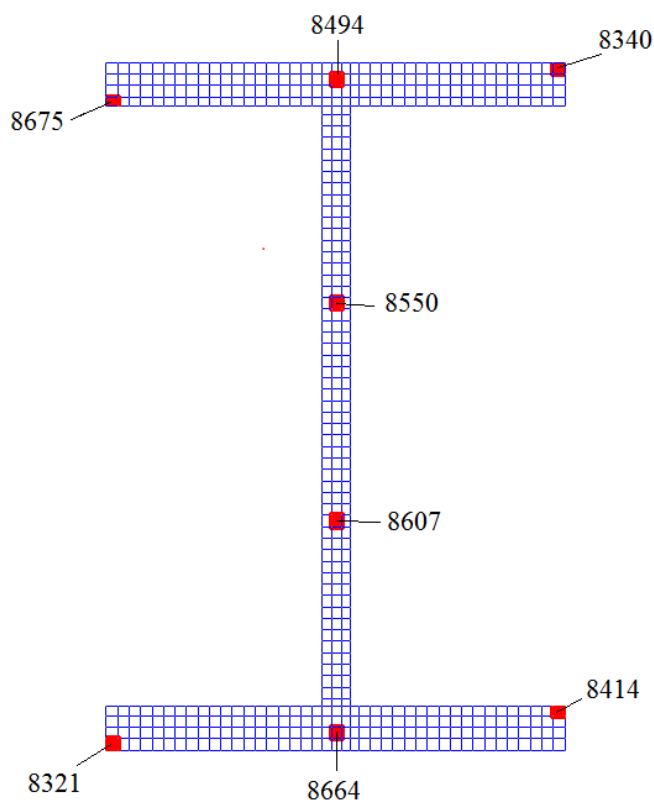


Figura 8.2 – Localização dos elementos selecionados para o perfil CVS 300 x 85.

### 8.2.1 – Perfil sem proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 1 sem proteção térmica é constituída do perfil de aço CVS 300 x 85, do material refratário sobreposto à mesa superior e da camada de ar envolvente, conforme o esquema geral apresentado na Figura 7.1. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 1368 nós e 1205 elementos.

A camada de ar que envolve o perfil de aço tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. Já a camada

de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Nas Figuras 8.3 até 8.10 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

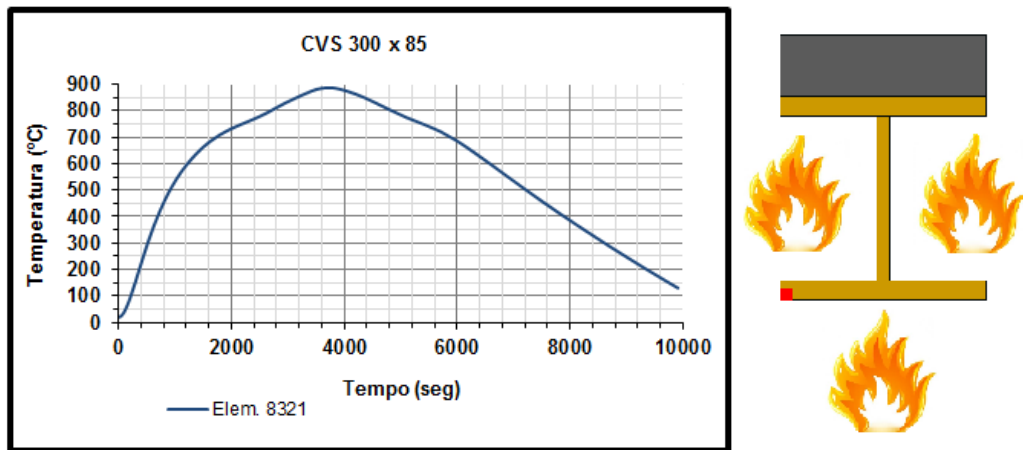


Figura 8.3 – Temperaturas do elemento 8321 ao longo do incêndio.

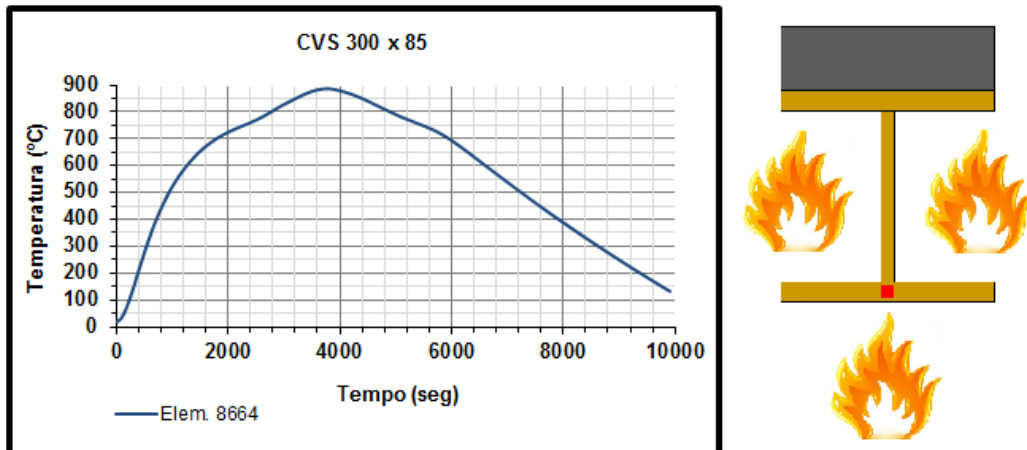


Figura 8.4 – Temperaturas do elemento 8664 ao longo do incêndio.

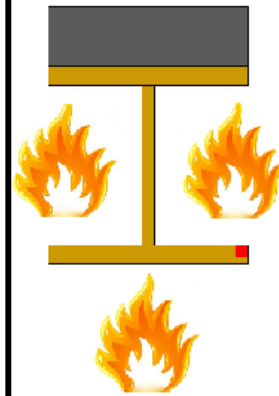
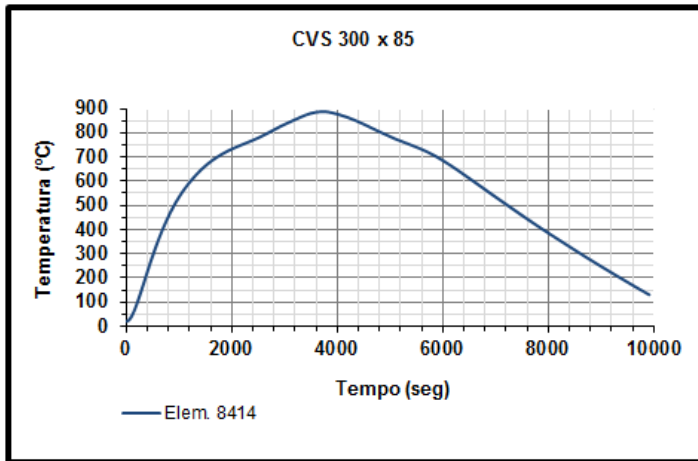


Figura 8.5 – Temperaturas do elemento 8414 ao longo do incêndio.

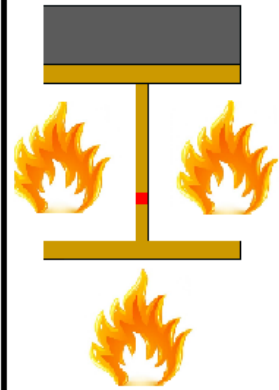
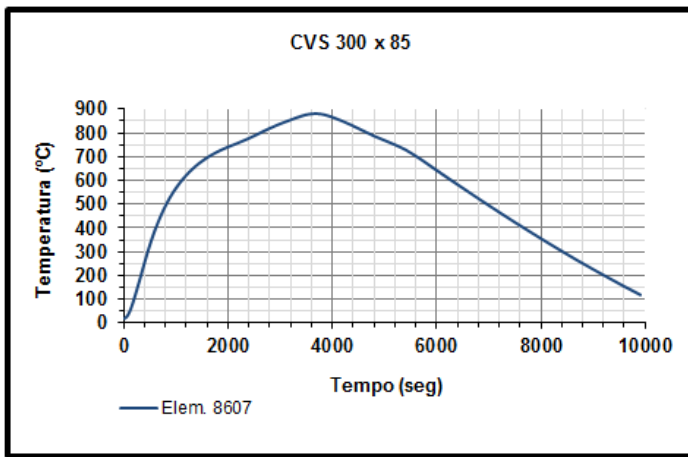


Figura 8.6 – Temperaturas do elemento 8607 ao longo do incêndio.

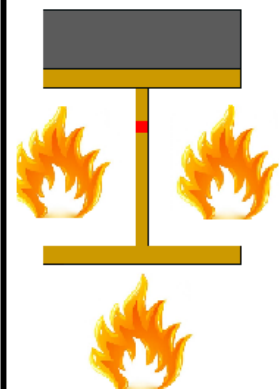
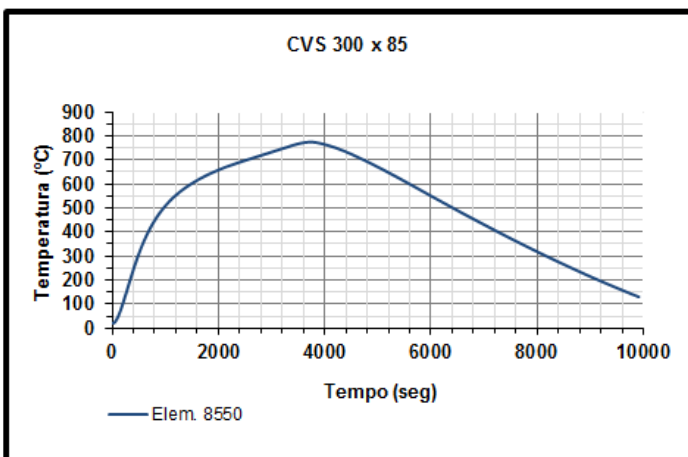


Figura 8.7 – Temperaturas do elemento 8550 ao longo do incêndio.

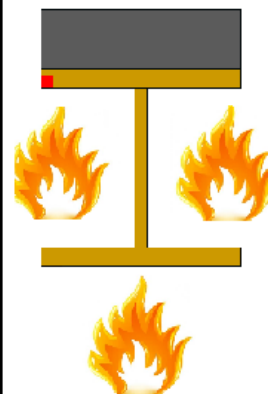
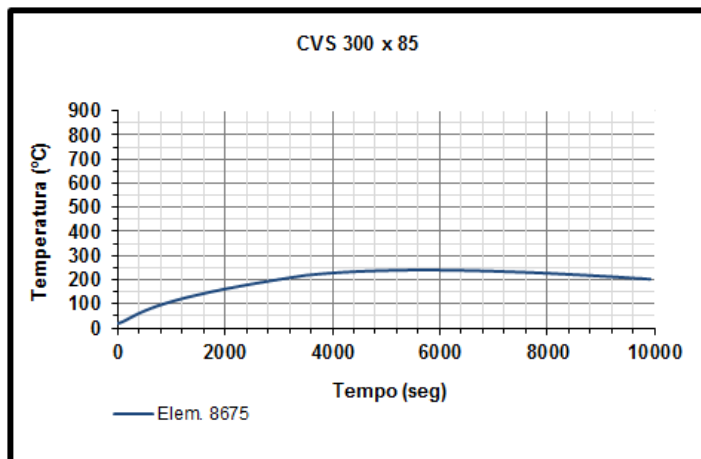


Figura 8.8 – Temperaturas do elemento 8675 ao longo do incêndio.

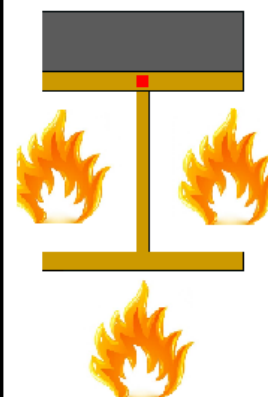
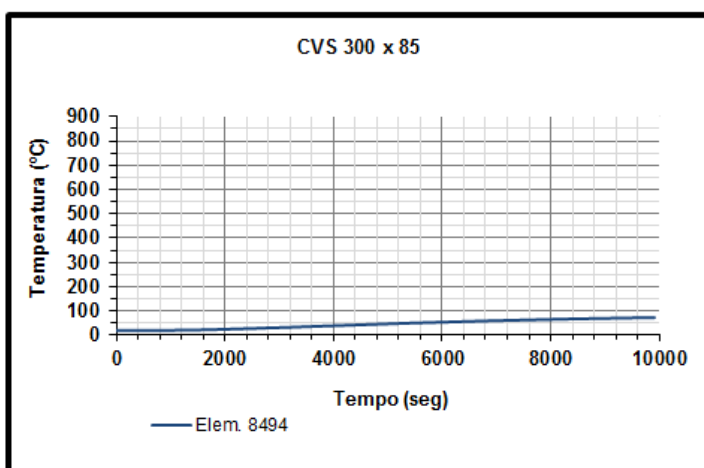


Figura 8.9 – Temperaturas do elemento 8494 ao longo do incêndio.

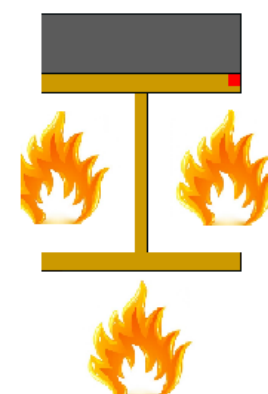
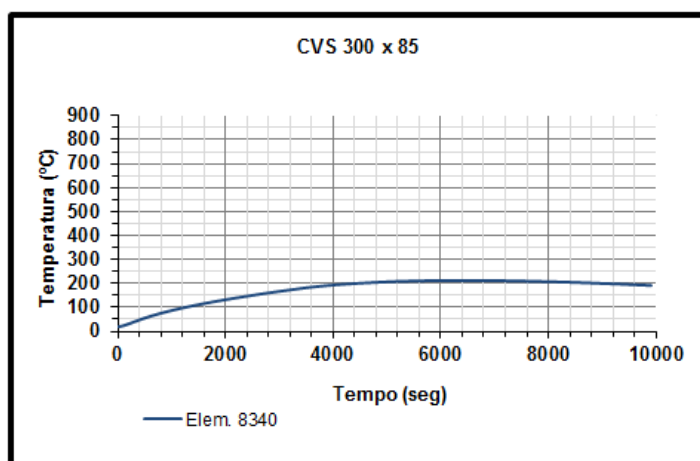


Figura 8.10 – Temperaturas do elemento 8340 ao longo do incêndio.

A Figura 8.11 mostra o gráfico que faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

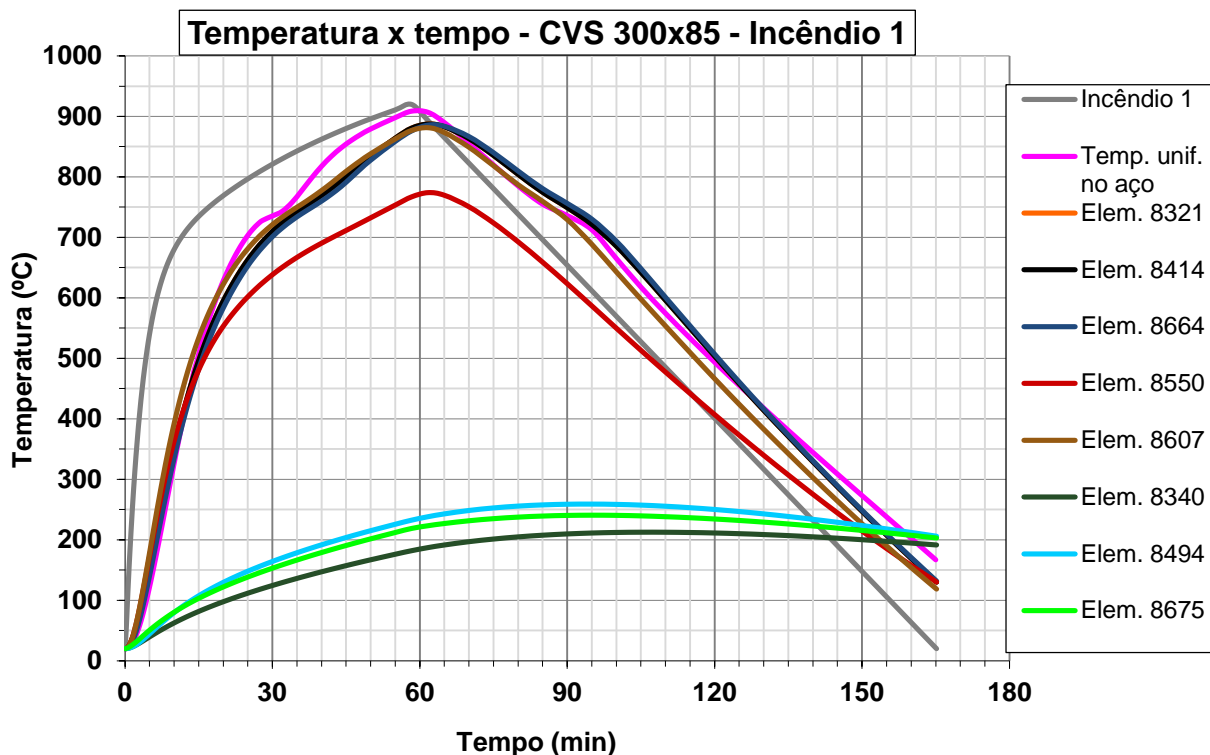


Figura 8.11 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 85.

Percebe-se que as temperaturas da mesa superior são bem menores que as temperaturas da mesa inferior. Isso se deve ao fato de a mesa inferior estar mais exposta às chamas do que a mesa superior, já que esta possui uma laje de concreto sobreposta. Os elementos 8321, 8664 e 8414 (elementos da mesa inferior) apresentam seus comportamentos, no desenvolvimento da temperatura, tão similares que a diferença de suas curvas é praticamente imperceptível. Observa-se também que as temperaturas da mesa inferior e da alma estão mais próximas das temperaturas do incêndio natural e das temperaturas de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.12 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

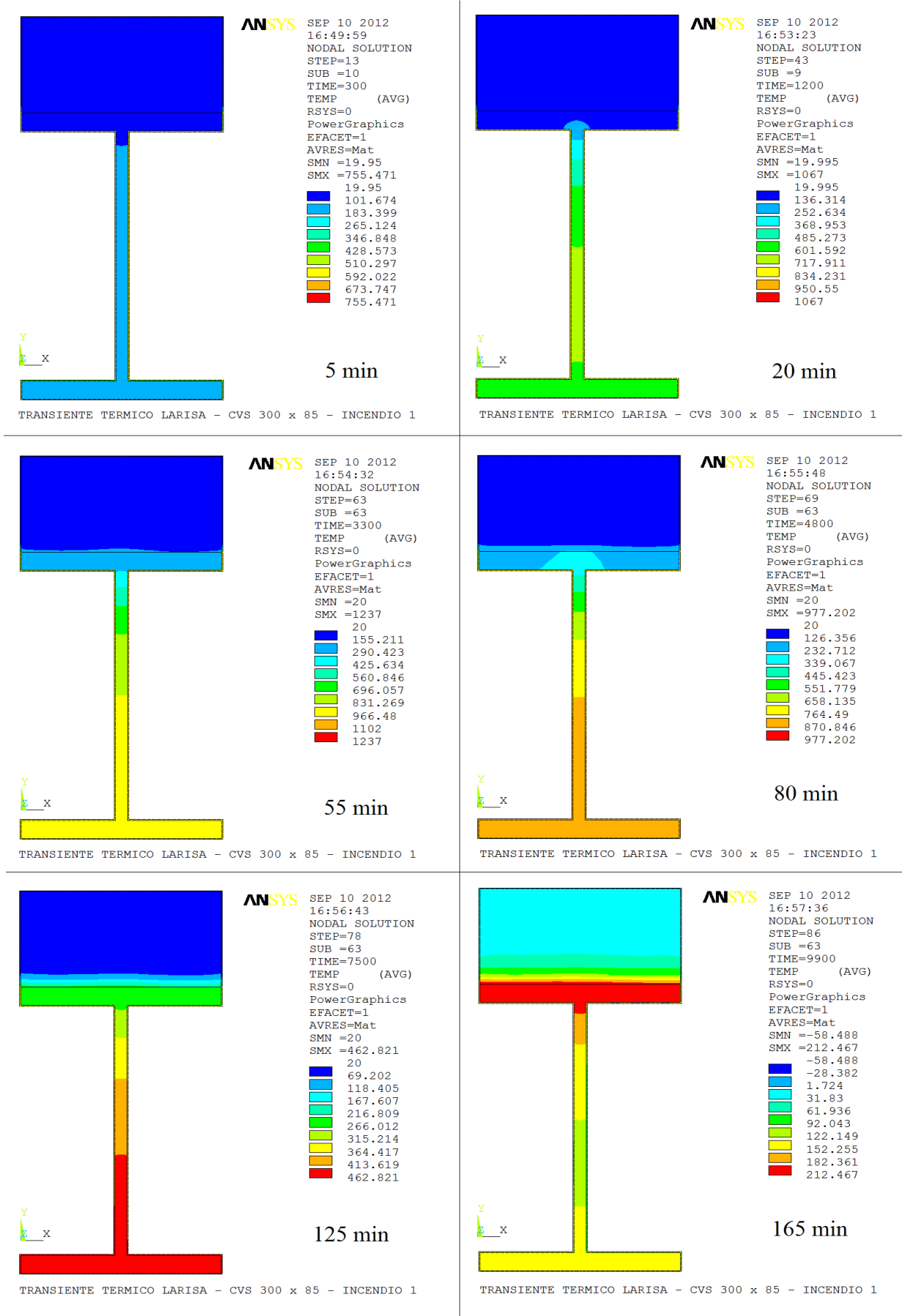


Figura 8.12 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 85 - ANSYS (2007).

### 8.2.1.1 – Determinação da carga crítica

Como já foi dito, foram escolhidos elementos estratégicos de cada trecho da seção transversal de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média. Como a alma tem uma contribuição desprezível para a flexão lateral da viga, considera-se apenas as contribuições das mesas 1 (mesa superior) e 2 (mesa inferior) no cálculo da carga crítica uniformemente distribuída através da formulação analítica proposta nesse trabalho. Com isso, é calculado um novo módulo de elasticidade apenas em cada mesa, a cada passo de tempo. Na Figura 8.13 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 1 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

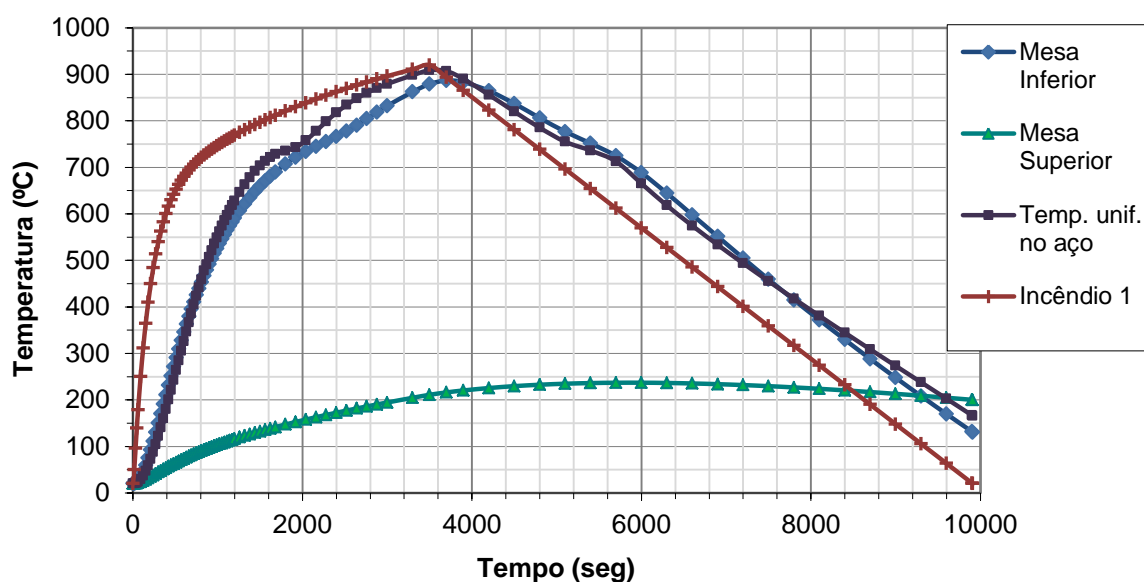


Figura 8.13 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 300 x 85.

Observando as significativas diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior durante o incêndio na Figura 8.13, é importante ressaltar esse fato para as investigações térmicas nos perfis e considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal.

Para o Caso 1 foram calculadas as cargas críticas uniformemente distribuídas de acordo com a formulação analítica proposta nesse trabalho, com a formulação proposta por Silva (1992) e de acordo com as recomendações normativas. Para isso, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade do aço para temperatura ambiente (20°C):  $E_0 = 20.500 \text{ kN/cm}^2$ ;
- Fator de redução para o módulo de elasticidade  $K_{E,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Fator de redução para o limite de escoamento dos aços  $K_{y,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- Tensão de escoamento do aço para temperatura ambiente (20°C):  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ ;
- A esbeltez  $\lambda$  deve apresentar valor maior que a esbeltez para início de escoamento  $\lambda_r$  para caracterizar que a viga esteja em estado de flexão lateral com flexo-torção (FLT) em regime elástico.

Considerando  $\lambda > \lambda_r$ , define-se o comprimento da viga sem travamento lateral que, para o perfil CVS 300 x 85, foi de 14 metros.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil CVS 300 x 85 submetido ao Incêndio 1 foi calculada para as formulações já mencionadas a cada passo de tempo. Na Figura 8.14 é apresentado o gráfico comparativo entre as três soluções estudadas:

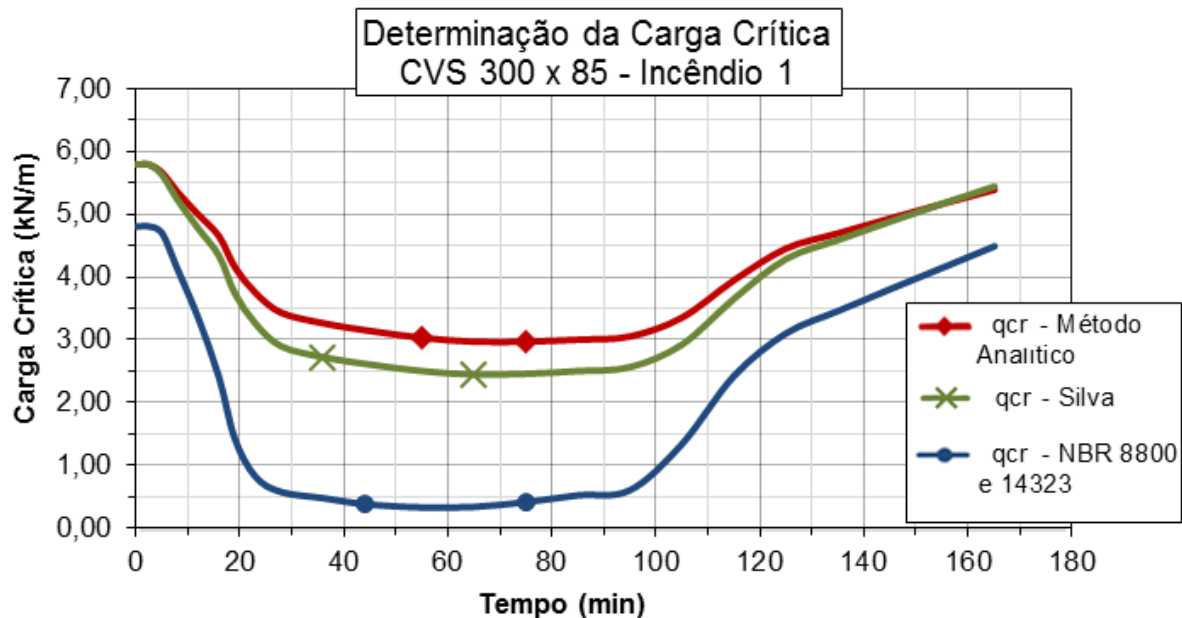


Figura 8.14 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1.



A Tabela 8.4 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos métodos propostos:

Tabela 8.4 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.

<b>Caso 1 (Sem proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0	4,8	5,79	5,79
0,5	4,8	5,79	5,79
2,5	4,8	5,79	5,79
5	4,7	5,66	5,63
8	4,12	5,35	5,23
12	3,34	4,99	4,77
16	2,39	4,65	4,33
19	1,42	4,16	3,74
23	0,81	3,75	3,25
28	0,57	3,43	2,89
36	0,48	3,26	2,72
44	0,38	3,15	2,62
55	0,33	3,03	2,5
65	0,34	2,97	2,45
75	0,41	2,97	2,46
85	0,52	3	2,5
95	0,6	3,05	2,56
105	1,34	3,35	2,92
115	2,42	3,95	3,65
125	3,1	4,45	4,28
135	3,46	4,69	4,59
145	3,8	4,93	4,88
155	4,14	5,16	5,16
165	4,48	5,38	5,44
165,17	4,49	5,39	5,44

Na Figura 8.14, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação apresentada por Silva (1992), observa-se que no início e final do incêndio (onde a temperatura é ambiente) as formulações são praticamente idênticas em seus resultados. Na medida em que se tem um aumento de temperatura, essa diferença se intensifica, e a medida que há um resfriamento (tendendo à temperatura ambiente novamente), essa diferença diminui. É verificado, então, que essas duas formulações são bastante próximas, mesmo seguindo caminhos diferentes em seus desenvolvimentos.

Ainda na Figura 8.14, analisando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho e através das recomendações normativas, observa-se que a carga crítica uniformemente distribuída proposta pelas normas brasileiras é extremamente conservadora. Em todos os momentos do incêndio, os valores referentes às normas brasileiras são sempre inferiores aos obtidos pelo método analítico proposto nesse estudo. Mesmo no início e no fim do incêndio, quando as temperaturas são ambientes ( $20^{\circ}\text{C}$ ) e o fato da influência do aquecimento ser desigual entre as mesas não interferir de fato, essa diferença já se mostra significativa. Por conseguinte, quando há o aumento da temperatura no incêndio, como a formulação analítica aqui proposta considera o aquecimento desigual das mesas e a formulação proposta pelas normas brasileiras considera um aquecimento uniforme do aço, essa diferença aumenta consideravelmente.

### **8.2.2 – Perfil com proteção térmica**

A geometria da seção transversal do Caso 1 com proteção térmica é constituída do perfil de aço CVS 300 x 85, do material refratário sobreposto à mesa superior, do revestimento de proteção térmica de concreto leve e da camada de ar envolvente, conforme o esquema geral apresentado na Figura 7.2. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 4481 nós e 4345 elementos.

A camada de ar que envolve o revestimento térmico tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. Já a camada de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$ . Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Como já mencionado, a duração do Incêndio 1, que foi de 9910 segundos, foi dividida em 87 passos. Porém, para o Caso 1 com proteção térmica, ao final do incêndio, a maioria dos elementos da seção transversal do perfil ainda estava atingindo sua temperatura máxima. Sendo assim, foram feitos passos adicionais para se obter a fase de resfriamento dos mesmos, se obtendo uma segurança numérica. Assim, para esse caso, foram feitos 126 passos totalizando em 48900 segundos.

Nas Figuras 8.15 até 8.22 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

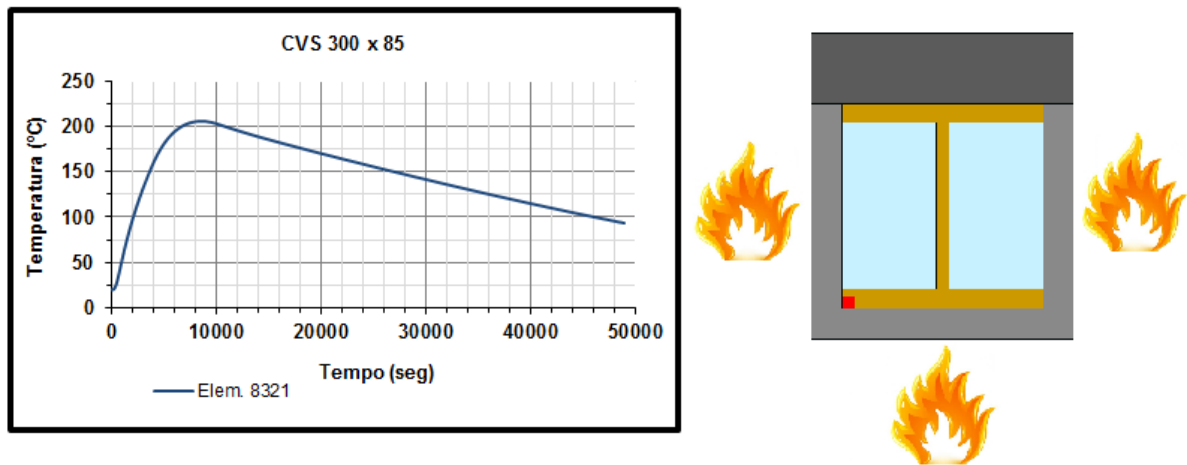


Figura 8.15 – Temperaturas do elemento 8321 ao longo do incêndio.

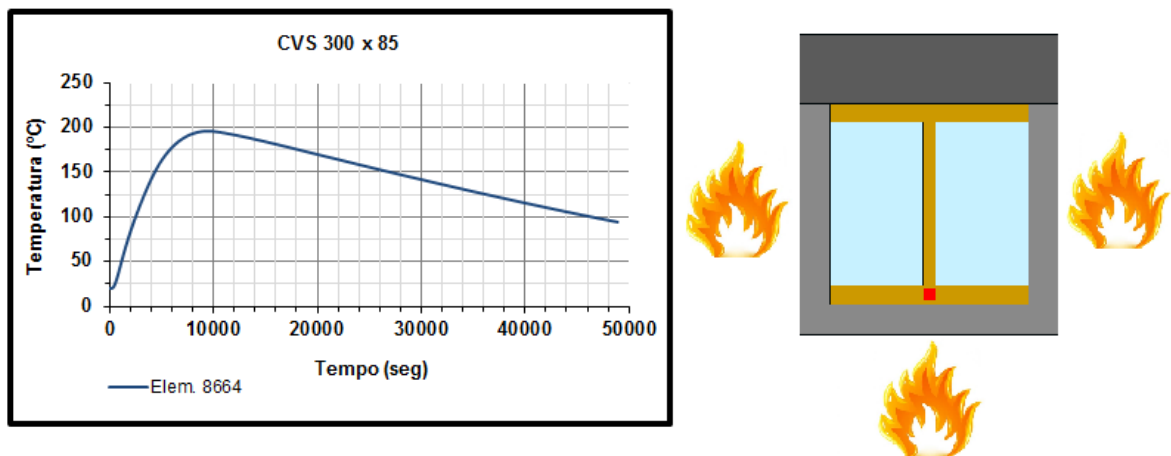


Figura 8.16 – Temperaturas do elemento 8664 ao longo do incêndio.

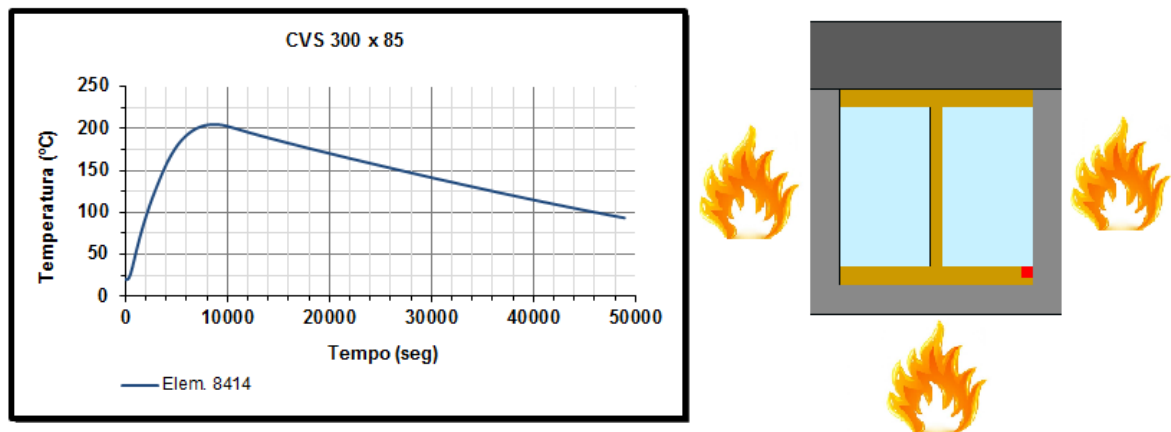


Figura 8.17 – Temperaturas do elemento 8414 ao longo do incêndio.

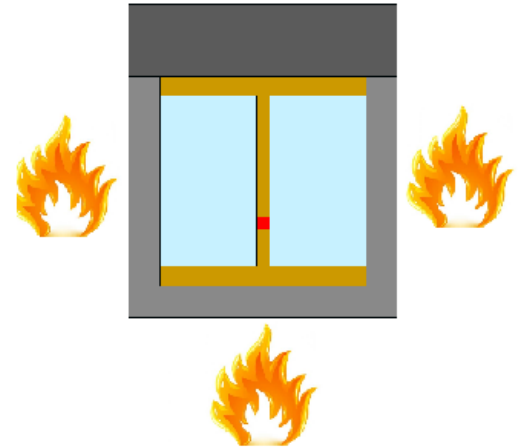
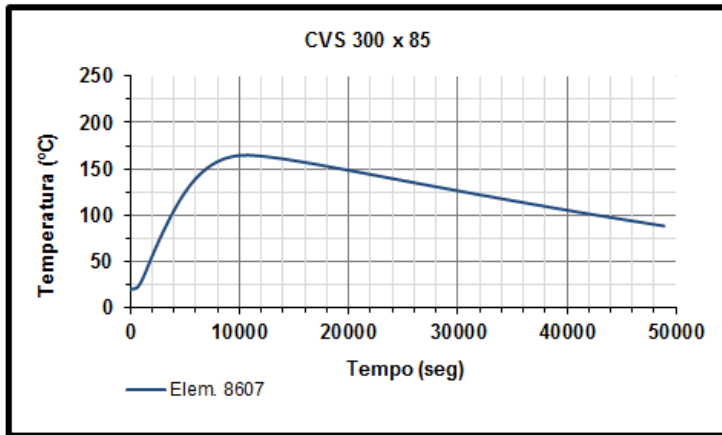


Figura 8.18 – Temperaturas do elemento 8607 ao longo do incêndio.

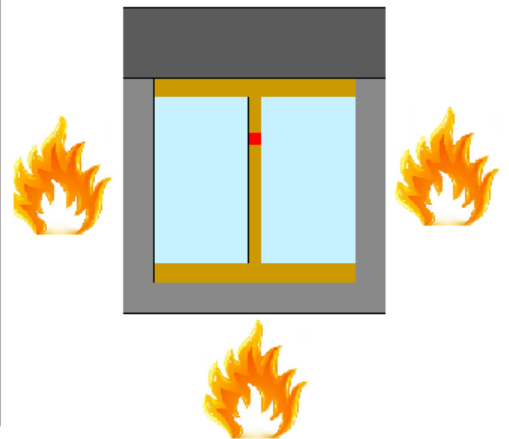
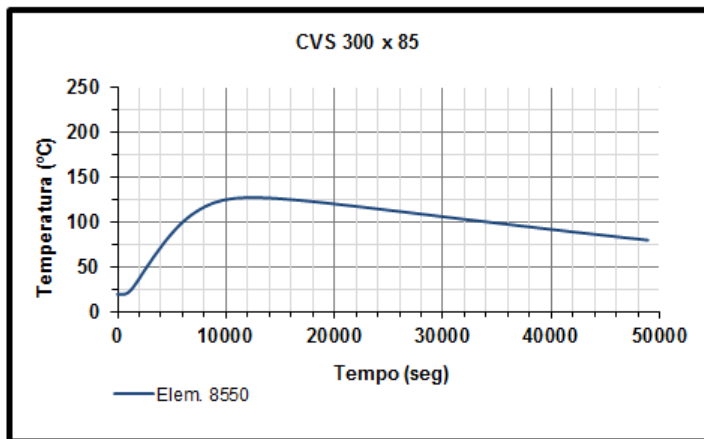


Figura 8.19 – Temperaturas do elemento 8550 ao longo do incêndio.

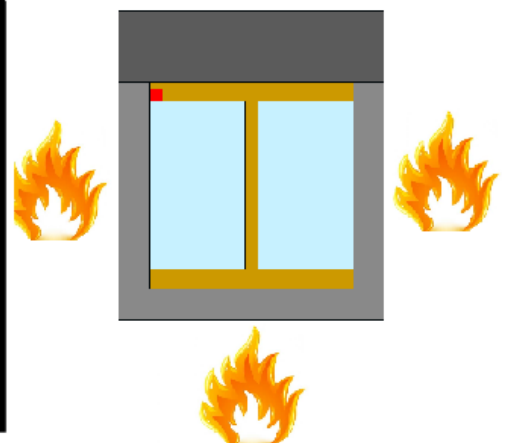
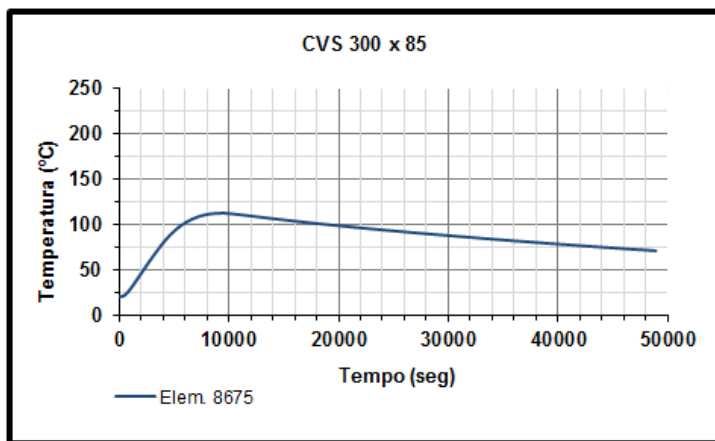


Figura 8.20 – Temperaturas do elemento 8675 ao longo do incêndio.

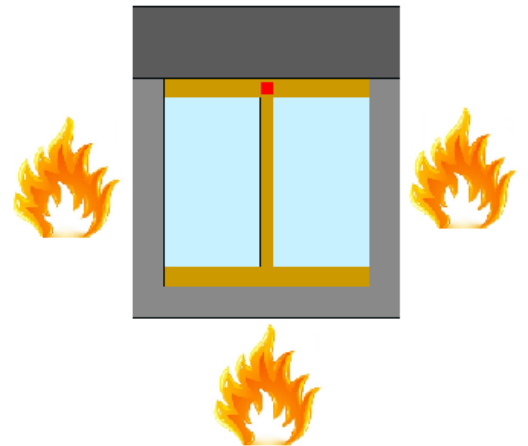
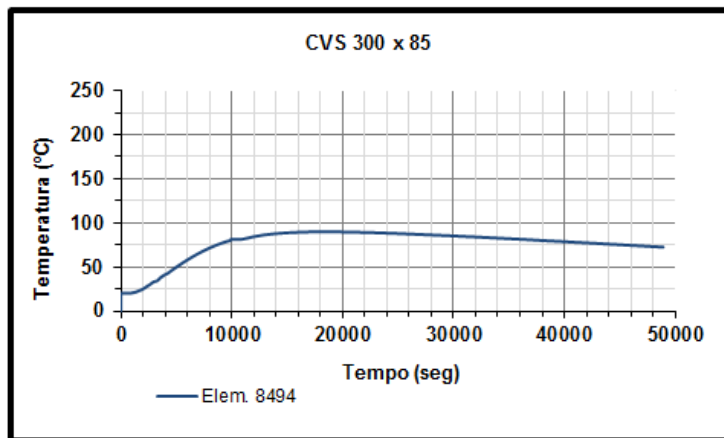


Figura 8.21 – Temperaturas do elemento 8494 ao longo do incêndio.

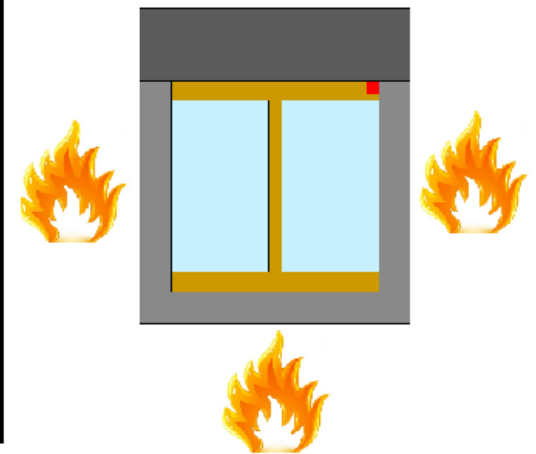
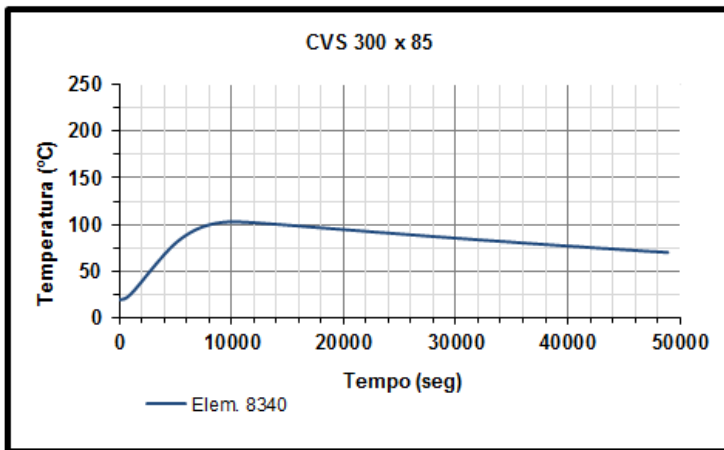


Figura 8.22 – Temperaturas do elemento 8340 ao longo do incêndio.

A Figura 8.23 mostra o gráfico que faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

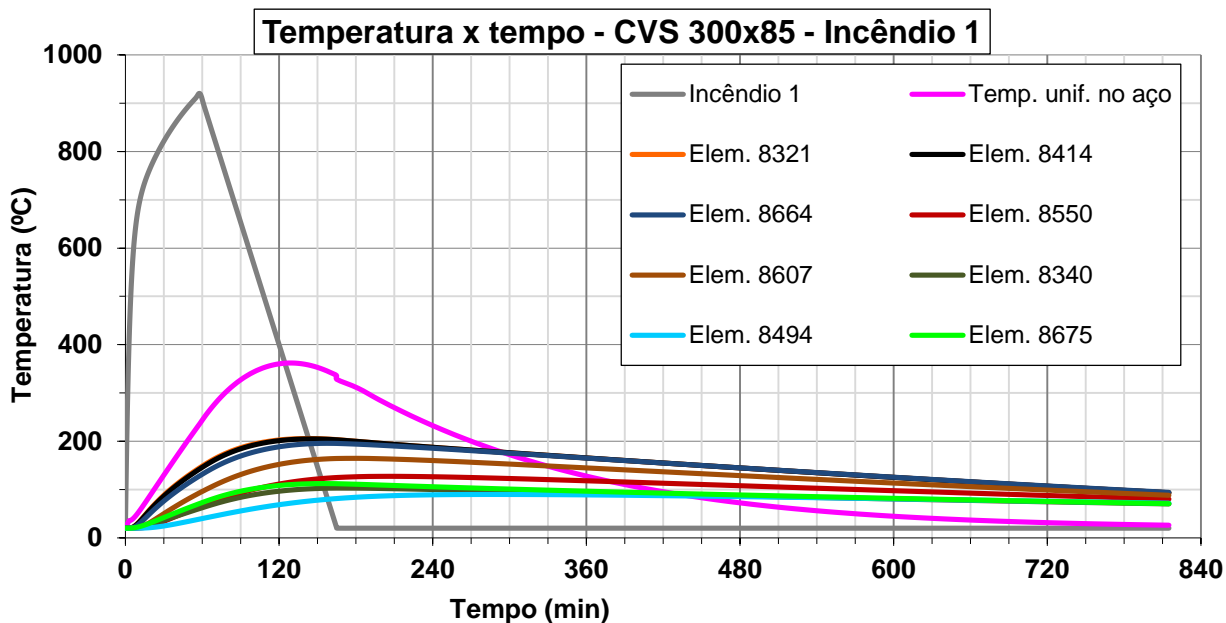
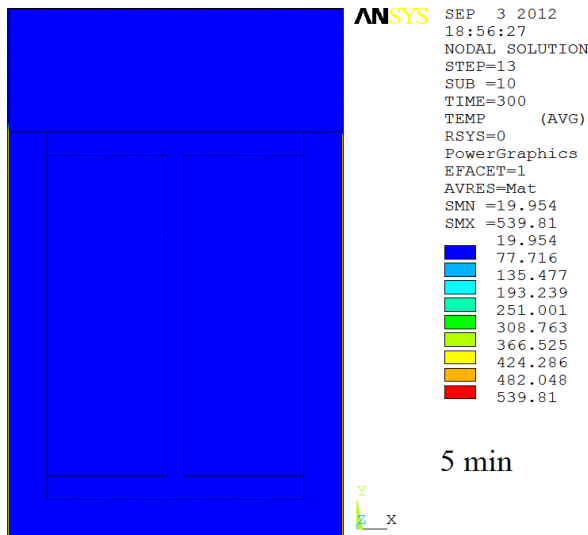


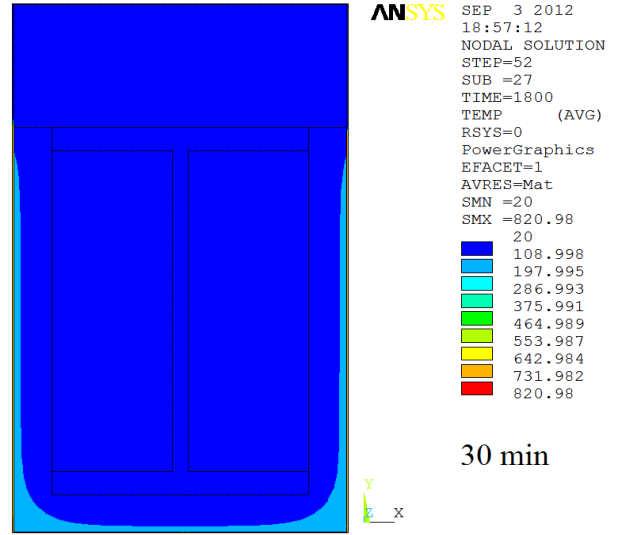
Figura 8.23 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 85.

Percebe-se que as temperaturas da mesa superior são bem menores que as temperaturas da mesa inferior. Isso se deve ao fato de a mesa inferior estar mais exposta às chamas do que a mesa superior, já que esta possui uma laje de concreto sobreposta. Comparando-se as temperaturas dos elementos com a curva de Incêndio 1, percebe-se que elas estão muito abaixo dos valores atingidos pelo incêndio. Isso se deve ao fato da existência de um revestimento de concreto que protege o perfil de aço das chamas do incêndio, sendo ele em menos aquecido. Observa-se também que, por volta do instante de 120 minutos (auge das temperaturas no aço), as temperaturas dos elementos estão bem abaixo da curva de aquecimento uniforme do aço.

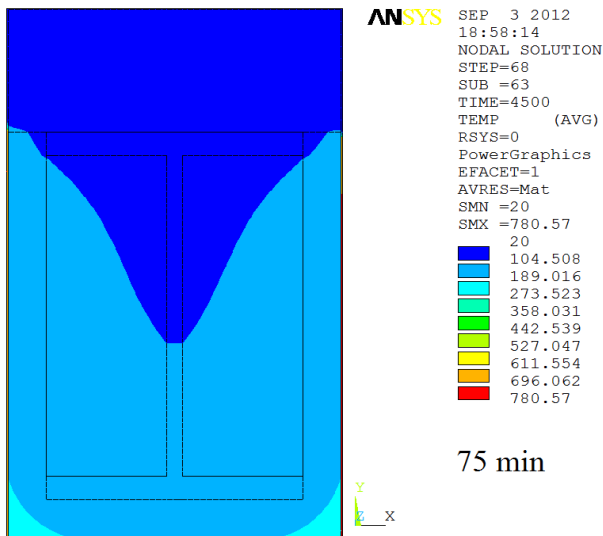
A Figura 8.24 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:



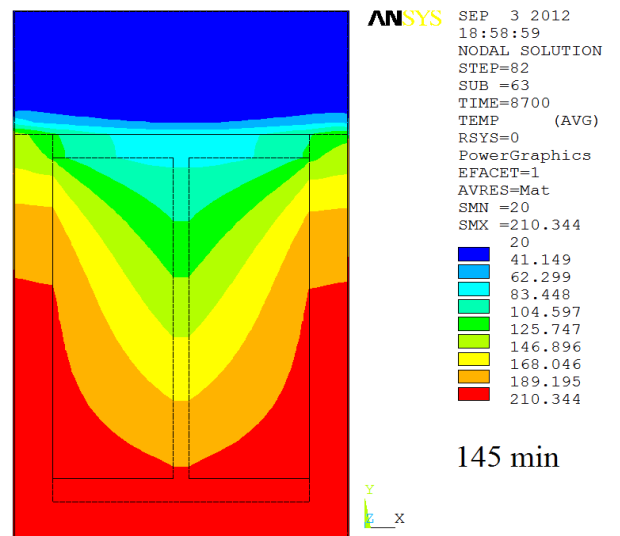
TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1



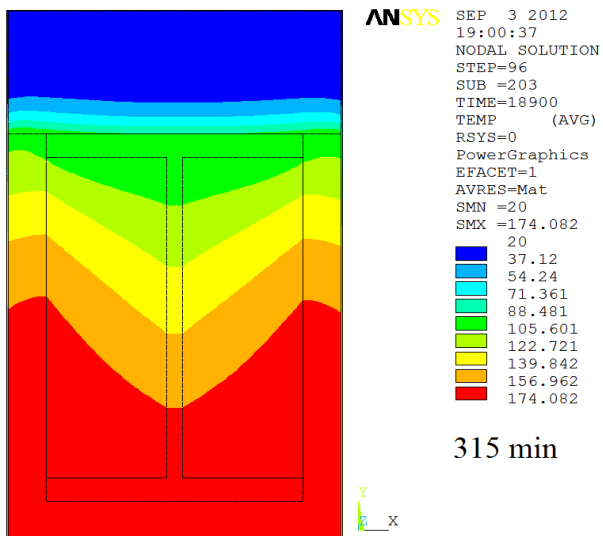
TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1



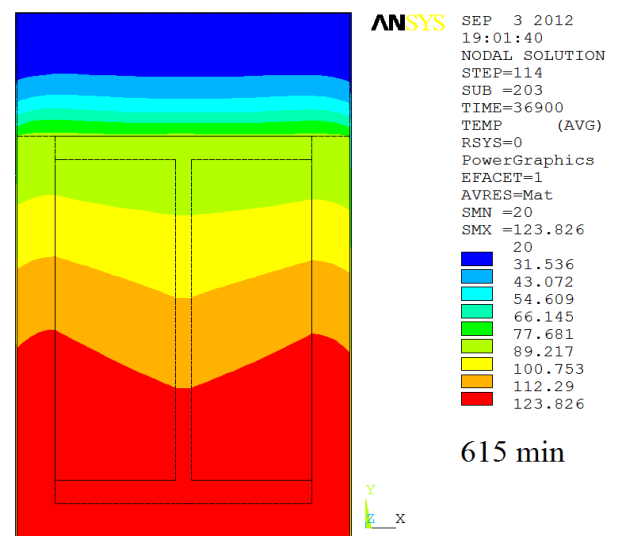
TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1



TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1



TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1



TRANSIENTE TERMICO LARISA - CVS 300 x 85 - INCENDIO 1

Figura 8.24 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 85 - ANSYS (2007).

### 8.2.2.1 – Determinação da carga crítica

Como já foi dito, foram escolhidos elementos estratégicos de cada trecho da seção transversal de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média. Como a alma tem uma contribuição desprezível para a flexão lateral da viga, considera-se apenas as contribuições das mesas 1 (mesa superior) e 2 (mesa inferior) no cálculo da carga crítica uniformemente distribuída. Com isso, é calculado um novo módulo de elasticidade apenas em cada mesa, a cada passo de tempo. Na Figura 8.25 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 1 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

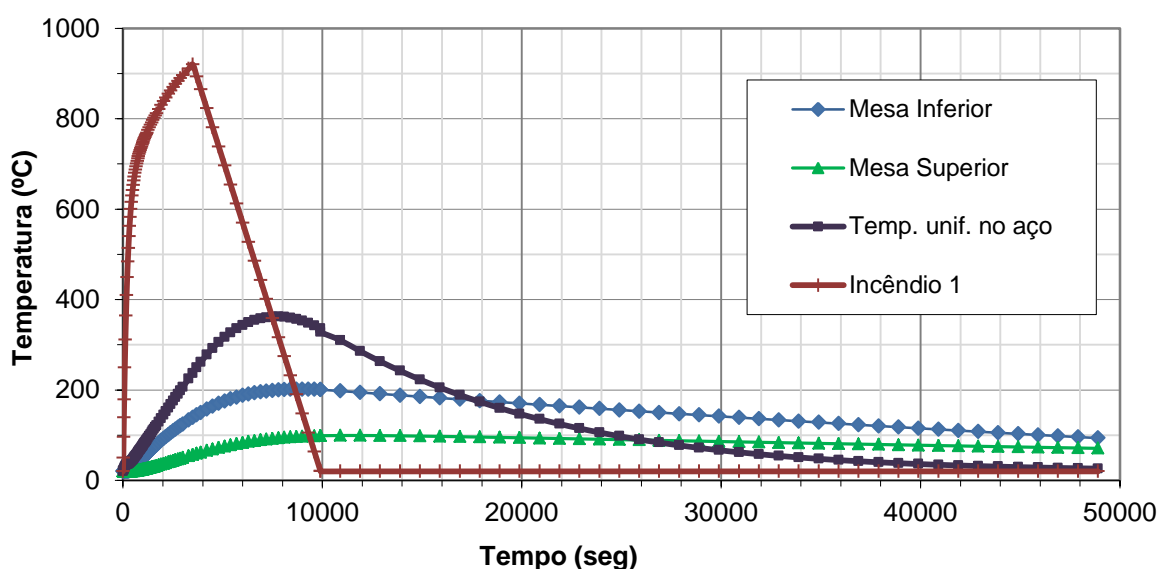


Figura 8.25 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 300 x 85.

Observando as significativas diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior durante o incêndio na Figura 8.25, é importante ressaltar esse fato para as investigações térmicas nos perfis e considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil CVS 300 x 85 submetido ao Incêndio 1 foi calculada para as formulações já mencionadas a cada passo de tempo. Para isso, foram adotados os mesmos parâmetros mencionados anteriormente para o Caso 1 sem proteção térmica. Na Figura 8.26 é apresentado o gráfico comparativo entre as três soluções estudadas:



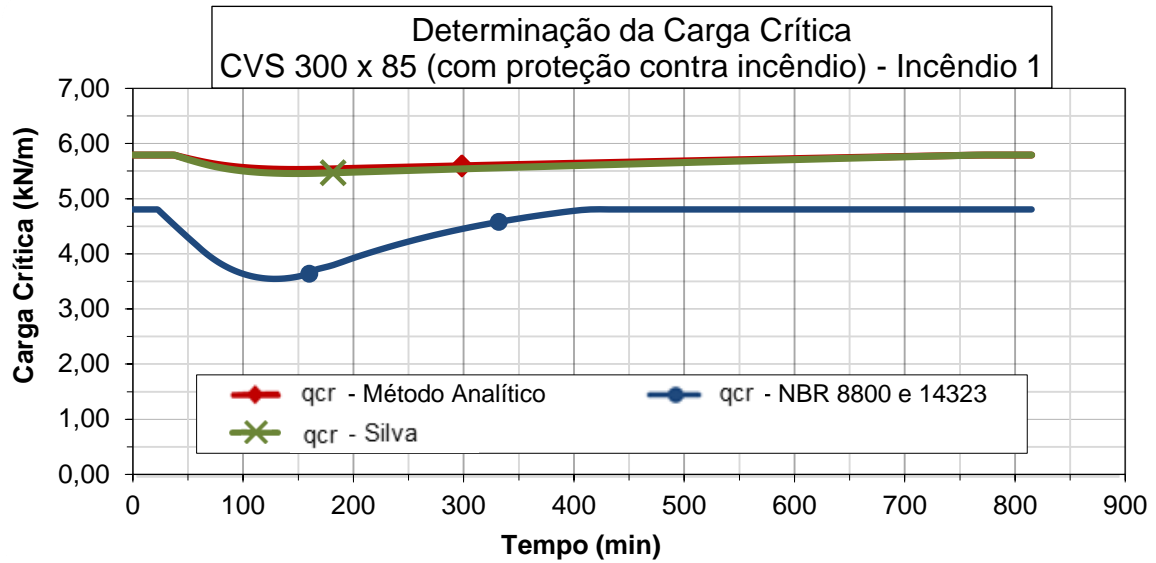


Figura 8.26 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1.

A Tabela 8.5 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos métodos propostos:

Tabela 8.5 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.

<b>Caso 1 (com proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0	4,8	5,79	5,79
15	4,8	5,79	5,79
36	4,55	5,79	5,79
70	3,95	5,64	5,6
85	3,76	5,6	5,54
110	3,58	5,55	5,48
125	3,55	5,54	5,47
160	3,64	5,53	5,46
248,33	4,21	5,57	5,51
315	4,52	5,6	5,55
348,33	4,63	5,62	5,57
365	4,69	5,63	5,58
415	4,8	5,65	5,61
515	4,8	5,69	5,66
565	4,8	5,71	5,69
615	4,8	5,73	5,72
665	4,8	5,75	5,74
715	4,8	5,77	5,77
765	4,8	5,79	5,79
815	4,8	5,79	5,79

Na Figura 8.26, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), observa-se novamente que as formulações são praticamente idênticas em seus resultados. Como já foi visto para esse caso sem revestimento, quanto maior o aumento da temperatura na viga de aço, maior é a diferença entre os resultados dessas formulações. Na Figura 8.26 essa diferença é praticamente imperceptível, pois como há o revestimento térmico, durante todo o incêndio não há elevações significativas da temperatura na viga de aço. É verificado, então, que essas duas formulações são bastante próximas, mesmo seguindo caminhos diferentes em seus desenvolvimentos.

Ainda na Figura 8.26, analisando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho e através das recomendações normativas, observa-se que a carga crítica uniformemente distribuída proposta pelas normas brasileiras é muito conservadora. Em todos os momentos do incêndio, os valores referentes às normas brasileiras são sempre inferiores aos obtidos pelo método analítico proposto nesse estudo. Novamente, mesmo no início e no fim do incêndio, quando as temperaturas estão ambientes (20°C) e o fato da influência do aquecimento ser desigual entre as mesas não interferir de fato, essa diferença já se mostra significativa. E quando há o aumento da temperatura no incêndio, como a formulação analítica aqui proposta considera o aquecimento desigual das mesas e a formulação proposta pelas normas brasileiras considera um aquecimento uniforme do aço, a diferença nos resultados aumenta consideravelmente de modo que as recomendações normativas se tornam muito conservadoras.

### **8.2.3 – Influência do isolamento**

Na Figura 8.27 é apresentado um gráfico comparando as cargas críticas obtidas para os dois casos estudados em relação ao perfil CVS 300 x 85: com e sem revestimento.

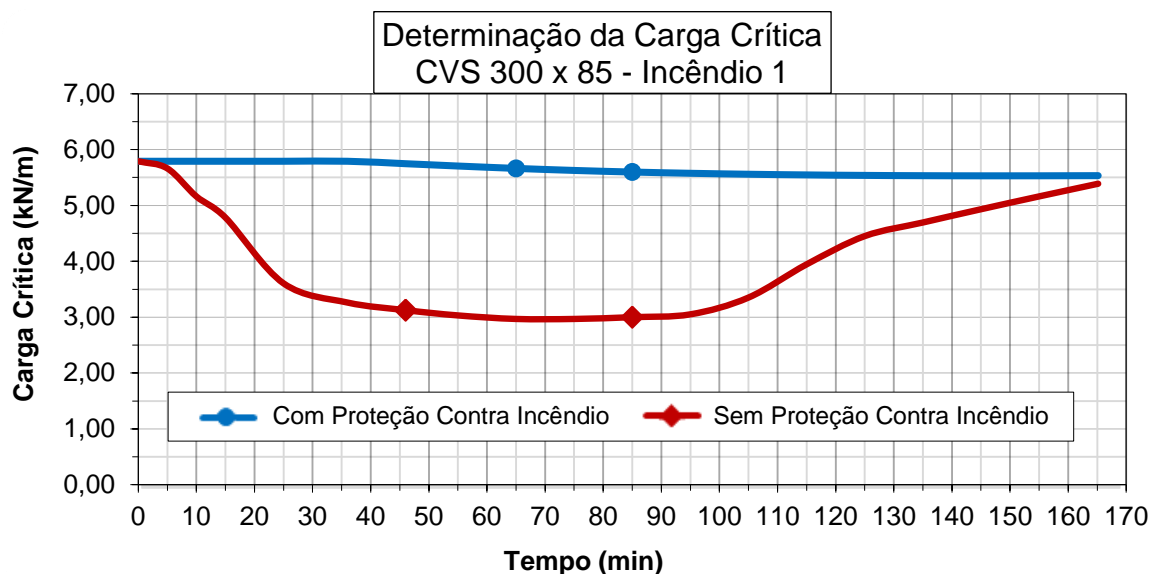


Figura 8.27 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85 – Incêndio 1 – Formulação analítica.

Na Figura 8.27 é observado que a existência de um revestimento térmico em vigas de aço tem uma influência significativa nos resultados da carga crítica uniformemente distribuída. Quando há proteção contra incêndio, as temperaturas na viga de aço não se elevam tanto quanto no mesmo caso sem revestimento. Para este caso de estudo em particular, a carga crítica uniformemente distribuída praticamente duplicou quando se adotou uma proteção contra incêndio. A Tabela 8.6 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada para os dois casos:

Tabela 8.6 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 300 x 85.

Caso 1		
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)	
	Sem Proteção	Com Proteção
0,00	5,79	5,79
10,00	5,16	5,79
25,00	3,61	5,79
46,00	3,13	5,75
55,00	3,03	5,71
70,00	<b>2,96</b>	5,64
105,00	3,35	5,56
115,00	3,95	5,55
135,00	4,69	5,53
155,00	5,16	5,53
165,00	5,38	5,53
165,17	5,39	<b>5,53</b>

### 8.3 – CASO 2: PERFIL “I” VS 400 X 68 – INCÊNDIO 2

O incêndio natural adotado para o Caso 2 foi o Incêndio 2, cujo o grau de ventilação vale  $0 = 0,08 \text{ m}^{1/2}$  e a carga de incêndio específica vale  $500 \text{ MJ/m}^2$ . A duração desse incêndio é de 6810 segundos (113,5 minutos) e sua curva está apresentada na Figura 8.28:

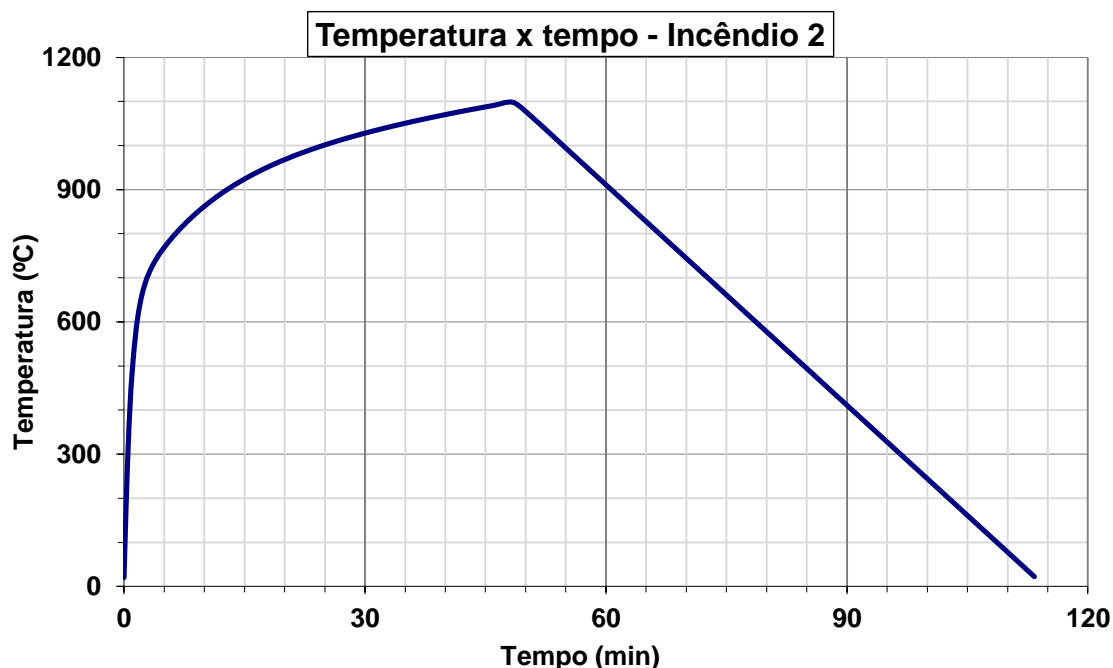


Figura 8.28 – Incêndio natural 2.

A duração do Incêndio 2 foi dividida em 77 passos com intervalos variando de 10 a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas. Para se testar a convergência da resposta a cada instante, foram utilizados subpassos de até 0,5 segundo.

A Tabela 8.7 apresenta as propriedades geométricas do perfil de aço VS 400 X 68 adotado para esse caso:

Tabela 8.7 – Propriedades geométricas do perfil VS 400 X 68.

Perfil	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	M (kg/m)
VS 400x68	400	200	16,0	6,3	87,2	68,4

Foram escolhidos elementos estratégicos de cada mesa e da alma de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média de cada trecho, em

cada passo de tempo. Para o perfil VS 400 X 68 foram escolhidos os elementos: 1875, 1792 e 1834 (mesa inferior); 1751 e 1674 (alma); 1597, 1576 e 1554 (mesa superior). A Figura 8.29 apresenta esses elementos selecionados:

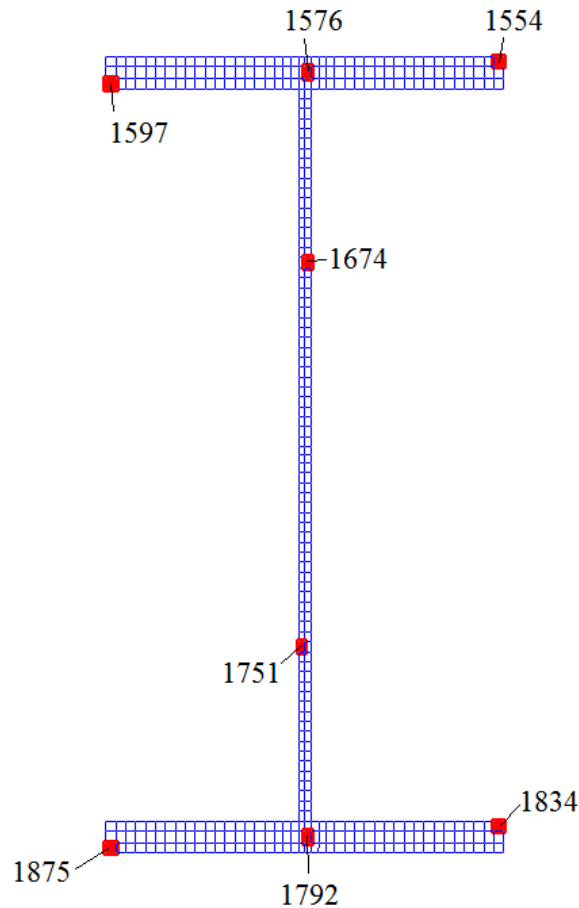


Figura 8.29 – Localização dos elementos selecionados para o perfil VS 400 X 68.

### 8.3.1 – Perfil sem proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 2 sem proteção térmica é constituída do perfil de aço VS 400 X 68, do material refratário sobreposto à mesa superior e da camada de ar envolvente, conforme o esquema geral apresentado na Figura 7.1. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 1839 nós e 1612 elementos.

A camada de ar que envolve o perfil de aço tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. Já a camada

de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Nas Figuras 8.30 até 8.17 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

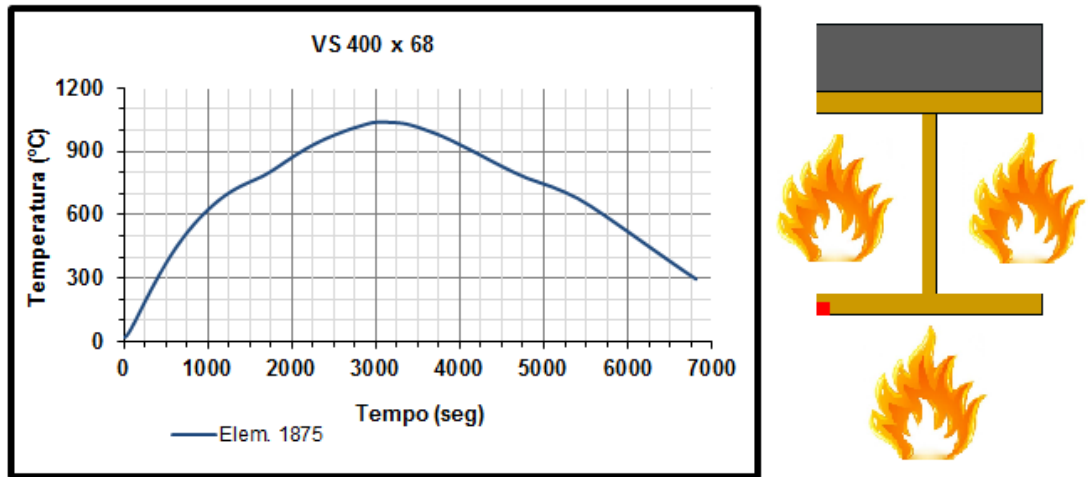


Figura 8.30 – Temperaturas do elemento 1875 ao longo do incêndio.

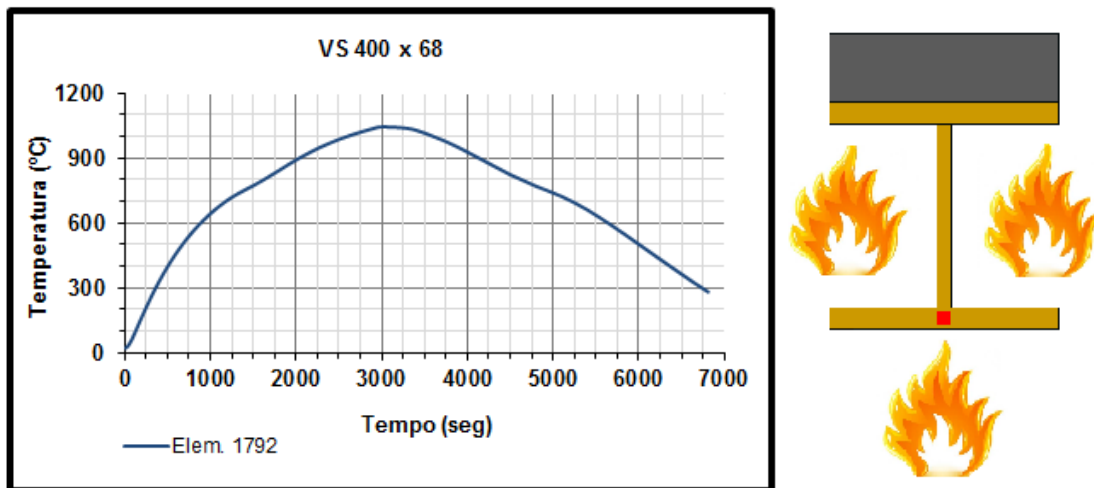


Figura 8.31 – Temperaturas do elemento 1792 ao longo do incêndio.

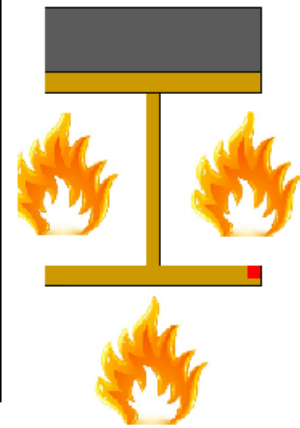
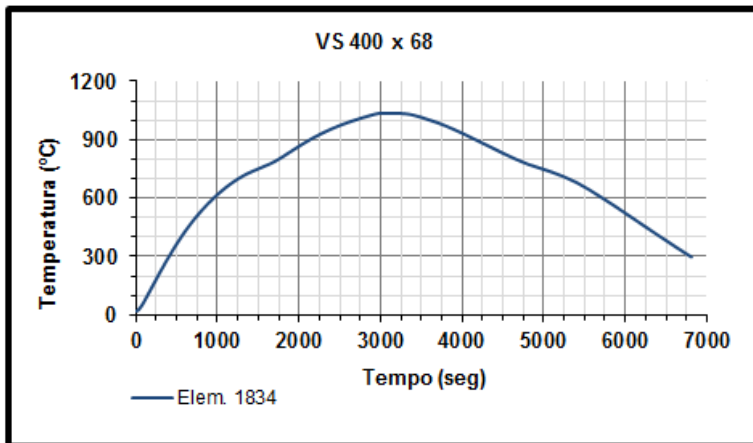


Figura 8.32 – Temperaturas do elemento 1834 ao longo do incêndio.

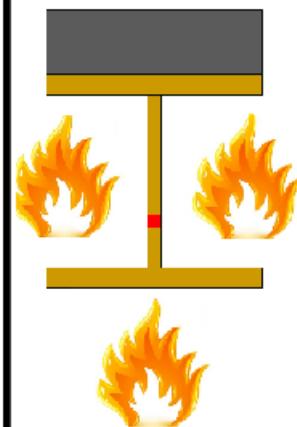
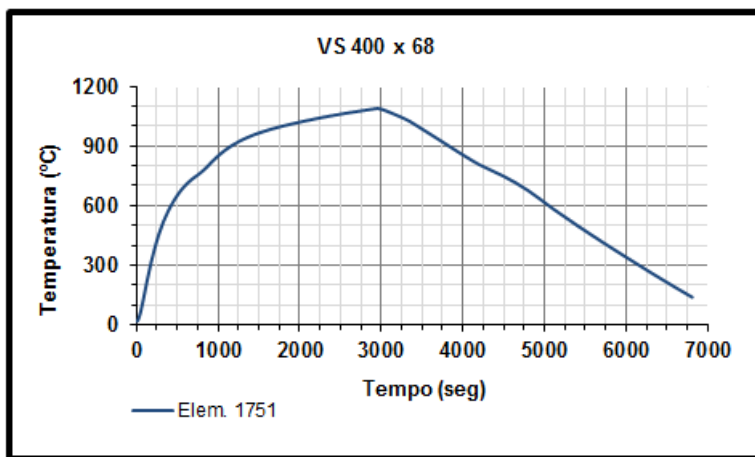


Figura 8.33 – Temperaturas do elemento 1751 ao longo do incêndio.

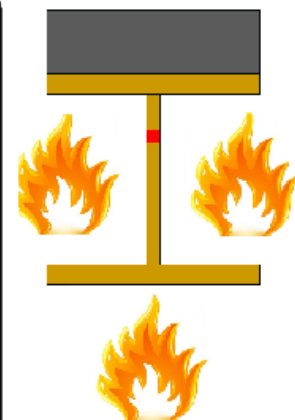
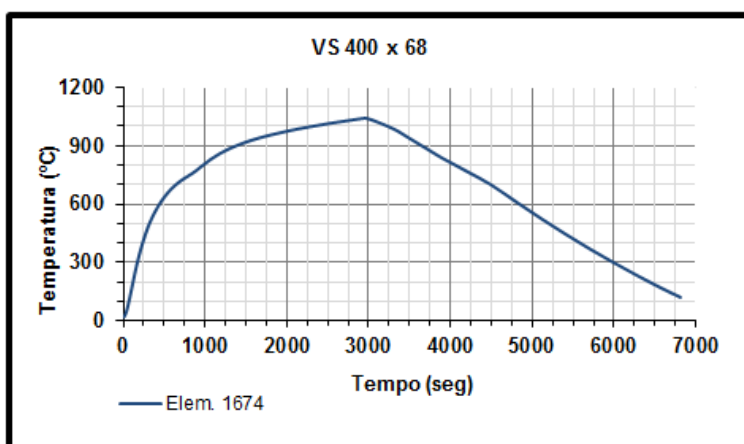


Figura 8.34 – Temperaturas do elemento 1674 ao longo do incêndio.

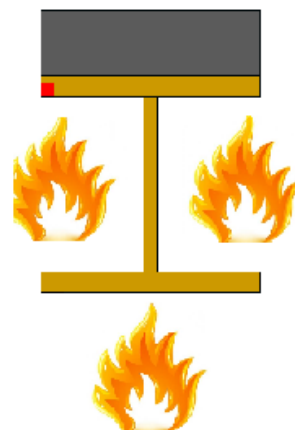
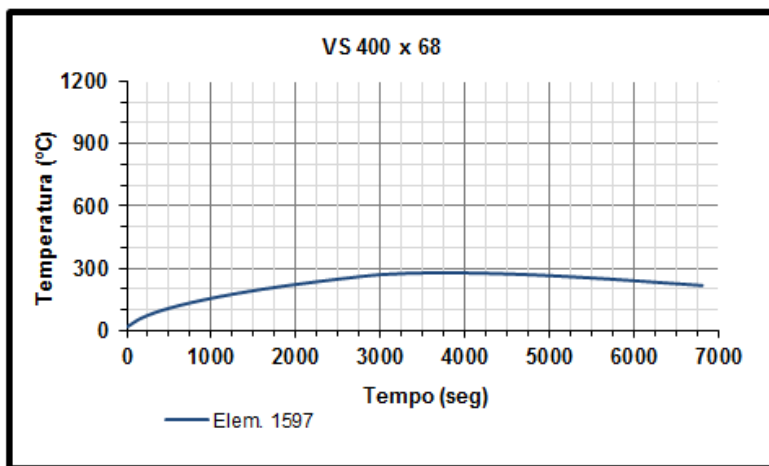


Figura 8.35 – Temperaturas do elemento 1597 ao longo do incêndio.

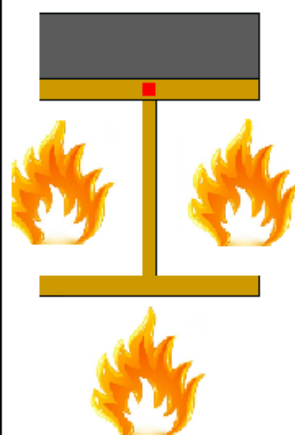
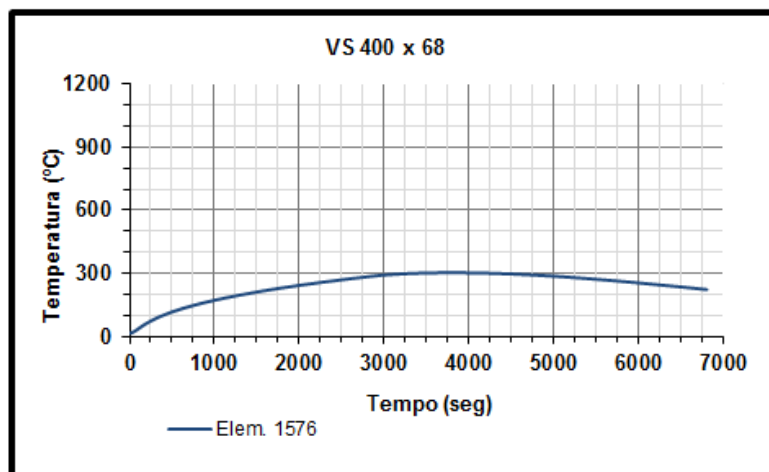


Figura 8.36 – Temperaturas do elemento 1576 ao longo do incêndio.

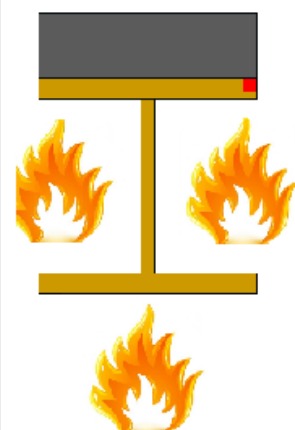
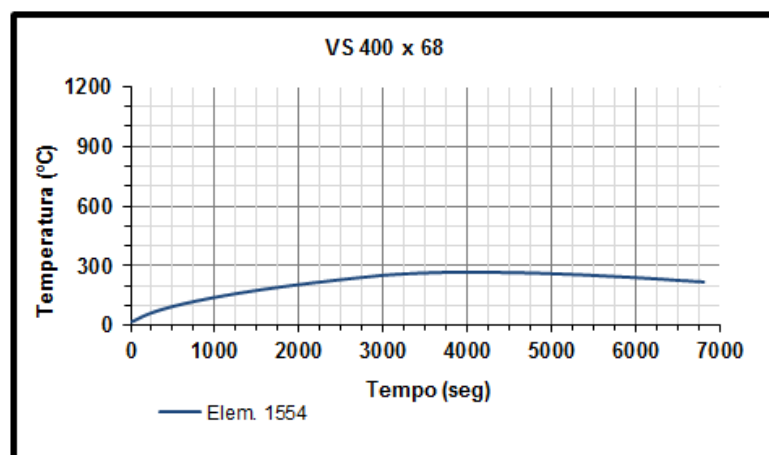


Figura 8.37 – Temperaturas do elemento 1554 ao longo do incêndio.



A Figura 8.38 mostra o gráfico que faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

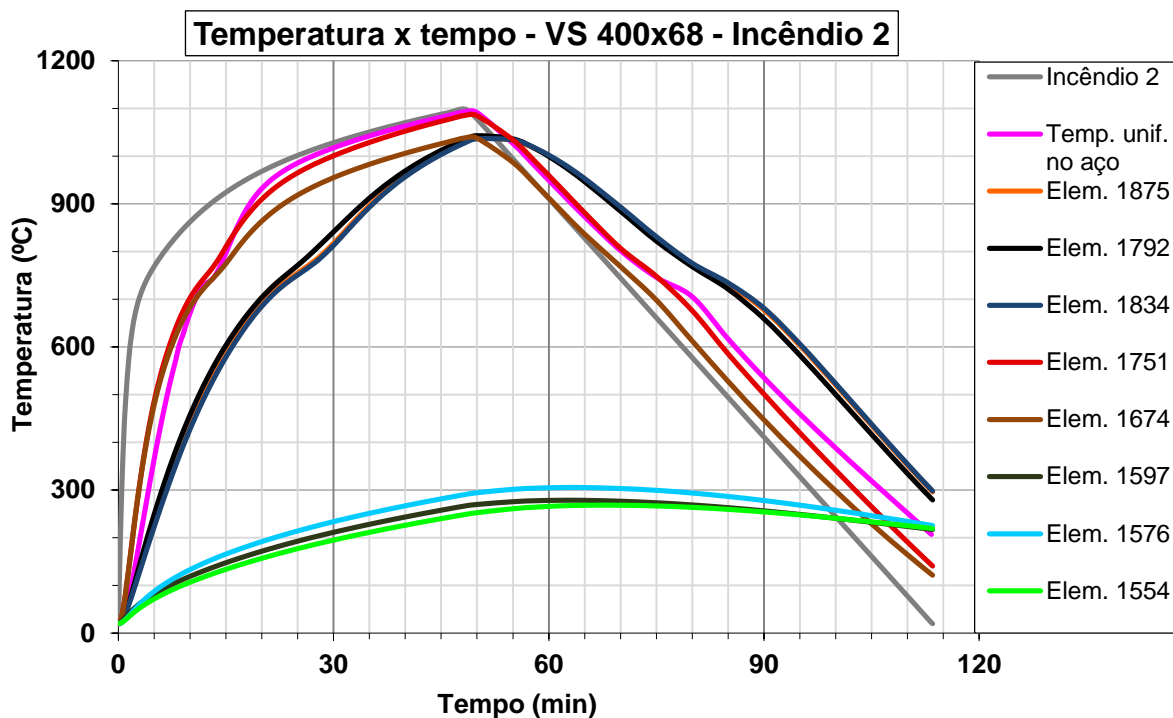


Figura 8.38 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 400 X 68.

Percebe-se que as temperaturas da mesa superior são bem menores que as temperaturas da mesa inferior. Isso se deve ao fato de a mesa inferior estar mais exposta às chamas do que a mesa superior, já que esta possui uma laje de concreto sobreposta. Os elementos 1875, 1792 e 1834 (elementos da mesa inferior) apresentam seus comportamentos, no desenvolvimento da temperatura, tão similares que a diferença de suas curvas é praticamente imperceptível. Observa-se também que as temperaturas da mesa inferior e da alma estão mais próximas das temperaturas do incêndio natural e das temperaturas de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.39 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

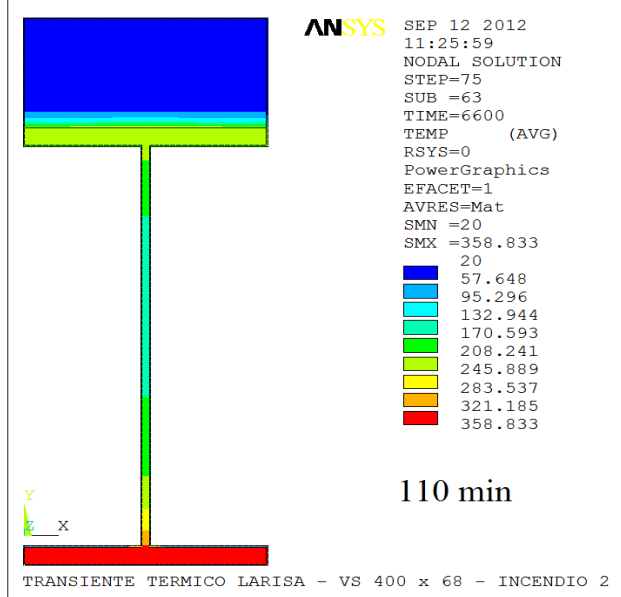
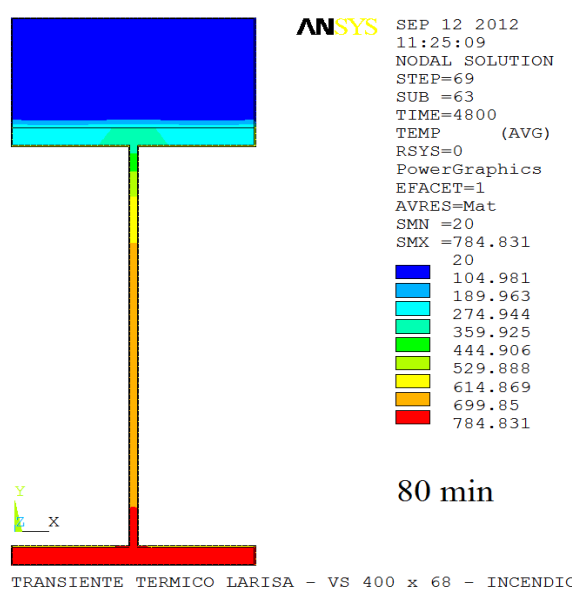
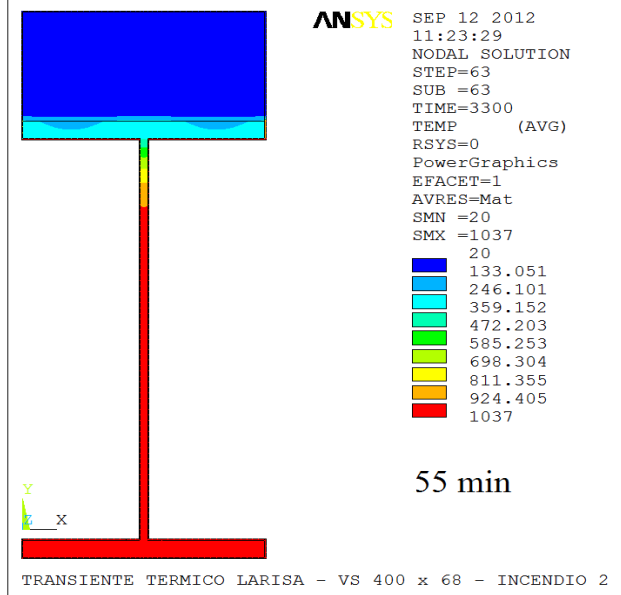
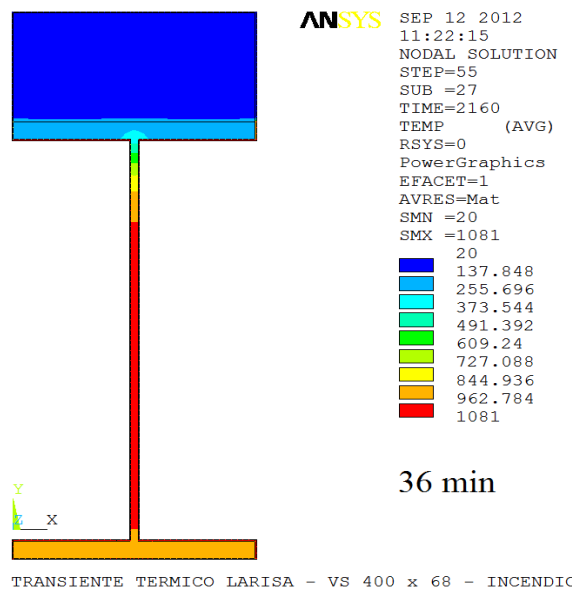
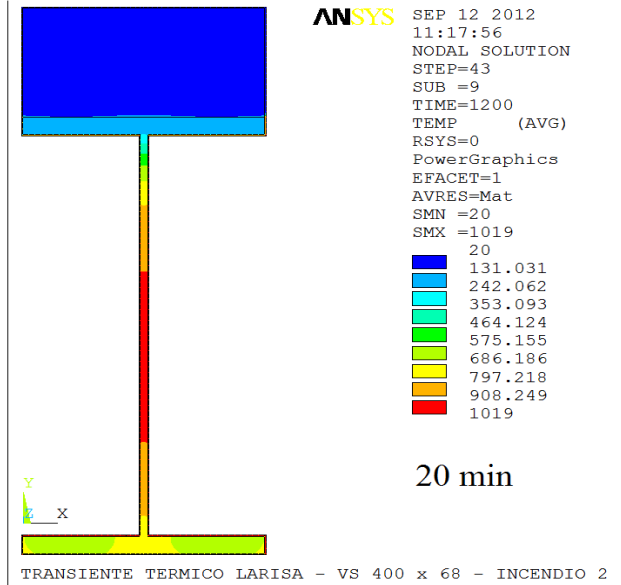
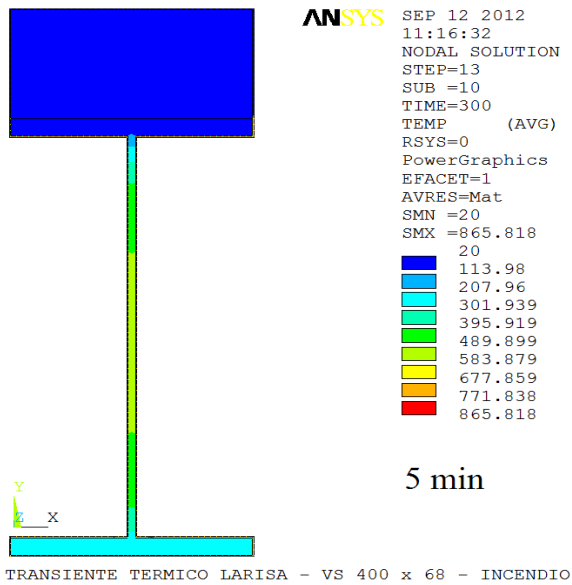


Figura 8.39 – Evolução térmica (°C) - Perfil VS 400 X 68 - ANSYS (2007).

### 8.3.1.1 – Determinação da carga crítica

Foram escolhidos elementos estratégicos de cada trecho da seção transversal de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média. Como a alma tem uma contribuição desprezível para a flexão lateral da viga, considera-se apenas as contribuições das mesas superior e inferior no cálculo da carga crítica uniformemente distribuída. Na Figura 8.40 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

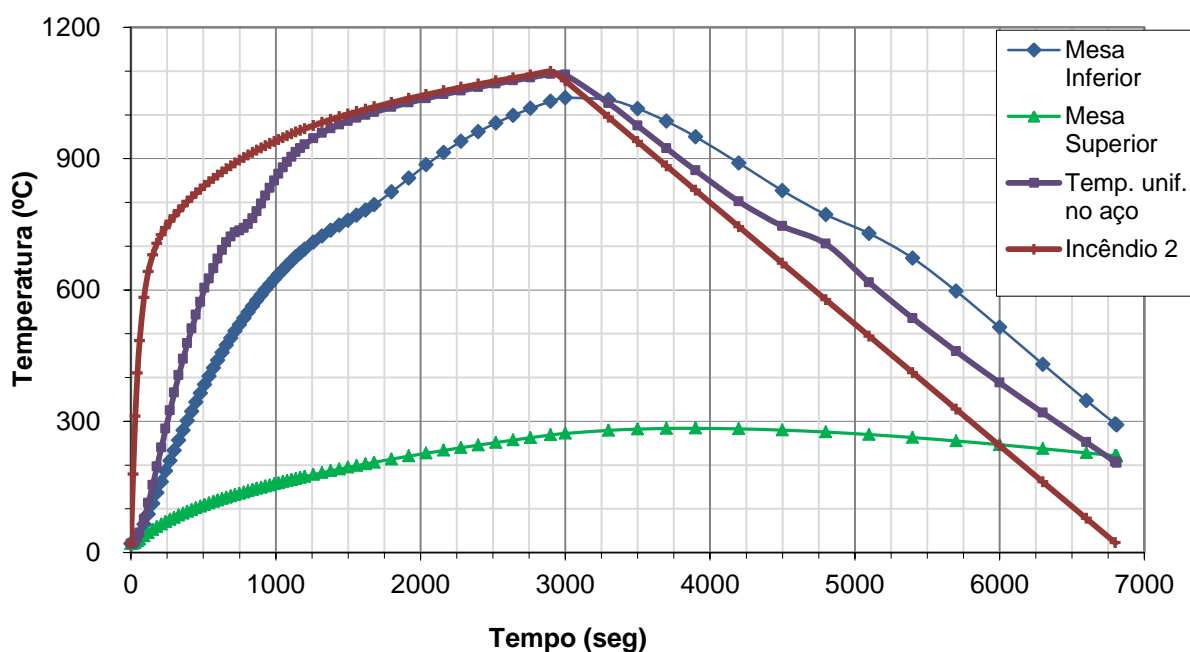


Figura 8.40 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 400 X 68.

Observando as significativas diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior durante o incêndio na Figura 8.40, é importante ressaltar esse fato para as investigações térmicas nos perfis e considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal.

Para o Caso 2 foram calculadas as cargas críticas uniformemente distribuídas de acordo com a formulação analítica proposta nesse trabalho, com a formulação proposta por Silva (1992) e de acordo com as recomendações normativas. Para isso, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade do aço para temperatura ambiente (20°C):  $E_0 = 20.500 \text{ kN/cm}^2$ ;
- Fator de redução para o módulo de elasticidade  $K_{E,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Fator de redução para o limite de escoamento dos aços  $K_{y,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- Tensão de escoamento do aço para temperatura ambiente (20°C):  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ ;
- A esbeltez  $\lambda$  deve apresentar valor maior que a esbeltez para início de escoamento  $\lambda_r$  para caracterizar que a viga esteja em estado de flexão lateral com flexo-torção (FLT) em regime elástico.

Considerando  $\lambda > \lambda_r$ , define-se o comprimento da viga sem travamento lateral que, para o perfil VS 400 X 68, foi de 10 metros.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil VS 400 X 68 submetido ao Incêndio 2 foi calculada para as formulações já mencionadas a cada passo de tempo. Na Figura 8.41 é apresentado o gráfico comparativo entre as três soluções estudadas:

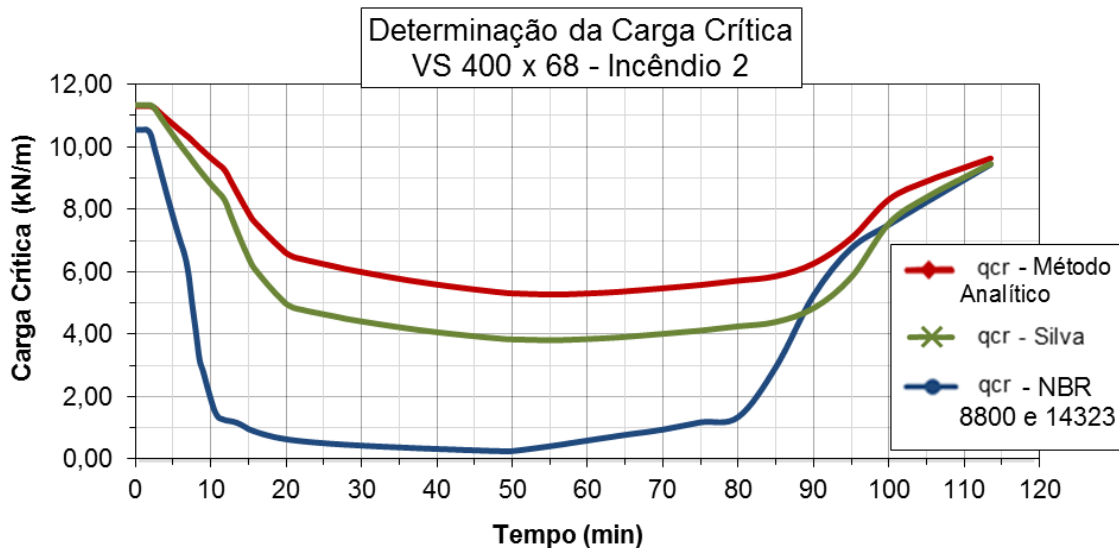


Figura 8.41 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 – Incêndio 2.

A Tabela 8.8 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos métodos propostos:

Tabela 8.8 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68.

<b>Caso 2 (Sem proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	q <sub>cr</sub> (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0	10,54	11,3	11,33
0,5	10,54	11,3	11,33
2	10,41	11,3	11,33
5	7,75	10,72	10,37
10	1,92	9,64	8,81
15	0,96	7,88	6,45
20	0,64	6,6	4,97
25	0,51	6,24	4,64
36	0,36	5,73	4,19
46	0,27	5,41	3,91
55	0,41	5,27	3,81
65	0,78	5,37	3,91
75	1,18	5,58	4,12
85	2,95	5,86	4,39
95	6,75	7,07	5,82
105	8,23	8,9	8,39
110	8,94	9,33	9,02
113,5	9,44	9,63	9,45

Na Figura 8.41, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), é notável que no início e final do incêndio as formulações são praticamente idênticas em seus resultados. Na medida em que se tem um aumento de temperatura, essa diferença se intensifica, e a medida que há um resfriamento, essa diferença diminui. É verificado novamente que essas duas formulações são bastante próximas.

Analisando-se os valores obtidos na Figura 8.41 através da formulação analítica proposta no presente trabalho e através das recomendações normativas, mais uma vez observa-se que a carga crítica uniformemente distribuída proposta pelas normas brasileiras é muito conservadora. Quando há o aumento da temperatura no incêndio, como a formulação analítica aqui proposta considera o aquecimento desigual das mesas e a formulação proposta pelas normas brasileiras considera um aquecimento uniforme do aço, a diferença nos resultados aumenta consideravelmente. Isso ocorre, pois a mesa comprimida (mesa superior) está parcialmente protegida por uma placa de material refratário, fazendo com que haja um aumento na resistência do perfil no caso da formulação aqui proposta.

### 8.3.2 – Perfil com proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 2 com proteção térmica é constituída do perfil de aço VS 400 X 68, do material refratário sobreposto à mesa superior, do revestimento de proteção térmica de concreto leve e da camada de ar envolvente, conforme o esquema geral apresentado na Figura 7.2. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 6213 nós e 6048 elementos.

A camada de ar que envolve o revestimento térmico tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. Já a camada de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Como já mencionado, a duração do Incêndio 2, que foi de 6810 segundos, foi dividida em 77 passos. Porém, para o Caso 2 com proteção térmica, ao final do incêndio, a maioria dos elementos da seção transversal do perfil ainda estava atingindo sua temperatura máxima. Sendo assim, foram feitos passos adicionais para se obter a fase de resfriamento dos mesmos. Assim, para esse caso, foram feitos 116 passos totalizando em 45800 segundos.

Nas Figuras 8.42 até 8.49 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

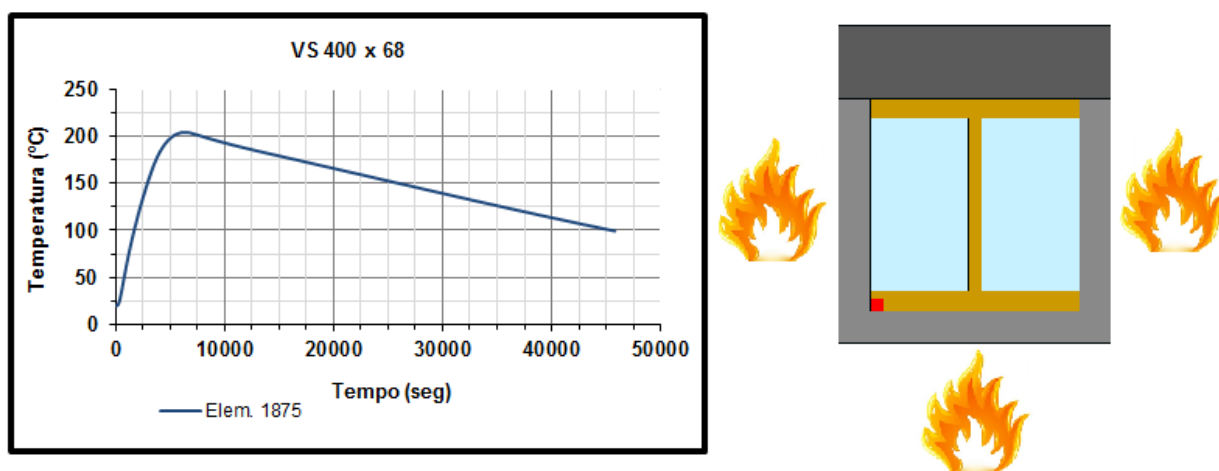


Figura 8.42 – Temperaturas do elemento 1875 ao longo do incêndio.

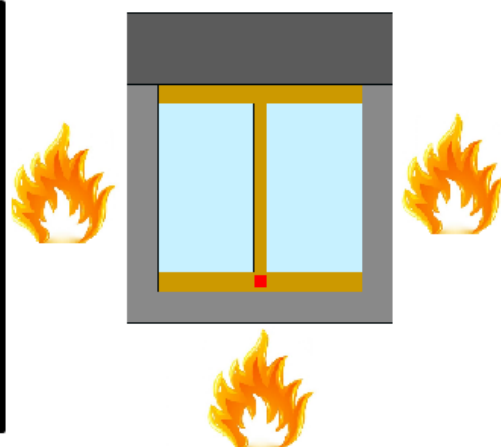
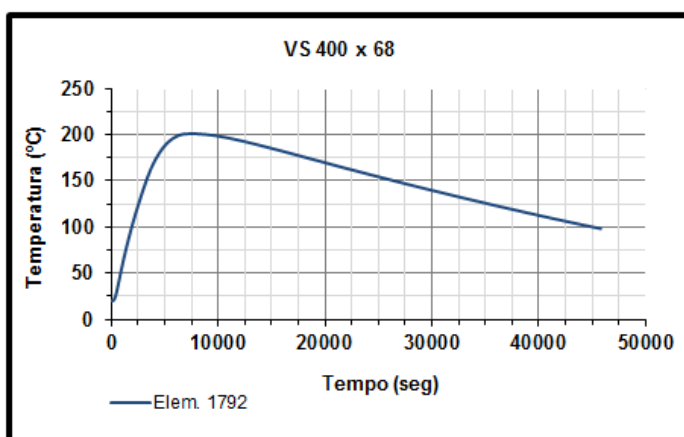


Figura 8.43 – Temperaturas do elemento 1792 ao longo do incêndio.

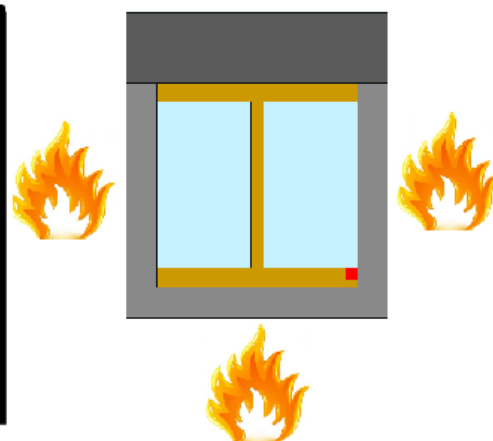
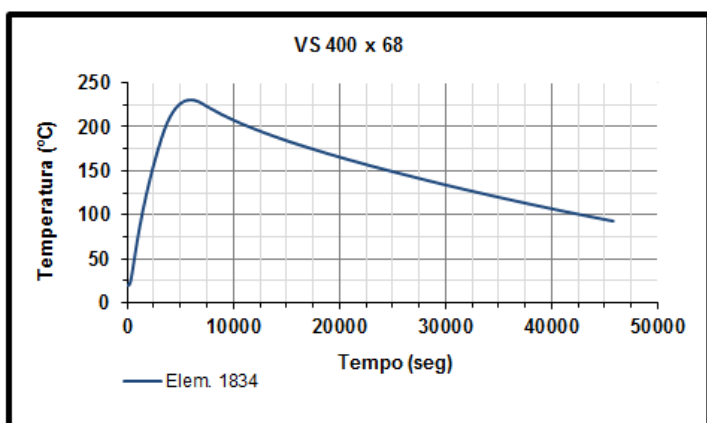


Figura 8.44 – Temperaturas do elemento 1834 ao longo do incêndio.

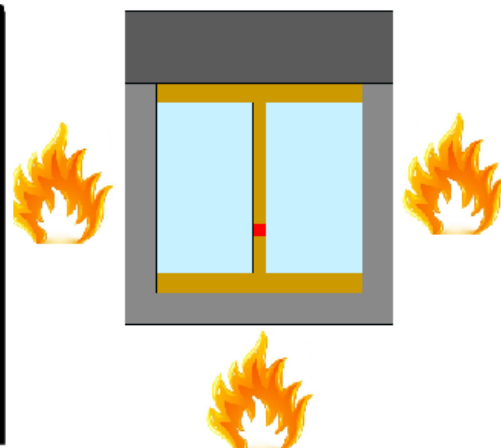
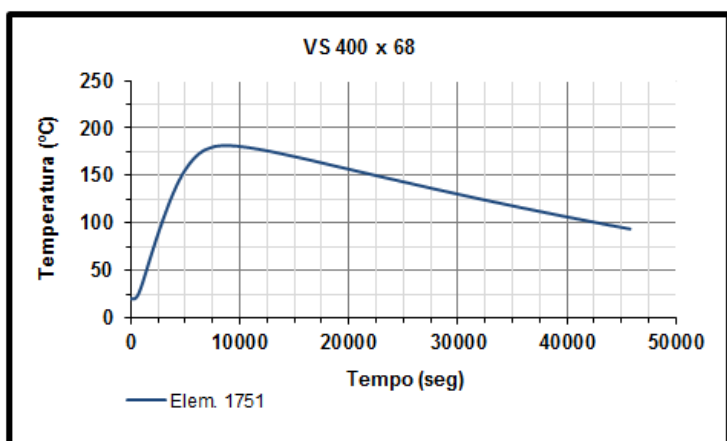


Figura 8.45 – Temperaturas do elemento 1751 ao longo do incêndio.

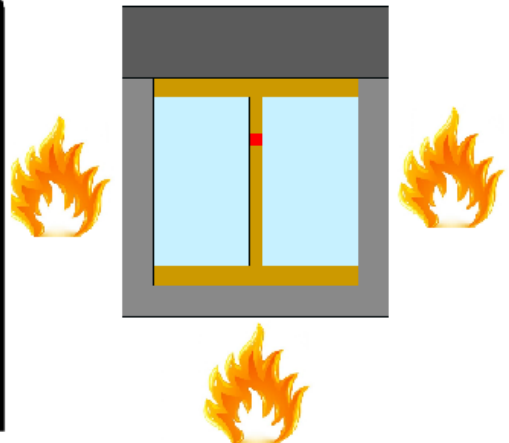
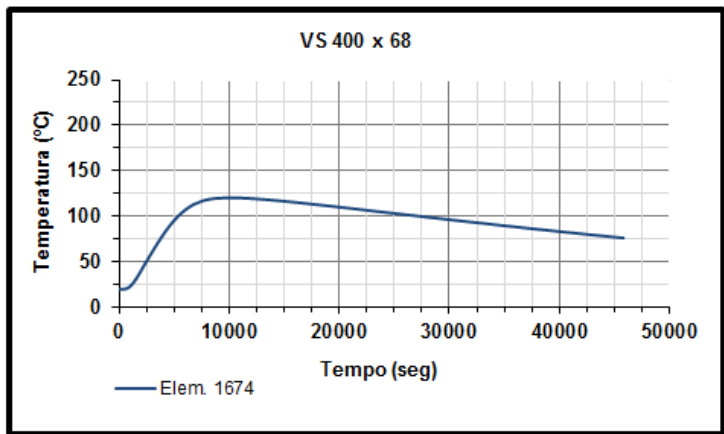


Figura 8.46 – Temperaturas do elemento 1674 ao longo do incêndio.

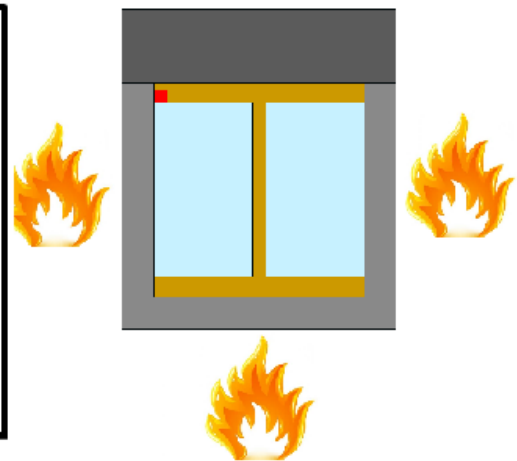
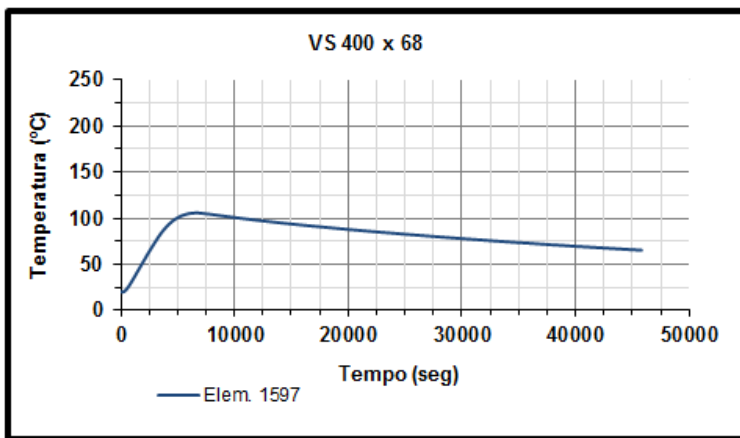


Figura 8.47 – Temperaturas do elemento 1597 ao longo do incêndio.

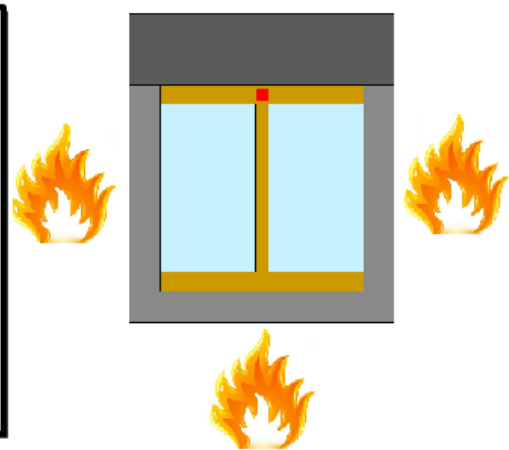
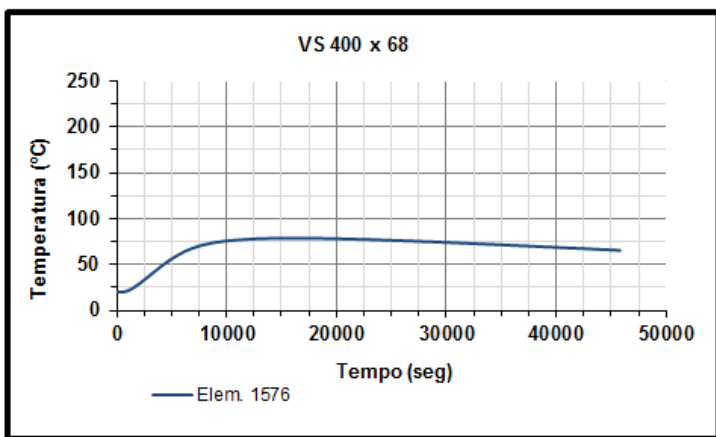


Figura 8.48 – Temperaturas do elemento 1576 ao longo do incêndio.



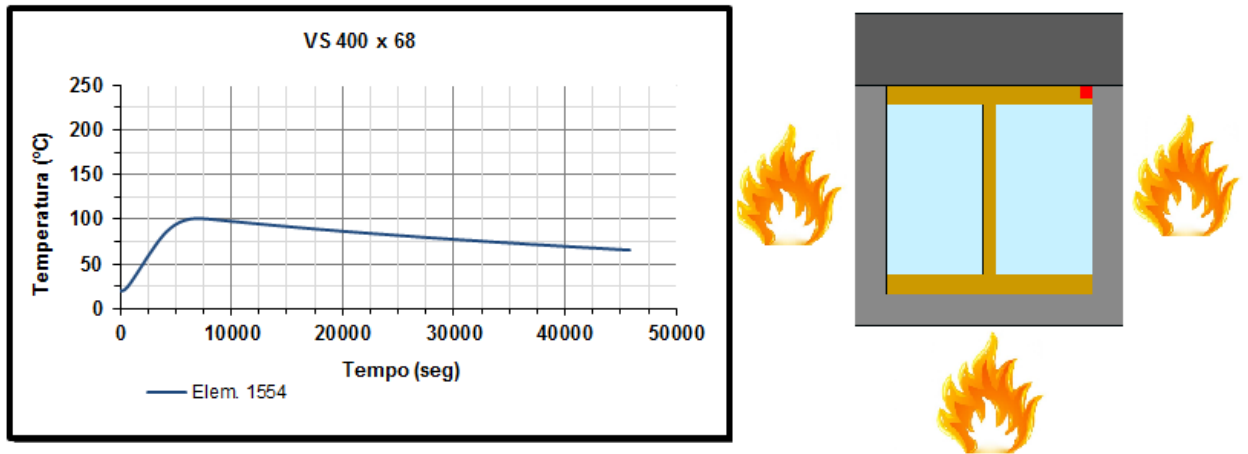


Figura 8.49 – Temperaturas do elemento 1554 ao longo do incêndio.

A Figura 8.50 mostra o gráfico que faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

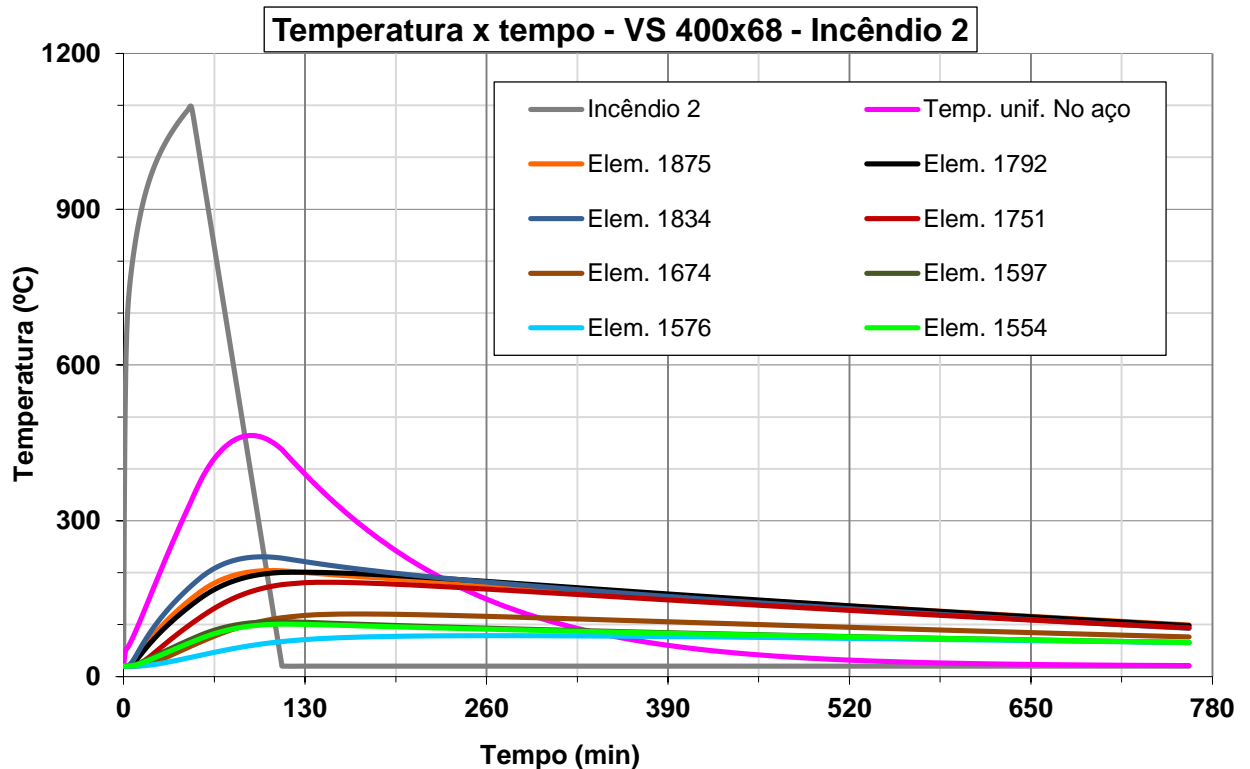
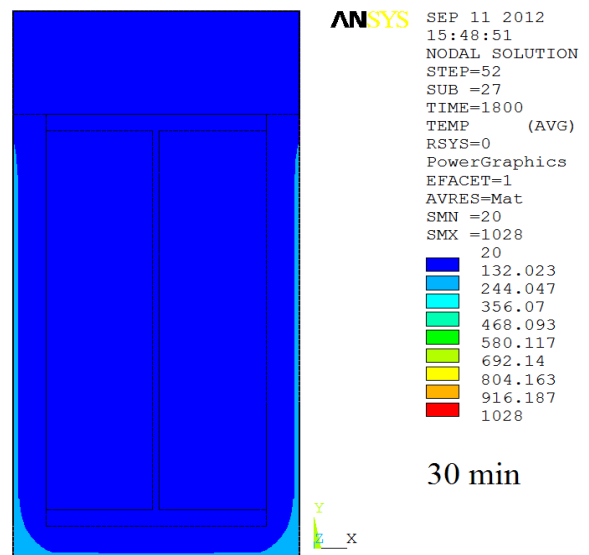
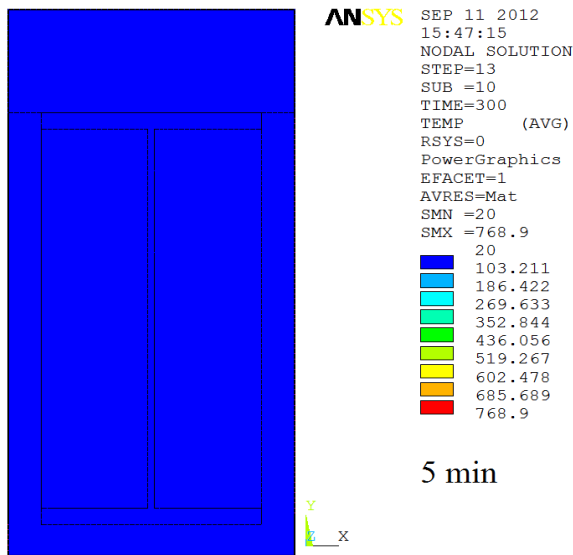


Figura 8.50 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 400 X 68.

Analisando a Figura 8.50, percebe-se que novamente as temperaturas da mesa inferior são bem menores que as temperaturas da mesa superior. Comparando-se as temperaturas dos elementos com a curva de Incêndio 2, percebe-se que elas estão muito abaixo dos valores

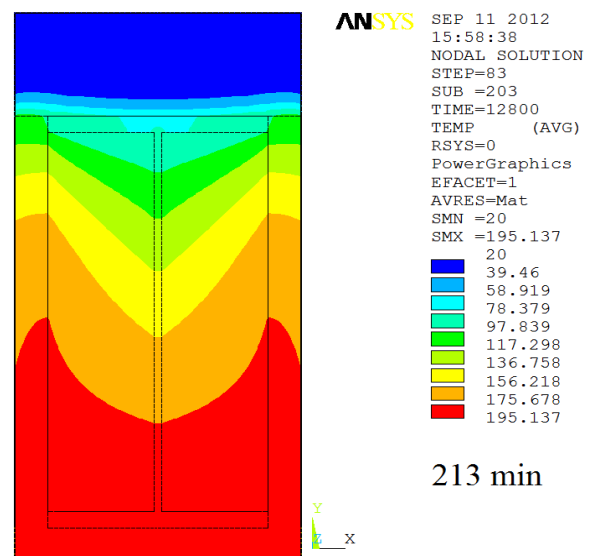
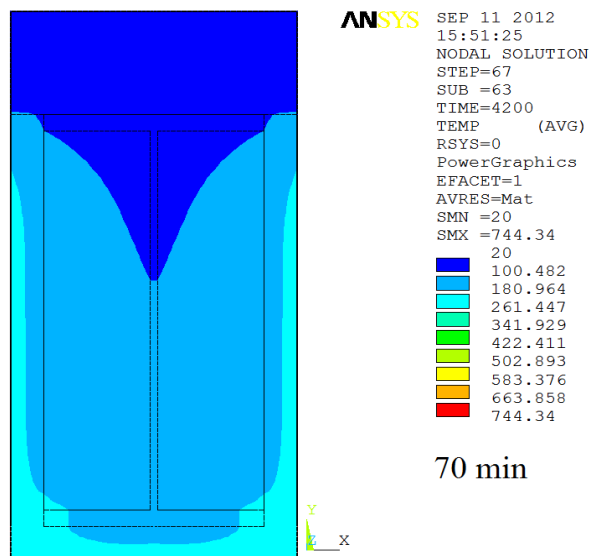
atingidos pelo incêndio, devido ao revestimento térmico. Observa-se também que, por volta do instante de 90 minutos, as temperaturas dos elementos estão bem abaixo da curva de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.51 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:



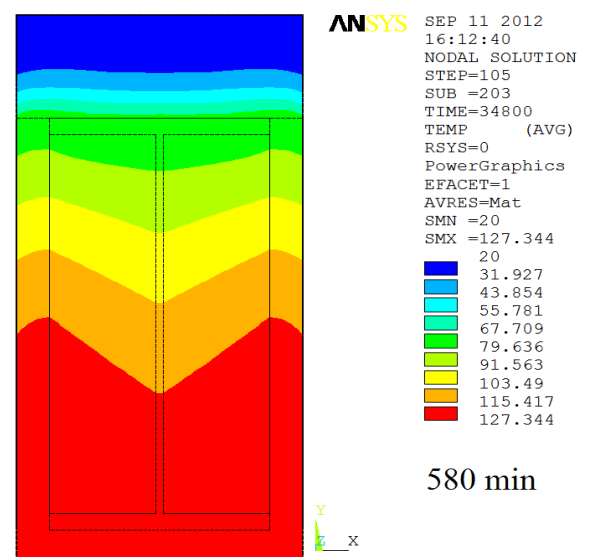
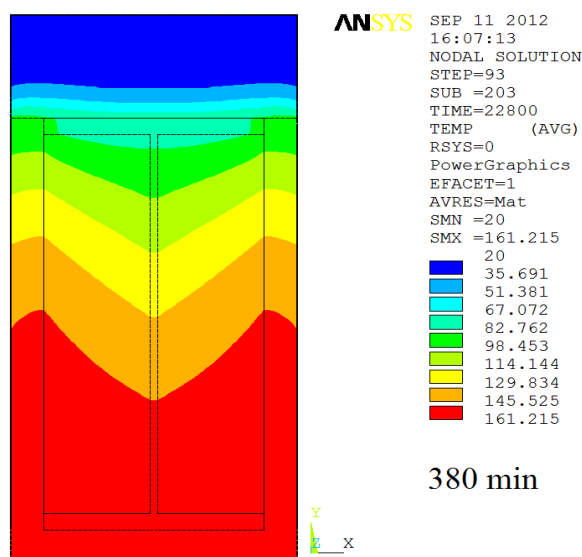
TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2

TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2



TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2

TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2



TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2

TRANSIENTE TERMICO LARISA - VS 400 x 68 - INCENDIO 2

Figura 8.51 – Evolução térmica (°C) - Perfil VS 400 X 68 - ANSYS (2007).

### 8.3.2.1 – Determinação da carga crítica

Na Figura 8.52 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

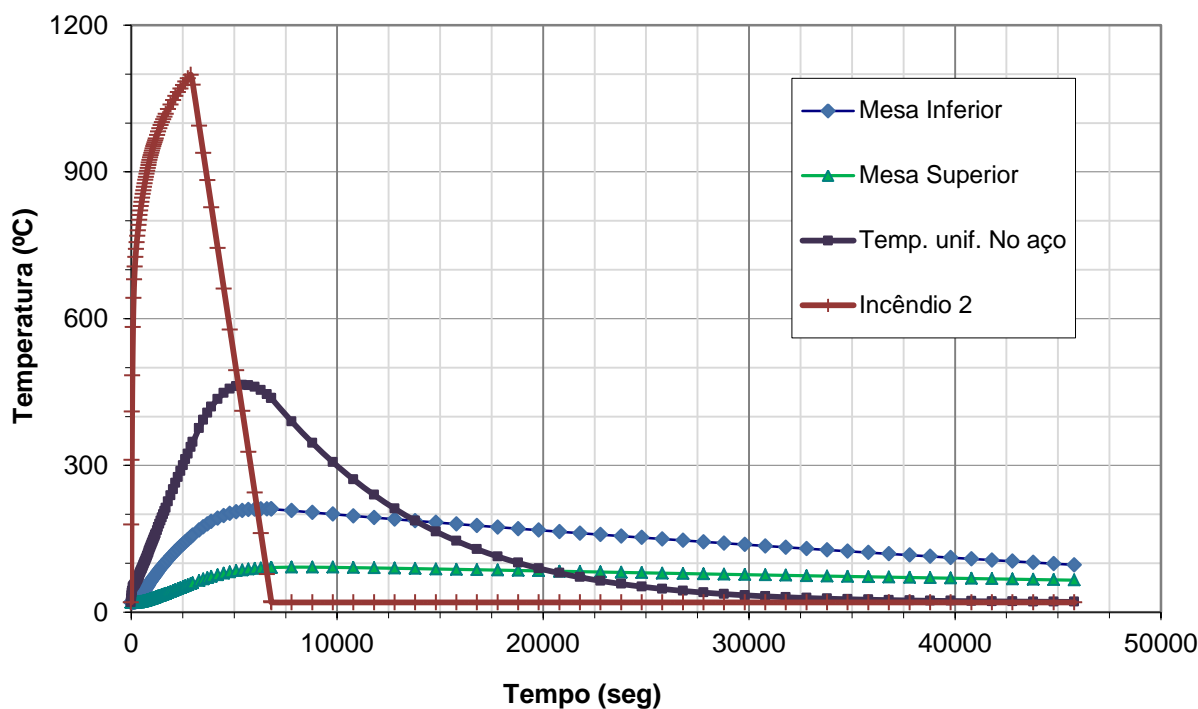


Figura 8.52 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 400 X 68.

Na Figura 8.52 nota-se a importância de se considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal, pois as diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior são significativas.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil VS 400 X 68 submetido ao Incêndio 2 foi calculada para as três formulações a cada passo de tempo. Para isso, foram adotados os mesmos parâmetros mencionados anteriormente para o Caso 2 sem proteção térmica. Na Figura 8.53 é apresentado o gráfico comparativo entre os três resultados obtidos:

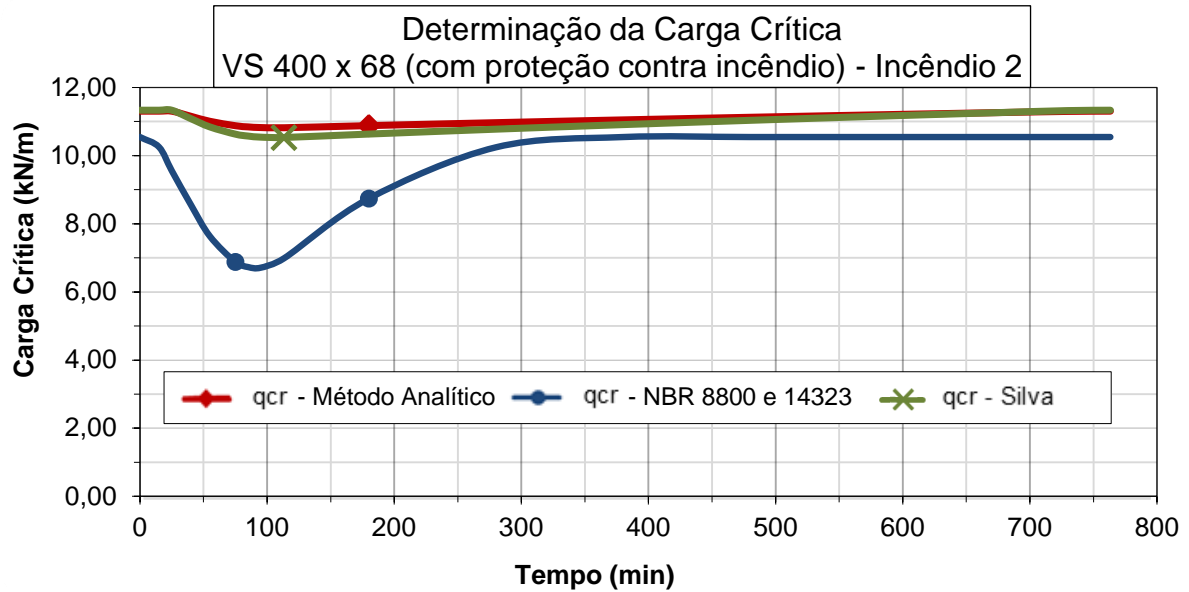


Figura 8.53 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68 – Incêndio 2.

A Tabela 8.9 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos três métodos:

Tabela 8.9 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68.

<b>Caso 2 (com proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	q <sub>cr</sub> (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0,00	10,54	11,30	11,33
15,00	10,25	11,30	11,33
25,00	9,56	11,30	11,33
40,00	8,56	11,15	11,09
55,00	7,63	11,01	10,84
75,00	6,88	10,88	10,63
85,00	6,73	10,84	10,57
95,00	6,71	10,82	10,54
113,33	6,99	10,82	10,53
180,00	8,74	10,88	10,63
280,00	10,24	10,97	10,78
380,00	10,54	11,05	10,91
480,00	10,54	11,13	11,04
580,00	10,54	11,20	11,16
630,00	10,54	11,23	11,21
680,00	10,54	11,26	11,27
730,00	10,54	11,30	11,32
763,33	10,54	11,30	11,33

Na Figura 8.53, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), novamente observa-se que os resultados são praticamente idênticos. Como já foi visto, quanto maior o aumento da temperatura na viga de aço, maior é a diferença entre os resultados dessas formulações. Como nesse caso há o revestimento térmico, durante todo o incêndio não há elevações significativas da temperatura na viga de aço e essa diferença de resultados é praticamente imperceptível.

Em relação às recomendações normativas brasileiras, mais uma vez é percebido que seus resultados são conservadores. Em todos os momentos do incêndio, os valores referentes às normas brasileiras são sempre inferiores aos obtidos pelo método analítico proposto nesse estudo. A diferença maior se dá quando há o aumento da temperatura no incêndio.

### 8.3.3 – Influência do isolamento

Na Figura 8.54 é apresentado um gráfico comparando as cargas críticas obtidas para os dois casos estudados em relação ao perfil VS 400 X 68: com e sem revestimento.

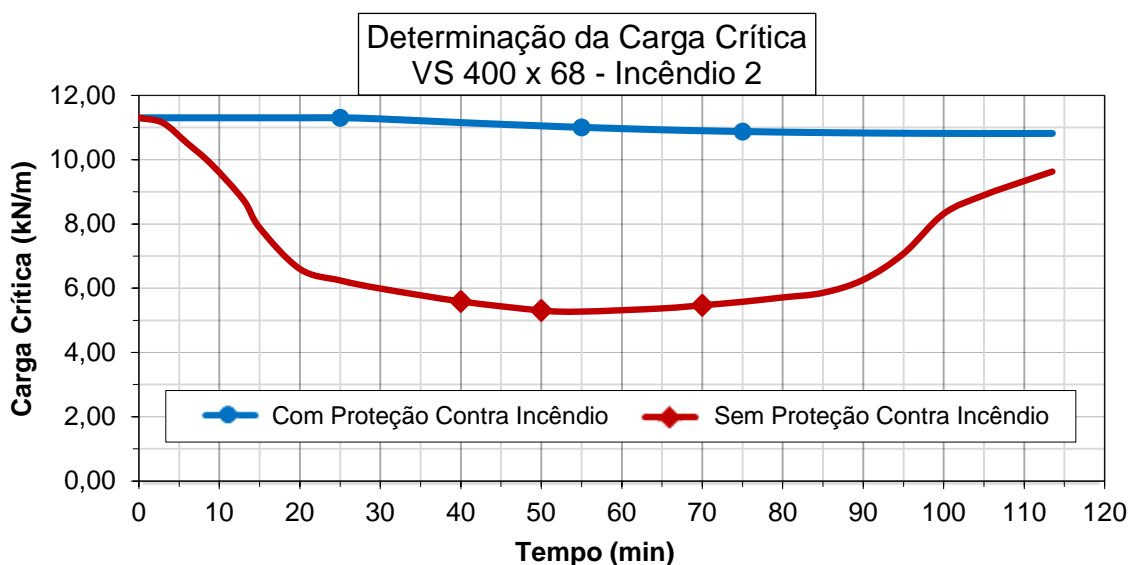


Figura 8.54 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68– Incêndio 2 - Formulação analítica.

Na Figura 8.54, novamente é observado que a existência de uma proteção contra incêndio em vigas de aço tem uma influência significativa nos resultados da carga crítica uniformemente distribuída. Quando há revestimento térmico, as temperaturas na viga de

aço não se elevam tanto quanto no mesmo caso sem revestimento. Para esse caso, assim como no Caso 1, a carga crítica uniformemente distribuída praticamente duplicou quando se adotou um revestimento térmico. A Tabela 8.10 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada para os dois casos:

Tabela 8.10 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 400 X 68.

Caso 2		
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)	
	Sem Proteção	Com Proteção
0,00	11,3	11,3
3,00	11,14	11,3
6,00	10,51	11,3
9,00	9,86	11,3
13,00	8,74	11,3
15,00	7,88	11,3
20,00	6,6	11,3
30,00	5,99	11,27
40,00	5,59	11,15
50,00	5,31	11,05
55,00	<b>5,27</b>	11,01
70,00	5,47	10,9
80,00	5,71	10,86
90,00	6,26	10,83
100,00	8,32	10,82
113,50	9,63	<b>10,82</b>

#### 8.4 – CASO 3: PERFIL “I” VS 550 X 88 – INCÊNDIO 2

O incêndio natural adotado para o Caso 3 foi novamente o Incêndio 2, cujo o grau de ventilação vale  $O = 0,08 \text{ m}^{1/2}$  e a carga de incêndio específica vale  $500 \text{ MJ/m}^2$ . A duração desse incêndio é de 6810 segundos (113,5 minutos) e sua curva está apresentada na Figura 8.28.

A Tabela 8.11 apresenta as propriedades geométricas do perfil de aço VS 550 X 88 adotado para esse caso:

Tabela 8.11 – Propriedades geométricas do perfil VS 550 X 88.

Perfil	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	M (kg/m)
VS 550x88	550	250	16,0	6,3	113,0	88,4

Os elementos estratégicos escolhidos de cada mesa e da alma para o perfil VS 550 X 88 foram os seguintes: 855, 2597 e 2699 (mesa inferior); 1530 e 6171 (alma); 7826, 7932 e 8033 (mesa superior). A Figura 8.55 apresenta esses elementos selecionados:

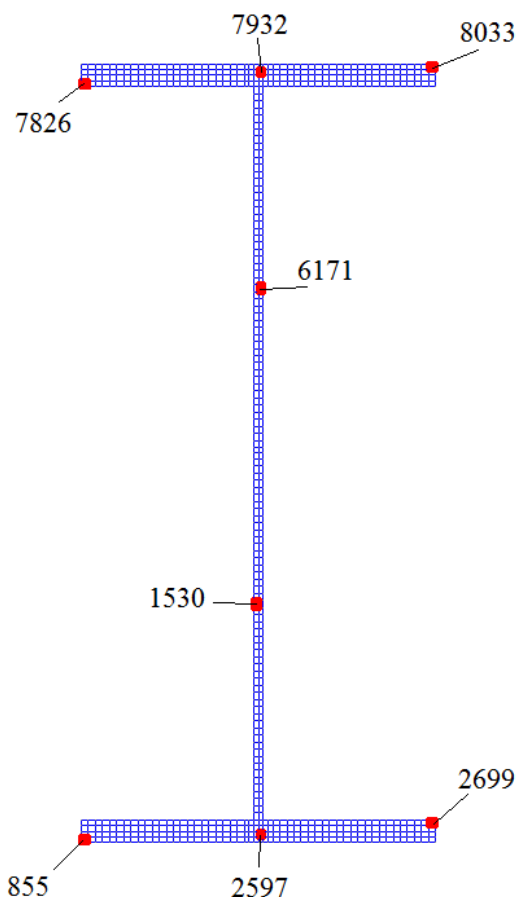


Figura 8.55 – Localização dos elementos selecionados para o perfil VS 550 X 88.

#### 8.4.1 – Perfil sem proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 3 sem proteção térmica é constituída do perfil de aço VS 550 X 88, do material refratário sobreposto à mesa superior e da camada de ar envolvente, como apresentado no esquema geral da Figura 7.1. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 2383 nós e 2140 elementos.

A camada de ar que envolve o perfil de aço tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. A camada de



ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Nas Figuras 8.56 até 8.63 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

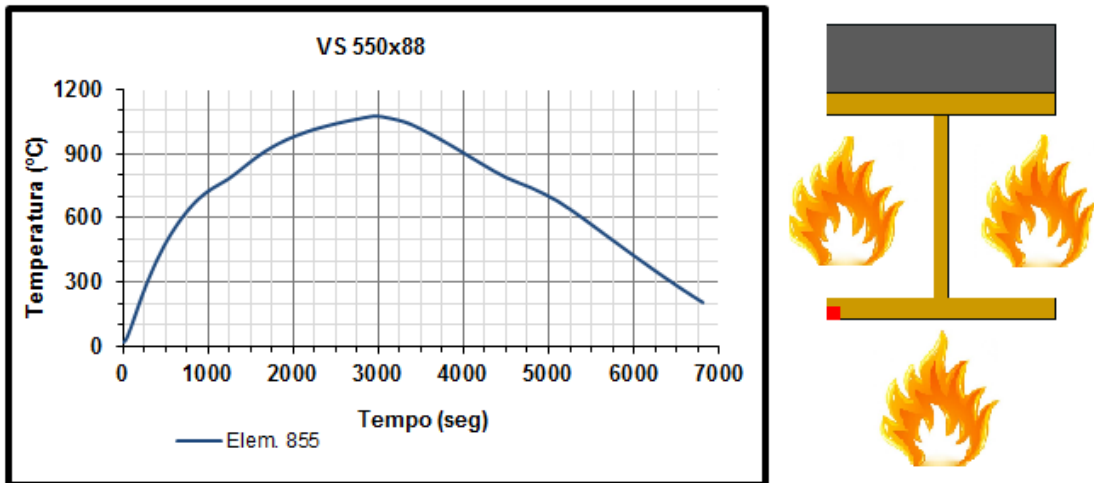


Figura 8.56 – Temperaturas do elemento 855 ao longo do incêndio.

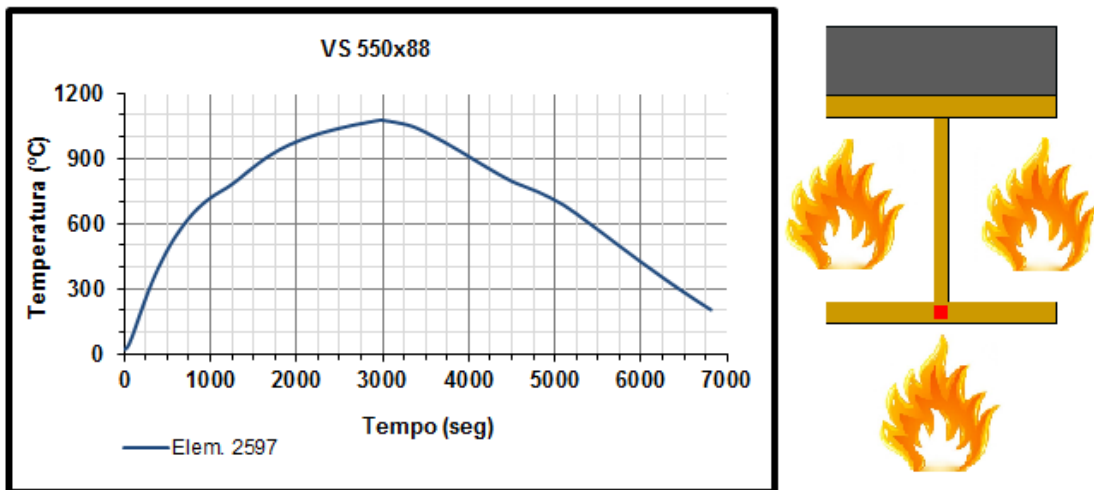


Figura 8.57 – Temperaturas do elemento 2597 ao longo do incêndio.

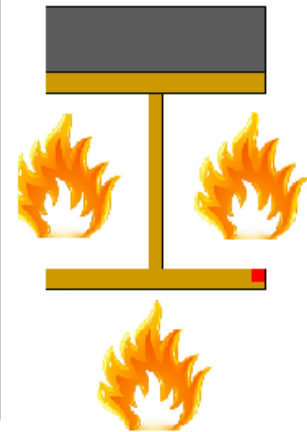
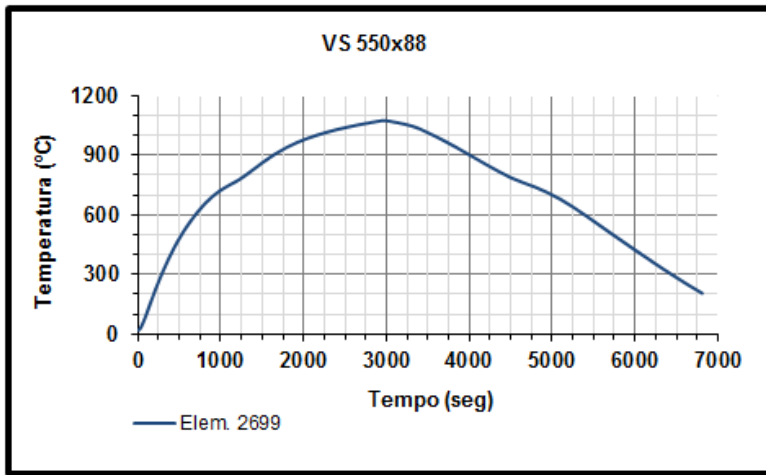


Figura 8.58 – Temperaturas do elemento 2699 ao longo do incêndio.

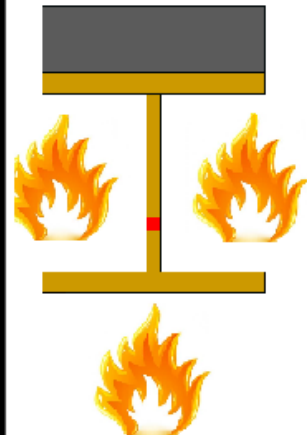
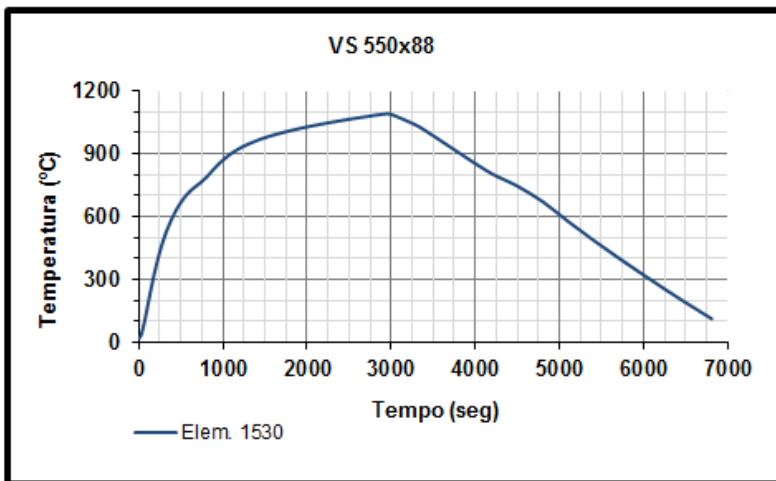


Figura 8.59 – Temperaturas do elemento 1530 ao longo do incêndio.

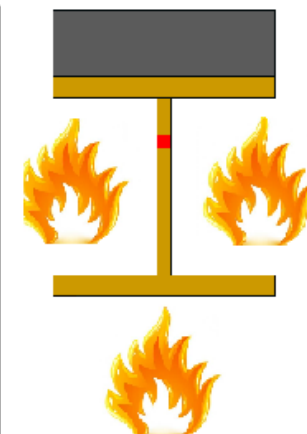
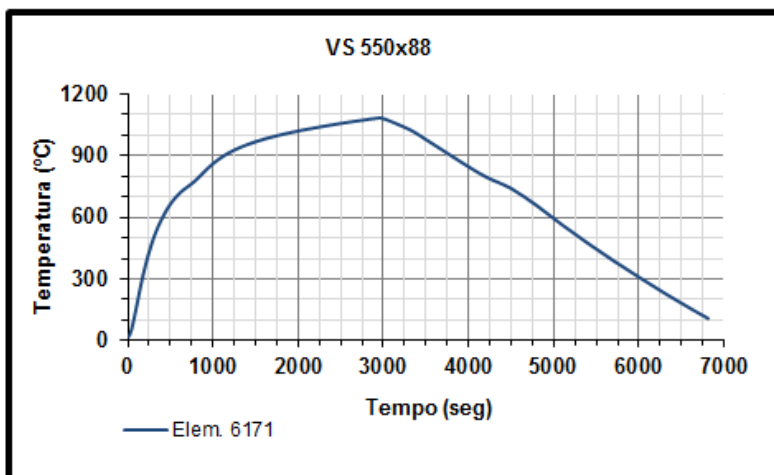


Figura 8.60 – Temperaturas do elemento 6171 ao longo do incêndio.

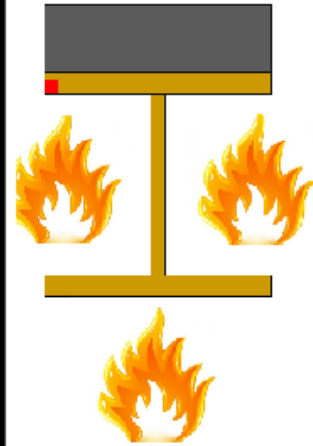
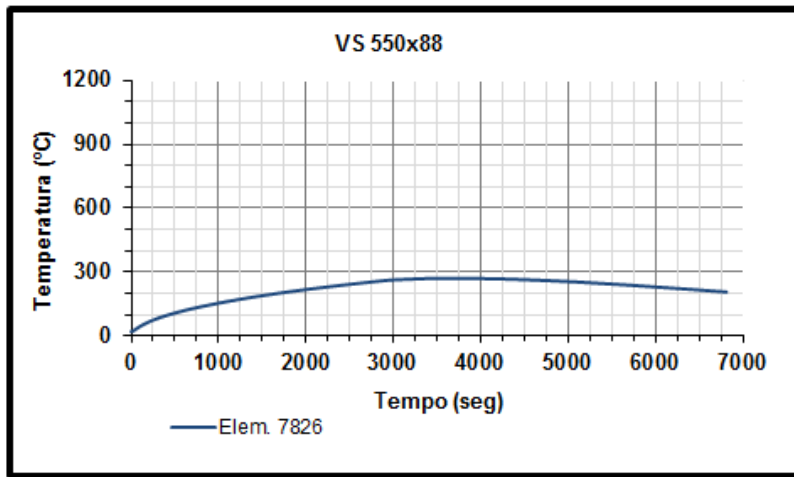


Figura 8.61 – Temperaturas do elemento 7826 ao longo do incêndio.

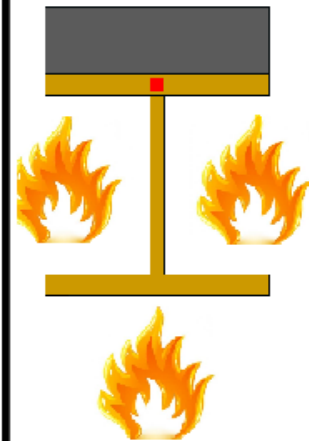
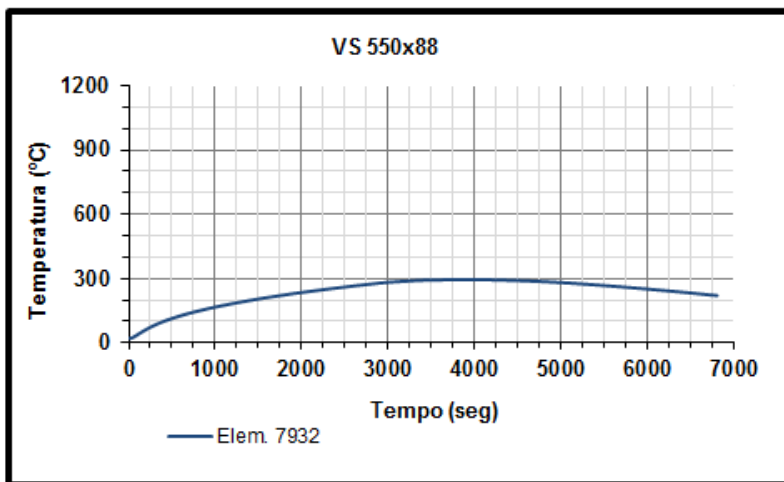


Figura 8.62 – Temperaturas do elemento 7932 ao longo do incêndio.

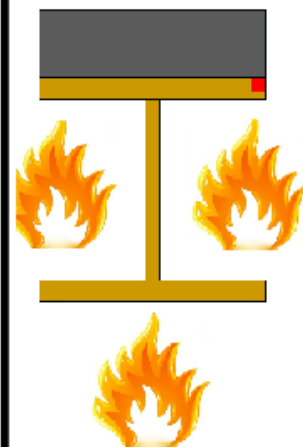
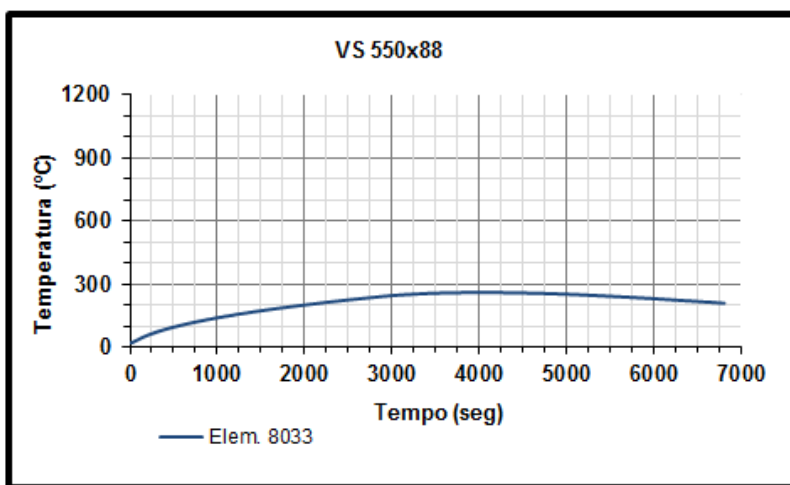


Figura 8.63 – Temperaturas do elemento 8033 ao longo do incêndio.

O gráfico da Figura 8.64 faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

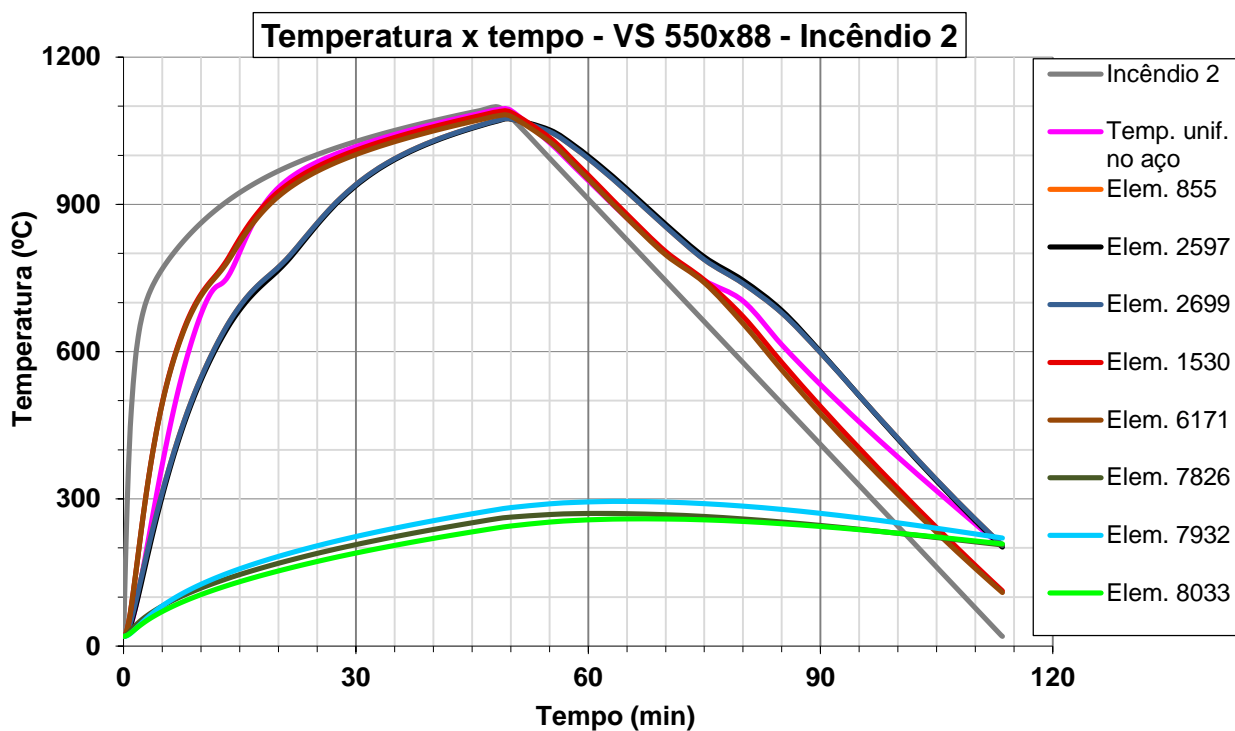


Figura 8.64 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 550 X 88.

Na Figura 8.64, assim como nos casos anteriores, as temperaturas da mesa superior são bem menores que as temperaturas da mesa inferior, já que a mesa superior possui uma laje de concreto sobreposta. Os elementos 855, 2597 e 2699 (elementos da mesa inferior) apresentam seus comportamentos tão similares que a diferença de suas curvas é praticamente imperceptível. Observa-se que, também para esse caso, as temperaturas da mesa inferior e da alma estão mais próximas das temperaturas do incêndio natural e das temperaturas de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.65 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

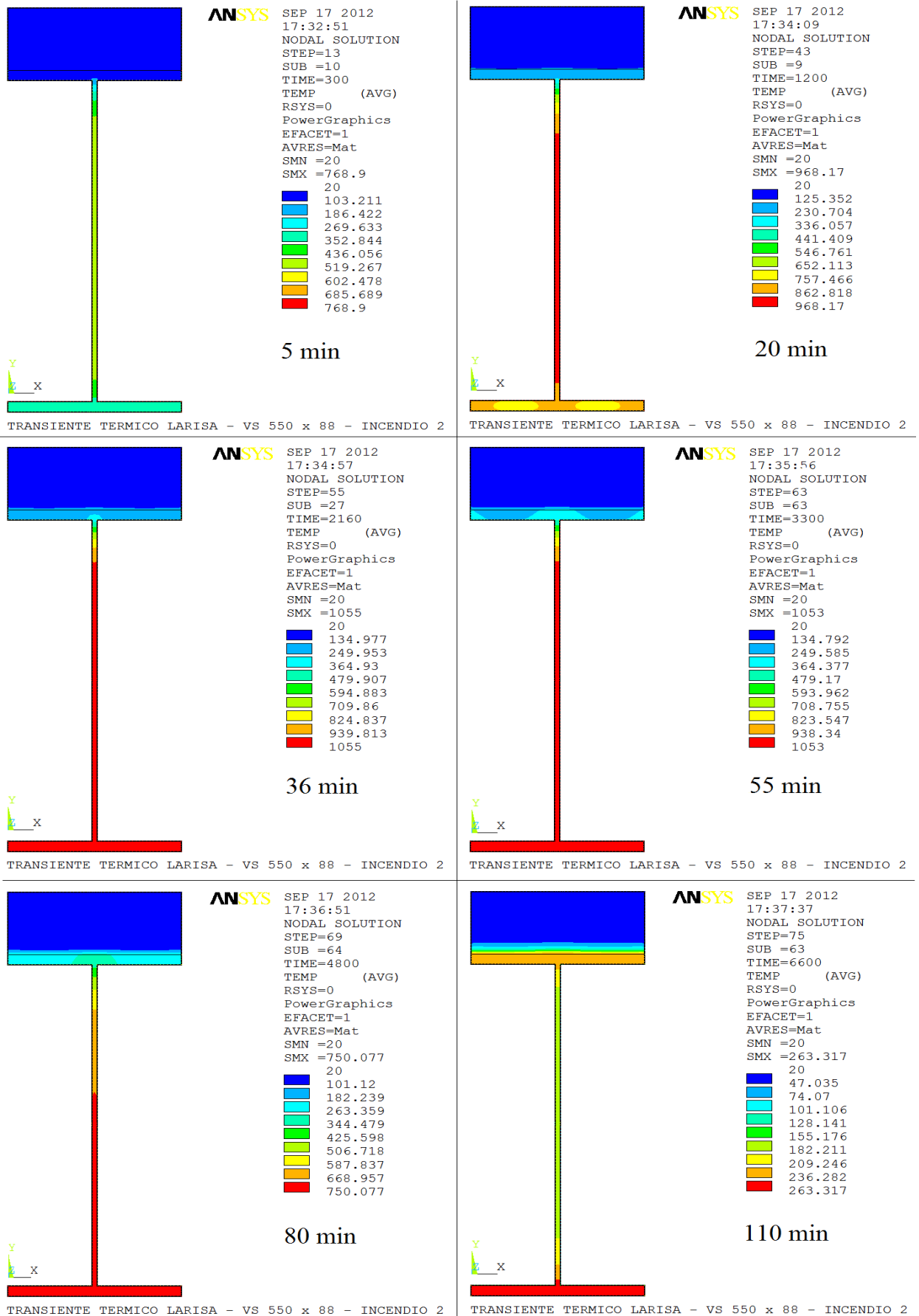


Figura 8.65 – Evolução térmica (°C) - Perfil VS 550 X 88 - ANSYS (2007).

#### 8.4.1.1 – Determinação da carga crítica

Considera-se apenas as contribuições das mesas superior e inferior no cálculo da carga crítica uniformemente distribuída, pois a alma tem uma contribuição desprezível para a flexão lateral da viga. Na Figura 8.66 são apresentadas as temperaturas médias obtidas através dos elementos selecionados, as temperaturas do Incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

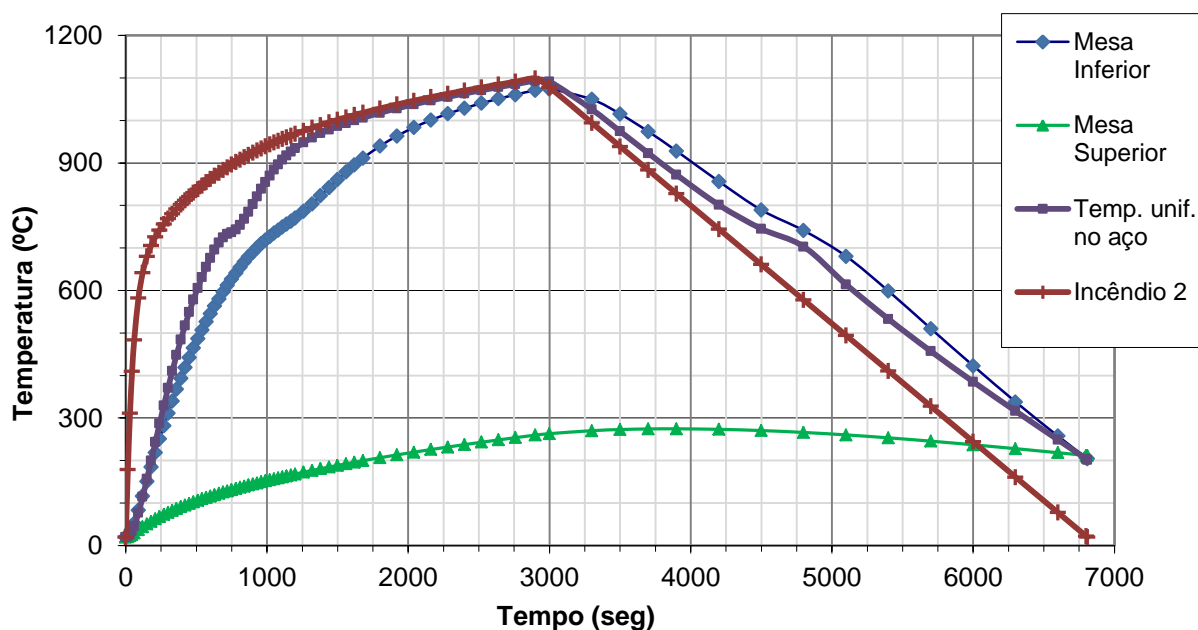


Figura 8.66 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 550 X 88.

É importante considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal do perfil de aço nas investigações térmicas, pois percebe-se na Figura 8.66 que as diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior são significativas.

Para o Caso 3 foram calculadas as cargas críticas uniformemente distribuídas de acordo com a formulação analítica proposta nesse trabalho, com a formulação proposta por Silva (1992) e de acordo com as recomendações normativas. Para isso, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade do aço para temperatura ambiente (20°C):  $E_0 = 20.500 \text{ kN/cm}^2$ ;
- Fator de redução para o módulo de elasticidade  $K_{E,0}$ : Conforme NBR 14323:1999;

- Fator de redução para o limite de escoamento dos aços  $K_{y,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- Tensão de escoamento do aço para temperatura ambiente (20°C):  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ ;
- A esbeltez  $\lambda$  deve apresentar valor maior que a esbeltez para início de escoamento  $\lambda_r$  para caracterizar que a viga esteja em estado de flexão lateral com flexo-torção (FLT) em regime elástico.

Considerando  $\lambda > \lambda_r$ , define-se o comprimento da viga sem travamento lateral que, para o perfil VS 550 X 88, foi de 10 metros.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil VS 550 X 88 submetido ao Incêndio 2 foi calculada para as formulações já mencionadas a cada passo de tempo. Na Figura 8.67 é apresentado o gráfico comparativo entre as soluções estudadas:

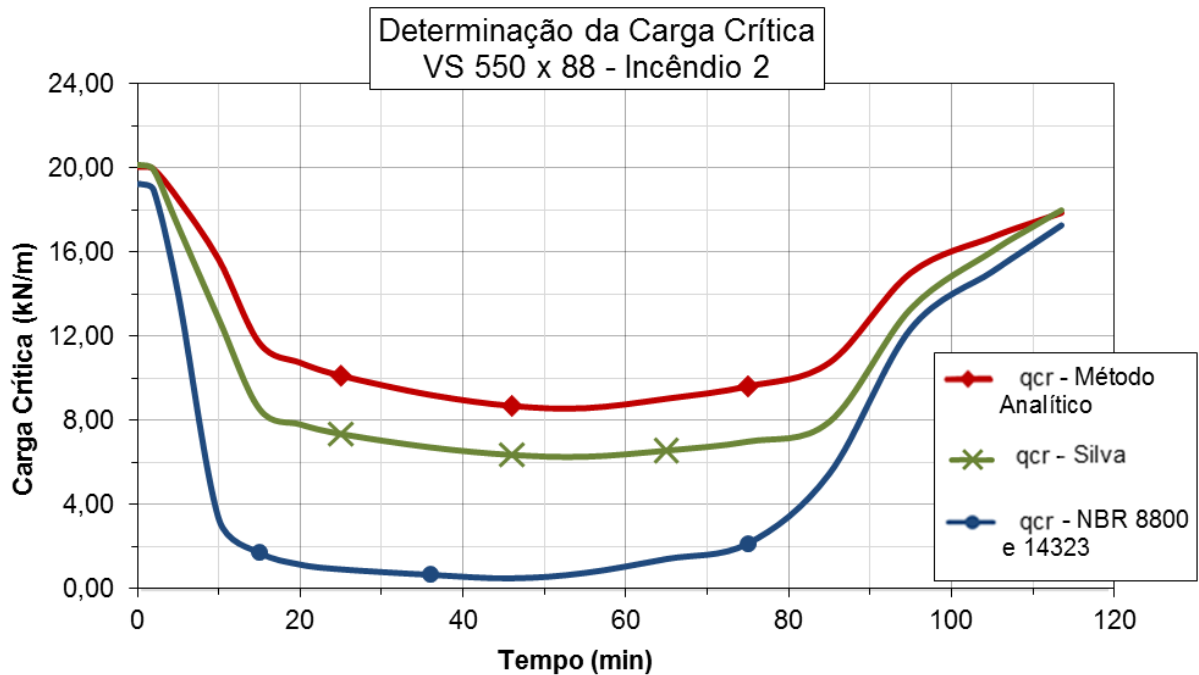


Figura 8.67 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2.

A Tabela 8.12 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos três métodos propostos:

Tabela 8.12 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88.

<b>Caso 3 (Sem proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0,00	19,22	20,05	20,13
0,5	19,22	20,05	20,13
2,00	18,93	19,93	19,90
5,00	14,01	18,52	17,22
10,00	3,31	15,63	12,81
15,00	1,72	11,67	8,53
20,00	1,15	10,74	7,81
25,00	0,92	10,12	7,36
36,00	0,66	9,21	6,72
46,00	0,50	8,69	6,36
55,00	0,75	8,58	6,27
65,00	1,42	9,03	6,57
75,00	2,15	9,62	7,00
85,00	5,47	10,74	7,93
95,00	12,36	15,01	13,31
105,00	15,06	16,70	16,03
110,00	16,36	17,40	17,20
113,50	17,27	17,86	17,99

Na Figura 8.67, comparando-se os resultados obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), é notável que no início e final do incêndio as formulações são praticamente idênticas em seus valores. Na medida em que se tem um aumento de temperatura, a diferença entre os resultados se intensifica, e a medida que há um resfriamento, essa diferença diminui. Como nos casos anteriores, é verificado que essas duas formulações são bastante próximas.

Analisando-se os valores obtidos na Figura 8.67 através da formulação analítica proposta no presente trabalho e através das recomendações normativas, mais uma vez observa-se que a carga crítica uniformemente distribuída proposta pelas normas brasileiras é muito conservadora. Quando há o aumento da temperatura no incêndio, como a formulação analítica aqui proposta considera o aquecimento desigual das mesas e a formulação proposta pelas normas brasileiras considera um aquecimento uniforme do aço, a diferença nos resultados aumenta consideravelmente. Isso ocorre, pois a mesa comprimida está parcialmente protegida por uma laje de concreto, fazendo com que haja um aumento na resistência do perfil no caso da formulação proposta nesse trabalho.



#### 8.4.2 – Perfil com proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 3 com proteção térmica é constituída do perfil de aço VS 550 X 88, do material refratário sobreposto à mesa superior, do revestimento de proteção térmica de concreto leve e da camada de ar envolvente, de acordo com o esquema geral apresentado na Figura 7.2. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 9451 nós e 9240 elementos.

A camada de ar que envolve o revestimento térmico tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo. A camada de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Também para este caso com proteção térmica, ao final do incêndio, a maioria dos elementos da seção transversal do perfil ainda estava atingindo sua temperatura máxima. Para se obter a fase de resfriamento dos mesmos, foram feitos passos adicionais, totalizando em 116 passos (45800 segundos).

Nas Figuras 8.68 até 8.75 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

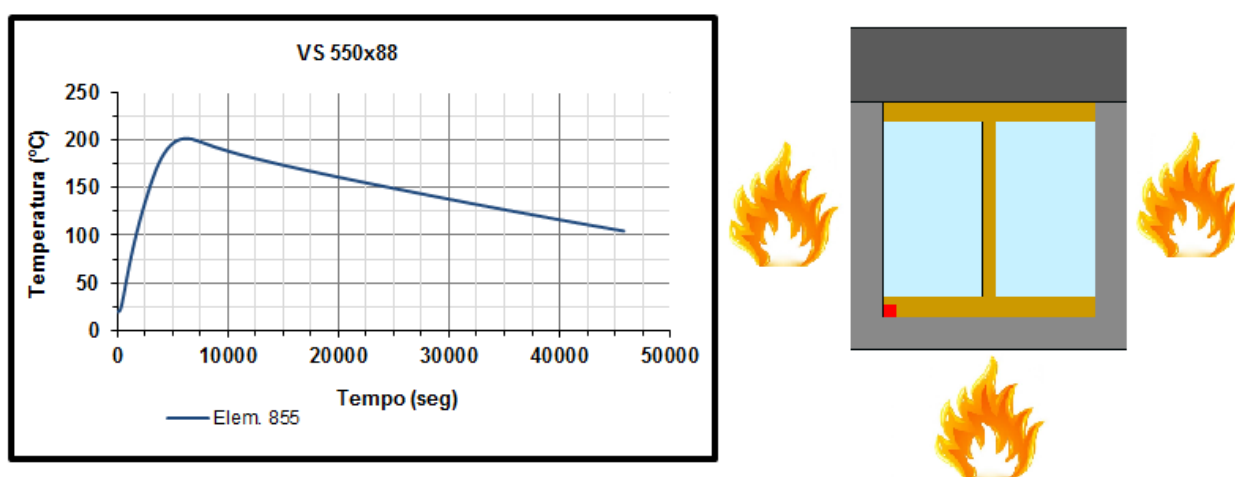


Figura 8.68 – Temperaturas do elemento 855 ao longo do incêndio.

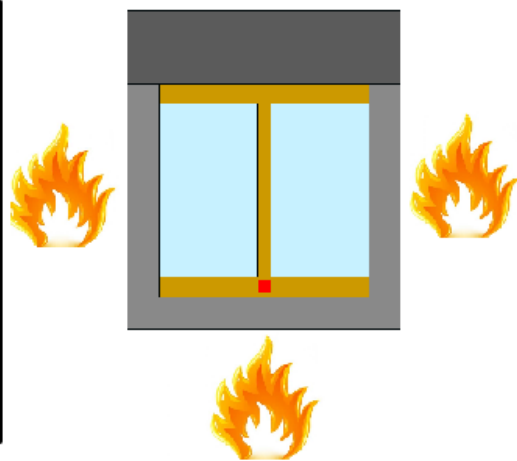
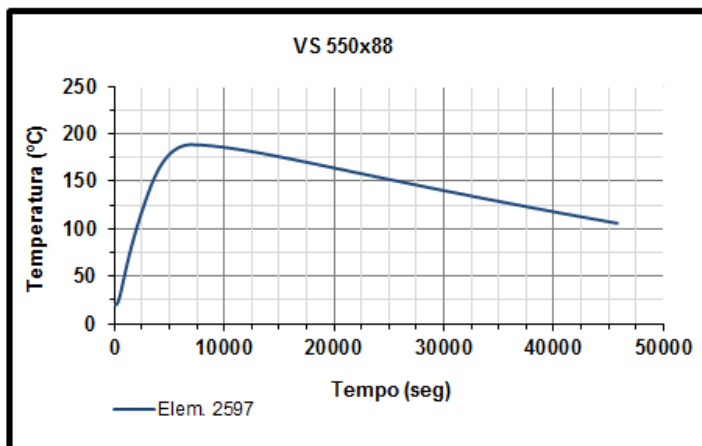


Figura 8.69 – Temperaturas do elemento 2597 ao longo do incêndio.

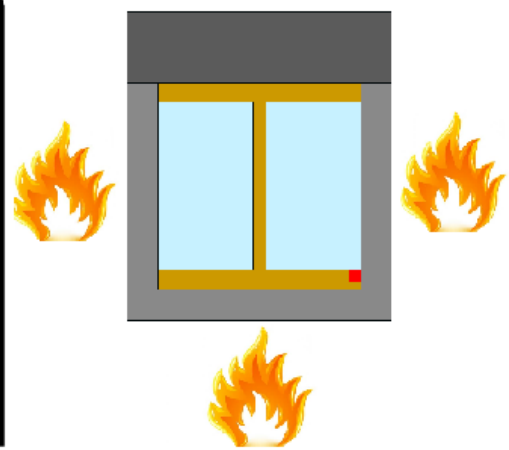
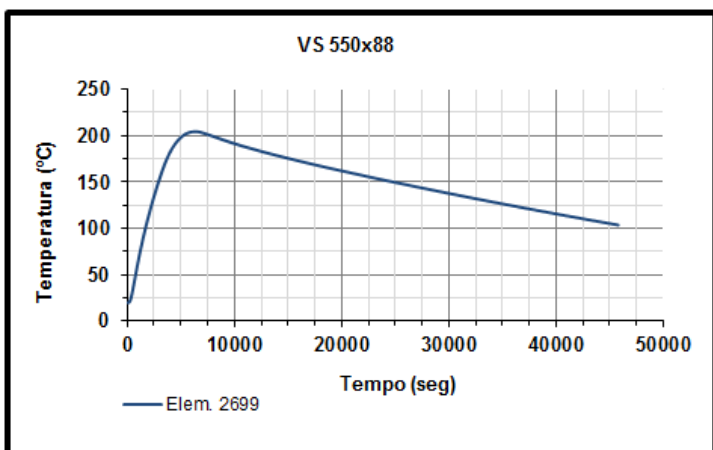


Figura 8.70 – Temperaturas do elemento 2699 ao longo do incêndio.

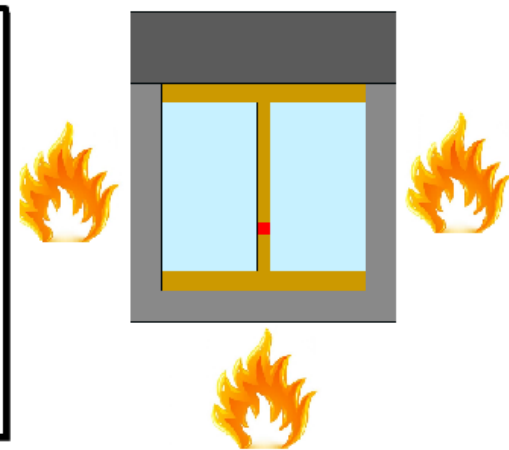
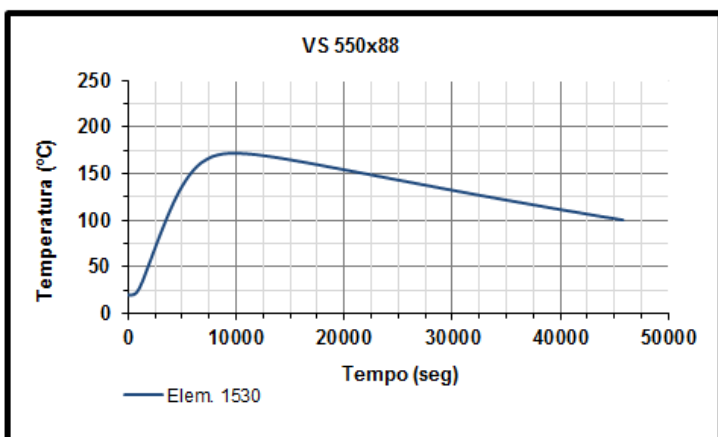


Figura 8.71 – Temperaturas do elemento 1530 ao longo do incêndio.

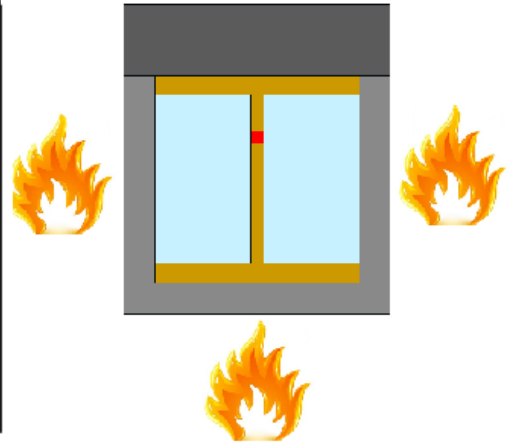
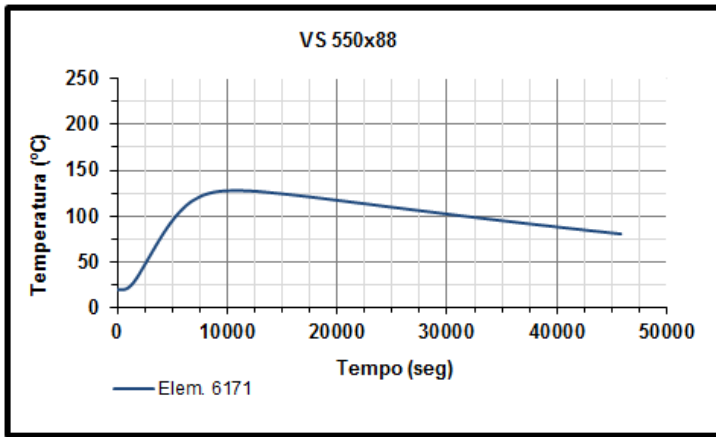


Figura 8.72 – Temperaturas do elemento 6171 ao longo do incêndio.

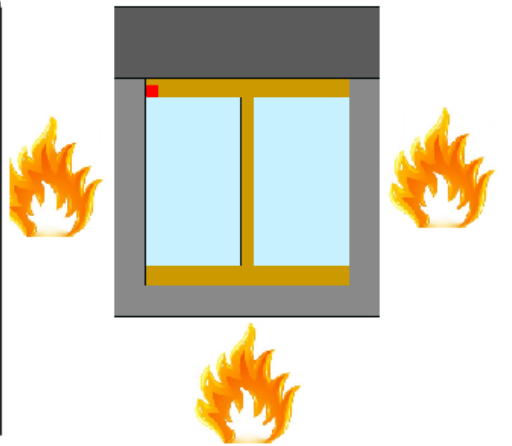
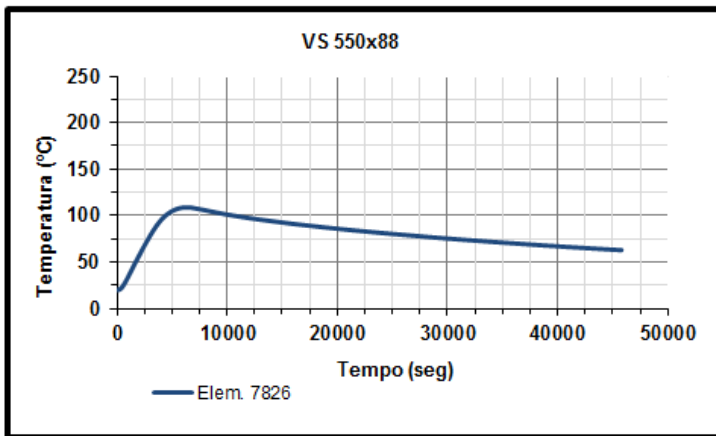


Figura 8.73 – Temperaturas do elemento 7826 ao longo do incêndio.

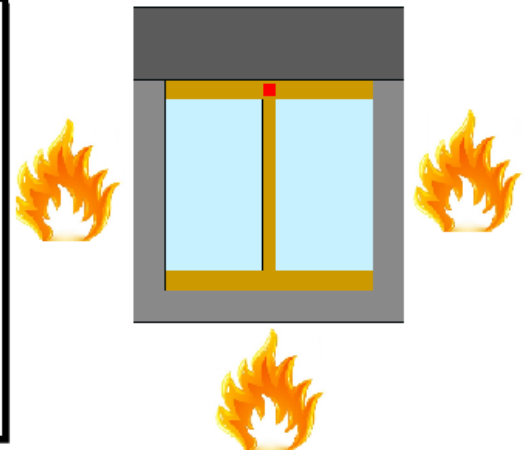
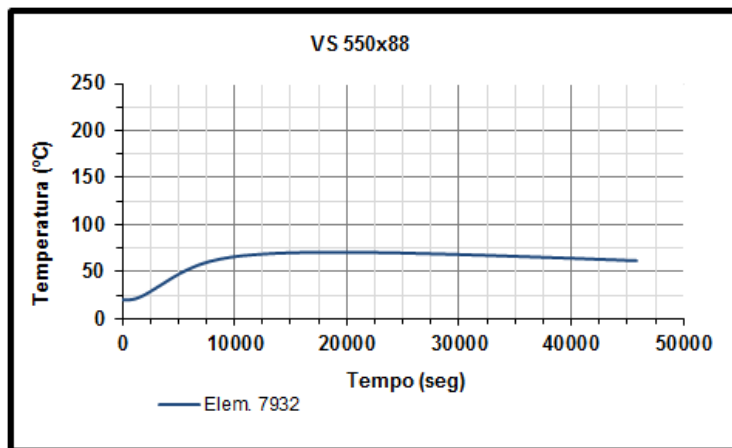


Figura 8.74 – Temperaturas do elemento 7932 ao longo do incêndio.

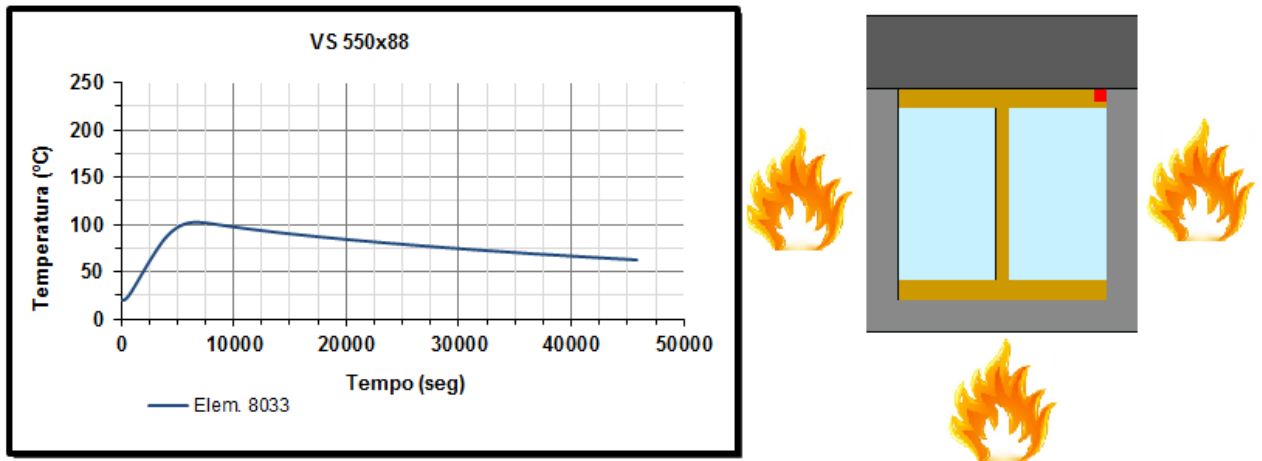


Figura 8.75 – Temperaturas do elemento 8033 ao longo do incêndio.

Na Figura 8.76 é feita uma comparação em relação ao desenvolvimento das temperaturas:

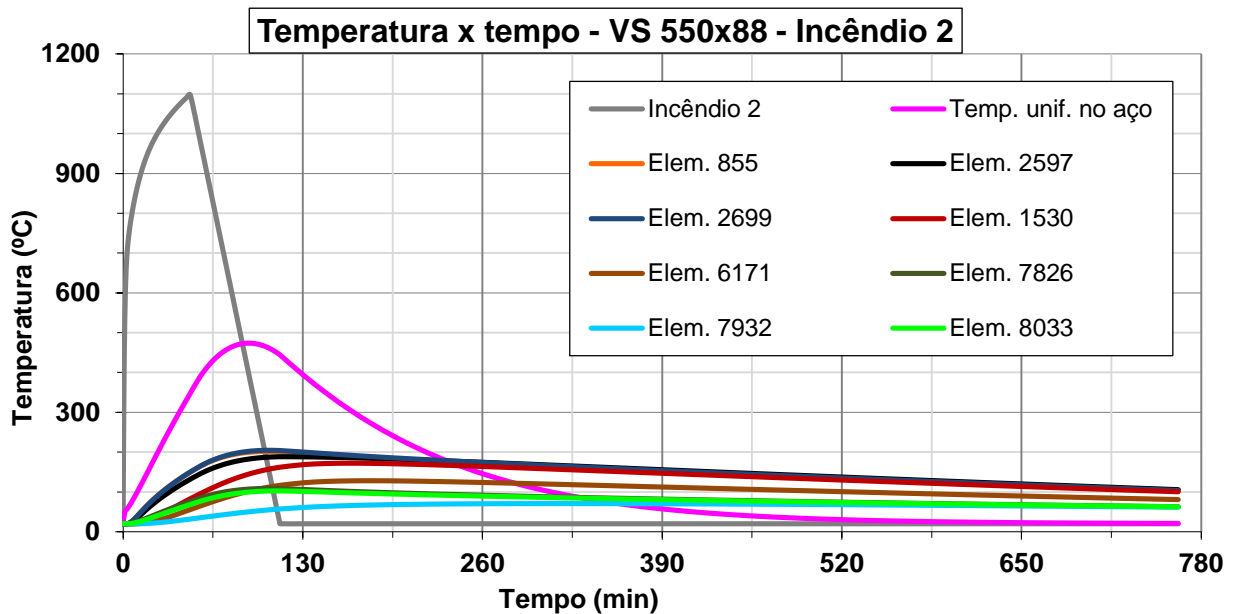


Figura 8.76 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 550 X 88.

A Figura 8.76 mostra que as temperaturas da mesa inferior são bem menores que as temperaturas da mesa superior. Devido à presença da proteção térmica, as temperaturas dos elementos estão muito abaixo dos valores atingidos pelo Incêndio 2. Assim como no Caso 2, por volta do instante de 90 minutos, as temperaturas dos elementos estão bem abaixo da curva de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.77 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

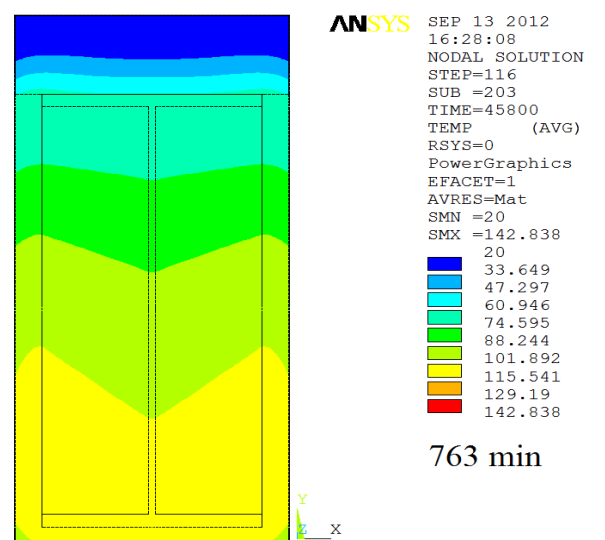
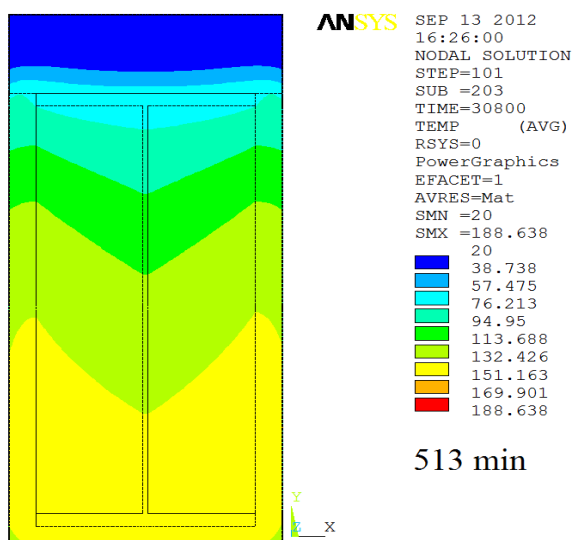
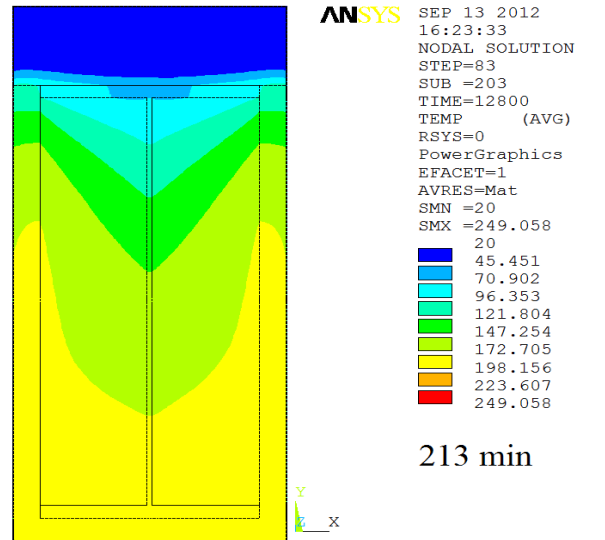
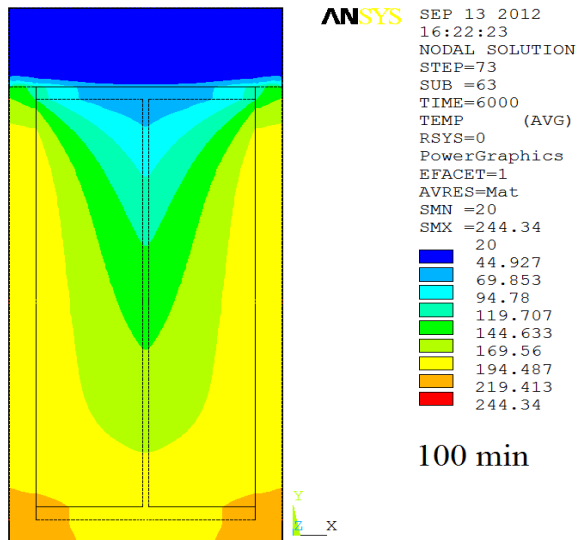
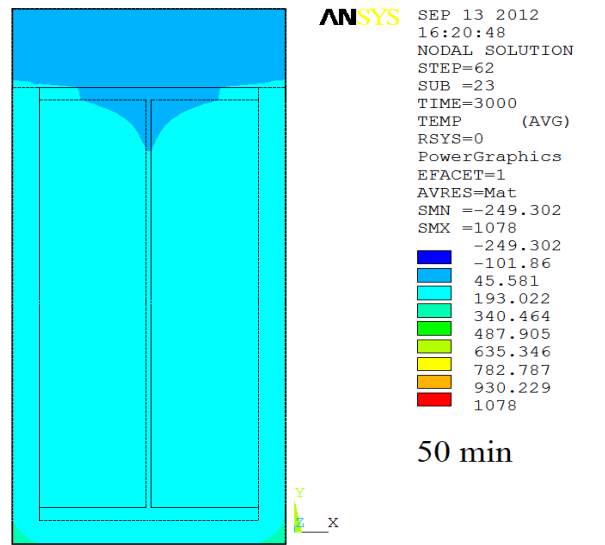
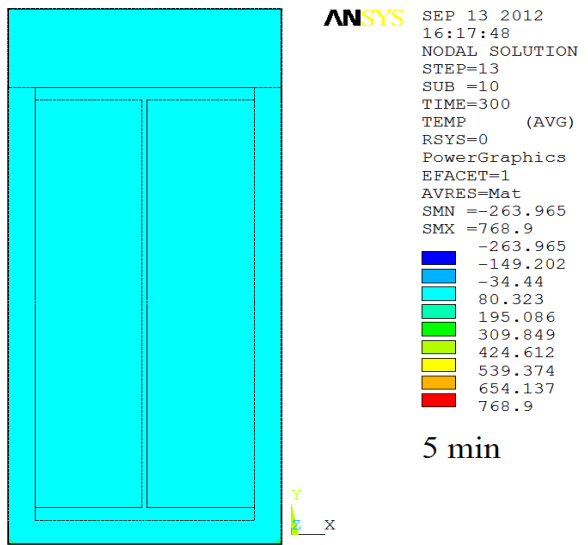


Figura 8.77 – Evolução térmica (°C) - Perfil VS 550 X 88 - ANSYS (2007).

#### 8.4.2.1 – Determinação da carga crítica

Na Figura 8.78 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

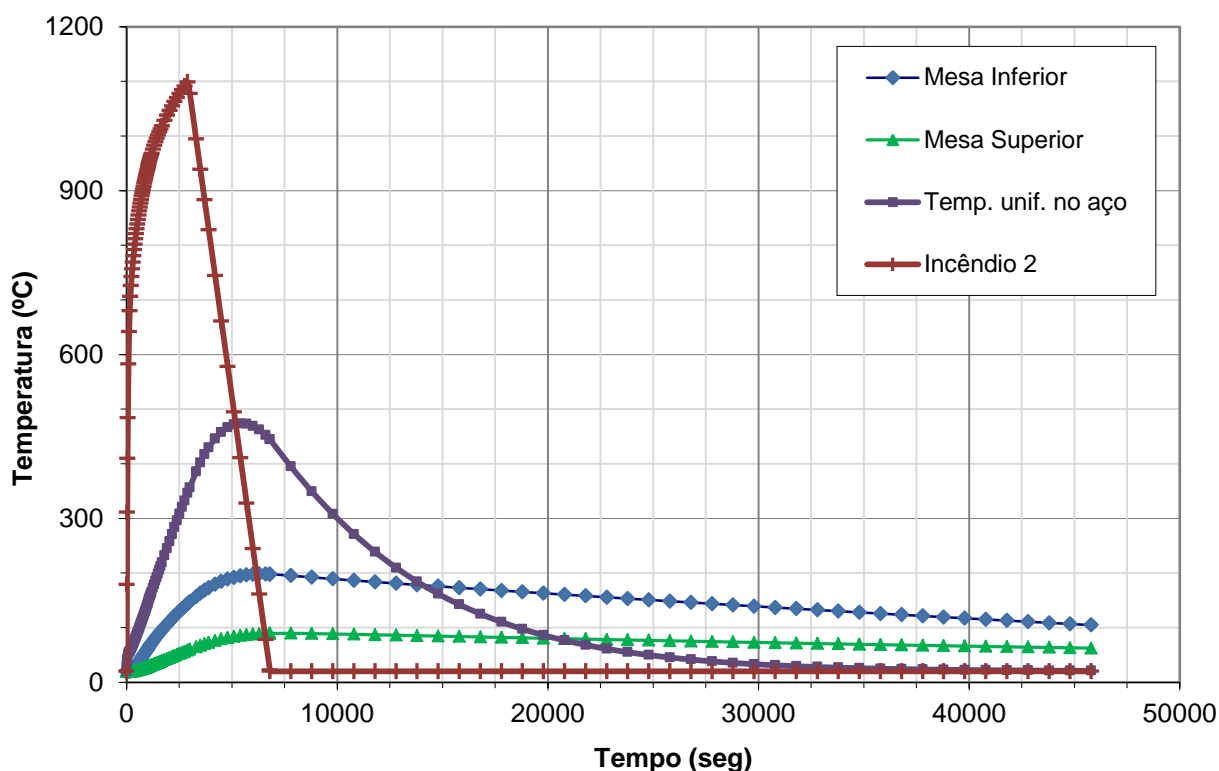


Figura 8.78 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil VS 550 X 88.

Na Figura 8.78 nota-se a importância de se considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal, pois as diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior são significativas.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil VS 550 X 88 submetido ao Incêndio 2 foi calculada para as três formulações a cada passo de tempo. Para isso, foram adotados os mesmos parâmetros mencionados anteriormente para o Caso 3 sem proteção térmica. Na Figura 8.79 é apresentado o gráfico comparativo entre as três formulações:

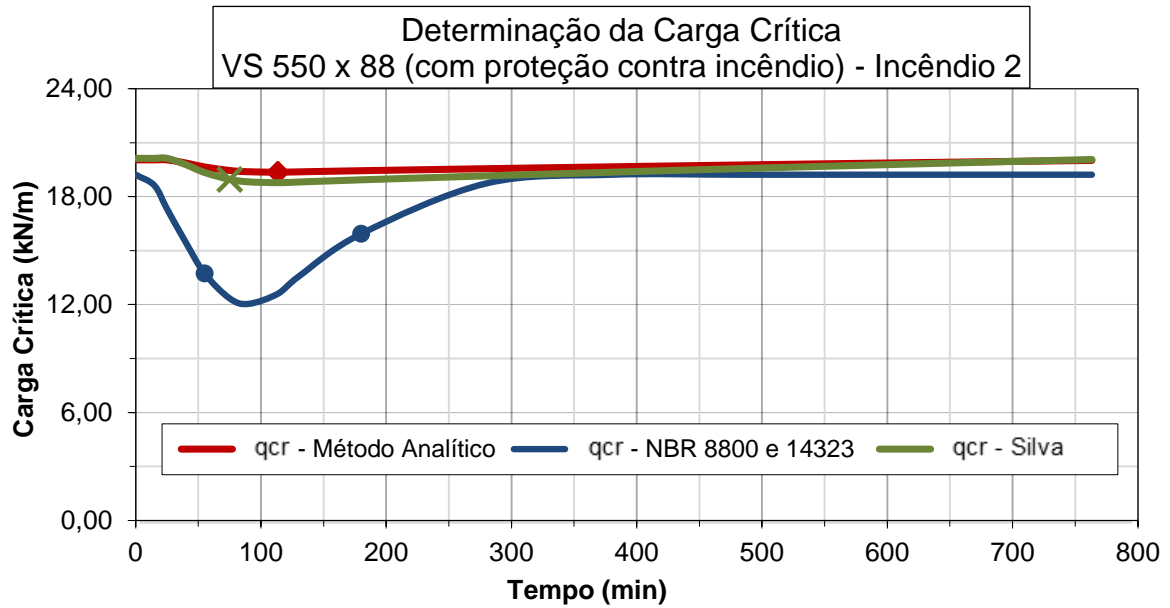


Figura 8.79 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2.

A Tabela 8.13 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos três métodos:

Tabela 8.13 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88.

<b>Caso 3 (com proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0,00	19,22	20,05	20,13
15,00	18,62	20,05	20,13
25,00	17,32	20,05	20,13
40,00	15,46	19,87	19,78
55,00	13,73	19,65	19,34
75,00	12,35	19,46	18,96
90,00	12,04	19,38	18,82
113,50	12,60	19,36	18,78
130,00	13,56	19,38	18,81
180,00	15,93	19,44	18,94
280,00	18,74	19,56	19,16
380,00	19,22	19,66	19,36
480,00	19,22	19,76	19,56
580,00	19,22	19,85	19,74
630,00	19,22	19,90	19,83
680,00	19,22	19,94	19,92
730,00	19,22	19,99	20,01
763,33	19,22	20,01	20,07

Na Figura 8.79, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), novamente observa-se que os resultados são praticamente idênticos. Como nesse caso há a proteção contra incêndio, durante todo o incêndio não há elevações significativas da temperatura na viga de aço e essa diferença de resultados é quase que imperceptível.

Em relação às recomendações normativas brasileiras, nesse caso, elas se mostram mais conservadoras quando há um aumento da temperatura no incêndio. Ou seja, a temperaturas não tão elevadas seus resultados se mostram com valores muito próximos aos obtidos através da formulação analítica proposta nesse trabalho.

### 8.4.3 – Influência do isolamento

Na Figura 8.80 é apresentado um gráfico comparando as cargas críticas obtidas para os dois casos estudados em relação ao perfil VS 550 X 88: com e sem revestimento.

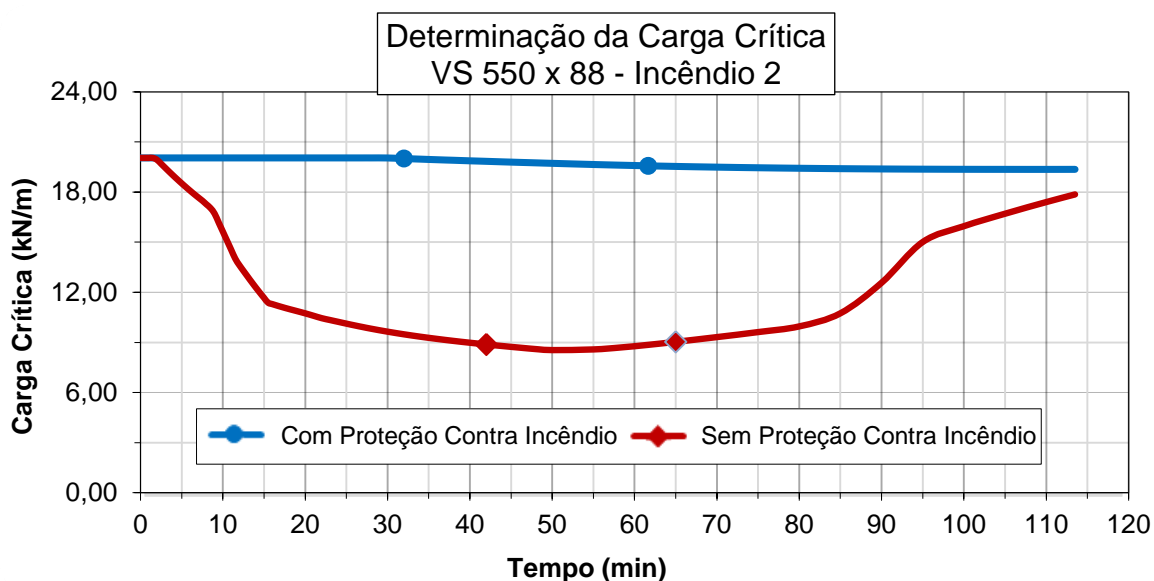


Figura 8.80 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88 – Incêndio 2 - Formulação analítica.

Na Figura 8.80, novamente é observado que a existência de um revestimento térmico em vigas de aço tem uma influência significativa nos resultados da carga crítica uniformemente distribuída. Quando há a proteção contra incêndio, as temperaturas na viga de aço não se elevam tanto quanto no mesmo caso sem revestimento. Para esse caso,



assim como no Caso 2, a carga crítica uniformemente distribuída mais que duplicou quando se adotou um revestimento térmico. A Tabela 8.14 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada para os dois casos:

Tabela 8.14 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil VS 550 X 88.

Caso 3		
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)	
	Sem Proteção	Com Proteção
0,00	20,05	20,05
3,00	19,45	20,05
6,00	18,09	20,05
9,00	16,71	20,05
13,00	12,95	20,05
15,00	11,67	20,05
20,00	10,74	20,05
25,00	10,12	20,05
30,00	9,64	20,04
40,00	8,98	19,87
50,00	<b>8,54</b>	19,72
55,00	8,58	19,65
65,00	9,03	19,54
70,00	9,32	19,49
80,00	9,96	19,43
85,00	10,74	19,40
90,00	12,57	19,38
95,00	15,01	19,37
100,00	15,96	19,36
105,00	16,70	19,36
110,00	17,40	19,36
113,50	17,86	<b>19,36</b>

### 8.5 – CASO 4: PERFIL “I” CVS 600 X 210 – INCÊNDIO 3

O incêndio natural adotado para o Caso 4 foi o Incêndio 3, cujo o grau de ventilação vale  $0 = 0,12 \text{ m}^{1/2}$  e a carga de incêndio específica vale  $600 \text{ MJ/m}^2$ . A duração desse incêndio é de 4215 segundos (70,25 minutos) e sua curva está apresentada na Figura 8.81:

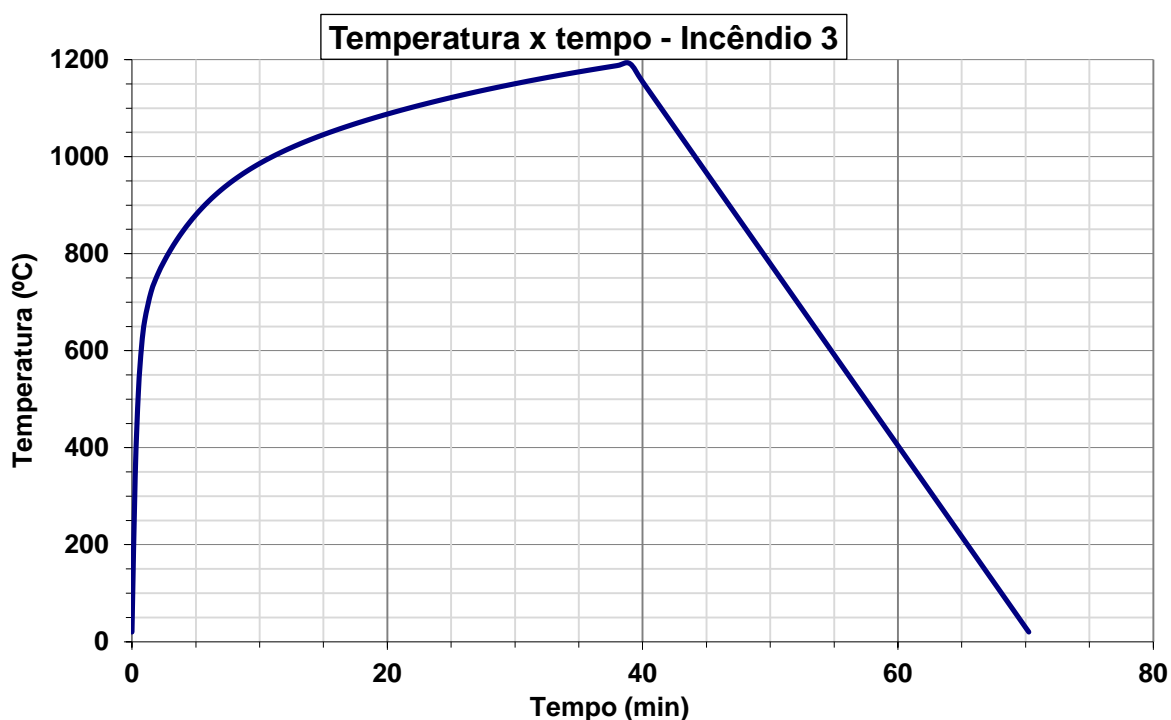


Figura 8.81 – Incêndio natural 3.

A Tabela 8.15 apresenta as propriedades geométricas do perfil de aço CVS 600 X 210 adotado para esse caso:

Tabela 8.15 – Propriedades geométricas do perfil CVS 600 X 210.

Perfil	h (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	M (kg/m)
CVS 600x210	600	400	22,4	16,0	268,0	210,0

Foram escolhidos elementos estratégicos de cada mesa e da alma de modo a representarem pontos significativos do perfil para se obter uma temperatura média de cada trecho, em cada passo de tempo. Para o perfil CVS 600 X 210 foram escolhidos os elementos: 5964, 5802 e 5922 (mesa inferior); 5544 e 5361 (alma); 4415, 4618 e 4816 (mesa superior). A Figura 8.82 apresenta esses elementos selecionados:

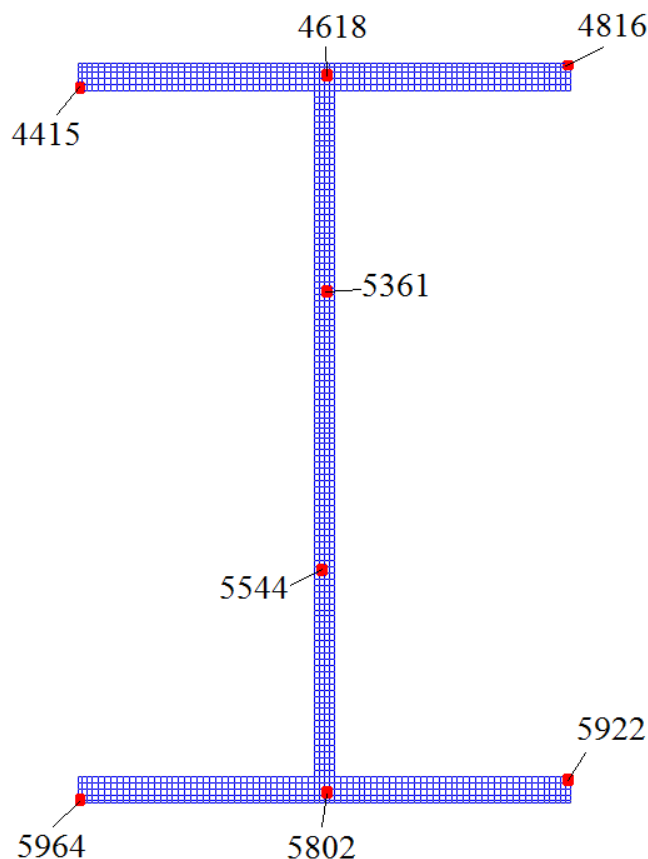


Figura 8.82 – Localização dos elementos selecionados para o perfil CVS 600 X 210.

### 8.5.1 – Perfil sem proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 4 sem proteção térmica é constituída do perfil de aço CVS 600 X 210, do material refratário sobreposto à mesa superior e da camada de ar envolvente, como apresentado no esquema geral da Figura 7.1. Para definir a estrutura dessa geometria no programa computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 3831 nós e 3520 elementos.

A camada de ar que envolve o perfil de aço tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo, através de curvas temporais. A camada de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Nas Figuras 8.83 até 8.90 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

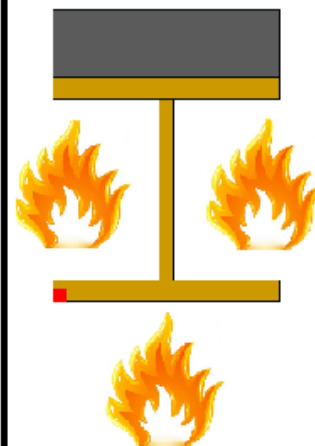
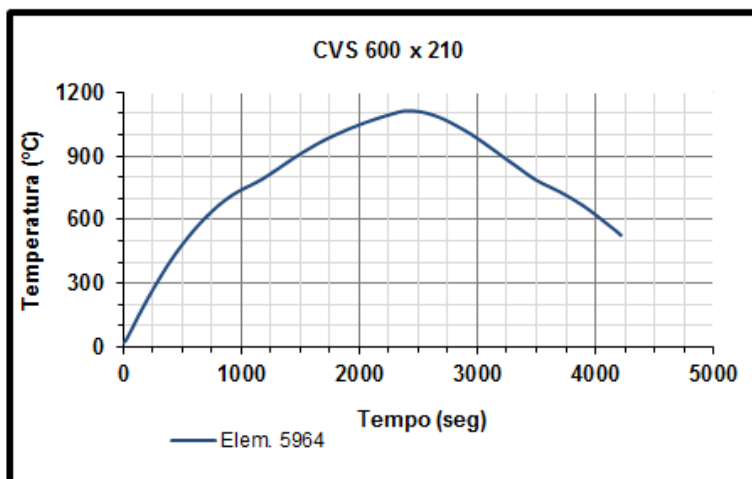


Figura 8.83 – Temperaturas do elemento 5964 ao longo do incêndio.

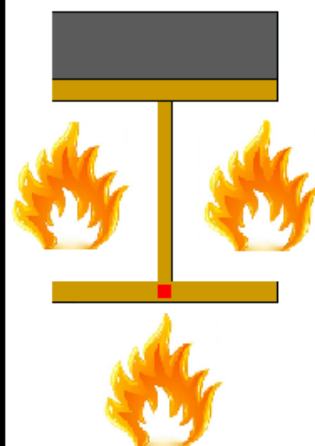
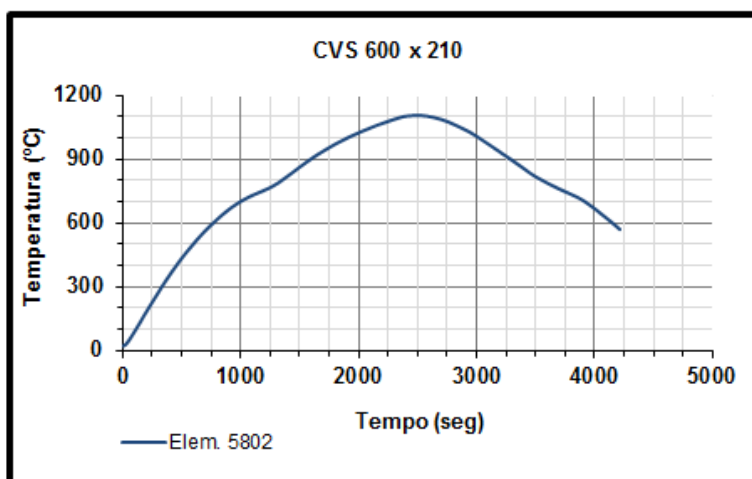


Figura 8.84 – Temperaturas do elemento 5802 ao longo do incêndio.

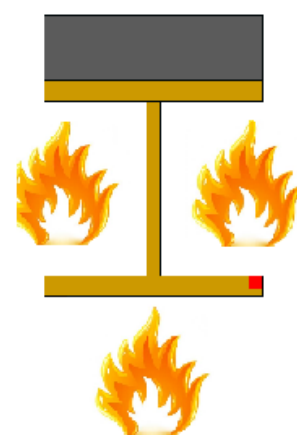
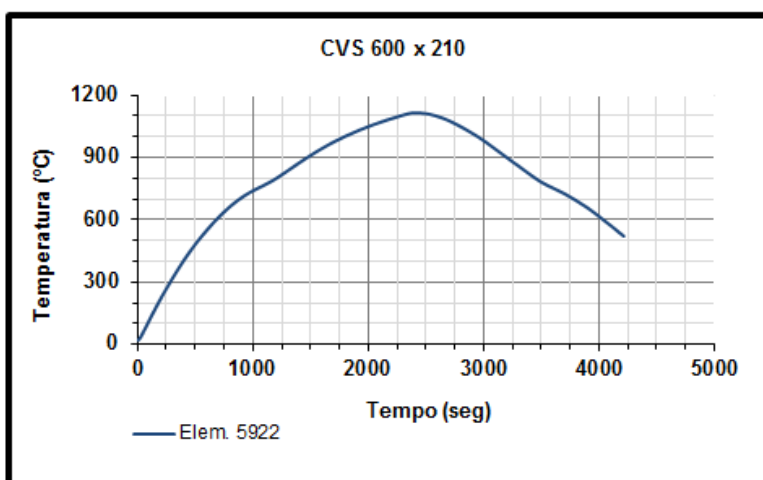


Figura 8.85 – Temperaturas do elemento 5922 ao longo do incêndio.

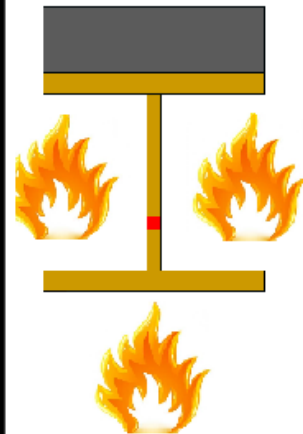
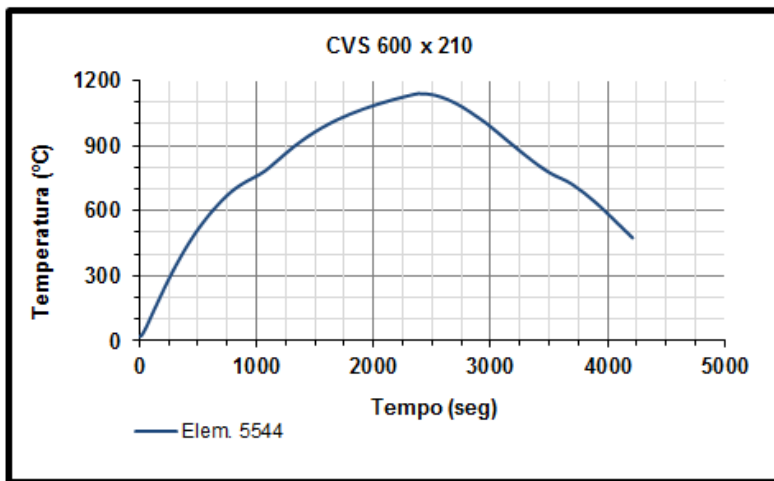


Figura 8.86 – Temperaturas do elemento 5544 ao longo do incêndio.

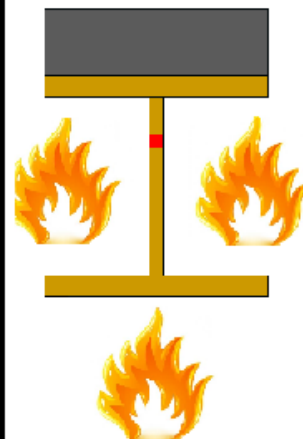
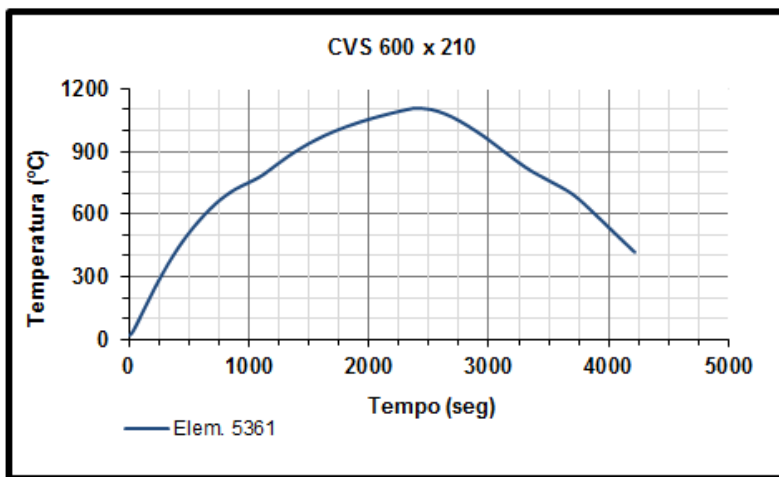


Figura 8.87 – Temperaturas do elemento 5361 ao longo do incêndio.

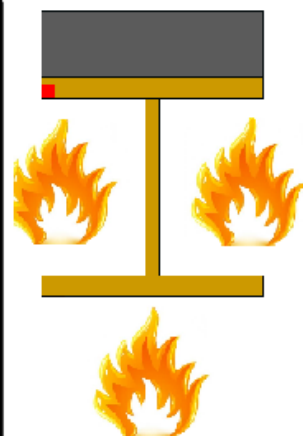
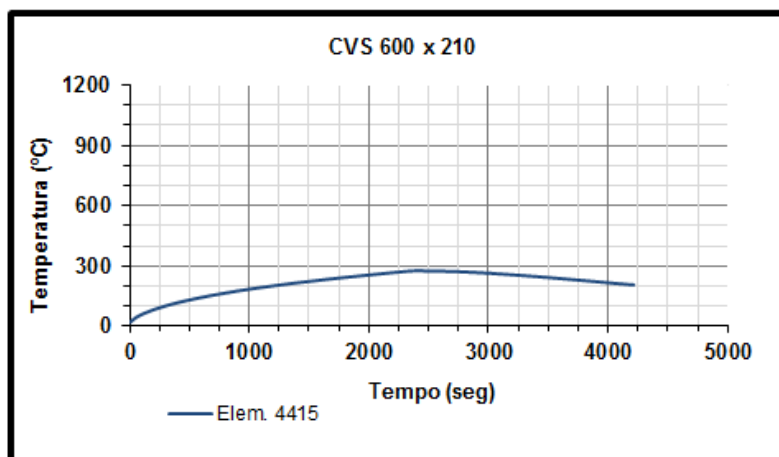


Figura 8.88 – Temperaturas do elemento 4415 ao longo do incêndio.

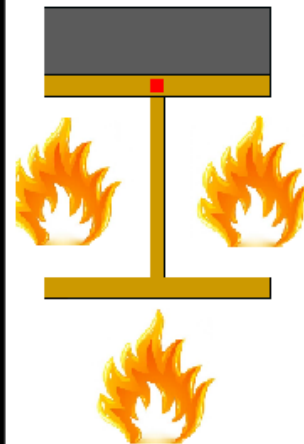
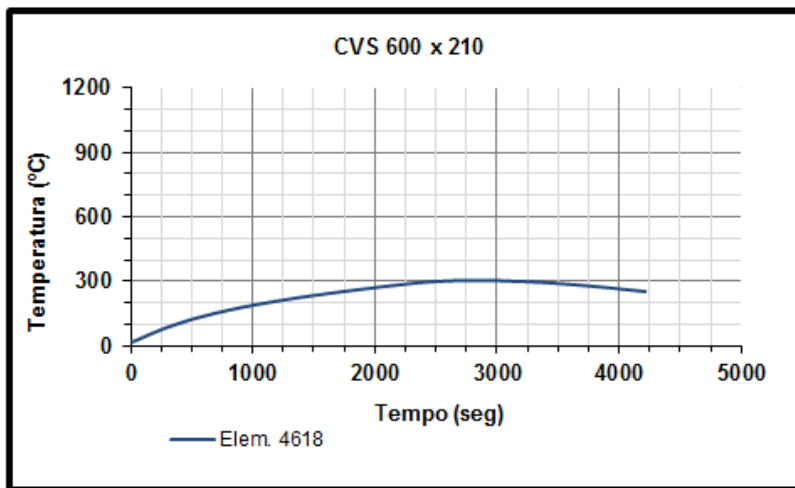


Figura 8.89 – Temperaturas do elemento 4618 ao longo do incêndio.

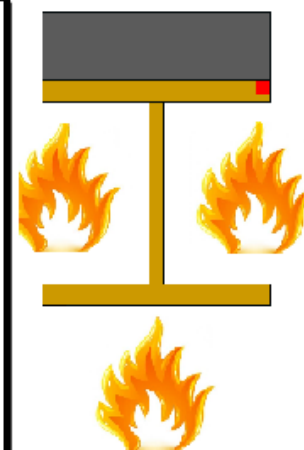
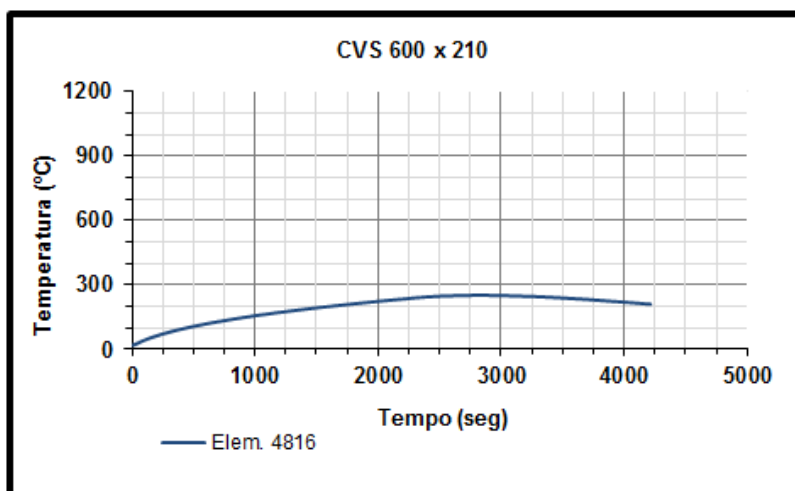


Figura 8.90 – Temperaturas do elemento 4816 ao longo do incêndio.

O gráfico da Figura 8.91 faz a comparação do desenvolvimento das temperaturas dos elementos, das temperaturas de aquecimento uniforme no aço e das temperaturas do incêndio natural:

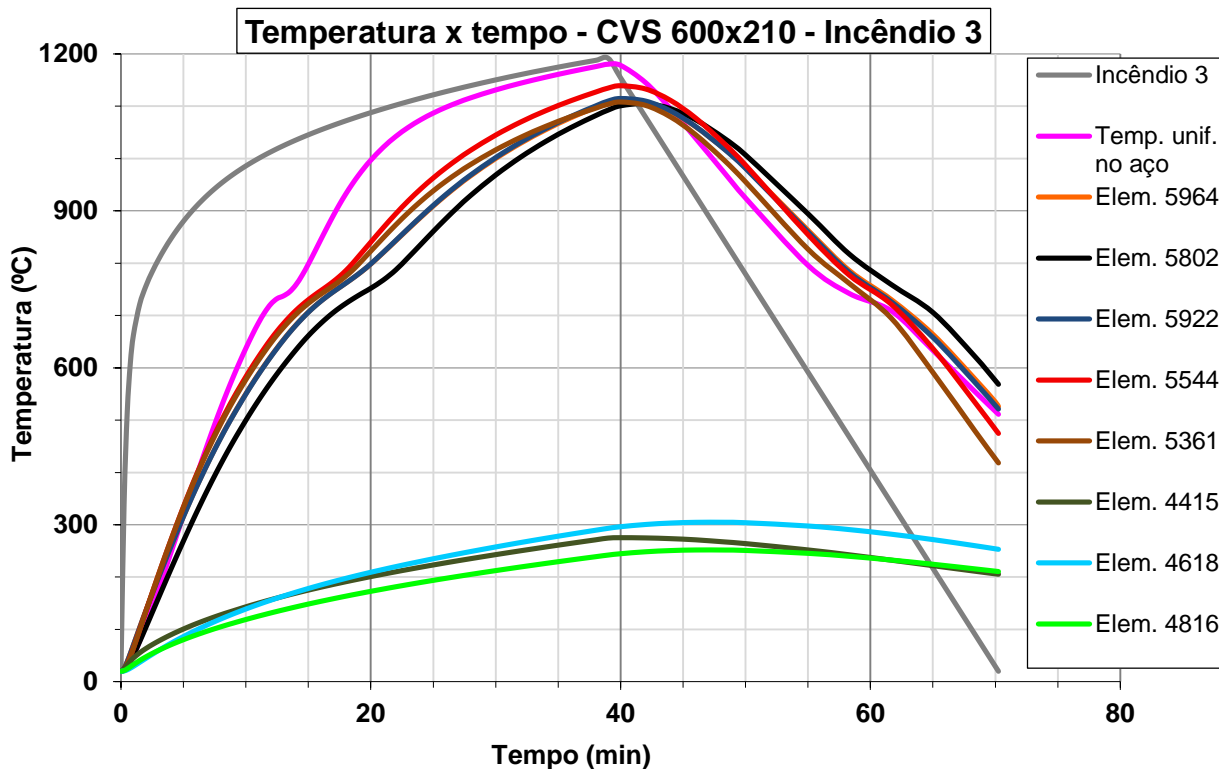


Figura 8.91 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 X 210.

Na Figura 8.91, assim como em todos os casos anteriores, as temperaturas da mesa superior são bem menores que as temperaturas da mesa inferior, já que a mesa superior possui uma laje de concreto sobreposta. Os elementos 5964 e 5922 (elementos da mesa inferior) apresentam seus comportamentos tão similares que a diferença de suas curvas é praticamente imperceptível. Observa-se que, também para esse caso, as temperaturas da mesa inferior e da alma estão mais próximas das temperaturas do incêndio natural e das temperaturas de aquecimento uniforme do aço.

A Figura 8.92 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

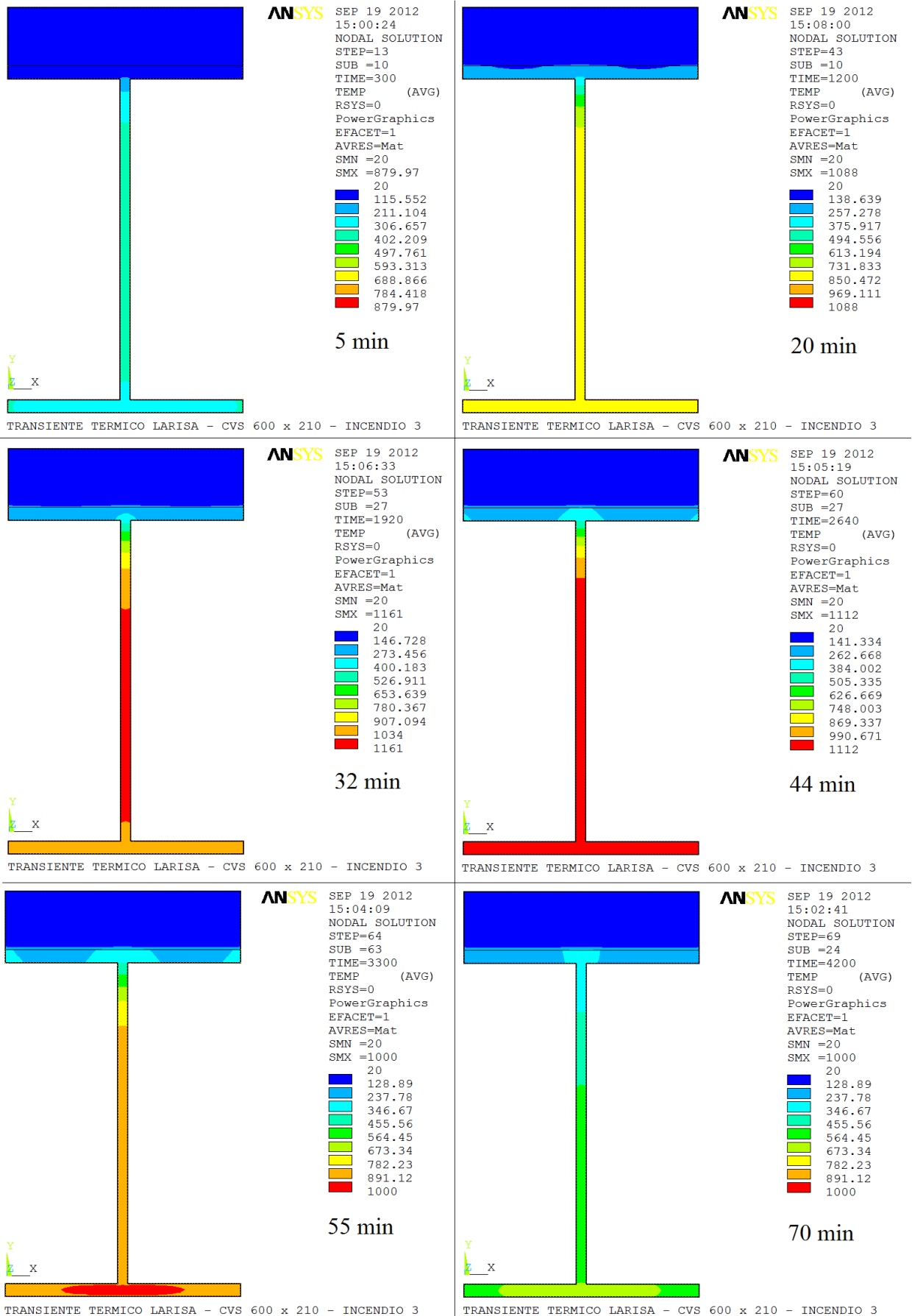


Figura 8.92 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600 X 210 - ANSYS (2007).



### 8.5.1.1 – Determinação da carga crítica

Considera-se apenas as contribuições das mesas superior e inferior no cálculo da carga crítica uniformemente distribuída, pois a alma tem uma contribuição desprezível para a flexão lateral da viga. Na Figura 8.93 são apresentadas as temperaturas médias obtidas através dos elementos selecionados, as temperaturas do Incêndio 3 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

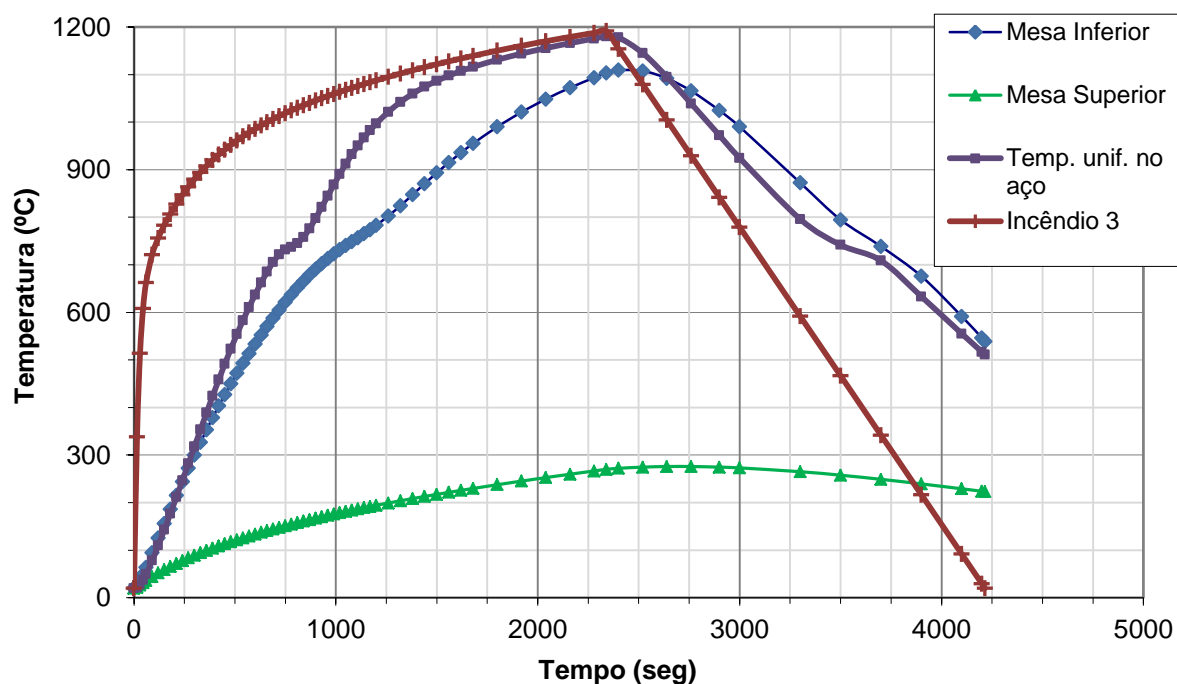


Figura 8.93 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 600 X 210.

É importante considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal do perfil de aço nas investigações térmicas, pois percebe-se mais uma vez na Figura 8.93 que as diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior são significativas.

Para o Caso 4 foram calculadas as cargas críticas uniformemente distribuídas de acordo com a formulação analítica proposta nesse trabalho, com a formulação proposta por Silva (1992) e de acordo com as recomendações normativas. Para isso, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade do aço para temperatura ambiente (20°C):  $E_0 = 20.500 \text{ kN/cm}^2$ ;

- Fator de redução para o módulo de elasticidade  $K_{E,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Fator de redução para o limite de escoamento dos aços  $K_{y,\theta}$ : Conforme NBR 14323:1999;
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$ ;
- Tensão de escoamento do aço para temperatura ambiente (20°C):  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ ;
- A esbeltez  $\lambda$  deve apresentar valor maior que a esbeltez para início de escoamento  $\lambda_r$  para caracterizar que a viga esteja em estado de flexão lateral com flexo-torção (FLT) em regime elástico.

Considerando  $\lambda > \lambda_r$ , define-se o comprimento da viga sem travamento lateral que, para o perfil CVS 600 X 210, foi de 16 metros.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil CVS 600 X 210 submetido ao Incêndio 3 foi calculada para as formulações já mencionadas a cada passo de tempo. Na Figura 8.94 é apresentado o gráfico comparativo entre as soluções estudadas:

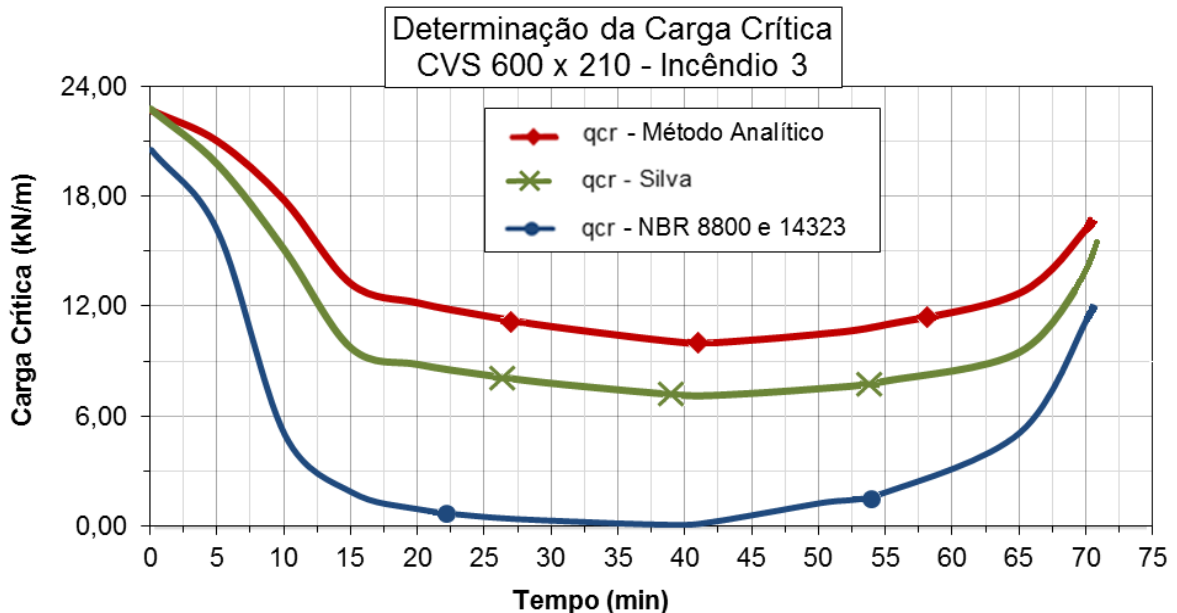


Figura 8.94 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3.

A Tabela 8.16 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos três métodos propostos:

Tabela 8.16 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.

<b>Caso 4 (Sem proteção contra incêndio)</b>			
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0,00	20,55	22,67	22,75
5,00	16,06	20,98	19,73
10,00	4,99	17,76	15,08
15,00	1,86	13,20	9,71
20,00	0,94	12,17	8,82
25,00	0,52	11,47	8,25
30,00	0,32	10,87	7,79
39,00	0,09	10,06	7,18
42,00	0,25	9,99	7,13
50,00	1,27	10,46	7,50
55,00	1,88	10,98	7,92
65,00	5,14	12,70	9,50
70,00	11,32	16,21	13,82
70,25	11,66	16,43	14,14

Na Figura 8.94, comparando-se os resultados obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), é notável que as formulações são muito parecidas. Na medida em que se tem um aumento de temperatura, a diferença entre os resultados se intensifica.

Analisando-se os valores obtidos na Figura 8.94 através da formulação analítica proposta no presente trabalho e através das recomendações normativas, mais uma vez observa-se que a carga crítica uniformemente distribuída proposta pelas normas brasileiras é muito conservadora. Quando há o aumento da temperatura no incêndio, como a formulação analítica aqui proposta considera o aquecimento desigual das mesas e a formulação proposta pelas normas brasileiras considera um aquecimento uniforme do aço, a diferença nos resultados aumenta consideravelmente.

### 8.5.2 – Perfil com proteção térmica

A geometria da seção transversal do Caso 4 com proteção térmica é constituída do perfil de aço CVS 600 X 210, do material refratário sobreposto à mesa superior, do revestimento de proteção térmica de concreto leve e da camada de ar envolvente, conforme o esquema geral apresentado na Figura 7.2. Para definir a estrutura dessa geometria no programa

computacional ANSYS (2007), foi feita uma malha em elementos finitos com 14647 nós e 14400 elementos.

A camada de ar que envolve o revestimento térmico tem a temperatura variando de acordo com a temperatura do incêndio, a cada passo de tempo. A camada de ar que envolve o material refratário permanece constante ao longo do tempo com a temperatura ambiente de 20°C. Todas as camadas de ar possuem espessura igual a 1mm.

Também para este caso com proteção térmica, ao final do incêndio, a maioria dos elementos da seção transversal do perfil ainda estava atingindo sua temperatura máxima. Para se obter a fase de resfriamento dos mesmos, foram feitos passos adicionais, totalizando em 108 passos (42200 segundos).

Nas Figuras 8.95 até 8.102 são apresentados os gráficos com o desenvolvimento das temperaturas, durante o incêndio, para os elementos selecionados:

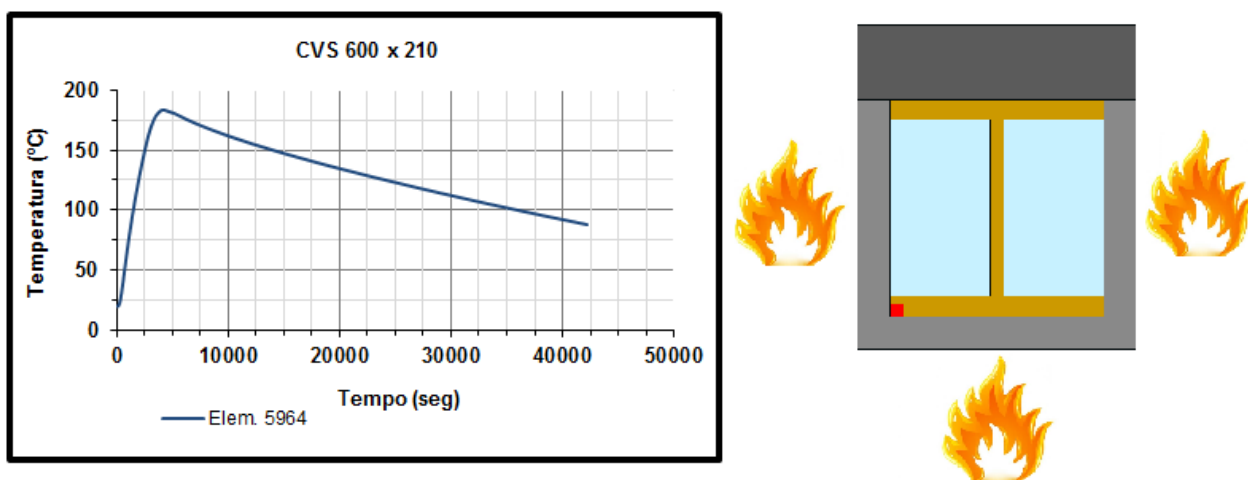


Figura 8.95 – Temperaturas do elemento 5964 ao longo do incêndio.

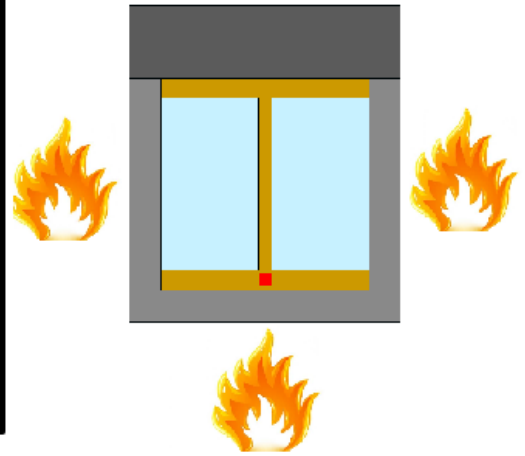
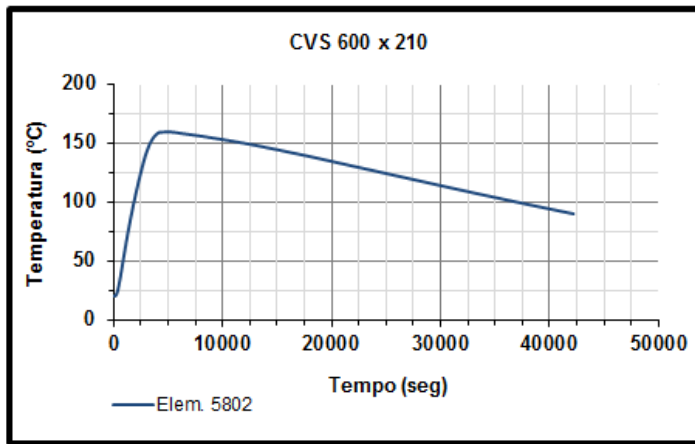


Figura 8.96 – Temperaturas do elemento 5802 ao longo do incêndio.

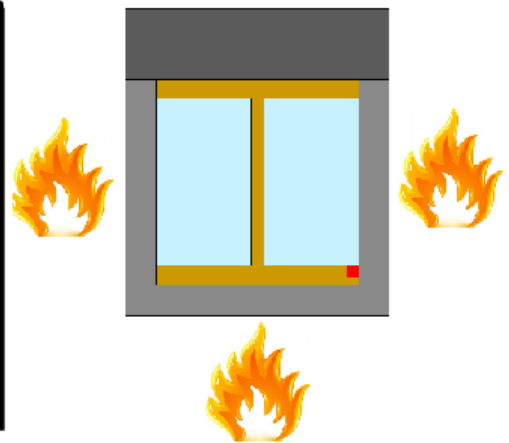
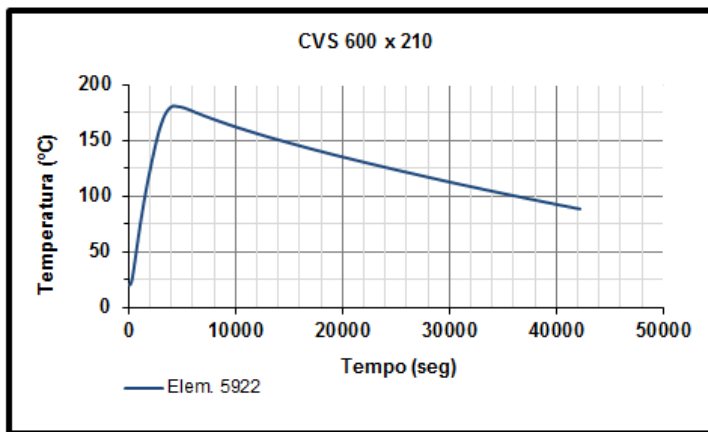


Figura 8.97 – Temperaturas do elemento 5922 ao longo do incêndio.

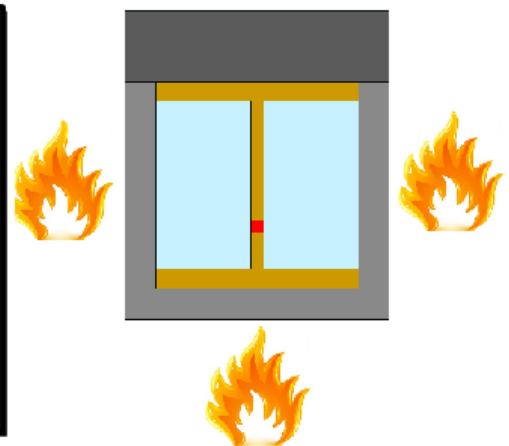
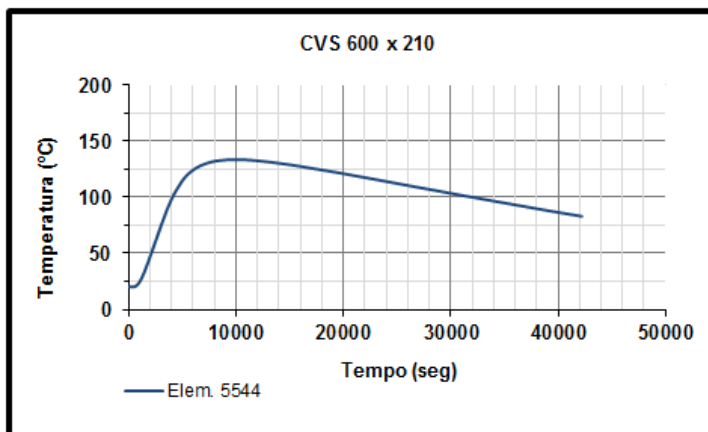


Figura 8.98 – Temperaturas do elemento 5544 ao longo do incêndio.

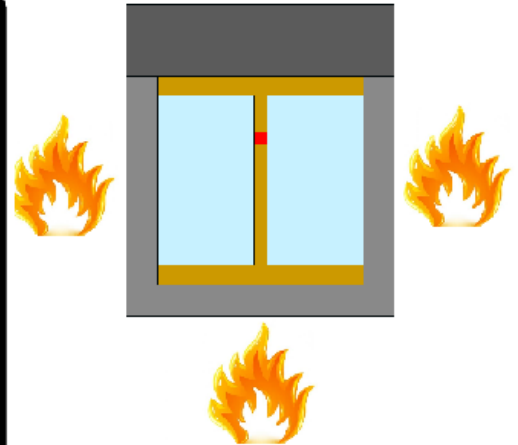
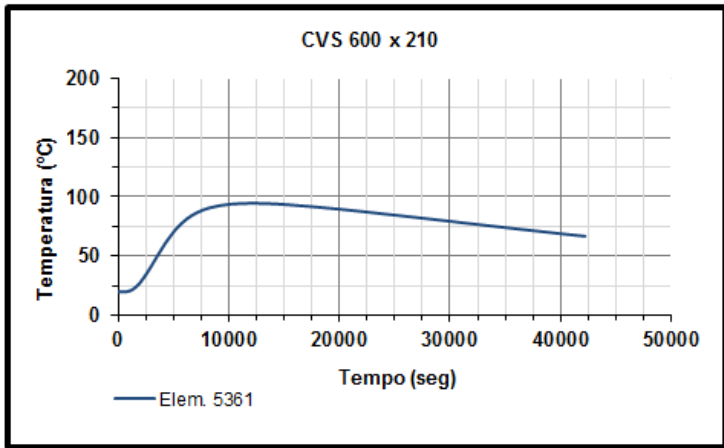


Figura 8.99 – Temperaturas do elemento 5361 ao longo do incêndio.

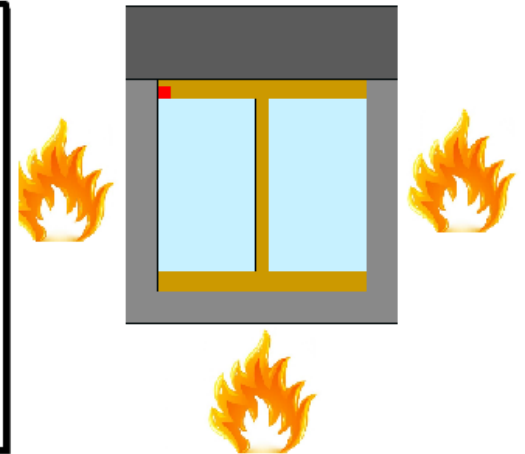
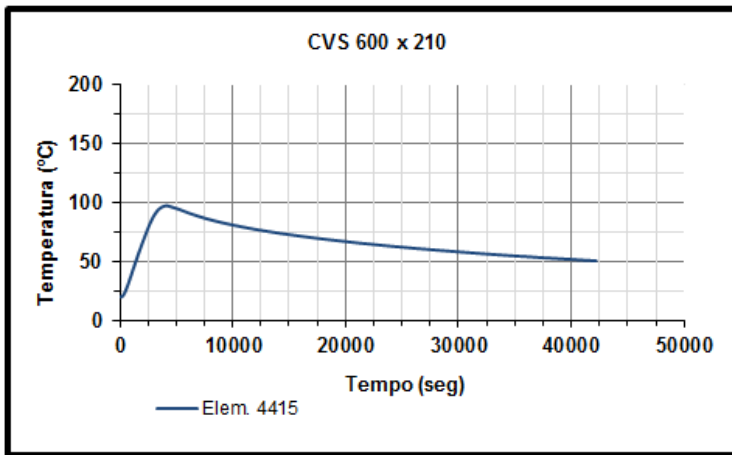


Figura 8.100 – Temperaturas do elemento 4415 ao longo do incêndio.

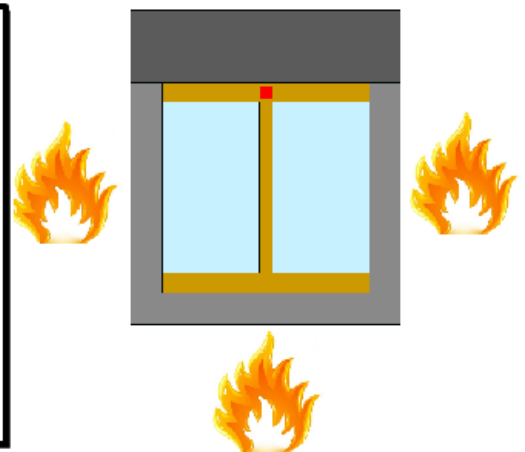
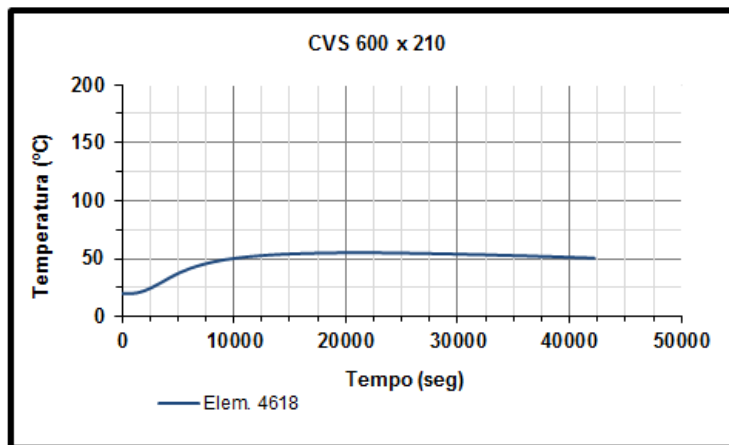


Figura 8.101 – Temperaturas do elemento 4618 ao longo do incêndio.

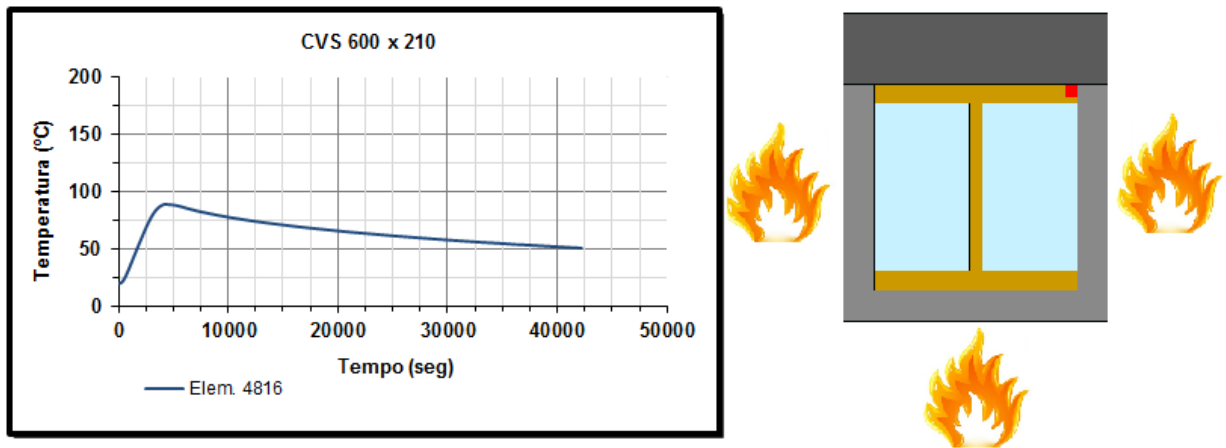


Figura 8.102 – Temperaturas do elemento 4816 ao longo do incêndio.

Na Figura 8.103 é feita uma comparação em relação ao desenvolvimento das temperaturas:

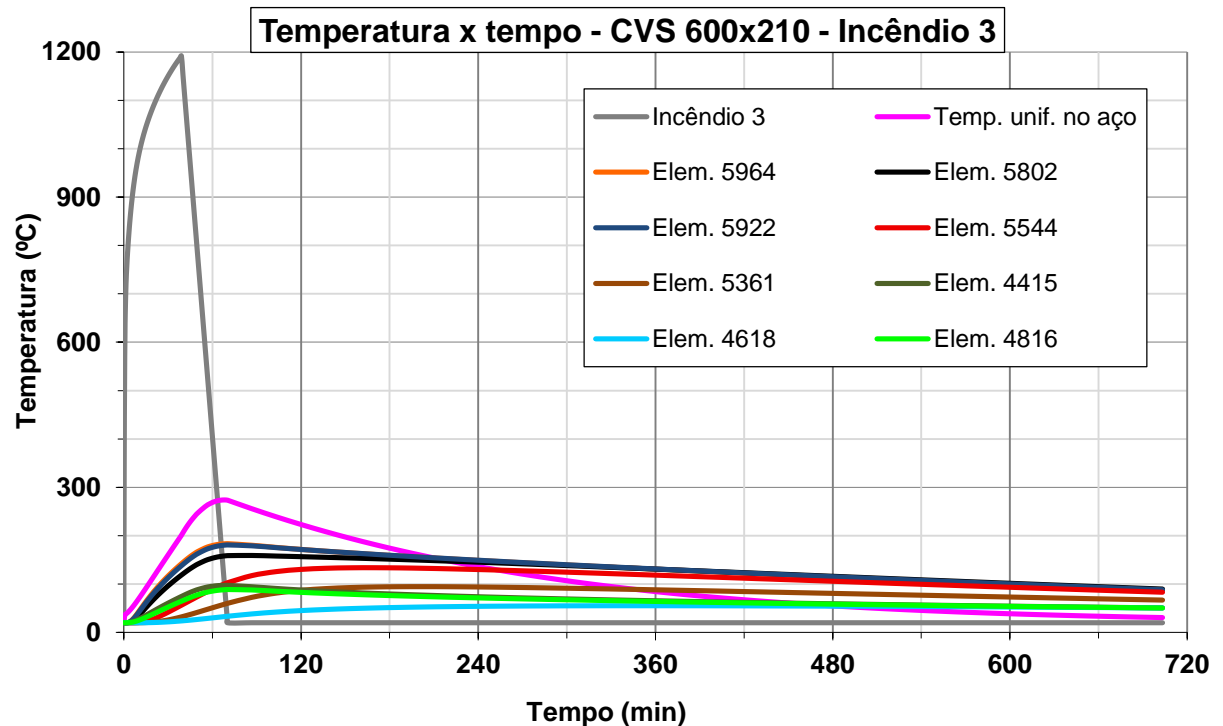


Figura 8.103 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 X 210.

A Figura 8.103 mostra que as temperaturas da mesa inferior são bem menores que as temperaturas da mesa superior. Devido à presença da proteção térmica, as temperaturas dos elementos estão muito abaixo dos valores atingidos pelo Incêndio 3.

A Figura 8.104 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal da estrutura extraída do ANSYS (2007) graficamente:

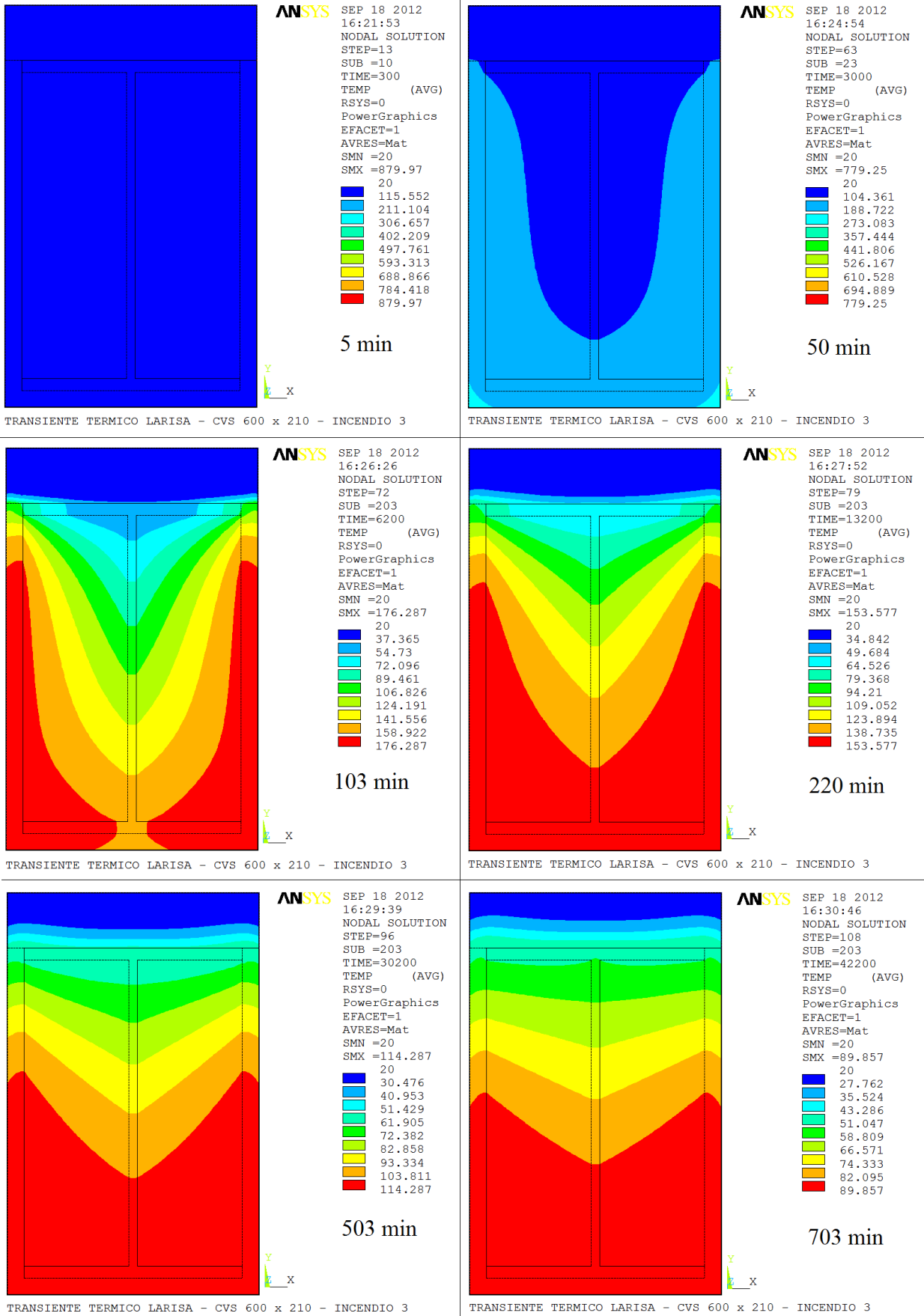


Figura 8.104 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600 X 210 - ANSYS (2007).



### 8.5.2.1 – Determinação da carga crítica

Na Figura 8.105 são apresentadas as temperaturas médias obtidas, as temperaturas do Incêndio 3 e a curva de aquecimento uniforme do aço:

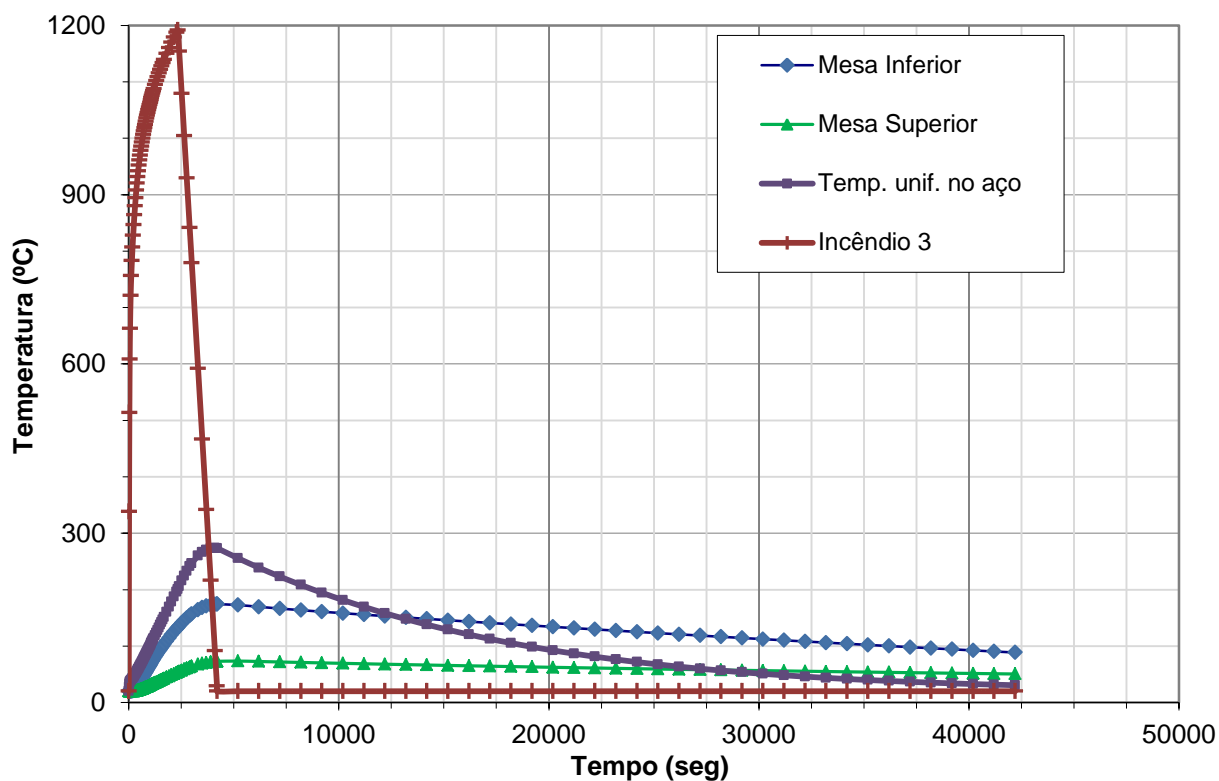


Figura 8.105 – Média das temperaturas nas mesas – Perfil CVS 600 X 210.

Novamente na Figura 8.105 nota-se a importância de se considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal, pois as diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior são significativas.

A carga crítica uniformemente distribuída do perfil CVS 600 X 210 submetido ao Incêndio 3 foi calculada para as três formulações a cada passo de tempo. Para isso, foram adotados os mesmos parâmetros mencionados anteriormente para o Caso 4 sem proteção térmica. Na Figura 8.106 é apresentado o gráfico comparativo entre as três formulações:

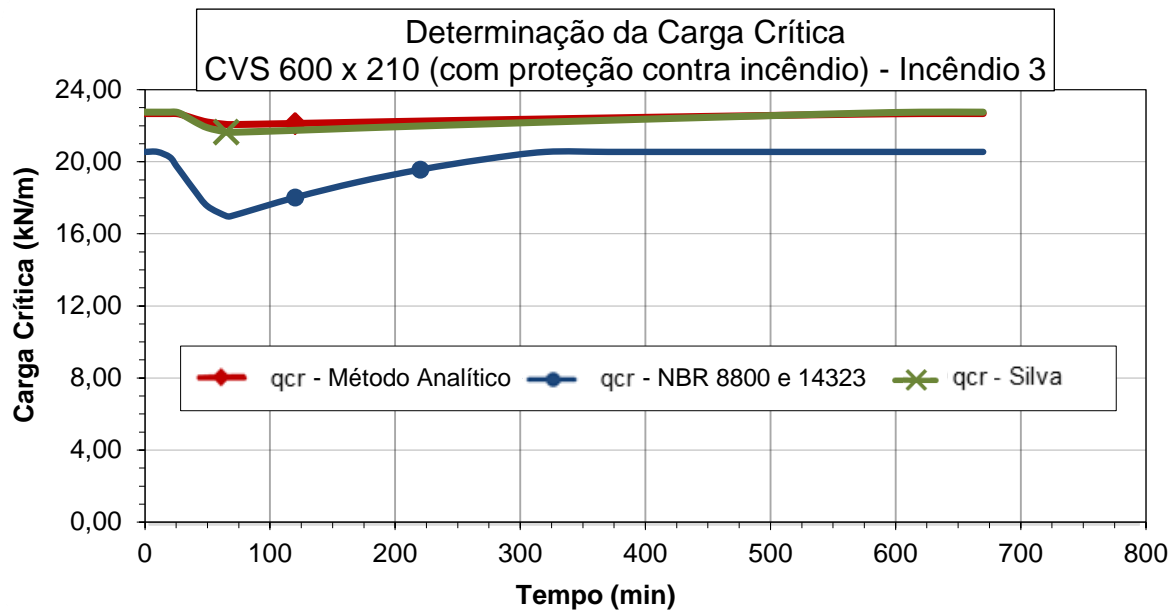


Figura 8.106 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3.

A Tabela 8.17 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada pelos três métodos:

Tabela 8.17 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.

Caso 4 (com proteção contra incêndio)			
Tempo (min)	q <sub>cr</sub> (kN/m)		
	NBR	FA	Silva (1992)
0,00	20,55	22,67	22,75
10,00	20,55	22,67	22,75
20,00	20,25	22,67	22,75
30,00	19,31	22,60	22,62
40,00	18,37	22,38	22,22
50,00	17,53	22,20	21,89
65,00	16,99	22,07	21,65
68,33	16,97	22,06	21,63
120,00	18,02	22,12	21,74
170,00	18,87	22,19	21,87
220,00	19,57	22,26	21,98
270,00	20,13	22,32	22,09
320,00	20,55	22,37	22,20
370,00	20,55	22,43	22,30
420,00	20,55	22,49	22,40
520,00	20,55	22,59	22,60
570,00	20,55	22,64	22,69
670,00	20,55	22,67	22,75

Na Figura 8.106, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), novamente observa-se que os resultados são praticamente idênticos. Como nesse caso há a proteção contra incêndio, durante todo o incêndio não há elevações significativas da temperatura na viga de aço e a diferença entre os resultados é quase que imperceptível.

Em relação às recomendações normativas brasileiras, mais uma vez é percebido que seus resultados são conservadores. Em todos os momentos do incêndio, os valores referentes às normas brasileiras são sempre inferiores aos obtidos pelo método analítico proposto nesse estudo. A diferença maior se dá quando há o aumento da temperatura no incêndio.

### 8.5.3 – Influência do isolamento

Na Figura 8.107 é apresentado um gráfico comparando as cargas críticas obtidas para os dois casos estudados em relação ao perfil CVS 600 X 210: com e sem revestimento.

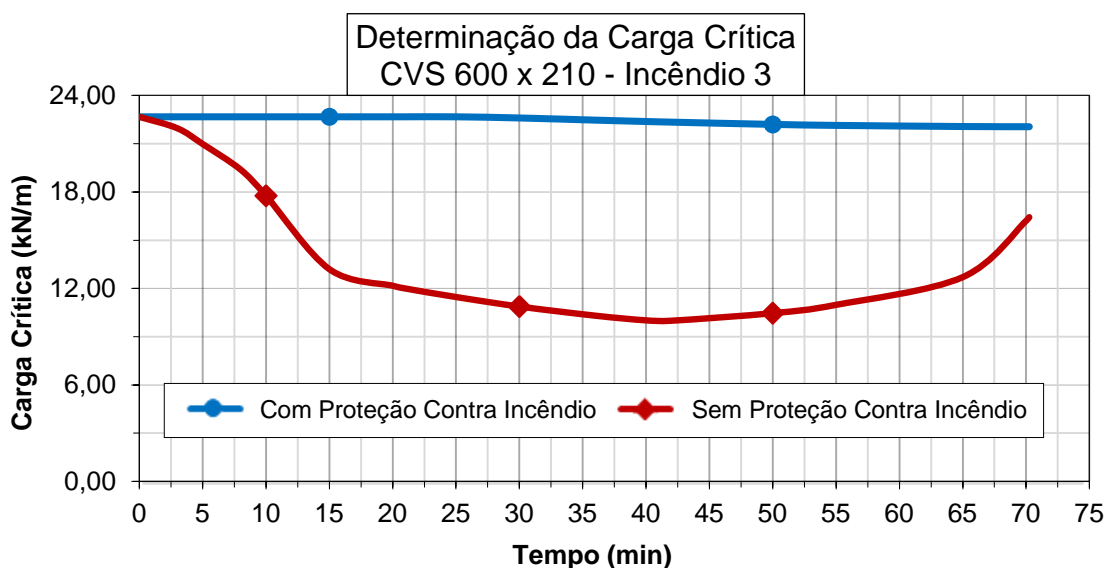


Figura 8.107 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210 – Incêndio 3 - Formulação analítica.

Na Figura 8.107, novamente é observado que a existência de um revestimento térmico em vigas de aço tem uma influência significativa nos resultados da carga crítica uniformemente distribuída. Quando há a proteção contra incêndio, as temperaturas na viga de aço não se elevam tanto quanto no mesmo caso sem revestimento. Percebe-se que a carga crítica uniformemente distribuída praticamente duplicou quando se adotou uma

proteção contra incêndio. A Tabela 8.18 mostra a comparação dos resultados numéricos da carga crítica uniformemente distribuída calculada para os dois casos:

Tabela 8.18 – Carga crítica uniformemente distribuída para o perfil CVS 600 X 210.

Caso 4		
Tempo (min)	$q_{cr}$ (kN/m)	
	Sem Proteção	Com Proteção
1,7E-08	22,67	22,67
3,00	21,96	22,67
5,00	20,98	22,67
8,00	19,39	22,67
10,00	17,76	22,67
15,00	13,20	22,67
20,00	12,17	22,67
25,00	11,47	22,67
30,00	10,87	22,60
36,00	10,30	22,47
40,00	10,02	22,38
42,00	<b>9,99</b>	22,34
50,00	10,46	22,20
55,00	10,98	22,14
70,00	16,21	22,06
70,25	16,43	<b>22,06</b>

## 9 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 9.1 – ANÁLISE DE RESULTADOS

Para todos os casos estudados nessa dissertação, os resultados demonstram que a formulação analítica com solução fechada para a determinação da carga crítica uniformemente distribuída em vigas I foi desenvolvida com sucesso.

Em todos os casos de estudo foram gerados mapas de distribuição de temperaturas nas seções transversais dos perfis de aço, revelando gradientes térmicos importantes e que devem ser considerados nos cálculos de resistência dos perfis estruturais de aço em situação de incêndio natural. Os resultados representam uma importante alerta quanto à deficiência da norma brasileira ao tratar o fenômeno em questão, já que esta considera o aquecimento uniforme do aço. Em todos os casos analisados, as curvas de carga crítica obtidas que levam em conta a diferença de temperatura entre os flanges do perfil apresentaram resultados bem mais precisos que as curvas determinadas considerando temperatura uniforme do aço. E isso ocorre, pois as variações de temperatura influenciam na resistividade da peça estrutural, uma vez que a mesa comprimida (mesa superior) está parcialmente protegida por uma placa de material refratário. Logo, o módulo de elasticidade da mesa superior é maior que o módulo de elasticidade na mesa inferior ( $E_1 > E_2$ ), durante o incêndio.

Essa maior precisão dos resultados obtidos a partir da formulação analítica proposta no presente trabalho culmina em soluções mais econômicas, tendo em vista que os vãos suportam sempre cargas críticas mais elevadas. Ou seja, seriam suficientes perfis menos robustos para suportar uma mesma solicitação.

Em relação aos tempos das curvas referentes às cargas críticas, eles podem ser interpretados como tempos máximos de resistência ao fogo, em contraponto aos TRRF's prescritos em norma. Estes, por sua vez, arbitram o tempo máximo da capacidade resistiva de uma viga que esteja sujeita à solicitação de uma carga uniformemente distribuída daquela magnitude.

Em relação à presença de um revestimento térmico envolvendo as vigas de aço, em todos os casos foi observado que a existência do mesmo tem uma influência significativa nos resultados da carga crítica uniformemente distribuída, como já esperado. Em todos os casos em que foi considerada a proteção contra incêndio, as temperaturas na viga de aço não se elevaram muito se comparadas ao mesmo caso sem revestimento. De um modo geral, a carga crítica uniformemente distribuída praticamente duplicava quando se adotava uma proteção contra incêndio. Essa medida (adoção de um revestimento térmico) traz soluções mais econômicas, pois para os mesmos vãos se pode adotar perfis menos robustos.

Para todos os casos de estudo, a formulação analítica proposta no presente trabalho esteve muito próxima da formulação proposta por Silva (1992) em seus resultados. Nos instantes em que a temperatura estava mais próxima da temperatura ambiente (geralmente no início e fim do incêndio), a diferença de resultados era praticamente nula. Já com o aumento de temperatura durante a evolução do incêndio, essa diferença se intensificava. Quando o incêndio atingia seu auge e se iniciava o resfriamento do mesmo, essa diferença novamente diminuía.

## **9.2- CONCLUSÕES**

Na presente dissertação, foram estudadas vigas I de aço submetidas a situações de incêndio com possibilidade de Flambagem Lateral com Flexo-Torção (FLT), do ponto de vista analítico e numérico. Esse assunto ainda é pouco abordado no meio acadêmico no Brasil, o qual geralmente apenas explora situações de aplicabilidade de normas sem a preocupação do desenvolvimento teórico.

Infelizmente, a maioria dos projetistas estruturais também não se interessa por esse tema. Entretanto, o incêndio deve ser considerado nos projetos de edificações, pois é de grande relevância para a sociedade na prevenção de grandes colapsos estruturais. Mesmo sendo de ocorrência baixa e de pequena probabilidade, quando ocorrem, os incêndios geram prejuízos em muitos aspectos. Hoje em dia ainda está mais agravante essa situação, uma vez que a tecnologia vai se inovando cada vez mais na construção civil. Existem, hoje, muitos materiais que possuem insumos combustíveis em sua composição e baixa vedação

durante um incêndio, como por exemplo, o papel parede, pisos sintéticos, painéis de gesso, portas de vidro, etc.

Portanto, não basta se ter medidas de combate a incêndios. Os profissionais da área devem ter um maior conhecimento sobre o comportamento das estruturas quando submetidas a situações de incêndio, com o intuito de promover melhor prevenção de catástrofes causadas por esse fenômeno. E esse trabalho tentou transmitir um melhor entendimento do comportamento, à FLT, de vigas I de aço quando submetidas à situação de incêndio natural. Como o incêndio natural caracteriza melhor a realidade de uma situação de incêndio (fase de aquecimento, desenvolvimento e resfriamento), este foi escolhido e considerado no estudo da presente dissertação. Os pontos mais importantes que foram enfatizados e questionados nesse trabalho foram:

- Desenvolvimento de uma formulação analítica com solução fechada para a determinação da carga crítica uniformemente distribuída sob FLT, considerando a variação de temperatura na seção transversal das vigas I de aço quando expostas a incêndios;
- A consideração de vigas I de aço revestidas com uma proteção contra incêndio, de forma a diminuir as temperaturas na seção transversal, tornando esses perfis mais resistentes;
- A comparação da formulação analítica desenvolvida nessa dissertação com a formulação proposta por Silva (1992), de forma a se ter mais um critério de validação, além da comparação com a formulação de Winter (1941).

Utilizou-se o programa computacional ANSYS (2007) para mapear as temperaturas, pois o mesmo tem bastante confiabilidade em estudos de transientes térmicos, fornecendo de forma precisa as temperaturas ao longo da seção transversal de cada perfil.

A variação da temperatura na seção transversal das vigas I de aço ocorreu devido à mesa superior possuir uma placa de material refratário sobreposta. Com isso, a mesa superior apresentava temperaturas inferiores às temperaturas da mesa inferior, já que esta estava totalmente exposta às chamas do incêndio (no caso do perfil sem revestimento). Mesmo no caso em que o perfil possuía proteção contra incêndio, a mesa inferior recebia um maior fluxo de calor se comparada à mesa superior. Isso porque, além de a mesa superior também

possuir o revestimento térmico, ela também possuía uma placa de material refratário sobreposta. Essa diferença de temperaturas gerou substancial aumento de resistência da viga quando comparada com a resistência obtida a partir de recomendações da NBR 14323:1999, já que esta considera aquecimento uniforme do aço. A mesa responsável pela instabilidade lateral da viga (mesa superior) não apresentou diminuição significativa no valor do módulo de elasticidade, como ocorreu no caso da consideração de temperatura uniforme ao longo da seção transversal pela norma.

Sendo assim, conclui-se que a NBR 14323:1999 parece ser bastante conservadora considerando que a temperatura seja uniforme ao longo da seção transversal da viga de aço e adotando fatores de correção. Em casos em que a mesa comprimida for a menos aquecida durante um incêndio, considerando o aquecimento uniforme da seção transversal, acarretará em perdas de resistência nominal e/ou menores vãos.

Comparando-se os casos em que os perfis estavam expostos às chamas do incêndio com os casos em que os perfis estavam protegidos contra o incêndio, percebeu-se que as temperaturas referentes aos perfis revestidos estavam bem abaixo das temperaturas dos mesmos perfis sem revestimento, como já esperado. Obviamente já se era esperado que houvesse uma diminuição das temperaturas com a adoção de revestimentos térmicos. Mas o que é relevante é que para os casos de estudo dessa dissertação, adotando essa medida de proteção, a resistência obtida praticamente dobrou se comparada à resistência obtida para a mesma situação sem o revestimento. Ou seja, uma “simples prática” que gerou uma diferença significativa na resistência das vigas de estudo, promovendo uma maior economia de material.

E, finalmente, comparando-se os valores obtidos através da formulação analítica proposta no presente trabalho com a formulação proposta por Silva (1992), observou-se que as formulações são bem parecidas em seus resultados. Principalmente no início e no final dos incêndios, quando a temperatura era ambiente, os valores das duas formulações eram praticamente idênticos. E quanto maior era o aumento da temperatura na viga de aço, maior era a diferença entre os resultados dessas formulações. Quando o perfil era revestido termicamente, essa diferença era praticamente imperceptível, uma vez que as temperaturas da viga de aço não eram tão elevadas. Conclui-se, então, que essas duas formulações são bastante próximas, mesmo seguindo caminhos diferentes em seus desenvolvimentos.



### 9.3 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Baseado no que foi estudado nessa dissertação, algumas sugestões para trabalhos futuros em relação a estruturas de aço submetidas a situações de incêndio são mencionadas a seguir:

- Analisar melhor os fatores de correção de gradientes térmicos para perfis de aço que são considerados na norma brasileira. Com um estudo mais aprofundado, pode-se mudar tais fatores de modo que estes considerem a não uniformidade da temperatura na seção transversal da viga;
- Estudar casos similares ao apresentado nessa dissertação, mas considerado outros tipos de carregamento, além dos já estudados (momento uniforme, carga concentrada e carga uniformemente distribuída);
- Fazer uma análise experimental para comprovar o que foi apresentado nesse trabalho. Verificar as temperaturas e comparar os resultados obtidos para análise experimental e para a formulação analítica aqui desenvolvida;
- Desenvolver o mesmo assunto aqui abordado, mas para outros tipos de estruturas que não sejam vigas de aço biapoiadas;
- Criar tabelas de uso prático para perfis de aço padronizados com os valores das cargas críticas em função das variações de temperatura nas mesas e do comprimento total da viga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E 119 (1988).  
*Standard Test Methods for Fire Tests of Building Constructions and Materials*, United States;
- ANSYS (2007). *ANSYS user's manual - version 11*, Inc., Canonsburg, PA, EUA.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 8800 (1986).  
*Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites)*, 129 pp., Rio de Janeiro;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 14323:1999.  
*Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento*, 46 pp., Rio de Janeiro;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 14432:2000.  
*Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento*, 14 pp., Rio de Janeiro;
- AUSTIN, W. J.; YEGIAN, S.; TUNG, T. P. (1955). *Lateral Buckling of Elastically End-restrained I Beams*, Journal of Structural Division, Proceedings, Vol. 81, Separate n. 673, ASCE, Nova Iorque;
- BARTHÉLÉMY, B.; KRUPPA, J. (1978). *Resistance au Feu des Structures: Béton – Acier – Bois*, Éditions Eyrolles, Paris, France;
- BOGOLYUBOV, N. N.; MIKHAILOV, G. K.; YUSHKEVICH, A. P. (2007). *Euler and Modern Science*, English Edition, USA;
- BUTKOV, E. (1983). *Física Matemática*, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro;
- CAMPÊLO, L.S. (2008). *Estudo Numérico e Analítico para a Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada*, Dissertação de Mestrado em estruturas e construção Civil, Publicação E.DM-002A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 165 p.;
- CBMERJ. *Histórico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro*. Disponível em <<http://www.defesacivil.rj.gov.br/>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- CESARI, F. (1996). *Analisi di Problemi Termici col Método degli Elementi Finiti*, Pitagora Editrice Bologna, Bologna, Italia;
- CNPQ. *Grupo de Pesquisas: Segurança das Estruturas em Situação de Incêndio*. Disponível em <<http://www.cnpq.br/>>. Acesso em: Março de 2013;

- COMITATO EUROPEO DI NORMAZIONE (1995). *Basi di Calcolo ed Azioni sulle Strutture*, Eurocodice 1, UNI ENV 1991-2-2 Bruxelles, Belgique;
- COMITATO EUROPEO DI NORMAZIONE (1995). *Progettazione delle Strutture di Acciaio*, Eurocodice 3, UNI ENV 1993-1-2 Bruxelles, Belgique;
- CONCEITO.DE. *Conceito de Termodinâmica*. Disponível em <<http://conceito.de/termodinamica>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- CPNSP (2005). *Segurança em Instalações e Serviços em eletricidade – Norma regulamentadora n° 10*, São Paulo.
- DIAS, LUÍS ANDRADE DE MATTOS (1999). *Estruturas de Aço no Brasil – Zigurate* Editora, São Paulo;
- DUNCAN, W. J. (1953). *The Flexural Centre or Centre of Shear*, Journal of the Royal Aeronautical Society, vol. 57, pp. 594-597;
- FLINT, A. R. (1951). *The Influence of Restraints on the Stability of Beams*, The Structural Engineer, Journal of the Institution of Structural Engineers, Vol. 29, p. 235-246;
- FRUCHTENGARTEN, J. (2005). *Sobre o Estudo da Flambagem Lateral de Vigas de Aço por Meio da Utilização de uma Teoria Não-Linear Geometricamente Exata*, Dissertação de Mestrado em engenharia de estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 227 p.;
- GALAMBOS T. V. (1963). *Inelastic Lateral Buckling of Beams*, Journal of the Structural Division ASCE, Vol. 89, p. 217-242;
- GAYLORD Jr., E. H.; GAYLORD, C. N.; STALLMEYER, J. E. (1992). *Design of Steel Structures*, McGraw-Hill, 3a edição, New York, USA;
- GRIMM, A. M. *Mecanismos De Transferência De Calor*. Disponível em <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- HILDEBRAND, F. B. (1976). *Advanced Calculus for Application*, Prentice-Hall, 2a edição, New Jersey, USA;
- HILL, H. N.; WINTER, G. (1941). *Discussion on the Lateral Stability of Unsymmetrical I-Beams and Trusses in Bending*, ASCE – Transaction of the American Society of Civil Engineers;
- HILL, H. N. (1942). *The Lateral Instability of Unsymmetrical I-Beams*, Journal of Aeronautical Science, Vol. 9, n°5;
- HORNE, M. R. (1954). *The Flexural-torsional Buckling of Members of Symmetric I-Section Under Combined Thrust and Unequal Terminal Moments*, Quartely Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 7, Part 4, p. 410-426;

- IBVENDAS. *Vermiculita – Concreto Leve, Revestimento Isolante*. Disponível em <<http://vermiculita2p.webs.com>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- INCROPERA, F. P.; DeWITT D. P. (1998). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro;
- ISO 834 (1999). *Fire-resistance Tests – Elements of Building construction, Part 1: General Requirements*, ISO – International Organization for Standardization, Genève, Suisse;
- KAPLAN, W. (1981). *Advanced Mathematics for Engineers*. Addison Wesley, New York, USA;
- KEN, R. *Bombeiros no Brasil*. Disponível em <<http://historica.com.br/hoje-na-historia/bombeiros-no-brasil>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- KREITH, F. (1973). *Princípios da Transmissão de Calor*, Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo;
- MARTINES, C. (1997). *Sicurezza Antincendio*, Ed. Hoepli, Milano, Italia;
- MARTINS, M.M. (2000). *Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 213 p.;
- MASSONNET, C. (1947). *Buckling of thin-Walled Bars with Open Cross Section*, Hommage Fac. Sci. Appl. Univ. Liege, Ed. G. Thone (in French);
- McGUIRE, W. (1968). *Steel Structures*, Prentice-Hall International, Inc, London, England;
- MCIHP, PMESP (2006). *Combate a Incêndio em Habitação Precária*, Coletânea de Manuais Técnico b s de Bombeiros, 1. Ed, Vol. 28, São Paulo;
- NUNES, J. M. de B. (2005). *Uma Abordagem Numérica e Analítica para a Determinação da Temperatura e do Momento Fletor Crítico em Vigas de Aço em Situação de Incêndio*, Tese de Doutorado em estruturas e construção Civil, Publicação E.TD-006A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 186 p.;
- PANNONI, F. D. *Proteção de Estruturas Metálicas Frente ao Fogo*. Disponível em <<http://www.metlica.com.br/protacao-de-estruturas-metalicas-frente-ao-fogo>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- PANNONI, F. D. (2004). *Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio*, 3. Ed, Perfis Gerdau Açominas, Coletânea do Uso do Aço;
- PFEIL, W.; PFEIL, M. (2009). *Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático*, 8. Ed, LTC Editora, Rio de Janeiro;

- POLEY, S. (1954). *Lateral Buckling of Cantilevered I-Beams under Uniform Loads*, Journal of Structural Division, Proceedings, Vol. 80, Separate n.527, ASCE, Nova Iorque;
- POPOV, E. P. (1982). *Introdução à Mecânica dos Sólidos*, Editora Edgar Blücher, São Paulo;
- PRANDTL, L. (1899). *Kipperscheinungen*, Dissertation, Munich, Germany;
- PURKISS, J. A. (1996). *Fire Safety Engineering – Design of Structures*, Butterworth-Heinemann, Melbourne, Australia;
- ROARK, R. J.; YOUNG, W. C. (1975). *Formulas for Stress and Strain*, 6th edition. McGraw-Hill, New York, USA;
- SALVADORI, M. G. (1955). *Lateral Buckling of I-Beams*, ASCE Transactions of the American Society of Civil Engineers, Paper 2773, Vol.120, p. 1165-1177, Nova Iorque;
- SALVADORI, M. G. (1956). *Lateral Buckling of Eccentrically Loaded I-Columns*, ASCE Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol.121, p. 1163-1178, Nova Iorque;
- SEITO, A. I., et al (2008). *A Segurança contra incêndio no Brasil*, Projeto Editora, São Paulo;
- SILVA, M.A. *Temperatura e Calor*. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/fisica/temperatura-calor.htm>>. Acesso em: Novembro de 2012;
- SILVA, V. P. (1992). *Flambagem Lateral de Vigas de Aço em Regime Elástico-Linear*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo;
- SILVA, V. P. (1997). *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, Tese de doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo;
- SILVA, V. P.; VARGAS, M. R. (2005). *Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço*, Manual de Construção em aço, IBS/CBCA, Rio de Janeiro, RJ;
- STAAD.Pro (2007). *OpenSTAAD Technical Reference*, Inc., Yorba Linda, CA, EUA.
- SOUZA, T. F. B.; MORAIS, V. L. B. (2006). *Uma Formulação para a Determinação Simplificada do Momento Crítico FLT de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural*, Trabalho de conclusão de curso de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília – DF;
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. (1961). *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, USA;
- VRIES, K. (1947). *Strength of Beams as Determined by Lateral Buckling*, ASCE Transactions, Paper 2326, Vol.112;

WIKIPEDIA. *John A. Swanson*. Disponível em <  
[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_A.\\_Swanson/](http://en.wikipedia.org/wiki/John_A._Swanson/)>. Acesso em: Março de 2013;

WIKIPEDIA. *Propagação térmica*. Disponível em  
<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Propagação\\_térmica/](http://pt.wikipedia.org/wiki/Propagação_térmica/)>. Acesso em: Março de 2013;

WINTER, G. (1941). *Lateral Stability of Unsymmetrical I-Beams and Trusses in Bending*,  
ASCE – Transactions of the American Society of Civil Engineers, Paper 2178, Vol.  
108;

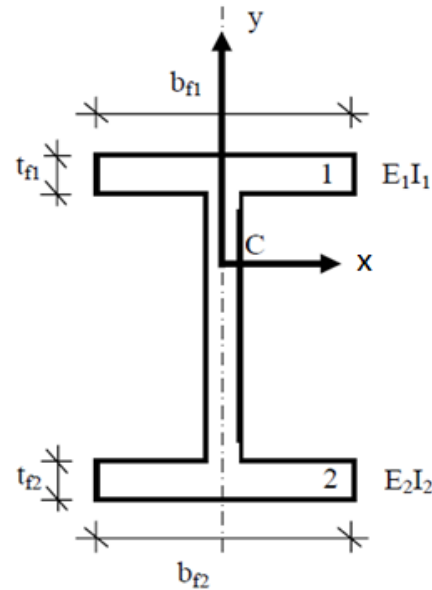
## **ANEXOS**

COMPARAÇÃO SILVA - NUNES: PARA  $E_1 = E_2$  e  $I_1 = I_2$  (MOMENTO UNIFORME)

SILVA

Sem Incêndio

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,120	m
	$t_{f1} =$	0,0095	m
	$b_{f2} =$	0,120	m
	$t_{f2} =$	0,0095	m
	$b_{f3} =$	0,181	m
	$t_{f3} =$	0,00475	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,1905	m
	$A_1 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$I_{y1} =$	0,000001368	m <sup>4</sup>
	$I_{y2} =$	0,000001368	m <sup>4</sup>
	$I_{y3} =$	1,61651E-09	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	1,24113E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	1,24113E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	1,46659E-11	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	3,4295E-08	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	3,4295E-08	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	6,46604E-09	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	1,31904E-08	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	1,31904E-08	m <sup>6</sup>
$C_3 =$	2,48694E-09	m <sup>6</sup>	
$yc =$	0,000	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	0,000	m
	$k$ (NBR 8800) =	26,958	m



$L =$	7	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	205000000	kPa
$E_2 =$	205000000	kPa
$E_3 =$	205000000	kPa

$M_{cr} =$	27,14	kN.m
------------	-------	------

Cálculo do k (SILVA)					
$y_0 =$	0,1	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,0905	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,0905	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1000	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1000	m			

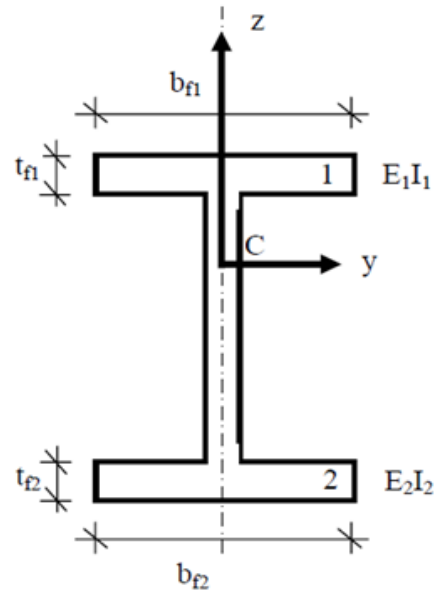


COMPARAÇÃO SILVA - NUNES: PARA  $E_1 = E_2$  e  $I_1 = I_2$  (MOMENTO UNIFORME)

NUNES

Sem Incêndio

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,120	m
	$t_{f1} =$	0,0095	m
	$b_{f2} =$	0,120	m
	$t_{f2} =$	0,0095	m
	$b_{f3} =$	0,181	m
	$t_{f3} =$	0,00475	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,1905	m
	$A_1 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$I_{z1} =$	0,000001368	m <sup>4</sup>
	$I_{z2} =$	0,000001368	m <sup>4</sup>
	$I_{z3} =$	1,61651E-09	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	1,24113E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	1,24113E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	1,46659E-11	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	3,4295E-08	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	3,4295E-08	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	6,46604E-09	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	1,31904E-08	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	1,31904E-08	m <sup>6</sup>
$C_3 =$	2,48694E-09	m <sup>6</sup>	
$yc =$	0,000	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	0,000	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,000	m



$L =$	7	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	205000000	kPa
$E_2 =$	205000000	kPa
$E_3 =$	205000000	kPa

Diferença: 0,6800293 %

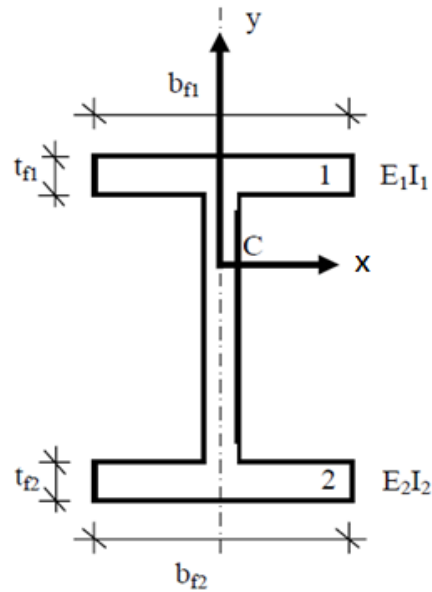
$M_{cr} =$  26,96 kN.m

Cálculo do k (SILVA)				
$y_o =$	0,1	m	$a =$	0,00 m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,0905	m	$b =$	0,00 m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,0905	m	$c =$	0,00 m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1000	m	$d =$	0,00 m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1000	m		

COMPARAÇÃO SILVA - NUNES: PARA  $E_1 \neq E_2$  e  $I_1 = I_2$  (MOMENTO UNIFORME)

SILVA

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,140	m
	$t_{f1} =$	0,0095	m
	$b_{f2} =$	0,120	m
	$t_{f2} =$	0,0111	m
	$b_{f3} =$	0,181	m
	$t_{f3} =$	0,00475	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,1913	m
	$A_1 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$I_{y1} =$	2,17233E-06	m <sup>4</sup>
	$I_{y2} =$	0,000001596	m <sup>4</sup>
	$I_{y3} =$	1,61651E-09	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	1,98728E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	1,46004E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	1,4788E-11	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	4,00108E-08	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	5,44592E-08	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	6,46604E-09	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	1,53888E-08	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	2,09458E-08	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	2,48694E-09	m <sup>6</sup>
$yc =$	0,070	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	-0,059	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,058	m



$q_{fi} = 100$ MJ/m <sup>2</sup>
$O = 0,04$ m <sup>1/2</sup>

$L =$	7	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	117055000	kPa
$E_2 =$	25010000	kPa
$E_3 =$	37720000	kPa

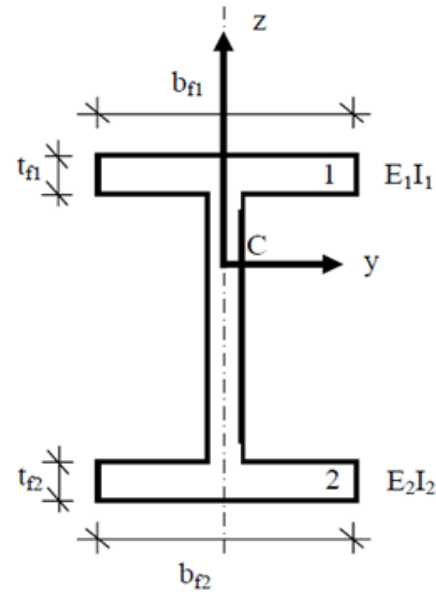
$M_{cr} =$	16,90	kN.m
------------	-------	------

Cálculo do k (SILVA)					
$y_0 =$	0,100299	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,0908	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,0902	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1003	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1013	m			

COMPARAÇÃO SILVA - NUNES: PARA  $E_1 \neq E_2$  e  $I_1 = I_2$  (MOMENTO UNIFORME)

NUNES

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,140	m
	$t_{f1} =$	0,0095	m
	$b_{f2} =$	0,120	m
	$t_{f2} =$	0,0111	m
	$b_{f3} =$	0,181	m
	$t_{f3} =$	0,00475	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,1913	m
	$A_1 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,001	m <sup>2</sup>
	$I_{z1} =$	2,17233E-06	m <sup>4</sup>
	$I_{z2} =$	0,000001596	m <sup>4</sup>
	$I_{z3} =$	1,61651E-09	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	1,98728E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	1,46004E-08	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	1,4788E-11	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	4,00108E-08	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	5,44592E-08	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	6,46604E-09	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	1,53888E-08	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	2,09458E-08	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	2,48694E-09	m <sup>6</sup>
$yc =$	0,070	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	-0,059	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,058	m



$q_{fi} = 100 \text{ MJ/m}^2$

$O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$

$L =$	7	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	117055000	kPa
$E_2 =$	25010000	kPa
$E_3 =$	37720000	kPa

Diferença: -1,591305 %

$M_{cr} = 17,16 \text{ kN.m}$

Cálculo do k (SILVA)

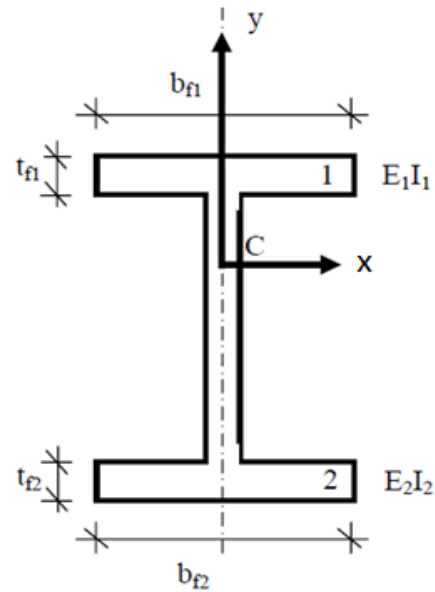
$Y_o =$	0,100299	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,0908	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,0902	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1003	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1013	m			

COMPARAÇÃO SILVA - CAMPÊLO: PARA  $E_1 = E_2$  e  $I_1 = I_2$  (CARGA CONCENTRADA)

SILVA

Sem Incêndio

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,250	m
	$t_{f1} =$	0,0224	m
	$b_{f2} =$	0,250	m
	$t_{f2} =$	0,0224	m
	$b_{f3} =$	0,255	m
	$t_{f3} =$	0,01250	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,2776	m
	$A_1 =$	0,006	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,006	m <sup>2</sup>
	$I_{y1} =$	2,91667E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{y2} =$	2,91667E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{y3} =$	4,15365E-08	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	5,61909E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	5,61909E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	8,00218E-10	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	9,36619E-07	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	9,36619E-07	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	1,66146E-07	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	3,60238E-07	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	3,60238E-07	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	6,39022E-08	m <sup>6</sup>
$y_c =$	0,000	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	0,000	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,000	m



$L =$	22	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	205000000	kPa
$E_2 =$	205000000	kPa
$E_3 =$	205000000	kPa

$M_{cr} = 234,50$  kN.m

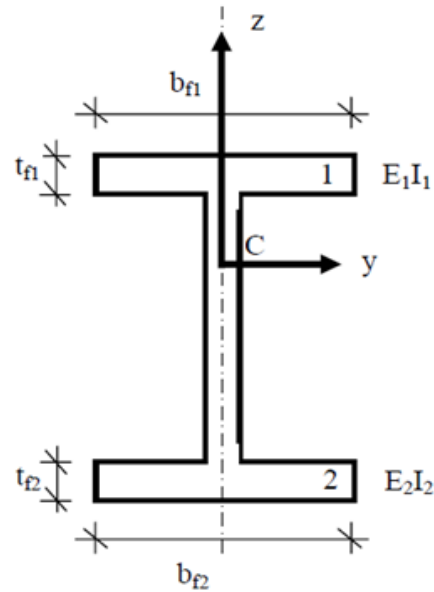
Cálculo do k (SILVA)					
$y_o =$	0,15	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,1276	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,1276	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1500	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1500	m			

COMPARAÇÃO SILVA - CAMPÊLO: PARA  $E_1 = E_2$  e  $I_1 = I_2$  (CARGA CONCENTRADA)

CAMPÊLO

Sem Incêndio

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,250	m
	$t_{f1} =$	0,0224	m
	$b_{f2} =$	0,250	m
	$t_{f2} =$	0,0224	m
	$b_{f3} =$	0,255	m
	$t_{f3} =$	0,01250	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,2776	m
	$A_1 =$	0,006	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,006	m <sup>2</sup>
	$I_{z1} =$	2,91667E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{z2} =$	2,91667E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{z3} =$	4,15365E-08	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	5,61909E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	5,61909E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	8,00218E-10	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	9,36619E-07	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	9,36619E-07	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	1,66146E-07	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	3,60238E-07	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	3,60238E-07	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	6,39022E-08	m <sup>6</sup>
$yc =$	0,000	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	0,000	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,000	m



$L =$	22	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	205000000	kPa
$E_2 =$	205000000	kPa
$E_3 =$	205000000	kPa

Diferença: -1,111258 %

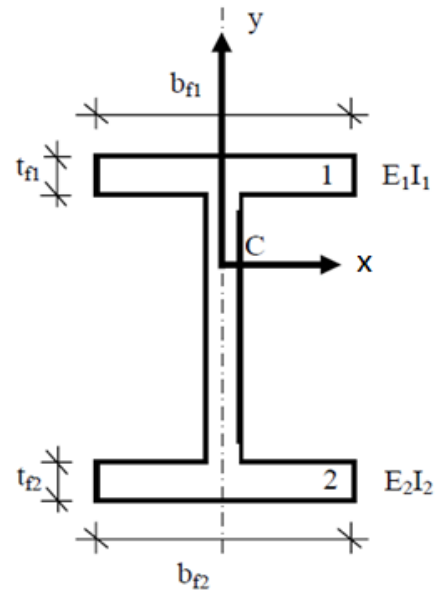
$M_{cr} =$  237,11 kN.m

Cálculo do k (SILVA)					
$y_o =$	0,15	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,1276	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,1276	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1500	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1500	m			

COMPARAÇÃO SILVA - CAMPÊLO: PARA  $E_1 \neq E_2$  e  $I_1 = I_2$  (CARGA CONCENTRADA)

SILVA

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,253	m
	$t_{f1} =$	0,0200	m
	$b_{f2} =$	0,250	m
	$t_{f2} =$	0,0205	m
	$b_{f3} =$	0,255	m
	$t_{f3} =$	0,01250	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,2755	m
	$A_1 =$	0,005	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,005	m <sup>2</sup>
	$I_{y1} =$	2,68308E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{y2} =$	2,66927E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{y3} =$	4,15365E-08	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	5,0893E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	5,06312E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	7,87871E-10	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	6,73333E-07	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	7,17927E-07	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	1,66146E-07	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	2,58974E-07	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	2,76126E-07	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	6,39022E-08	m <sup>6</sup>
$yc =$	0,104	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	-0,095	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,089	m



$q_{fi} = 300$ MJ/m <sup>2</sup>
$O = 0,04$ m <sup>1/2</sup>

$L =$	22	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	184500000	kPa
$E_2 =$	26650000	kPa
$E_3 =$	15221250	kPa

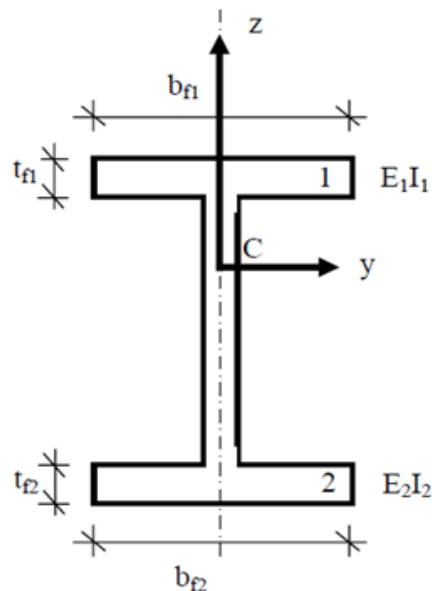
$M_{cr} =$	103,15	kN.m
------------	--------	------

Cálculo do k (SILVA)					
$y_0 =$	0,148468	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,1285	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,1267	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1485	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1472	m			

COMPARAÇÃO SILVA - CAMPÊLO: PARA  $E_1 \neq E_2$  e  $I_1 = I_2$  (CARGA CONCENTRADA)

CAMPÊLO

Geometria do perfil (Dados de entrada)	$b_{f1} =$	0,253	m
	$t_{f1} =$	0,0200	m
	$b_{f2} =$	0,250	m
	$t_{f2} =$	0,0205	m
	$b_{f3} =$	0,255	m
	$t_{f3} =$	0,01250	m
Propriedades geométricas	$h =$	0,2755	m
	$A_1 =$	0,005	m <sup>2</sup>
	$A_2 =$	0,005	m <sup>2</sup>
	$I_{z1} =$	2,68308E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{z2} =$	2,66927E-05	m <sup>4</sup>
	$I_{z3} =$	4,15365E-08	m <sup>4</sup>
	$C_{w1} =$	5,0893E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w2} =$	5,06312E-07	m <sup>6</sup>
	$C_{w3} =$	7,87871E-10	m <sup>6</sup>
	$J_1 =$	6,73333E-07	m <sup>4</sup>
	$J_2 =$	7,17927E-07	m <sup>4</sup>
	$J_3 =$	1,66146E-07	m <sup>4</sup>
	$C_1 =$	2,58974E-07	m <sup>6</sup>
	$C_2 =$	2,76126E-07	m <sup>6</sup>
	$C_3 =$	6,39022E-08	m <sup>6</sup>
$yc =$	0,104	m	
Coeficiente de monossimetria	$k$ (SILVA) =	-0,095	m
	$k$ (NBR 8800) =	0,089	m



$q_{fi} = 300 \text{ MJ/m}^2$

$O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$

$L =$	22	m
$E =$	205000000	kPa
$\nu =$	0,3	
$E_1 =$	184500000	kPa
$E_2 =$	26650000	kPa
$E_3 =$	15221250	kPa

Diferença: -2,8474 %

$M_{cr} = 106,08 \text{ kN.m}$

Cálculo do k (SILVA)

$Y_o =$	0,148468	m	$a =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_1 =$	0,1285	m	$b =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_2 =$	0,1267	m	$c =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_3 =$	0,1485	m	$d =$	0,00	m <sup>5</sup>
$H_4 =$	0,1472	m			