

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

**ESTUDO NUMÉRICO E ANALÍTICO PARA
DETERMINAÇÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO
NATURAL DA CARGA CRÍTICA DE VIGAS DE AÇO COM
CARGA CONCENTRADA**

LÍRIS SILVEIRA CAMPÊLO

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

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

**PUBLICAÇÃO: E.DM-002A/2008
BRASÍLIA/DF: 12 de Março de 2008**

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

**ESTUDO NUMÉRICO E ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO EM SITUAÇÃO
DE INCÊNDIO NATURAL DA CARGA CRÍTICA DE VIGAS DE AÇO COM
CARGA CONCENTRADA**

LÍRIS SILVEIRA CAMPÊLO

**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. Valdir Pignatta e Silva, DSc (USP)
(Examinador Externo)

Prof. George Cajaty Barbosa Braga, DSc (CBMDF)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 12 DE MARÇO DE 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

CAMPÊLO, LIRIS SILVEIRA

Estudo Numérico e Analítico para Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada [Distrito Federal] 2008.

xx, 165 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2008).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estruturas

2. Aço

3. Incêndio

4. Análise Térmica

5. Análise Transiente

6. Carga Crítica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAMPÊLO, L. S. (2008). Estudo Numérico e Analítico para 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.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Líris Silveira Campêlo

TÍTULO: Estudo Numérico e Analítico para Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília a 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 desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Líris Silveira Campêlo

Rua Zuca Accioly, 633 , Bloco H, Apt. 203, Papicu - CEP 60.176-160

Fortaleza – Ceará – Brasil

e-mail: lrissc@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, João e Célia,
Ao meu marido, Marcos Helano,
Ao meu filho, Luís Marcos,
e ao meu irmão, Rubens.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas vitórias e conquistas, sempre me guiando pelos melhores caminhos.

Ao orientador, Luciano Mendes Bezerra, por sua orientação, atenção, ensinamentos, amizade e confiança de que alcançaríamos nossos objetivos.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro ao longo da etapa de elaboração desta pesquisa.

Aos professores e funcionários da Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, por sua competência e disponibilidade ao longo do curso.

Aos meus pais, João e Célia, e ao meu irmão, Rubens, que sempre estiveram ao meu lado me ajudando a superar a distância da família e incentivando a superar este obstáculo.

Ao meu marido e amigo, Marcos Helano, que esteve comigo sempre presente ao meu lado em toda essa batalha e nos momentos mais difíceis, incentivando-me incansavelmente e me dando forças para continuar lutando até o fim. Obrigado por ter estado ao meu lado mesmo superando a distância física que estávamos um do outro e de nosso filho, por me apoiar em todos os sentidos, demonstrando sempre a certeza de que tudo daria certo ao final. Eu te amo!!!!

Ao meu filho, Luís Marcos, que superou juntamente comigo esta batalha, incentivando-me com cada sorriso. Filho você foi meu maior presente!!!!!!!!!!!!!! Eu te amo!!!!!!

À família Campelo, à família Silveira, Stella Carneiro, Regina, Ronaldo Fiuza, Fátima, Gerardo Santos, Tereza, Fernando Holanda, Ângela, Dennis, aos sobrinhos e sobrinhas, pelo incentivo, carinho e confiança.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, em especial ao Cel. Nilton, Cel. Sossigenes, TC Loureiro, TC Walterloo, TC Athos, Major Roberto, Cap. George, Cap. Helen, Sgt. Maia, Sgt. Rubem, Cabo Paulo, SBM Cíntia, SBM Paiva, pela oportunidade de conhecer essa família do CBMDF, por toda amizade, atenção e receptividade.

Aos grandes amigos Ricardo Holanda e Valéria, Alfeu e Daiane, Henrique e Fran, Cássio, Daniel, Davi, Leonardo Freire, Adriene, Ângelo, Marcelo, Rafaela, Roberto, Áurea, Andréa, Rosemery, Paulo Rafael e Cecília, por todos os gestos de carinho e amizade.

Às amigas verdadeiras de Thomas, Régis, Roger, Ari, Josi, Lorena, Salomé, Evandro, Otávio, André Freitas, Carlos Eduardo, Selênio, Uchoa, Nelson, Carolina, Renata, Fernanda Pilati e demais amigos da pós-graduação.

A todos os professores responsáveis pela minha formação de graduação na UNIFOR, e em especial aos professores Eduardo Leite, Gulielmo, José Bastos e Vanda Malveira.

Líris Silveira Campelo

RESUMO

ESTUDO NUMÉRICO E ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL DA CARGA CRÍTICA DE VIGAS DE AÇO COM CARGA CONCENTRADA

Autor: Líris Silveira Campêlo

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 12 de março de 2008.

A situação de incêndio em uma estrutura constitui um carregamento excepcional que pode provocar colapsos estruturais. Os efeitos catastróficos de um incêndio devem ser evitados com medidas preventivas, o que torna imperativo o conhecimento do comportamento da estrutura em situação de incêndio, a fim de se tomar medidas que evitem o colapso estrutural durante a ação do fogo. Este trabalho apresenta um estudo numérico e analítico do comportamento de vigas de aço em perfil I sob situação de incêndio natural e com carga concentrada. Inicialmente, estudam-se o fenômeno do incêndio, os modelos de incêndio, a degradação das propriedades dos materiais com o fogo e os mecanismos de transmissão de calor numa estrutura. Propõe-se uma formulação analítica pelo método de energia para o cálculo da carga crítica nominal concentrada 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 e a conseqüente assimetria de rigidez gerada nas mesas do perfil durante o incêndio. Diversos casos de incêndio natural com cargas de incêndio, ventilação e tempo de duração do incêndio natural são estudados para perfis de aço típicos da construção em aço no Brasil. Constatou-se que as cargas críticas nominais calculadas, levando-se em conta a formulação aqui desenvolvida com diferença de temperatura nas mesas, são maiores que aquelas previstas pela Norma Brasileira.

ABSTRACT

NUMERICAL AND ANALYTICAL STUDY FOR THE DETERMINATION IN NATURAL FIRE SITUATION OF THE CRITICAL LOAD ON STEEL BEAMS UNDER CONCENTRATED LOAD

Author: Líris Silveira Campêlo

Supervisor: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, March 12th, 2008

Fire over a structural system is considered an accidental load and can generate structural collapses. The catastrophic effects of a fire on a structural system should always be avoided with preemptive actions. Therefore, it is essential to have the appropriate knowledge of the structure behavior under fire and to take appropriate actions to avoid its collapse during a fire incident. This work presents a numerical and analytical study of the behavior of steel beams with I-section under natural fire and under a concentrated load. Initially, the phenomenon of fire is reviewed, fire models recommended by Standards are presented, the weakening of the material properties is pointed out, and the heat transfer mechanisms are described. An analytical formulation, based on the energy method, is presented for the determination of the nominal critical load concentrated on a steel beam. This formulation takes into account the lateral instability with flexural-torsional buckling of the beam and considers the different heating conditions of the beam flanges, and the consequent stiffness asymmetry generated on the I-section flanges during fire. Several cases of natural fires with a variety of fire loads, aeration ratios, and time durations of fire are studied for steel beams typically used in Brazil. Considering the temperature difference on the beam flanges, and using the formulation presented here; it is demonstrated that the critical nominal loads are higher than those recommended by the Brazilian Standard.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. EVOLUÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO BRASIL.....	2
1.3. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. INCÊNDIO.....	8
2.1. CONCEITUAÇÃO BÁSICA.....	8
2.2. DINÂMICA DO INCÊNDIO	10
2.3. MODELOS DE INCÊNDIO	13
2.3.1. Modelo do incêndio-padrão	13
2.3.2. Modelo do incêndio-natural ou compartimentado.....	17
2.4. DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA PARA PERFIS I EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, CONFORME NBR 14323:1999 E NBR 8800:1986	27
3. PROPRIEDADES DO AÇO A ELEVADAS TEMPERATURAS	35
3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS	35
3.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS	38
3.2.1. – Calor específico	39
3.2.2. – Condutividade térmica	40
4. ANÁLISE TÉRMICA DOS PERFIS DE AÇO	42
4.1. A TRANSMISSÃO DE CALOR E AS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA FÍSICA MATEMÁTICA.....	42
4.2. O PROBLEMA TÉRMICO	44
4.3. TRANSMISSÃO DE CALOR.....	47
4.3.1. – Condução	50

4.3.2. – Convecção.....	51
4.3.3. Radiação Térmica	53
4.4. DESENVOLVIMENTO DA TEMPERATURA NOS PERFIS ESTRUTURAIS DE AÇO	56
4.5. A TRANSMISSÃO DE CALOR TRANSIENTE EM SÓLIDOS	80
5. FORMULAÇÃO ANALÍTICA DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	82
5.1. INTRODUÇÃO	82
5.2. DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA EM UMA VIGA DE AÇO COM CARGA CONCENTRADA PELO MÉTODO DA ENERGIA	84
5.2.1. Determinação da energia interna de deflexão e de torção da viga.....	88
5.2.2. Determinação do trabalho externo	97
6. ESTUDOS NUMÉRICOS COM O ANSYS.....	105
6.1. INTRODUÇÃO	105
6.2. SOFTWARE ANSYS	106
6.3. ELEMENTOS	109
6.4. CARGAS TÉRMICAS	111
6.5. MÉTODO DE CONVERGÊNCIA.....	112
6.6. DISCRETIZAÇÃO	112
7. APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS	114
7.1. INTRODUÇÃO	114
7.2. Caso 1: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 300x113 – INCÊNDIO 1. 115	
7.2.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 300x113 – Incêndio 1	122
7.3. Caso 2: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 500x250 – INCÊNDIO 2. 126	
7.3.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 500x250 – Incêndio 2	133
7.4. Caso 3: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 600x292 – INCÊNDIO 3. 136	
7.4.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 600x292 – Incêndio 3	143

7.5. Caso 4: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 700x166 – INCÊNDIO 3.	146
7.5.1. Determinação da carga crítica para o perfil VS 700x166 – Incêndio 3	153
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	158
8.1. CONCLUSÕES GERAIS	158
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gráfico da temperatura x tempo das fases de um incêndio.	12
Figura 2.2 - Comparação entre diferentes tipos de material combustível na norma ISO 834 (1999).....	14
Figura 2.3 – Curva temperatura-tempo de um incêndio padronizado, conforme ASTM E 119.	15
Figura 2.4 – Curva temperatura-tempo de um incêndio padronizado, conforme EUROCODE.....	16
Figura 2.5 – Curva modelo incêndio padronizado, conforme NBR 14432:2000.....	17
Figura 2.6 – Curva modelo incêndio-natural.....	18
Figura 2.7 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 300\text{MJ/m}^2$)	24
Figura 2.8 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 600\text{MJ/m}^2$)	24
Figura 2.9 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 700\text{MJ/m}^2$)	25
Figura 2.10 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,04\text{m}^{1/2}$)	25
Figura 2.11 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,08\text{m}^{1/2}$)	26
Figura 2.12 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,12\text{m}^{1/2}$)	26
Figura 3.1 – Curvas características dos fatores de redução em função da temperatura.	35
Figura 3.2 – Variação da tensão de escoamento do aço em função da temperatura	37
Figura 3.3 – Comparação das variações do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura.	38
Figura 3.4 – Calor específico do aço devido à temperatura	40
Figura 3.5 – Variação da condutividade térmica do aço devido à temperatura.....	41
Figura 4.1 – Fluxo térmico.	46
Figura 4.2 – Transferência de calor.	48
Figura 4.3 – Formas de transferência de calor	50
Figura 4.4 – Fator de massividade do aço não protegido	55
Figura 4.5 – Desenvolvimento da temperatura em função do fator de massividade.....	58
Figura 4.6 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2}$).....	60
Figura 4.7 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,08\text{m}^{1/2}$).....	61
Figura 4.8 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$).....	62

Figura 4.9 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2}$).....	63
Figura 4.10 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,08\text{m}^{1/2}$).....	64
Figura 4.11 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$).....	65
Figura 4.12 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2}$).....	66
Figura 4.13 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $O=0,08\text{m}^{1/2}$).....	67
Figura 4.14 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$).....	68
Figura 4.15 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)	70
Figura 4.16 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)	71
Figura 4.17 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)	72
Figura 4.18 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)	73
Figura 4.19 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)	74
Figura 4.20 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)	75
Figura 4.21 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)	76
Figura 4.22 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)	77
Figura 4.23 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)	78
Figura 5.1 – Viga em perfil metálico I em situação de incêndio.....	83
Figura 5.2 – Viga em perfil metálico I em situação de incêndio.....	83
Figura 5.3 – Viga em perfil metálico I submetida à flexão pura.....	85

Figura 5.4 - Centro de flexão e centróide em perfil I no estado de flexão lateral e Momento de inércia em relação ao eixo z (local)	86
Figura 5.5 Viga I sob flambagem lateral com torção (FLT) e Vista da seção transversal deformada	88
Figura 5.6 (a) Seção transversal da viga I antes e depois da flexão lateral com torção / (b) – Rotação da seção transversal da viga I	89
Figura 5.7 Seção transversal da viga I com atuação da carga crítica na mesa superior	97
Figura 6.1 – PLANE55 – Sólido térmico de 4 nós 2D	109
Figura 7.1 – Modelo do perfil “I” CVS 300x113, parede de concreto e camada de ar	116
Figura 7.2 – Modelo do perfil “I” CVS 300x113, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.	117
Figura 7.3 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 300 x 113.	118
Figura 7.4 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 113	120
Figura 7.5 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 113.....	121
Figura 7.6 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 113.....	122
Figura 7.7 – Temperatura das mesas do perfil CVS 300 x 113 – Incêndio 1.....	123
Figura 7.8 – Carga crítica para o perfil CVS 300 x 113 – Incêndio 1.....	124
Figura 7.9 – Modelo do perfil “I” CVS 500x250, placa de material refratário e camada de ar.	127
Figura 7.10 – Modelo do perfil “I” CVS 500x250, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.....	128
Figura 7.11 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 500x250	129
Figura 7.12 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 500x250	131
Figura 7.13 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 500x250.....	132
Figura 7.14 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 500x250.....	133
Figura 7.15 – Temperatura das mesas do perfil CVS 500 x 250 – Incêndio 2.....	134
Figura 7.16 – Carga crítica para o perfil CVS 500 x 250 – Incêndio 2.....	134
Figura 7.17 – Modelo do perfil “I” CVS 600x292, placa de material refratário e camada de ar.	137
Figura 7.18 – Modelo do perfil “I” CVS 600x292, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.....	138
Figura 7.19 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 600x292	139
Figura 7.20 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600x292	141
Figura 7.21 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 x 292.....	142

Figura 7.22 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600x292.....	143
Figura 7.23 – Temperatura das mesas do perfil CVS 600 x 292 – Incêndio 3.....	144
Figura 7.24 – Carga crítica para o perfil CVS 600 x 292 – Incêndio 3.....	145
Figura 7.25 – Modelo do perfil “I” VS 700x166, placa de material refratário e camada de ar.	147
Figura 7.26 – Modelo do perfil “I” VS 700x166, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.	148
Figura 7.27 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 700x166	149
Figura 7.28 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 700x166.....	151
Figura 7.29 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 700 x 166.....	152
Figura 7.30 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 700x166.	153
Figura 7.31 – Temperatura das mesas do perfil VS 700 x 166 – Incêndio 3.	154
Figura 7.32 – Carga crítica para o perfil CVS 700 x 166 – Incêndio 3.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores da curva temperatura dos gases quentes x tempo – ASTM E 119.....	15
Tabela 2.2 – Valores do potencial calorífico específico.....	19
Tabela 3.1 – Fatores de redução devido à temperatura.	36
Tabela 4.1 – Problemas físicos relacionados a equações diferenciais harmônicas	43
Tabela 4.2 – Fator de massividade	56
Tabela 4.3 - Temperatura máxima no elemento estrutural de aço ($^{\circ}\text{C}$) $C_a = 600 \text{ J} / \text{Kg}^{\circ}\text{C}$	79
Tabela 4.4 - Temperatura máxima no elemento estrutural de aço ($^{\circ}\text{C}$) C_a variável de acordo com formulações da NBR 14323:1999.....	80
Tabela 6.1 – Perfis e características.....	105
Tabela 6.2 – Resumo de entrada – PLANE55.....	111
Tabela 7.1 – Perfis e respectivos tipos de incêndios.	114
Tabela 7.2 – Perfil CVS 300 x 113.....	115
Tabela 7.3 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 300x113 ($^{\circ}\text{C}$).....	119
Tabela 7.4 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 300x113 ($^{\circ}\text{C}$).....	119
Tabela 7.5 – Cargas críticas para o perfil CVS 300x113 (kN).....	125
Tabela 7.6 – Perfil CVS 500x250.....	126
Tabela 7.7 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 500x250 ($^{\circ}\text{C}$).....	130
Tabela 7.8 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 500x250 ($^{\circ}\text{C}$).....	130
Tabela 7.9 – Cargas críticas para o perfil CVS 500x250 (kN).....	135
Tabela 7.10 – Perfil CVS 600 x 292.....	136
Tabela 7.11 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 600x292 ($^{\circ}\text{C}$).....	140
Tabela 7.12 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 600x292 ($^{\circ}\text{C}$).....	140
Tabela 7.13 – Cargas críticas para o perfil CVS 600x292 (kN).....	145
Tabela 7.14 – Perfil CVS 700 x 166.....	146
Tabela 7.15 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 700x166 ($^{\circ}\text{C}$).....	150
Tabela 7.16 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 700x166 ($^{\circ}\text{C}$).....	150
Tabela 7.17 – Cargas críticas para o perfil VS 700x166 (kN)	155

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

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

1. Escalares

A	Área (de um elemento ou de parte de um perfil)
A_a	Área exposta ao fogo
A_f	Área do piso do compartimento incendiado
A_{fc}	Área pela qual há o fluxo de calor
A_q	Área da superfície do material combustível que participa da combustão
A_r	Área de referência
A_t	Área total de vedação (piso, paredes e teto) e aberturas.
A_v	Área total das aberturas para o exterior da estrutura
A_1	Área da mesa superior
A_2	Área da mesa inferior
B	Fator de parede
b_f	Largura da mesa do perfil I
b_w	Altura da alma do perfil I
C	Calor específico
c_a	Calor específico do aço
C_i	Constante torcional reduzida
\hat{C}	Rigidez torcional
C_b	Coefficiente de correção para o cálculo de M_{cr}
C_1, c_2	Posição das mesas (1 e 2) em relação ao centro de flexão
D	Altura total do perfil
D	Distância do centro de rotação ao centro de flexão da seção
E_0	Módulo de elasticidade do aço para temperatura ambiente
E	Excentricidade entre o centróide e o centro de flexão da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do aço
E_1	Módulo de elasticidade da mesa superior modificado pela temperatura
E_2	Módulo de elasticidade da mesa inferior modificado pela temperatura
E_θ	Módulo de elasticidade do material à temperatura θ

EI_{total}	Rigidez total equivalente do perfil
ELEM	Elemento da seção transversal do perfil
f	Distância do ponto de aplicação da carga ao eixo horizontal do flange inferior
f_r	Tensão residual do aço
f_y	Tensão de escoamento do aço
F	Fator de massividade da seção transversal
G	Módulo de elasticidade transversal do material
h	Altura do perfil de eixo a eixo das mesas
H	Altura média das aberturas
H_i	Potencial calorífico de cada componente combustível
H_c	Corrente térmica de convecção
\dot{h}_c	Fluxo convectivo de calor por unidade de área
\dot{h}_r	Fluxo radiativo de calor por unidade de área
I	Momento de inércia
I_x	Momento de inércia em relação ao eixo x
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo y
I_1	Momento de inércia da mesa superior
I_2	Momento de inércia da mesa inferior
I_{eq}	Momento de inércia equivalente
I_T	Momento de inércia a torção
J	Constante torcional
K	Coefficiente de condutividade térmica nos planos x e y
k_1 e k_2	Fatores de correção da distribuição de temperatura não-uniforme
$K_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade à temperatura θ_a
$K_{y,\theta}$	Fator de redução do limite de escoamento do aço à temperatura θ_a
L	Comprimento do elemento
L_b	Comprimento da viga sem travamento lateral
m	Massa
m_a	Massa do aço aquecida
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica
M_n	Resistência nominal calculada
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_T	Momento de torção
M_{T1}	Parcela do momento de torção devida à variação de Φ
M_{T2}	Parcela do momento de torção devida às tensões de cisalhamento
m_i	Coefficiente de eficiência da combustão do material combustível i
M_i	Massa de cada componente i do material combustível
M_z	Momento de flexão em torno do eixo z
M_{1z}	Momento de flexão da mesa 1 em torno do eixo z
M_{2z}	Momento de flexão da mesa 2 em torno do eixo z
O	Fator de abertura ou grau de ventilação
p	Perímetro da seção transversal de um elemento unidimensional
P_{cr}	Carga crítica
q_0	Fluxo de calor absorvido ou emanado do corpo
q_{fi}	Carga de incêndio específica
$q_{fi,d}$	Carga de incêndio específica de projeto
$q_{fi,k}$	Carga de incêndio específica
Q	Potência térmica gerada por unidade de volume
R_t	Resistência térmica
r_y	Raio de giração em relação ao eixo $y-y$
t	Tempo
t_f	Espessura da mesa do perfil I
t_{f1}	Espessura da mesa 1 do perfil I
t_{f1}'	Espessura equivalente da mesa 1 do perfil I
t_w	Espessura da alma do perfil I
V_a	Volume aquecido
W_e	Trabalho (ou energia) externo dos esforços atuantes
W_i	Energia interna de deflexão
x	Comprimento total da viga
y	Deslocamento do centro de flexão do perfil I
y_1	Deslocamento da mesa 1 em relação ao centro de flexão do perfil I
y_2	Deslocamento da mesa 2 em relação ao centro de flexão do perfil I
z_1, z_2	Posição das mesas (1 e 2) em relação ao centróide do perfil I

α_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção
Δ_1	Deslocamento relativo ao ponto de aplicação da carga P em relação ao centro de flexão do perfil I
Δ_2	Deslocamento do centro de flexão dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga
ΔQ_{abs}	Quantidade de calor absorvida pelo elemento estrutural
$\Delta\theta_a$	Variação da temperatura experimentada pelo elemento do aço
Δ_t	Intervalo de tempo
β	Ângulo de rotação vertical da extremidade da viga
ε_{res}	Emissividade
ξ	Fator de relação entre a quantidade de material combustível e grau de ventilação
ϕ	Ângulo de rotação da seção em FLT (Flambagem lateral com flexo-torção)
$\Phi_{fi,a}$	Coeficiente de resistência do aço
γ_n	Fator de consideração de medidas de proteção ativa da estrutura
γ_s	Fator de consideração de risco de incêndio e das conseqüências de colapso
λ	Parâmetro de esbeltez do perfil
λ_a	Condutividade térmica do aço
λ_p	Parâmetro de esbeltez de plastificação
$\lambda_{p,fi}$	Parâmetro de esbeltez de plastificação em situação de incêndio
λ_r	Parâmetro de esbeltez no início do escoamento
$\lambda_{r,fi}$	Parâmetro de esbeltez no início do escoamento em situação de incêndio
θ	Temperatura em um ponto qualquer em estudo
θ_a	Temperatura na superfície do aço
θ_g	Temperatura dos gases quentes em um incêndio
θ_0	Temperatura sobre o contorno θ_0
θ_∞	Temperatura do ambiente
ρ	Massa específica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, de valor igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$
φ	Valor do fluxo de calor por unidade de área na estrutura
φ_c	Componente do fluxo de calor convectivo
φ_r	Componente do fluxo de calor radiante

ν	Coeficiente de Poisson
ψ_i	Coeficiente adimensional do grau de proteção do combustível ao fogo

2. Índices

$\theta()$	Temperatura em um ponto
-------------	-------------------------

3. Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Analysis System (software)
ASTM	American Specification of Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut Für Normung
EUROCODE	Comitato Europeo di Normazione (Eurocodice)
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa
FLT	Flambagem lateral com flexo-torção
ISO	International Organization for Standardization
MDF	Método das diferenças finitas
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fogo é um elemento utilizado pelos seres humanos há milhares de anos. No decorrer do tempo, o homem incorporou este elemento a sua vida como algo essencial para o seu dia-a-dia, em ações como: aquecimento de alimentos, combate ao frio, industrialização de equipamentos, objetos e metais, preparo de alimentos e outras utilizações importantes. O fogo de forma controlada faz parte das atividades humanas, não sendo possível à humanidade obter todas as facilidades e confortos atualmente existentes caso o fogo deixasse de existir.

O fogo que foge do controle do homem é considerado um incêndio e representa uma ameaça para a humanidade, capaz de produzir danos ao patrimônio e à vida por ação das chamas, calor e fumaça.

Como tudo que foge ao controle do homem é prejudicial à sociedade como um todo, surgiu a necessidade de se projetar e aperfeiçoar, ao longo dos anos, mecanismos de pronta resposta para evitar, minimizar e extinguir incêndios. É essencial o desenvolvimento de estudos e técnicas em que se conheça o nível de segurança das edificações sob situações de incêndios para que estes possam ser combatidos. Faz-se necessário, portanto, saber avaliar os limites que uma estrutura sob incêndio pode ser considerada segura, a fim de se ter o tempo necessário para a evacuação da edificação e a chegada e atuação das brigadas de combate ao incêndio.

Na engenharia há, portanto, a contínua necessidade de se explorar novas técnicas para serem estudadas e discutidas com relação ao comportamento das estruturas durante e após um incêndio, com a finalidade de garantir a vida e a integridade da estrutura. O assunto sobre segurança nas estruturas numa situação de incêndio é complexo e envolve áreas da cinética que estudam o equilíbrio químico durante o incêndio, a transferência de calor, a propagação das chamas, o gradiente térmico, entre outros assuntos.

1.2. EVOLUÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO BRASIL

No Brasil, foi criado, oficialmente, o primeiro Corpo de Bombeiros, em 2 de julho de 1856, no estado do Rio de Janeiro. Antes, porém, os incêndios no estado do Rio de Janeiro eram combatidos pelo pessoal do Arsenal da Marinha, de forma provisória (site CBMERJ, 2004). Nas décadas de 70 e 80, não existiam medidas eficazes quanto à prevenção e extinção do fogo, e grandes incêndios, como os citados a seguir, aconteceram no Brasil:

- 1972 - no edifício Andraus, SP,
- 1974 - no edifício Joelma, SP,
- 1981 - no edifício da Caixa Econômica Federal, RJ,
- 1981 - no edifício Grande Avenida, SP,
- 1986 - no edifício Andorinhas, RJ ,
- 1987- no edifício CESP, SP, onde, após incendiar, teve sua estrutura colapsada por desabamento parcial.

Incêndios esses que causaram grandes danos e algumas dessas estruturas precisaram ser substancialmente reparadas após os incidentes. Somente a partir de 1987 houve um progresso considerável quanto às normas de segurança contra incêndio no Brasil. Mas, mesmo depois de todo empenho e análises das normas de segurança contra incêndio outros incêndios ainda ocorreram no Brasil em que a perda patrimonial foi notável, como, por exemplo, em:

- 1998 - no aeroporto Santos Dumont, RJ,
- 2002 - no edifício do Ministério do Trabalho, RJ,
- 2004 - no edifício da Eletrobrás, no centro da cidade, RJ,
- 2005 – no edifício do INSS, DF.

Após estas perdas, passou-se a observar a grande importância de se estudar melhor o comportamento do incêndio e a segurança nas estruturas para suportar as altas temperaturas durante uma situação de incêndio. Após vários estudos e o empenho de profissionais qualificados na área, foram publicadas, pela ABNT, duas normas referentes à análise e dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio. Estas normas partiram de compilações feitas em universidades brasileiras sobre recomendações adotadas pelas normas de outros países. A primeira norma, a NBR 14323, em julho de 1999, sob o tema “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio”, e a

segunda, no ano seguinte, em janeiro de 2000, NBR 14432, sob o título “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações”.

1.3. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

No Brasil ainda são poucos os trabalhos científicos de cunho analítico, numérico e também experimental desenvolvidos em instituições de pesquisa e centros acadêmicos que tratam de estruturas de aço em situação de incêndio. Grande parte da produção científica brasileira sobre este assunto compõe-se de coletâneas e sugestões originárias de normas estrangeiras aplicadas às situações de projeto. Não há no Brasil de hoje laboratórios experimentais adequados para desenvolvimento de análises sobre o comportamento de estruturas sob situação de incêndio. Entretanto, a partir da década de 90, nota-se no Brasil o aparecimento de algumas pesquisas sobre o comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio, bem como a publicação de normas pela ABNT.

As normas publicadas no Brasil, como descrito anteriormente, consideraram situações de incêndio nas estruturas (NBR 14323:1999 e NBR 14432:2000) fornecendo subsídios para a avaliação da segurança das edificações e análise estrutural das mesmas, sob ação do incêndio. A Norma Brasileira, NBR 14323:1999, baseia-se em estados limites e desta forma compara a solicitação de cálculo com a resistência de cálculo dos elementos estruturais quando em situação de incêndio. A Norma ainda permite verificar se a temperatura atingida pelos elementos estruturais não ultrapassa a temperatura de colapso, denominada de “temperatura crítica”, no Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) também arbitrado pela NBR 14432:2000. Na situação de um incêndio, para que o elemento estrutural tenha resistência adequada, a temperatura alcançada no TRRF não deve ultrapassar sua “temperatura crítica”.

Existe no mercado atual certo descuido por parte dos projetistas em considerar o incêndio como carga acidental, usando sempre a desculpa da baixa probabilidade de ocorrência do incêndio, visto que, de fato, o incêndio é uma ação excepcional, com baixa probabilidade de ocorrência e geralmente de relativa curta duração. Entretanto, convém lembrar que os elementos estruturais em situação de incêndio sofrem acentuada perda de resistência, as propriedades mecânicas dos materiais se debilitam, podendo a estrutura vir a colapso em tempo reduzido. Caso esse tempo seja inferior ao TRRF arbitrado pela NBR 14432:2000, considera-se que os elementos estruturais correm “risco de colapso”. O TRRF é um

importante intervalo que deve permitir a fuga segura de pessoas que ocupam a edificação em situação de incêndio bem como a ação das equipes de combate ao fogo sem risco de colapso estrutural. Portanto, o estudo do comportamento das estruturas sob situação de incêndio é assunto importante para a comunidade de projetistas e para a segurança de usuários das edificações. No Brasil, é recente por parte da comunidade científica o interesse em conhecer de forma mais exata a resistência das estruturas em situação de incêndio.

Neste âmbito surgiu o interesse desta dissertação em continuar estudo na linha de pesquisa teórica de determinação de carga crítica em vigas de aço em situação de incêndio natural. Nesta linha de pesquisa, outros trabalhos (Nunes, 2005; Souza e Morais, 2006) já foram desenvolvidos no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB). Sendo assim, desenvolve-se nesta dissertação uma formulação teórica para verificação das cargas críticas de vigas de aço sob carga concentrada, estando a viga em situação de incêndio. Para aplicar a formulação às vigas usuais, fez-se um levantamento das principais bitolas das vigas de aço utilizadas nas edificações em aço no Brasil.

Nota-se ainda que a NBR 14432:2000 considera distribuição uniforme de temperatura nos elementos (vigas, colunas, etc.) sob incêndio. Diferenças de temperatura são algumas vezes consideradas via parâmetros arbitrários. Entretanto, na prática, um perfil metálico sob situação de incêndio não sofre aquecimento uniforme - em especial quando o perfil de aço não está totalmente imerso ao fogo. Com essas supostas diferenças de temperaturas entre as partes na seção transversal de um perfil exposto ao fogo, suas propriedades serão depreciadas de forma desigual e em tempos diferentes, gerando diferentes valores de resistência e conseqüentemente fenômenos de instabilidade na estrutura não previstos ainda em norma. Contudo, devido a essas diferenças de propriedades e presumindo que durante um incêndio determinadas regiões no perfil vão apresentar consideráveis gradientes térmicos (e conseqüentemente de tensões), considera-se no desenvolvimento desta pesquisa a diferença de temperatura entre as mesas do perfil "I" de aço.

Considerando alguns itens expostos neste capítulo, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento das cargas críticas em vigas metálicas quando submetidas a situações de incêndio. A pesquisa será realizada com simulação dos perfis I

de aço soldado, estando esses parcialmente protegidos e sob placas de material refratário (gesso, placas de drywall, paredes sob a viga) em sua mesa superior e com possibilidade de FLT – Flambagem Lateral com Flexo-Torção. Esta tem o intuito de obter um maior conhecimento sobre o comportamento e a gravidade do incêndio em estruturas de aço por meio de uma análise mais detalhada com as altas temperaturas alcançadas. Serão considerados 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. No caso, as vigas “I” têm uma tendência a sofrer instabilidade lateral. Será apresentada uma determinação analítica da carga crítica, sendo considerada também a depreciação desigual do módulo de elasticidade das mesas do perfil a cada instante no decorrer do incêndio. Para simular o aquecimento dos perfis de aço, são utilizados os modelos simplificados propostos pela NBR 14323:1999.

Este é mais um trabalho deste gênero a ser realizado na UnB, dando prosseguimento à linha de pesquisa realizada no PECC/UnB na área de vigas de aço em situação de incêndio.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado é composta por oito capítulos. Tais capítulos descrevem alguns fundamentos teóricos importantes referentes ao incêndio e apresentam uma formulação analítica e respectiva aplicação na determinação de cargas críticas em vigas metálicas com seção transversal “I” com carga concentrada no vão. A formulação desenvolvida leva em conta a depreciação desigual do módulo de elasticidade das mesas a cada instante no decorrer do incêndio.

No primeiro capítulo, como apresentado, é feita uma explanação geral da importância do incêndio em estruturas metálicas, da evolução da segurança contra incêndio no Brasil, os objetivos desta pesquisa e o resumo do conteúdo de cada capítulo desta dissertação.

O segundo capítulo comenta as características do fenômeno do incêndio, as formas de transmissão de calor, a dinâmica do incêndio, as fases de queima de um incêndio, modelos de incêndio-padrão e natural, parâmetros que influenciam o incêndio (carga de incêndio e grau de ventilação), curvas temperatura x tempo utilizando os valores dos parâmetros definidos para esta pesquisa, resumo das recomendações normativas (NBR 14323:1999 e

NBR 8800:1986) para determinar o momento crítico e a carga crítica em perfis de aço numa situação de incêndio.

O terceiro capítulo relata as propriedades do aço quando submetidos a elevadas temperaturas (mecânicas e térmicas). No item de propriedades mecânicas, apresentam-se, em formato de tabela e gráfico, os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade dos aços estruturais considerando a elevação das temperaturas. Em propriedades térmicas, apresentam-se as variações que devem ser observadas nesta pesquisa sofridas pelo aço quando submetido a altas temperaturas (calor específico e condutividade térmica).

O capítulo 4 estuda a análise térmica do perfil de aço, apresentando as equações matemáticas diferenciais que administram a transferência de calor e outros fenômenos físicos, os conceitos dos fundamentos da transferência de calor, os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação). Descreve o desenvolvimento da temperatura nos perfis de aço apresentando a influência do fator de massividade, do grau de ventilação dos perfis numa situação de incêndio.

As análises térmicas realizadas nesta pesquisa tiveram o objetivo de mapear as temperaturas em perfis de aço quando submetidos a situações de incêndios. No caso utilizou-se o programa computacional ANSYS (2006).

O quinto capítulo apresenta uma formulação analítica na qual se determina a carga crítica em perfis de aço submetidos a situações de incêndio. É uma formulação matemática com solução fechada, que leva em consideração o aquecimento desigual das mesas superior e inferior das vigas em perfil “I” a cada instante do incêndio. Esta formulação é novidade, visto que a determinação prevista em normas e trabalhos científicos considera a evolução térmica ao longo do incêndio com um aquecimento uniforme do perfil ou, na melhor das hipóteses, utilizando-se de fatores de correção empíricos para considerar a existência deste gradiente térmico entre as mesas, como fica claro, por exemplo, na NBR 14323:1999, item 8.3.1 e sub-item 8.4.3.5.

O sexto capítulo aborda uma simples explanação sobre o programa computacional ANSYS, apresentando os tipos de problemas que podem ser desenvolvidos, no caso desta

pesquisa o problema térmico, onde se apresentam os tipos de regimes (estacionário e transiente). São apresentadas também as etapas para gerar uma análise térmica transiente, o tipo de elemento escolhido, bem como suas características.

No capítulo 7 são apresentadas aplicações da teoria exposta nesta dissertação, utilizando os perfis metálicos de seção I escolhidos e os incêndios, nas quais existiu a preocupação de sempre buscar simular situações reais de incêndio. Os resultados de aquecimento desigual dos perfis são analisados e, a partir deles, é determinada a carga crítica para cada caso exposto, sendo, então, traçados gráficos comparativos com os valores encontrados por meio de recomendações normativas (NBR-ABNT).

O oitavo capítulo descreve as conclusões com referência aos assuntos estudados nesta dissertação, à formulação analítica desenvolvida e aos resultados alcançados, bem como são apontadas sugestões para desenvolvimento de trabalhos posteriores afins ao conteúdo desta dissertação.

As referências bibliográficas que serviram para estudo e pesquisa dos assuntos concernentes a esta pesquisa foram apresentadas no final desta dissertação.

2. INCÊNDIO

2.1. CONCEITUAÇÃO BÁSICA

Para compreensão de como se inicia um incêndio, é necessário se entender, antes de tudo, como o fogo ocorre, uma vez que todo incêndio está relacionado à presença do fogo. Muitas vezes há referências a incêndio, sinistro, fogo, combustão, queima e chama de uma forma generalizada, como se todos esses elementos tivessem uma conceituação semelhante ou igual. Na verdade alguns deles são até sinônimos, mas tem-se que saber que não são todos a mesma coisa.

O incêndio acontece quando o processo de combustão ocorre em determinado ambiente que não está preparado nem foi idealizado para a ocorrência desta reação fora de controle. A combustão é uma reação química que se processa entre uma substância combustível, ao sofrer um aquecimento, e um agente oxidante. Normalmente o agente oxidante é oxigênio do próprio ar. O incêndio produz luz, fumaça, gases quentes e calor, gerando uma reação sustentável, na qual a quantidade de calor produzida depende da quantidade e qualidade dos reagentes envolvidos, e não da velocidade da reação em questão. Esse processo ocorre em um espaço inflamável e todo o sistema envolvido fica sujeito a uma temperatura superior a um valor mínimo característico de cada material, chamado de temperatura de auto-ascensão, que se refere à temperatura em que um combustível começa a queimar espontaneamente. O processo de combustão é finalizado ao término do combustível ou quando a temperatura atinge um valor inferior à temperatura de auto-ascensão ou quando acaba o oxigênio. É importante deixar esclarecido que fogo e combustão são sinônimos, sendo o fogo mais conhecido usualmente e a combustão mais utilizada nos estudos científicos.

Em um incêndio, os objetos queimados começam a desprender gases combustíveis devido ao aquecimento (processo de pirólise – decomposição química de uma substância mediante a ação do calor). Caso não haja interferência, em pouco tempo os demais objetos se inflamam e todo o ambiente estará tomado pelas chamas. Para que tudo isso ocorra, é necessária também uma energia mínima para iniciar uma reação química conhecida como energia de ativação. Esta quantidade de energia varia conforme o material combustível que

na combinação, quanto melhor a mistura entre o combustível e o ar menor será a quantidade de energia para iniciar o processo de combustão.

Durante muito tempo acreditou-se que para existir fogo eram necessários três elementos: o oxigênio (comburente), o calor e o combustível, formando assim o triângulo do fogo. E para que houvesse fogo seriam necessários que os três componentes estivessem presentes. Nos últimos anos, vários estudos científicos mostraram um quarto componente – a reação em cadeia – que tem sido adicionada ao triângulo do fogo. Quanto a este último componente, foi comprovado que existe uma reação química contínua entre o combustível e o comburente, liberando mais calor para a reação e mantendo a combustão em um processo sustentável, sendo responsável por fornecer continuamente o calor necessário e os gases combustíveis que permitem o desenvolvimento da combustão. Devido à inclusão deste último elemento, passou-se a admitir o tetraedro do fogo.

Depois de se entender melhor a composição do fogo, pode-se definir o tetraedro do fogo como uma combinação do combustível com o oxigênio, na presença de uma fonte de calor, em uma reação química em cadeia, liberando energia em forma de luz e mais calor.

Antigamente, falava-se de um agente ígneo, hoje chamado de calor. Ele representa o elemento energético do tetraedro do fogo e é o responsável pelo início da combustão, por promover o crescimento e propagação das chamas, pela manutenção de um ciclo contínuo de produção de vapor de combustível e de energia para ignição deste material e por manter a temperatura da reação. Tal agente também é o causador da vaporização do combustível durante a combustão para liberalização de mais calor. No incêndio, especificamente no processo de combustão, os materiais combustíveis, à medida que vão sofrendo aquecimento, atingem pontos diferentes de temperatura. Tais pontos são tradicionalmente conhecidos como:

- Ponto de fulgor: também chamado de *flashpoint*, apresenta menor temperatura, é alcançado no momento em que os vapores liberados pelo material combustível entram em ignição quando em contato com uma fonte externa de calor, é uma combustão não auto-sustentável, pois a chama não se mantém quando se retira esta fonte de suas proximidades, isto ocorre devido à quantidade de vapores combustíveis liberada ser muito pequena;
- Ponto de ignição: também chamado de *firepoint*, é alcançado quando os vapores

liberados pelo material combustível entram em ignição em contato com uma fonte de calor externa, a chama se mantém mesmo quando a fonte de calor inicial se afasta. Reações sustentáveis de combustão ocorrem quando calor suficiente proveniente de uma reação exotérmica é gerado nas imediações do combustível, produzindo vapores em concentração para permitir o desenvolvimento auto-sustentável da combustão;

- Ponto de auto-ignição: acontece quando as condições do ambiente favorecem um aquecimento progressivo, permitindo a liberação dos vapores em uma concentração adequada até se inflamar sem a presença de uma fonte externa de calor. Neste caso, a temperatura pode coincidir ou não com a temperatura do ponto de ignição do mesmo material.

Ainda neste capítulo, serão apresentados modelos de avaliação deste fenômeno, para se efetuar a análise das estruturas a serem estudadas.

2.2. DINÂMICA DO INCÊNDIO

É o comportamento do incêndio quanto à sua propagação em um ambiente, confinado ou não, dentro de suas fases. A dinâmica do incêndio é diretamente influenciada por diversos fatores, variáveis caso a caso, tais como: a temperatura atingida no ambiente, o projeto arquitetônico da edificação, o comportamento da fumaça e a carga de incêndio.

São bem definidos os estágios de queima de um incêndio estrutural. Esses estágios, que também podem ser chamados de fases, são descritos como: inicial, crescente, totalmente desenvolvida e final. Para melhor entendimento e visualização, apresenta-se um gráfico na Figura 2.1.

A fase inicial acontece após a ignição de algum material combustível. Nesta o combustível e o oxigênio presentes no ambiente são abundantes, e o incêndio apresenta uma grande instabilidade, dependendo de diversos fatores determinantes do desenvolvimento do incêndio (quantidade e tipo de materiais combustíveis presentes no ambiente, fluxos de corrente de ar, elementos de vedação da estrutura, etc.). A temperatura permanece relativamente baixa em um espaço de tempo maior e abrange a eclosão do incêndio, onde é restrito ao foco inicial.

Na segunda fase, conhecida como crescente, o seu início abrange a incubação do incêndio. Em incêndios confinados, à medida que a combustão progride, o nível mais alto do ambiente (teto) é preenchido, por convecção, com fumaça e gases quentes gerados pela combustão. O volume das chamas aumenta e a concentração de oxigênio começa a baixar para 20%. No início desta fase, a temperatura ainda não é muito alta, mas há um aumento exponencial na quantidade de calor em um curto período de tempo, fazendo com que todos os materiais presentes no ambiente venham a sofrer pirólise. A temperatura sobe de 50 °C para 800 °C, aproximadamente, em um espaço de tempo relativamente curto. O tamanho e forma do ambiente também influenciarão o comportamento do fogo: quanto menor o ambiente, mais facilmente se desenvolverá o incêndio. Da mesma forma, quanto mais fechado (com poucas aberturas naturais para ventilação), mais calor será irradiado para o material combustível ainda não atingido por este. No final desta fase, todos os materiais presentes no ambiente atingirão seu ponto de ignição, imergindo o ambiente inteiro em chamas, também conhecido como *flashover*. O calor se espalha para cima e para fora do combustível inicial por convecção e condução.

A terceira fase é a totalmente desenvolvida, também conhecida como estágio de queima livre ou estável. É nela que o incêndio torna-se mais agressivo, usando mais oxigênio e combustível. A temperatura nessa fase continuará se elevando acima de 800 °C. O acúmulo de fumaça e gases quentes é intensificado. A concentração de oxigênio baixa para cerca de 18% e há grandes diferenças entre sua concentração no nível do piso e no nível do teto. Enquanto no nível do piso a concentração de oxigênio é quase normal e a temperatura ainda é confortável, no nível do teto a camada de gás combustível e a temperatura aumentam rapidamente. A transição entre a fase crescente e esta pode ocorrer quando o suprimento de combustível ou oxigênio começa a ser limitado.

Na fase final, também conhecida como estágio de brasa ou decrescente, o incêndio dependerá da quantidade de material combustível ainda não ignido. O início ocorre quando o incêndio já consumiu a maior parte do oxigênio e combustíveis presentes no ambiente. As chamas tendem a diminuir e buscar oxigênio disponível por qualquer abertura. A concentração de oxigênio baixa para cerca de 16%. Se a concentração baixar para 15% ou menos, as chamas se extinguirão, permanecendo somente brasas. A temperatura no teto ainda é muito elevada e o ambiente é rico em gases quentes e fumaça. Há pouca ou nenhuma visibilidade no local. Há uma diminuição linear da temperatura, o que significa

que o ambiente estará resfriando, porém muito lentamente e com pouco oxigênio. De acordo com Martines (1997), é considerado que o incêndio foi extinto ao alcançar uma temperatura em torno de 300 °C.

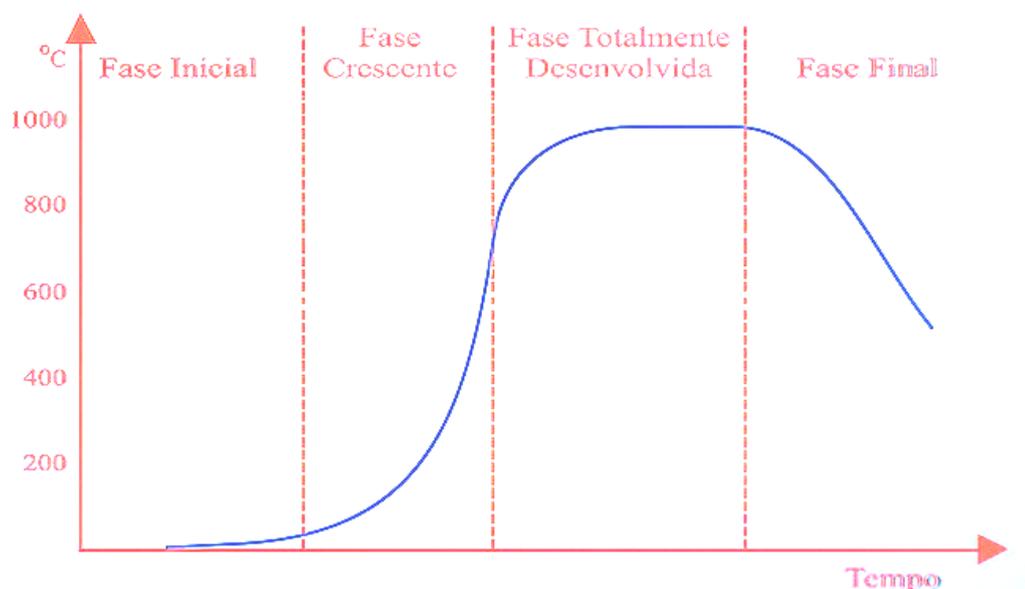


Figura 2.1 - Gráfico da temperatura x tempo das fases de um incêndio.

Em resumo, pode-se relatar que o fenômeno do incêndio é influenciado por fatores como a carga de incêndio, o ambiente, a ventilação do ambiente, a velocidade da combustão, as características dos materiais que compõem o ambiente. Sabe-se que a grande maioria dos incêndios inicia-se a partir de uma fonte de energia térmica, mecânica ou elétrica, a qual em contato direto ou indireto com o combustível, dá início ao processo de combustão. E dependendo da gravidade do incêndio, pode ocorrer propagação para suas adjacências tanto no sentido vertical (podendo ser interno ou externo ao compartimento inicialmente incendiado ou provocado pelas chamas e gases quentes oriundos do incêndio inicial) como no sentido horizontal (geralmente ocorre no mesmo padrão de comportamento do incêndio inicial). A propagação das chamas pode ser facilitada também a outros ambientes superiores por intermédio das escadas, dos fossos dos elevadores, das fissuras existentes no edifício ou fissuras provocadas pelo próprio incêndio, janelas, shafts de tubulações. Enfim, independente da natureza do incêndio, tem-se que levar em conta a sua existência e gravidade, pois suas conseqüências sempre são trágicas, gerando perdas de bens materiais e patrimônio, traumas a pessoas e até perdas de vidas humanas, agressão ao meio ambiente, entre outros.

2.3. MODELOS DE INCÊNDIO

2.3.1. Modelo do incêndio-padrão

Devido aos inúmeros estudos em incêndio, foi necessário criar um modelo de incêndio preconizando temperaturas envolvidas para as análises experimentais. Desta forma adotou-se uma curva temperatura x tempo, que é conhecida como curva de incêndio-padrão. Com tal curva, é possível determinar a temperatura máxima atingida num elemento da estrutura antes do colapso. Este resultado pode ainda ser utilizado no dimensionamento estrutural onde tal modelo de incêndio é empregado para análises de estruturas e equipamentos ou mesmo de materiais anti-chama ensaiados em fornos de laboratórios de pesquisas.

O incêndio-padrão segue curvas padronizadas para ensaios com a característica principal de possuir apenas um ramo ascendente, o que não caracteriza um incêndio real, e admitindo que a temperatura dos gases seja sempre crescente e independente da quantidade de carga de incêndio e das características do ambiente em chamas. Dentre as curvas padronizadas mais citadas em bibliografias consultadas e mais utilizadas em ensaios de incêndios, são usadas: ISO 834 (1999), ASMT E 119 (1998) e EUROCODE 1 (1995).

2.3.1.1. A *International Organization for Standardization*, por meio da norma ISO 834 - “*Fire-resistance tests – Elements of building construction*”, recomenda a curva temperatura x tempo de incêndio apresentada na Equação 2.1, sendo caracterizada pelo aumento contínuo da temperatura ao longo do tempo numa velocidade pré-estabelecida.

$$\theta_g = \theta_{g,0} + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (2.1)$$

Sendo:

θ_g Temperatura dos gases, em °C
t Tempo em minutos

A temperatura no instante inicial do incêndio ($\theta_{g,0}$), geralmente, é considerada 20°C.

Ressalta-se que o modelo proposto na equação acima refere-se a um ensaio no qual a carga de combustível predominante é de material celulósico, o que ocorre na maioria dos casos de incêndios em edificações.

Existem situações em que o material combustível não é composto à base de material celulósico, a norma ISO 834 (1999) expõe por meio da Equação 2.2, o comportamento de um incêndio basicamente composto de materiais derivados do petróleo (hidrocarbonetos) e pela Equação 2.3, situação de incêndios externos (não compartimentados).

$$\theta_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,50t}) + 20 \quad (2.2)$$

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

Abaixo, são apresentadas comparações de curvas do incêndio-padrão em alguns diferentes tipos de material combustível nesta norma em estudo.

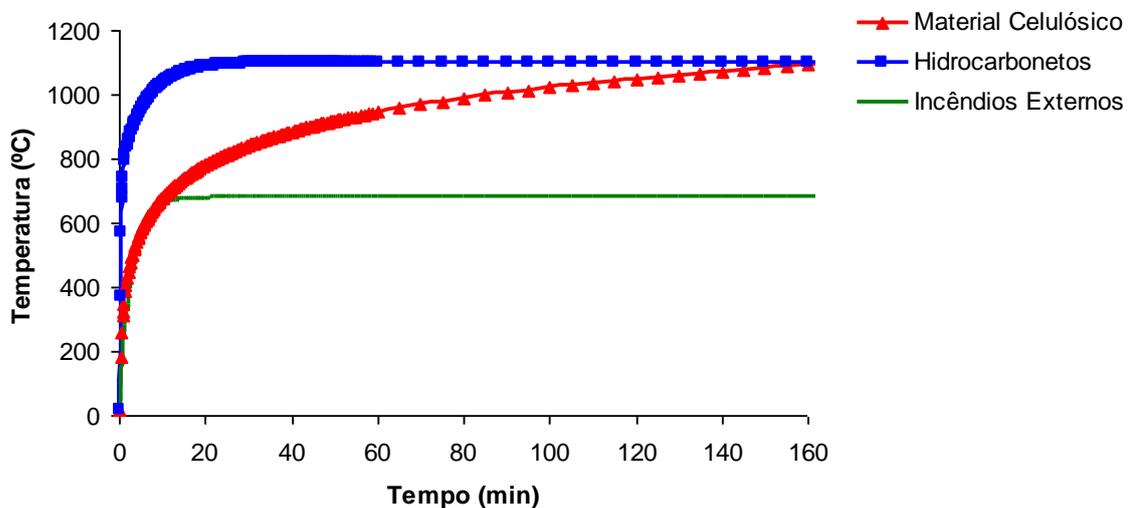


Figura 2.2 - Comparação entre diferentes tipos de material combustível na norma ISO 834 (1999)

2.3.1.2. *American Specification of Testing and Materials*, por meio da norma ASTM E 119 (1988) – “*Standard test methods for fire tests of building construction and*

materials”, foi adotada em 1918, fundamentada na proposta do UL – *Underwriters Laboratory de Chicago* (1916), que durante a realização de ensaios de pilares que estavam sendo realizados no período, utilizava destes dados para a fase de aquecimento, onde se tem uma suposição de que estes dados sejam obtidos de incêndios reais. Para a construção da curva de incêndio-padrão esta norma recomenda a utilização dos valores apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores da curva temperatura dos gases quentes x tempo – ASTM E 119

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

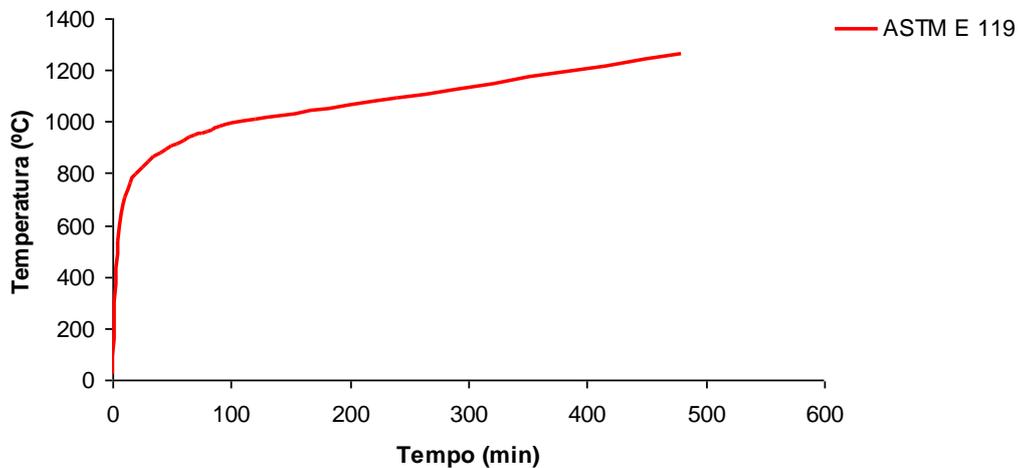


Figura 2.3 – Curva temperatura-tempo de um incêndio padronizado, conforme ASTM E 119.

2.3.1.3. EUROCODE 1 (1995) “*Basis of Design and Actions on Structures, Part 2.2 – Actions on Structures Exposed to Fires*”, representa a curva padronizada da norma da união européia, na qual é apresentado um conjunto de curvas parametrizadas para representar incêndios naturais e duas curvas distintas para incêndio-padrão. Essas curvas distintas para incêndio-padrão se diferenciam de

acordo com o material combustível predominante, podendo ser composto por materiais celulósicos e hidrocarbonetos.

- Para materiais combustíveis celulósicos, a curva é dada pela equação:

$$\theta_g = \theta_{g,0} + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (2.4)$$

- Para materiais combustíveis hidrocarbonetos, é utilizada a equação:

$$\theta_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,50t}) + 20 \quad (2.5)$$

A seguir, são apresentadas comparações de curvas do incêndio-padrão na norma EUROCODE em diferentes tipos de material combustível adotados nesta norma.

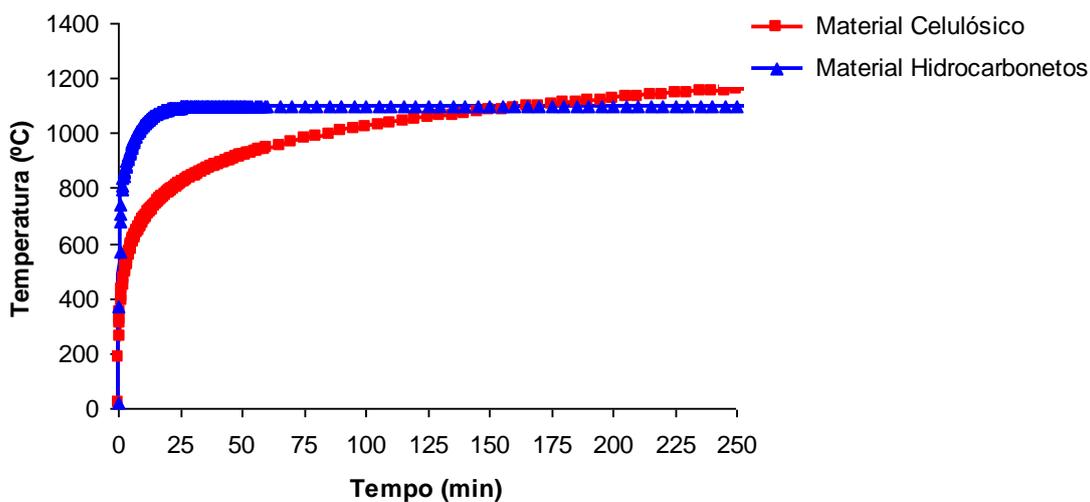


Figura 2.4 – Curva temperatura-tempo de um incêndio padronizado, conforme EUROCODE

A norma brasileira representada pela NBR 14432:2000 adota a mesma equação definida na ISO 834.

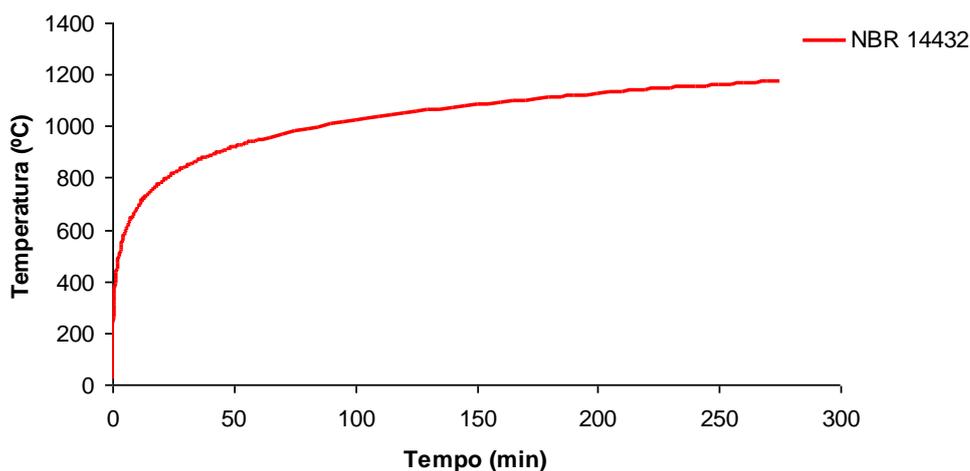


Figura 2.5 – Curva modelo incêndio padronizado, conforme NBR 14432:2000.

A Figura 2.5 apresenta o gráfico com as curvas de incêndio-padrão das normas ISO 834 (NBR 14432:2000 e Eurocode 1 para materiais celulósicos), ASTM E 119 e Eurocode 1 para materiais hidrocarbonetos.

2.3.2. Modelo do incêndio-natural ou compartimentado

O modelo de incêndio natural gera curvas de temperatura x tempo dos gases quentes simulando as fases mais importantes de um incêndio real. Este modelo gera curvas de incêndio caracterizadas por um ramo ascendente (indicando a fase de aquecimento) e um ramo descendente (indicando a fase de resfriamento). Este modelo não admite que a temperatura dos gases do incêndio seja sempre ascendente com o tempo como no incêndio-padrão. No incêndio natural, existem parâmetros que interferem diretamente na curva temperatura x tempo, uma vez que tais curvas são idealizadas para compartimentos. Sendo assim, consideram-se neste modelo de incêndio o grau de ventilação, o tipo de vedação e suas características térmicas (calor específico, peso específico e condutividade térmica), a quantidade de carga de incêndio específica e a geometria do compartimento.

As curvas do incêndio natural são construídas a partir de modelos matemáticos aferidos em ensaios que simulam situações reais de incêndio. Portanto, para estudo deste modelo, é necessário considerar ambientes com aberturas, devido às características de estanqueidade, resistência dos elementos de vedação e de isolamento térmico. Torna-se importante também que o incêndio venha a se propagar somente no interior do ambiente e sem

possibilidades de propagação do lado externo. Devido a este tipo de comportamento, esse incêndio é conhecido também como incêndio natural compartimentado.

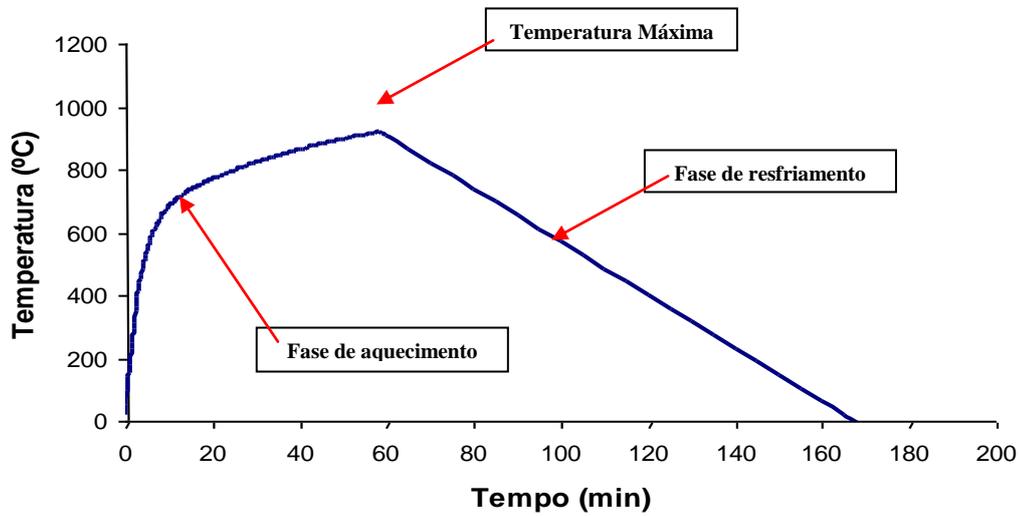


Figura 2.6 – Curva modelo incêndio-natural

Seguindo as formulações dos modelos matemáticos, são apresentados a seguir os parâmetros necessários para calcular este tipo de incêndio:

- Carga de incêndio: que pode ser definida pela soma total das energias caloríficas liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis existentes em um espaço ou área possível de ser atingida pelo fogo, incluindo materiais de acabamento e decoração, expressos em unidades de calor ou em peso equivalente de madeira. É utilizada para indicar a possível gravidade de um incêndio. Na NBR 14432:2000, são apresentadas tabelas referentes a valores da carga de incêndio em função do tipo de ocupação das edificações.

Além da carga de incêndio, há na NBR 14432:2000 tabelas que fornecem valores das cargas de incêndio específicas a determinado estabelecimento. Tais cargas são definidas como o valor da carga de incêndio dividida por uma área de referência, que pode ser a do piso do compartimento ou a área total, e expressa pela equação:

$$q_{fi,k} = \frac{\sum_i M_i H_i m_i \psi_i}{A_r} \quad (2.6)$$

Sendo:

$q_{fi,k}$ Valor característico da carga de incêndio específica

M_i Massa de cada componente “i” do material combustível

H_i Potencial calorífico de cada componente combustível

m_i Coeficiente adimensional que indica a eficiência da combustão de cada componente do material combustível e é representado entre o intervalo de 0 a 1

ψ_i Coeficiente adimensional com variação dentro do intervalo de 0 a 1, que representa o grau de proteção do combustível ao fogo

A_r Área de referência

Geralmente considera-se $m_i = 1$, pois representa a combustão completa e $\psi_i = 1$, que indica nenhuma proteção do combustível ao fogo.

A seguir apresenta-se na Tabela 2.2 a recomendação da NBR 14432:2000, com relação aos valores de potencial calorífico específico de determinados materiais. Devido à dificuldade de determinação na prática, da carga de incêndio específica na Equação 2.6, as normas técnicas adotam valores de acordo com a finalidade das edificações.

Tabela 2.2 – Valores do potencial calorífico específico.

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	Poliétileno	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	41	Polycarbonato	29	Seda	19

O valor de cálculo da carga de incêndio específica é utilizado para determinação da ação térmica nas estruturas que, com ajuda de métodos simplificados de determinação da temperatura do incêndio ou do elemento estrutural e de análise estrutural, se pode verificar a segurança estrutural da edificação. O valor de cálculo da carga de incêndio específica é dado pela equação:

$$q_{fi,d} = \gamma_n \gamma_s q_{fi} \quad (2.7)$$

Sendo:

- $q_{fi,d}$ Valor característico da carga de incêndio específica de projeto (MJ/m²)
- q_{fi} Valor característico da carga de incêndio específica (MJ/m²)
- γ_n Coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa
- γ_s Coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das conseqüências do colapso da edificação

Os coeficientes adimensionais definidos na Equação 2.7 podem também ser encontrados nas instruções técnica do Manual do CBMSP.

O grau de ventilação, ou fator de abertura, representa a quantidade de ventilação diretamente proporcional às aberturas existentes nas paredes do compartimento e às alturas destas aberturas, em relação à área total do ambiente.

Na análise experimental ou numérica do incêndio, associa-se o grau de ventilação como parâmetro à quantidade de oxigênio no ambiente, que é representado pelo fator de abertura O e é dado pela seguinte equação:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t} \quad , \text{ visto que} \quad h = \frac{\sum_i h_i A_i}{A_v} \quad (2.8)$$

Sendo:

- O Fator de abertura ou grau de ventilação
- A_v Área total das aberturas para o exterior do edifício, inclusive janelas que podem ser quebradas em um incêndio;

A_t Área total de paredes, piso, teto e aberturas;

h Altura média das aberturas;

h_i Altura da abertura i ;

A_i Área da abertura i .

Mostra-se a seguir a relação entre a quantidade de material combustível e o grau de ventilação do compartimento, que pode ser representada pela equação:

$$\xi = \frac{A_q}{A_v \sqrt{h}} \quad (2.9)$$

Sendo:

ξ 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;

A_v Área total das aberturas para o exterior do edifício, inclusive janelas que podem ser quebradas em um incêndio;

h_i Altura da abertura i .

De acordo com Silva (2001), se em um incêndio natural compartimentado a quantidade de material combustível for suficientemente grande ou o grau de ventilação suficientemente pequeno (alto valor de ξ), a temperatura dos gases quentes será função somente do grau de ventilação, e se estará, então, diante de um incêndio de ventilação controlada. Por questões de simplificação e segurança, freqüentemente assume-se que na fase de aquecimento o incêndio é de ventilação controlada. Já para baixos valores de ξ , diz-se que o incêndio é controlado pelo combustível, e a temperatura depende apenas da carga de incêndio.

O método proposto pelo EUROCODE 1 (1995), utilizado para representar o compartimento do incêndio natural, indica o uso de curvas de um mesmo padrão para as fases de aquecimento e resfriamento e apresenta um conjunto de equações que levam em conta os parâmetros descritos anteriormente. Este método é limitado onde o valor de cálculo da carga de incêndio específica deve ser: $50 \leq q_{fi,d} \leq 1000 \text{ MJ/m}^2$, a área de piso do

compartimento não deve ser superior a 100 m², o grau de ventilação (O) deve assumir um valor entre 0,02 e 0,20 m^{1/2}; o valor de b (raiz quadrada do produto ρ c λ) deve situar-se entre 1000 e 2000 J/m²s^{1/2}°C para que conduza a resultados a favor da segurança.

A seguir, serão apresentadas as equações referentes à aplicação do modelo do incêndio natural:

Para o ramo ascendente, isto é a fase de aquecimento da curva do incêndio natural.

$$\theta_g = 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (2.10)$$

$$t^* = t \Gamma \quad ; \quad \Gamma = \frac{O/b^2}{0,04/1160^2} \quad ; \quad b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (2.11)$$

Para o ramo descendente, isto é a fase de resfriamento da curva do incêndio natural.

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 625(t^* - t_d^*) \quad \text{Para } t_d^* \leq 0,5 \quad (2.12)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*) \quad \text{Para } 0,5 < t_d^* \leq 2 \quad (2.13)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250(t^* - t_d^*) \quad \text{Para } t_d^* > 2 \quad (2.14)$$

O valor de t_d^{*} é dado por:

$$t_d^* = 0,13 \cdot 10^{-3} \frac{q_{fi,d}}{O} \Gamma \quad (2.15)$$

Sendo:

- θ_{g,max} Temperatura máxima dos gases quentes em °C
- ρ Massa específica (kg/m³)
- c Calor específico (J/kg°C)
- λ Condutividade térmica (W/m°C) do material de vedação do compartimento
- b Fator de parede
- t Tempo em horas

Os gases quentes alcançam sua temperatura máxima quando $t^* = t_d^*$.

É válido ressaltar que para cada compartimento de uma edificação ter-se-ão diferentes curvas de incêndio natural, visto que o grau de ventilação, a carga de incêndio e os parâmetros térmicos variam de um compartimento para outro.

No presente estudo, as análises serão realizadas tendo como base o modelo de incêndio natural. A partir de resultados trabalhados com as formulações matemáticas propostas para incêndio natural, foram analisadas comparativamente três casos de incêndios, utilizando valores diferentes para carga de incêndio específica (300, 600 e 700MJ/m²) e grau de ventilação (0,04, 0,08 e 0,12m^{1/2}). Depois foram traçados os gráficos apresentados nas Figuras 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 e observado que:

- Com a carga constante e aumento do grau de ventilação, a temperatura cresce e ocorre uma redução do tempo de duração do incêndio;
- A temperatura máxima do incêndio aumenta com a ventilação até certo limite de tempo quando reduz bruscamente e tende a um valor constante. Isso acontece devido ao incêndio não ser controlado mais pela ventilação e sim pelo combustível.
- A duração do tempo do incêndio aumenta com a redução de ventilação
- Quanto maior o grau de ventilação, menor o tempo em que o incêndio atinge a temperatura máxima.
- Quanto maior a carga de incêndio, maior é o tempo em que o incêndio alcança a temperatura máxima e também maior é a temperatura máxima atingida pelos gases quentes no ambiente compartimentado.
- Para um mesmo grau de ventilação e um aumento da carga de incêndio específica, a temperatura máxima e o tempo de duração do incêndio se elevam.

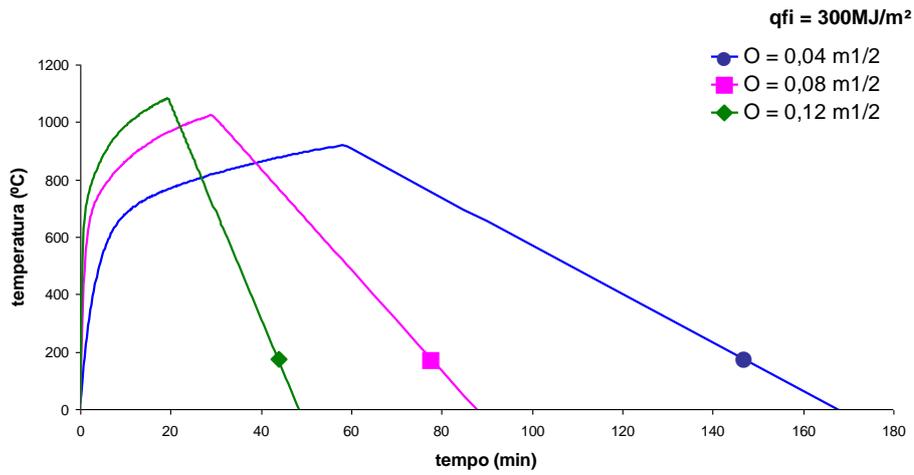


Figura 2.7 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 300\text{MJ/m}^2$)

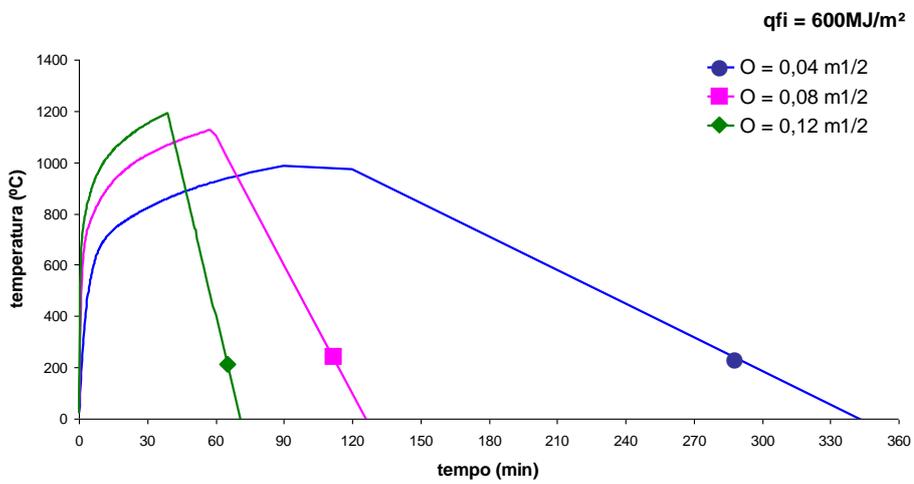


Figura 2.8 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 600\text{MJ/m}^2$)

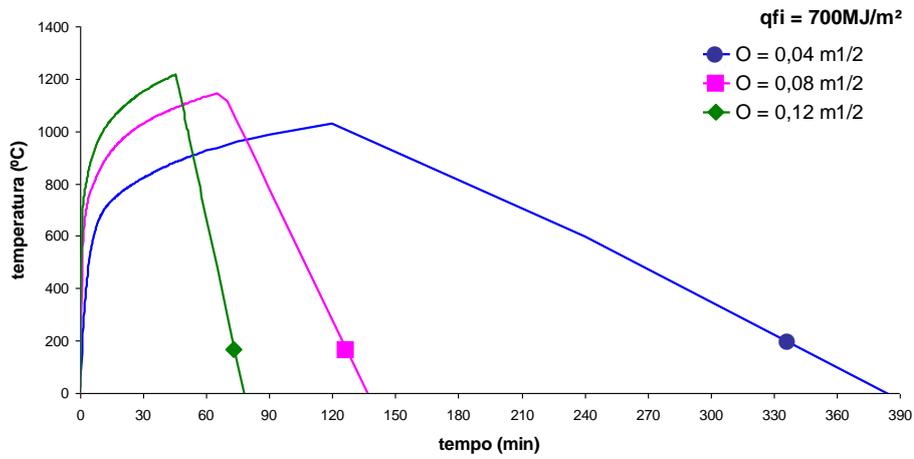


Figura 2.9 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo ($q_{fi} = 700 \text{ MJ/m}^2$)

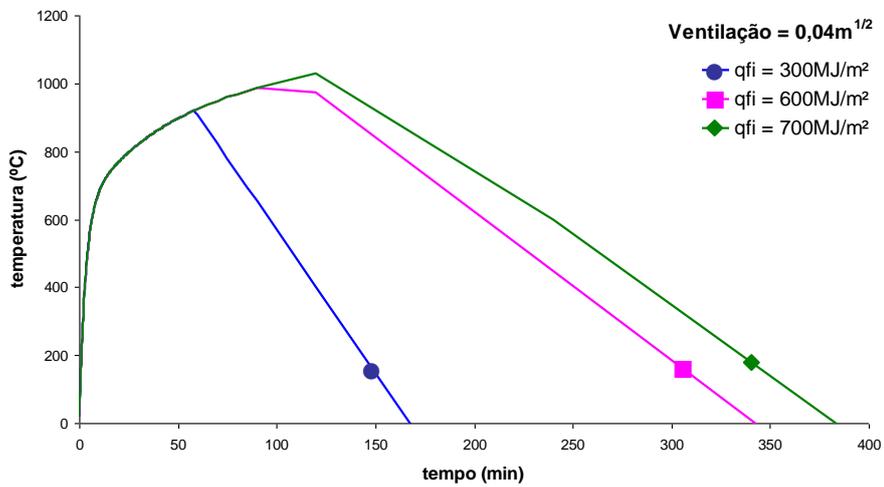


Figura 2.10 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,04 \text{ m}^{1/2}$)

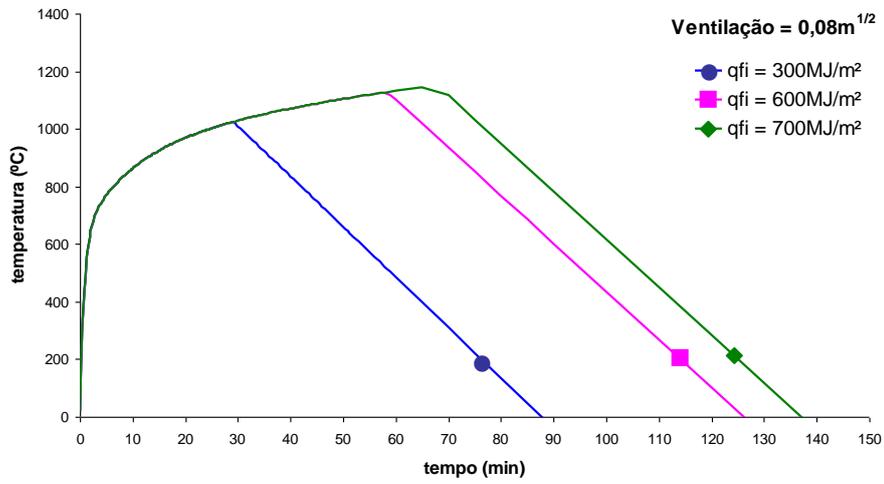


Figura 2.11 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,08m^{1/2}$)

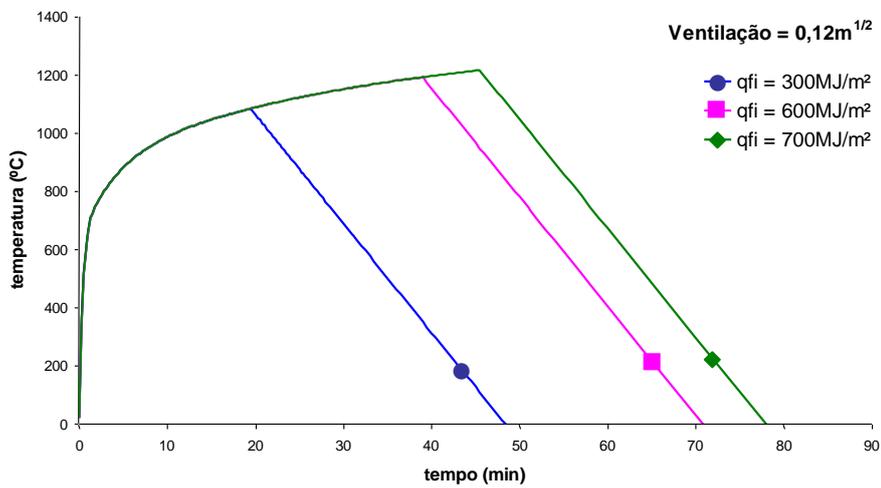


Figura 2.12 – Incêndio natural – Curvas temperatura x tempo (Ventilação = $0,12m^{1/2}$)

2.4. DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA PARA PERFIS I EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, CONFORME NBR 14323:1999 E NBR 8800:1986

Nesta dissertação o objetivo principal é avaliar as cargas críticas nos perfis de aço em situação de incêndio. No momento em que o perfil de aço é exposto ao fogo, suas propriedades sofrem grandes perdas de resistência para suportar carregamentos, podendo ainda apresentar fenômenos de instabilidade. Nesta pesquisa, o objetivo principal é a determinação da resistência teórica dos perfis quando submetidos à flexão pura, considerando a situação de instabilidade caracterizada pela flexão lateral com flexo-torção (FLT). Inicialmente, é importante revisar o que é aceito e sugerido atualmente pela norma técnica brasileira NBR 14323:1999 na determinação do momento crítico em perfis com seção transversal I sob situação de incêndio.

Conforme já comentado, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou as normas NBR 14323:1999, NBR 14432:2000 e NBR 8800:1986, que são utilizadas nesta pesquisa como referência de recomendações normativas de procedimentos do comportamento de estruturas em situação de incêndio. Dentre essas publicações, segue abaixo um resumo das recomendações destas normas sobre segurança contra incêndio nas estruturas:

- NBR 14323:1999 fundamenta-se nos estados limites, comparando a solicitação de cálculo com a resistência de cálculo dos elementos estruturais em situação de incêndio. Desta forma é possível verificar se a temperatura atingida pelos elementos estruturais não ultrapassa a temperatura de colapso (denominada temperatura crítica) no tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) obtido por meio da NBR 14432:2000.
- NBR 14432:2000 descreve as exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – visando à segurança estrutural, analisando de tal forma que a edificação não colapse, permitindo a execução de reforços para sua reutilização. A segurança das estruturas em situação de incêndio é verificada no momento em que se analisa se a temperatura atuante no aço é ou não inferior à temperatura crítica do elemento estrutural. Verifica-se se o valor de cálculo dos efeitos das ações solicitantes é menor do que o valor de cálculo dos esforços resistentes de cada elemento estrutural.

Como para análise desta dissertação é designado o perfil de aço com seção transversal I, utiliza-se para auxílio e parâmetro a NBR 8800:1986 – Projeto e execução de estruturas de aço em edifícios, em especial o Anexo D, o qual se aplica a vigas não esbeltas, sujeitas à flexão normal simples.

Conforme descrito no Anexo D da NBR 8800:1986, vigas não esbeltas são aquelas cujos elementos (almas ou mesas) perpendiculares ao eixo de flexão têm índice de esbeltez λ inferior ou igual a λ_r (λ e λ_r definidos em tabela na norma, para o estado limite FLA). E vigas esbeltas ($\lambda > \lambda_r$ para FLA) com seções I duplamente simétricas, que devem ser vistas no Anexo F da NBR 8800:1986.

Existem casos em situação de incêndio que a NBR 14323:1999, nos itens 8.4.3.2, 8.4.3.3 e 8.4.3.4, recomenda que o valor do parâmetro de esbeltez λ seja determinado de acordo com o Anexo D da NBR 8800:1986, como, por exemplo, o caso de barras fletidas para os estados limites últimos de flambagem local da mesa comprimida (FLM), flambagem local da alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT), e o caso de vigas biapoiadas, sobrepostas por laje de concreto, os valores dos parâmetros de esbeltez correspondente à plastificação e ao início do escoamento.

Nesta pesquisa serão avaliadas vigas de aço supondo-se que a mesa superior encontra-se protegida por placa de material refratário (gesso, placa de drywall, parede sob a viga, etc). Numa situação de incêndio, os valores dos parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação ($\lambda_{p,fi}$) e ao início do escoamento ($\lambda_{r,fi}$) devem ser determinados de acordo com os procedimentos descritos no Anexo D da NBR 8800 (1986) para obtenção de λ_p e λ_r à temperatura ambiente. No caso onde as vigas fletidas não sejam biapoiadas, devem ser seguidas as recomendações do item 8.4.3.4 da NBR 14323(1999). λ_p e λ_r devem ser calculados pelo mesmo procedimento, no entanto multiplicando-se o valor do módulo de elasticidade E pelo fator de redução do módulo de elasticidade $K_{E,\theta}$, conforme será apresentado em tabela no próximo capítulo (item 3.1). Também os valores do limite do escoamento f_y devem ser multiplicados pelos valores do fator de redução $k_{y,\theta}$ correspondentes ao limite de escoamento do aço à temperatura θ_a .

O procedimento para determinar a resistência de cálculo ao momento fletor para uma viga de aço com seção transversal I em situação de incêndio é recomendado pela NBR 14323:1999, no item 8.4.3.5, que, conforme o estado limite em questão, tem-se:

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

$$M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} M_{pl} \quad \text{Para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad (2.16)$$

$$M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} \left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r \right) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \quad \text{Para } \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad (2.17)$$

- Flambagem lateral com flexo-torção (FLT):

$$M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} k_1 k_2 K_{y,\theta} M_{pl} \quad \text{Para } \lambda \leq \lambda_{p,fi} \quad (2.18)$$

$$M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{K_{y,\theta}}{1,2} \left[M_{pl} - \left(M_{pl} - M_r \right) \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right] \quad \text{Para } \lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi} \quad (2.19)$$

$$M_{fi,Rd} = \phi_{fi,a} \frac{K_{E,\theta} M_{cr}}{1,2} \quad \text{Para } \lambda > \lambda_{r,fi} \quad (2.20)$$

Sendo:

- k_1 Fator de correção para temperatura não uniforme na seção transversal
- k_2 Fator de correção para temperatura não uniforme ao longo do comprimento da barra
- $k_{y,\theta}$ Fator de redução do limite de escoamento do aço à temperatura θ_a
- 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 – Anexo D NBR 8800:1986
- $k_{E,\theta}$ Fator de redução do módulo de elasticidade à temperatura θ_a
- M_{cr} Momento fletor de flambagem elástica em temperatura ambiente – Anexo D da NBR 8800:1986
- 1,2 Fator de correção empírica da resistência da barra em temperatura elevada

$\phi_{f\bar{i},a}$	Coeficiente de resistência do aço
λ	Parâmetro de esbeltez
$\lambda_{p,\bar{f}\bar{i}}$	Valor de λ para o qual a seção pode atingir M_{pl}
$\lambda_{r,\bar{f}\bar{i}}$	Valor de λ para o qual $M_{cr} = M_r$

É válido observar na NBR 14323:1999 que, para determinação da resistência de cálculo, deve-se considerar:

- Para os estados limites FLM e FLA, e FLT, quando $\lambda \leq \lambda_{p,\bar{f}\bar{i}}$, considera-se uma distribuição da temperatura não-uniforme ao longo da seção transversal da viga, por meio de fatores k_1 e k_2 , que, conforme descrito na NBR 14323:1999, item 8.4.3.7:
 - O fator de correção k_1 para distribuição de temperatura não-uniforme na seção transversal do perfil de aço I assume os valores de 1,00 para viga com os quatro lados expostos ao fogo e 1,40 para viga com três lados expostos ao fogo e uma laje de concreto incorporada no quarto lado.
 - O fator de correção k_2 para distribuição de temperatura não-uniforme ao longo do comprimento da viga assume valores de 1,15 nos apoios de uma viga estaticamente indeterminada e, nos demais casos, 1,00.
- Para FLT, quando $\lambda > \lambda_{r,\bar{f}\bar{i}}$, considera-se uma distribuição de temperatura uniforme, corrigindo-se o resultado obtido por meio do fator de correção empírico 1,2, conforme procedimento descrito na NBR 14323:1999, item 8.4.3.7.

Para o estado limite de flambagem lateral com torção (FLT) quando $\lambda > \lambda_{r,\bar{f}\bar{i}}$, é considerada uma distribuição uniforme de temperatura no elemento estrutural. Neste caso, corrige-se o resultado por meio do fator de correção empírico 1,2. Nesta pesquisa, conforme comentado anteriormente, é proposto contribuir com uma análise da carga crítica

considerando temperatura não uniforme nas mesas do perfil I. Podem as implicações normativas ser motivo de futuras pesquisas relacionadas ao tema exposto.

Já no anexo D da NBR 8800:1986, adota-se o seguinte procedimento para determinar a resistência de cálculo ao momento fletor:

- No caso de vigas não esbeltas:

$$M_{fi,Rd} = \phi_b M_n \quad (2.21)$$

Sendo:

ϕ_b Coeficiente de resistência do momento fletor

M_n Resistência nominal calculada

No caso a ser estudado de perfis de aço com seção transversal I, seguindo as recomendações contidas no Anexo D da NBR 8800:1986, item D-2.3, M_n , é o menor dos três valores, considerando os estados limites FLT, FLM e FLA, onde para cada um desses estados limites, têm-se:

$$M_n = M_{pl} \quad \text{Para } \lambda \leq \lambda_p \quad (2.22)$$

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad \text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (2.23)$$

$$M_n = M_{cr} \quad \text{Para } \lambda > \lambda_r \quad (2.24)$$

Sendo:

M_{cr} Momento fletor de flambagem elástica

M_r Momento fletor de início ao escoamento em temperatura ambiente

M_{pl} Momento de plastificação para projeto à temperatura ambiente

M_n Resistência nominal calculada

λ Parâmetro de esbeltez

λ_r	Parâmetro de esbeltez no início do escoamento
λ_p	Parâmetro de esbeltez de plastificação

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa, estudar o comportamento das cargas críticas em vigas metálicas com seção transversal I quando submetidas a situações de incêndio, será necessário calcular os momentos críticos dos perfis de aço numa situação de incêndio. Com os momentos críticos calcular a correspondente carga crítica seguindo as recomendações normativas do estado limite de flexão lateral com torção (FLT), ou seja, para as vigas metálicas que se incluem na situação onde $\lambda > \lambda_r$. Com estes resultados, fazer comparações com a formulação analítica que será sugerida no capítulo 5.

Seguindo as recomendações da norma NBR 8800:1986, o resultado do momento fletor crítico para as vigas de aço com seção do tipo I, com dois eixos de simetria e fletida em torno do eixo de maior inércia, é dado pela equação:

$$M_{cr} = \frac{C_b \beta_1}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda^2}} \quad (2.25)$$

Sendo:

M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica
C_b	Coefficiente de correção para o cálculo de M_{cr}
β	Ângulo de rotação vertical da extremidade da viga
λ	Parâmetro de esbeltez
$k_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade à temperatura θ_a

Na Equação 2.25, o menor do coeficiente de C_b foi deduzido para uma viga sob flexão pura. Com o objetivo de corrigi-la para M_{cr} , levando-se em conta outros tipos de carregamentos, a norma NBR 8800:1986 adota o clássico coeficiente de correção C_b sugerido por Salvadori (1955), conforme descrito no item 5.4 da NBR 8800:1986.

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2,3 \quad (2.26)$$

Como se pode observar na Equação 2.26, o cálculo do coeficiente C_b é função dos momentos M_1 e M_2 , que são definidos após o cálculo dos momentos fletores nas extremidades do trecho não contido lateralmente, em que se adotam para estes valores o menor e o maior dos momentos fletores encontrados. É válido lembrar que a relação $\left(\frac{M_1}{M_2} \right)$ apresenta valores positivos, quando esses momentos provocarem curvatura reversa, e valores negativos, quando a curvatura for simples.

No caso de o cálculo do momento fletor em alguma seção intermediária ser superior em valor absoluto a M_1 e M_2 , deve-se adotar $C_b = 1,00$, e, em casos de estrutura em balanço, adota-se também $C_b = 1,00$.

Ainda na Equação 2.25, os valores de λ , β_1 e β_2 são definidos pelas expressões a seguir:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (2.27)$$

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

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

Sendo o momento de inércia à torção I_T definido na equação a seguir:

$$I_T = 2 \left(\frac{b_f t_f^3}{3} \right) + \left(\frac{d t_w^3}{3} \right) \quad (2.30)$$

Depois de concluído o cálculo do momento crítico, parte-se da formulação utilizada por Winter (1941) para se calcular a carga crítica, onde:

$$\left(-\frac{M \phi}{EI} \right) = \left(-\frac{P x \phi}{2EI} \right) \quad (2.31)$$

Considerando o caso ora em estudo, carga concentrada, resolve a Equação 2.31 para determinar o cálculo da carga crítica, conforme descrito na Equação 2.32. Considera-se nesta solução que o comprimento total da viga é $x = L_b$ e que a carga concentrada é $P = \frac{P_{cr}}{2}$, conforme distribuída nos apoios.

$$P_{cr} = \frac{4 M_{cr}}{L_b} \quad (2.32)$$

Sendo:

- M_{cr} Momento fletor de flambagem elástica
- P_{cr} Carga crítica
- L_b Comprimento da viga sem travamento lateral

Revisadas estas normas e formulações, no capítulo de aplicações numéricas e analíticas será calculada e analisada, para vigas de aço com seção transversal I em situação de incêndio, a carga crítica por meio de formulação fechada que será definida e proposta nesta pesquisa.

3. PROPRIEDADES DO AÇO A ELEVADAS TEMPERATURAS

O aço, atualmente a mais importante liga metálica, composto por ferro, carbono e outros componentes como: óxidos, sulfetos, enxofre, fósforo, níquel, cromo, etc., está sendo cada vez mais empregado de forma intensiva na construção civil. Entretanto ainda existem alguns impedimentos devido as suas características técnicas que favorecem outros materiais, como a sua maior resistência à corrosão e ao fogo. Quando submetido a uma situação de incêndio, passa por perda de resistência e rigidez, devendo tais importâncias ser consideradas em procedimentos de projeto e análise.

Quando os aços para uso estrutural previstos em normas brasileiras passam por elevadas temperaturas, administram as propriedades mecânicas e térmicas apresentadas a seguir:

3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para variações de temperatura no aço entre 2° e $50^\circ\text{C}/\text{min}$, de acordo com a NBR 14323:1999, as propriedades mecânicas do material serão obtidas considerando relações matemáticas entre limites de escoamento e módulos de elasticidade.

O módulo de elasticidade apresenta valores tabelados, conforme NBR 14323:1999. Na Tabela 3.1, são apresentados os fatores de redução da resistência ao escoamento dos aços estruturais, a elevadas temperaturas, e na Figura 3.1, as curvas características de cada fator de redução.

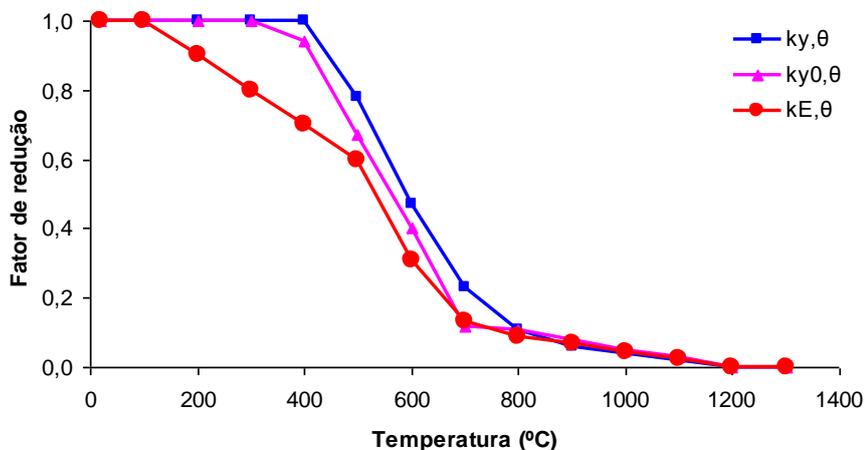


Figura 3.1 – Curvas características dos fatores de redução em função da temperatura.

Tabela 3.1 – Fatores de redução devido à temperatura.

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fatores de redução devido à temperatura		
	Limite de escoamento dos aços laminados a quente	Limite de escoamento dos aços trefilados	Módulo de elasticidade de todos os tipos de aço
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	$k_{y0,\theta} = f_{y0,\theta} / f_{y0}$	$k_{E,\theta} = E_\theta / E$
20	1,000	1,000	1,0000
100	1,000	1,000	1,0000
200	1,000	1,000	0,9000
300	1,000	1,000	0,8000
400	1,000	0,940	0,7000
500	0,780	0,670	0,6000
600	0,470	0,400	0,3100
700	0,230	0,120	0,1300
800	0,110	0,110	0,0900
900	0,060	0,080	0,0675
1000	0,040	0,050	0,0450
1100	0,020	0,030	0,0225
1200	0,000	0,000	0,0000

Sendo:

- $k_{y,\theta}$ Fator de redução da resistência ao escoamento dos aços laminados a quente
- $f_{y,\theta}$ Limite de escoamento dos aços laminados a quente devido a uma temperatura θ_a
- f_y Limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C
- $k_{y0,\theta}$ Fator de redução da resistência ao escoamento dos aços trefilados
- $f_{y0,\theta}$ Limite de escoamento dos aços trefilados devido a uma temperatura θ_a
- f_{y0} Limite de escoamento dos aços trefilados a 20°C
- $k_{E,\theta}$ Fator de redução para o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço
- E_θ Módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura θ_a
- E Módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C

Em estudos realizados por Barthélémy e Kruppa (1978) e Martines (1997), definiu-se a redução da tensão de escoamento do aço, apresentados nas expressões:

$$\frac{\sigma_{e\theta}}{\sigma_e} = 1 + \frac{\theta}{900 \ln\left(\frac{\theta}{1750}\right)} \quad \text{Para } 0^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

$$\frac{\sigma_{e\theta}}{\sigma_e} = \frac{340 - 0,34\theta}{\theta - 240} \quad \text{Para } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1000^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

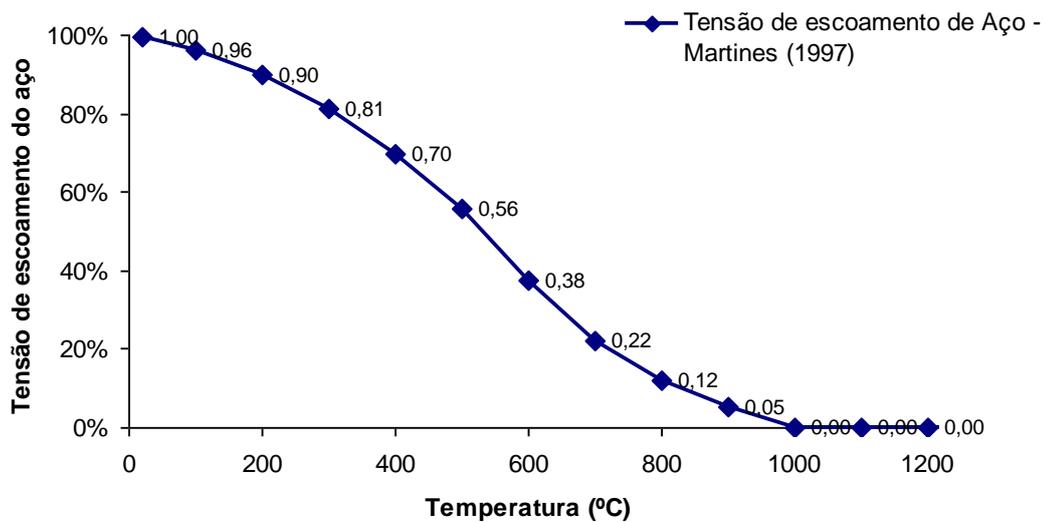


Figura 3.2 – Variação da tensão de escoamento do aço em função da temperatura

Na Figura 3.2, observa-se a tensão de escoamento em valores percentuais referentes da tensão à temperatura ambiente. Nota-se que a tensão de escoamento zera quando a temperatura atinge 1000°C.

Barthélémy e Kruppa (1978) e Martines (1997), por outro lado, definem também que a queda do módulo de elasticidade do aço ocorre de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{E_\theta}{E} = 1 + \frac{\theta}{2000 \ln\left(\frac{\theta}{1100}\right)} \quad (3.3)$$

Na Figura 3.3 apresenta-se um gráfico comparativo entre as quedas do módulo de elasticidade do aço pela norma brasileira e por outras literaturas mencionadas na Equação 3.3, em função do aumento da temperatura dos aços.

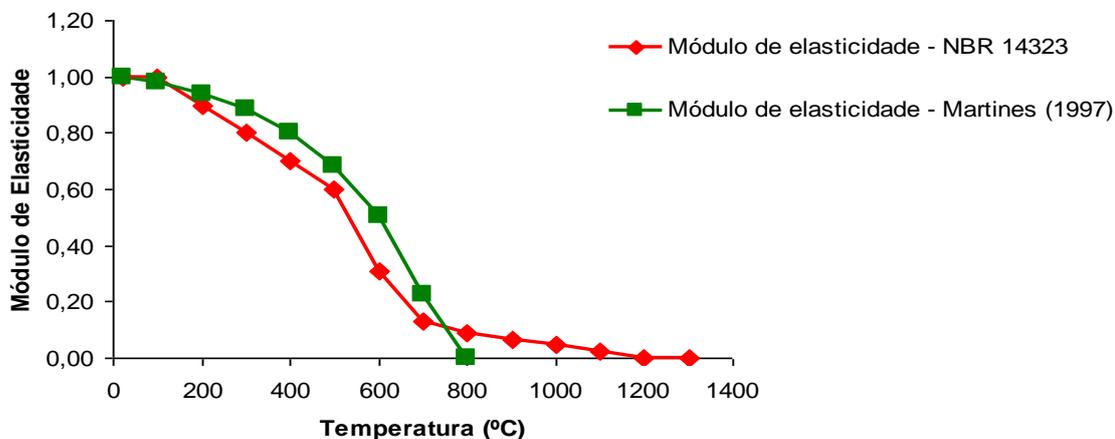


Figura 3.3 – Comparação das variações do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura.

Analisando o gráfico acima, verifica-se que com a curva da equação fornecida por Barthélémy e Kruppa (1978) e Martines (1997), o módulo de elasticidade sofre uma redução em torno de 2% até a temperatura de 50°C, reduz a 50% quando a temperatura está em torno de 600°C e cai praticamente a zero quando a temperatura chega aos 750°C. A curva gerada com os valores da Tabela 3.1 da NBR 14323:1999 apresenta redução no módulo de elasticidade apenas a partir de 100°C. Desta temperatura em diante, os valores reduzidos estão sempre abaixo dos valores prescritos por Martines (1997) até aproximadamente 700°C. Após esta temperatura, o valor do módulo de elasticidade vai se reduzindo lentamente até zerar na temperatura de 1200°C.

3.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS

Com o aumento da temperatura do aço e o desequilíbrio entre suas ligas metálicas a certas temperaturas, as propriedades térmicas dos aços sofrem variações que são apresentadas a seguir, de acordo como descrito na NBR 14323:1999.

3.2.1. – Calor específico

Define-se calor específico como sendo a relação entre a capacidade térmica e a massa de determinado corpo. A propriedade térmica sofre variação de acordo com a temperatura a que este corpo é exposto.

Na NBR 14323:1999 o calor específico (em J/Kg°C) do aço estrutural é determinado em função da temperatura, determinada pelas expressões abaixo e representada graficamente pela Figura 3.4:

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

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$$

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

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

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

$$c_a = 650$$

Sendo:

c_a Calor específico do aço (J/Kg°C)

θ_a Temperatura no aço (°C)

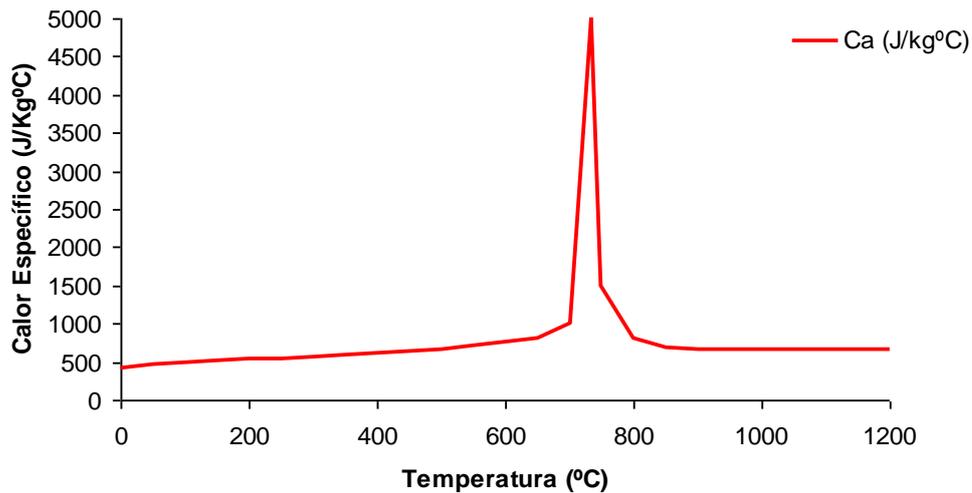


Figura 3.4 – Calor específico do aço devido à temperatura

3.2.2. – Condutividade térmica

Define-se condutividade térmica como sendo a corrente térmica por unidade de área perpendicular ao fluxo de calor e por unidade de gradiente de temperatura.

A variação da condutividade térmica do aço apresenta-se devido ao aumento de temperatura, podendo ser determinada pelas expressões abaixo e representada graficamente, conforme Figura 3.5.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a && \text{Para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \\ \lambda_a &= 27,3 && \text{Para } 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sendo:

λ_a Condutividade térmica do aço (W/m°C)

θ_a Temperatura no aço (°C)

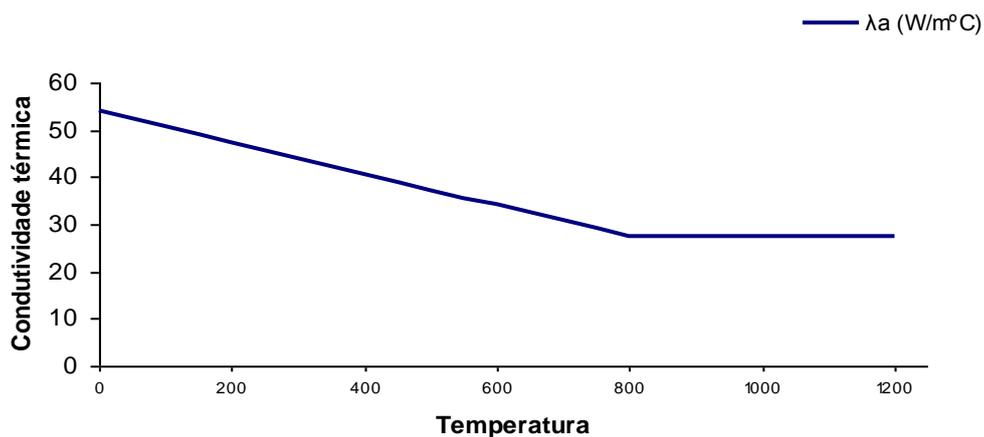


Figura 3.5 – Variação da condutividade térmica do aço devido à temperatura

Analisando o gráfico, deduz-se que a condutividade térmica do aço até alcançar a temperatura de 500 $^{\circ}C$ sofre redução em torno de 30%, e que, após alcançar a temperatura de 800 $^{\circ}C$, a mesma mantém-se constante e apresenta uma redução de 50% em relação ao valor inicial.

4. ANÁLISE TÉRMICA DOS PERFIS DE AÇO

Nesta pesquisa os perfis de aço são submetidos a uma situação de incêndio, onde, devido às condições térmicas causadas por intensas trocas de calor, surge a necessidade de melhor investigar o seu comportamento. Para melhor análise desse comportamento na peça de aço, é necessária uma avaliação da distribuição da temperatura ao longo da peça que compõe a estrutura, sendo elaborada por meio de uma análise de transferência e fluxo de calor ao longo das seções transversais dos perfis aquecidos. É importante um estudo detalhado da natureza dos fenômenos da transferência de calor, compreendendo como acontece e de que maneira se manifesta as leis físicas e matemáticas e como estas conduzem seu comportamento.

Por meio de análises térmicas, pode-se resolver diversos problemas relacionados à distribuição de temperatura, geração de calor, gradientes térmicos e fluxos térmicos em um objeto ou sistema (Butkov, 1983). Princípios da teoria física e matemática deste fenômeno serão utilizados nos modelos simplificados indicados na norma NBR 14323:1999 para esse tipo de análise.

4.1. A TRANSMISSÃO DE CALOR E AS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA FÍSICA MATEMÁTICA

Os fenômenos físicos existentes na natureza geralmente são deduzidos por meio de formulações que envolvem equações diferenciais. Nesta pesquisa é interessante uma revisão das equações diferenciais relacionadas à transferência de calor e quais os tipos de problemas a que elas se referem, bem como é possível a utilização destas equações de problemas térmicos em outros fenômenos físicos administrados por equações análogas. A equação de Fourier é o tipo de equação diferencial conhecida para cálculo da distribuição de temperatura em determinado corpo.

As equações diferenciais que regem a transferência de calor e a maioria dos fenômenos físicos em regime estacionário são apresentadas em três tipos (Cesari, 1996):

$$\lambda_a \Delta^2 \phi(x, y, z) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.1)$$

A primeira equação apresentada (4.1) é conhecida como uma equação harmônica de Poisson. Quando $Q = 0$, transforma-se na equação de Laplace. É muito usada para resolução de problemas de escoamento de fluidos compressíveis, considerando ϕ o potencial de velocidade, λ a densidade, com Q igual a zero. De acordo com Cesari (1996), análises de trocas térmicas em sólidos e vários outros problemas físicos são realizados por meio da Equação 4.1.

Caso λ_a venha a depender das coordenadas espaciais x , y e z , a Equação 4.1 constitui-se numa equação quase harmônica. Considerando que $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$, pode-se apresentar a equação na seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.1, são apresentadas as grandezas correspondentes a λ_a , ϕ e Q em cada tipo de fenômeno questionado.

Tabela 4.1 – Problemas físicos relacionados a equações diferenciais harmônicas

Problema	ϕ	λ	Q
Condução térmica	Temperatura	Condutividade térmica	Geração de Calor
Escoamento de fluidos ideais	Potencial de Velocidade	-	-
Filtração	Pressão	Permeabilidade	Fonte de Fluxo
Membrana	Deslocamento transversal	Tensão no bordo	Carga distribuída
Torção	Função de Airy	Inverso do módulo de cisalhamento	Momento de torção
Difusão de matéria	Concentração	Difusividade da matéria	-
Magnetostática	Potencial Magnético	Relutância Magnética	Densidade de corrente

A segunda Equação, 4.3, abaixo apresentada, é conhecida como uma equação bi-harmônica, sendo o seu uso muito importante na resolução de problemas de engenharia estrutural.

$$\lambda_a \Delta^4 \phi(x, y, z) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.3)$$

E a terceira Equação, 4.4, conhecida como equação de Helmholtz, é utilizada em estudos de fenômenos que envolvem propagação de ondas e vibrações.

$$\lambda_a \Delta^2 \phi(x, y, z) + \gamma(x, y, z) = 0 \quad (4.4)$$

4.2. O PROBLEMA TÉRMICO

Nesta pesquisa trabalhar-se-á com elementos sólidos e a transmissão de calor neste caso se dar por condução. A equação diferencial que permite trabalhar o cálculo da distribuição de temperatura em um corpo já foi apresentada na Equação 4.1, é uma equação de Fourier do tipo harmônica. No caso atual, supõe-se que o meio seja isotrópico e para um problema tridimensional a Equação 4.1 assumirá a forma:

$$\lambda_a \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z) = 0 \quad (4.5)$$

Sendo:

λ_a Condutividade térmica do material em qualquer direção do plano (x, y, z)

ϕ Temperatura

Q Potência térmica gerada por unidade de volume

No caso de um problema bidimensional, a Equação 4.5 se torna:

$$K \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + Q(x, y) = 0 \quad (4.6)$$

Sendo:

K Coeficiente de condutividade térmica nos planos x e y

θ Temperatura

Q Potência térmica gerada por unidade de volume

De acordo com Cesari (1996), nesta última equação existem duas condições de contorno:

- A primeira definida por Dirichlet (Butkov (1983) e Hildebrand (1976)) é do tipo essencial e significa impor que os pontos do contorno γ_0 possuem uma temperatura fixa igual a θ_0 .

$$\theta = \theta_0 \quad \text{Sobre o contorno } S_0 \quad (4.7)$$

- A segunda, conhecida como condição de Cauchy, é do tipo natural

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = q_0 + H(\theta - \theta_\infty) \quad \text{Sobre o contorno } S_1 + S_2 \quad (4.8)$$

Onde K_n é o coeficiente de condutividade térmica na direção n normal externa à superfície no ponto considerado, $\partial\theta/\partial n$ é o gradiente de temperatura sempre na direção normal, q_0 é a quantidade de calor por unidade de superfície e de fluxo que é absorvido ou emanado pelo corpo, H é o coeficiente de troca térmica entre o corpo e o ambiente, cuja temperatura é θ_∞ .

Geralmente, em problemas térmicos, a Equação 4.8 se divide sobre os contornos S_1 e S_2 e passa a apresentar as seguintes condições:

- Condição de Neumann ou Condição de Fluxo é do tipo natural e fornece o valor de fluxo térmico em um ponto do contorno γ_1 .

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = q_0 \quad \text{Sobre o contorno } S_1 \quad (4.9)$$

- Condição Mista é do tipo natural e convectivo, o qual exprime a condição que o fluxo de calor em um ponto do contorno γ_2 seja proporcional à diferença entre a temperatura θ do ponto e θ_∞ do ambiente.

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = H(\theta - \theta_\infty) \quad \text{Sobre o contorno } S_2 \quad (4.10)$$

Caso venha a ocorrer uma transmissão de calor por radiação, é possível de existir também uma condição não-linear do tipo radiativo, dada por Cesari (1996).

$$-K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = \sigma \varepsilon_r f \left[\theta + 273 \right]^4 + \left[\theta_\infty + 273 \right]^4 \quad \text{Sobre o contorno } S_3 \quad (4.11)$$

Sendo:

- σ Constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$
- ε Fator de emissividade $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$
- f Fator geométrico (podendo ser exemplificada pela área da superfície radiante ou irradiada)
- θ Temperatura da superfície radiante
- θ_∞ Temperatura do ambiente

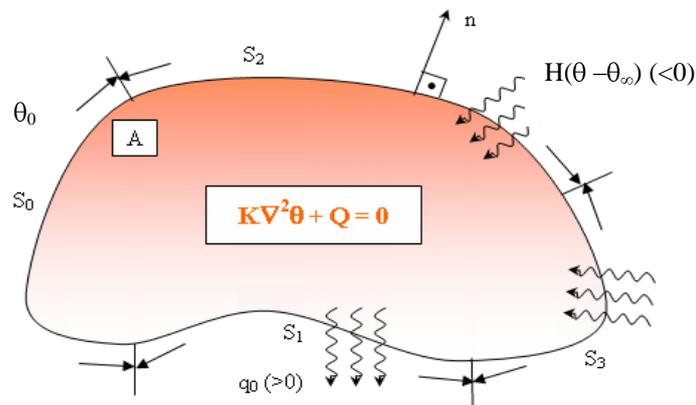


Figura 4.1 – Fluxo térmico.

Na Figura 4.1 apresenta-se o fluxo térmico, θ_0 , q_0 e θ_∞ , onde é válido observar que:

- O fluxo térmico q_0 é positivo quando apresenta o sentido da normal externa à superfície, ou ainda se é normal às isotermas e é orientado no sentido das temperaturas decrescentes.
- θ_0 , q_0 e θ_∞ são nulos quando as condições de contorno são ditas homogêneas.

4.3. TRANSMISSÃO DE CALOR

Chama-se transmissão de calor o processo de transferência de energia, que ocorre exclusivamente em virtude de diferenças de temperaturas. Como nesta pesquisa está-se analisando a carga crítica em vigas de aço, submetidas às diversas variações de temperaturas causadas pelo calor produzido por incêndio, é importante entender como o calor produzido pela combustão se propaga em um ambiente atingindo a estrutura, compreendendo a ocorrência dos fenômenos, em que momento e como a transmissão de calor acontece. Esta ação possui um potencial de dano tão grande ou maior do que o da ação direta das chamas em um incêndio.

A Termodinâmica é a ciência que define a relação entre energia, calor e propriedades físicas mensuráveis como a temperatura, tornando o seu estudo essencial para a compreensão do estudo do fogo. Para esta melhor compreensão a respeito, observam-se as seguintes definições:

- Energia é a expressão mais produtiva do equilíbrio termodinâmico de um sistema, comparecendo sempre como trabalho ou calor. Existem vários tipos de energias e suas aplicações mais comuns envolvem a transformação de um modelo para outro. No caso de uma reação em cadeia, a energia térmica é transformada em energia química (novos produtos de combustão), que proporcionará a transferência de calor de um elemento para outro em um incêndio.
- Calor é a transferência de energia devido à diferença de temperatura e pode ser dita também como a energia térmica em movimento que se transporta de uma região mais quente para uma região mais fria, e ocorre de um elemento para outro ou entre áreas diferentes de um mesmo elemento. A transferência de calor é influenciada

pelo tipo de material combustível que está sendo aquecido, pela capacidade do material combustível de reter calor e pela distância da fonte de calor até o material combustível.

O calor (Q) pode ser calculado pela equação:

$$Q = m c \Delta T \quad (4.12)$$

Sendo:

m Massa

c Calor específico

ΔT Diferença de temperatura entre os elementos ou entre as partes

Pode-se afirmar que os elementos estruturais não possuem calor, mas possuem temperaturas e, numa reação, o calor pode ser liberado (reação exotérmica) ou absorvido (reação endotérmica).

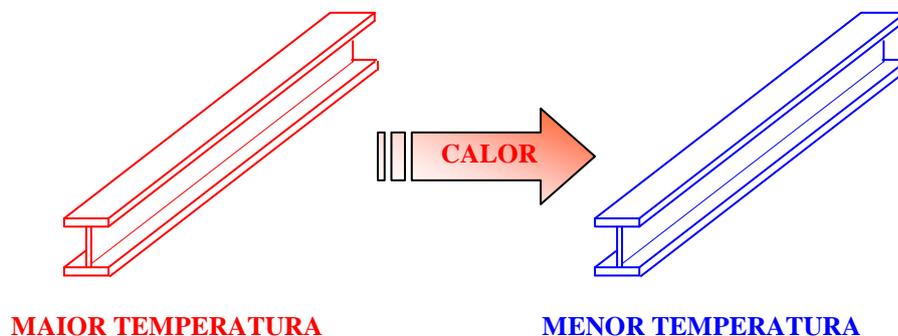


Figura 4.2 – Transferência de calor.

- Temperatura, esta pode-se dizer que seja a medida da energia térmica. Todas as escalas utilizadas para definir temperatura são arbitrárias e foram estabelecidas levando-se em conta a conveniência.

Uma estrutura de aço, quando submetida a um incêndio, é sujeita a uma variação térmica provocada por um fluxo de calor (quantidade de calor fluindo sobre uma unidade de área), devido à diferença de temperatura entre as chamas, os gases e a própria estrutura. Por

intermédio do equilíbrio térmico entre o calor emitido pelo incêndio e o absorvido pelo elemento estrutural, pode-se calcular a variação térmica em cada elemento da estrutura. No caso de dois ou mais elementos em contato entre si, o calor é conduzido por meio deles como se este conjunto fosse um único elemento, sendo necessário respeitar a condutividade do material de cada elemento. A transferência de calor em um elemento acontece simultaneamente em todas as direções e, geralmente, é instável (regime transiente).

Quando um elemento estrutural perde ou ganha calor, em geral, ocorre uma mudança no estado de agitação de suas moléculas.

Ao calor trocado (ganho ou perdido) por um elemento estrutural e que acarreta mudança de temperatura do mesmo, mas sem mudar a forma de ligação de suas moléculas (sólida, líquida ou gasosa), dá-se o nome de calor sensível. Se houver mudança na forma de ligação das moléculas do elemento (mudança de estado), mas sem mudar a temperatura, o calor é definido como sendo calor latente.

Na presente dissertação, será abordada a troca de calor sensível. A esta troca de calor estão associados os seguintes mecanismos de transferência: a condução, a convecção e a radiação. O fluxo de calor entre elementos estruturais se manifesta por duas formas de transferência de calor: convecção e radiação.

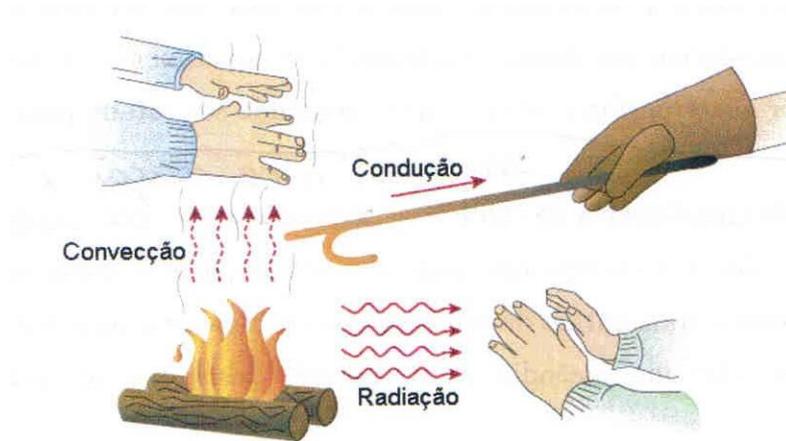
$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (4.13)$$

Sendo:

φ Valor do fluxo de calor por unidade de área na estrutura

φ_c Componente do fluxo de calor convectivo

φ_r Componente do fluxo de calor radiante



Fonte: <http://www.physics.brocku.ca/courses/1p93/Heat/>

Figura 4.3 – Formas de transferência de calor

4.3.1. – Condução

É a transmissão de calor por meio do contato direto entre as moléculas do material, em corpos sólidos. Neste processo o calor passa de molécula a molécula, mas nenhuma delas é transportada com o calor. Uma viga de aço aquecida em uma de suas extremidades sofrerá condução. O sentido do fluxo de calor será sempre transportado da área com maior temperatura para a área com menor temperatura. A quantidade de calor se movendo na viga de aço será diretamente proporcional ao tempo de exposição ao calor, à sua seção transversal e à diferença de temperatura entre as extremidades é inversamente proporcional ao seu comprimento. A condução de calor num corpo haverá somente quando suas partes tiverem temperaturas diferentes.

Nos gases, a condução de calor é menor que nos corpos sólidos, devido à concentração das moléculas constituintes do material. Nos materiais sólidos, as moléculas se apresentam mais próximas, enquanto que, em meios gasosos, as mesmas estão mais distantes umas das outras.

A capacidade de condução calorífica da maioria dos materiais aumenta suavemente com o acréscimo da temperatura (Sears e Zemansky, 1976). E nas estruturas de aço expostas à ação do fogo, acontece exatamente o contrário.

A condutividade térmica (λ_a) é definida por meio da seguinte equação:

$$\Delta Q / \Delta t = -\lambda_a A_{fc} (\Delta T / \Delta x) \quad (4.14)$$

Sendo:

$\Delta Q/\Delta t$ Taxa com que o calor flui por intermédio de uma área (W)

λ_a Condutividade térmica (W/m°C)

A_{fc} Área pela qual há o fluxo de calor (m²)

$\Delta T/\Delta x$ Mudança de temperatura por unidade de comprimento (°C/m)

Os materiais com baixa condutividade de temperatura são usualmente empregados como isolantes térmicos. O isolamento é descrito em termos de resistência térmica (R_t), conforme a equação abaixo:

$$R_t = 1 / \lambda_a \quad (4.15)$$

4.3.2. – Convecção

É a transferência de calor nos fluidos, pelo movimento de massa de um meio líquido ou gasoso, causada pela diferença de densidade entre moléculas quentes e frias, fazendo com que as partículas aquecidas subam e as com menor temperatura desçam. Quando o fluido é aquecido, sua agitação molecular aumenta, fazendo com que aumente o número de colisões entre as moléculas. Com isso, as moléculas mais externas são empurradas para fora e alcançam o espaço ao redor, expandindo-se. Neste processo de expansão, o fluido se torna menos denso e, portanto, mais leve que o ar. Este procedimento faz com que ele suba, atingindo as áreas mais altas. O fluxo de calor convectivo será maior em ambientes confinados, devido ao empuxo (ou força atuante para cima em qualquer corpo que esteja total ou parcialmente imerso em um fluido) e à delimitação de espaço feita por teto e paredes, que faz com que a fumaça se acumule. A convecção é o tipo de transferência de calor que envolve dois mecanismos: a advecção (transmissão de energia devido ao movimento global), a difusão (transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório) e três processos distintos: a condução de calor, a diferença de densidade e a mudança de fase (estado físico). Para que aconteça troca de calor de uma superfície a determinada temperatura e um fluido a outra temperatura, é preciso observar alguns fatores, tais como: o tipo de superfície (plana ou curva, horizontal ou vertical), o tipo de

fluido em contato com a superfície (gasoso ou líquido), a densidade, a viscosidade, o calor específico e a condutividade térmica do fluido; e ainda se a velocidade do fluido é suficientemente pequena para que o escoamento seja lamelar, ou grande para que entre em regime turbulento, e se ocorre evaporação, condensação ou formação de películas.

O método adotado em cálculos práticos consiste primeiro em se definir um coeficiente de convecção, podendo ser obtido por meio da seguinte equação:

$$\alpha_c = \frac{H_c}{A \Delta t} \quad (4.16)$$

Sendo:

α_c Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

H_c Corrente térmica de convecção (W)

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

Δ_t Diferença de temperaturas entre a superfície e a massa do fluido ($^\circ C$).

A determinação de valores numéricos de α_c é feita, parcialmente, por análise dimensional e, parcialmente, por uma série elaborada de experiências (Sears e Zemansky, 1976).

No uso de modelos simplificados, o coeficiente de transferência de calor por convecção poderá ser assumido como $\alpha_c = 25 \text{ W} / m^2 \text{ } ^\circ C$.

A taxa de transferência de calor por convecção é governada pela Lei de Resfriamento de Newton (Incropera e DeWitt, 1998). Tal taxa, quando aplicada a problemas de elementos estruturais em aço submetido a incêndio, pode se chamada, conforme a norma NBR 14323:1999, de fluxo de calor convectivo que é descrito pela seguinte equação:

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (4.17)$$

Sendo:

φ_c Fluxo de calor convectivo por unidade de área

α_c Coeficiente de transferência de calor por convecção

- θ_g Temperatura dos gases em °C
 θ_a Temperatura na superfície do aço em °C

4.3.3. Radiação Térmica

É a transferência de calor para um elemento onde o transporte ocorre por meio de ondas eletromagnéticas propagadas com a velocidade da luz, que se deslocam em todas as direções. As ondas podem ser refletidas ou absorvidas por uma superfície, sendo esta a única forma de transferência de calor que não depende de meio material para se propagar e pode aquecer até mesmo os objetos mais distantes em um ambiente.

Todos os elementos que se encontram a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação, normalmente em pequena quantidade. Numa situação de incêndio, o ambiente emite radiação térmica que será absorvida por intermédio da superfície do elemento estrutural sujeito a ação térmica. Neste caso, a troca global de calor entre o ambiente e o elemento é conhecida como fluxo de calor por radiação e descrito pela equação:

$$\varphi_r = \sigma \varepsilon_{res} \left[\theta_g + 273 \right]^4 - \left[\theta_a + 273 \right]^4 \quad (4.18)$$

Sendo:

- φ_r Fluxo de calor radiante
 σ Fluxo de calor por radiação
 σ Constante de Stefan-Boltzmann, de valor igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}^4$
 ε_{res} Emissividade
 θ_g Temperatura dos gases em °C
 θ_a Temperatura na superfície do aço em °C

A emissividade, característica de cada tipo de material, varia no intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (no caso em estudo considera-se o fogo, gases quentes e a superfície do aço), e no caso em que se utiliza o modelo simplificado de análise, poderá considerar o valor de $\varepsilon_{res} = 0,5$. Em virtude da baixa ordem de grandeza da constante, apenas em temperaturas elevadas um

objeto pode irradiar uma quantidade significativa de calor. Em geral, é maior para superfícies áspera e menor para as polidas.

Em um incêndio, o calor será irradiado em todas as direções e o elemento que estiver em seu caminho irá absorver o calor fornecido pelas ondas e terá sua temperatura elevada, o que poderá causar a pirólise ou até mesmo fazer com que este elemento atinja seu ponto de ignição.

Para que se manifestem os efeitos da radiação térmica, é necessário que: (a) a fonte de calor esteja com temperatura elevada o suficiente para produzir um fluxo de calor significativo; (b) os elementos ainda não atingidos sejam capazes de absorver calor e os elementos retenham o calor sem dissipá-lo (nas mesmas proporções) para o ambiente. A intensidade de propagação do calor por radiação irá aumentar ou diminuir à medida que os elementos estejam mais próximos ou mais distantes da fonte, respectivamente.

Para calcular o equilíbrio térmico entre os fluxos de calor emitido e absorvido resta, então, calcular o fluxo absorvido pelo elemento estrutural. Este fluxo pode ser determinado a partir da fórmula da variação da quantidade de calor:

$$\Delta Q_{\text{abs}} = m_a c_a \Delta \theta_a \quad (4.19)$$

Sendo:

- ΔQ_{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.

Para determinação do fluxo de calor por radiação, tem-se que conhecer o fator de massividade da peça em estudo. Tal fator é representado pela área exposta ao fogo dividida pelo volume aquecido ($F = A_a / V_a$).

Na norma NBR 14323:1999 são apresentadas algumas seções de perfis estruturais empregados na construção civil, conforme Figura 4.4.

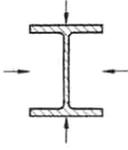
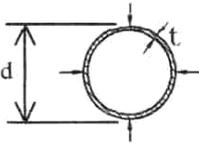
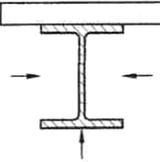
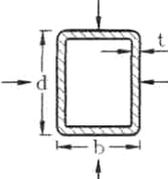
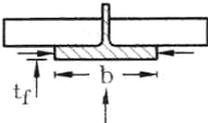
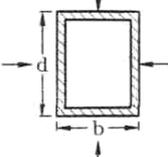
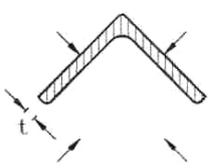
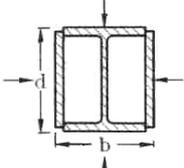
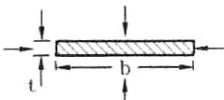
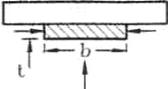
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<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 de exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{2+\sqrt{2}}{2t}$ 	<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 4.4 – Fator de massividade do aço não protegido

Nesta pesquisa o fator de massividade dos perfis I de aço escolhidos para análise é calculado baseado na Figura 4.4 acima apresentada.

Tabela 4.2 – Fator de massividade

Características do perfil	Simb	Unid	CVS	CVS	CVS	VS
			300x113	500x250	600x292	700x166
Altura	h	mm	300,00	500,00	600,00	700,00
Largura da mesa	bf	mm	250,00	350,00	400,00	320,00
Espessura da alma	tw	mm	12,50	22,40	22,40	8,00
Espessura da mesa	tf	mm	22,40	31,50	31,50	25,00
Massa	m	kg/m	113,00	249,90	292,20	166,40
Momento de Inércia	J	cm ⁴	204,00	893,00	1035,00	344,00
Perímetro exposto ao incêndio	u	m	1,33	2,01	2,36	2,34
Área da seção transversal	Aa	cm ²	0,01	0,03	0,04	0,02
FATOR DE MASSIVIDADE	F	m⁻¹	92	63	63	110

Para finalidade de projeto, é recomendado na norma NBR 14323:1999 que o fator de massividade não seja inferior a $10 m^{-1}$.

4.4. DESENVOLVIMENTO DA TEMPERATURA NOS PERFIS ESTRUTURAIS DE AÇO

A determinação da temperatura em perfis de aço numa situação de incêndio é possível por meio de ensaios experimentais ou por intermédio da utilização de modelos teóricos de análise. Os modelos são definidos por meio de formulações físicas e matemáticas para o problema de transferência de calor. Considerando-se o equilíbrio térmico entre o calor proveniente do incêndio e o calor absorvido pelo perfil de aço, torna-se possível determinar o acréscimo de temperatura.

Modelos simplificados de análise de temperatura nos perfis de aço são descritos na norma NBR 14323:1999.

Na determinação do fluxo calorífico, são levadas em conta as componentes de transmissão por convecção e radiação, definido pela equação:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (4.20)$$

A seguir, serão apresentadas equações propostas pela norma NBR 14323:1999 que analisam a temperatura durante o incêndio em perfis de aço sem proteção.

A massa específica do material sob ação de alta temperatura será considerada idêntica à temperatura ambiente ($\rho_a = 7850 \text{ Kg} / \text{m}^3$).

Conhecido o conceito do fator de massividade, do fluxo calorífico e considerando ainda que o calor específico do aço seja em função da temperatura, utiliza-se conforme recomendado pela NBR 14323:1999, o modelo simplificado para obtenção da curva temperatura x tempo em um perfil de aço numa situação de incêndio descrito pela equação:

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

Que de forma expandida, a Equação 4.21 se torna:

$$\theta_a(t + \Delta t) = \theta_a(t) + \frac{F}{c_a \rho_a(\theta)} \left[\alpha_c \left(\theta_g(t) - \theta_a(t) \right) + 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_r \left(\theta_g(t) + 273 \right)^4 - \left(\theta_a(t) + 273 \right)^4 \right] \Delta t \quad (4.22)$$

Sendo:

- $\Delta Q_{a,t}$ Variação da temperatura no aço em função do tempo ($^{\circ}\text{C}$)
- F Fator de massividade da seção transversal (m^{-1})
- c_a Calor específico do aço ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
- ρ_a Massa específica do aço (Kg/m^3)
- φ Valor do fluxo de calor (W/m^2)
- Δt Intervalo de tempo ($\Delta t \leq 5\text{s}$)

Considerando o que foi apresentado, utilizando-se a Equação 4.21 e os dados dos perfis em estudo, é possível obter o desenvolvimento da temperatura nos perfis de aço sem proteção e comparar a curva de incêndio-padrão.

Na Figura 4.5, é apresentado o gráfico em que se compara o desenvolvimento da temperatura do aço entre os perfis selecionados para análise nesta pesquisa e o incêndio-padrão:

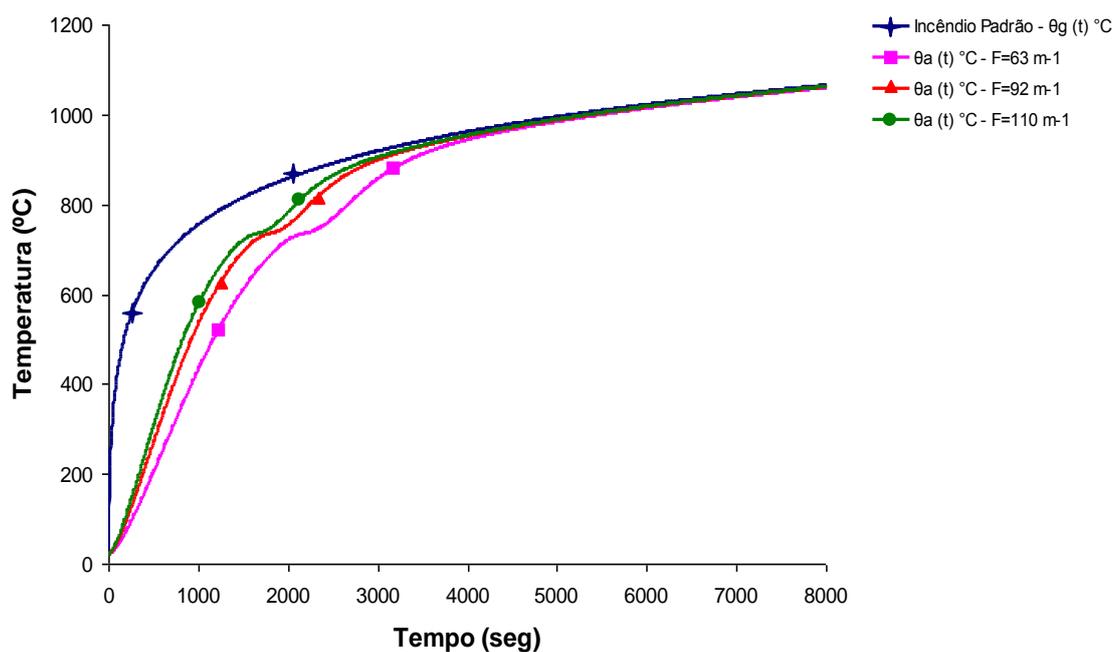


Figura 4.5 – Desenvolvimento da temperatura em função do fator de massividade

Analisando o gráfico acima, percebe-se que quando a temperatura nos perfis alcança a 740°C, a curva temperatura-tempo do aço apresenta um patamar em sua trajetória, gerado em função do calor específico. Isto se explica devido à mudança de fase de equilíbrio entre as ligas metálicas que constituem os aços estruturais.

Observa-se também que, em função do fator de massividade, as seções transversais de perfis de aço com maior fator de massividade aquecem mais rapidamente do que as outras com menor fator.

Para melhor apresentar e analisar a influência do fator de massividade em cada caso de incêndio estudado nesta dissertação, utilizam-se gráficos gerados a partir da formulação

apresentada pela Equação 4.21, que permite calcular a temperatura no elemento estrutural e as curvas temperatura x tempo para incêndio natural, traçando comparações relativas à temperatura do aço e à temperatura do incêndio, utilizando diferentes valores de carga de incêndio, grau de ventilação e fator de massividade, os quais foram definidos nesta pesquisa por:

- Cargas de incêndio: 300, 600 e 700 MJ/m²,
- Graus de ventilação: 0,04, 0,08 e 0,12m^{1/2} e
- Fatores de massividade referentes aos perfis metálicos de seção I:
 - CVS 300x113 (F=92m⁻¹),
 - CVS 500x250 (F=63m⁻¹),
 - CVS 600x292 (F=63m⁻¹) e
 - VS 700x166 (F=110m⁻¹).

Consideram-se também para o cálculo das temperaturas os seguintes itens:

- Imersão total do perfil ao fogo, com exceção da face superior da mesa superior;
- O valor de “b” constante para todos os casos, e igual a 1160 J/m²s^{1/2}°C;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 25W/m²°C;
- A emissividade resultante igual a 0,5;
- O intervalo para cada passo de tempo foi considerado de 5 segundos.

Devido ao calor específico, foram gerados dois tipos de gráficos: o primeiro assume valor igual a 600J/ Kg°C e o segundo valores variáveis de acordo com a temperatura do aço, seguindo as formulações apresentadas nesta pesquisa no capítulo 3. Todos os valores acima relatados e assumidos seguem recomendações e são constantes na NBR 14323:1999.

Após a conclusão dos cálculos utilizando a Equação 4.21, geram-se os gráficos de incêndio natural apresentados nas figuras a seguir, retratando a influência do fator de massividade na temperatura final do aço estrutural.

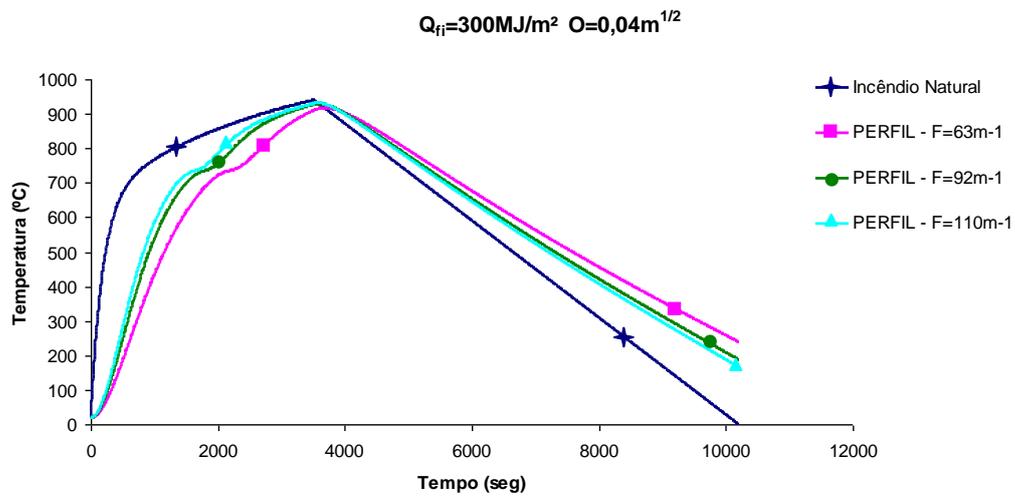
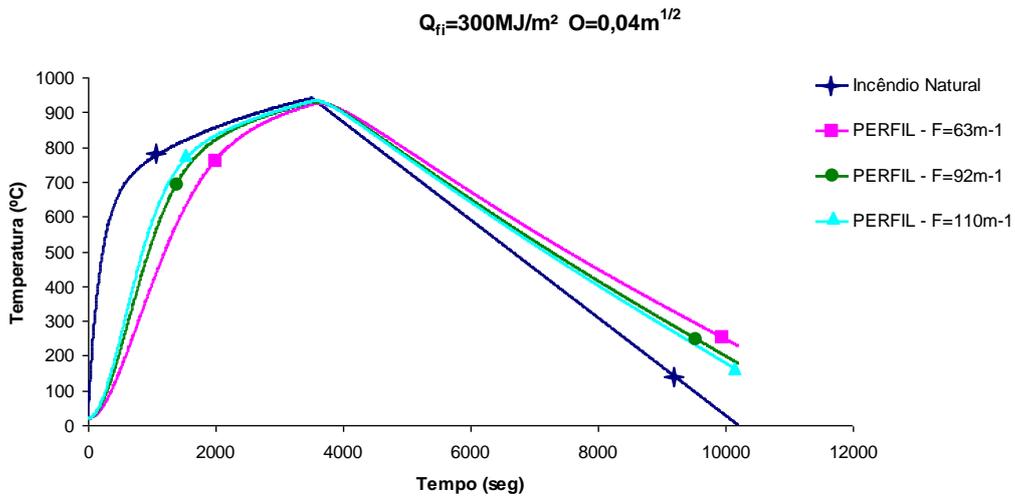


Figura 4.6 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2}$)

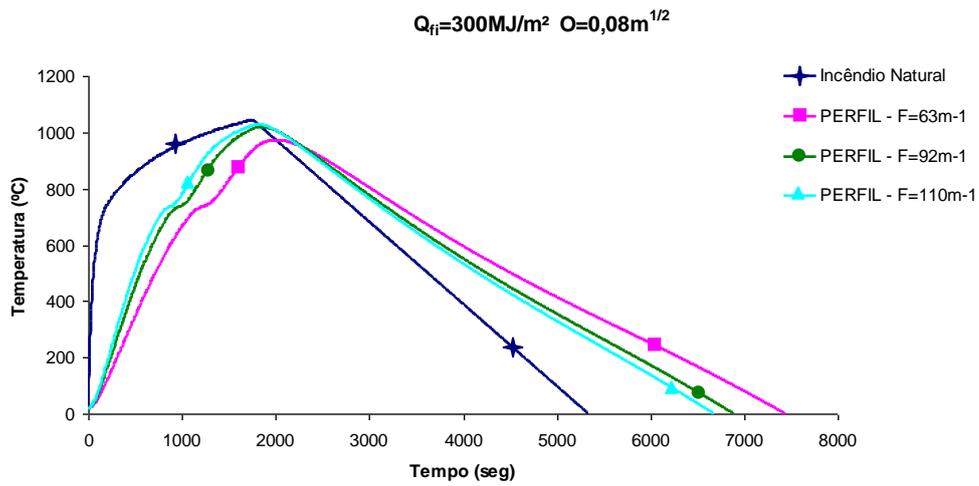
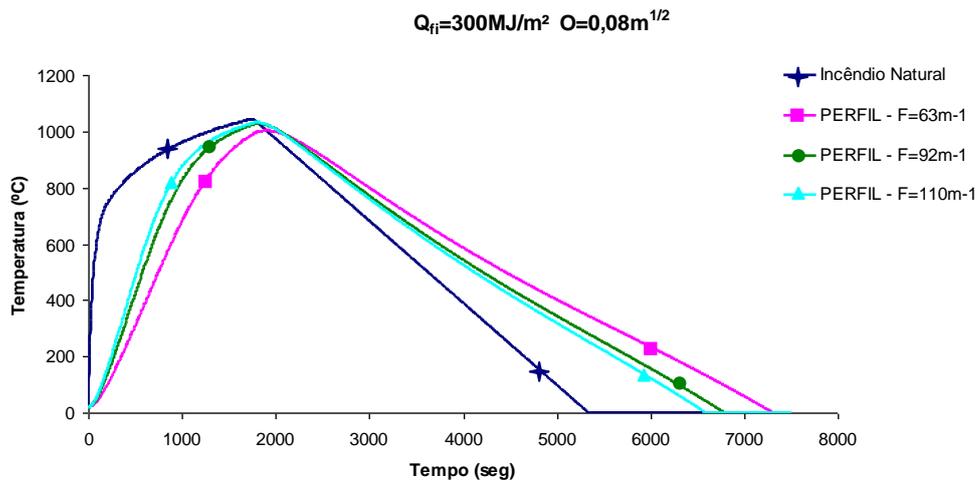


Figura 4.7 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço
 $(Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,08\text{m}^{1/2})$

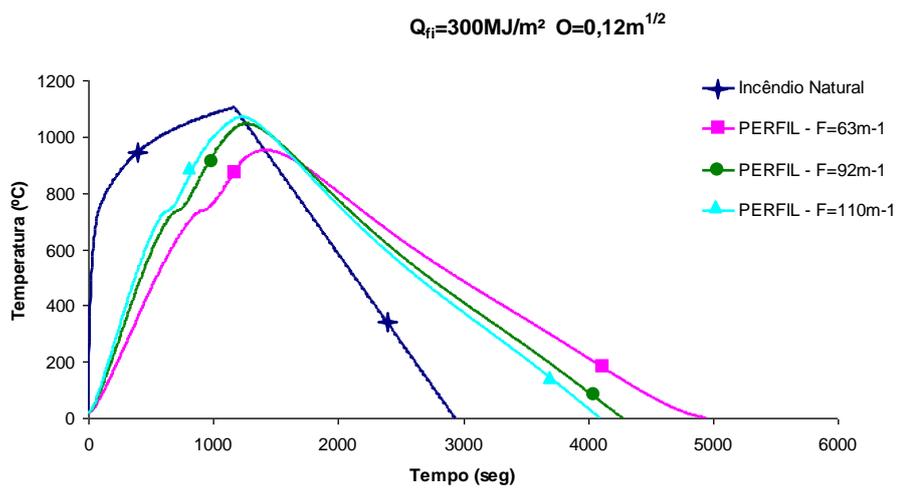
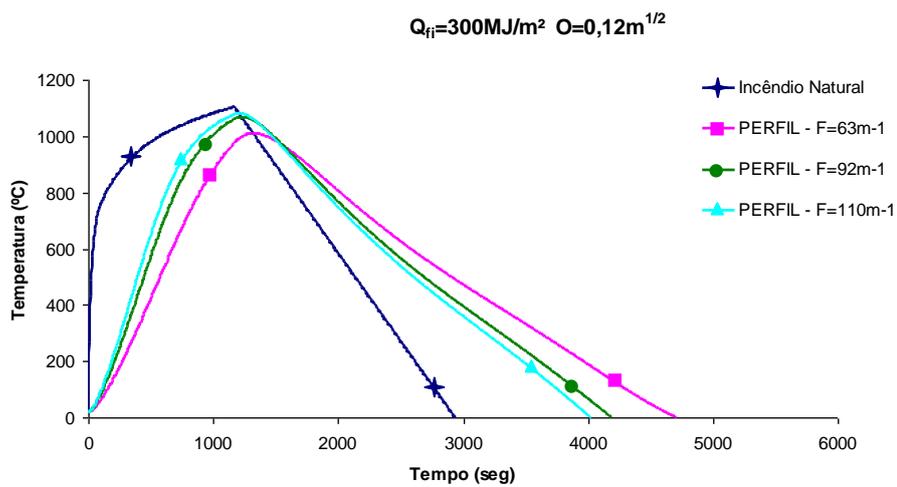


Figura 4.8 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$)

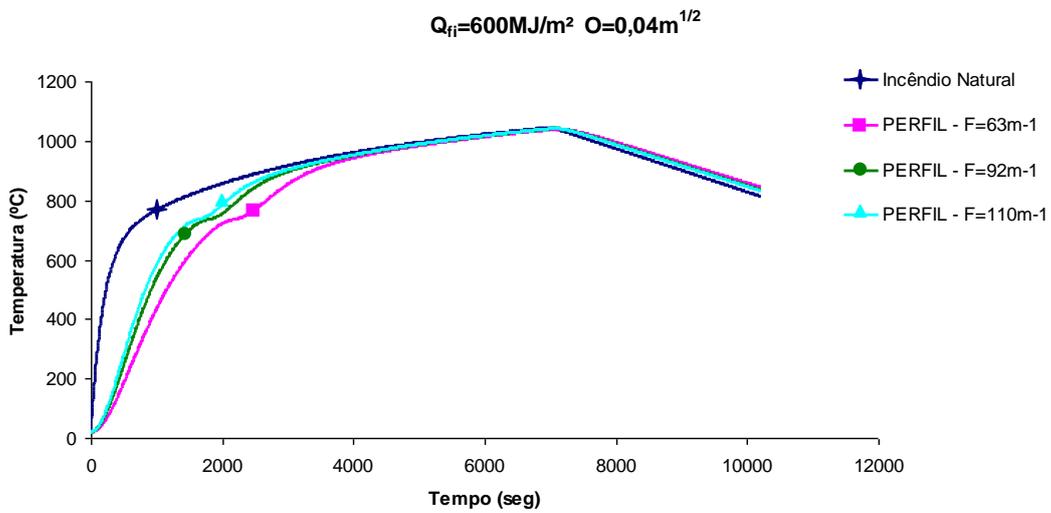
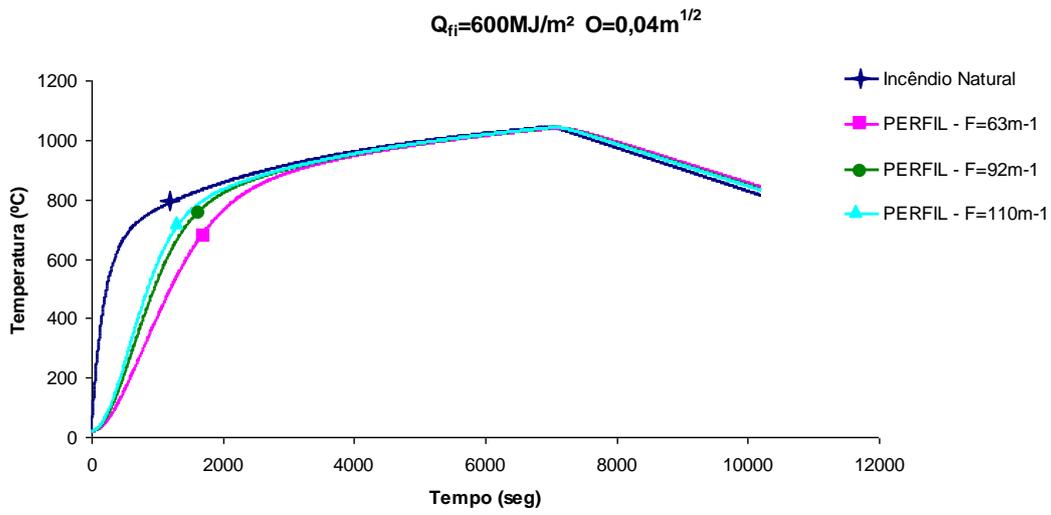


Figura 4.9 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço
 $(Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2})$

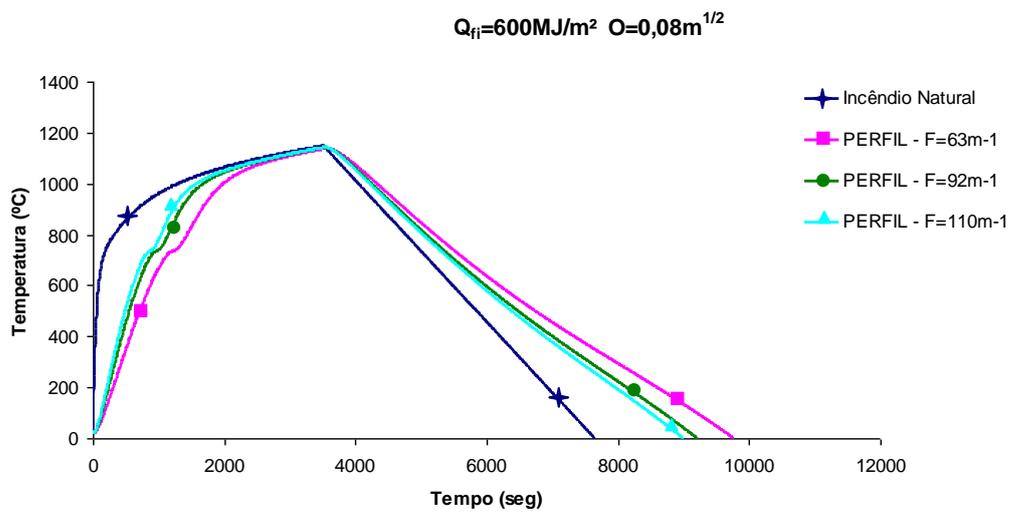
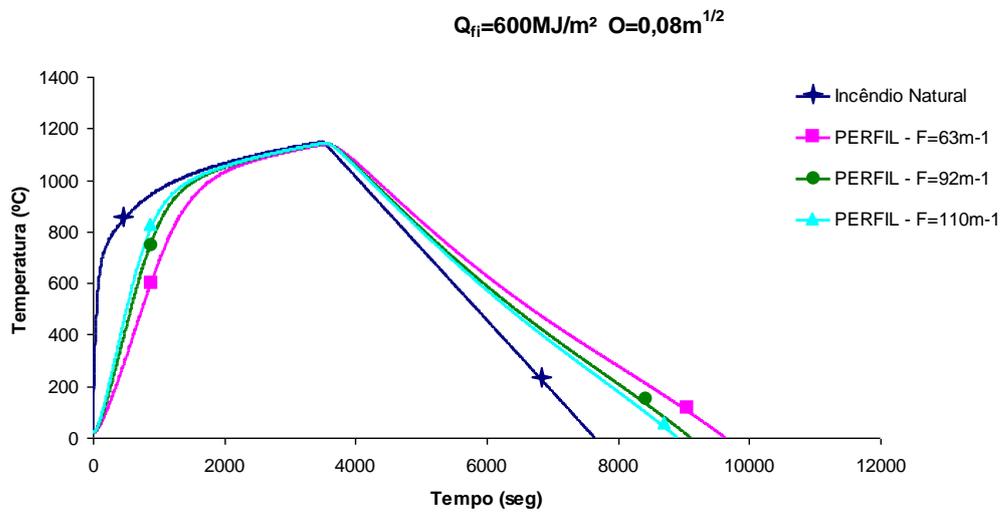


Figura 4.10 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço
 $(Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,08\text{m}^{1/2})$

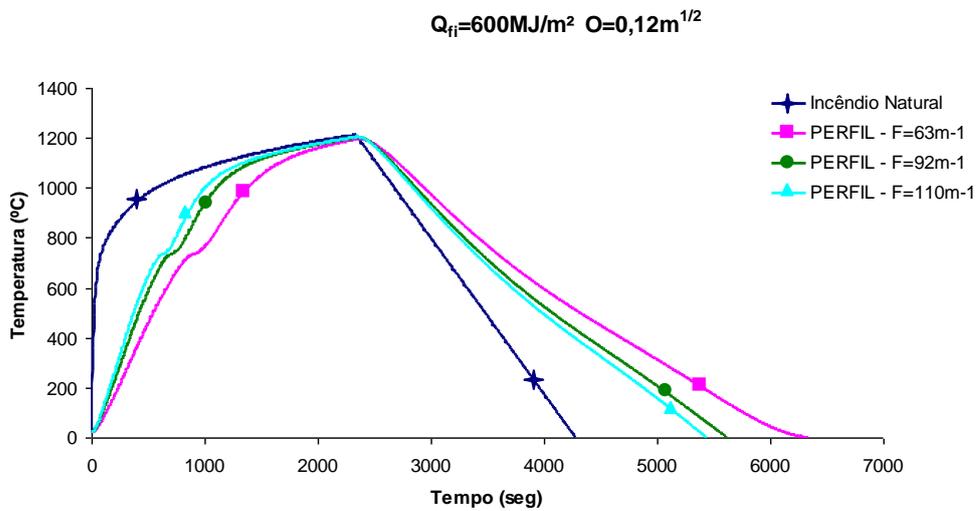
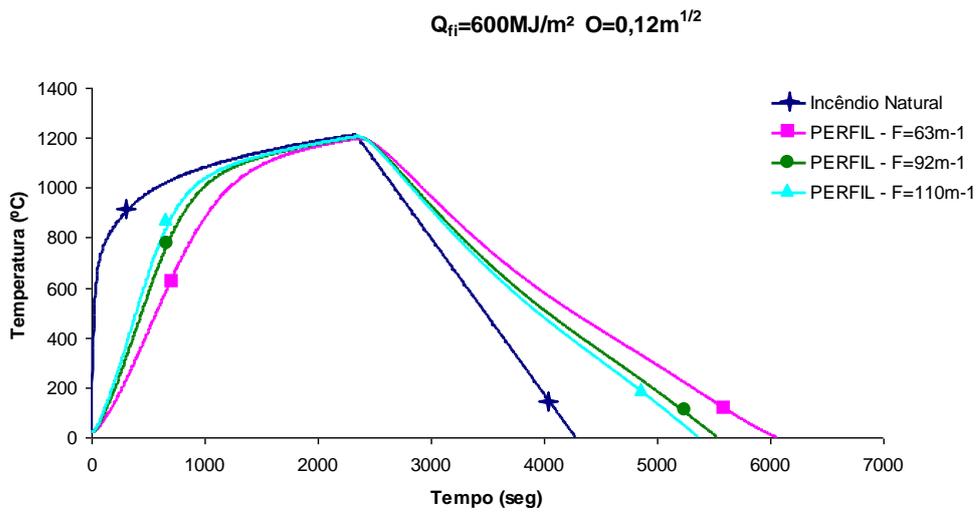


Figura 4.11 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço
($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$)

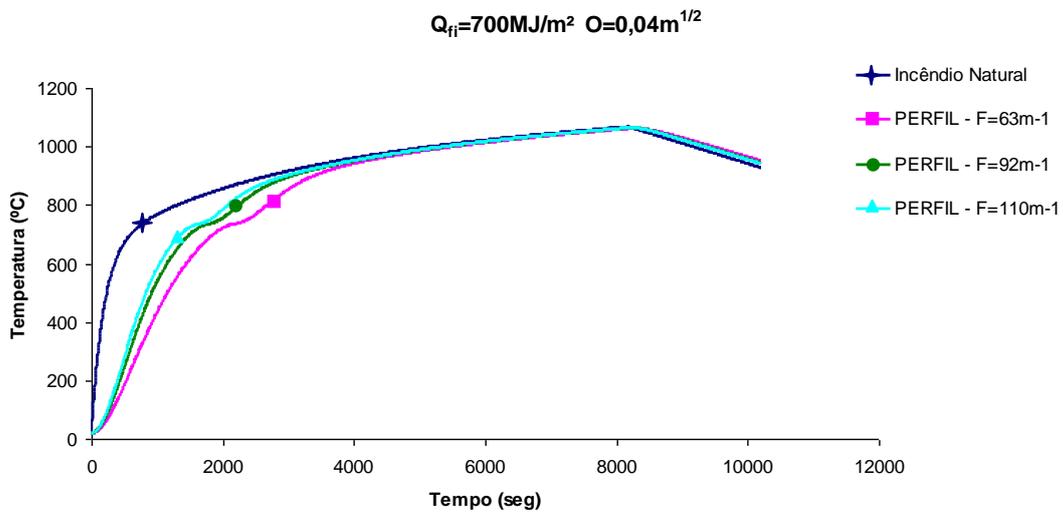
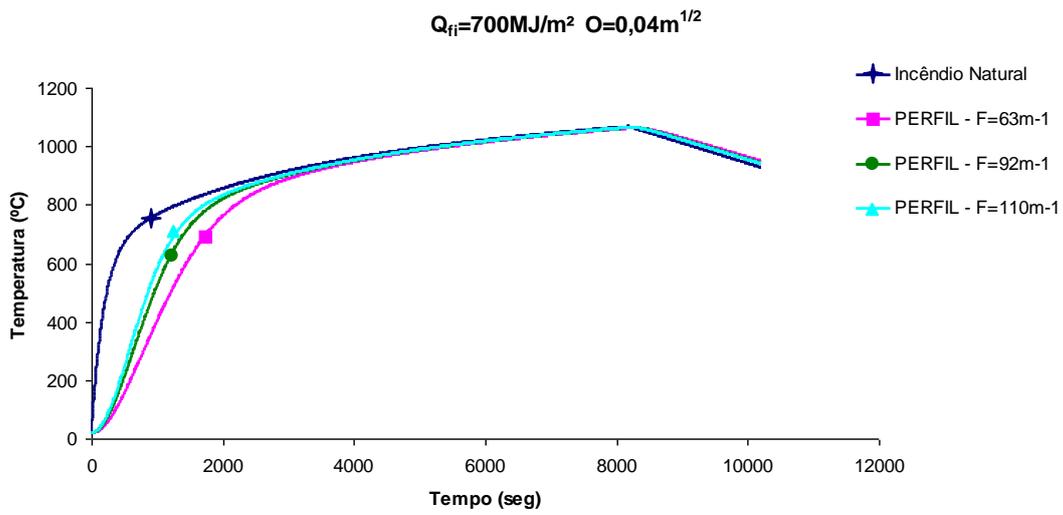


Figura 4.12 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço
 $(Q=700\text{MJ/m}^2$ e $O=0,04\text{m}^{1/2})$

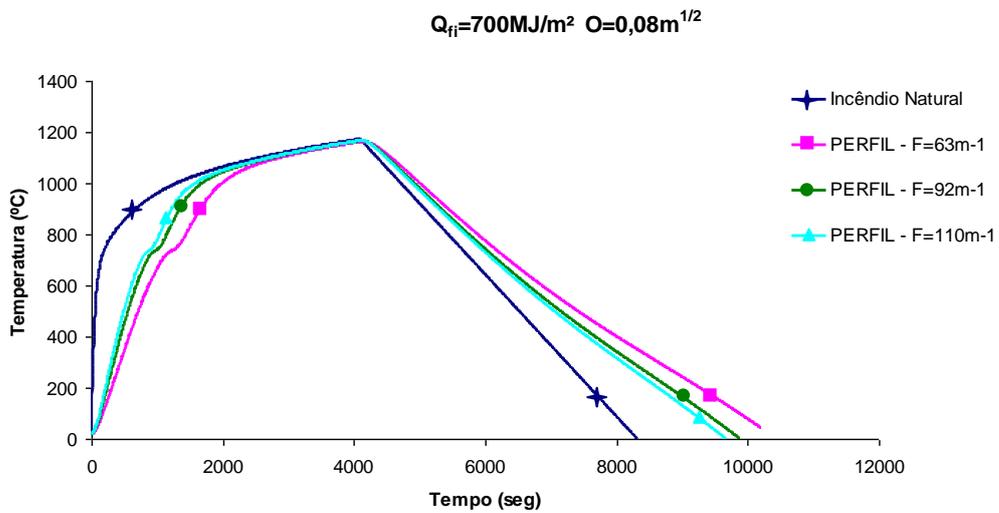
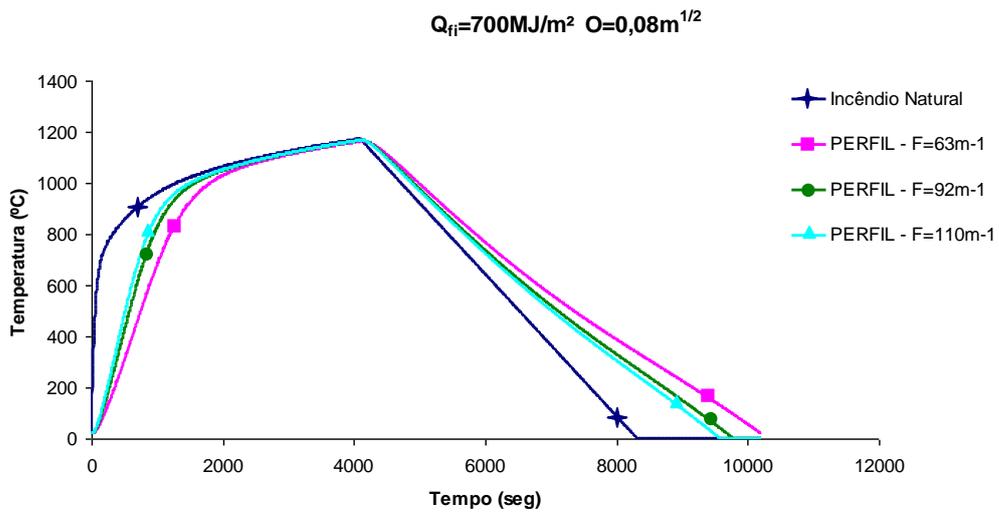


Figura 4.13 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=700MJ/m^2$ e $O=0,08m^{1/2}$)

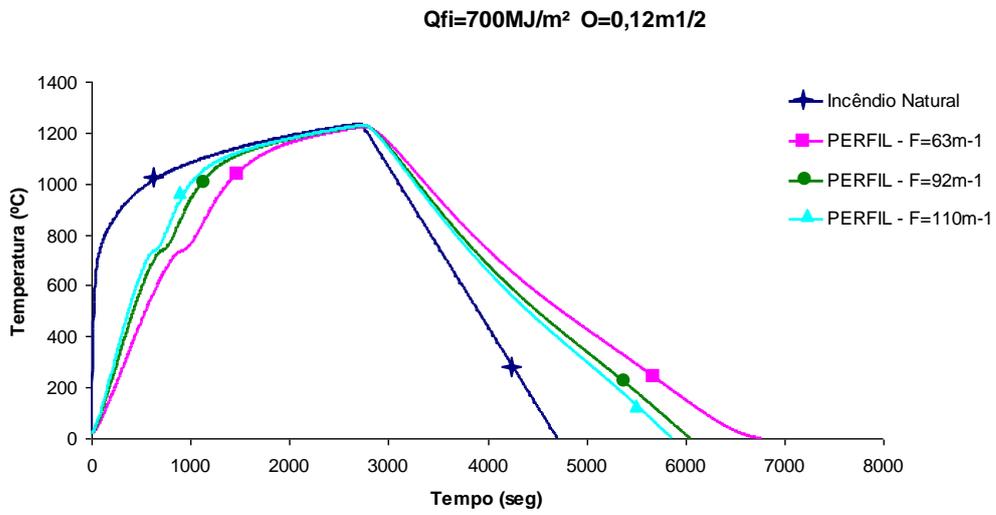
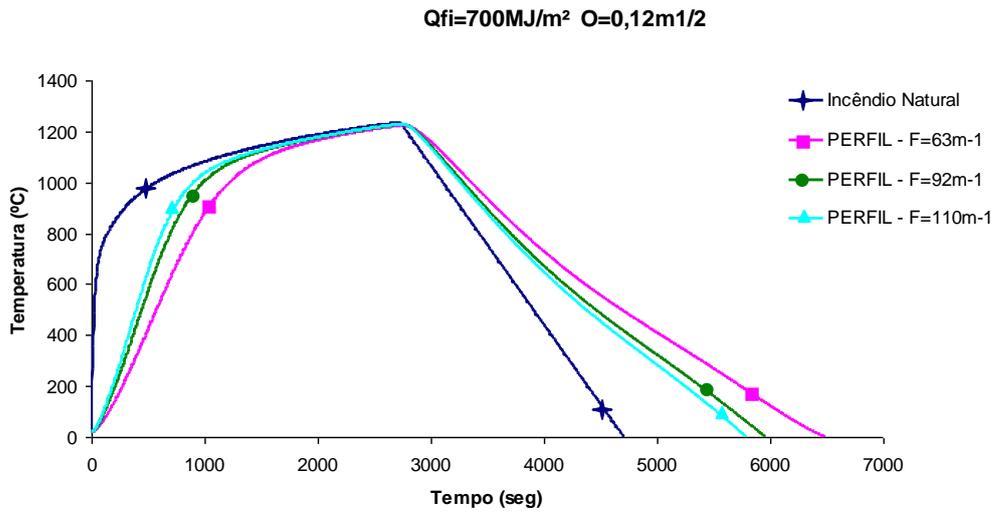


Figura 4.14 – Influência do fator de massividade na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $O=0,12\text{m}^{1/2}$)

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 4.6 a 4.14, analisam-se comparativamente os casos de incêndio natural e se observa que:

- Quanto maior o valor do fator de massividade do perfil de aço utilizado, maior será a temperatura alcançada pelo elemento estrutural em um incêndio;
- As temperaturas alcançadas pelos perfis de aço de maior valor do fator de massividade decrescem mais rapidamente na fase de resfriamento do incêndio;
- Quanto maior apresentar o valor do fator de massividade, o aquecimento do perfil de aço acontecerá em menor período de tempo;
- Quando a carga de incêndio considerada for relativamente grande quando comparada ao respectivo grau de ventilação, mais longo será o período de tempo do incêndio e mais lentamente acontecerá a fase de resfriamento;
- Quando o grau de ventilação considerado for relativamente grande para a carga de incêndio considerada, o incêndio acontecerá em curto período de tempo.

Nos próximos gráficos serão apresentadas curvas que indicam o comportamento da temperatura de um mesmo elemento estrutural de aço quando submetido a incêndios naturais com diferentes graus de ventilação e carga de incêndio específica.

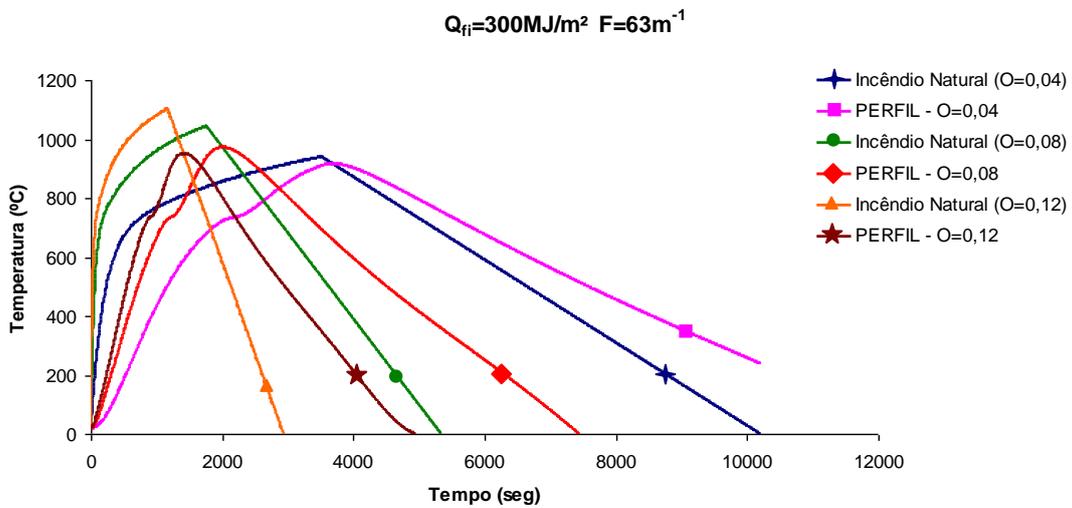
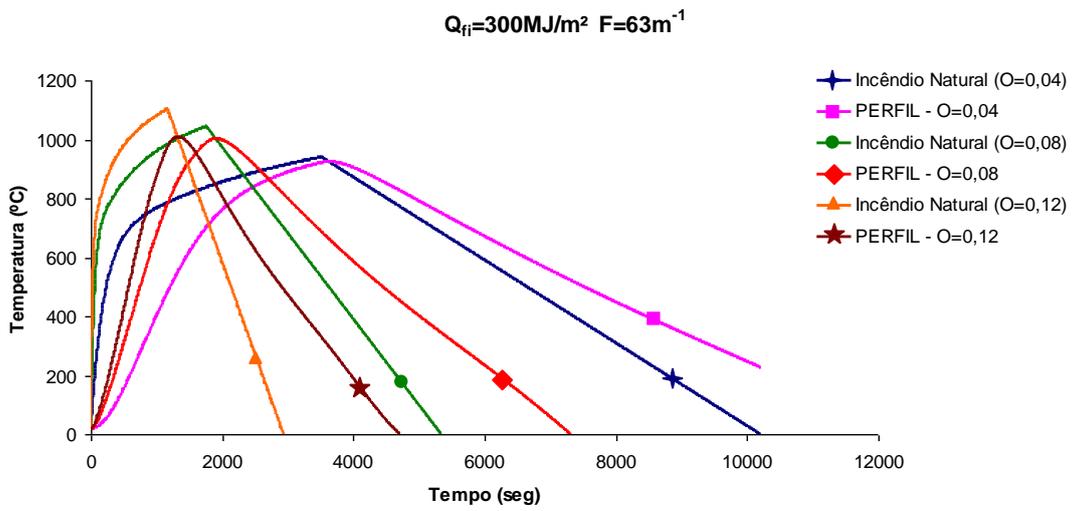


Figura 4.15 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)

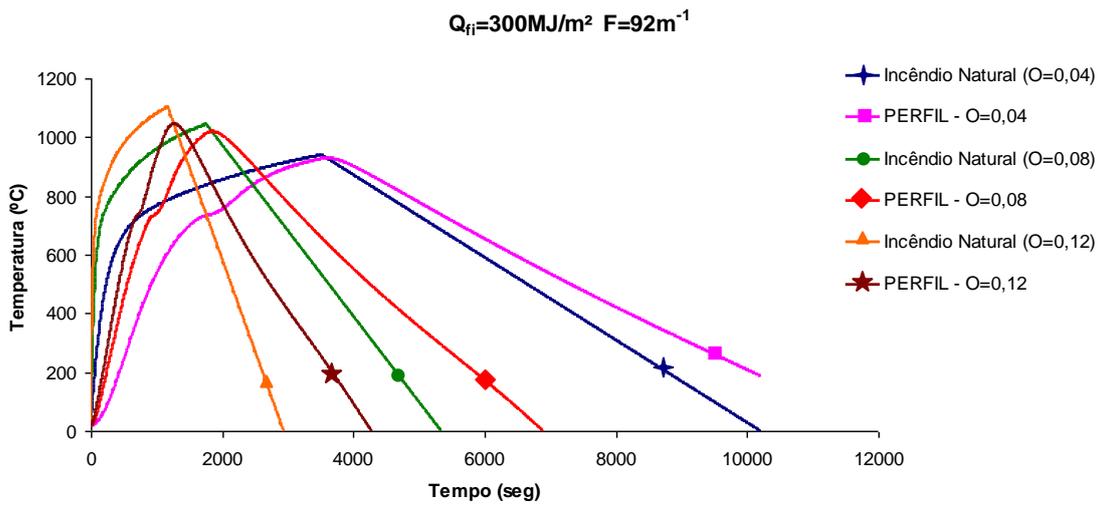
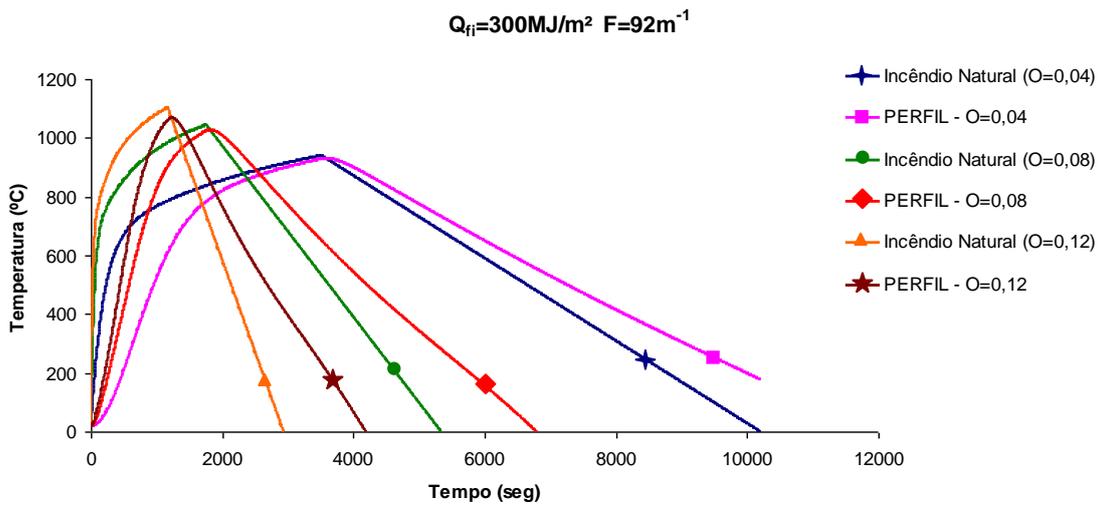


Figura 4.16 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)

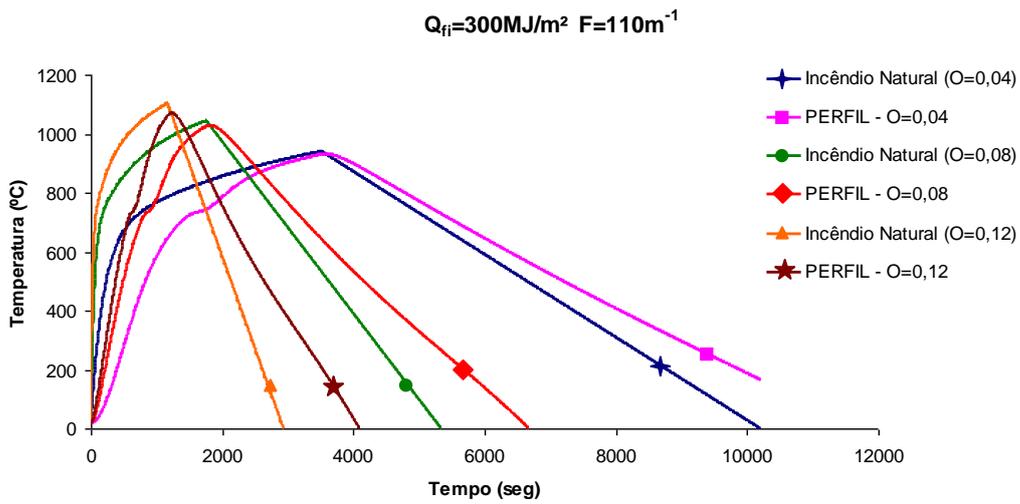
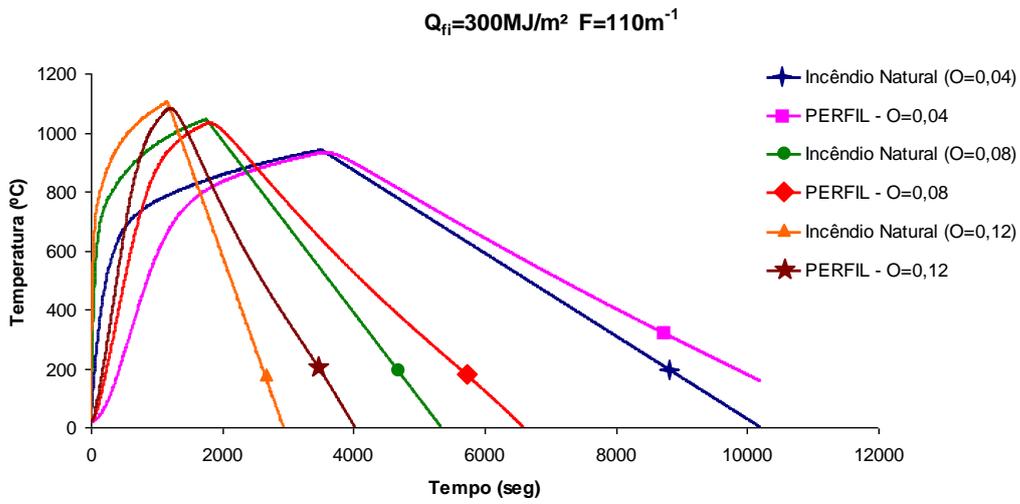


Figura 4.17 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=300\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)

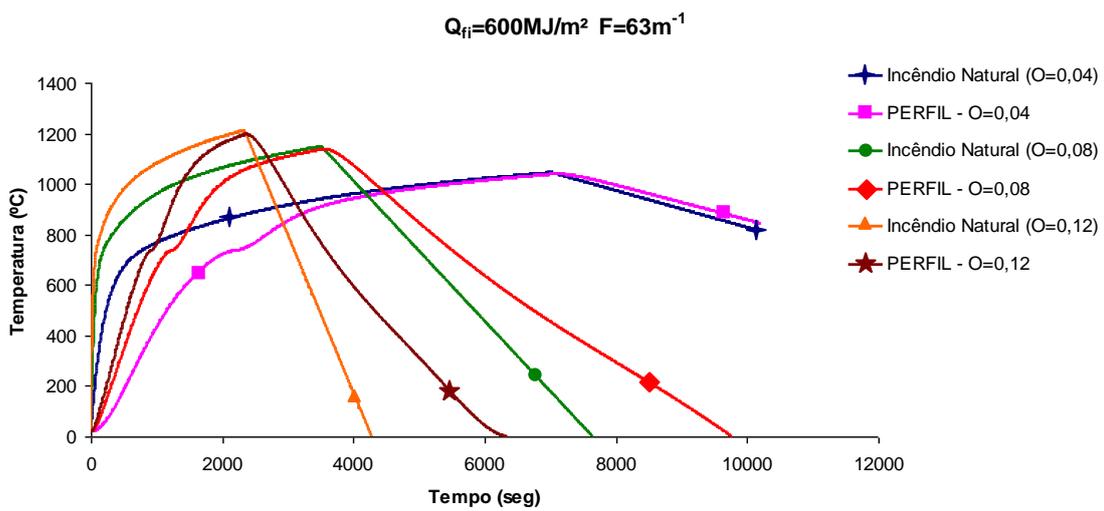
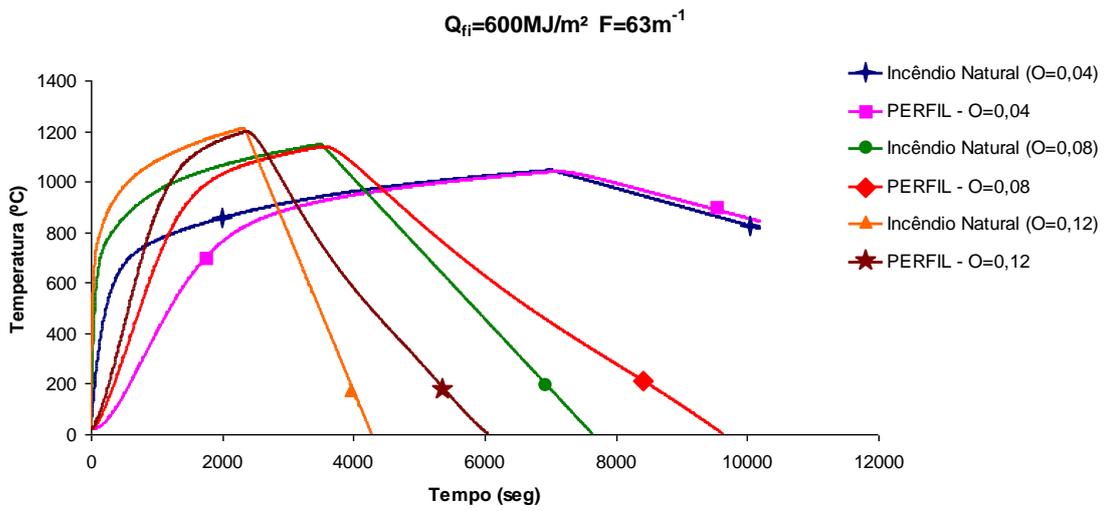


Figura 4.18 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)

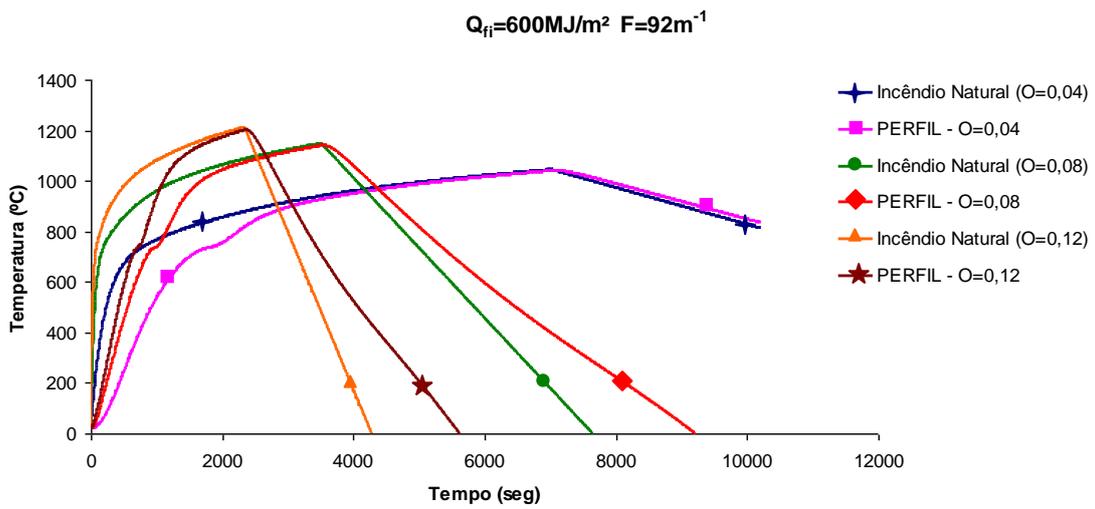
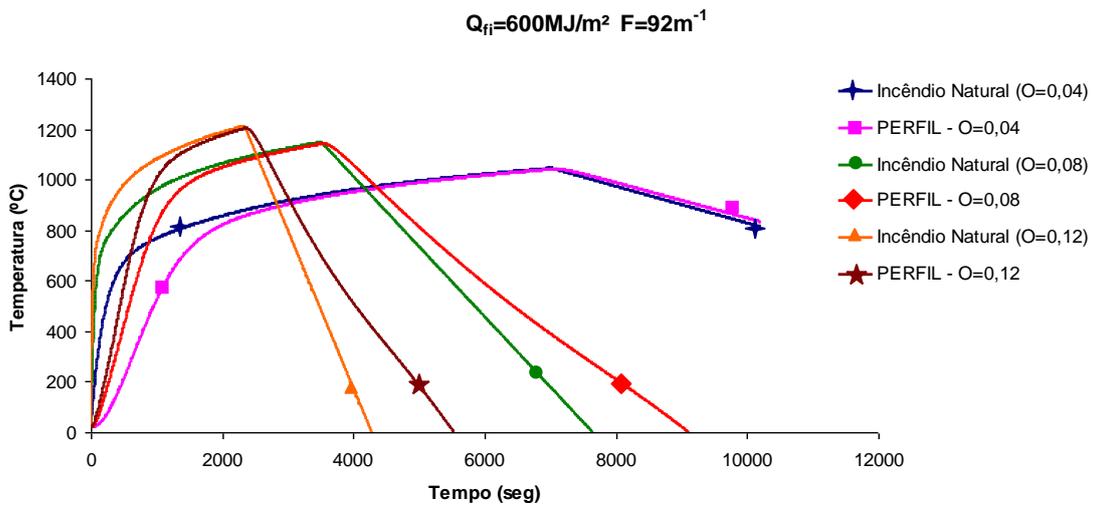


Figura 4.19 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)

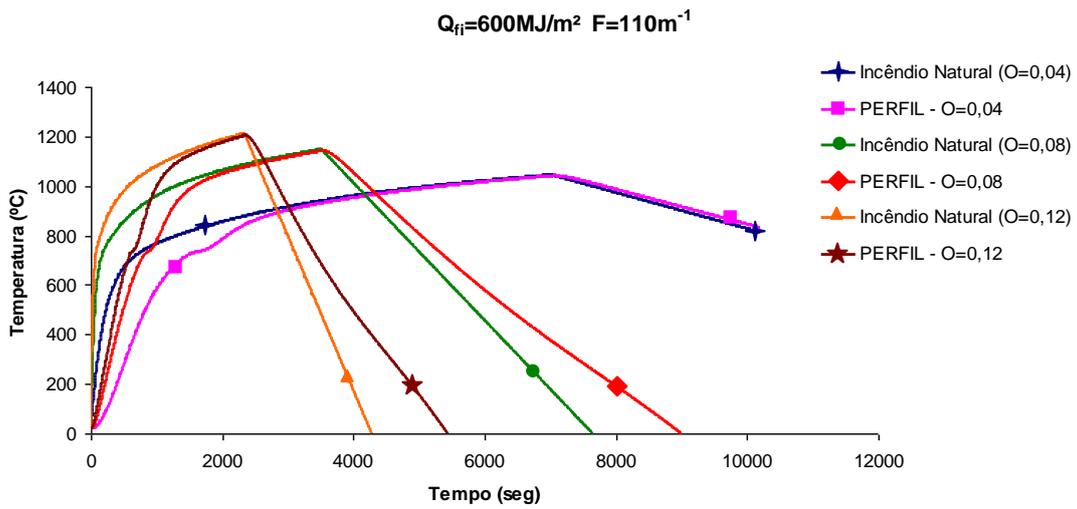
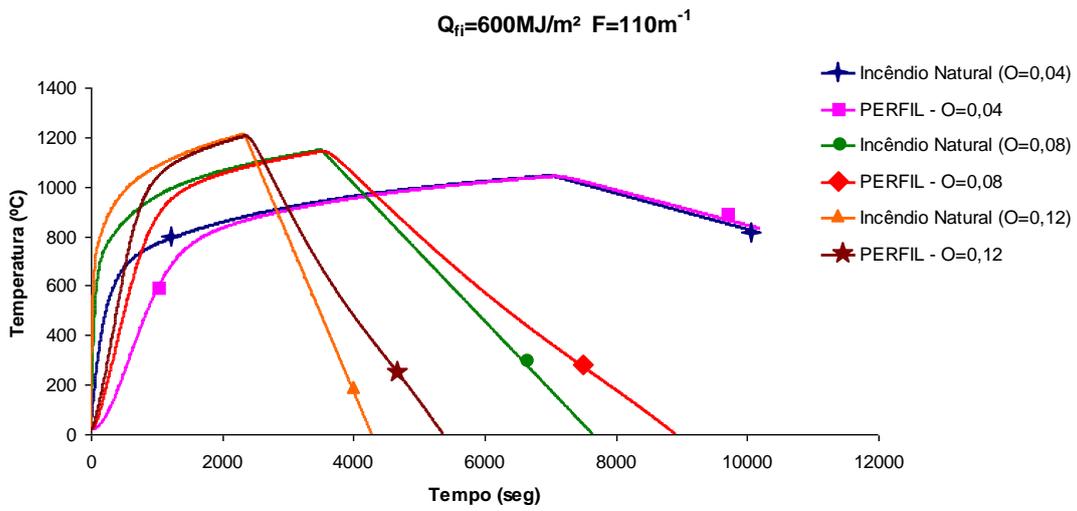


Figura 4.20 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=600\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)

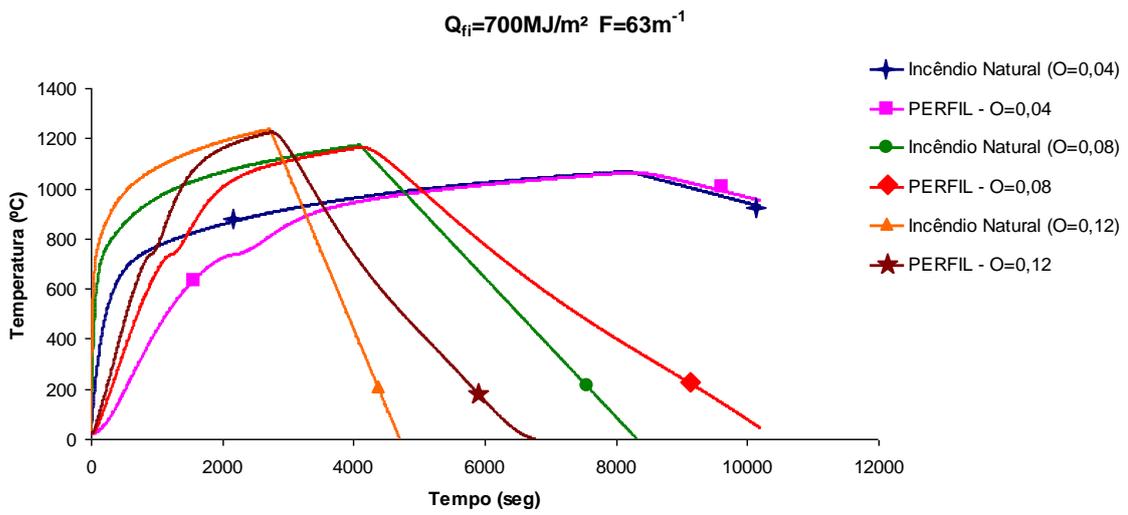
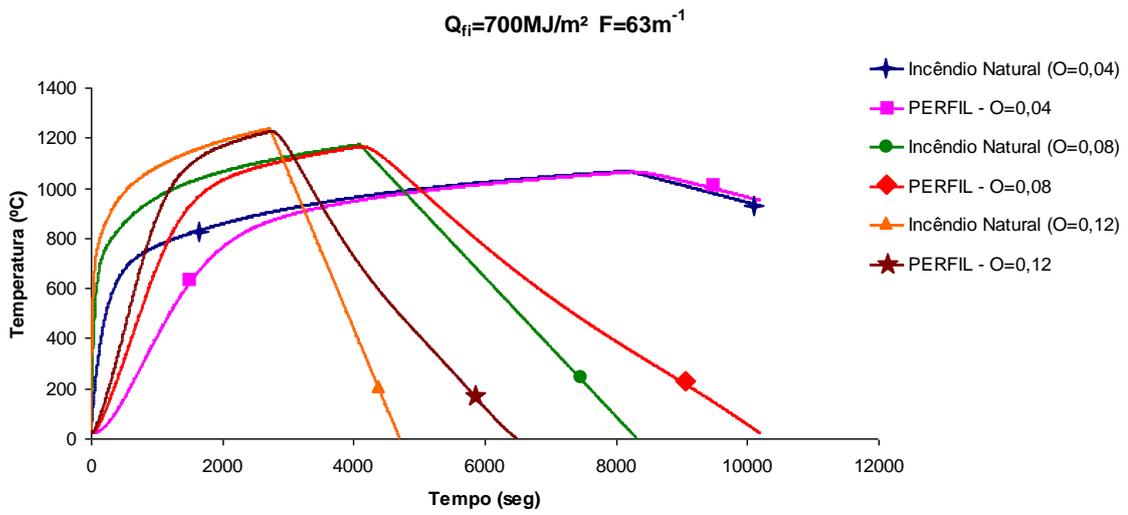


Figura 4.21 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=63\text{m}^{-1}$)

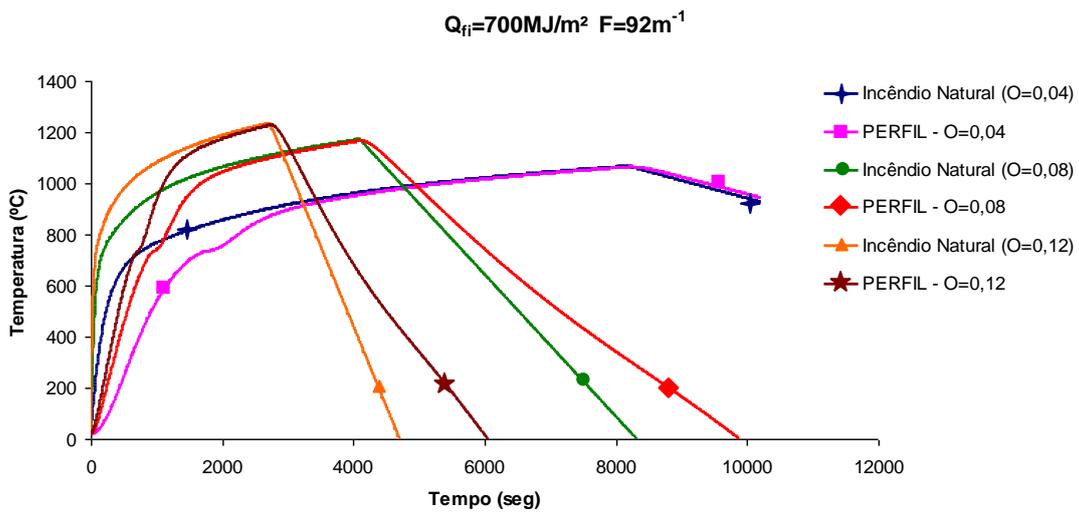
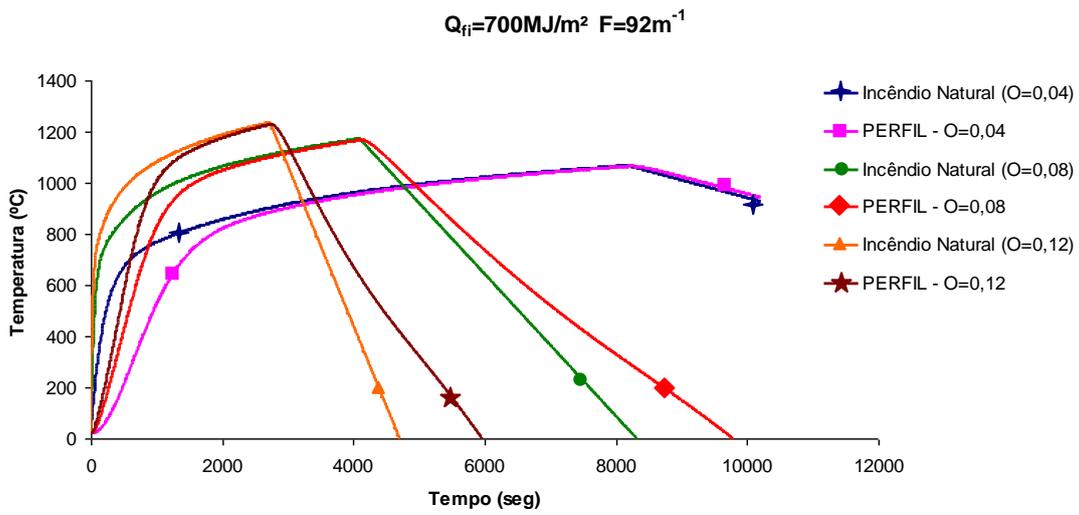


Figura 4.22 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=92\text{m}^{-1}$)

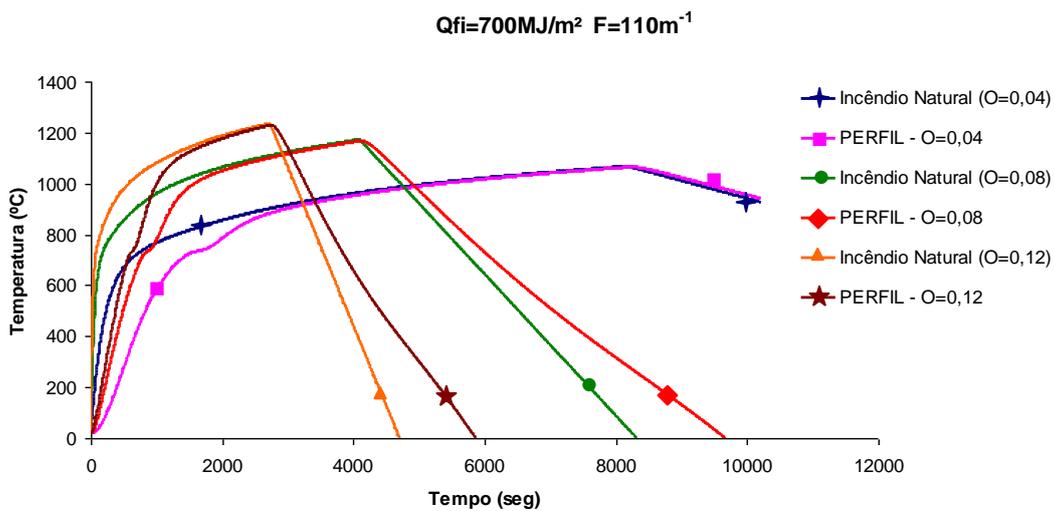
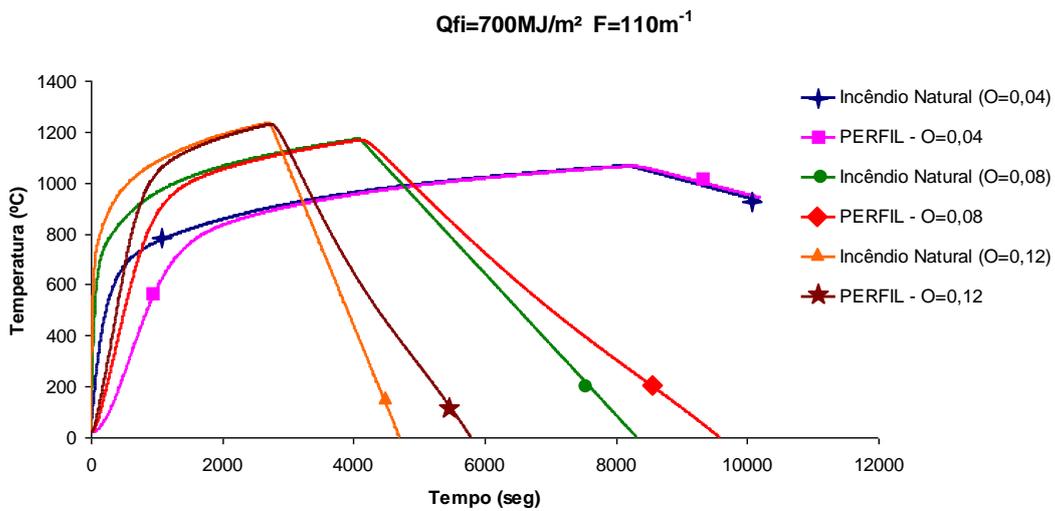


Figura 4.23 – Influência do grau de ventilação na temperatura do elemento de aço ($Q=700\text{MJ/m}^2$ e $F=110\text{m}^{-1}$)

A partir dos gráficos das Figuras 4.15 a 4.23, analisam-se comparativamente os casos de incêndio natural e se observa que:

- Para a mesma carga de incêndio específica trabalhada, quanto menos houver ventilação no compartimento submetido a incêndio, mais as temperaturas máximas dos perfis de aço se aproximarão da temperatura máxima do incêndio natural;
- Quando existe um aumento na carga de incêndio específica e se mantém o grau de ventilação, maior será a temperatura alcançada pelo perfil;
- Quando são mantidos o grau de ventilação e a carga de incêndio e quanto menor for o valor apresentado do fator de massividade dos perfis de aço, menor será a temperatura máxima alcançada pelo mesmo.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 a seguir são apresentados os valores das temperaturas máximas alcançadas pelos elementos estruturais de aço nos gráficos acima, onde se pode observar aumentos e/ou quedas das temperaturas máximas que ocorreram devido a variações do fator de massividade, da carga de incêndio específica e do grau de ventilação para as situações de incêndio a que os perfis foram submetidos.

Tabela 4.3 - Temperatura máxima no elemento estrutural de aço ($^{\circ}\text{C}$) $C_a = 600 \text{ J} / \text{Kg}^{\circ}\text{C}$

Q_{fi}	$F = 63\text{m}^{-1}$			$F = 92\text{m}^{-1}$			$F = 110\text{m}^{-1}$		
MJ/m^2	$O=0,04$	$O=0,08$	$O=0,12$	$O=0,04$	$O=0,08$	$O=0,12$	$O=0,04$	$O=0,08$	$O=0,12$
300	924,77	1002,49	1009,41	930,81	1026,88	1068,36	932,53	1031,44	1081,06
600	1039,48	1138,35	1197,70	1041,15	1141,60	1202,93	1041,73	1142,69	1204,54
700	1062,87	1164,26	1224,68	1064,22	1166,89	1228,45	1064,69	1167,79	1229,70

Tabela 4.4 - Temperatura máxima no elemento estrutural de aço (°C) C_a variável de acordo com formulações da NBR 14323:1999

Q_{fi}	$F = 63m^{-1}$			$F = 92m^{-1}$			$F = 110m^{-1}$		
MJ/m^2	O=0,04	O=0,08	O=0,12	O=0,04	O=0,08	O=0,12	O=0,04	O=0,08	O=0,12
300	916,72	972,54	951,42	929,45	1019,30	1045,61	931,72	1028,22	1069,66
600	1039,03	1137,39	1195,33	1040,85	1141,02	1202,07	1041,48	1142,22	1203,87
700	1062,51	1163,53	1223,47	1063,98	1166,42	1227,81	1064,49	1167,41	1229,16

É notado nas Tabelas 4.3 e 4.4 que o aumento no grau de ventilação na mesma carga de incêndio específica provoca uma elevação da temperatura máxima alcançada pelo perfil de aço. Fato este que acontece na maioria dos casos, entretanto, esse comportamento nem sempre acontece. De acordo com os resultados apresentados em pesquisas realizadas por Silva (1997), aumentos no grau de ventilação só são garantia de elevação de temperatura máxima do aço se a carga de incêndio específica e o fator de massividade assumirem valores em que $Q_{fi} \geq 150MJ/m^2$ e $F \geq 200m^{-1}$. No caso de valores inferiores a estes, podem acontecer fatos em que a temperatura máxima do aço sofra ou não elevação. Já nos resultados apresentados por Nunes (2005), o disposto por Silva (1997) foi perfeitamente exemplificado. O aumento do grau de ventilação provocou aumentos de temperatura máxima em todos os casos em que o fator de massividade apresentou valor igual a $250m^{-1}$. Nos casos em que o fator de massividade apresentou valores iguais a $68m^{-1}$ e $110m^{-1}$, o aumento do grau de ventilação fez com que as temperaturas máximas diminuíssem e aumentassem nos casos apresentados.

4.5. A TRANSMISSÃO DE CALOR TRANSIENTE EM SÓLIDOS

Sabe-se que grande parte dos fenômenos térmicos que ocorrem na natureza tem como característica a influência do tempo nas condições do sistema e também sofrem modificações das propriedades dos materiais ao longo do tempo devido à ação térmica do sistema ao qual está submetido. Esses problemas citados se encontram submetidos a um regime transiente térmico.

Na ciência térmica, as análises transientes são as sucessoras das análises térmicas estacionárias e representam um grau maior de complexidade. A análise estacionária pode ser usada para estabelecer condições iniciais do problema transiente, podendo também ser

utilizada em algoritmos como passos temporais e subsequentes nas análises térmicas transientes.

São desenvolvidas de forma similar tanto as análises transientes como as estacionárias, existindo diferença considerável pelo fato de que, agora, as cargas térmicas e as propriedades dos materiais envolvidos são funções da variável tempo. A equação de Fourier para regimes térmicos transientes em sólidos pode ser descrita como (Kaplan, 1981):

$$K\nabla^2\theta + Q = \mu \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (4.23)$$

Sendo:

$$\mu = \rho c \quad (4.24)$$

Onde:

t Tempo

μ Capacidade térmica específica

c Calor específico

ρ Massa específica

5. FORMULAÇÃO ANALÍTICA DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS “I” EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

5.1. INTRODUÇÃO

Na engenharia de estruturas, considerando especialmente estruturas em situações de incêndio, verifica-se que existem poucas pesquisas e investigações de cunho puramente analítico. Tal área da ciência exata não tem despertado ultimamente muito interesse na comunidade científica. Isto se deve ao fato de que hoje é comum o uso abusivo de métodos numéricos computacionais em vez de soluções analíticas até mesmo em problemas de fácil solução. Até o presente, ainda são insuficientes as formulações disponíveis na literatura que enfoque o problema da instabilidade de vigas de aço em situação de incêndio. Sabe-se que numa viga de aço submetida a incêndio é necessária a verificação da instabilidade lateral e que o ideal é se buscar soluções mais realistas que inclusive considerem a influência das diferenças de temperaturas na seção transversal da viga. Na NBR 14323:1999, a consideração da diferença de temperatura é feita por meio de fatores de correção.

Um dos objetivos desta pesquisa é o desenvolvimento de uma formulação analítica para a determinação da instabilidade lateral de vigas “I” com carga concentrada no vão, estando a viga em situação de incêndio natural. O intuito é calcular a carga crítica “ P_{cr} ” que causa a flambagem lateral com flexo-torção da viga. Considera-se que a instabilidade da viga esteja em regime elástica. Em tal fenômeno nesse regime o perfil tende a se flexionar lateralmente em relação ao eixo de menor inércia.

A Figura 5.1 representa o caso típico desse trabalho, uma viga em perfil metálico “I” e uma placa de material refratário sobreposta. A viga encontra-se em situação de incêndio e sob carga concentrada. Considera-se também que nos apoios a fixação se apresenta de forma que não é possível ocorrer a deflexão lateral e a rotação e que, durante a deformação da viga, não aconteça empenamento da seção transversal nos apoios.

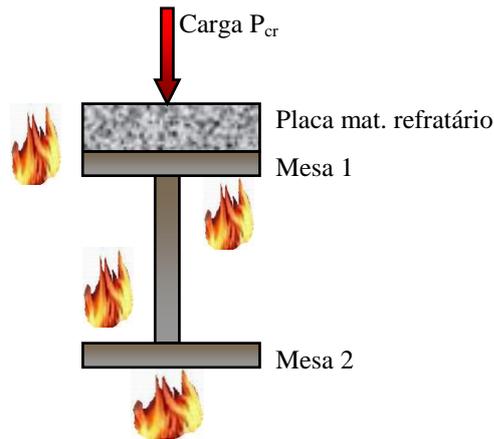


Figura 5.1 – Viga em perfil metálico I em situação de incêndio.

Durante o incêndio a viga de aço atinge altas temperaturas ao longo da seção transversal, provocando significativas mudanças no módulo de elasticidade do aço ao longo do tempo do incêndio. Essas mudanças são devidas às desigualdades do aquecimento na seção transversal da peça, fazendo com que as mesas apresentem módulos de elasticidades diferentes para cada mesa. A mesa que estiver em contato com a placa (material refratário) durante o incêndio vai estar menos exposta ao fogo e sofrerá uma variação de temperatura menor. Conseqüentemente, o módulo de elasticidade vai sofrer uma menor variação. Na Figura 5.2 apresenta-se qualitativamente, de forma ilustrativa, o comportamento do módulo de elasticidade do aço em uma situação de incêndio natural.

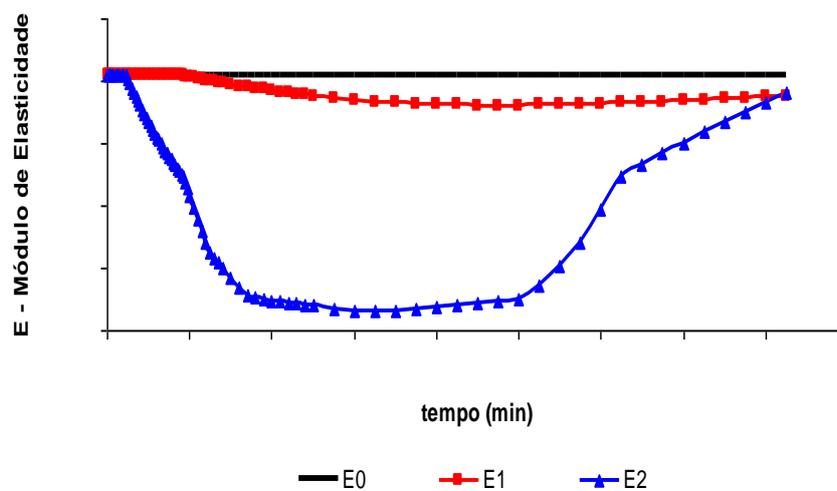


Figura 5.2 – Viga em perfil metálico I em situação de incêndio.

No gráfico apresentado na Figura 5.2, E_0 representa o módulo de elasticidade do aço na temperatura ambiente (geralmente 20°C), E_1 e E_2 a variação dos módulos de elasticidades nas mesas 1 (superior) e 2 (inferior), respectivamente, devido a aquecimentos desiguais na seção transversal do perfil em situação de incêndio.

Sendo de difícil determinação a carga crítica que vai gerar a Flambagem Lateral com Flexo-Torção, apresenta-se neste capítulo uma proposta de formulação analítica com solução fechada para determinação da carga crítica em vigas I em situação de incêndio. Na formulação proposta a ser apresentada, foi considerada a média das diferenças de temperatura entre os elementos das mesas do perfil em análise numa situação de incêndio. A diferença de temperatura e a sua distribuição na seção transversal do perfil de aço I foram calculadas pelo programa comercial ANSYS após modelagem da viga a ser estudada e definição da carga de incêndio e grau de ventilação do ambiente onde a viga está localizada. A formulação analítica proposta e desenvolvida nesta pesquisa utiliza o método da energia.

5.2. DETERMINAÇÃO DA CARGA CRÍTICA EM UMA VIGA DE AÇO COM CARGA CONCENTRADA PELO MÉTODO DA ENERGIA

O objetivo principal desta pesquisa é a determinação da carga crítica que pode causar uma FLT (Flambagem Lateral com Flexo-Torção) numa viga sob situação de incêndio. No caso, a viga com carga concentrada em situação de incêndio pode gerar uma instabilidade elástica denominada Flambagem Lateral com Flexo-Torção, situação esta que será desenvolvida por intermédio do método da energia nesta pesquisa. A energia de deformação da viga apresenta crescimento a partir de uma instabilidade lateral (FLT) apresentada pela viga, existindo assim flexão na direção lateral que se divide em três tipos:

- 1 - Flexão em torno do eixo Z global no início da deformação;
- 2 - Flexão em torno do eixo Z local após a deformação, e
- 3 - Torção em torno do eixo X global ou X local.

Além da energia absorvida pela viga quando acontece a deformação, a carga aplicada produz trabalho.

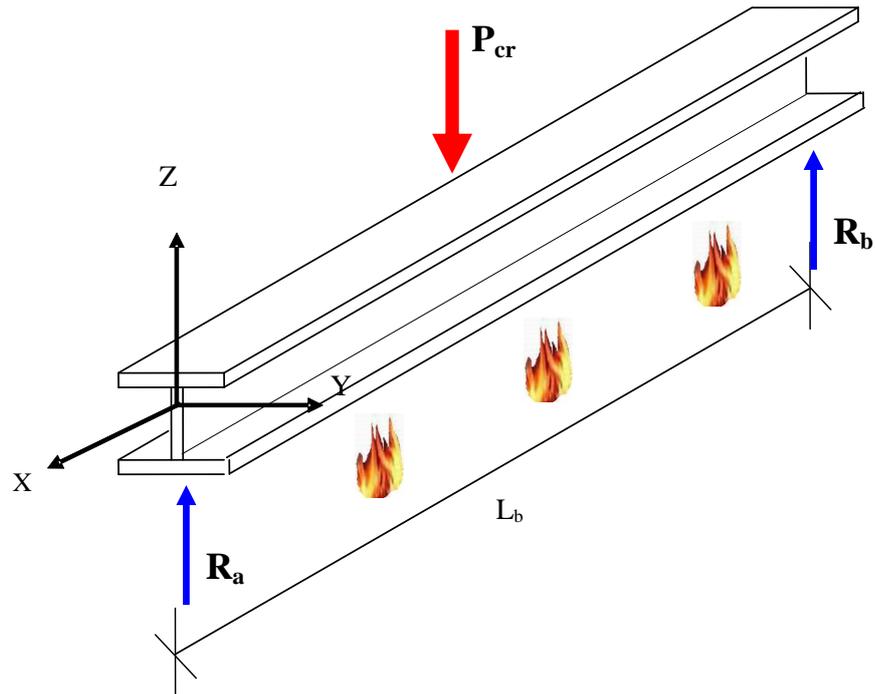


Figura 5.3 – Viga em perfil metálico I submetida à flexão pura

O perfil a ser analisado não necessariamente deve apresentar características de mesas simétricas, podendo ter diferenças geométricas e módulos de elasticidades diferentes. A questão é que essas diferenças fazem com que o centróide da seção transversal não coincida com o centro de flexão (ou centro de cisalhamento) da peça. Para que o centróide e o centro de flexão de uma peça coincidam, é obrigatório que o perfil seja simétrico e apresente o mesmo tipo material. O centro de flexão ficará situado entre o centróide da seção transversal e a mesa que apresentar maior área ou maior rigidez EI – E é o módulo de elasticidade e I o momento de inércia. Mesmo sendo construídos do mesmo tipo de aço, no momento do incêndio, devido à exposição da peça, as chamas podem apresentar rigidez diferente entre suas partes. Caso os valores das áreas das mesas sejam aproximadamente iguais, o centróide pode estar bem próximo do centro geométrico da alma do perfil.

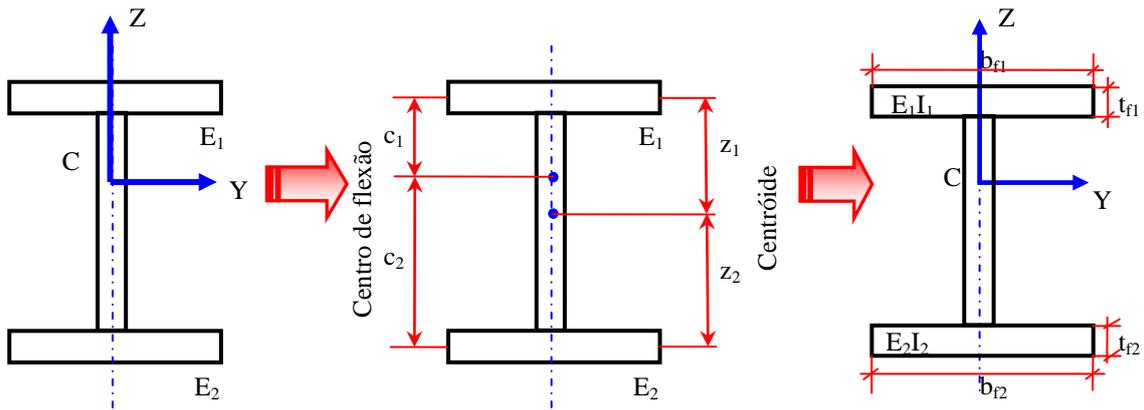


Figura 5.4 - Centro de flexão e centróide em perfil I no estado de flexão lateral e Momento de inércia em relação ao eixo z (local)

A distância entre o centro de flexão (ou centro de cisalhamento) e o centróide da seção transversal será denominada de excentricidade “e”. Quando a mesa que estiver sob compressão for a de maior área (ou maior rigidez), a excentricidade “e” tem valor positivo. Caso a mesa de menor área (ou menor rigidez) esteja sob compressão, convencionou-se a excentricidade “e” como negativa.

No caso de uma FLT (Flambagem lateral com flexo-torção), o perfil tende a flexionar lateralmente em torno do eixo de menor inércia, sendo importante determinar a posição do centro de flexão em relação a este eixo, que é denominado por eixo Z. Os valores do centro de flexão (c_1 e c_2) e do centróide (z_1 e z_2) são determinados pelas expressões (Roark e Young, 1975; Duncan, 1953):

$$c_1 = \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \quad c_2 = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \quad (5.1)$$

$$z_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} h \quad z_2 = \frac{A_1}{A_1 + A_2} h \quad (5.2)$$

Onde, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade, I_1 e I_2 são os momentos de inércia (em relação ao eixo de menor inércia onde o perfil tende a flexionar, no caso eixo Z) e passando pelas mesas 1 (superior) e 2 (inferior) e A_1 e A_2 são as áreas das mesas superior e inferior, respectivamente.

Pode-se, por intermédio do método da homogeneização das seções das mesas, encontrar a rigidez equivalente total do perfil I em relação ao eixo Z, para que os cálculos sejam facilitados, pois o termo $E_1I_1+E_2I_2$ aparecerá com frequência na formulação. Utilizando-se o módulo de elasticidade de uma das mesas (aqui se escolheu a mesa 2), calcula-se o momento de inércia da outra (mesa 1), considerando-o de espessura equivalente:

$$t_{f1}' = (E_1/E_2)t_{f1} \quad (5.3)$$

Onde se pode notar que “ t_{f1} ” considera a relação entre os módulos de elasticidades (E_1/E_2) das duas mesas, superior e inferior. Assim a rigidez equivalente total vale:

$$E_2I_{eq} = E_2 \left(\frac{t_{f2}b_{f2}^3}{12} + \frac{t'_{f1}b_{f1}^3}{12} \right) \quad (5.4)$$

Substituindo o valor de t_{f1}' na Equação 5.3:

$$E_2I_{eq} = E_2 \left(\frac{t_{f2}b_{f2}^3}{12} + \frac{E_1}{E_2} \frac{t_{f1}b_{f1}^3}{12} \right) \quad (5.5)$$

Encontra-se a rigidez equivalente total dada por:

$$E_2I_{eq} = E_1I_1 + E_2I_2 = (EI)_{TOTAL} \quad (5.6)$$

Para determinação da carga crítica (“Pcr”) da FLT, é utilizada a condição da física em que o trabalho realizado pela ação externa seja igual à energia de deformação (flexão e torção) acumulada no interior da viga. Logo, a energia interna deve ser igualada ao trabalho realizado pela carga externa.

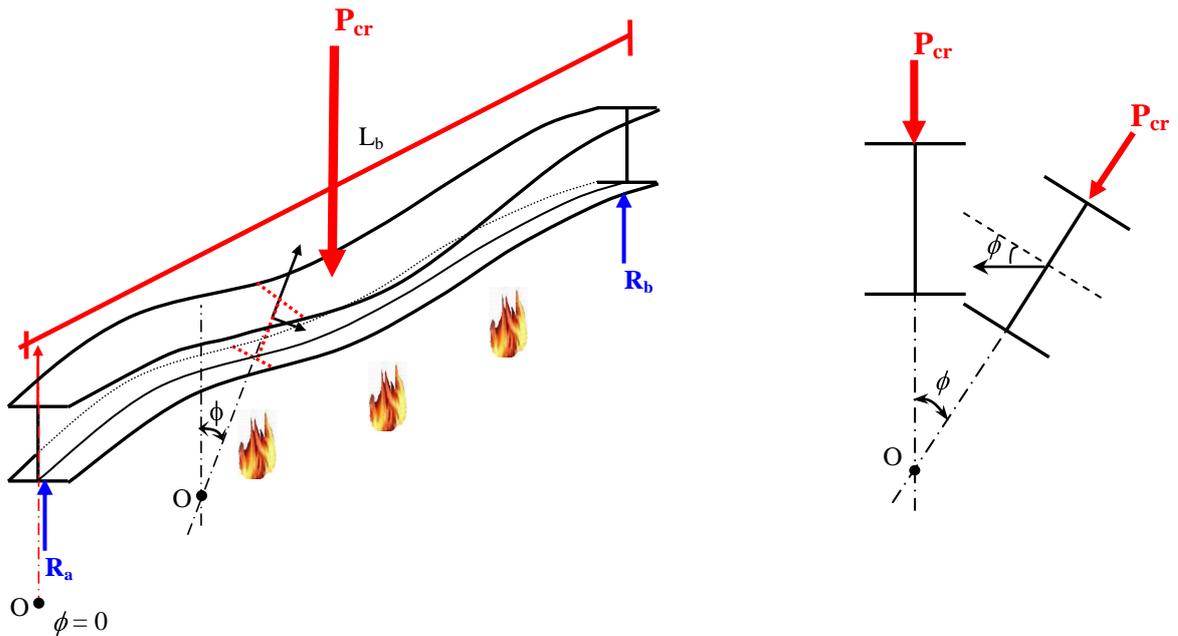


Figura 5.5 Viga I sob flambagem lateral com torção (FLT) e Vista da seção transversal deformada

5.2.1. Determinação da energia interna de deflexão e de torção da viga

Para determinação da energia interna de deflexão com torção da viga, é analisado o momento de flexão em torno do eixo Z, onde se verifica a existência de deslocamentos nas mesas (superior e inferior) e no centro de flexão – observar Figura 5.6.

O deslocamento nas mesas apresenta-se em função da rotação Φ e do deslocamento lateral do centro de flexão “y”. As parcelas de energias apresentadas serão utilizadas na determinação da energia interna e trabalho externo.

Na Figura 5.6 observa-se o centro de rotação denominado ponto “O”, situado numa distância constante “D” do centro de flexão “C” da seção transversal da viga, podendo-se afirmar que o deslocamento “y” do centro de flexão pode ser calculado como:

$$y = D \text{ sen } \Phi \quad (5.7)$$

Considerando Φ pequeno: $\text{sen } \Phi = \Phi$, então:

$$y = D \Phi \quad (5.8)$$

- $y + c_1\Phi$ indica a deflexão do centro da mesa 1;
- $y - c_2\Phi$ indica a deflexão do centro da mesa 2;
- y indica a deflexão do centro de flexão.

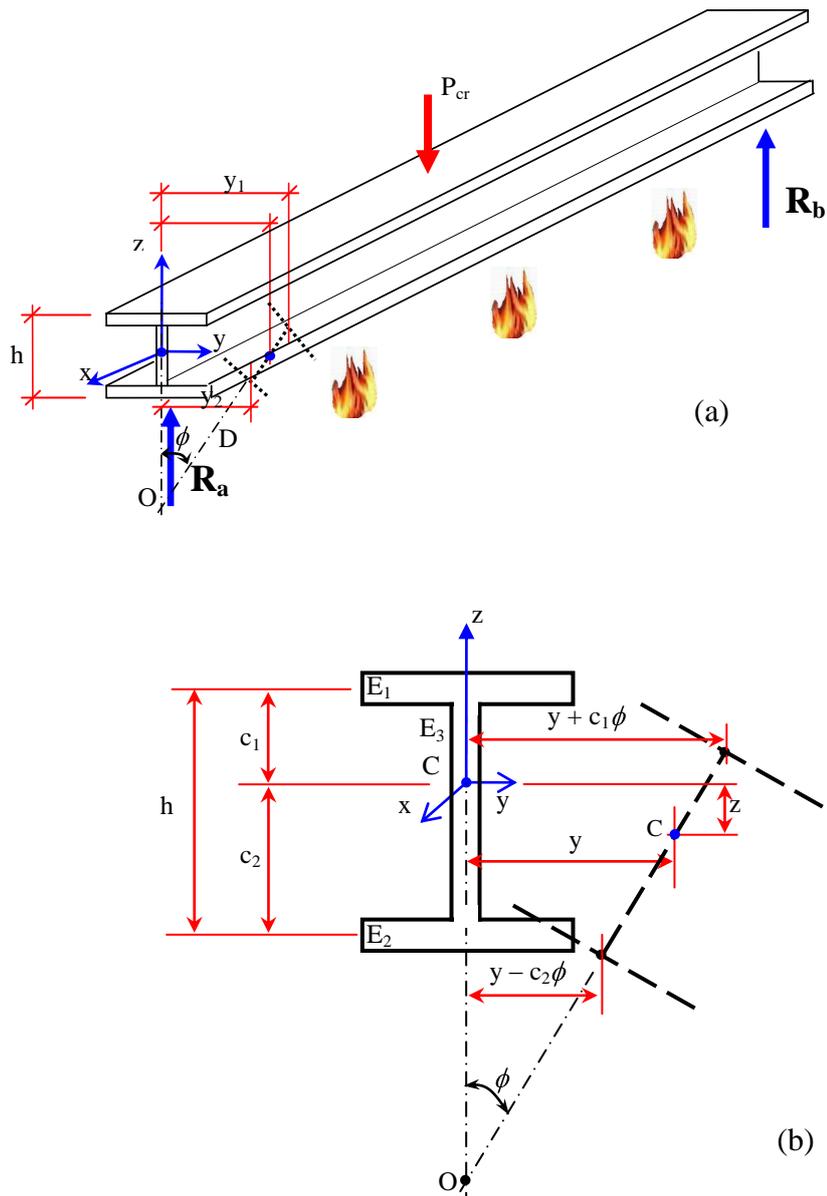


Figura 5.6 (a) Seção transversal da viga I antes e depois da flexão lateral com torção / (b) – Rotação da seção transversal da viga I

Concordando que os deslocamentos laterais sofridos pela viga tomam uma forma aproximada de curva senoidal e seguindo a indicação de Timoshenko e Gere (1961) e Winter (1941), tem-se uma condição aproximada do deslocamento que a viga apresenta em flambagem lateral com flexo-torção:

$$y = \bar{A} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L} \quad (5.9)$$

Sendo assim, igualando os valores de “y” das equações 5.8 e 5.9, encontra-se que:

$$D\phi = \bar{A} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L} \quad (5.10)$$

Denominando na Equação 5.10 que $a = \bar{A}/D$, tem-se:

$$\phi = a \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L} \quad (5.11)$$

Devido à constante “D” não representar de forma exata uma curva senoidal perfeita, gera-se um erro de aproximação na deformada que, no entanto, é desprezível, e a aproximação, portanto, é válida conforme indicado por Winter (1941). Aqui, cabe observar que referências como Winter (1941) e Timoshenko e Gere (1961) são clássicas e, portanto, não devem ser consideradas obsoletas, pois seus ensinamentos são atemporais.

Considerando desprezível a contribuição da alma na flexão lateral da viga, pode-se dizer que a energia de flexão é dada pelo momento de flexão em torno do eixo Z e pela soma das contribuições de flexão das mesas 1 (Superior) e 2 (Inferior).

$$M_z = M_{1Z} + M_{2Z} \quad (5.12)$$

Conhecendo os deslocamentos $y_1 = y + c_1\Phi$ e $y_2 = y - c_2\Phi$, respectivamente, das mesas superior e inferior da viga de aço, é possível concluir da resistência dos materiais (Popov, 1982) que os momentos de flexão nas mesas da viga:

$$M_{1z} = E_1 I_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} \Rightarrow M_{1z} = E_1 I_1 \frac{d^2 (y + c_1 \phi)}{dx^2} \quad (5.13)$$

$$M_{2z} = E_2 I_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} \Rightarrow M_{2z} = E_2 I_2 \frac{d^2 (y + c_2 \phi)}{dx^2} \quad (5.14)$$

Na viga, além do momento de flexão nas mesas em torno do eixo Z, tem-se ainda a torção atuando por intermédio de um momento de torção M_T na seção transversal. A torção atuante é referente à variação do ângulo de rotação Φ ao longo do comprimento da viga, portanto, $d\Phi / dx$:

$$M_T = \hat{C} \frac{d\phi}{dx} \quad (5.15)$$

Sabendo-se que o ângulo de torção por unidade de comprimento $d\Phi / dx$ é igual: (**Gaylord et al.**, 1999)

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{M_T}{G J} \quad (5.16)$$

Em que:

Rigidez Torcional:

$$\hat{C} = G J \quad (5.17)$$

Módulo de Elasticidade Transversal:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.18)$$

Constante Torcional para perfis abertos tipo I:

$$J = \frac{b_1 t f_1^3}{3} + \frac{b_2 t f_2^3}{3} + \frac{b_w t f_w^3}{3} \quad (5.19)$$

Na Equação 5.19 observa-se que cada parte “i” da viga (mesas e alma) contribui com um terço do produto do cubo da sua espessura multiplicado por sua extensão. Cada parte do

perfil I, em situação de incêndio, está sob determinada temperatura e, portanto, é possível associar a cada uma destas partes um valor para o módulo de elasticidade transversal G_i . Pode-se, então, reescrever a equação do momento de torção, M_T , como:

$$M_T = \sum G_i J_i \frac{d\phi}{dx} \quad (5.20)$$

São conhecidas as expressões para o cálculo de peças com energia de flexão e torção (Popov, 1982; Timoshenko e Gere, 1961), em que a energia interna é expressa da seguinte forma:

$$W_i = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^L \frac{M_{1Z}^2}{E_1 I_1} dx + \int_0^L \frac{M_{2Z}^2}{E_2 I_2} dx + \int_0^L \frac{M_T^2}{G J} dx \right\} \quad (5.21)$$

Substituindo as equações 5.13 e 5.14 dos momentos de flexão e do momento de torção (5.20) na Equação 5.21 da energia interna, tem-se:

$$W_i = \frac{1}{2} \left\{ E_1 I_1 \int_0^L \left(\frac{d^2(y + c_1 \phi)}{dx^2} \right)^2 dx + E_2 I_2 \int_0^L \left(\frac{d^2(y - c_2 \phi)}{dx^2} \right)^2 dx + \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \right\} \quad (5.22)$$

Desenvolvendo os termos da Equação 5.22 em função de c_1 e c_2 , temos:

$$\left(\frac{d^2(y + c_1 \phi)}{dx^2} \right)^2 = \left(\frac{d^2 y}{dx^2} + c_1 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 = \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + 2 c_1 \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_1^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \quad (5.23)$$

$$\left(\frac{d^2(y - c_2 \phi)}{dx^2} \right)^2 = \left(\frac{d^2 y}{dx^2} - c_2 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 = \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2 c_2 \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_2^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \quad (5.24)$$

Retornando à Equação 5.22 e utilizando os resultados dos termos desenvolvidos nas equações 5.23 e 5.24, tem-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
W_i = & \frac{E_1 I_1}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + 2 c_1 \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_1^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \\
& \frac{E_2 I_2}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2 c_2 \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + c_2^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \quad (5.25) \\
& \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx
\end{aligned}$$

A Equação 5.1 apresenta os valores de c_1 e c_2 relacionados com o centro de flexão que, substituindo na Equação 5.25, obtém-se:

$$\begin{aligned}
W_i = & \frac{E_1 I_1}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + 2 \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + \frac{E_2^2 I_2^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \\
& \frac{E_2 I_2}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 - 2 \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right) + \frac{E_1^2 I_1^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h^2 \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 \right] dx + \quad (5.26) \\
& \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx
\end{aligned}$$

Desenvolvendo matematicamente e simplificando a Equação 5.26:

$$\begin{aligned}
W_i = & \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \left[\frac{E_1 I_1}{2} \frac{E_2^2 I_2^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h^2 + \frac{E_2 I_2}{2} \frac{E_1^2 I_1^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h^2 \right] \int_0^L \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 dx + \\
& \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.27)
\end{aligned}$$

Simplificando esta equação, obtém-se:

$$W_i = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 E_1 I_1 + E_2 I_2} h^2 \int_0^L \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.28)$$

Considerando a Equação 5.6, onde $E_1 I_1 + E_2 I_2 = (EI)_{total}$, sendo possível simplificar ainda mais a Equação 5.28:

$$W_i = \frac{(EI)_{total}}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 (EI)_{total}} h^2 \int_0^L \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dx \quad (5.29)$$

De acordo com Winter (1941):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-M \phi}{EI} = \frac{-P x \phi}{2 EI} \quad (5.30)$$

$$\int_0^L \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{P^2}{2 (EI)_{total}^2} \int_0^{L/2} \phi^2 x^2 dx \quad (5.31)$$

E como apresentado na Equação 5.11, $\Phi = a \text{ sen } (\pi x / L)$. Têm-se abaixo descrito as derivadas primeira e segunda da Equação 5.11:

$$\phi' = \frac{a \pi}{L} \cos \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (5.32)$$

$$\phi'' = -\frac{a \pi^2}{L^2} \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (5.33)$$

Substituindo as equações 5.31, 5.32 e 5.33 na Equação 5.29, tem-se:

$$W_i = \frac{(EI)_{total}}{2} \frac{P^2}{2 (EI)_{total}^2} \int_0^{L/2} \phi^2 x^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 (EI)_{total}} h^2 \int_0^L \left(-\frac{a \pi^2}{L^2} \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum G_i J_i \int_0^L \left(\frac{a \pi}{L} \cos \left(\frac{\pi x}{L} \right) \right)^2 dx \quad (5.34)$$

Simplificando a Equação 5.34:

$$W_i = \frac{P^2}{4 \overleftarrow{EI}_{total}} \int_0^{L/2} \phi^2 x^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 \overleftarrow{EI}_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L^4} \int_0^L \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L^2} \int_0^L \left(\cos \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx \quad (5.35)$$

Inserindo o valor de $\Phi = a \text{ sen} (\pi x / L)$ na Equação 5.35:

$$W_i = \frac{P^2}{4 \overleftarrow{EI}_{total}} \int_0^{L/2} a^2 \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 x^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 \overleftarrow{EI}_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L^4} \int_0^L \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L^2} \int_0^L \left(\cos \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx \quad (5.36)$$

Simplificando a Equação 5.36:

$$W_i = \frac{P^2 a^2}{4 \overleftarrow{EI}_{total}} \int_0^{L/2} x^2 \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 \overleftarrow{EI}_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L^4} \int_0^L \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L^2} \int_0^L \left(\cos \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx \quad (5.37)$$

Desenvolvendo as integrais da Equação 5.37:

$$\int_0^{L/2} x^2 \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx = \frac{1}{48} \frac{L^3 \left(\pi^2 + 6 \right)}{\pi^2} = \frac{L^3}{8\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right)$$

$$\int_0^L \left(\text{sen} \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx = \frac{L}{2}$$

$$\int_0^L \left(\cos \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx = \frac{L}{2} \quad (5.38)$$

Substituindo os valores das integrais da Equação 5.37 resolvidas na Equação 5.38, tem-se:

$$W_i = \frac{P^2 a^2}{4 \overline{EI}_{total}} \frac{1}{48} \frac{L^3}{\pi^2} \left(\frac{\pi^2}{6} + 6 \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{2 \overline{EI}_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{L^4} \frac{L}{2} + \frac{1}{2} \sum G_i J_i \frac{a^2 \pi^2}{L^2} \frac{L}{2} \quad (5.39)$$

Simplificando:

$$W_i = \frac{P^2 a^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{32\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} h^2 \frac{a^2 \pi^4}{4L^3} + \frac{a^2 \pi^2}{4L} \sum G_i J_i \quad (5.40)$$

Colocando o termo “ a^2 ” em evidência:

$$W_i = a^2 \left[\frac{P^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{32\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{4L^3} + \frac{\pi^2}{4L} \sum G_i J_i \right] \quad (5.41)$$

Definindo C_i como uma constante torcional reduzida e conhecendo o módulo de elasticidade transversal por intermédio da Equação 5.18, o somatório existente na Equação 5.41 pode ser descrito da seguinte forma:

$$C_i = \frac{J_i}{2(1+\nu)} \quad (5.42)$$

$$\sum G_i J_i = \sum \frac{E_i}{2(1+\nu)} J_i = \sum E_i C_i \quad (5.43)$$

Adotando o termo da rigidez torcional da Equação 5.43, a equação final para a energia interna de deflexão para uma viga I sob flexão lateral será dada por:

$$W_i = a^2 \left[\frac{P^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{32\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{4L^3} + \frac{\pi^2}{4L} \sum E_i C_i \right] \quad (5.44)$$

5.2.2. Determinação do trabalho externo

Para determinação do trabalho externo, geralmente depende do tipo de sollicitação a que a viga está submetida. No caso em estudo a viga de aço I encontra-se biapoiada e a ação externa atuante é a carga concentrada no centro da viga.

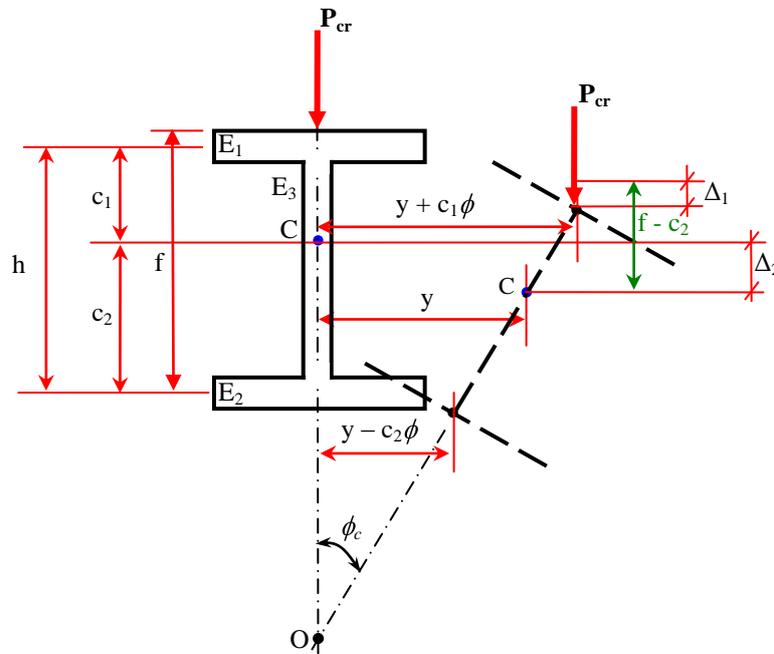


Figura 5.7 Seção transversal da viga I com atuação da carga crítica na mesa superior

O deslocamento vertical da força P , aplicado a uma distância arbitrária f da mesa inferior, pode ser solucionado em duas componentes, Δ_1 e Δ_2 .

A componente Δ_1 representa o deslocamento relativo ao ponto de aplicação da carga P em relação ao centro de flexão. É visto geometricamente na Figura 5.7 e apresentado na equação abaixo o valor do deslocamento Δ_1 :

$$\Delta_1 = (f - c_2) \sin \phi_c \quad (5.45)$$

Onde ϕ_c é o ângulo referente à rotação de C para a carga crítica P_{cr} e f é a distância do ponto de aplicação da carga ao eixo horizontal da mesa inferior.

Considerando na Equação 5.45 que Φ_c seja um ângulo pequeno, pode-se dizer que a tangente e o seno têm praticamente o mesmo valor, isto é:

$$\Delta_1 = a^2 \frac{f - c_2}{2} \quad (5.46)$$

Onde “a” representa o coeficiente de ajuste da deformação do ângulo Φ_c .

Substituindo na Equação 5.46 o valor de c_2 apresentado por meio da Equação 5.1, tem-se:

$$\Delta_1 = \frac{a^2}{2} \left(f - \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} h \right) \quad (5.47)$$

Considerando $E_1 I_1 + E_2 I_2 = (EI)_{total}$ na Equação 5.47, obtém-se:

$$\Delta_1 = \frac{a^2}{2} \left(f - \frac{E_1 I_1}{(EI)_{total}} h \right) \quad (5.48)$$

Assim Δ_1 pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\Delta_1 = \frac{a^2}{2 (EI)_{total}} \left(f (EI)_{total} - E_1 I_1 h \right) \quad (5.49)$$

A segunda componente Δ_2 representa o deslocamento do centro de flexão dado pela curvatura horizontal do eixo longitudinal da viga. Assim:

$$\Delta_2 = - \int_0^{L/2} \frac{d^2 y}{dx^2} \phi x dx \quad (5.50)$$

Já foi visto anteriormente que o valor da segunda derivada de y em relação a x é conhecido e dado pela Equação 5.30. Substituindo-se o valor da segunda derivada na Equação 5.50 e resolvendo matematicamente, tem-se:

$$\Delta_2 = - \int_0^{L/2} \frac{P x \phi}{2 (EI)_{total}} \phi x dx \quad (5.51)$$

$$\Delta_2 = \frac{P}{2 EI_{total}} \int_0^{L/2} \phi^2 x^2 dx \quad (5.52)$$

E como apresentado na Equação 5.11, $\Phi = a \text{ sen } (\pi x / L)$. Substituindo-se o valor de Φ na Equação 5.52, chega-se a:

$$\Delta_2 = \frac{P}{2 EI_{total}} \int_0^{L/2} a^2 \left(\text{sen } \frac{\pi x}{L} \right)^2 x^2 dx \quad (5.53)$$

Desenvolvendo a integral da Equação 5.53:

$$\int_0^{L/2} x^2 \left(\text{sen } \frac{\pi x}{L} \right)^2 dx = \frac{1}{48} \frac{L^3}{\pi^2} (\pi^2 + 6) \quad (5.54)$$

E substituindo o resultado na Equação 5.53, encontra-se:

$$\Delta_2 = \frac{P a^2}{2 EI_{total}} \frac{1}{48} \frac{L^3}{\pi^2} (\pi^2 + 6) \quad (5.55)$$

Desenvolvendo matematicamente a Equação 5.55, encontra-se a equação que determina o deslocamento Δ_2 :

$$\Delta_2 = \frac{P a^2}{EI_{total}} \frac{L^3}{16\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \quad (5.56)$$

Com Δ_1 e Δ_2 representando deslocamentos devido à deformação horizontal da viga, a energia das forças externas será dada por:

$$W_e = P (\Delta_1 + \Delta_2) \quad (5.57)$$

Substituindo-se os valores das equações 5.49 e 5.56 na Equação 5.57, obtém-se:

$$W_e = P \left(\frac{a^2}{2 \overline{EI}_{total}} \left[\overline{EI}_{total} - E_1 I_1 h \right] + \frac{P a^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{16\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \right) \quad (5.58)$$

Desenvolvendo-se matematicamente a Equação 5.58, encontra-se que o trabalho das forças externas será determinado por:

$$W_e = a^2 \left[\frac{P}{2 \overline{EI}_{total}} \left[\overline{EI}_{total} - E_1 I_1 h \right] + \frac{P^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{16\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \right] \quad (5.59)$$

Igualando a energia interna ao trabalho externo – equações 5.44 e 5.59 – determina-se a carga crítica $P = P_{cr}$ para o perfil I no estado de flambagem lateral com torção, FLT.

$$\begin{aligned} a^2 \left[\frac{P_{cr}^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{32\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{4L^3} + \frac{\pi^2}{4L} \sum E_i C_i \right] \\ = a^2 \left[\frac{P_{cr}}{2 \overline{EI}_{total}} \left[\overline{EI}_{total} - E_1 I_1 h \right] + \frac{P_{cr}^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{16\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.60)$$

Simplificando e organizando a equação anterior, tem-se:

$$\frac{P_{cr}^2}{\overline{EI}_{total}} \frac{L^3}{16\pi^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \left[\overline{EI}_{total} - E_1 I_1 h \right] \frac{P_{cr}}{\overline{EI}_{total}} - \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{2L^3} - \frac{\pi^2}{2L} \sum E_i C_i = 0 \quad (5.61)$$

Para simplificar a Equação 5.61 são adotados os coeficientes A, B e C, que valem:

$$\begin{aligned} A &= \frac{L^3}{16\pi^2 \overline{EI}_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \\ B &= \frac{\left[\overline{EI}_{total} - E_1 I_1 h \right]}{\overline{EI}_{total}} \\ C &= - \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{\overline{EI}_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{2L^3} - \frac{\pi^2}{2L} \sum E_i C_i \end{aligned} \quad (5.62)$$

Assim, a Equação 5.61 assume a forma da seguinte equação quadrática:

$$A P_{cr}^2 + B P_{cr} + C = 0 \quad (5.63)$$

O discriminante Δ da equação do segundo grau 5.63 ($\Delta = b^2 - 4ac$) vale:

$$\Delta = \left(\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}} \right)^2 - 4 \left(\frac{L^3}{16\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \right) \left(-\frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{EI_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{2L^3} - \frac{\pi^2}{2L} \sum Ei Ci \right) \quad (5.64)$$

Desenvolvendo a Equação 5.64 e simplificando algebricamente:

$$\Delta = \left(\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}} \right)^2 + \left(\frac{-L^3}{4\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \right) \left(-\frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{EI_{total}} \frac{h^2 \pi^4}{2L^3} - \frac{\pi^2}{2L} \sum Ei Ci \right) \quad (5.65)$$

$$\Delta = \left(\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}} \right)^2 + \left(\frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{EI_{total}} \frac{h^2 \pi^2}{8} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) + \frac{L^2}{8 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right) \sum Ei Ci \right) \quad (5.66)$$

$$\Delta = \left(\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}} \right)^2 + \frac{1}{8} \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{EI_{total}} h^2 \pi^2 + \frac{1}{48} \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{EI_{total}} h^2 \pi^4 + \frac{1}{8} \frac{L^2}{EI_{total}} \sum Ei Ci + \frac{1}{48} \frac{\pi^2 L^2}{(EI)_{total}} \sum Ei Ci \quad (5.67)$$

$$\Delta = \frac{1}{EI_{total}} \left(E_1 I_1 h - f EI_{total} \right)^2 + \left(\frac{1}{8} + \frac{\pi^2}{48} \right) \left(E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2 \right) + \left(\frac{L^2}{8} + \frac{L^2 \pi^2}{48} \right) \left(\sum Ei Ci EI_{total} \right) \quad (5.68)$$

$$\Delta = \frac{1}{EI_{total}} \left(E_1 I_1 h - f EI_{total} \right)^2 + \left(\frac{L^2}{8} + \frac{L^2 \pi^2}{48} \right) \left(\sum Ei Ci EI_{total} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right) \quad (5.69)$$

A equação final do discriminante da Equação 5.63 é, portanto:

$$\Delta = \frac{1}{EI_{total}^3} \left(E_1 I_1 h - f EI_{total} \right)^2 + \left(\frac{L^2}{48} (6 + \pi^2) \right) \left(\sum E_i C_i EI_{total} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right) \quad (5.70)$$

Pode-se então determinar a carga crítica na viga I:

$$P_{cr} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A} = \frac{-B}{2A} \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2A} \quad (5.71)$$

Substituindo-se os valores das equações 5.62 e 5.70 na Equação 5.71, obtém-se:

$$P_{cr} = \frac{\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}}}{2 \frac{L^3}{16\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right)} + \frac{\sqrt{\frac{1}{EI_{total}^3} \left(E_1 I_1 h - f EI_{total} \right)^2 + \left(\frac{L^2}{48} (6 + \pi^2) \right) \left(\sum E_i C_i EI_{total} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right)}}{2 \frac{L^3}{16\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right)} \quad (5.72)$$

Desenvolvendo-se algebricamente a Equação 5.72, obtém-se:

$$P_{cr} = \frac{\frac{E_1 I_1 h - f EI_{total}}{EI_{total}}}{\frac{L^3}{8\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right)} + \frac{\frac{1}{EI_{total}} \sqrt{\frac{1}{EI_{total}^3} \left(E_1 I_1 h - f EI_{total} \right)^2 + \left(\frac{L^2}{48} (6 + \pi^2) \right) \left(\sum E_i C_i EI_{total} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right)}}{\frac{L^3}{8\pi^2 EI_{total}} \left(1 + \frac{\pi^2}{6} \right)} \quad (5.73)$$

Procedendo às simplificações algébricas, chega-se à determinação da carga crítica P_{cr} em vigas de aço I com mesas diferentes do ponto de vista geométrico e com módulos de elasticidade também diferentes devido ao incêndio.

$$P_{cr} = \frac{48\pi^2}{L^3(\epsilon + \pi^2)} \left[\epsilon I_1 h - f \epsilon I_{total} \right] + \sqrt{\left[\epsilon I_1 h - f \epsilon I_{total} \right]^2 + \left(\frac{L^2(\epsilon + \pi^2)}{48} \right) \left(\sum E_i C_i \epsilon I_{total} + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right)} \quad (5.74)$$

Nota-se que, partindo-se da fórmula geral, caso se considerasse o módulo de elasticidade das mesas iguais ($E_1 = E_2 = E$), o somatório $\sum E_i C_i$ na Equação 5.74 tornar-se-ia EC , com C sendo $\sum C_i$ e o valor comum do módulo de elasticidade das mesas E poderia ser colocado em evidência. Assim, a Equação 5.74 transformar-se-ia em:

$$P_{cr} = \frac{48\pi^2 E}{L^3(\epsilon + \pi^2)} \left[I_1 h - f I \right] + \sqrt{\left[I_1 h - f I \right]^2 + \left(\frac{L^2(\epsilon + \pi^2)}{48} \right) \left(C I + \frac{I_1 I_2 h^2 \pi^2}{L^2} \right)} \quad (5.75)$$

É importante ressaltar que, nesta situação, a Equação 5.75 coincide com a fórmula deduzida por Winter (1941) para o caso particular de vigas I de mesmo material com mesas geometricamente assimétricas.

Por outro lado, caso a consideração fosse de que as mesas pudessem ter módulos de elasticidades diferentes ($E_1 \neq E_2$), por exemplo, gerados pela evolução temporal do incêndio e que tais mesas fossem simétricas, ou seja, tivessem momentos de inércia iguais em relação ao eixo Z ($I_1 = I_2 = I$), a Equação 5.74 tornar-se-ia:

$$P_{cr} = \frac{48\pi^2}{L^3(\epsilon + \pi^2)} \left[I_1 h - f I (E_1 + E_2) \right] + \sqrt{\left[I_1 h - f I (E_1 + E_2) \right]^2 + \left(\frac{L^2(\epsilon + \pi^2)}{48} \right) \left(\frac{I}{2(\epsilon + \nu)} \left[E_1 J_1 + E_2 J_2 + E_3 J_3 \right] (E_1 + E_2) + \frac{E_1 E_2 I^2 h^2 \pi^2}{L^2} \right)} \quad (5.76)$$

O momento de inércia I em relação ao eixo z é o dobro do momento de inércia I_z de uma mesa, visto que as mesas são simétricas. A Equação 5.76 representa o caso típico de interesse desta dissertação (perfis simétricos geometricamente, módulos de elasticidades diferentes devido ao aquecimento desigual do perfil durante a situação de incêndio).

A distância do eixo da mesa inferior ao ponto de aplicação da carga representada na equação da carga crítica por f é uma distância arbitrária. No caso deste estudo, considera-se a aplicação da carga sobre a mesa superior. Visualiza-se que quanto mais próximo do centróide mais desfavorável é a situação a que a viga pode estar submetida.

Pode-se concluir neste capítulo que se obteve uma solução fechada para o cálculo da carga crítica P_{cr} em perfis I, considerando que o perfil tenha características gerais tanto para o material quanto para sua geometria. Em outros casos de carregamento, onde a carga crítica P_{cr} é função da distância de aplicação da carga f na seção transversal do perfil I, a norma admite uma constante de correção utilizando o coeficiente C_b (Salvadori, 1955).

Nota-se que o coeficiente de correção C_b (ou variantes) é adotado em diversas normas do mundo, inclusive na NBR 8800:1986. Com tal coeficiente, a formulação desenvolvida para um determinado carregamento pode ser adaptada para carregamentos mais complexos – para maiores detalhes ver as referências Chen e Lui (1987) e Silva (1992). Para os estudos nesta dissertação, considerou-se sempre o valor de $C_b = 1,00$, que é um valor conservador.

Uma aplicação do uso dessa formulação será apresentada no capítulo 7 desta dissertação.

6. ESTUDOS NUMÉRICOS COM O ANSYS

6.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no desenvolvimento de projetos de engenharia, as simulações numéricas de problemas térmicos são bastante utilizadas. Em muitos casos, os projetistas recorrem a análises térmicas associadas a análises de tensão para o cálculo de tensões térmicas provocadas por expansões ou contrações térmicas.

Foram realizadas para desenvolvimento desta pesquisa simulações numéricas de perfis metálicos I em MEF (Método de Elementos Finitos) submetidos a situações de incêndio natural, nas quais se levaram em consideração: a geometria da estrutura, as propriedades dos materiais (condutividade térmica, calor específico, densidade) e uma tabela de temperatura para definição de propriedades variáveis com a temperatura. No caso, foram realizadas análises das temperaturas ao longo do tempo do incêndio em cada parte da seção transversal da viga.

Os perfis foram submetidos à análise no ANSYS (2006) (Analysis System – Programa Computacional em Elementos Finitos). Perfis estes escolhidos por intermédio de uma pesquisa na literatura “ESTRUTURAS DE AÇO NO BRASIL”, onde se realizou um estudo dos perfis com seção “I” mais utilizados como vigas nas obras em estruturas de aço relatadas e construídas no Brasil. Com base neste levantamento, foram escolhidos quatro tipos de perfis que serão apreciados com o intuito de validar e expor os resultados práticos do comportamento dessas geometrias quando submetidos a situações de incêndio natural. São estes:

Tabela 6.1 – Perfis e características.

Perfil	Massa (m) kg/m	Altura (h) mm	Área (A) cm ²	Alma		Mesa	
				(t _o) mm	(h _o) mm	(t _f) mm	(b _f) mm
CVS 300x113	113	300	143,9	12,5	255	22,4	250
CVS 500x250	249,9	500	318,4	22,4	437	31,5	350
CVS 600x292	292,2	600	372,3	22,4	537	31,5	400
VS 700x166	166,4	700	212,0	8,0	650	25,0	320

6.2. SOFTWARE ANSYS

O ANSYS é um software computacional em elementos finitos, desenvolvido pelo Dr. John Swanson e sua empresa, a Swanson Analysis System Incorporated, em 1970, aplicável aos mais diversos campos da ciência e de grande aplicabilidade em todos os campos da engenharia, como estruturas, eletromagnética, elétrica, mecânica, térmica, fluidos, etc. Por ser um programa de vasta aplicabilidade, passou a ser bastante utilizado também em estudos acadêmicos de universidades. O ANSYS apresenta características próprias para investigar como sistemas planejados trabalharão de acordo com suas condições de funcionamento, bem como determina os projetos apropriados dando condições para trabalharem dentro dos limites de utilização.

Dentre suas diversas possibilidades de aplicação, o programa desenvolve problemas dos tipos:

- Análises estáticas ou dinâmicas (Modal, Harmônica, Transiente, Espectral);
- Térmicos (Condução, Conveccção, Radiação);
- Eletromagnéticos (Eletrostática, Condução de corrente, Eletromagnetismo, Simulação de circuitos, etc.);
- Mecânica dos fluidos (Características dos fluidos);
- Contato;
- Mecânica da fratura.

Nesta pesquisa serão analisados problemas térmicos e para este tipo o ANSYS disponibiliza dois tipos de regimes:

- Estacionário, quando as condições de carga são estacionárias e a variação dos efeitos térmicos fora de um dado período é desprezível.
- Transientes, quando as distribuições térmicas e outras grandezas são determinadas sob condições de significativa influência do tempo.

Independente do regime a ser trabalhado, as análises térmicas podem ser lineares, com propriedades dos materiais constantes, ou não lineares, se estas propriedades variarem de acordo com a temperatura.

Geralmente os engenheiros consideram com frequência como precursora que estabelece as condições iniciais do problema de análises transientes as análises térmicas estacionárias, podendo também ser utilizada como o último passo de uma análise transiente desde que todos os efeitos transientes tenham sido reduzidos a ponto de se tornarem desprezíveis. Este tipo de análise pode ser utilizado para definir temperaturas, gradientes térmicos, taxas de fluxo de calor e fluxos de calor em objetos causados por cargas térmicas constantes ao longo do tempo. Já nas análises térmicas transientes, os engenheiros utilizam as temperaturas calculadas como parâmetro inicial para análises estruturais que visam a determinar a evolução das tensões térmicas transientes. As temperaturas e as possíveis variáveis são calculadas pelas análises térmicas transientes com variação ao longo do tempo. Para resolução de análises térmicas transientes, é adotado basicamente o mesmo procedimento de análises térmicas estacionárias, com a diferença de que as cargas existentes trabalham em função do tempo.

Para se gerar uma análise térmica transiente no ANSYS, é preciso seguir três etapas:

- Elaboração do modelo;
- Aplicação das cargas e obtenção da solução;
- Análise da solução.

A primeira etapa de elaboração do modelo envolve a definição da geometria, da geração da malha em elementos finitos do modelo, dos tipos de elementos, das constantes reais dos elementos e das propriedades dos materiais.

A segunda etapa de aplicação das cargas e obtenção da solução é correspondente à definição do tipo de análise (estacionária ou transiente, no caso em estudo opta-se pela transiente), da aplicação das condições iniciais do problema e da colocação de passos de carga. Sabendo que para especificar as cargas das análises térmicas transientes no ANSYS, é preciso dividir em passos de carga a curva carga x tempo e, para cada um destes passos, atribuir um par de valores de carga e tempo.

A terceira etapa de análise de solução é constituída a partir do interesse do usuário, do que se pretende visualizar e das respostas que se quer obter, podendo ser dados primários ou dados derivados. Este último inclui, a partir das temperaturas calculadas, gradientes, fluxos térmicos, temperatura em determinados elementos, taxas de geração de calor, etc. É

possível também definir qual variável deseja visualizar, nos nós, elementos, passos de tempo ou instantes que convém, sendo os resultados apresentados em valores, tabelas ou gráficos.

No caso em estudo, com o intuito de simular o perfil de aço com seção I numa situação de incêndio no ANSYS, escolheu-se a plataforma de trabalho ANSYS/Mechanical. As análises térmicas são desenvolvidas em regime transiente nas seções transversais de perfis I de aço. Em seguida as temperaturas, quando os perfis I de aço ficam submetidos a diversas situações de incêndio, são mapeadas. Pode-se neste tipo de análise calcular a distribuição da temperatura, os valores e variações de grandezas térmicas (distribuições de temperatura, gradientes térmicos, fluxos térmicos, quantidade de calor, etc). A solução em métodos de elementos finitos encontrada via ANSYS determina temperaturas nodais, utilizando-as para calcular outras variáveis térmicas.

Tendo como origem o princípio da conservação da energia, tem-se a equação de balanço térmico representando a base das análises térmicas no ANSYS, partindo dos três modos primários de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação.

O modo convecção é observado como uma carga de superfície nos elementos externos discretizados sujeitos a esta condição. Neste caso, determina-se um coeficiente de troca por convecção e uma temperatura de fluido em contato com a superfície e o programa determina uma taxa de transferência de calor adequada entre o meio e a superfície. No caso de o coeficiente de troca por convecção ser influenciado pela temperatura, é possível especificar uma tabela de temperaturas com seus respectivos valores do coeficiente.

Para o modo radiação chamado de não-linearidades, são disponibilizados quatro tipos de considerações do fenômeno: utilização do elemento de radiação LINK31, consideração de elementos de efeitos de superfície com a opção de radiação (SURF19 em modelos 2D ou SURF22 em 3D), geração de uma matriz de radiação (AUX12) a ser realizada como um super elemento na análise térmica, utilização de contorno de radiação em análises FLOTRAN CFD.

Existem situações em problemas de análises térmicas que, além dos três modos de transferência de calor, é possível considerarem efeitos especiais como geração interna de calor ou mudança de fase (fusão, condensação, evaporação, etc).

6.3. ELEMENTOS

No ANSYS pode-se encontrar um amplo acervo de elementos, podendo ser trabalhado em 1D, 2D e 3D, adequados para diversas situações de análise que o usuário necessite. No caso de análises térmicas, o ANSYS oferece quarenta elementos para análises estacionárias ou transientes.

O tipo de elemento escolhido no acervo disponível pelo ANSYS foi devido a intenção de não tornar o modelo em elementos finitos muito carregado e que pudesse atender à necessidade de analisar os resultados de temperaturas ao longo do tempo de acordo com cada incêndio, bem como visualizar em 2D o perfil de aço e uma camada ou placa de material refratário sobre o perfil de aço (responsável em acentuar a diferença térmica entre os fralges). Portanto, foi escolhido o PLANE55 que se compõe de 4 nós, com um grau de liberdade, que é temperatura nodal. O elemento requer ainda a definição das propriedades do material do perfil (Condutividade térmica – KXX e KYY, Densidade do material – DENS, Calor específico – C). O PLANE 55 pode ser utilizado como um elemento plano ou como um elemento axialsimétrico, ou seja, com simetria axial e com capacidade térmica bidimensional em análises térmicas estacionárias ou transientes.

Na Figura 6.1 é possível observar uma representação da geometria do elemento escolhido e a opção triangular permitida para quando dois nós coincidem.

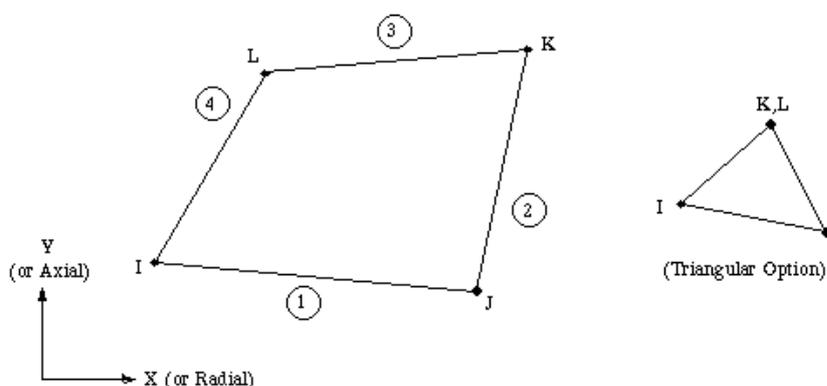


Figura 6.1 – PLANE55 – Sólido térmico de 4 nós 2D

Analisando o sistema de coordenadas local deste elemento, observa-se que o eixo x é orientado ao longo do elemento com sentido do nó I para o nó J. E para utilizar este elemento, é importante observar alguns pontos, como: o elemento deve ter área diferente de zero, deve situar-se em um plano xy e, a partir do elemento quadrangular, pode ser gerado um elemento triangular igualando dois nós, conforme apresentado na Figura 6.1. Já nos casos que envolvem simetria axial, deve-se considerar o eixo y como de simetria.

Para definição das características do problema em análise, o ANSYS disponibiliza chaves de opções, apresentadas no programa como KEYOPT. Para o elemento PLANE55, têm-se as seguintes KEYOPTs disponíveis:

- KEYOPT (1) – Avalia o coeficiente de convecção de acordo com as temperaturas da superfície e o 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

Logo abaixo é apresentado na Tabela 6.2 um resumo das entradas de dados para o elemento PLANE55.

Tabela 6.2 – Resumo de entrada – PLANE55

<i>PROPRIEDADES</i>	<i>ESPECIFICAÇÃO</i>
Nome do elemento	PLANE55
Nós (04 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)
	Fluxo 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	KXX, KYY = Condutividade Térmica (Aço, Concreto, Ar)
	C = Calor Específico (Aço, Concreto, Ar)
	DENS = Densidade (Aço, Concreto, Ar)

6.4. CARGAS TÉRMICAS

É disponibilizado pelo ANSYS em suas análises que as cargas podem ser aplicadas nos nós ou nos elementos. Têm-se dois tipos de cargas:

- Nodais: diretamente associadas aos graus de liberdade dos nós
- Cargas nos elementos: definidas como forças de superfície, de corpo ou inércia, mas sempre ligadas ao elemento. Esta é especificada em diferentes tipos:
 - Temperaturas constantes – graus de liberdades restritos, especificadas nas condições de contorno como nós com temperatura imposta fixa.
 - Convecção – força de superfície aplicada na face externa do modelo com a finalidade de considerar o calor ganho ou perdido em relação a um fluido externo.
 - Fluxos de calor – força de superfície usada quando o total de calor

trocado por uma superfície é conhecido ou calculado por meio de uma análise FLOTRAN CFD.

- Taxa de geração de calor – força de corpo representando o calor gerado dentro de um elemento.

É válido lembrar que o ANSYS impõe restrições e no caso das cargas não é possível considerar ao mesmo tempo o uso de convecção e fluxo de calor. É obrigatória a escolha de apenas uma das cargas, e caso sejam inseridas as duas simultaneamente no mesmo problema em análise, o programa automaticamente considera a última condição aplicada.

6.5. MÉTODO DE CONVERGÊNCIA

O programa ANSYS utiliza na análise não linear o equilíbrio das cargas térmicas durante as interações que se processam para cada passo de carga dado. O número estabelecido de interações de equilíbrio por passo é de 25 interações, suficiente para a maioria das análises térmicas não-lineares. Mas o ANSYS permite ao usuário a possibilidade de determinar as condições de não-linearidade da análise, alterando o grau de precisão desejado na solução. Sendo assim, é possível modificar o número de interações de equilíbrio e a tolerância de convergência. No caso de temperaturas, o programa compara a variação de temperatura de um passo para o imediatamente anterior em todos os nós, de modo que somente após esta variação de temperatura ser menor que o critério de convergência em todos os nós é dado como convergente a solução do problema.

6.6. DISCRETIZAÇÃO

Dentre as opções apresentadas pelo programa ANSYS para geração de malhas, optou-se pela geração de malhas manual. Este procedimento deu mais segurança para o conhecimento da malha utilizada. Cada nó, cada elemento e as propriedades foram gerados por comandos específicos da linguagem do programa ANSYS.

Para facilitar este trabalho, a malha da estrutura do perfil, da placa de material refratário e da camada de ar foi obtida por meio de uma planilha desenvolvida no programa EXCEL. Com base nas características geométricas, a planilha gera como resultado o arquivo de entrada do ANSYS.

Neste arquivo de entrada estão contidos todos os nós e elementos. A planilha gera um arquivo de entrada obviamente para um perfil de aço com seção I, a placa de material refratário sob a mesa superior do perfil e a camada de ar, desde que não ultrapassem as medidas geométricas do conjunto em estudo. Desta forma é mais fácil ter controle da localidade dos nós e elementos, facilitando a análise da estrutura.

7. APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS

7.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados numéricos de perfis submetidos a incêndios com a finalidade de comparar os resultados numéricos de determinação da carga crítica encontrados por meio das formulações analíticas desenvolvidas com os valores de carga crítica obtidos com as recomendações da NBR 14323:1999.

Durante o desenvolvimento desses resultados práticos numéricos, foi possível observar o comportamento dos perfis de aço, bem como as variações de temperatura na seção transversal ao longo do tempo quando submetidos a diferentes tipos de incêndio.

Os resultados práticos numéricos que serão apresentados neste capítulo foram obtidos com ajuda do software ANSYS. Cada perfil foi submetido a um tipo de incêndio natural, conforme Tabela 7.1 abaixo apresentada:

Tabela 7.1 – Perfis e respectivos tipos de incêndios.

Perfil	Tipo de Incêndio	Carga de Incêndio MJ/m²	Grau de Ventilação m^{1/2}
CVS 300 x 113	Incêndio 1	300	0,04
CVS 500 x 250	Incêndio 2	600	0,08
CVS 600 x 292	Incêndio 3	700	0,12
VS 700 x 166	Incêndio 3	700	0,12

Depois de concluídas as análises numéricas no ANSYS, os resultados das temperaturas foram utilizados para determinar a carga crítica em cada perfil em determinada situação de incêndio a que cada um foi exposto.

A carga crítica foi determinada de acordo com a formulação analítica deduzida no capítulo 5, para perfis simétricos geometricamente e com diferenças nos módulos de elasticidade entre as mesas a cada instante, ocasionada pelo aquecimento desigual do perfil durante o incêndio. A solução encontrada é posteriormente comparada com os resultados obtidos

seguinto os procedimentos recomendados pelas normas brasileiras (NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986).

Nos casos a seguir apresentados, considerou-se como sendo a temperatura da mesa a média em três pontos das mesas superior e inferior fornecidas pelo ANSYS nos elementos indicados em cada passo de tempo e para todas as temperaturas foram determinados os fatores de redução $K_{E,\theta}$ do módulo de elasticidade correspondente. Sendo assim, para o cálculo da carga crítica, consideram-se as variações distintas do módulo de elasticidade do aço das mesas do perfil a cada instante de tempo.

Seguindo as determinações das normas, calcula-se a carga crítica para os mesmos instantes que foram calculados na formulação analítica, levando-se em consideração também a redução do módulo de elasticidade de acordo com as temperaturas do perfil no decorrer do incêndio. As temperaturas do perfil consideradas pelas normas são dadas pelas curvas de aquecimento uniforme do aço, apresentadas no capítulo 2.

7.2. Caso 1: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 300x113 – INCÊNDIO 1

Analisa-se inicialmente o perfil de aço com seção transversal tipo “I” - CVS 300x113, cujas propriedades geométricas são:

Tabela 7.2 – Perfil CVS 300 x 113.

Perfil 300x113			
Características do perfil	Símbolo	Unidade	
Altura	d	cm	30,00
Largura da mesa	bf	cm	25,00
Espessura da alma	tw	cm	1,25
Espessura da mesa	tf	cm	2,24
Área da seção transversal	A	cm ²	143,90
Momento de inércia rel. a x-x	I _x	cm ⁴	23.355,00
Módulo de resistência elástica rel. a x-x	W _x	cm ³	1.557,00
Raio de giração em rel. a x-x	r _x	cm	12,74
Módulo de resistência plástica rel. a x-x	Z _x	cm ³	1.758,00
Momento de inércia rel. a y-y	I _y	cm ⁴	5.837,00
Módulo de resistência elástica rel. a y-y	W _y	cm ³	467,00
Raio de giração rel. a y-y	r _y	cm	6,37
Momento de inércia à torção	I _t	cm ⁴	6,90

Para a análise deste perfil, via ANSYS, foi construída uma malha em elementos finitos com 1544 nós e 1394 elementos. Tal malha discretiza o perfil de aço, a placa de material refratário e a camada de ar. Esta camada envolve o perfil e a placa de material refratário apresentando espessura de um milímetro, cujos nós externos acompanham a temperatura de cada incêndio, por meio de curvas temporais. A malha está na Figura 7.1.

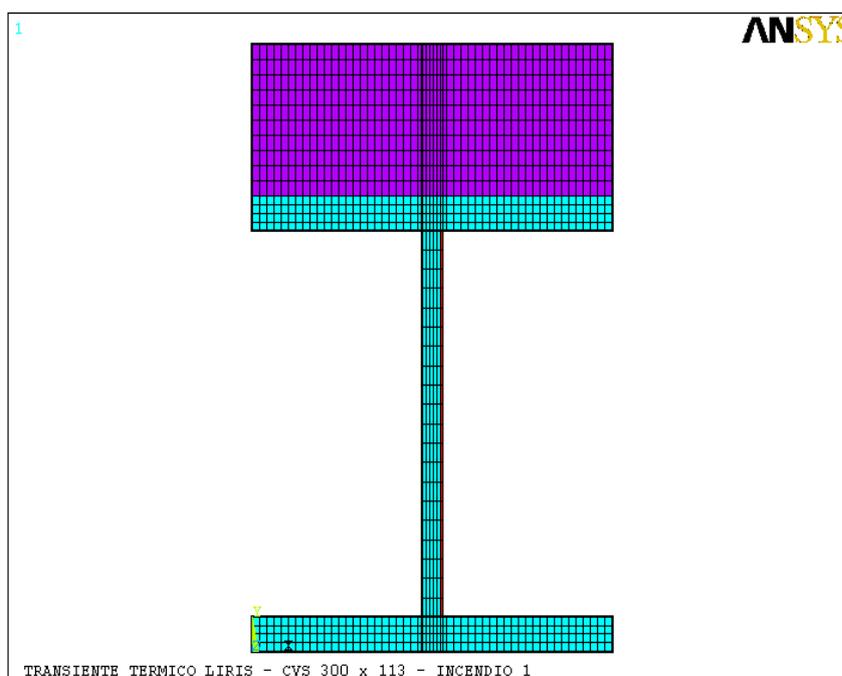


Figura 7.1 – Modelo do perfil “T” CVS 300x113, parede de concreto e camada de ar

Em cada perfil a ser analisado foram escolhidos alguns elementos para estudo, sendo observada a sua localização na seção transversal, de modo que representassem pontos significativos do perfil. Após a escolha dos elementos, foram gerados gráficos com os resultados obtidos, demonstrando o desenvolvimento das temperaturas durante o incêndio.

Para o perfil CVS 300x113 foram escolhidos os elementos: 01 (canto inferior esquerdo da mesa inferior), 138 (centro da mesa inferior), 220 (canto superior direito da mesa inferior), 261 (elemento a um terço da altura da alma), 296 (elemento a dois terço da altura da alma), 331 (canto inferior esquerdo da mesa superior), 468 (centro da mesa superior) e 550 (canto superior direito da mesa superior).

A seguir é apresentada a discretização da seção transversal do perfil com os respectivos elementos escolhidos para análise em destaque.

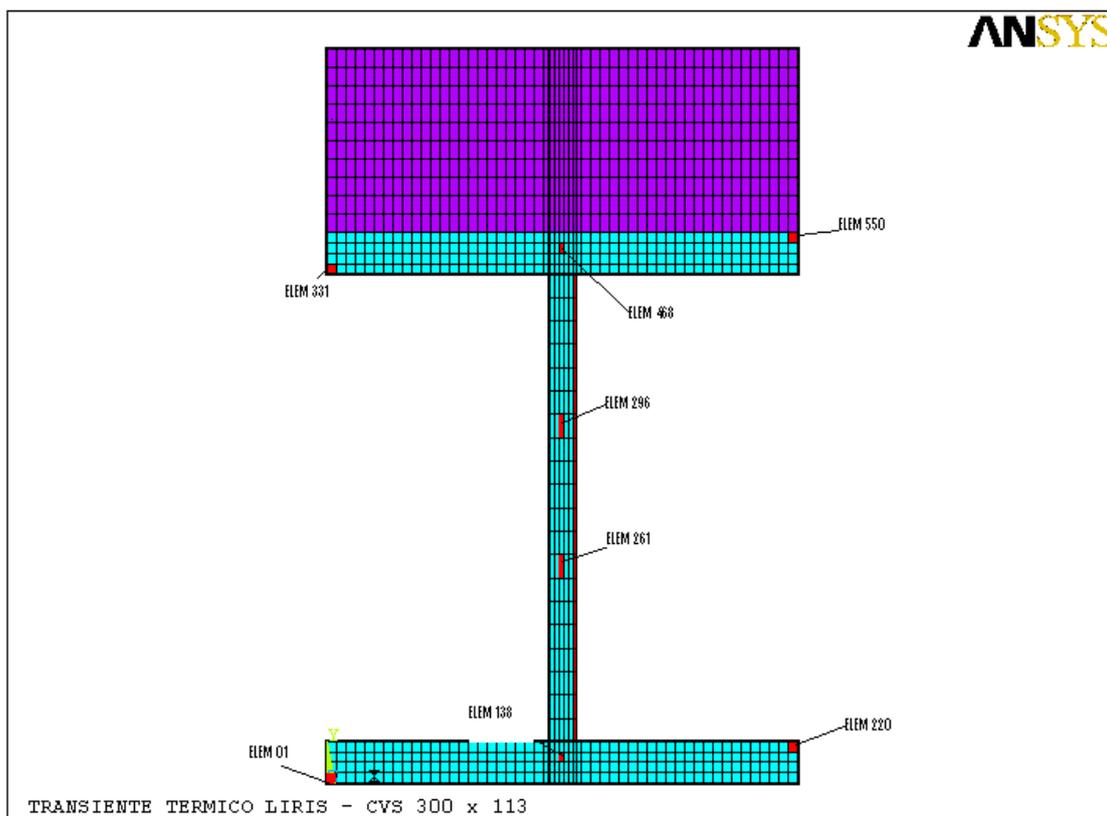


Figura 7.2 – Modelo do perfil “I” CVS 300x113, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.

Neste perfil, as temperaturas dos nós e dos elementos do perfil em análise foram definidas para um incêndio natural, onde são utilizados os dados do incêndio 1. A carga específica considerada é igual a 300 MJ/m^2 , o grau de ventilação é igual a $0,04 \text{ m}^{1/2}$, e, neste caso, a duração do incêndio é de 9900 segundos. A curva deste incêndio foi apresentada no capítulo 2, Figura 2.7. Para a simulação via ANSYS, a duração deste incêndio (9900 segundos) foi dividida em 85 passos com intervalos variando de 15 segundos a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas, sempre se utilizando subpassos de até 0,5 segundo para se testar a convergência da resposta a cada instante.

Apresentam-se a seguir o esquema de localização dos elementos escolhidos para análise na seção transversal do perfil e, em seguida, os gráficos que apresentam o desenvolvimento das temperaturas durante o incêndio para os elementos 01, 138, 220, 261, 296, 331, 468 e 550.

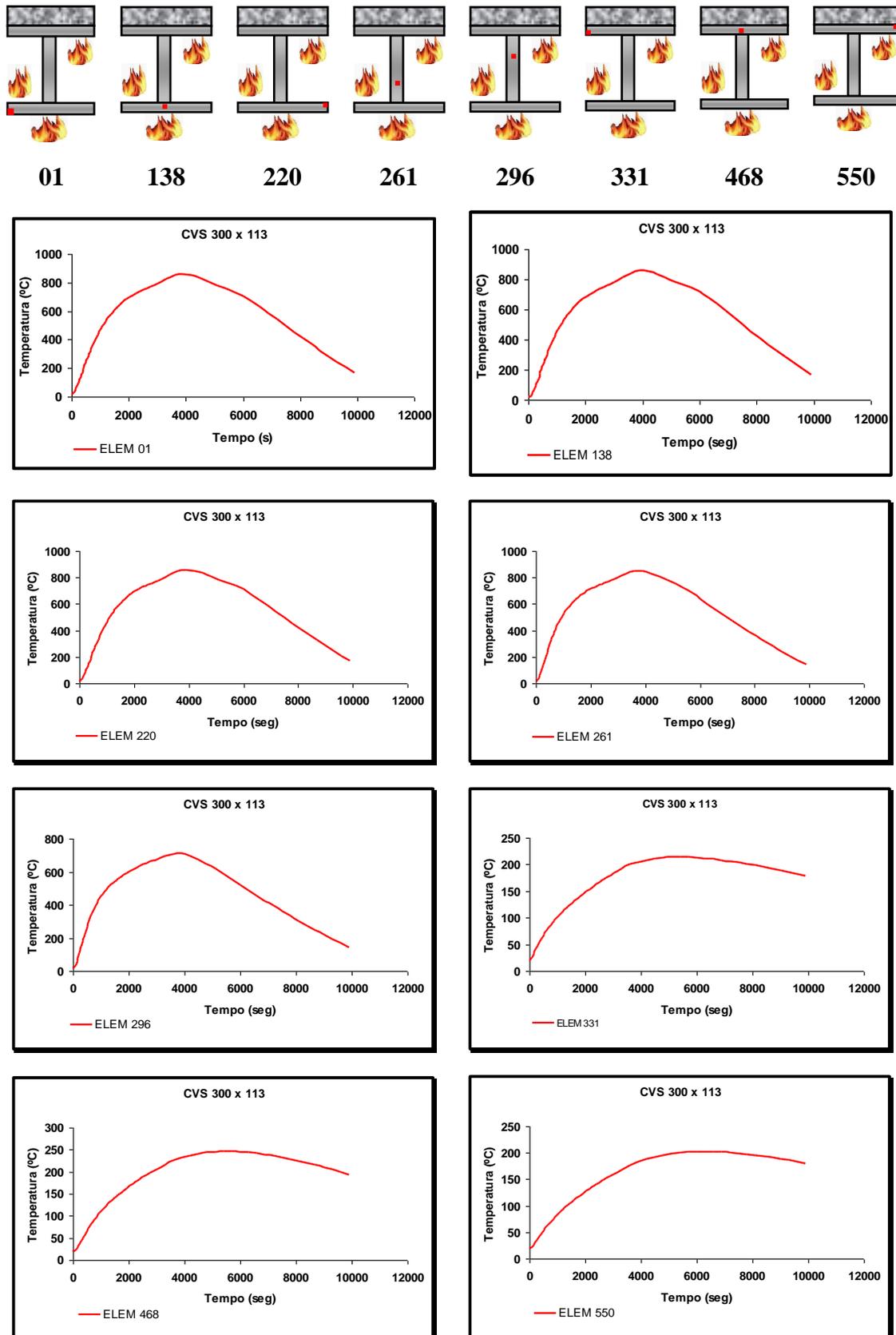


Figura 7.3 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 300 x 113.

Incêndio natural 1 - ANSYS

Na Tabela 7.3 apresentam-se os valores das temperaturas encontradas nos elementos analisados via ANSYS nos instantes mais significativos, observando em destaque as temperaturas mais elevadas dentre esses instantes de tempo, conforme os gráficos apresentados anteriormente.

Tabela 7.3 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 300x113 (°C)

Temperaturas no perfil CVS 300 x 113 (°C)								
Tempo (min)	Elementos							
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
	01	138	220	261	296	331	468	550
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
8	226,34	207,67	221,58	275,67	252,38	65,18	62,72	51,12
14	403,19	386,33	398,49	462,26	404,24	91,38	97,26	74,34
25	606,55	593,28	602,88	641,36	542,44	126,44	141,36	106,71
34	700,03	688,25	696,93	716,58	604,72	149,24	168,19	128,02
50	791,32	778,75	788,53	802,65	676,27	183,14	206,09	159,77
110	630,39	636,89	632,98	555,87	456,31	210,16	241,60	202,15
135	408,96	410,83	410,55	353,42	302,42	198,26	224,43	195,89

A Tabela 7.4 apresenta os valores das temperaturas máximas encontradas nos elementos analisados via ANSYS e o tempo correspondente a estas temperaturas.

Tabela 7.4 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 300x113 (°C)

Temperaturas máximas no perfil CVS 300x113 (°C)								
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
Elementos	01	138	220	261	296	331	468	550
Temperatura (tempo)	858,96 (65min)	857,05 (65min)	858,79 (65min)	849,49 (65min)	710,51 (65min)	213,81 (90min)	245,91 (90min)	202,34 (105min)

A Figura 7.4 mostra a evolução das temperaturas na seção transversal do perfil metálico extraída do ANSYS graficamente.

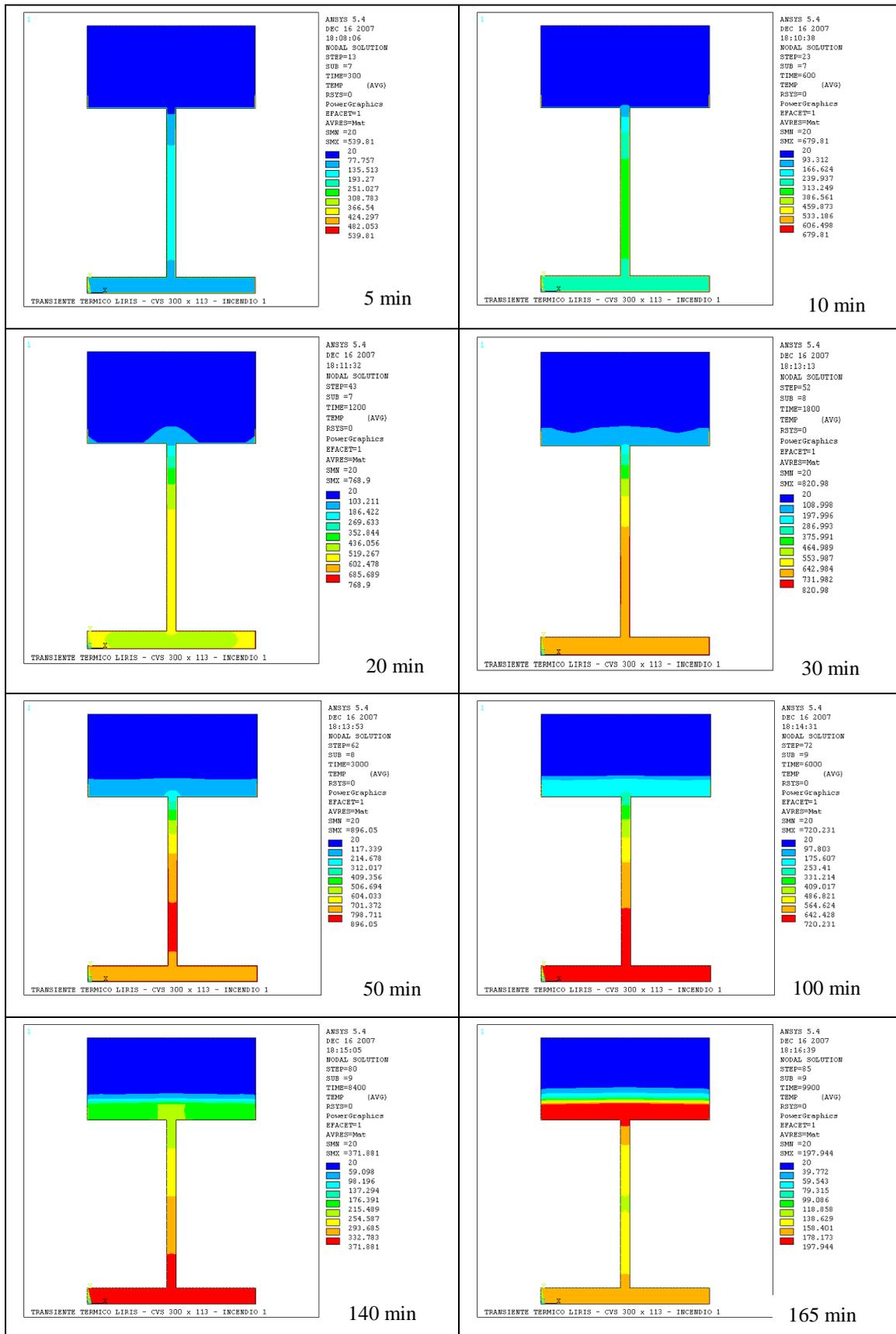


Figura 7.4 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 300 x 113
 Incêndio natural 1 - ANSYS

No gráfico da Figura 7.5 apresenta-se a comparação do desenvolvimento das temperaturas calculadas nos elementos via ANSYS. É observada neste gráfico a diferença entre as temperaturas da mesa inferior quando comparada com a mesa superior, onde esta apresenta temperaturas bem inferiores.

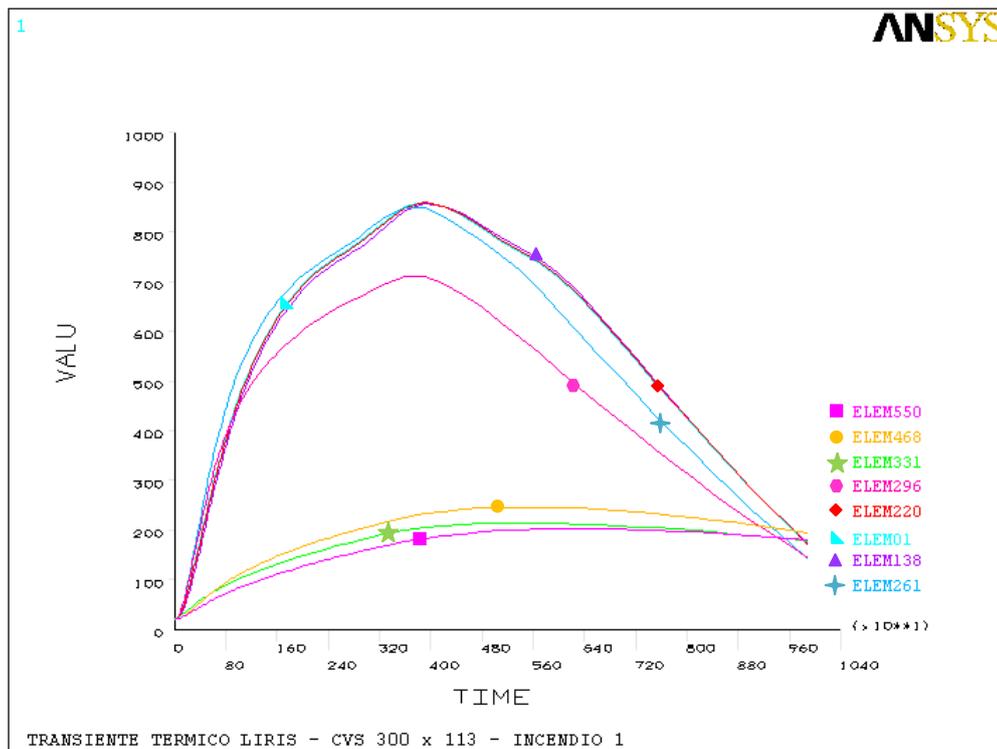


Figura 7.5 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 113

Na Figura 7.6 são mostradas no gráfico, para efeito de comparação, as curvas das temperaturas nos elementos via ANSYS, a temperatura de aquecimento uniforme no aço e a temperatura do incêndio natural, de acordo com a formulação simplificada apresentada no capítulo 2. Nota-se que as temperaturas dos elementos da mesa superior são bem diferentes das temperaturas da mesa inferior, onde seus valores já ficam bem próximos da temperatura apresentada no incêndio natural e as curvas das temperaturas dos elementos da mesa inferior ficam bem próximas da temperatura de aquecimento uniforme no aço.

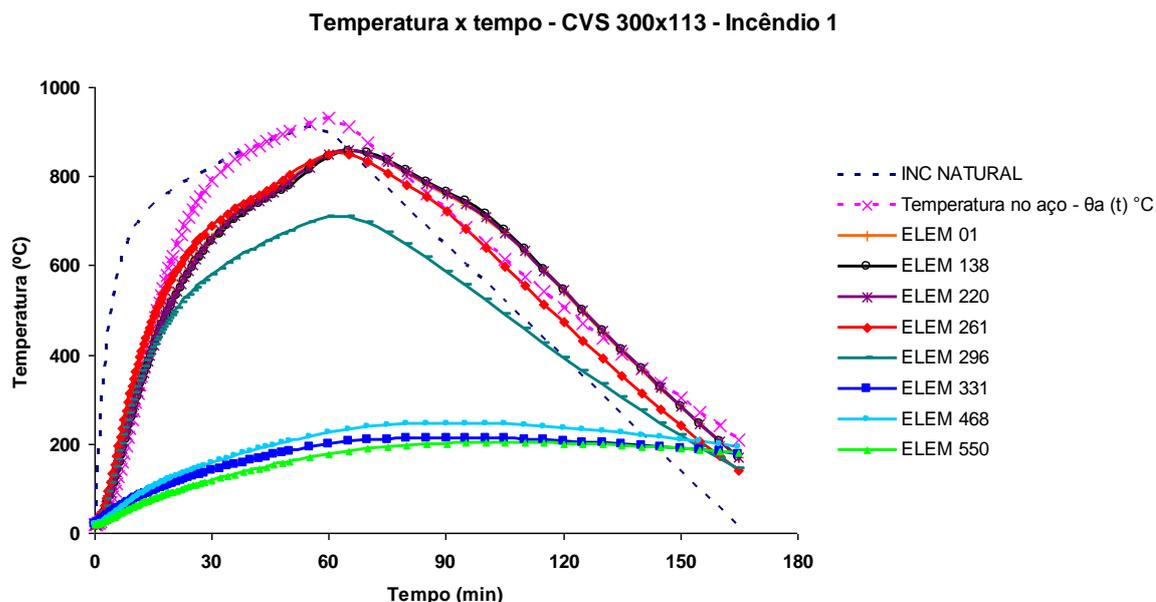


Figura 7.6 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 300 x 113.

7.2.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 300x113 – Incêndio 1

Para o perfil apresentado foram calculadas as cargas críticas de acordo com a formulação analítica apresentada no capítulo 5 e de acordo com as recomendações das normas NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986.

Conforme já explicado, considerou-se, para a formulação analítica, a média das temperaturas calculadas pelo programa ANSYS nas mesas superior e inferior, e calculado um novo módulo de elasticidade em cada mesa e a cada passo de tempo.

Alguns parâmetros precisaram ser traçados e considerados para o cálculo da carga crítica, tanto na formulação analítica como nas recomendações das normas NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986:

- E_0 = módulo de elasticidade do aço = 20.500 KN/cm^2 para temperatura ambiente (considerada 20°C)
- Fator de redução $K_{E,\theta}$ – Conforme NBR 14323:1999
- Fator de redução $K_{Y,\theta}$ – Conforme NBR 14323:1999
- ν = coeficiente de poisson = 0,3

- f_y = tensão de escoamento do aço = 25 kN/cm² para temperatura ambiente (considerada 20°C)
- f_r = tensão residual do aço = 11,50 kN/cm²
- A esbeltez representada por λ deve apresentar valor maior que a esbeltez para início de escoamento λ_r , para caracterizar que a viga esteja em estado de flexão lateral com torção (FLT) em regime elástico.

É necessário definir o comprimento da viga sem travamento lateral para complementar o cálculo da carga crítica. No caso, para este valor, foi considerado o parâmetro de que $\lambda > \lambda_r$. Logo, para este perfil, adotou-se uma viga com comprimento de 22 metros.

As temperaturas médias adotadas para a resolução do cálculo da carga crítica nas mesas superior e inferior são visualizadas na Figura 7.7. Observa-se também na mesma figura as temperaturas do incêndio e a curva de aquecimento uniforme do aço, cujos valores são usados para determinar as cargas críticas quando seguidos os procedimentos das normas técnicas brasileiras (NBR 8800:1986 e NBR 14323:1999).

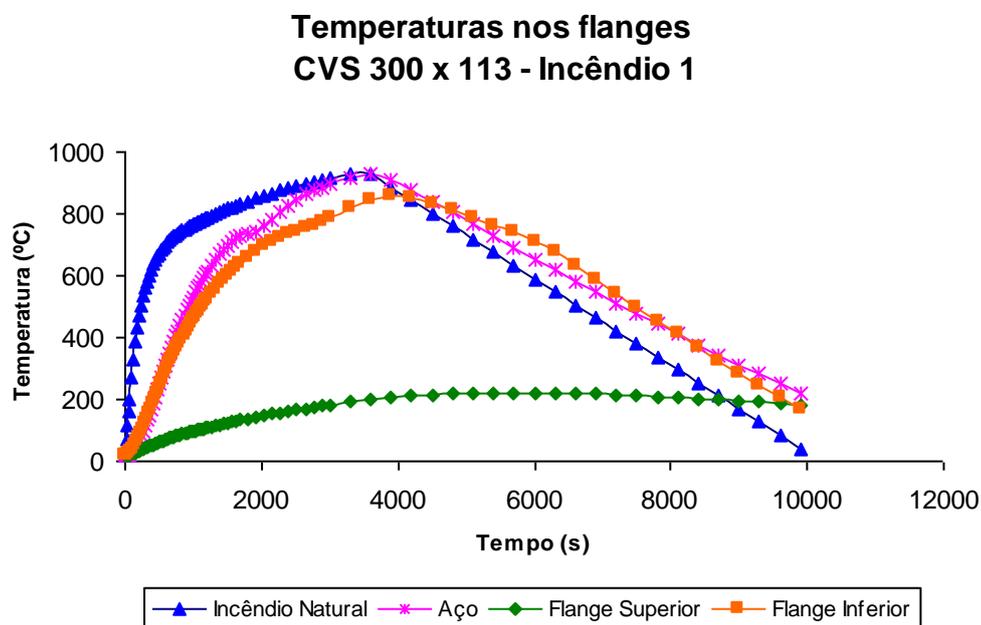


Figura 7.7 – Temperatura das mesas do perfil CVS 300 x 113 – Incêndio 1.

Visualizadas as significativas diferenças entre as temperaturas das mesas superior e inferior durante o incêndio, é válido ressaltar a grande importância para as investigações

térmicas nos perfis e considerar a distribuição não uniforme da temperatura na seção transversal. No gráfico da Figura 7.7, a variação de temperatura entre as mesas superior e inferior foi calculada em todos os passos de tempo e para cada tipo de incêndio.

A carga crítica do perfil CVS 300x113 submetido ao incêndio 1 foi calculada pelo método analítico proposto no capítulo 5 e pela norma brasileira a cada passo de tempo. Logo, abaixo, na Figura 7.8, apresenta-se o gráfico comparativo entre as duas soluções e a tabela com os valores calculados a cada passo de tempo.

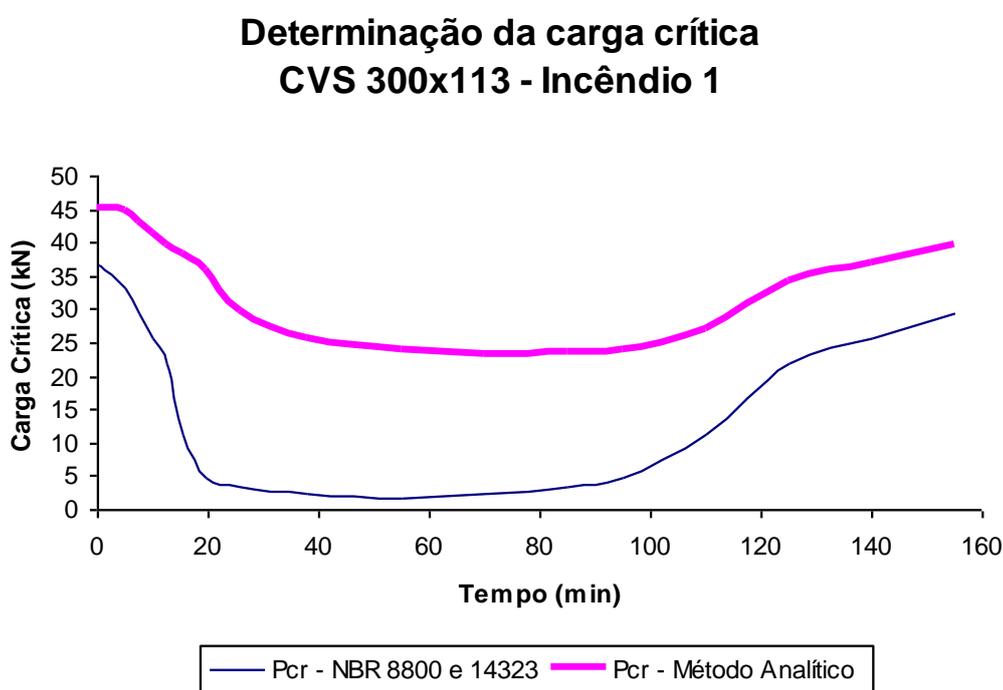


Figura 7.8 – Carga crítica para o perfil CVS 300 x 113 – Incêndio 1.

Comparam-se na Tabela 7.5 os resultados práticos numéricos da carga crítica calculada pelo método analítico proposto e pela norma.

Observa-se que para o cálculo da carga crítica nesta pesquisa, seguido pelos procedimentos normativos, foi considerado o $C_b = 1,00$, ou seja, em nenhum caso utilizou-se margem de correção para os resultados e considerou-se o f sobre o perfil.

Tabela 7.5 – Cargas críticas para o perfil CVS 300x113 (kN)

Tempo (min)	P_{cr} - NBR 8800:1986 e 14323:1999	P_{cr} - Método Analítico
0,00	36,81	45,11
0,25	36,81	45,11
5,00	33,13	44,74
7,50	29,45	43,07
10,00	25,77	41,39
12,50	22,09	39,88
15,50	11,41	38,30
19,50	4,79	35,82
26,00	3,31	29,91
38,00	2,48	25,80
55,00	1,66	24,13
70,00	2,48	23,40
85,00	3,31	23,75
95,00	4,79	24,13
110,00	11,41	26,98
125,00	22,09	34,18
140,00	25,77	37,10
155,00	29,45	39,88

Analisando-se os resultados apresentados, é visualizado claramente que o cálculo da carga crítica proposta pelas normas brasileiras é extremamente conservador neste caso quando comparado com a formulação analítica proposta nesta dissertação, mostrando valores sempre inferiores aos obtidos pelo método analítico proposto.

Observa-se que o que influencia na diferença das resoluções é que na formulação analítica proposta leva-se em conta o aquecimento não uniforme do perfil, porquanto, na situação da mesa comprimida, estar parcialmente protegida por uma placa de material refratário, faz com que haja um aumento na resistência do perfil. Devido a isso, percebe-se que no início do incêndio as cargas críticas apresentam valores bem próximos, mas quando ocorre o aumento da temperatura, esses valores se distanciam excessivamente.

7.3. Caso 2: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 500x250 – INCÊNDIO 2

No segundo caso, analisa-se o perfil de aço com seção transversal tipo “I” - CVS 500x250, cujas propriedades geométricas são:

Tabela 7.6 – Perfil CVS 500x250.

Perfil 500x250			
Características do perfil	Símbolo	Unidade	
Altura	d	cm	50,00
Largura da mesa	bf	cm	35,00
Espessura da alma	tw	cm	2,24
Espessura da mesa	tf	cm	3,15
Área da seção transversal	A	cm ²	318,40
Momento de inércia rel. a x-x	I _x	cm ⁴	136.755,00
Módulo de resistência elástica rel. a x-x	W _x	cm ³	5.470,00
Raio de giração em rel. a x-x	r _x	cm	20,72
Módulo de resistência plástica rel. a x-x	Z _x	cm ³	6.235,00
Momento de inércia rel. a y-y	I _y	cm ⁴	22.550,00
Módulo de resistência elástica rel. a y-y	W _y	cm ³	1.289,00
Raio de giração rel. a y-y	r _y	cm	8,42
Momento de inércia à torção	I _t	cm ⁴	9,43

A malha construída em elementos finitos no ANSYS consta de 1724 nós e 1554 elementos para o perfil de aço, a placa de material refratário e a camada de ar. Esta camada envolve o perfil e a placa de material refratário, apresentando espessura de um milímetro, cujos nós externos acompanham a temperatura de cada incêndio, por meio de curvas temporais - conforme pode ser visto na Figura 7.9.

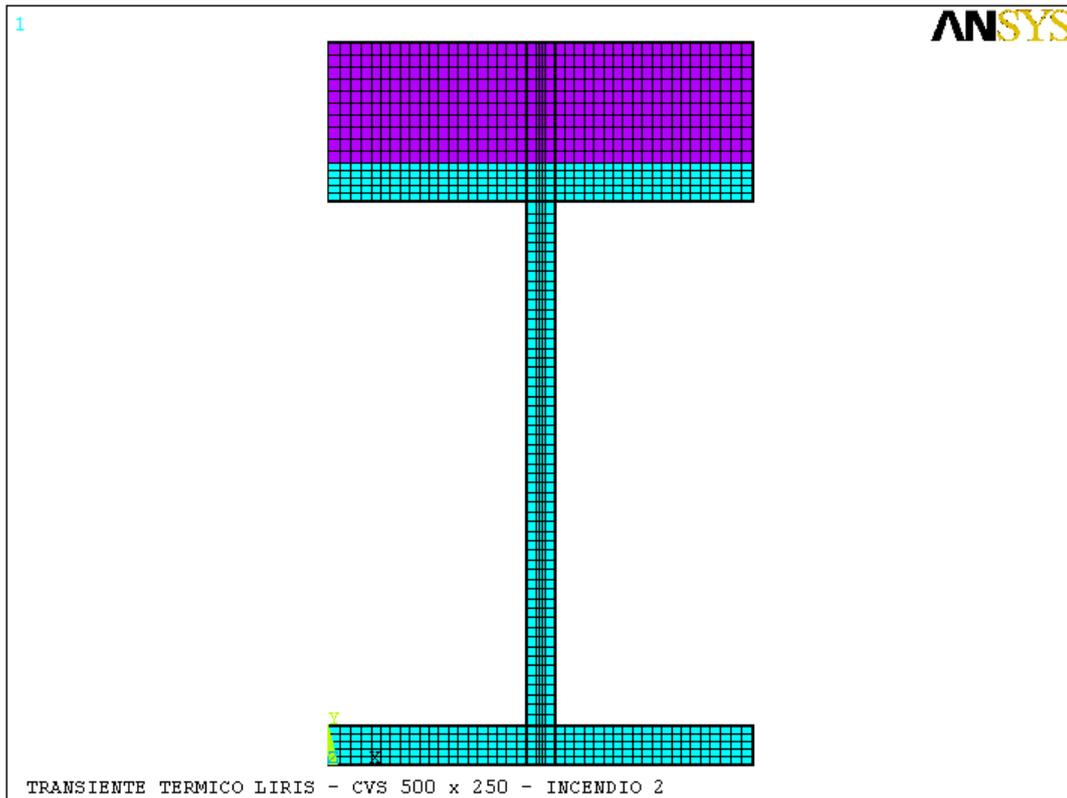


Figura 7.9 – Modelo do perfil “I” CVS 500x250, placa de material refratário e camada de ar.

Assim como no caso anterior, foram escolhidos para análise alguns elementos, sendo observada a sua localização na seção transversal, de modo que representassem pontos significativos do perfil.

Foram plotados gráficos que apontam o desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os elementos 01 (canto inferior esquerdo da mesa inferior), 118 (centro da mesa inferior), 235 (canto superior direito da mesa inferior), 333 (elemento a um terço da altura da alma), 423 (elemento a dois terço da altura da alma), 516 (canto inferior esquerdo da mesa superior), 633 (centro da mesa superior) e 750 (canto superior direito da mesa superior).

A seguir é apresentada a discretização da seção transversal do perfil com os respectivos elementos escolhidos para análise em destaque.

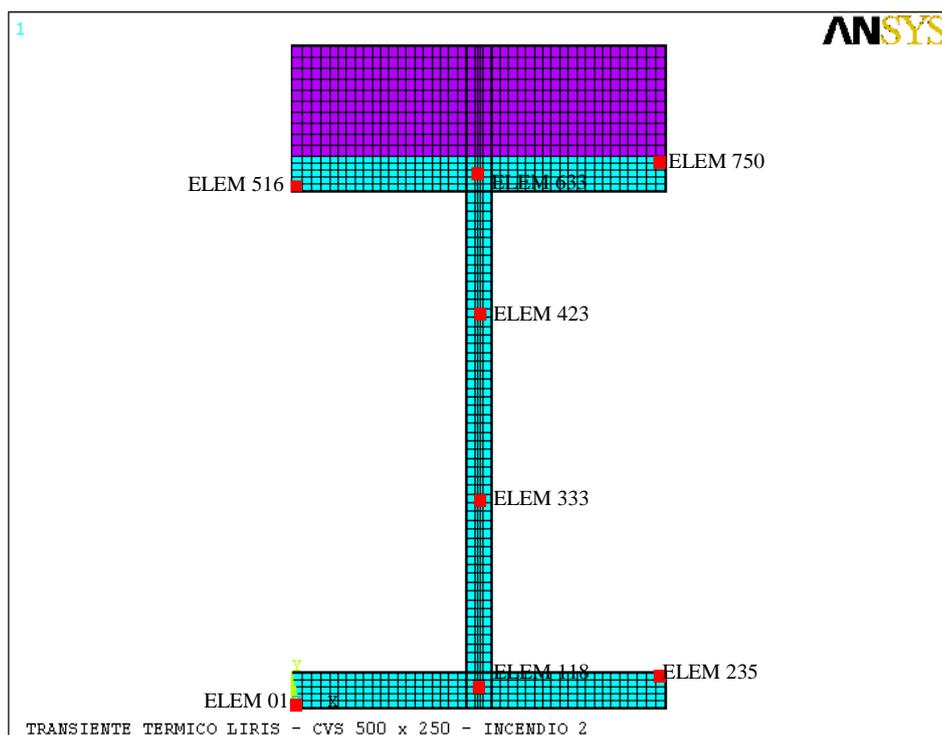


Figura 7.10 – Modelo do perfil “I” CVS 500x250, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.

No perfil CVS 500x250, as temperaturas dos nós e elementos do perfil em análise foram definidas para um incêndio natural, no qual, são utilizados os dados do incêndio 2, em que a carga específica considerada é igual a 600 MJ/m^2 , o grau de ventilação é igual a $0,08 \text{ m}^{1/2}$. Para este caso, o incêndio tem duração de 7440 segundos, o qual, na simulação por intermédio do ANSYS, a duração do incêndio foi dividida em 80 passos com intervalos variando de 15 segundos a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas, sempre se utilizando subpassos de até 0,5 segundo para se testar a convergência da resposta a cada instante.

Assim como no caso anterior, apresentam-se a seguir esquemas da seção transversal do perfil em que se visualiza a localização dos elementos escolhidos para análise e, em seguida, os gráficos que apresentam o desenvolvimento das temperaturas durante o incêndio para os elementos 01, 118, 235, 333, 423, 516, 633 e 750.

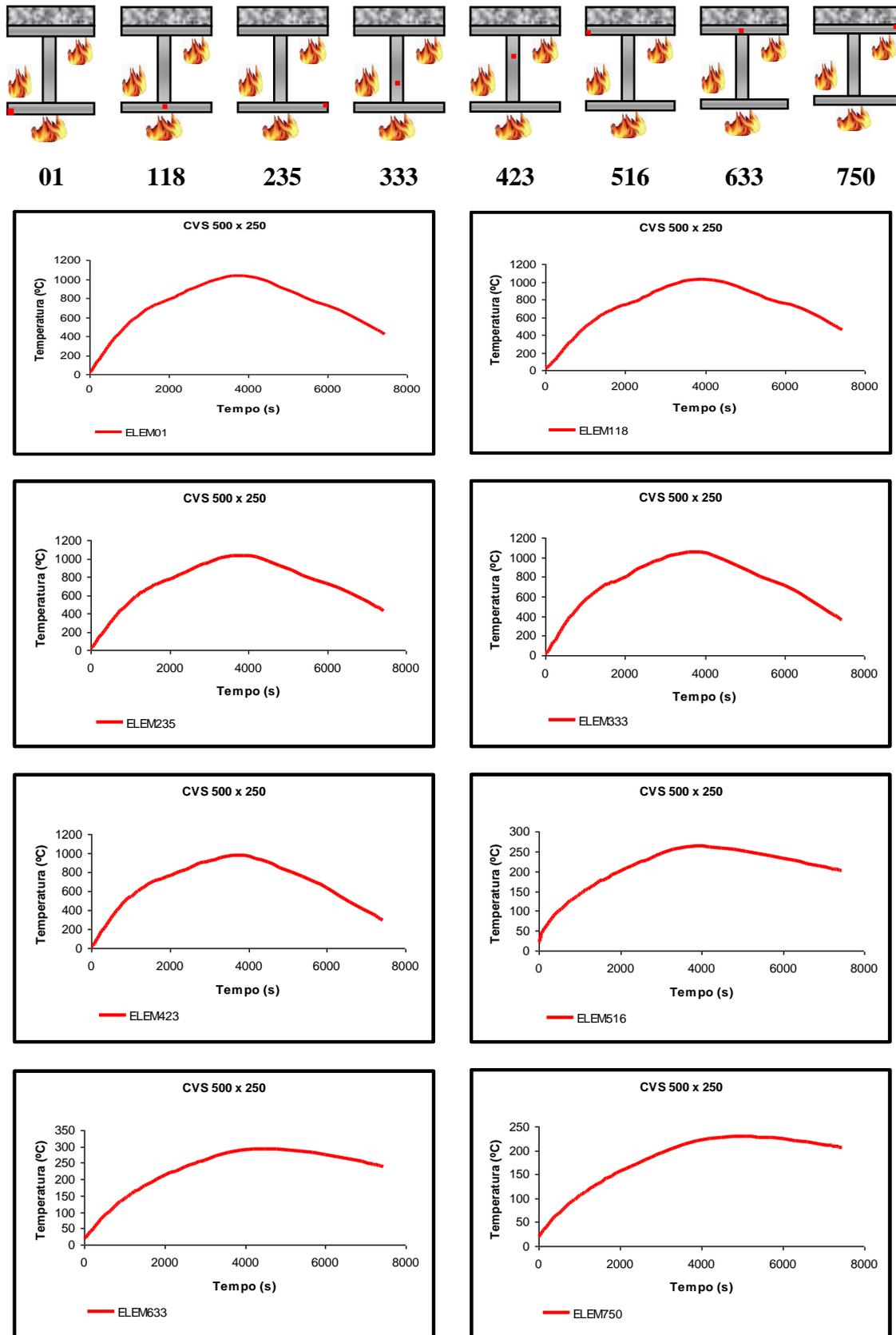


Figura 7.11 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 500x250
Incêndio natural 2 - ANSYS

Valores de temperaturas obtidas via ANSYS para os elementos escolhidos para análise durante o desenvolvimento do incêndio podem ser observados na Tabela 7.7, bem como seus valores máximos para cada um destes elementos e seu tempo correspondente a cada temperatura se encontram na Tabela 7.8.

Tabela 7.7 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 500x250 (°C)

Temperaturas no perfil CVS 500x250 (°C)								
Tempo (min)	Elementos							
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
	01	118	235	333	423	516	633	750
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
8	295,97	246,07	285,59	306,80	302,33	98,71	85,09	67,89
12	418,41	365,68	407,55	438,29	426,31	120,31	112,88	86,14
16	521,94	469,74	511,00	545,04	525,18	138,69	136,71	101,91
20	607,92	557,24	597,12	630,62	604,06	154,88	157,33	115,97
30	751,19	709,92	741,03	760,49	731,22	189,65	199,19	146,38
60	1035,76	1018,62	1032,85	1050,96	978,12	261,68	282,63	213,45
124	423,93	454,59	429,78	363,41	298,77	201,47	238,29	206,00

Tabela 7.8 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 500x250 (°C)

Temperaturas máximas no perfil CVS 500x250 (°C)								
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
Elementos	01	118	235	333	423	516	633	750
Temperatura	1035,76	1031,87	1036,13	1050,96	978,12	262,28	293,61	228,51
(tempo)	(60min)	(65min)	(65min)	(60min)	(60min)	(65min)	(75min)	(85min)

Na Figura 7.12 é representada a evolução das temperaturas na seção transversal do perfil de aço, mapeada por meio do ANSYS no modelo analisado.

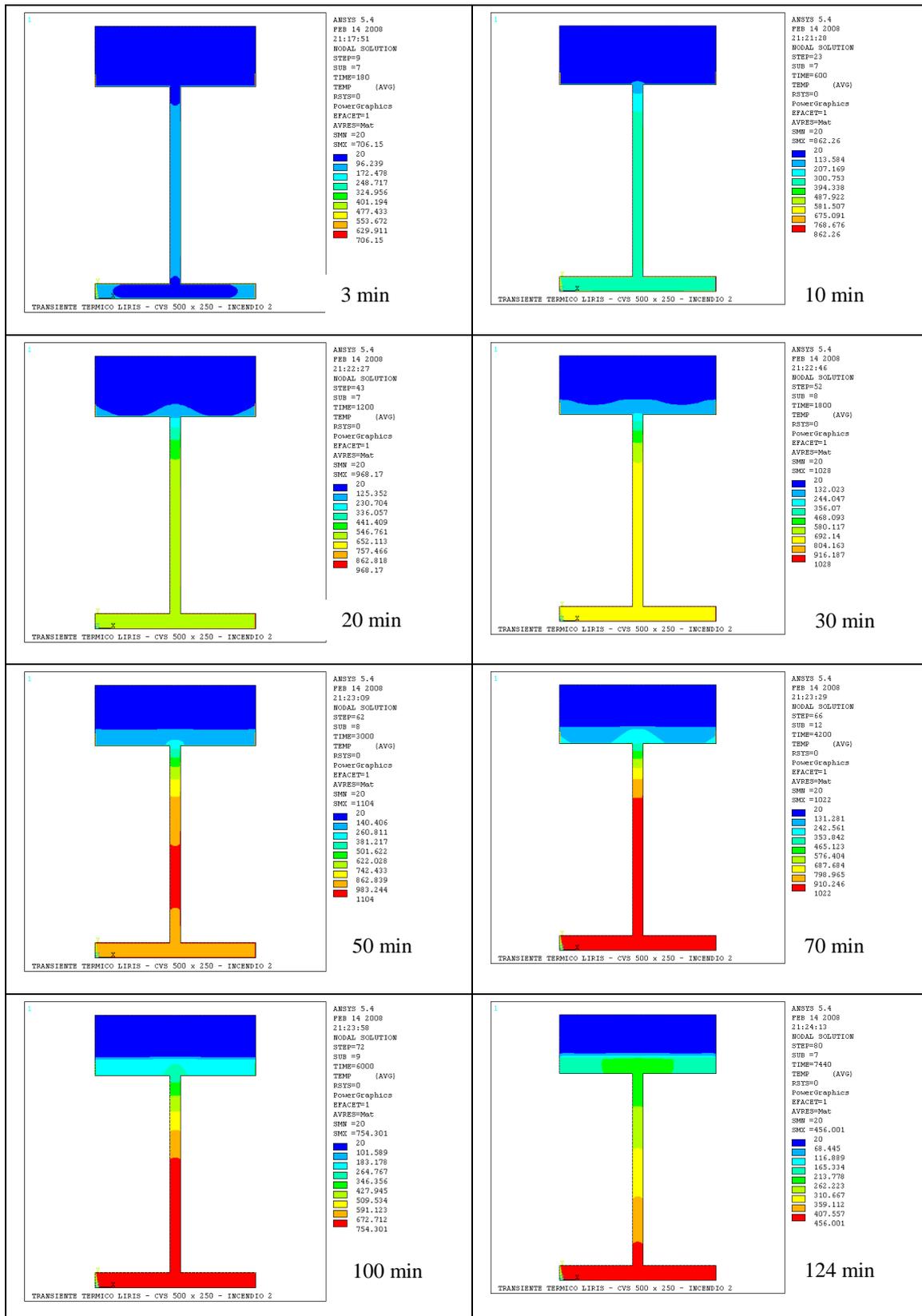


Figura 7.12 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 500x250
Incêndio natural 2 - ANSYS

No gráfico da Figura 7.13 é apresentado o desenvolvimento das temperaturas obtidas nos elementos via ANSYS. Observa-se no gráfico, assim como no caso anterior, que é explícita a diferença de temperaturas entre os elementos da mesa inferior quando comparada com a mesa superior. As curvas de temperatura dos elementos da mesa inferior e da alma do perfil apresentaram comportamentos próximos, mas com temperaturas máximas inferiores.

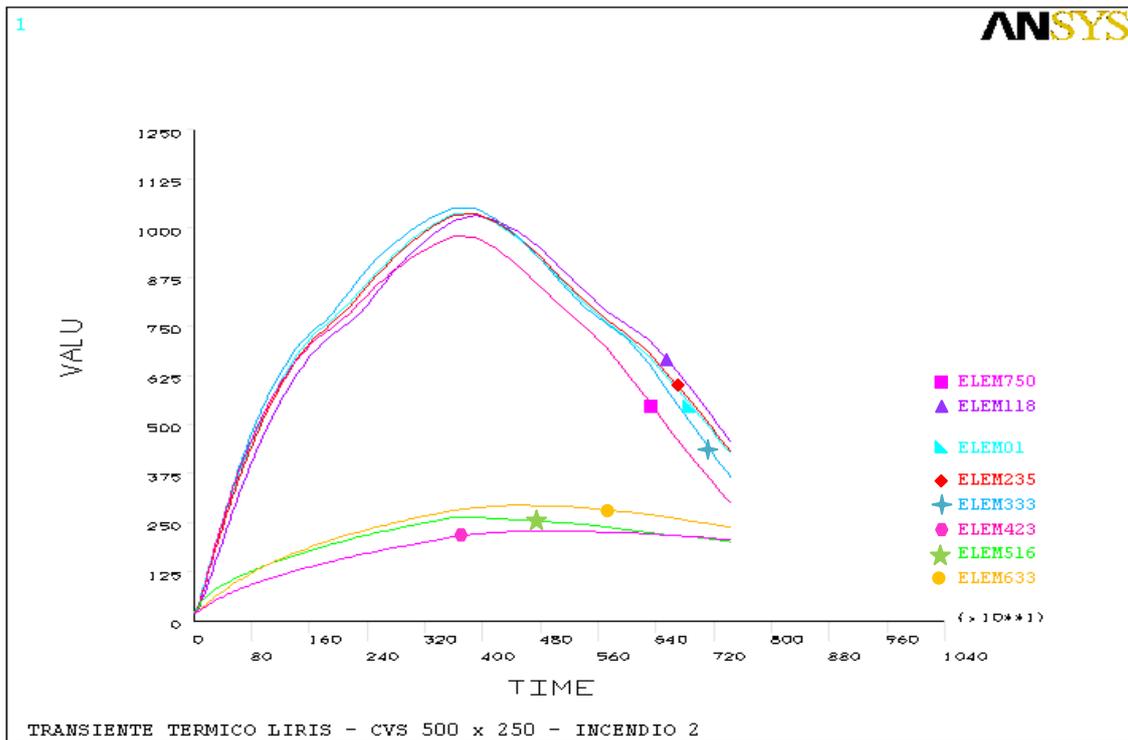


Figura 7.13 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 500x250

A Figura 7.6 apresenta o gráfico comparativo temperatura x tempo para os elementos 01, 118, 235, 333, 423, 516, 633 e 750, com as curvas de temperatura no incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço apresentada no capítulo 2 desta dissertação.

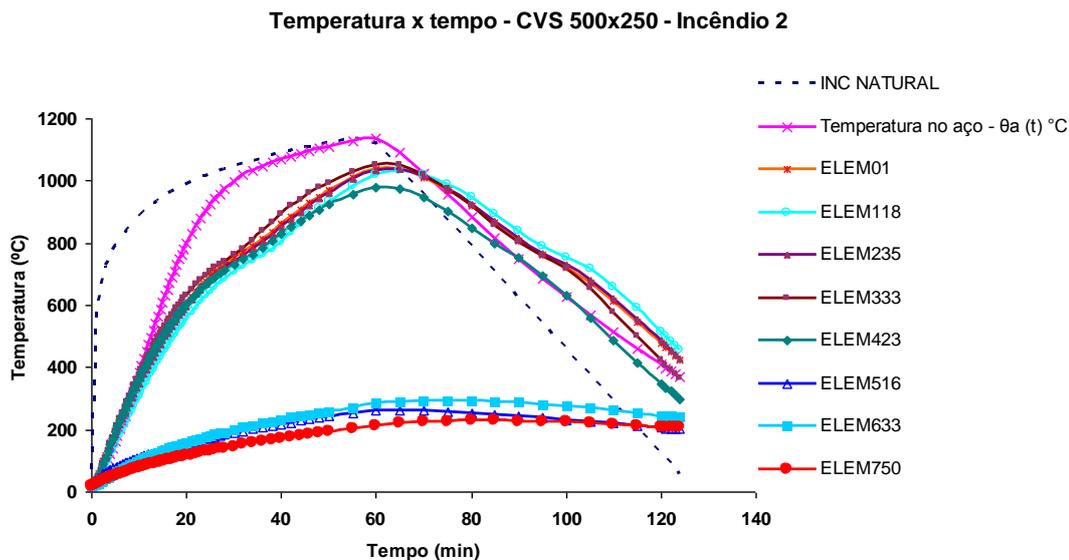


Figura 7.14 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 500x250.

7.3.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 500x250 – Incêndio 2

Realizado o mapeamento da temperatura no perfil CVS 500x250 para o incêndio 2, e considerados os parâmetros apresentados no item 7.2.1, chega-se à etapa de determinação da carga crítica pela formulação analítica proposta no capítulo 5 e de compará-la com os resultados encontrados pelo método proposto pela NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986. O comprimento destravado da viga a ser utilizado no cálculo foi determinado pelo mesmo procedimento adotado para o perfil CVS 300x113, no caso, $\lambda > \lambda_r$ foi de 26 metros.

As temperaturas médias nas mesas do perfil foram plotadas, juntamente com a curva de aquecimento uniforme do aço e a curva de incêndio natural, em gráfico apresentado na Figura 7.15. Temperaturas estas, do incêndio natural e aço, cujos valores são utilizados no cálculo para determinação da carga crítica. Observa-se também que as temperaturas da mesa inferior, que sofre uma ação mais incisiva no incêndio, são significativamente inferiores aos valores da curva de aquecimento uniforme do perfil.

Temperaturas nos flanges CVS 500x250 - Incêndio 2

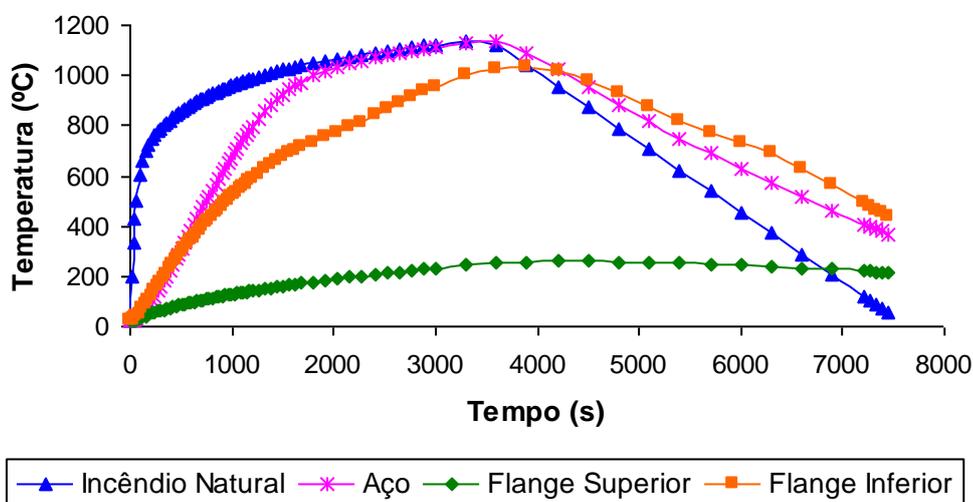


Figura 7.15 – Temperatura das mesas do perfil CVS 500 x 250 – Incêndio 2.

Os parâmetros utilizados na determinação analítica e no cálculo recomendado por norma da carga crítica são os mesmos indicados para o caso anterior, item 7.2.1 (Perfil CVS 300x113), cujas características geométricas foram citadas anteriormente.

O gráfico da Figura 7.16 corresponde à evolução da carga crítica calculada pelos dois métodos aqui abordados para a simulação de incêndio utilizada na aplicação desta dissertação.

Determinação da carga crítica CVS 500 x 250 - Incêndio 2

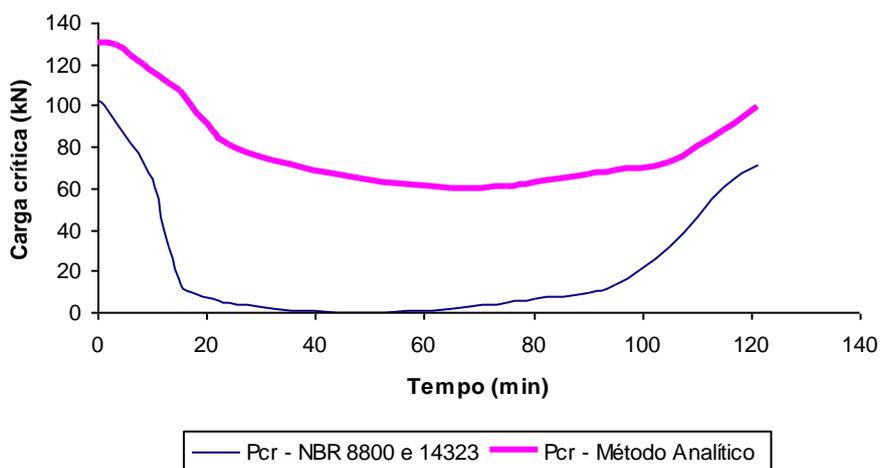


Figura 7.16 – Carga crítica para o perfil CVS 500 x 250 – Incêndio 2

Os resultados expressos no gráfico acima e na Tabela 7.9 apontam um comportamento extremamente conservador da norma brasileira. Percebe-se que a não distribuição uniforme de temperatura compromete o resultado da carga crítica quando a viga se encontra submetida a altas temperaturas.

Tabela 7.9 – Cargas críticas para o perfil CVS 500x250 (kN)

Tempo (min)	P_{cr} - NBR 8800:1986 e 14323:1999	P_{cr} - Método Analítico
0,00	102,08	130,18
0,25	102,08	130,18
3,50	91,87	129,07
6,00	81,66	124,09
8,50	71,46	119,28
10,50	61,25	115,66
13,00	31,64	110,71
15,00	13,27	107,02
17,50	9,19	99,36
21,00	6,89	87,51
24,00	4,59	81,45
32,00	2,30	73,83
48,00	0,00	64,90
65,00	2,30	59,87
75,00	4,59	61,08
80,00	6,89	62,39
90,00	9,19	66,28
95,00	13,27	68,38
105,00	31,64	72,37
115,00	61,25	88,10
121,00	71,46	99,78

A partir da formulação analítica para calcular a carga crítica deduzida no capítulo 5 com mesas submetidas a aquecimentos desiguais, é possível elaborar tabelas práticas com tipos de incêndios, diversas características geométricas de perfis I, valores da carga crítica relacionados a valores fixados de temperatura das mesas superior e inferior, podendo variar também o comprimento destravado da viga. Tabelas essas que podem ser práticas ao profissional quando precisar verificar uma situação prática pré-definida, facilitando também quando precisar estimar a carga crítica de uma viga de uma estrutura já executada. Referida tabela pode trazer ao projetista praticidade quando lhe for necessário recorrer a métodos numéricos a cada situação em que se desejar verificar a carga crítica em diversas situações.

7.4. Caso 3: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 600x292 – INCÊNDIO 3

O terceiro perfil a ser analisado nesta dissertação é o CVS 600x292, cujas propriedades geométricas são:

Tabela 7.10 – Perfil CVS 600 x 292.

Perfil 600x292			
Características do perfil	Símbolo	Unidade	
Altura	d	cm	60,00
Largura da mesa	bf	cm	40,00
Espessura da alma	tw	cm	2,24
Espessura da mesa	tf	cm	3,15
Área da seção transversal	A	cm ²	372,30
Momento de inércia rel. a x-x	I _x	cm ⁴	232.726,00
Módulo de resistência elástica rel. a x-x	W _x	cm ³	7.758,00
Raio de giração em rel. a x-x	r _x	cm	25,00
Módulo de resistência plástica rel. a x-x	Z _x	cm ³	8.778,00
Momento de inércia rel. a y-y	I _y	cm ⁴	33.650,00
Módulo de resistência elástica rel. a y-y	W _y	cm ³	1.683,00
Raio de giração rel. a y-y	r _y	cm	9,51
Momento de inércia à torção	I _t	cm ⁴	10,73

A malha deste perfil está construída por elementos finitos do ANSYS, constando um total de 2224 nós e 1986 elementos, incluindo nesta malha o perfil de aço, a placa de material refratário e a camada de ar. Tal camada envolve o perfil e a placa de material refratário, apresentando espessura de um milímetro, cujos nós externos acompanham a temperatura de cada incêndio, por meio de curvas temporais – ver Figura 7.17.

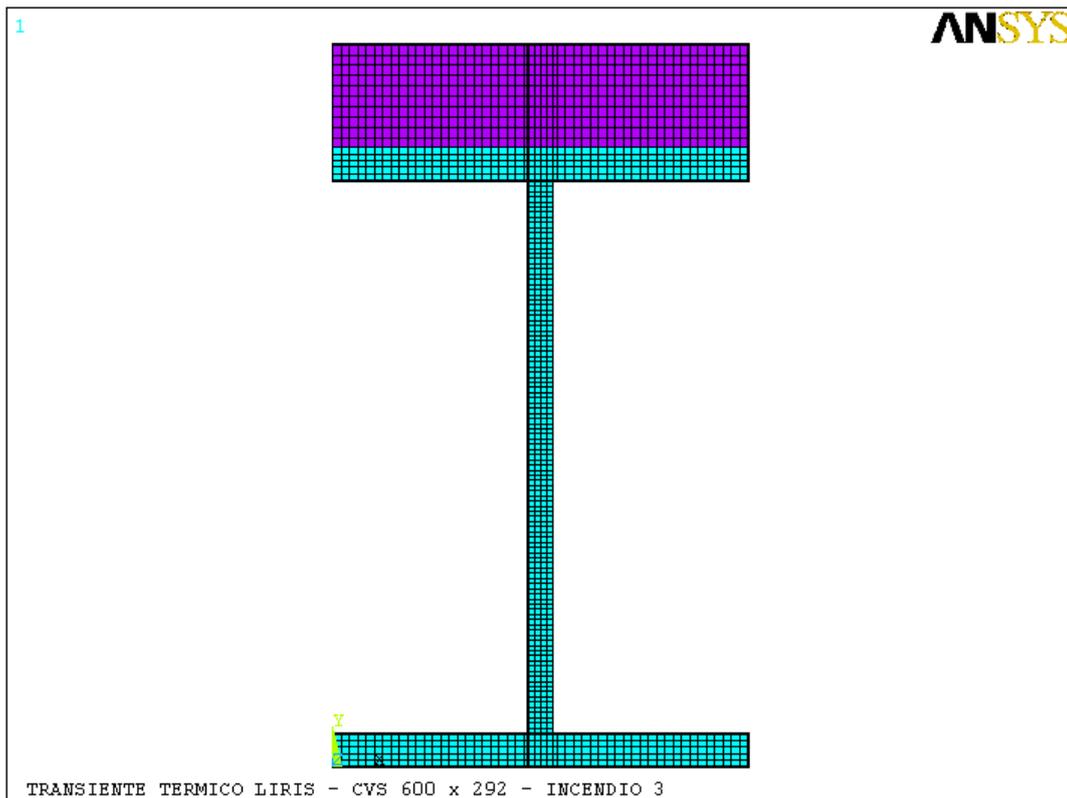


Figura 7.17 – Modelo do perfil “I” CVS 600x292, placa de material refratário e camada de ar.

Assim como nos casos anteriores, foram escolhidos para análise alguns elementos, sendo observadas a sua localização na seção transversal, de modo que representassem pontos significativos do perfil. Foram plotados gráficos que apontam o desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os elementos 01 (canto inferior esquerdo da mesa inferior), 190 (centro da mesa inferior), 270 (canto superior direito da mesa inferior), 421 (elemento a um terço da altura da alma), 561 (elemento a dois terço da altura da alma), 707 (canto inferior esquerdo da mesa superior), 896 (centro da mesa superior) e 976 (canto superior direito da mesa superior).

A seguir é apresentada a discretização da seção transversal do perfil com os respectivos elementos escolhidos para análise em destaque.

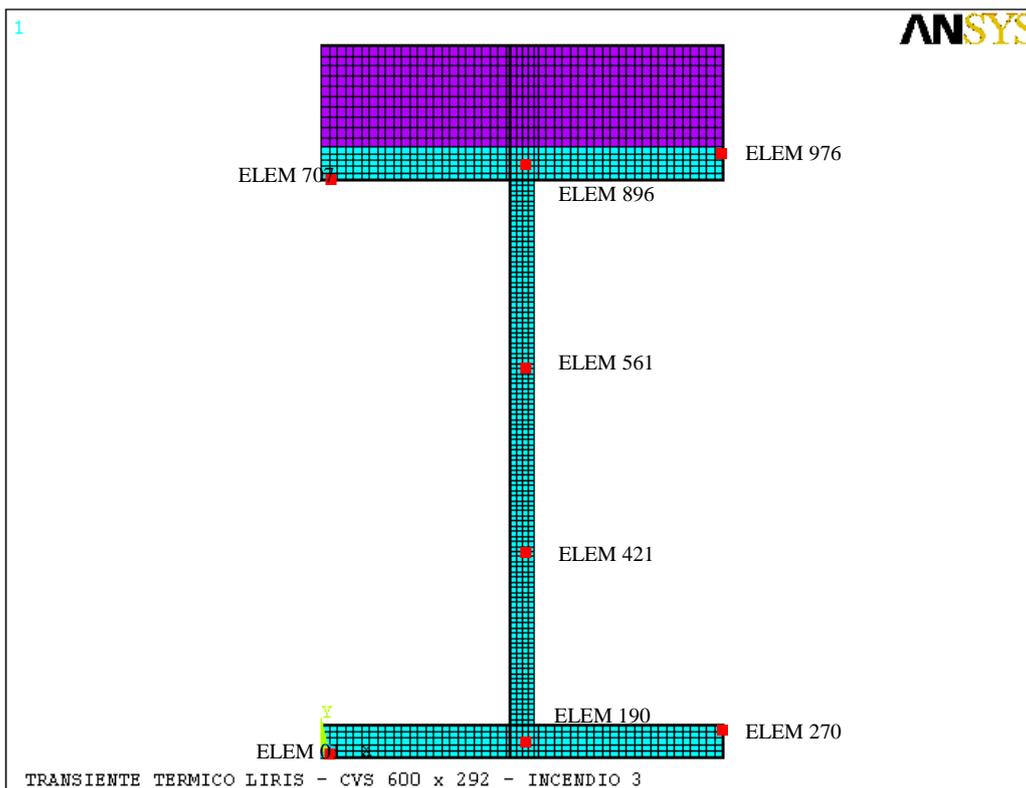
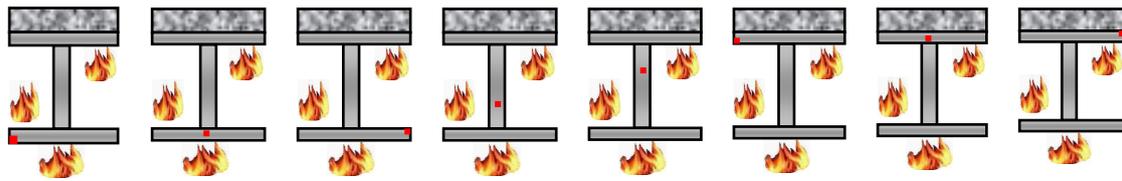


Figura 7.18 – Modelo do perfil “I” CVS 600x292, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.

No perfil CVS 600x292, as temperaturas dos nós e elementos do perfil em análise foram definidas para um incêndio natural, onde se utilizam os dados do incêndio 3, em que a carga específica considerada é igual a 700 MJ/m^2 , o grau de ventilação é igual a $0,12 \text{ m}^{1/2}$.

Para este caso, o incêndio tem duração de 4620 segundos, onde na simulação por intermédio do ANSYS, a duração do incêndio foi dividida em 69 passos com intervalos variando de 15 segundos a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas, sempre se utilizando subpassos de até 0,5 segundo para se testar a convergência da resposta a cada instante.

Os gráficos da Figura 7.19 a seguir apresentam o desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os elementos 01, 190, 270, 421, 561, 707, 896 e 976.



01

190

270

421

561

707

896

976

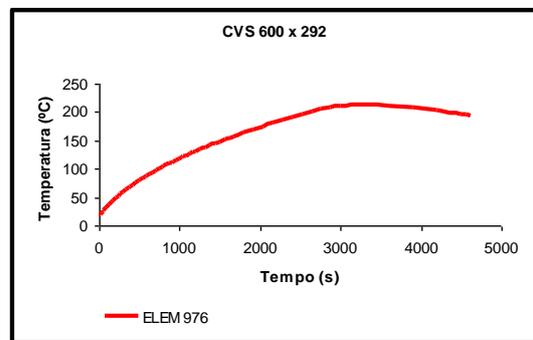
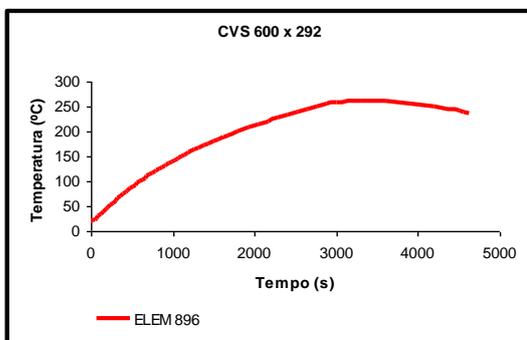
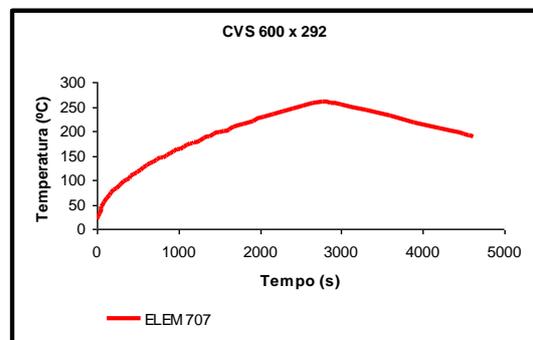
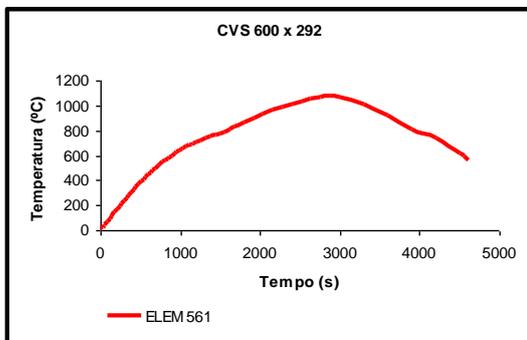
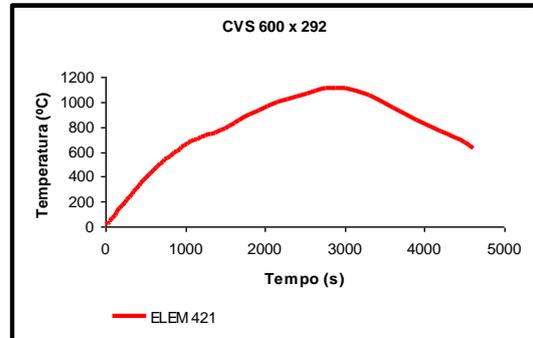
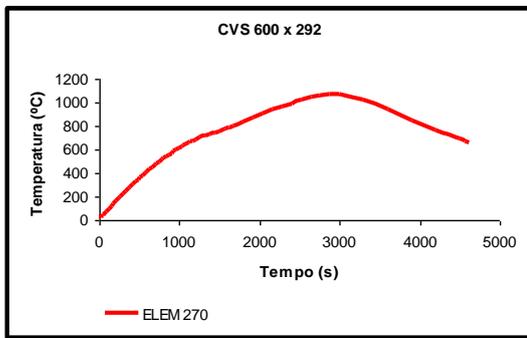
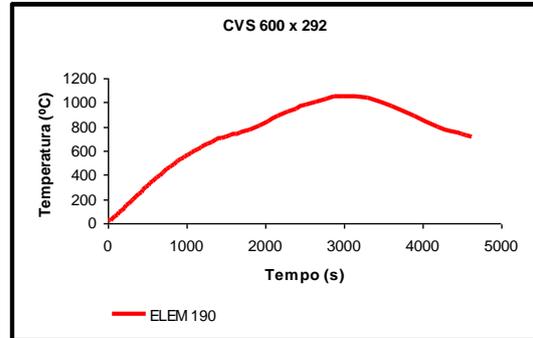
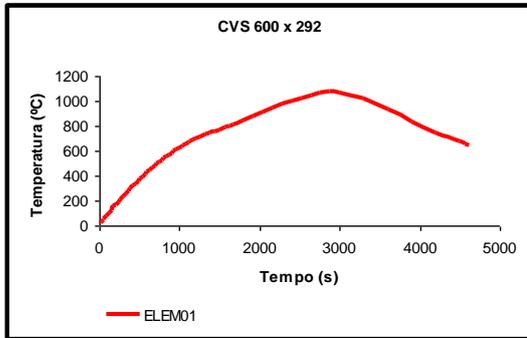


Figura 7.19 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 600x292
Incêndio natural 3 - ANSYS

As temperaturas dos elementos dos gráficos anteriores para alguns passos de tempo são listadas na Tabela 7.11, e na Tabela 7.12, são descritas as temperaturas máximas nestes elementos, seguindo de seus respectivos tempos.

Tabela 7.11 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 600x292 (°C)

Temperaturas no perfil CVS 600x292 (°C)								
Tempo (min)	Elementos							
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
	01	190	270	421	561	707	896	976
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
8	357,01	294,37	344,80	370,14	368,26	114,72	85,44	77,62
13	526,57	460,09	513,71	550,54	544,29	144,46	119,77	102,53
19	677,70	613,39	664,86	699,40	689,57	173,08	153,00	127,22
25	771,30	716,54	758,23	787,26	773,29	196,82	180,31	148,17
40	1001,82	951,26	993,92	1047,06	1011,23	245,39	233,53	191,26
48	1072,90	1048,45	1070,59	1112,03	1072,20	257,94	255,41	208,69
77	614,17	709,99	653,35	630,37	565,33	188,70	237,20	194,06

Tabela 7.12 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 600x292 (°C)

Temperaturas máximas no perfil CVS 600x292 (°C)								
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
Elementos	01	190	270	421	561	707	896	976
Temperatura (tempo)	1072,90 (48 min)	1055,23 (50 min)	1070,59 (48 min)	1112,03 (48min)	1072,20 (48min)	260,33 (46min)	261,51 (55min)	212,66 (55min)

A Figura 7.20 apresenta o desenvolvimento das temperaturas no perfil fornecido pelo ANSYS para o incêndio em questão.

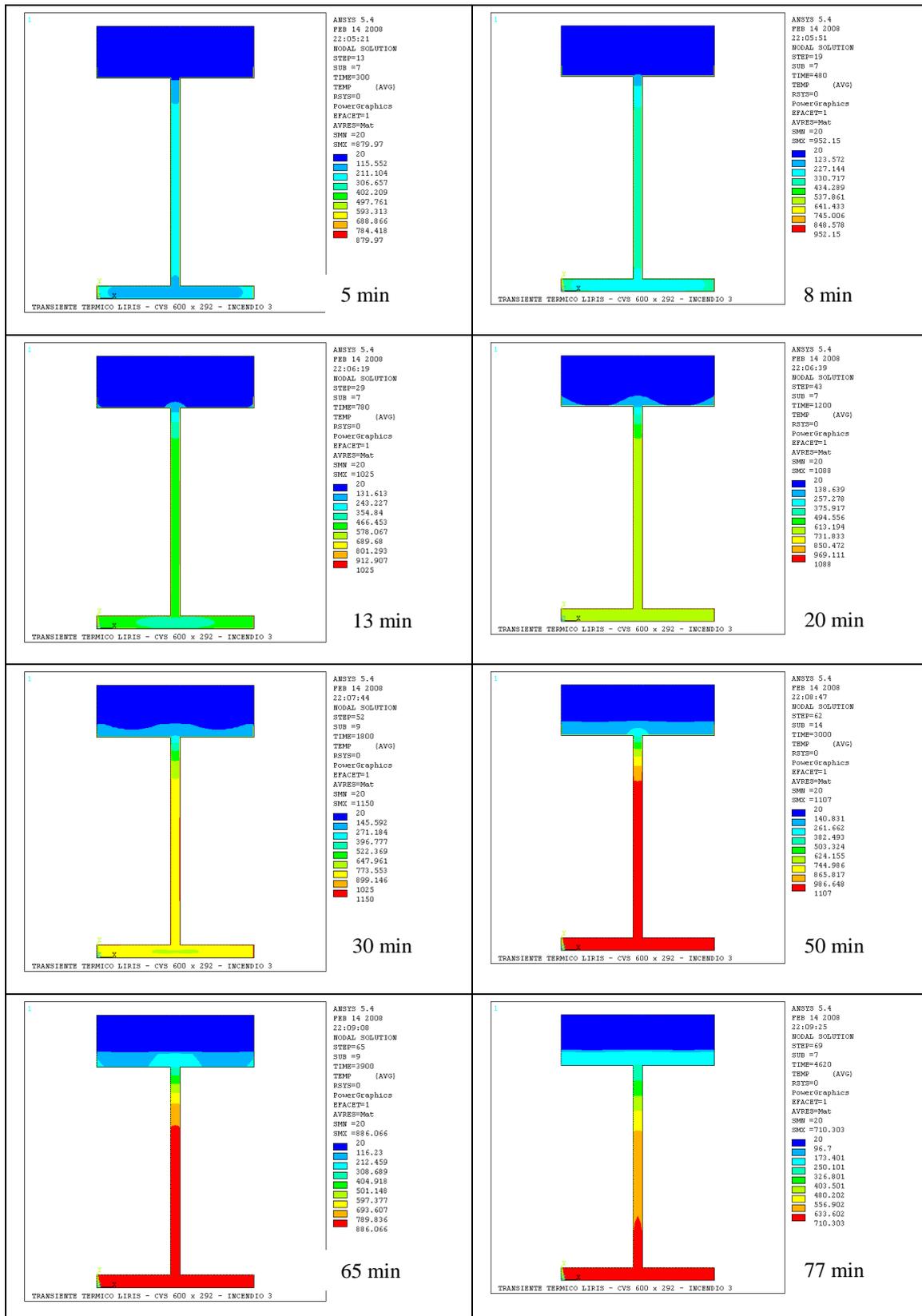


Figura 7.20 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 600x292
Incêndio natural 3 - ANSYS

A Figura 7.21 apresenta o gráfico com o desenvolvimento das temperaturas dos elementos obtidas via ANSYS, com o intuito de mostrar a diferença entre as temperaturas da mesa inferior, da mesa superior e da alma.

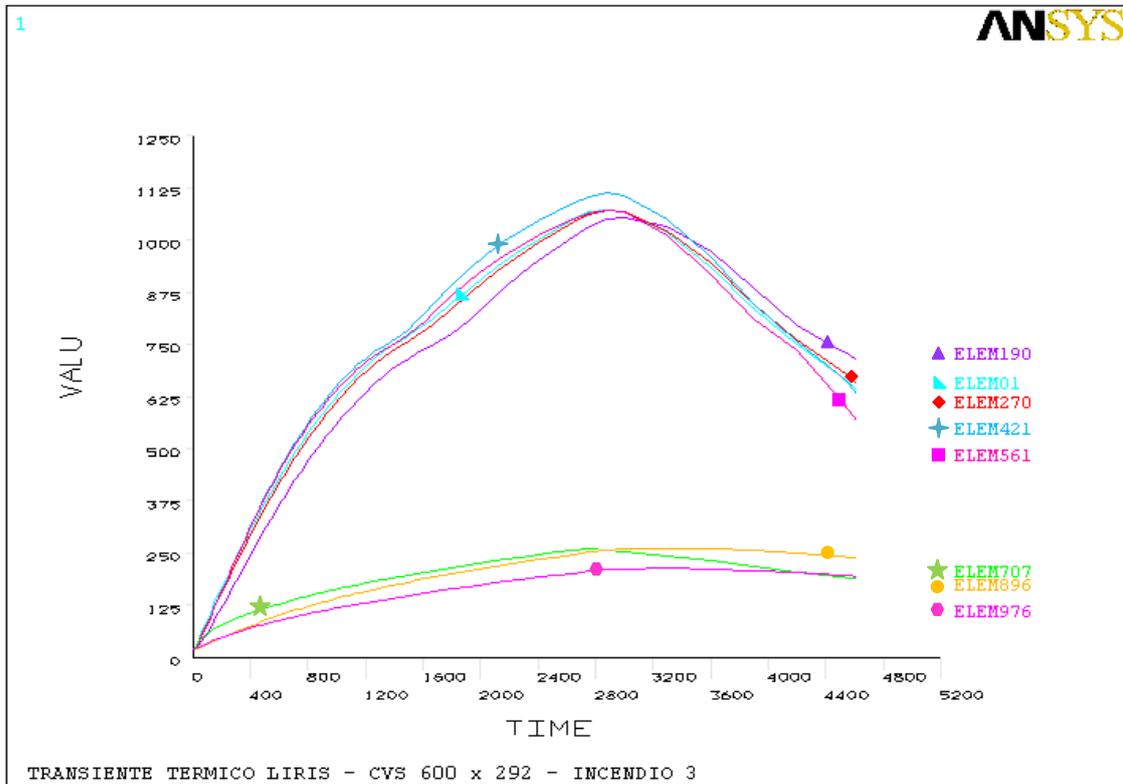


Figura 7.21 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600 x 292.

Na Figura 7.22 subsequente, tem-se a representação gráfica das temperaturas do incêndio, do aquecimento uniforme do perfil e das respostas do programa ANSYS para os elementos 01, 190, 270, 421, 561, 707, 896 e 976.

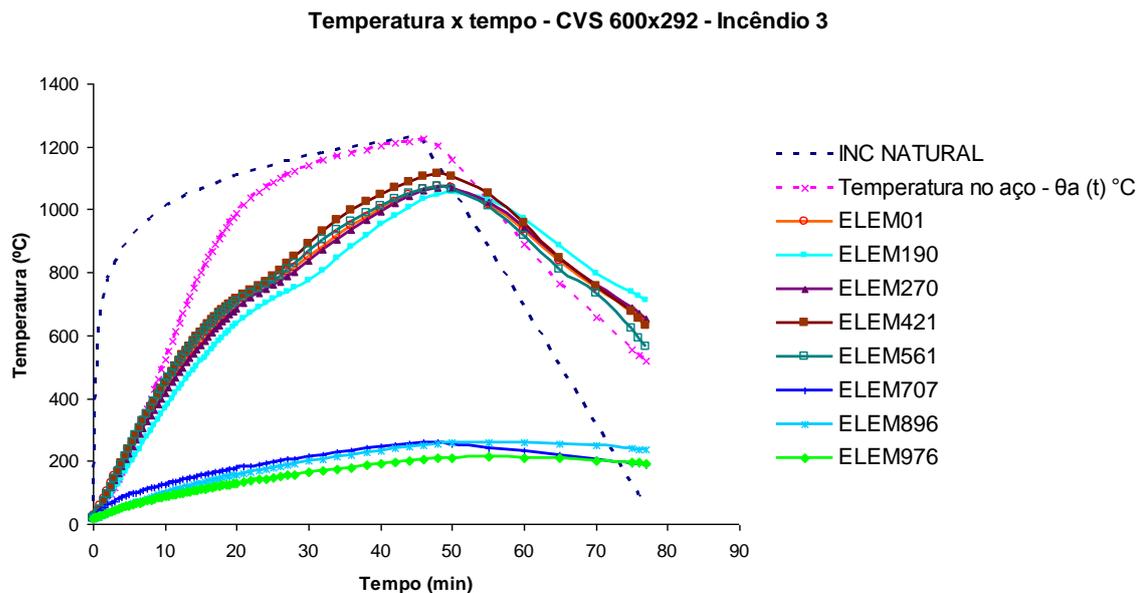


Figura 7.22 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 600x292.

Neste caso, a alma apresenta um aquecimento mais rápido na fase de desenvolvimento do incêndio. A significativa diferença de temperatura entre a mesa superior e inferior é percebida novamente.

7.4.1. Determinação da carga crítica para o perfil CVS 600x292 – Incêndio 3

Os valores da carga crítica para o perfil CVS 600x292 foram similares aos demais perfis já apresentados, nos quais, para o cálculo, utilizou-se a teoria desenvolvida nesta pesquisa e proposta para a obtenção de soluções fechadas, e o método proposto pelas normas brasileiras.

A seguir apresenta-se na Figura 7.23 o gráfico temperatura média x tempo para as mesas superior e inferior, construído a partir de dados obtidos via ANSYS, de formulações indicadas para o cálculo do incêndio natural e do aço.

Temperatura nos flanges CVS 600x292 - Incêndio 3

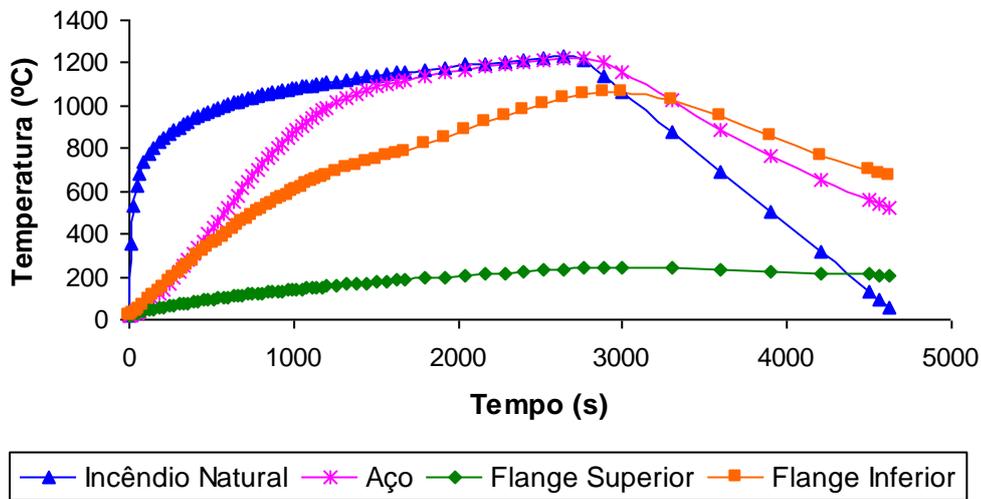


Figura 7.23 – Temperatura das mesas do perfil CVS 600 x 292 – Incêndio 3.

Observa-se neste gráfico novamente que a temperatura do aço apresenta-se bastante diferente da curva da mesa inferior e mais ainda da mesa superior.

Neste caso, os parâmetros utilizados na formulação analítica e no cálculo recomendado por norma da carga crítica são os mesmos indicados para os casos anteriores, apresentados no item 7.2.1 (Perfil CVS 300x113).

As características geométricas adotadas para este perfil ora em análise, foram citadas no início deste item, Tabela 7.10.

Para definição do comprimento da viga, respeitou-se a condição em que $\lambda > \lambda_r$. No presente caso, para que a viga trabalhe em estado de flexão lateral com torção, determinou-se que o seu comprimento deveria ser de 25 metros.

O gráfico da Figura 7.24 corresponde à evolução da carga crítica calculada pelo método analítico e recomendada pela norma, ambos abordados para a simulação de incêndio utilizada na aplicação desta pesquisa.

Determinação da carga crítica CVS 600 x 292 - Incêndio 3

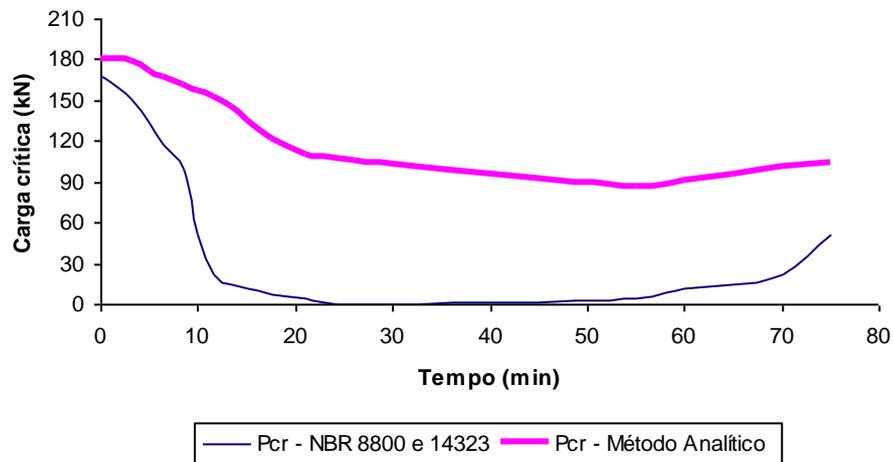


Figura 7.24 – Carga crítica para o perfil CVS 600 x 292 – Incêndio 3

Observa-se no gráfico da Figura 7.24, no qual confirma-se o ocorrido em casos anteriores, afirmando mais uma vez, este diferente comportamento dos resultados obtidos para a carga crítica quando calculado pela formulação analítica descrita no capítulo 5 e comparado com a norma brasileira.

Tabela 7.13 – Cargas críticas para o perfil CVS 600x292 (kN)

Tempo (min)	P _{cr} - NBR 8800:1986 e 14323:1999	P _{cr} - Método Analítico
0,00	167,46	180,76
0,25	167,46	180,76
3,00	150,71	178,64
5,00	133,97	172,41
6,50	117,22	167,77
8,50	100,48	161,87
10,00	51,91	157,23
11,50	21,77	152,49
13,50	15,07	144,74
15,00	11,30	135,30
17,50	7,54	122,33
21,00	3,77	110,80
26,00	0,00	105,13
55,00	3,77	87,12
60,00	11,30	90,45
65,00	15,07	95,61
70,00	21,77	100,69
75,00	51,91	104,25

Importante ressaltar, que essa diferença de valores da carga crítica, dar-se devido à formulação analítica considerar um aquecimento desigual nas mesas. Verifica-se, ainda que, na situação da mesa superior (comprimida), protegida parcialmente pela placa de material refratário sobreposta, faz-se com que haja um aumento na capacidade resistiva da peça. Por isso, percebe-se que no início do incêndio as cargas críticas ainda apresentam valores próximos, mas rapidamente, com o aumento da temperatura, as diferenças entre as cargas críticas se distanciam consideravelmente com o desenvolvimento do incêndio.

7.5. Caso 4: PERFIL DE AÇO SOLDADO TIPO “I” CVS 700x166 – INCÊNDIO 3

O quarto e último perfil a ser analisado neste trabalho é o VS 700x166, com suas características geométricas apresentadas na Tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Perfil CVS 700 x 166

Perfil 700x166			
Características do perfil	Símbolo	Unidade	
Altura	d	cm	70,00
Largura da mesa	bf	cm	65,00
Espessura da alma	tw	cm	0,80
Espessura da mesa	tf	cm	2,50
Área da seção transversal	A	cm ²	212,00
Momento de inércia rel. a x-x	I _x	cm ⁴	200.642,00
Módulo de resistência elástica rel. a x-x	W _x	cm ³	5.733,00
Raio de giração em rel. a x-x	r _x	cm	30,76
Módulo de resistência plástica rel. a x-x	Z _x	cm ³	6.245,00
Momento de inércia em rel. a y-y	I _y	cm ⁴	13.656,00
Módulo de resistência elástica rel. a y-y	W _y	cm ³	854,00
Raio de giração rel. a y-y	r _y	cm	8,03
Momento de inércia à torção	I _t	cm ⁴	8,77

A malha deste perfil também está construída por elementos finitos do ANSYS com um total de 1815 nós e 1576 elementos para o perfil de aço, a placa de material refratário e a camada de ar. Esta camada de ar envolve o perfil e a placa de material refratário apresentando espessura de um milímetro, cujos nós externos acompanham a temperatura de cada incêndio, por meio de curvas temporais. A Figura 7.25 mostra detalhes da malha.

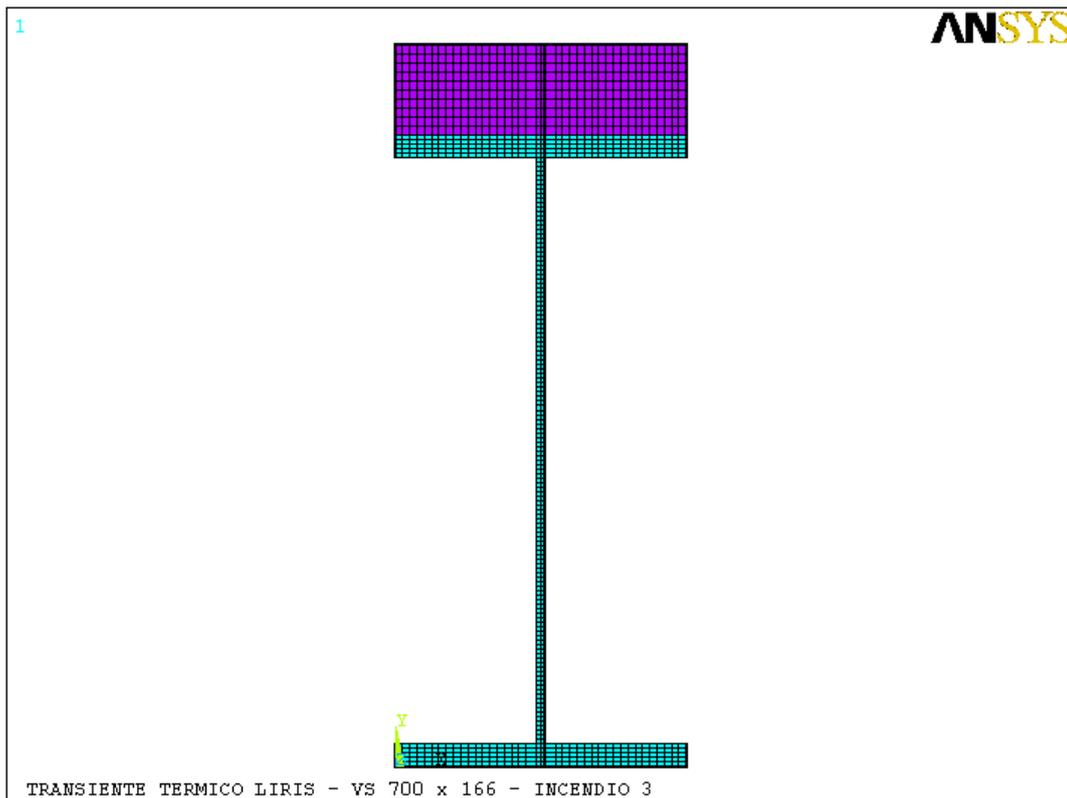


Figura 7.25 – Modelo do perfil “I” VS 700x166, placa de material refratário e camada de ar.

Da mesma forma considerada nos modelos de perfis anteriores, foram escolhidos para análise alguns elementos, sendo observada a sua localização na seção transversal, de modo que representassem pontos significativos do perfil.

Foram plotados gráficos que apontam o desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os elementos 01 (canto inferior esquerdo da mesa inferior), 106 (centro da mesa inferior), 210 (canto superior direito da mesa inferior), 300 (elemento a um terço da altura da alma), 386 (elemento a dois terço da altura da alma), 475 (canto inferior esquerdo da mesa superior), 580 (centro da mesa superior) e 684 (canto superior direito da mesa superior).

A seguir é apresentada a discretização da seção transversal do perfil com os respectivos elementos escolhidos para análise em destaque.

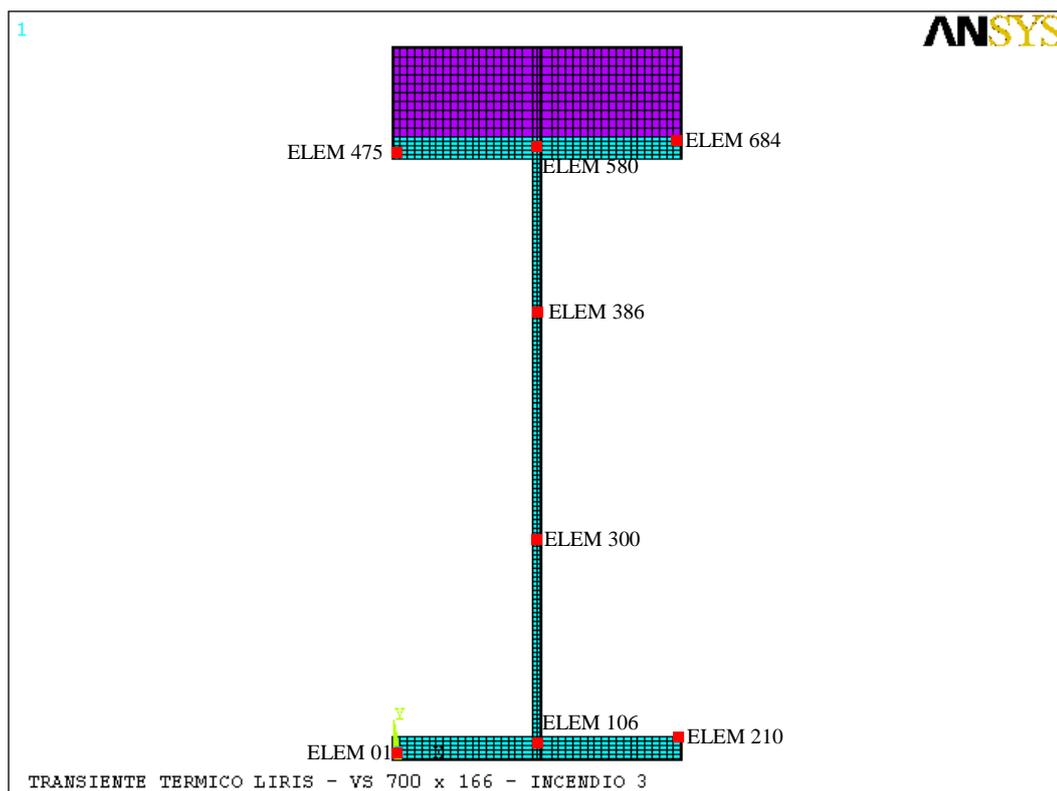
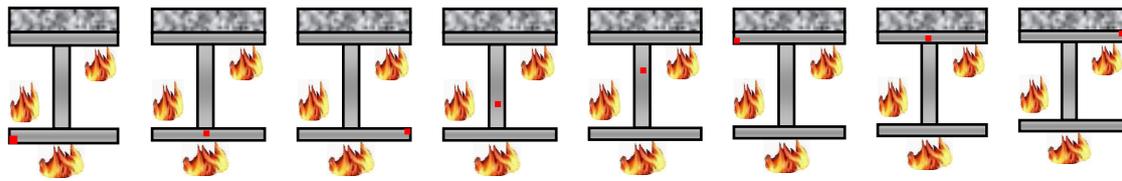


Figura 7.26 – Modelo do perfil “I” VS 700x166, placa de material refratário e camada de ar apresentando em destaque a localização dos elementos.

Neste modelo o perfil VS 700x166 é submetido a um incêndio natural, no qual se utilizam os dados do incêndio 3, em que a carga específica considerada é igual a 700 MJ/m^2 , o grau de ventilação é igual a $0,12 \text{ m}^{1/2}$, e, neste caso, a duração do incêndio é de 9900 segundos.

Para a simulação por intermédio do ANSYS, a duração deste incêndio (9900 segundos) foi dividida em 69 passos com intervalos variando de 15 segundos a 300 segundos, dependendo dos valores que apresentam as variações térmicas mais significativas, sempre se utilizando subpassos de até 0,5 segundo para se testar a convergência da resposta a cada instante.

Os gráficos da Figura 7.27 a seguir indicam o desenvolvimento das temperaturas obtidas no ANSYS no decorrer do incêndio para os elementos 01, 106, 210, 300, 386, 475, 580 e 684 do perfil.



01

106

210

300

386

475

580

684

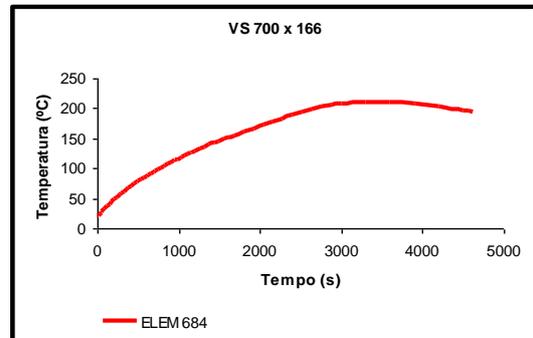
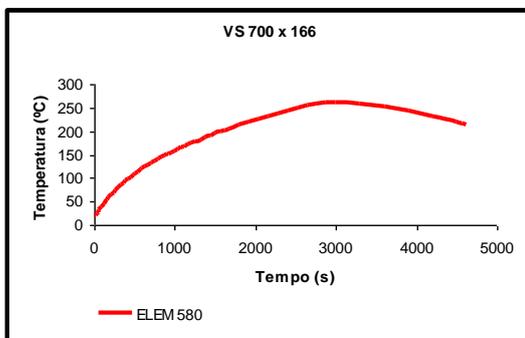
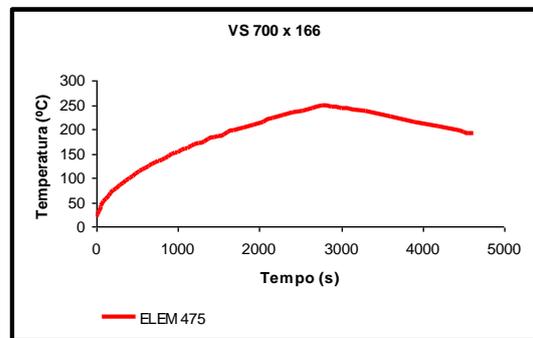
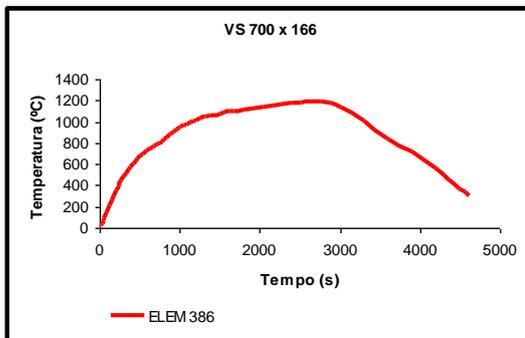
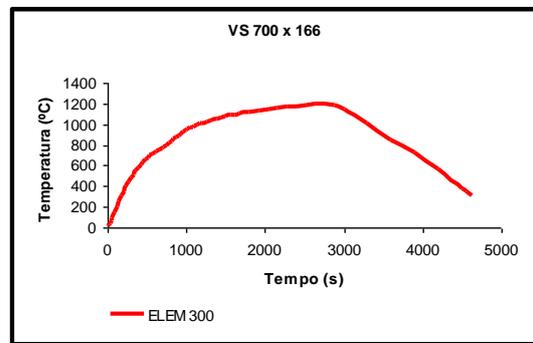
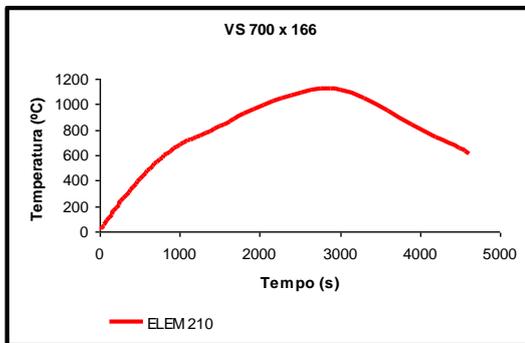
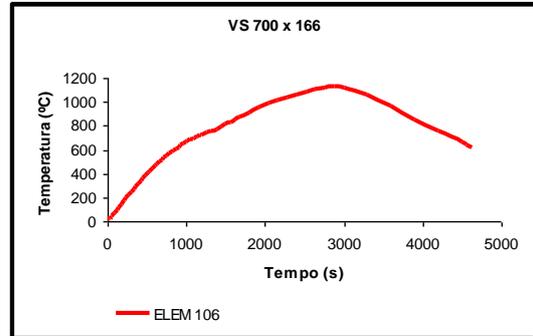
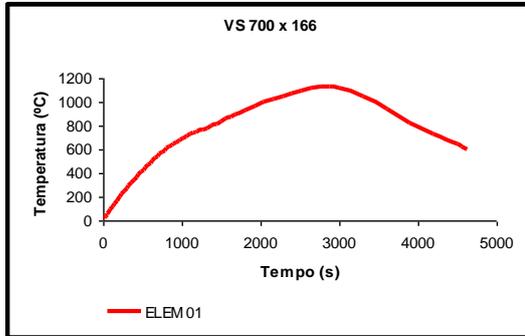


Figura 7.27 – Temperatura dos elementos escolhidos para o perfil CVS 700x166
Incêndio natural 3 – ANSYS

Na seqüência, são apresentadas na Tabela 7.15 as temperaturas em alguns passos de tempo e, na Tabela 7.16, são apontadas as temperaturas máximas encontradas via ANSYS, de acordo com seus respectivos tempos que ocorreram.

Tabela 7.15 – Temperaturas nos elementos do perfil de aço CVS 700x166 (°C)

Temperaturas no perfil CVS 700x166 (°C)								
Tempo (min)	Elementos							
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
	01	106	210	300	386	475	580	684
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
7	363,99	339,67	353,27	605,92	605,88	100,75	98,32	70,81
12	559,20	534,84	548,07	781,18	781,01	130,41	133,59	96,30
17	697,33	671,38	686,41	950,82	949,99	154,62	160,26	117,46
24	815,45	790,61	804,22	1066,86	1065,29	182,44	190,73	142,45
38	1051,80	1040,32	1046,76	1165,38	1163,26	227,26	238,15	183,06
48	1126,59	1126,34	1126,52	1181,51	1179,18	246,10	261,93	205,60
77	598,81	620,57	608,50	312,84	300,83	190,48	215,06	194,77

Tabela 7.16 – Temperatura máxima em cada elemento do perfil CVS 700x166 (°C)

Temperaturas máximas no perfil CVS 700x166 (°C)								
	Mesa Inferior			Alma		Mesa Superior		
Elementos	01	106	210	300	386	475	580	684
Temperatura (tempo)	1126,59 (48 min)	1126,34 (48 min)	1126,52 (48 min)	1196,01 (46 min)	1193,71 (46 min)	247,53 (46 min)	262,35 (50 min)	210,57 (55 min)

A evolução térmica na seção transversal do perfil de acordo com a solução obtida por meio do ANSYS para este incêndio é apresentada graficamente na Figura 7.28.

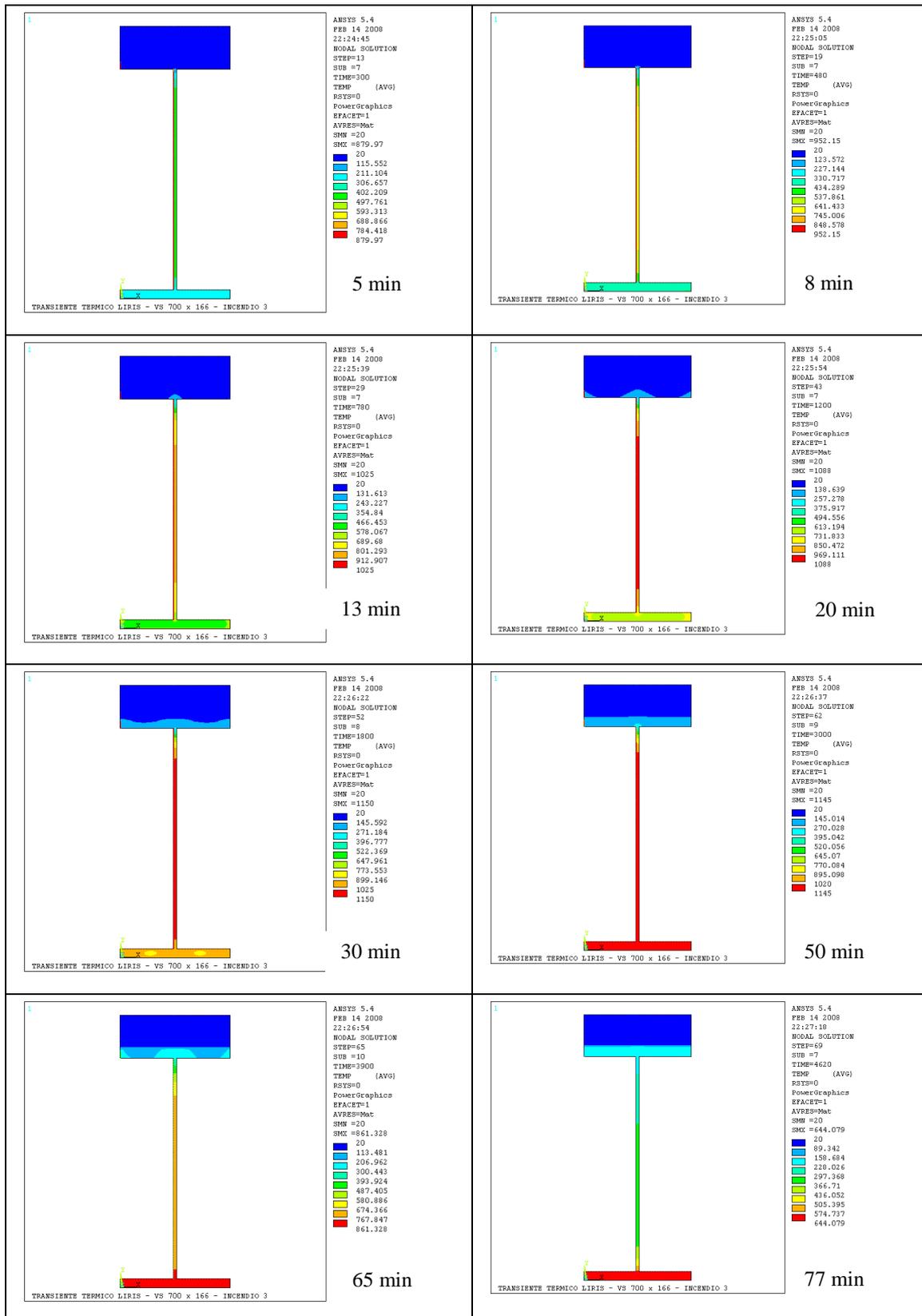


Figura 7.28 – Evolução térmica (°C) - Perfil CVS 700x166
Incêndio natural 3 - ANSYS

Na Figura 7.29 apresenta-se o gráfico comparativo temperatura x tempo para os elementos 01, 106, 210, 300, 386, 475, 580 e 684, com as curvas de temperatura no incêndio 2 e a curva de aquecimento uniforme do aço, conforme apresentada no capítulo 2 desta dissertação.

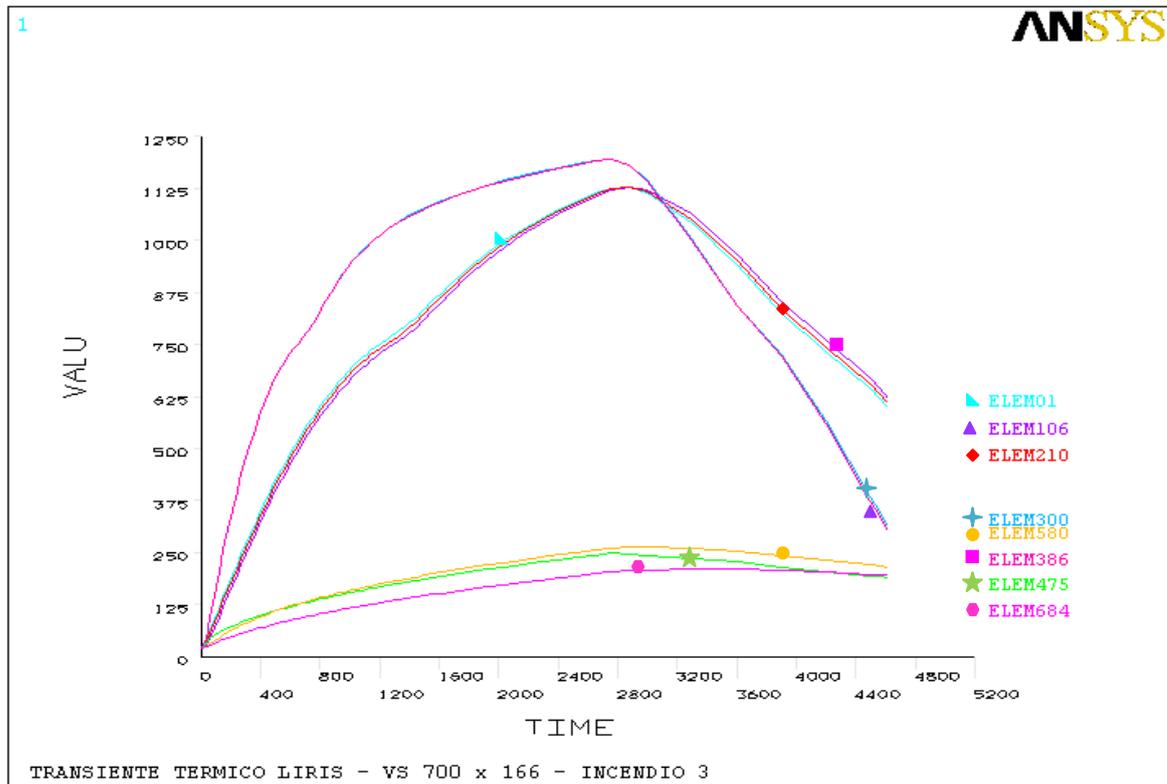


Figura 7.29 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil CVS 700 x 166

Finalmente, conforme ocorreu em todos os outros modelos de perfis, a temperatura dos elementos da mesa inferior foi sempre maior que a temperatura dos elementos da mesa superior. A alma apresenta-se novamente com um aquecimento mais rápido na fase de desenvolvimento do incêndio. A curva de temperatura uniforme do aço apresentou máximo próximo ao da curva do elemento da mesa inferior.

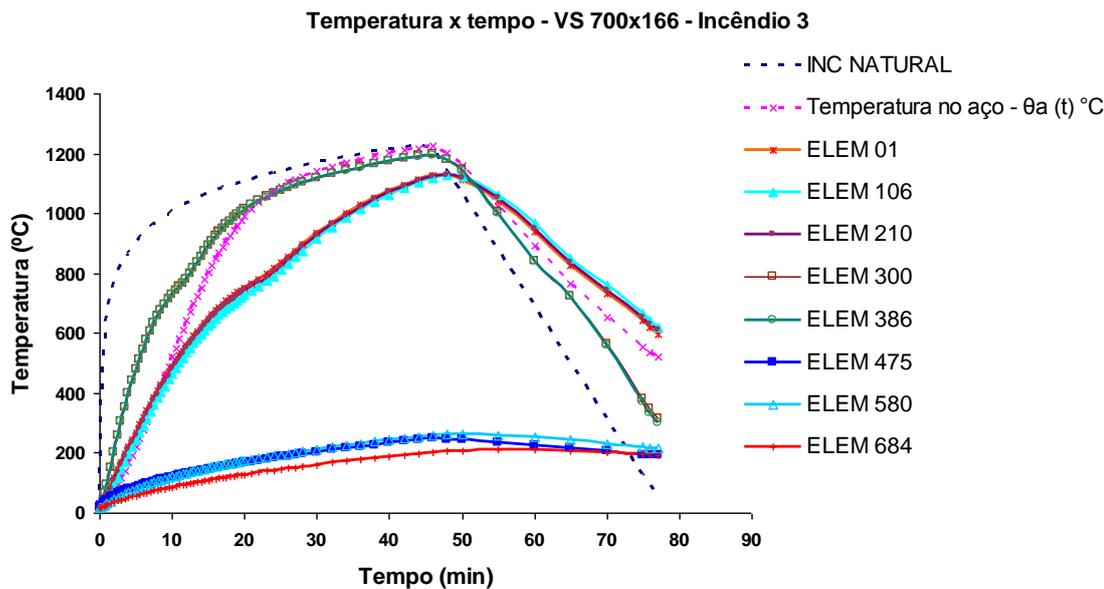


Figura 7.30 – Gráfico temperatura x tempo – Perfil VS 700x166.

7.5.1. Determinação da carga crítica para o perfil VS 700x166 – Incêndio 3

Os valores da carga crítica para o perfil I VS 700x166 foram, assim como para os outros perfis apresentados, calculados utilizando a teoria desenvolvida nesta pesquisa e proposta para obtenção de soluções fechadas, e o método descrito pela NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986.

A seguir, na Figura 7.31, apresenta-se o gráfico temperatura média x tempo para as mesas do perfil, construído a partir dos dados utilizados em que se considera o aquecimento desigual das mesas na formulação analítica.

Temperatura nos flanges VS 700x166 - Incêndio 3

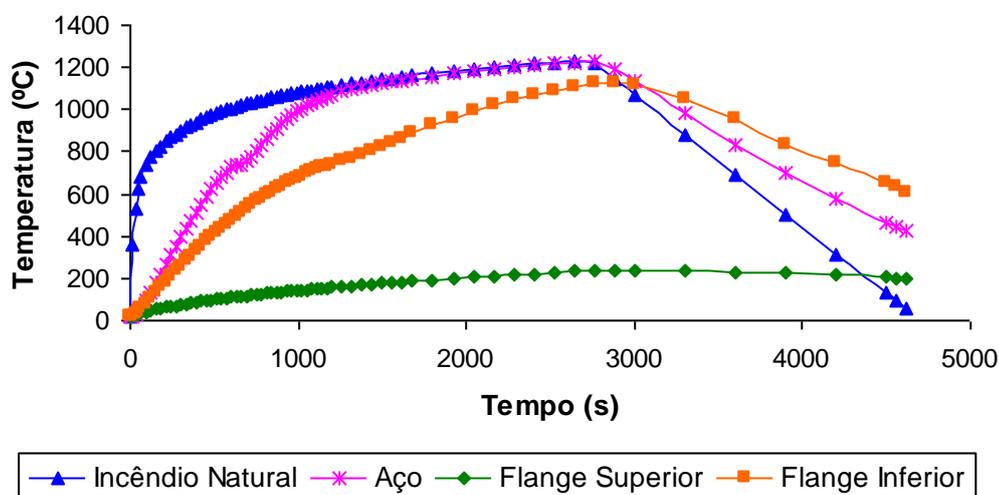


Figura 7.31 – Temperatura das mesas do perfil VS 700 x 166 – Incêndio 3.

Neste caso, observa-se novamente que a curva de aquecimento uniforme do aço apresenta-se mais próxima da curva da mesa inferior. Como as mesas são as responsáveis pela resistência ao fenômeno da flexo-torção, a carga crítica calculada seguindo os procedimentos da norma brasileira não representará a realidade, pois utiliza a curva de temperatura uniforme no perfil. Conclusões estas também válidas para os modelos anteriores.

A determinação analítica e o cálculo recomendado pelas normas brasileiras da carga crítica são desenvolvidos utilizando-se os mesmos parâmetros descritos no primeiro modelo estudado e as características geométricas da seção foram definidas na Tabela 7.14.

Quanto ao comprimento da viga, foi respeitada a condição em que $\lambda > \lambda_r$ para que a viga trabalhe em estado de flexo-torção, e determinado como sendo de 15 metros.

A seguir apresenta-se a curva de evolução da carga crítica para este caso, calculado analiticamente, conforme NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986.

Determinação da carga crítica VS 700 x 166 - Incêndio 3

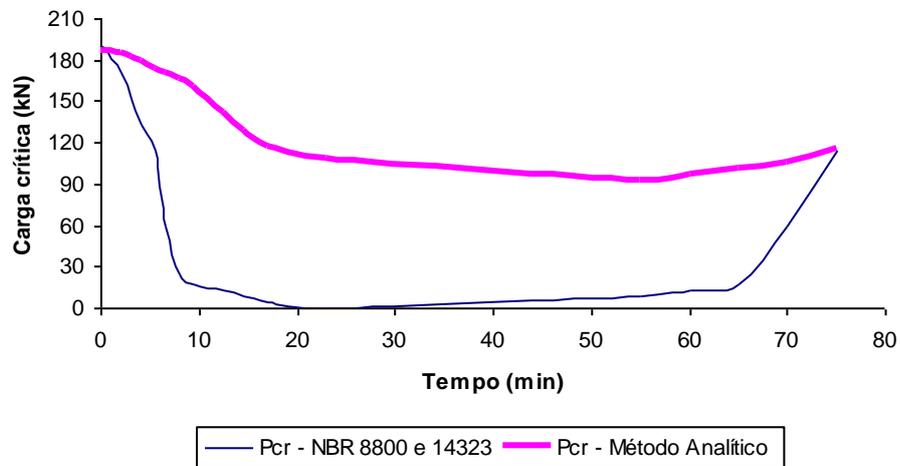


Figura 7.32 – Carga crítica para o perfil CVS 700 x 166 – Incêndio 3

Como ocorrido em todos os casos anteriores, os resultados obtidos para o perfil VS 700x166 confirma o comportamento conservador das normas NBR 14323:1999 e NBR 8800:1986. Percebe-se também que nos primeiros minutos do incêndio existe uma proximidade maior dos valores entre os métodos trabalhados e depois, com o desenvolvimento do incêndio, apresenta uma queda acentuada na curva que representa a carga crítica da norma e uma queda suave na curva da carga crítica da formulação analítica.

Tabela 7.17 – Cargas críticas para o perfil VS 700x166 (kN)

Tempo (min)	P_{cr} - NBR 8800:1986 e 14323:1999	P_{cr} – Método Analítico
0,00	189,90	186,34
0,25	189,90	186,34
2,00	170,91	185,93
3,00	151,92	182,59
4,00	132,93	179,24
5,50	113,94	174,29
6,50	58,87	171,06
8,00	24,69	166,41
9,50	17,09	161,35
12,50	12,82	142,37
14,50	8,55	128,97
17,00	4,27	117,21
23,00	0,00	108,25
55,00	8,55	93,04
60,00	12,82	96,57
65,00	17,09	100,79
70,00	58,87	105,24
75,00	113,94	115,97

De acordo com os resultados apresentados neste capítulo, os quatro perfis estudados, submetidos a tipos diferentes de incêndios, geram mapas de distribuição de temperaturas nas seções transversais dos perfis de aço (quando submetidos a variadas temperaturas no decorrer do incêndio), revelando gradientes térmicos importantes e que devem ser considerados nos cálculos de resistência dos perfis estruturais em aço sob situação de incêndio natural.

A formulação analítica apresentada no capítulo 5 foi desenvolvida com sucesso para o cálculo da carga crítica em perfis de aço quando submetidos a incêndios e os resultados atenderam ao esperado, mostrando a deficiência existente atualmente nas normas brasileiras. E no caso, é deixada óbvia a necessidade de se considerar as variações de temperatura para vigas de aço quando se sujeitam aos incêndios, pois se sabe agora, conforme demonstrado nesta pesquisa, que essas variações influenciam na resistividade da peça estrutural.

Considerando as variações de temperatura em todos os casos apresentados nesta pesquisa, as cargas críticas das vigas apresentaram resultados bem mais realistas que as curvas determinadas com temperaturas uniformes ao longo das seções transversais. Estas cargas críticas maiores encontradas pela formulação apresentada podem representar consideráveis economias. Nota-se que as vigas estudadas podem suportar cargas críticas bem maiores do que as determinadas quando se seguem os procedimentos recomendados pela norma brasileira atual (NBR 14323:1999).

Pela norma atual, o perfil I de aço (com gradiente térmico como demonstrado nos exemplos) seria menos robusto e talvez insuficiente para atender à solicitação de cálculo. Tudo isto se deve à diferença de temperatura entre a mesa superior (que está parcialmente protegida por uma placa de material refratário) e a mesa inferior. Tal diferença se processa de forma a conferir ao perfil I estudado, maior resistência. Durante o incêndio, o módulo de elasticidade da mesa superior é maior que o módulo de elasticidade na mesa inferior ($E_1 > E_2$).

É válido ressaltar que essa margem existente entre a carga crítica obtida com a formulação proposta e a carga crítica obtida pelas recomendações da norma (NBR 14323:1999) é

válida para perfis I protegidos parcialmente na mesa superior. No caso de perfis protegidos parcialmente na mesa inferior, é importante verificar os cálculos, pois a diferença entre os módulos de elasticidades ($E_1 - E_2$) seria outra (negativa), contribuindo desta forma para uma queda dos valores na carga crítica.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1. CONCLUSÕES GERAIS

Esta dissertação analisou do ponto de vista analítico e numérico, perfis de aço submetidos à situação de incêndio, um assunto ainda pouco considerado e explorado no meio acadêmico brasileiro sob o aspecto aqui adotado. De fato, as contribuições do meio acadêmico brasileiro têm sido seguir normas estrangeiras e explorar situações de aplicabilidade destas normas sem a preocupação do desenvolvimento teórico, como feito aqui neste trabalho. Nota-se também que o assunto incêndio ainda é de pouco interesse para a maioria dos projetistas estruturais, apesar de ser de grande relevância para a sociedade na prevenção de grandes colapsos estruturais de estruturas de aço.

É de grande importância na execução de projetos de edificações a consideração de uma provável situação de incêndios. Este tema é muitas vezes desconsiderado pela sociedade e pelos projetistas, que preferem relacionar incêndio à palavra “fatalidade” e acham poucas as possibilidades de ocorrência de um incêndio. A sociedade esquece que fatalidades acontecem e podem levar a grandes prejuízos. Na construção civil, cada dia mais inovada com tecnologias que consideram o tempo de execução como um fator primordial, muitos materiais hoje disponíveis estão cada vez mais a favor do incêndio apresentando em sua composição insumos combustíveis e ainda baixa vedação durante um incêndio, como, por exemplo: papel parede, pisos sintéticos, painéis de gesso, portas de vidro, para citar alguns materiais. Portanto, além das medidas de combate e prevenção a incêndio, é importante todo profissional ter um maior conhecimento do comportamento das estruturas quando submetidas a situações de incêndio, com o intuito de promover melhor prevenção a catástrofes causadas pelo incêndio que pode vir ocorrer.

Como já apresentado, o objetivo desta dissertação foi transmitir aos profissionais da área de estruturas e incêndio um melhor entendimento do comportamento a flambagem lateral com flexo-torção (FLT) de vigas de aço com seção transversal I quando submetidas à situação de incêndio natural. Considerou-se nesta dissertação dois pontos importantes que foram de modo geral enfatizados e questionados ao longo desta pesquisa, quais sejam:

- O conhecimento mais realista da variação de temperatura na seção transversal das vigas de aço quando expostas a incêndios;
- Desenvolvimento de uma formulação analítica para a determinação da carga crítica (FLT), considerando o aquecimento não uniforme ao longo da seção transversal do perfil I, fator este que influencia diretamente na resistência da peça estrutural.

Para melhor entendimento, considerou-se nesta dissertação o incêndio natural por se entender que, na prática, melhor caracteriza a realidade de uma situação de incêndio, com uma fase de aquecimento, desenvolvimento e subsequente resfriamento.

Para o mapeamento das temperaturas, utilizou-se nesta pesquisa o ANSYS. Tal programa em elementos finitos oferece resultados com excelentes qualidades e bastante confiabilidade para estudos de transientes térmicos, fornecendo de forma precisa as temperaturas ao longo da seção transversal de cada perfil estudado.

Foram estudados nesta pesquisa três tipos de incêndios naturais e cada perfil foi simulado dentre um destes incêndios. As vigas foram escolhidas de acordo com um estudo das principais vigas mais utilizadas em projetos no Brasil, conforme publicado no livro Estruturas de Aço no Brasil (Dias, 1999). Portanto, escolheu-se analisar as vigas CVS 300x113, CVS 500x250, CVS 600x262 e VS 700x166.

Em cada análise desenvolvida nesta dissertação, além das mudanças de geometria nos perfis, as características dos incêndios foram também variadas.

Os perfis de aço com seção transversal I analisados com placa de material refratário sobreposta indicam que a mesa em contato com a placa, no caso mesa superior, apresentam temperaturas inferiores quando comparada à mesa inferior totalmente exposta às chamas do incêndio. Nesta circunstância, as curvas de temperaturas das mesas superior e inferior revelam significativas diferenças de temperaturas entre as mesas que propiciam substancial aumento de resistência quando comparada com a resistência obtida a partir de recomendações da norma brasileira (NBR 14323:1999). Observa-se nos resultados das temperaturas entre as mesas que o tempo de ocorrência da maior diferença de temperatura não coincide com o tempo de pico do incêndio natural nem com o tempo da máxima

temperatura uniforme atingida pelo elemento estrutural de aço. Nota-se ainda que esta temperatura uniforme é a temperatura recomendada pela norma brasileira (NBR 14323:1999) no cálculo da resistência estrutural corrigida apenas por determinados coeficientes que revelam-se insuficientes para mostrar a resistência efetiva da viga.

As partes do perfil que estão mais expostas ao fogo, no caso a mesa inferior e a alma, estão mais aquecidas quando comparadas com as da mesa superior. Esta diferença de temperatura não é levada em conta pelas normas brasileiras, de forma eficaz no dimensionamento de perfis metálicos quando submetidos a situações de incêndio. Nesta dissertação foi proposta uma formulação analítica para calcular a carga crítica e conseqüentemente a resistência à instabilidade lateral com flexo-torção do perfil de aço com seção transversal I. A formulação proposta considera de forma mais efetiva esta diferença de temperatura entre as mesas e a conseqüente diminuição do valor do módulo de elasticidade em função da temperatura. Considerando a análise dos quatro casos estudados nesta dissertação, conclui-se ainda que para vigas de aço com placas termicamente refratárias sobrepostas existe um ganho significativo de resistência nominal quando comparada com os valores prescritos pelas normas brasileiras. Pois a mesa responsável pela instabilidade lateral da viga, no caso a mesa superior, não apresenta diminuição significativa no valor do módulo de elasticidade como ocorre caso a temperatura fosse uniforme ao longo da seção transversal, conforme sugerido na norma.

Observa-se finalmente que a norma brasileira (NBR 14323:1999) parece ser bastante conservadora, quando considera que a temperatura seja uniforme ao longo da seção transversal de estruturas, como as vigas. Em certas situações, como no caso da mesa comprimida ser a menos aquecida num incêndio, os ganhos de resistência nominal podem proporcionar maiores resistências ou maiores vãos livres - considerando as mesmas situações de incêndio quando calculadas pela formulação proposta e pelas recomendações da norma citada.

8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no que foi objeto de estudo para esta dissertação, a formulação analítica apresentada no capítulo 5 abre vários caminhos para serem analisados quando o assunto em questão for estruturas de aço submetidas a situações de incêndio, sendo interessante:

- Verificar e analisar melhor os fatores de correção de gradientes térmicos na seção da peça, os quais são considerados na norma brasileira. Sugere-se modificar na norma tais fatores, de modo a se levar em consideração a não uniformidade da temperatura na seção transversal;
- Avaliar a resistência nominal da viga no estado de flexo-torção, considerando a variação de temperatura nas mesas durante o incêndio o qual está submetida;
- Desenvolver estudos similares ao apresentado nesta dissertação, considerando diferentes tipos cargas de incêndio e não apenas cargas pontuais, como estudadas neste trabalho;
- Adotar análise experimental para comprovar o que foi desenvolvido e concluído nesta dissertação, verificando as temperaturas e confrontando os resultados obtidos entre a análise experimental e formulação analítica aqui apresentada;
- Estudar outros tipos de estruturas que não sejam apenas vigas de aço biapoiadas;
- Criar tabelas de uso prático para perfis padronizados com os valores das cargas críticas em função das variações de temperatura nas mesas e do comprimento total da viga L_b ;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS Revision 5.2 (2006). *ANSYS User's Manual*, vol. 1 a 5, EUA;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 8800:1986.
Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites),
129pp., Rio de Janeiro;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 14323:1999.
*Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio –
Procedimento*, 46pp., Rio de Janeiro;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 14432:2000.
*Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações -
Procedimento*, 14pp., Rio de Janeiro;

BUTKOV, E. (1983). *Física Matemática*, Ed. Guanabara, Rio de Janeiro;

CESARI, F. (1996). *Analisi di Problemi Termici col Método degli Elementi Finiti*, Pitagora
Editrice Bologna, Bologna, Itália;

CHEN, W. F. e Lui, E. M. (1987). *Structural Stability – Theory and Implementation*,
Prentice Hall, New Jersey, EUA;

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;

DIAS, LUÍS ANDRADE DE MATTOS (1999). *Estruturas de Aço no Brasil – Zigarette*
Editora, São Paulo;

- DRYSDALE, DOUGAL (2004). *An Introduction to fire dynamics* – Second edition, University of edinburgh, UK;
- 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 – Transactions of the American Society of Civil Engineers;
- 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 834-1 (1999), Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction, Part 1: General Requirements, ISO – International Organization for Standardization, Geneva.
- KAPLAN, W. (1981). *Advanced Mathematics for Engineers*. Addison Wesley, New York, USA;
- MANUAL BÁSICO DE COMBATE A INCÊNDIO DO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL (2006). Brasília-DF, Brasil;
- MARTINES, C. (1997). *Sicurezza Antincendio*, Ed. Hoepli, Milano, Itália;
- MOAVENI, SAEED (1999). *Finite Element Analysis. Theory and application with ANSYS*, Prentice-Hall, New Jersey, USA;
- NUNES, J. M. de B.: (2005). *Uma Abordagem Numérica e Analítica para 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, 186p.;

- PFEIL, WALTER E MICHÉLE (2000). *Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático – 7ª edição*, LTC Editora, Rio de Janeiro;
- SALVADORI, M.G. (1955). *Lateral Buckling of I-Beams*, ASCE – Transactions of the American Society of Civil Engineers, *Paper 2773, Vol. 120*;
- SPIEGEL, MURRAY RALPH (1992). *Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática – Edição Revisada e Ampliada – São Paulo – Coleção Schaum*
- SEARS, F.W., ZEMANSKY, M.W., 1976, Física – Vol. II. – 1ª edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
- SILVA, VALDIR PIGNATTA E (2001). *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, 241pp, São Paulo;
- SILVA, VALDIR PIGNATTA E (1992). *Flambagem Lateral de Vigas de Aço em Regime Elástico-Linear*, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo;
- SOUZA, Thauler Ferreira Bispo e MORAIS, Vanessa Lima de Brito. *Uma Formulação para a Determinação Simplificada do Momento Crítico FLT de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural* (2006). Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- TEODÓSIO, J.R. (1983). *Elementos de Tratamentos Térmicos em Aços - 1ª edição*. Rio de Janeiro, Comissão de Divulgação e Publicação da COPPE.
- TIMOSHENKO, STEPHEN P. AND GERE, JAMES M. (1961). *Theory of Elastic Stability, Engineering Societies Monographs*, Second edition, New York;
- VARGAS, MAURI RESENDE E SILVA, VALDIR PIGNATTA E (2003). *Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço*, Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS / Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, Rio de Janeiro;

VRIES, K. (1947). *Strength of Beams as Determined by Lateral Buckling*, ASCE Transaction, Paper 2326, Vol. 112.

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(1943).