

**ANÁLISE DE VIGAS DE AÇO SUBMETIDAS A DIVERSAS CARGAS E  
CONDIÇÕES DE ISOLAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL**

**RÔMULO COSTA MELO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

E CONSTRUÇÃO CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2017

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

**ANÁLISE DE VIGAS DE AÇO SUBMETIDAS A DIVERSAS CARGAS E  
CONDIÇÕES DE ISOLAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO  
NATURAL**

**RÔMULO COSTA MELO**

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO – 2017  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE VIGAS DE AÇO SUBMETIDAS A DIVERSAS CARGAS E  
CONDIÇÕES DE ISOLAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL**

**RÔMULO COSTA MELO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, *Ph.D* (UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. William Taylor Matias Silva, *Dr. Ing* (UnB)**  
(Examinador interno)

---

**Prof. Gilberto Gomes, *DSc* (UnB)**  
(Examinador interno)

BRASÍLIA/DF, 12 DE DEZEMBRO DE 2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, RÔMULO COSTA

**Análise de Vigas de Aço Submetidas a Diversas Cargas e Condições de Isolamento em Situação de Incêndio Natural** [Distrito Federal] 2017.

xx, 93 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Vigas

2. Cargas

3. Isolamento

4. Incêndio

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, R.C. (2017). Análise de Vigas de Aço Submetidas a Diversas Cargas e Condições de Isolamento em Situação de Incêndio Natural. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rômulo Costa Melo.

TÍTULO: Análise de Vigas de Aço Submetidas a Diversas Cargas e Condições de Isolamento em Situação de Incêndio Natural.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Rômulo Costa Melo

Avenida Parque Águas Claras, número 3305, Bloco B, Apartamento 1405, Águas Claras - Norte

CEP: 71.906-500 Brasília – DF – Brasil

e-mail: rcmmssc95@gmail.com

## DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Aparício e Maria do Socorro.  
Uma das maiores virtudes ensinadas a mim pelos senhores é a perseverança.  
Sendo esta fundamental para enfrentar as adversidades impostas pela vida e  
para trilhar um caminho de vitórias em todos os aspectos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus, por me conceder o dom da vida e me cumular de bênçãos ao longo deste projeto final.

Ao Professor Luciano Mendes Bezerra, por ser um orientador presente e disponível. Sua exigência me impulsionou a melhorar a qualidade do meu trabalho de forma constante e incessante.

Aos meus pais, por proverem um ambiente familiar saudável, repleto de amor, conselhos e ensinamentos. Sem dúvidas, não seria quem sou sem a educação que me proporcionaram.

Ao Colégio Militar de Brasília, por ter sido uma instituição responsável por lapidar valores ensinados em casa ao longo de 7 anos da minha vida.

A todos os professores que tive, por contribuírem em meu engrandecimento intelectual e pessoal.

A todos os meus amigos, por compartilharem comigo os bons e maus momentos de minha vida.

## RESUMO

### ANÁLISE DE VIGAS DE AÇO SUBMETIDAS A DIVERSAS CARGAS E CONDIÇÕES DE ISOLAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL

**Autor: Rômulo Costa Melo**

**Orientador: Luciano Mendes Bezerra**

**Brasília, 12 de dezembro de 2017**

O fenômeno incêndio gera um carregamento acidental que, de forma errônea, nem sempre é considerado por projetistas no momento do cálculo estrutural. Além disso, as altas temperaturas atingidas nessas circunstâncias afetam de maneira negativa as propriedades mecânicas do aço. Esta combinação de efeitos pode se mostrar suficiente para o colapso parcial ou total de um edifício. Neste projeto, fez-se um estudo teórico sobre as formulações das temperaturas atingidas durante um incêndio ao longo do tempo, as propriedades do aço que são afetadas nessa circunstância, proposições das normas brasileiras para o cálculo de momentos fletor em vigas em perfil I e proposições mais precisas para o cálculo do momento fletor crítico que causa flambagem lateral por torção em viga submetida à situação de incêndio. Estas proposições foram determinadas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013). Posteriormente, com o auxílio do *software* de elementos finitos chamado ANSYS, realizaram-se modelagens de duas vigas com seção transversal em I em múltiplas situações de incêndio submetidas a diversas cargas. A carga específica de incêndio é única e foram utilizados dois graus de ventilação para os incêndios modelados. Os produtos finais dessas modelagens são os mapas de temperaturas ao longo dos perfis das vigas analisadas. Assim, pode-se calcular o momento crítico nas vigas, conforme NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013). Por fim, realizou-se a comparação entre estes valores e os valores obtidos segundo a metodologia proposta em norma.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF STEEL BEAMS SUBJECTED TO DIFFERENT LOADS AND ISOLATION CONDITIONS UNDER NATURAL FIRE SITUATION**

**Author: Rômulo Costa Melo**

**Supervisor: Luciano Mendes Bezerra**

**Brasília, December 12th, 2017**

Fire produces an accidental load that is erroneously not considered by some engineers during the project phase. Moreover, high temperatures developed during natural fire change mechanical properties of steel. This combination of effects can lead to partial or total collapse of structural systems. In this research, a theoretical study about the determination of the critical bending moment of I-shaped beams subjected to natural fire situation is done, according to the methodologies developed by NUNES (2005), CAMPÊLO (2008), RODRIGUES (2013) and the Brazilian Standards. In order to obtain these results, models of two I-shaped beams under multiple fire situations and a variety of loads are created using the finite element software ANSYS. The specific fire load is unique and the ventilation assumes two values. The outcome of those models is the temperature distribution in the section of the beam. This temperature distribution is paramount to calculate the degradation of mechanical properties of steel as the natural fire progresses. Then, the critical bending moments proposed by NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) and RODRIGUES (2013) are calculated and compared to the Brazilian Standard.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....	2
1.3. RESUMO DOS CAPÍTULOS .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. CRIAÇÃO DE NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE INCÊNDIOS.....	5
2.2. CASOS DE INCÊNDIO NO BRASIL.....	7
2.3. ESTADO DA ARTE.....	8
<b>3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>10</b>
3.1. INCÊNDIO.....	10
3.1.1. FENÔMENO.....	10
3.1.2. MODELOS .....	12
3.1.2.1. INCÊNDIO PADRÃO .....	13
3.1.2.2. INCÊNDIO NATURAL .....	14
3.1.3. PROPRIEDADES DO AÇO ESTRUTURAL AFETADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	18
3.1.3.1. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO .....	18
3.1.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	19
3.1.3.3. MASSA ESPECÍFICA.....	21
3.1.3.4. CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	21
3.1.3.5. CALOR ESPECÍFICO .....	23
3.1.4. PROPRIEDADES DO CONCRETO AFETADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	24
3.1.4.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	24
3.1.4.2. CALOR ESPECÍFICO.....	26
3.1.4.3. MASSA ESPECÍFICA.....	27
3.1.5. VARIAÇÃO TÉRMICA EM ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	27

3.1.5.1. FLUXOS DE CALOR CONDUTIVO.....	27
3.1.5.2. FLUXOS DE CALOR RADIATIVO .....	28
3.1.5.3. FLUXOS DE CALOR CONVECTIVO.....	29
3.1.6. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO.....	30
3.1.6.1. MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: ESTRUTURA DE AÇO SEM PROTEÇÃO .....	30
3.1.6.2. MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: ESTRUTURA DE AÇO COM PROTEÇÃO .....	32
3.1.7. DETERMINAÇÃO DE MOMENTO FLETOR SEGUNDO AS NORMAS NBR 14323:2013 E NBR 8800:2008 .....	34
3.2. ANÁLISE NUMÉRICA VIA ANSYS .....	38
3.2.1. SOFTWARE ANSYS .....	38
3.2.2. ELEMENTO UTILIZADO.....	38
<b>4. APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS .....</b>	<b>40</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	40
4.2. PERFIL VS 450X51.....	43
4.2.1. Caso 1 (sem alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	44
4.2.2. Caso 2 (sem alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	47
4.2.3. Caso 3 (com alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	50
4.2.4. Caso 4 (com alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	53
4.2.5. Caso 5 (com alvenaria e incêndio lateral): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	56
4.2.6. Caso 6 (com alvenaria e incêndio lateral): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	59
4.3. PERFIL VS 1400X481.....	62
4.3.1. Caso 1 (sem alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	63
4.3.2. Caso 2 (sem alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	66
4.3.3. Caso 3 (com alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	69
4.3.4. Caso 4 (com alvenaria): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	72
4.3.5. Caso 5 (com alvenaria e incêndio lateral): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02$ <b>m12</b> .....	75
4.3.6. Caso 6 (com alvenaria e incêndio lateral): $qfd = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13$ <b>m12</b> .....	78

4.4. COMPARAÇÕES ENTRE AS REDUÇÕES PERCENTUAIS NO VALOR DE MOMENTO CRÍTICO .....	81
4.5. METODOLOGIA PARA AJUSTE DAS FORMULAÇÕES PROPOSTAS .....	86
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>89</b>
5.1. CONCLUSÕES.....	89
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Temperaturas do incêndio padrão para queima de combustível celulósico e hidrocarbonetos. ....	13
Tabela 3.2: Valores de cargas de incêndio específicas .....	15
Tabela 3.3 Fatores de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados e trefilados.....	19
Tabela 3.4 Fatores de redução do módulo de elasticidade dos aços laminados e trefilados ....	20
Tabela 3.5 Variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura .....	22
Tabela 3.6 Variação do calor específico do aço em função da temperatura do aço.....	23
Tabela 3.7 Condutividade térmica do concreto em função da temperatura .....	25
Tabela 3.8 Calor específico do concreto em função da temperatura .....	26
Tabela 3.9 Descrição dos elementos térmicos .....	39
Tabela 4.1 Temperaturas máximas - VS450X51 O2 .....	45
Tabela 4.2 Temperaturas máximas – VS450X51 O13.....	48
Tabela 4.3 Temperaturas máximas - VS450X51 O2 ALVENARIA .....	51
Tabela 4.4 Temperaturas máximas - VS450X51 O13 ALVENARIA .....	54
Tabela 4.5 Temperaturas máximas - VS450X51 O2 L ALVENARIA.....	57
Tabela 4.6 Temperaturas máximas - VS450X51 O13 L ALVENARIA.....	60
Tabela 4.7 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2 .....	64
Tabela 4.8 Temperaturas máximas - VS1400X482 O13 .....	67
Tabela 4.9 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2 ALVENARIA .....	70
Tabela 4.10 Temperaturas máximas -VS1400X482 O13 ALVENARIA .....	73
Tabela 4.11 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2 L ALVENARIA.....	76
Tabela 4.12 Temperaturas máximas - VS1400X482 O13 L ALVENARIA.....	79
Tabela 4.13 Perdas percentuais de capacidade resistente para TRRF de 30 min e 120 min....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação do Tetraedro de Fogo .....	10
Figura 3.2: Curva representativa da evolução de um incêndio em função do tempo. ....	11
Figura 3.3: Temperatura do incêndio padrão em função do tempo e do material incendiado .	14
Figura 3.4 Fatores de redução para a resistência ao escoamento dos aços em função da temperatura.....	19
Figura 3.5 Fatores de redução do módulo de elasticidade dos aços em função da temperatura .....	21
Figura 3.6 Condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	22
Figura 3.7 Variação do calor específico do aço em função da temperatura.....	24
Figura 3.8 Condutividade térmica do concreto em função da temperatura .....	25
Figura 3.9 Calor específico do concreto em função da temperatura .....	27
Figura 3.10 Fator de massividade de viga perfil I sem proteção.....	32
Figura 3.11 Fator de massividade de viga perfil I com proteção .....	33
Figura 3.12 Parâmetros referentes ao momento fletor resistente .....	36
Figura 3.13 Elemento térmico PLANE 55 .....	39
Figura 4.1 Condições de incêndio analisadas.....	40
Figura 4.2 Incêndio natural .....	40
Figura 4.3 Nós selecionados para aferição de temperatura .....	43
Figura 4.4 Evolução térmica - VS450X51 O2 .....	44
Figura 4.5 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O2.....	45
Figura 4.6 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2 .....	46
Figura 4.7 Momento fletor crítico .....	46
Figura 4.8 Evolução térmica - VS450X51 O13 .....	47
Figura 4.9 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13.....	48
Figura 4.10 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13 .....	49
Figura 4.11 Momento fletor crítico .....	49
Figura 4.12 Evolução térmica - VS450X51 O2 ALVENARIA.....	50
Figura 4.13 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O2 ALVENARIA.....	51
Figura 4.14 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2 ALVENARIA .....	52
Figura 4.15 Momento fletor crítico .....	52
Figura 4.16 Evolução térmica - VS450X51 O13 ALVENARIA.....	53
Figura 4.17 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13 ALVENARIA.....	54

Figura 4.18 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13 ALVENARIA .....	55
Figura 4.19 Momento fletor crítico .....	55
Figura 4.20 Evolução térmica - VS450X51 O2 L ALVENARIA .....	56
Figura 4.21 Desenvolvimento da temperatura nos nós -VS450X51 O2 L ALVENARIA .....	57
Figura 4.22 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2 L ALVENARIA.....	58
Figura 4.23 Momento fletor crítico .....	58
Figura 4.24 Evolução térmica - VS450X51 O13 L ALVENARIA .....	59
Figura 4.25 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13 L ALVENARIA ...	60
Figura 4.26 Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13 L ALVENARIA.....	61
Figura 4.27 Momento fletor crítico .....	61
Figura 4.28 Nós selecionados para aferição de temperatura .....	62
Figura 4.29 Evolução térmica - VS1400X482 O2 .....	63
Figura 4.30 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O2.....	64
Figura 4.31 Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O2 .....	65
Figura 4.32 Momento fletor crítico .....	65
Figura 4.33 Evolução térmica - VS1400X482 O13 .....	66
Figura 4.34 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13.....	67
Figura 4.35 Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O13 .....	68
Figura 4.36 Momento fletor crítico .....	68
Figura 4.37 Evolução térmica - VS1400X482 O2 ALVENARIA.....	69
Figura 4.38 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O2 ALVENARIA.....	70
Figura 4.39 Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O2 ALVENARIA .....	71
Figura 4.40 Momento fletor crítico .....	71
Figura 4.41 Evolução térmica - VS1400X482 O13 ALVENARIA.....	72
Figura 4.42 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13 ALVENARIA...	73
Figura 4.43 Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400x482 O13 ALVENARIA .....	74
Figura 4.44 Momento fletor crítico .....	74
Figura 4.45 Evolução térmica - VS 1400X482 O2 L ALVENARIA .....	75
Figura 4.46 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS 1400X482 O2 L ALVENARIA	76
Figura 4.47 Temperaturas médias das mesas dos perfis VS1400X482 O2 L ALVENARIA..	77
Figura 4.48 Momento fletor crítico .....	77
Figura 4.49 Evolução térmica - VS1400X482 O13 L ALVENARIA .....	78
Figura 4.50 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13 L ALVENARIA	79
Figura 4.51 Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O13 L ALVENARIA..	80

Figura 4.52 Momento fletor crítico .....	80
Figura 4.53 Perda de resistência ao longo do tempo - VS450X51 .....	82
Figura 4.54 Perda de resistência ao longo do tempo - VS450X51 ALVENARIA .....	82
Figura 4.55 Perda de resistência ao longo do tempo - L VS450X51 ALVENARIA.....	83
Figura 4.56 Perda de resistência ao longo do tempo - VS1400X482 .....	83
Figura 4.57 Perda de resistência ao longo do tempo - VS1400X482 ALVENARIA .....	84
Figura 4.58 Perda de resistência ao longo do tempo - L VS1400X482 ALVENARIA.....	84
Figura 4.59 Metodologia proposta para o perfil VS450X51 .....	87
Figura 4.60 Metodologia proposta para o perfil VS1400X482.....	88

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$A$	Área da seção transversal do elemento estrutural de aço
$A_f$	Área do piso do compartimento
$A_{fc}$	Área da seção através da qual o calor flui por condução
$A_t$	Área total do compartimento (paredes, telhado e piso, incluindo aberturas)
$A_{tc}$	Área da superfície exposta à troca de calor
$A_v$	Área total de aberturas verticais em todas as paredes
$b_{f1}$	Largura da mesa superior
$b_{f2}$	Largura da mesa inferior
$b_w$	Comprimento da alma
$c$	Calor específico do material de vedação do compartimento
$c_a$	Calor específico do aço
$c_m$	Calor específico do material de proteção contra incêndio
$C_b$	Fator de modificação do diagrama de momento fletor não uniforme
$C_i$	Constante torcional reduzida
$C_w$	Constante de empenamento da seção transversal
$d$	Altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão
$E$	Módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.
$E_{0,\theta}$	Módulo de elasticidade dos aços trefilados a uma temperatura de $\theta_a$
$E_1$	Módulo de elasticidade do aço da mesa superior
$E_2$	Módulo de elasticidade do aço da mesa inferior
$E_\theta$	Módulo de elasticidade dos aços laminados a uma temperatura de $\theta_a$
$f$	Distância do ponto de aplicação da carga crítica ao eixo horizontal da mesa inferior
$f_{y,\theta}$	Resistência ao escoamento dos aços laminados a uma temperatura $\theta_a$
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço a 20°C

$f_{y0,\theta}$	Resistência ao escoamento dos aços trefilados a uma temperatura $\theta_a$
$f_{y0}$	Resistência ao escoamento dos aços trefilados a 20°C
$h$	Altura da alma
$h_{eq}$	Média ponderada das alturas das janelas em todas as paredes
$H_C$	Corrente térmica de convecção
$H_i$	Potencial calorífico de cada componente $i$ do material combustível
$I_y$	Momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma
$J$	Constante de torção da seção transversal
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados
$k_{E0,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços trefilados
$k_{y,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados
$k_{y0,\theta}$	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços trefilados
$L_b$	Distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)
$m$	Coefficiente para cálculo da carga de incêndio específica de design
$M_A$	Valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda
$M_B$	Valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado
$M_C$	Valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda
$M_{cr}$	Momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente
$M_i$	Massa total de cada componente $i$ do material combustível
$M_{max}$	Valor de momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado
$M_{pl}$	Momento de plastificação da seção transversal à temperatura ambiente

$M_r$	Momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal para projeto à temperatura ambiente
O	Fator de abertura
$q_{fd}$	Carga de incêndio específica para design
$q_{fk}$	Carga de incêndio específica característica
$q_{td}$	Carga de design do incêndio
$r_y$	Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão
$R_m$	Parâmetro igual a 1,00 para seções com dois eixos de simetria
t	Tempo
$t_f$	Espessura da mesa
$t_{f1}$	Espessura da mesa superior
$t_{f2}$	Espessura da mesa inferior
$t_{lim}$	Tempo limite
$t_m$	Espessura do material de proteção contra incêndio
$t_w$	Espessura da alma
W	Módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão
$W_c$	Módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão
$\alpha_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$\epsilon_{res}$	Emissividade resultante
$\theta_0$	Temperatura ambiente antes do início do aquecimento
$\theta_a$	Temperatura do aço
$\theta_g$	Temperatura dos gases
$\kappa_1$	Fator de correção para temperatura não-uniforme na seção transversal
$\kappa_2$	Fator de correção para temperatura não-uniforme ao longo do comprimento da barra
$\lambda$	Condutividade térmica do material de vedação do compartimento

$\lambda$	Parâmetro de esbeltez da peça
$\lambda_a$	Condutividade térmica do aço
$\lambda_m$	Condutividade térmica do material de proteção contra incêndio
$\lambda_p$	Valor de esbeltez correspondente à plastificação
$\lambda_r$	Valor de esbeltez correspondente ao início do escoamento
$\mu$	Perímetro do elemento estrutural de aço exposto ao incêndio
$\mu/A$	Fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio
$\mu_m$	Perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio
$\mu_m/A$	Fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de proteção contra incêndio
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Massa específica do material de vedação do compartimento
$\rho_a$	Massa específica do aço
$\rho_m$	Massa específica do material de proteção contra incêndio
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman
$\sigma_{q1}$	Coefficiente para cálculo da carga de incêndio específica de design
$\sigma_{q2}$	Coefficiente para cálculo da carga de incêndio específica de design
$\sigma_n$	Coefficiente para cálculo da carga de incêndio específica de design
$\sigma_r$	Tensão residual de compressão nas mesas que deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado
$\varphi$	Fluxo de calor por unidade de área
$\varphi_c$	Fluxo de calor convectivo por unidade de área
$\varphi_r$	Fluxo de calor devido à radiação
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Delta Q/\Delta t$	Taxa de calor transmitido por condução através de uma área
$\Delta T$	Diferença de temperaturas entre a superfície e a massa de fluido
$\Delta T/\Delta x$	Gradiente de temperatura na seção

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Analysis System
ASTM	American Society for Testing and Materials
EN	European Standard
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa comprimida
FLT	Flambagem lateral com torção
NBR	Norma Brasileira
NFPA	National Fire Protection Association
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Poli/USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Acredita-se que o primeiro contato dos seres humanos com o fogo se deu com incêndios ocasionados por relâmpagos que inflamavam a vegetação. No início, o manuseio do fogo era esporádico, uma vez que não se sabia como iniciar e manter as chamas. Percebeu-se que este novo recurso era capaz de cozer alimentos, prover iluminação, espantar animais selvagens, servir como fonte de calor para sobrevivência às noites frias e derretimento de metais para moldar armas de guerra. Esses benefícios impulsionaram a humanidade a desenvolver métodos de aproveitamento do fogo, levando a uma revolução na história do homem.

Conforme a sociedade foi evoluindo, o uso do fogo também se adaptou às novas necessidades humanas. A tendência atual é de formação de grandes centros urbanos e o processo de verticalização das construções é uma consequência. Assim, a possibilidade de incêndio em edifícios se tornou uma preocupação, uma vez que este fenômeno, sem o controle adequado, pode trazer prejuízos materiais e ceifar vidas.

O papel do engenheiro civil é garantir que essas perdas sejam minimizadas ou mesmo eliminadas. Portanto, do ponto de vista do incêndio, duas considerações devem ser feitas durante a concepção do projeto estrutural, sendo elas: manutenção das chamas em nível controlado, a fim de que possam ser suprimidas e, em caso de perda de controle sobre o incêndio, a determinação do tempo que a estrutura resiste ao incêndio até o seu colapso. Sendo que, este tempo é determinante para a evacuação da edificação.

Assim sendo, faz-se necessário seguir normas de segurança contra incêndios. Tais normas são de suma importância para garantir que os cálculos dos tempos de colapso de diferentes estruturas sejam determinados segundo metodologias propostas e aceitas por especialistas. Vale ressaltar que o método deve ser validado e que os resultados sejam realistas do ponto de vista da engenharia de segurança.

Atualmente, utilizam-se *softwares* para que sejam feitas simulações de incêndios, de forma a antever os impactos deste fenômeno na estrutura estudada. Esse recurso ainda possui limitações, uma vez que nem todos os fenômenos envolvidos foram completamente compreendidos ou modelados de forma satisfatória. Assim sendo, espera-se que a ciência evolua no sentido de prover modelos de incêndio cada vez mais realistas.

## 1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O fenômeno de incêndio em edificações é visto como uma carga excepcional pelas normas brasileiras. Este fato fez com que um número significativo de engenheiros civis optasse erroneamente por desprezar os efeitos desse fenômeno evocando as prerrogativas de curta duração e de baixa probabilidade de ocorrência.

Vale ressaltar que durante um incêndio, diversas propriedades dos materiais constituintes da estrutura são alteradas conforme a variação da temperatura local, sendo uma das mais importantes, a redução do valor do módulo de elasticidade com o aumento de temperatura. Assim, a falta de estudos sobre a diminuição da eficiência da estrutura em resistir aos carregamentos impostos ao longo de um incêndio pode resultar em seu colapso parcial ou total, ocasionando, desta forma, significativos prejuízos materiais e óbitos de pessoas e animais.

Uma forma de se alterar o panorama atual, no qual boa parte dos projetistas negligencia os efeitos negativos que um incêndio provoca em uma estrutura, é por meio da divulgação do conhecimento científico. Sendo este conhecimento alcançado pela produção de boas pesquisas na área de incêndio em estruturas, as quais são dependentes também de investimentos em universidades e centros de pesquisas públicos e privados. No entanto, o financiamento de uma pesquisa depende também da demanda do mercado, o qual deve ser sensibilizado para o problema de segurança das estruturas em situação de incêndio. Além disso, os experimentos mostram resultados mais satisfatórios quando são realizados em uma estrutura em escala real. Consequentemente, os custos de ensaios são altos perante os benefícios imediatos que esses estudos trazem. Assim, entra-se em um círculo vicioso no qual não há uma melhoria significativa no âmbito da segurança contra incêndios em edificações.

Por mais que o cenário se mostre desfavorável, a produção de pesquisas nessa área tem sido fundamental para que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolvesse as normas NBR 14323:1999 – Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio e NBR 14432:2000 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Vale ressaltar que essas normas já foram revisadas e atualizadas em 2013 e em 2001, respectivamente.

As normas NBR apresentam uma tendência conservadora, dado que servirão de base para o dimensionamento de variadas estruturas. Assim, neste trabalho, propõe-se a comparação entre os valores de momentos fletores em vigas de aço em perfil I submetidas a diversas cargas e

condições de isolamento em situação de incêndio natural obtidos pela metodologia estipulada pela norma NBR 14323:2013 e os valores destes momentos obtidos por formulações mais precisas desenvolvidas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013). Segundo a norma citada, podem-se adotar as seguintes considerações: distribuição uniforme de temperatura no perfil metálico estudado ou temperaturas iguais da mesa inferior e alma deste perfil e uma temperatura distinta para a mesa superior. Por outro lado, para se obter dados de distribuição de temperatura mais reais para as formulações citadas, desenvolve-se um modelo computacional no *software* ANSYS. Este modelo computacional gera uma distribuição de temperaturas, ao longo do perfil metálico analisado, mais verossímil comparada ao incêndio real, assim, os resultados se mostram mais acurados.

### **1.3. RESUMO DOS CAPÍTULOS**

Este trabalho de conclusão de curso de graduação é composto por cinco capítulos. No primeiro deles, faz-se um breve histórico sobre a interação entre homem e fogo, ressaltando benefícios ao controlar chamas e potenciais malefícios quando se perde este controle. Em seguida, a motivação e os objetivos deste trabalho são evidenciados e refletem a importância de estudos nessa área para a segurança da sociedade como um todo. Por fim, apresenta-se um breve resumo dos capítulos abordados ao longo do trabalho.

No segundo capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica sobre a relevância da criação de normas técnicas sobre incêndios no Brasil e no mundo. Evidenciando que formulações mais específicas para este evento são recentes. Além disso, alguns incêndios notórios na história brasileira são pontuados por se mostrarem divisores de águas quanto à criação de regulamentações mais claras sobre a concepção de projetos de edifícios em situação de incêndio. Por fim, expõe-se que o estado da arte no Brasil ainda caminha a passos lentos na engenharia de incêndio e se evidenciam os trabalhos desenvolvidos na Universidade de Brasília.

O terceiro capítulo versa sobre as variáveis que governam o fenômeno incêndio, os modelos desenvolvidos para simular a distribuição da temperatura dos elementos estruturais ao longo do tempo, as principais propriedades térmicas e mecânicas dos elementos estruturais alteradas ao longo do tempo durante um incêndio, as formas de transmissão de calor para estes elementos, a elevação da temperatura de vigas sem e com proteção contra incêndio proposta em norma e os métodos simplificados de cálculo de momento fletor em vigas metálicas em

perfil I propostos em norma. Por fim, é abordado o elemento utilizado para compor a malha de elementos finitos, assim como as suas propriedades nos estudos da análise numérica proposta.

O quarto capítulo trata sobre as aplicações numéricas e analíticas baseadas nas simulações computacionais desenvolvidas no *software* ANSYS e nas formulações demonstradas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para o cálculo de momento fletor em vigas de aço submetidas a incêndio. Além disso, abordará de forma detalhada a metodologia aplicada à simulação de cada caso estudado. Por exemplo, trazendo informações sobre a malha utilizada e temperatura dos elementos selecionados como representativos da temperatura das mesas das vigas.

No quinto e último capítulo, encontram-se as conclusões, sugestões para trabalhos vindouros e referências bibliográficas consultadas ao longo deste trabalho de conclusão de curso.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CRIAÇÃO DE NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE INCÊNDIOS

O Reino Unido foi uma das primeiras nações a criar regulamentações sobre segurança contra incêndios. Este fato é consequência de uma série de incêndios em larga escala que devastaram cidades inteiras, principalmente, no período medieval. A maioria das cidades possuíam vias estreitas, as edificações eram construídas em madeira e os ventos fluíam com certa facilidade, dado que o relevo local não é muito acidentado. Assim, esta combinação de fatores contribuía para uma rápida propagação das chamas.

Os principais atos adotados pelo governo britânico que visavam proporcionar maior segurança contra incêndios nas cidades são listados abaixo (Fonte: Internet 1, ver em referências bibliográficas):

- Século XII – primeira tentativa de legislação sobre segurança contra incêndio. O prefeito de Londres decretou que as casas deveriam ser construídas em pedra e telhados compostos por fibras vegetais não seriam mais permitidos;
- Século XV – decretado o primeiro *Act of Parliament*, que versava sobre prevenção e combate contra incêndios;
- Século XVII – ocorre o grande incêndio de Londres, que durou por quatro dias consecutivos e destruiu cerca de 80% da cidade. Este evento fez com que o rei *Charles II* determinasse que todos os novos prédios fossem construídos em tijolos ou pedras e as principais vias fossem expandidas para evitar que futuros incêndios se espalhassem e tomassem a mesma dimensão que este;
- Século XVIII – *The Fires Prevention (Metropolis) Act* foi lançado em 1774, o qual categorizava as edificações em sete classes segundo as espessuras de paredes externas e repartições internas;
- Século XIX – uma grande quantidade de incêndios atingiu o Reino Unido neste período, sendo que alguns deles afetaram prédios relevantes ao governo britânico como *Houses of Parliament* e *Tower of London*. Assim, uma série de atos sobre segurança contra incêndio foi decretada. Uma das medidas mais relevantes foi à formação de uma brigada de incêndio na cidade de Edimburgo, constituída por 80 bombeiros;
- Século XX – uma série de atos decretados nesse século buscava estabelecer rotas seguras de fuga em caso de incêndio em fábricas e outros prédios que abrigavam grandes concentrações de pessoas, como teatros. Além disso, em 1948, foi publicado o primeiro

*British Standard Code of Practice* que tratava sobre precauções contra incêndios. Desde então, o desenvolvimento de normas técnicas sobre essa temática se intensificou e as suas bases teórica e experimental se fortaleceram, culminando no estado da arte atual.

Outro país que se tornou referência no âmbito de normatizações quanto à segurança contra incêndios foram os Estados Unidos. Segundo Lawson (2009), acredita-se que o grande incêndio na cidade de Nova Iorque em 1835 levou ao desenvolvimento do primeiro método conhecido de teste de incêndio especificado na lei norte americana, sendo estabelecido em 1896. Em 1899, os testes relativos a incêndios se tornaram parte do código de edificação da cidade.

Em 1903, desenvolveram-se dois importantes métodos de teste de incêndio que são utilizados até hoje. Um deles foi desenvolvido por *Underwriter's Laboratories* e visava à proteção de prédios urbanos incluindo avaliação de ignição, propagação de chamas e penetração de materiais exteriores do telhado. Esta metodologia foi adotada pela *National Fire Protection Association* (NFPA) para a classificação de materiais componentes de telhados em 1910. Este teste está em uso há 100 anos e atualmente passou por atualizações e se tornou ASTM E108, *Standard Test Methods for Fire Tests of Roof Coverings*. (LAWSON, 2009).

O outro método de teste de incêndio surgiu das recomendações proposta pelo *London Meeting of the International Fire Prevention Congress* em 1903. Este método visava analisar o comportamento de sistemas construtivos e membros estruturais expostos ao fogo. Em 1918, esse método foi revisado e adotado como NFPA 251. Atualmente, este método ainda é mantido pela NFPA. (LAWSON, 2009).

Segue abaixo um pequeno histórico sobre testes e normas relacionados a incêndios realizados nos Estados Unidos, baseado também no trabalho de Lawson (2009):

- 1890 – Denver – Primeiro teste norte americano relacionado a incêndio relacionado a desempenho estrutural;
- 1895 – Chicago – *Chicago Sanitary District* realizou um dos primeiros testes térmicos de pequena escala relacionados à exposição de estrutura ao fogo;
- 1908 – *American Society for Testing and Materials* (ASTM) – primeiro método de teste de incêndio para pisos;
- 1909 – ASTM – primeiro método de teste de incêndio para partições;

- 1933 – ASTM E199 – criação do *Standard Method of Fire Tests of Building Construction and Materials*, que em tradução livre seria norma sobre teste de incêndio em edifícios e materiais.

## 2.2. CASOS DE INCÊNDIO NO BRASIL

Os grandes casos de incêndios prediais ocorridos no início dos anos 70 no Brasil serviram de motivação para as autoridades locais competentes desenvolverem normas técnicas sobre segurança para estes eventos. Segundo Seito et al (2008), até então, a regulamentação quanto a tais eventos era esparsa e bastante incipiente, contida em Códigos de Obras dos Municípios. Além disso, o Corpo de Bombeiros estadual era responsável por regulamentar apenas a obrigatoriedade de medidas de combate a incêndio, por exemplo, instalação de hidrantes e extintores. Assim sendo, não existia nenhuma norma específica sobre o dimensionamento de estruturas submetidas a incêndio.

Os casos de incêndios que provocaram as maiores perdas materiais e de vidas no Brasil estão listados abaixo em ordem cronológica (SEITO ET AL, 2008):

- 1961 – *Gran Circo Norte-Americano*, Niterói, Rio de Janeiro – este é o incêndio que causou o maior número de fatalidades no Brasil, sendo contabilizados cerca de 250 mortos e 400 feridos. Estima-se que 2500 espectadores estavam presentes no circo no dia da tragédia e que a evacuação do local foi prejudicada por não haver saídas devidamente posicionadas e dimensionadas;

- 1970 – Montadora de automóveis Volkswagen, São Bernardo do Campo, São Paulo – neste incêndio, as perdas materiais predominaram, dado que houve a perda total do edifício e apenas um óbito contabilizado;

- 1972 – Edifício Andraus, São Paulo, São Paulo – segundo investigações, a origem das chamas neste prédio comercial se deu em cartazes de publicidade instalados na marquise deste edifício. Contabilizaram-se 16 óbitos e 336 feridos neste evento. Acredita-se que um número maior de fatalidades não aconteceu, pois as pessoas migraram para um heliporto na cobertura. Este incêndio levou a Prefeitura de São Paulo a planejar uma reformulação do Código de Obras municipal, o qual tinha sido desenvolvido em 1929 e atualizado em 1955.

- 1974 – Edifício Joelma, São Paulo, São Paulo – o incêndio foi semelhante ao acontecido no Edifício Andraus, no entanto, com maiores proporções, dado que 179 pessoas faleceram e 320 ficaram feridas. Uma parcela considerável dos óbitos advém de pessoas que

se projetaram do prédio. Este ato de desespero foi motivado por falta de rotas de escape devidamente sinalizadas e dimensionadas.

Os incêndios ocorridos nos edifícios Andraus e Joelma impulsionaram a prefeitura municipal de São Paulo a editar o Decreto Municipal nº 10.878, instituindo normas especiais para segurança de edifícios em situação de incêndio a serem observadas durante a fase de projeto. Posteriormente, estas diretrizes foram incorporadas à Lei nº 8266 de 1975, que é o novo Código de Edificações para o Município de São Paulo. Além dessas medidas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NB208/74 “Saídas de Emergência em Edifícios Altos” que, posteriormente, se tornou a NBR 9077:2001. (SEITO ET AL, 2008).

Assim, nota-se que houve uma tendência de criação de normas sobre rotas de saída, sistemas de controle de fumaça e chuveiros automáticos. Por outro lado, as normas que tratam sobre estabilidade estrutural de prédios com estrutura metálica em situação de incêndio surgiram apenas a partir do ano 1999 com o lançamento da norma NBR 14323.

### **2.3. ESTADO DA ARTE**

Conforme apresentado anteriormente, as normas técnicas brasileiras que abordam sobre a análise e dimensionamento de estruturas em situação de incêndio foram produzidas há menos de 20 anos. Conseqüentemente, a quantidade de publicações sobre o tema ainda se encontra aquém do necessário, dada a sua importância para a sociedade. A Universidade de Brasília conta com o Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) para o desenvolvimento de pesquisas na área. Dado o grau de dificuldade das modelagens de situação de incêndio, nota-se que os trabalhos desenvolvidos nesta instituição, com a orientação do Professor Luciano Mendes Bezerra, estão focados no estudo de elementos estruturais, sendo tais elementos, viga em perfil I, pórticos planos, *decks* de madeira e fachadas. Assim, estes trabalhos encontram-se listados abaixo em ordem cronológica de desenvolvimento:

- 2005 – Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil intitulada “Uma Abordagem Numérica e Analítica para Determinação da Temperatura e do Momento Fletor Crítico em Vigas de Aço em Situação de Incêndio”, desenvolvida por NUNES;
- 2006 – Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil intitulado “Uma Formulação para a Determinação Simplificada do Momento Crítico FLT de

Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural”, desenvolvida por SOUZA e MORAIS;

- 2008 – Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil intitulada “Estudo Numérico e Analítico para a Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada”, desenvolvida por CAMPÊLO.
- 2013 – Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil intitulada “Determinação Numérica e Analítica da Carga Crítica Uniformemente Distribuída de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural”, desenvolvida por RODRIGUES.
- 2014 – Artigo Científico intitulado “Flame Spread Along Horizontal Wooden Structures Adjacent to Buildings, Part A: Full Scale Test”, desenvolvido por BEZERRA, HEJTMÁNEK e BRAGA.

Outras universidades brasileiras também se destacam na produção de conhecimento na área de incêndios em estruturas entre elas a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A Poli/USP conta com um grupo de pesquisadores liderados pelo Professor Valdir Pignatta e Silva. Enquanto isso, a UFOP conta com um grupo de pesquisa liderado pelo professor Antônio Maria Claret de Gouveia.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1. INCÊNDIO

##### 3.1.1. FENÔMENO

O ser humano utiliza a combustão, uma reação química exotérmica que libera grandes quantidades de energia térmica, em variadas circunstâncias. Quando este fenômeno foge ao controle em um local no qual se colocam em risco vidas e bens materiais, tem-se um incêndio. Existem quatro elementos, que permitem o início e a manutenção de uma combustão, que compõem o Tetraedro de Fogo, sendo eles: o combustível, o comburente, o calor ou temperatura de ativação das chamas e a reação em cadeia.



**Figura 3.1: Representação do Tetraedro de Fogo**

**Fonte: SEITO ET AL, 2008, p. 36.**

Um material é dito combustível quando apresenta a propriedade de ser inflamado. Uma vez que as chamas se iniciam, deve-se ter um equilíbrio entre o combustível e o comburente para que o processo continue. Dado que se mantenha uma quantidade suficiente de comburente no ambiente, a intensidade das chamas será função da carga de incêndio. Segundo a norma NBR 14432:2000, define-se carga de incêndio como a soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas em uma situação de combustão completa de todos os materiais combustíveis presentes em um ambiente, incluindo-se os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos.

De forma geral, o comburente presente em incêndios é o gás oxigênio. Este compõe cerca de 20% do ar atmosférico. Vale ressaltar que a liberação de luz e calor, formação das chamas que caracterizam um incêndio, ocorre apenas para ambientes que contenham uma parcela de gás oxigênio que corresponde ao mínimo de 13% do ar atmosférico presente no local incendiado (Fonte: Internet 2, ver em referências bibliográficas). Assim, nota-se que a ventilação do ambiente, ou seja, a capacidade de renovação do ar local, e consequente reposição de gás oxigênio, será de suma importância na manutenção das chamas. Outros materiais podem desempenhar a função de comburente em situações mais específicas como o cloro e o flúor.

Ao se analisar um incêndio, três temperaturas de ativação das chamas se mostraram cruciais para o desenvolvimento do fenômeno, sendo elas (SEITO ET AL, 2008):

- Ponto de fulgor - temperatura mínima capaz de provocar o desprendimento de vapores ou gases do material combustível e o início do processo de combustão na presença da chama piloto. As chamas não se mantêm, pois a quantidade de gases combustíveis liberadas é insuficiente;
- Ponto de inflamação – temperatura mínima capaz de promover uma combustão autossustentável na presença de uma chama piloto, ainda que esta seja retirada. Isto acontece devido à formação de gases combustíveis em quantidade suficiente para a manutenção das chamas;
- Ponto de ignição - temperatura mínima em que os gases combustíveis liberados, em mistura com o oxigênio do ar, iniciam e mantêm a combustão independente de qualquer fonte de calor.

Por fim, o último elemento constituinte do tetraedro de fogo é a reação em cadeia. Esta é a responsável pela produção da própria energia de ativação do sistema para manutenção das chamas, enquanto houver combustível e comburente.

Uma vez que o incêndio apresenta os quatro elementos do tetraedro de fogo, pode-se avaliar o seu desenvolvimento ao longo do tempo, conforme a figura abaixo:

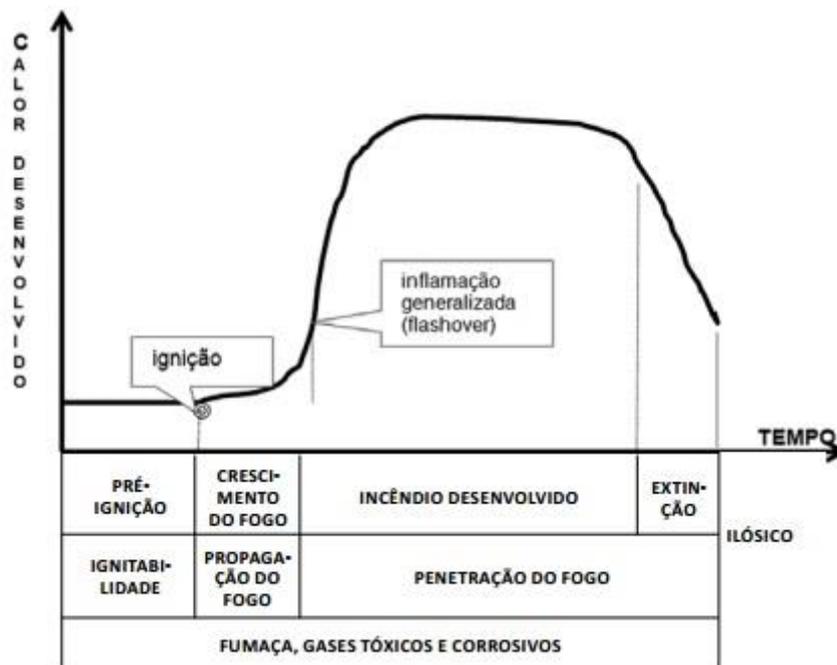


Figura 3.2: Curva representativa da evolução de um incêndio em função do tempo.

Fonte: SEITO ET AL, 2008, p. 44.

Este modelo apresenta três estágios principais, sendo que o primeiro estágio está subdividido em duas etapas. A primeira etapa do primeiro estágio é chamada de “pré-ignição” e é caracterizada por uma combustão lenta, pode-se ter ou não a presença de fumaça no ambiente e a quantidade de calor produzida é relativamente pequena. Por conta deste fato, a força de flutuação dos gases gerados é pequena, assim, o fluxo de ar no ambiente será crucial na movimentação destes gases. Esta etapa chega ao fim quando se desenvolve o processo de ignição. A segunda etapa do primeiro estágio é chamada de “crescimento do fogo” e é caracterizada pela propagação das chamas para outros objetos dentro do ambiente. O aumento na temperatura do ambiente acontece de forma mais rápida do que na etapa anterior e o final dessa etapa é marcado pelo *flashover* ou inflamação generalizada. Nota-se que este estágio é bastante instável, assim, pequenas perturbações podem levar a extinção das chamas. Por isso, os sistemas de proteção contra incêndio são desenvolvidos para atuarem neste momento, pois terão uma maior taxa de sucesso (SEITO ET AL, 2008).

A segunda etapa é chamada de “incêndio desenvolvido” e está compreendida entre os pontos de inflamação generalizada e a máxima temperatura do incêndio. As principais características dessa etapa são: elevadas temperaturas, atingindo 1000°C ou mais, dependendo do material combustível; todos os materiais combustíveis presentes no ambiente serão inflamados; cerca de 50% da carga de incêndio será consumida nesta etapa (SEITO ET AL, 2008). Lembrando que os principais fatores que determinarão a temperatura do incêndio e a quantidade de material consumido são carga de incêndio e ventilação do ambiente.

A terceira etapa é chamada de “extinção do incêndio” e se inicia após o ponto de temperatura máxima do incêndio. Nota-se que o incêndio apresentará intensidade reduzida à medida que os materiais combustíveis são completamente inflamados e sua disponibilidade for reduzida. A temperatura no ambiente cairá de forma relativamente rápida e o incêndio será considerado extinto quando atingir a temperatura de 300°C (NUNES, 2005).

### **3.1.2. MODELOS**

O processo de determinação das temperaturas atingidas no interior de um ambiente em situação de incêndio é complexo, uma vez que depende de fatores que variam de estrutura para estrutura, por exemplo, grau de ventilação, carga de incêndio, geometria do ambiente, dentre outros. Assim, fez-se necessário o desenvolvimento de modelos que pudessem simular a variação da temperatura ao longo do tempo. Dentre eles, a norma NBR 14432:2000 adota o incêndio padrão e o incêndio natural.

### 3.1.2.1. INCÊNDIO PADRÃO

O método de incêndio padrão foi desenvolvido para caracterizar a temperatura de gases em um compartimento em chamas no âmbito de ensaios experimentais. O único parâmetro levado em consideração nessa formulação é o tempo de duração do incêndio, assim, desprezando efeitos de grau de ventilação e carga de incêndio do ambiente. Logo, o emprego desta metodologia é recomendado para situações em que não se tem dados reais do local estudado.

A formulação utilizada para caracterizar o incêndio padrão mostra que o comportamento da temperatura em relação ao tempo é sempre crescente e tende a se estabilizar com o passar do tempo. A norma NBR 14432:2000 admite a mesma formulação que a norma europeia EN 1991-1-2/2002 para a combustão de material celulósico, conforme indicado na equação abaixo:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.1)$$

Onde,

$\theta_g$  é a temperatura dos gases, em °C, no instante t;

$\theta_0$  é a temperatura ambiente antes do início do aquecimento, em °C, igual a 20 °C;

t é o tempo em minutos.

A norma europeia considera a possibilidade de combustão de material composto por hidrocarbonetos, onde o incêndio será mais intenso, ocasionando um aumento de temperatura bem mais rápido em relação à queima de material celulósico. Assim sendo, seguem abaixo a formulação para a temperatura de incêndio para combustão de material composto por hidrocarbonetos e o gráfico comparativo entre incêndios causados pela queima de material celulósico e hidrocarbonetos:

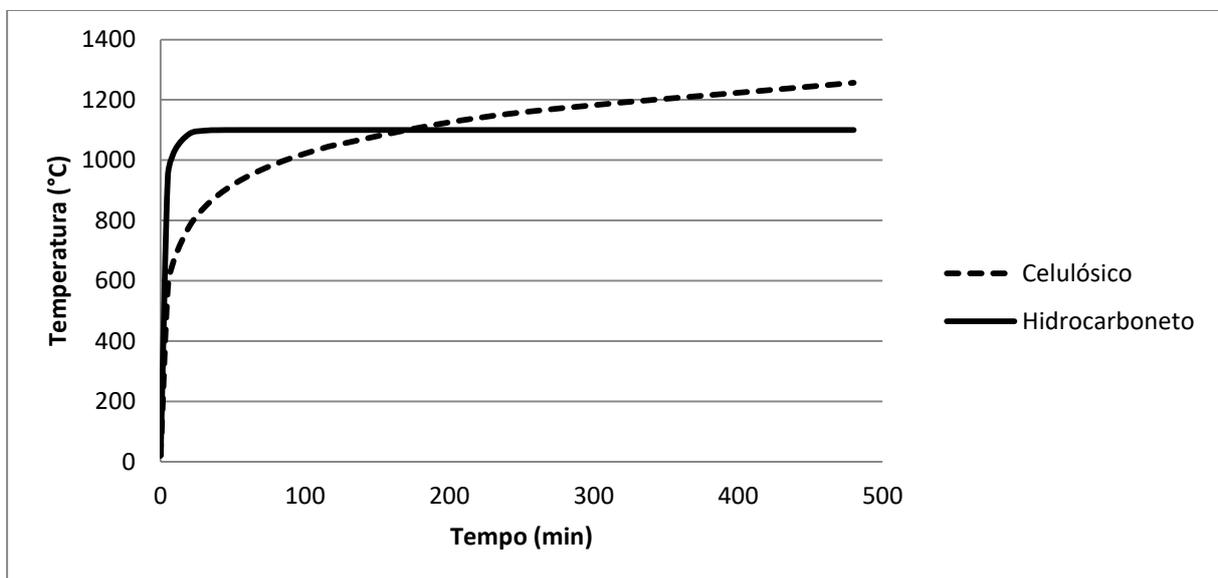
$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3.2)$$

Sendo que os parâmetros  $\theta_g$ ,  $\theta_0$  e t são os mesmos da equação anterior.

**Tabela 3.1: Temperaturas do incêndio padrão para queima de combustível celulósico e hidrocarbonetos.**

Tempo (min)	Combustível	
	Celulósico	Hidrocarboneto
t	$\theta_g$ (°C)	$\theta_g$ (°C)
0	20,00	20,00
5	576,41	947,71
10	678,43	1033,93
20	781,35	1087,56

30	841,80	1097,66
40	884,74	1099,56
50	918,08	1099,92
60	945,34	1099,98
70	968,39	1100,00
80	988,37	1100,00
90	1005,99	1100,00
100	1021,75	1100,00
110	1036,02	1100,00
120	1049,04	1100,00
240	1152,82	1100,00
480	1256,63	1100,00



**Figura 3.3: Temperatura do incêndio padrão em função do tempo e do material incendiado**

### 3.1.2.2. INCÊNDIO NATURAL

A norma NBR 14432:2000 define o modelo de incêndio natural como uma simulação de um incêndio real, onde a variação da temperatura é função dos seguintes parâmetros: geometria, ventilação do ambiente, características térmicas dos elementos de vedação e carga de incêndio específica.

A principal diferença que o modelo de incêndio natural apresenta em relação ao modelo de incêndio padrão é a presença de um ramo de aquecimento e outro de resfriamento. Assim, o modelo de incêndio natural se mostra mais verossímil a um incêndio real. Este fato se dá pelas condições de ensaio, uma vez que os compartimentos incendiados apresentam aberturas que simulam portas e janelas. A norma NBR 14432:2000 define compartimento como espaço,

cômodo ou pavimento que foi concebido em projeto para evitar a propagação de incêndio em um edifício ou entre edifícios adjacentes. Dado que os compartimentos em um edifício são definidos, cria-se o efeito de compartimentação que é definido por esta mesma norma como uma medida de proteção passiva por meio de barreiras, fixas ou móveis, com a finalidade de evitar ou minimizar a propagação de fogo, calor e gases, interna ou externamente ao edifício, no mesmo pavimento ou para outros pavimentos.

Vale ressaltar que se espera que o incêndio não se propague para regiões exteriores ao compartimento dado que este apresenta características de isolamento térmico, estanqueidade e elementos de vedação resistentes à pressão gerada pelos gases liberados durante o incêndio. A norma NBR 14432:2000 define isolamento térmico como a capacidade de um elemento construtivo de impedir aumentos de temperatura maiores que 140°C na média dos pontos medidos na face que não está em contato com o incêndio ou maiores que 180°C em qualquer ponto medido. Outro importante conceito definido pela norma NBR 14432:2000 é a estanqueidade. Esta é a capacidade de um elemento construtivo de impedir o surgimento de rachaduras ou aberturas, através das quais podem passar chamas e gases quentes capazes de ignizar um chumaço de algodão. Por fim, a resistência dos elementos de vedação é de suma importância para garantir a integridade da compartimentação da edificação.

Como dito anteriormente, um dos principais parâmetros para quantificar o fenômeno de incêndio é a carga de incêndio específica. A norma NBR 14432:2000 define este parâmetro como a soma das energias caloríficas liberadas em caso de combustão completa de todos os materiais combustíveis em um ambiente, incluindo-se os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos por área do piso do compartimento. Esta norma traz valores desse parâmetro com base na ocupação da edificação, sendo que as edificações foram divididas em nove grandes categorias conforme a tabela abaixo.

**Tabela 3.2: Valores de cargas de incêndio específicas**

Ocupação/uso	$q_{fi}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
Industrial	40-4000
Residencial	300
Comercial varejista	40-1000
Serviços automotivos	200-300
Serviços de hospedagem	300-500
Locais de reunião pública	200-2000
Educacional e cultura física	300-400
Serviços de saúde e institucionais	300-350
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	100-1000

Nota-se que os valores de carga de incêndio específica apresentam grande variabilidade dentro das categorias. Para cada caso, calcula-se este parâmetro conforme a equação abaixo:

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \quad (3.3)$$

Onde,

$q_{fi}$  é o valor da carga de incêndio específica, em MJ/m<sup>2</sup>;

$M_i$  é a massa total de cada componente  $i$  do material combustível, em kg. Este valor não pode ser excedido durante a vida útil da edificação, exceto quando houver alteração de ocupação, ocasião em que  $M_i$  deve ser reavaliado;

$H_i$  é o potencial calorífico de cada componente  $i$  do material combustível, em MJ/kg;

$A_f$  é a área do piso do compartimento, em m<sup>2</sup>.

A norma europeia EN 1991-1-2/2002 traz um modelo que descreve um incêndio natural de forma mais satisfatória que a norma brasileira. Ainda assim, o método apresenta as seguintes restrições: compartimentos de até 500 m<sup>2</sup> de área de piso, sem aberturas no telhado e com altura máxima de pé direito de 4m e considera-se que toda a carga de incêndio foi completamente queimada.

O ramo da curva temperatura *versus* tempo na fase de aquecimento é descrito da seguinte forma:

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^o} - 0,204e^{-1,7t^o} - 0,472e^{-19t^o}) \quad (3.4)$$

$$t^o = t \cdot \Gamma \quad (3.5)$$

$$\Gamma = \frac{[O/b]^2}{(0,04/1160)^2} \quad (3.6)$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}, \text{ sendo que } 100 \leq b \leq 2200, \text{ em } J/m^2 s^{1/2} K \quad (3.7)$$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t, \text{ sendo que } 0,02 \leq O \leq 0,2 \quad (3.8)$$

Onde,

$\theta_g$  é a temperatura do gás no compartimento incendiado, em °C;

$t$  é o tempo em horas;

$\rho$  é a massa específica do material de vedação do compartimento, em kg/m<sup>3</sup>;

$c$  é o calor específico do material de vedação do compartimento, em  $J/kgK$ ;

$\lambda$  é a condutividade térmica do material de vedação do compartimento, em  $W/mK$ ;

$O$  é o fator de abertura, em  $m^{1/2}$ ;

$A_v$  é a área total de aberturas verticais em todas as paredes, em  $m^2$ ;

$h_{eq}$  é a média ponderada das alturas das janelas em todas as paredes, em  $m^{1/2}$ ;

$A_t$  é a área total do compartimento (paredes, telhado e piso, incluindo aberturas), em  $m^2$ .

Vale ressaltar que o valor do parâmetro  $b$  adotado foi de 1160, a fim de que  $\Gamma$  varie apenas em função do grau de ventilação adotado.

Um importante parâmetro a ser determinado neste método é a máxima temperatura atingida durante a fase de aquecimento que ocorre quando  $t^o = t_{max}^o$ , onde:

$$t_{max}^o = t_{max} \Gamma, \text{ em horas.} \quad (3.9)$$

$$t_{max} = \max[(0, 2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{td} / O); t_{lim}], \text{ em horas.} \quad (3.10)$$

Onde,

$q_{td}$  é o valor da carga de design do incêndio, sendo que este valor deve estar entre 50 e 1000 MJ/m<sup>2</sup>;

$t_{lim}$  é igual a 25 minutos para baixa taxa de crescimento do incêndio, 20 minutos para média taxa e 15 minutos para alta taxa.

O segundo ramo da curva temperatura *versus* tempo representa a fase de resfriamento e é formulada da seguinte maneira:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^o - t_{max}^o \cdot x) \text{ para } t_{max}^o \leq 0,5 \quad (3.11)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^o)(t^o - t_{max}^o \cdot x) \text{ para } 0,5 < t_{max}^o < 2 \quad (3.12)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^o - t_{max}^o \cdot x) \text{ para } t_{max}^o \geq 2 \quad (3.13)$$

$$t_{max}^o = (0, 2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma \quad (3.14)$$

Onde,

As variáveis foram devidamente descritas no ramo de aquecimento;

$x=1$  se  $t_{max} > t_{lim}$ , ou  $x = t_{lim} \cdot \Gamma / t_{max}$  se  $t_{max} = t_{lim}$ .

Assim, nota-se que o modelo de incêndio natural é consideravelmente mais complexo que o modelo de incêndio padrão, dado que a quantidade de parâmetros é superior, assim como o

número de equações. Por outro lado, o modelo de incêndio natural gera melhores resultados, como destacado anteriormente.

### **3.1.3. PROPRIEDADES DO AÇO ESTRUTURAL AFETADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Os riscos associados ao colapso de uma estrutura metálica não dependem apenas do acréscimo de carga gerado por esse carregamento excepcional, mas também, da alteração de propriedades do aço que estão intimamente relacionadas à sua resistência mecânica. A norma NBR 14323:2013 propõe diretrizes para quantificar as variações das propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) e mecânicas (resistência ao escoamento, módulo de elasticidade e massa específica), a fim de conduzir os engenheiros a realizarem projetos mais condizentes com uma situação de incêndio real.

#### **3.1.3.1. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO**

Os engenheiros costumam dimensionar estruturas metálicas para se comportarem dentro do regime elástico, ou seja, até atingirem a resistência limite ao escoamento e não a resistência última. Durante um incêndio, essa propriedade é severamente afetada e tem seu valor drasticamente minorado. Consequentemente, os elementos estruturais poderão entrar em regime plástico e a estrutura se recomodar em uma configuração deformada ou o ponto de resistência última será ultrapassado levando ao colapso de elementos e até mesmo de toda a estrutura.

A norma NBR 14323:2013 adota 20°C como temperatura de referência para análise da resistência ao escoamento do aço e propõe uma tabela de fatores de redução para este parâmetro para taxas de aquecimento entre 2°C/min e 50°C/min. As formulações, tabela e gráfico seguem abaixo:

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (3.15)$$

$$k_{y0,\theta} = \frac{f_{y0,\theta}}{f_{y0}} \quad (3.16)$$

Onde:

$k_{y,\theta}$  é o fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados;

$k_{y0,\theta}$  é o fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços trefilados;

$f_{y,\theta}$  é a resistência ao escoamento dos aços laminados a uma temperatura  $\theta_a$ ;

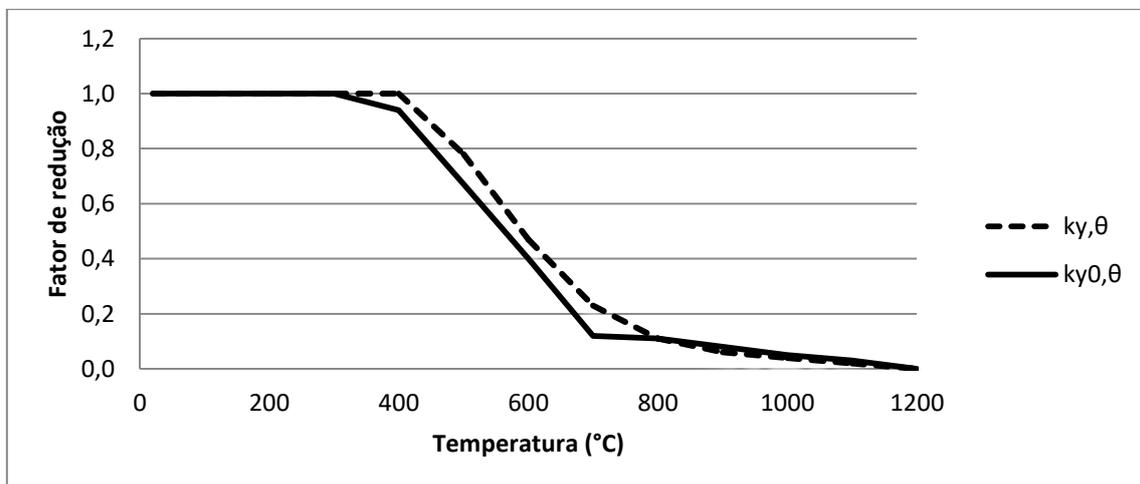
$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

$f_{y0,\theta}$  é a resistência ao escoamento dos aços trefilados a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$f_{y0}$  é a resistência ao escoamento dos aços trefilados a 20°C.

**Tabela 3.3 Fatores de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados e trefilados**

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



**Figura 3.4 Fatores de redução para a resistência ao escoamento dos aços em função da temperatura**

### 3.1.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A rigidez de um elemento estrutural, por exemplo, uma viga ou um pilar, é calculada levando em consideração a inércia da seção avaliada e o módulo de elasticidade do material. Em uma

situação de incêndio, o valor do módulo de elasticidade do aço decai conforme a temperatura aumenta e, conseqüentemente, a estrutura se torna mais flexível e menos resistente. A norma NBR 14323:2013 propõe um modelo de fatores de redução do módulo de elasticidade do aço semelhante ao da resistência de escoamento. As formulações, tabela e gráfico seguem abaixo:

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{\theta}}{E} \quad (3.17)$$

$$k_{E0,\theta} = \frac{E_{0,\theta}}{E} \quad (3.18)$$

Onde:

$k_{E,\theta}$  é o fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados;

$k_{E0,\theta}$  é o fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços trefilados;

$E_{\theta}$  é o módulo de elasticidade dos aços laminados a uma temperatura de  $\theta_a$ ;

$E_{0,\theta}$  é o módulo de elasticidade dos aços trefilados a uma temperatura de  $\theta_a$ ;

$E$  é o módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.

**Tabela 3.4 Fatores de redução do módulo de elasticidade dos aços laminados e trefilados**

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	$k_{E,\theta}$	$k_{E0,\theta}$
20	1,0000	1,000
100	1,0000	1,000
200	0,9000	0,870
300	0,8000	0,720
400	0,7000	0,560
500	0,6000	0,400
600	0,3100	0,240
700	0,1300	0,080
800	0,0900	0,060
900	0,0675	0,050
1000	0,0450	0,030
1100	0,0225	0,020
1200	0,0000	0,000

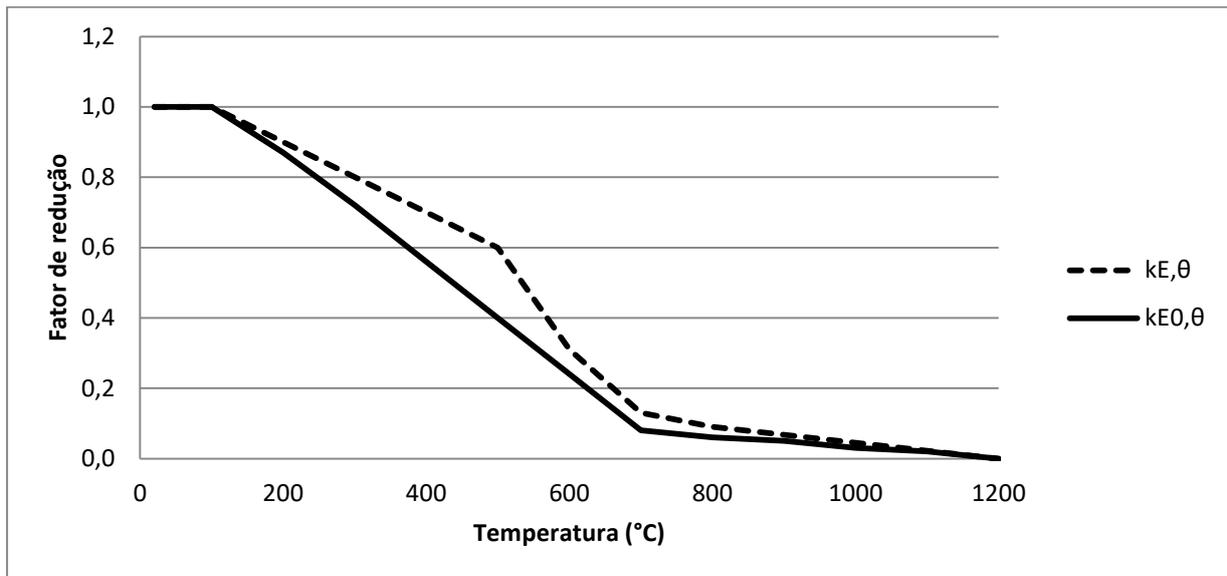


Figura 3.5 Fatores de redução do módulo de elasticidade dos aços em função da temperatura

### 3.1.3.3. MASSA ESPECÍFICA

A norma NBR 14323:2013 considera que a massa específica do aço não é função da temperatura. Assim, adota-se o valor abaixo para qualquer temperatura:

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad (3.19)$$

### 3.1.3.4. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é um parâmetro que indica o quão facilmente a temperatura de um material aumentará em função da quantidade de energia aplicada neste, sendo que isto é avaliado principalmente em materiais sólidos. Nesse fenômeno, a transmissão de calor se dá pelo choque entre as moléculas do material analisado. A norma NBR 14323:2013 permite a adoção de dois modelos para determinação da condutividade térmica.

Uma das proposições admite que a condutividade térmica do aço não é função de sua temperatura e pode ser considerada constante e igual a:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (3.20)$$

A segunda proposição considera que a condutividade térmica do aço é função de sua temperatura e o modelo é bilinear, conforme mostrado na formulação abaixo:

- Trecho 1 – para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ (W/m}^\circ\text{C)} \quad (3.21)$$

- Trecho 2 – para  $800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

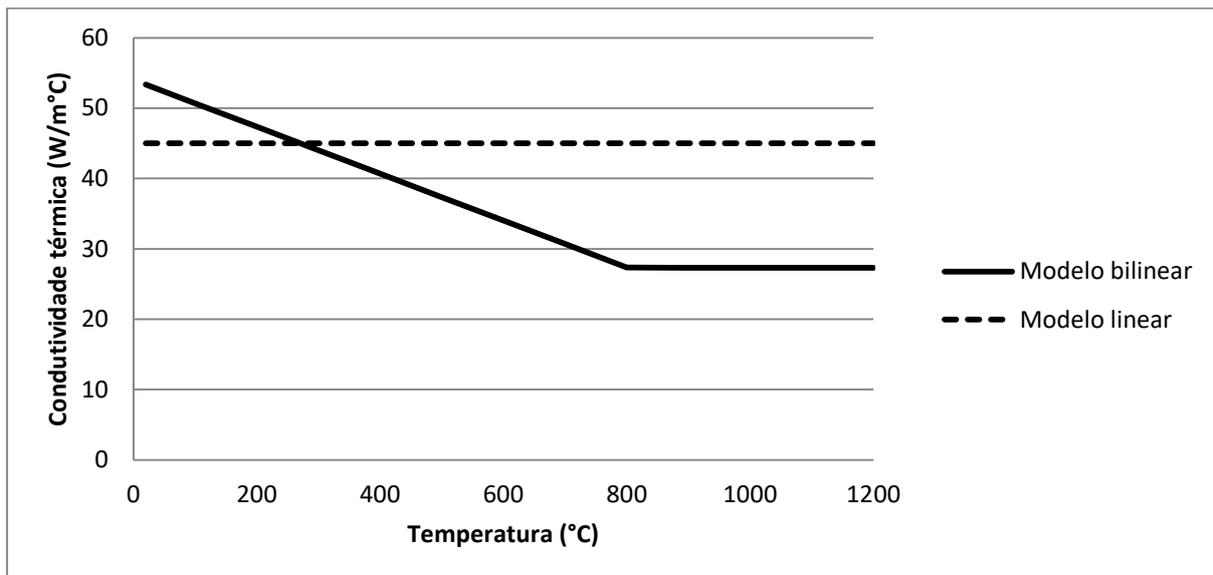
$$\lambda_a = 27,3 \text{ (W/m}^\circ\text{C)} \quad (3.22)$$

Onde:

$\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

**Tabela 3.5** Variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura

Temperatura do aço $\theta_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	Condutividade térmica do aço ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )	
	Modelo bilinear	Modelo linear
20	53,334	45
100	50,67	45
200	47,34	45
300	44,01	45
400	40,68	45
500	37,35	45
600	34,02	45
700	30,69	45
800	27,36	45
900	27,3	45
1000	27,3	45
1100	27,3	45
1200	27,3	45



**Figura 3.6** Condutividade térmica do aço em função da temperatura

### 3.1.3.5. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico indica a quantidade de energia necessária para elevar em 1 °C uma porção de massa de um material. Segundo a NBR 14323:2013, uma das proposições admite que o calor específico do aço não é função de sua temperatura e pode ser considerada constante e igual a:

$$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (3.23)$$

A segunda proposição considera que o calor específico do aço é função de sua temperatura, adotando um modelo mais avançado que consiste de equações definidas para determinados intervalos de temperatura, conforme mostrado na formulação abaixo:

- Trecho 1 – para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (3.24)$$

- Trecho 2 – para  $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (3.25)$$

- Trecho 3 – para  $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (3.26)$$

- Trecho 4 – para  $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

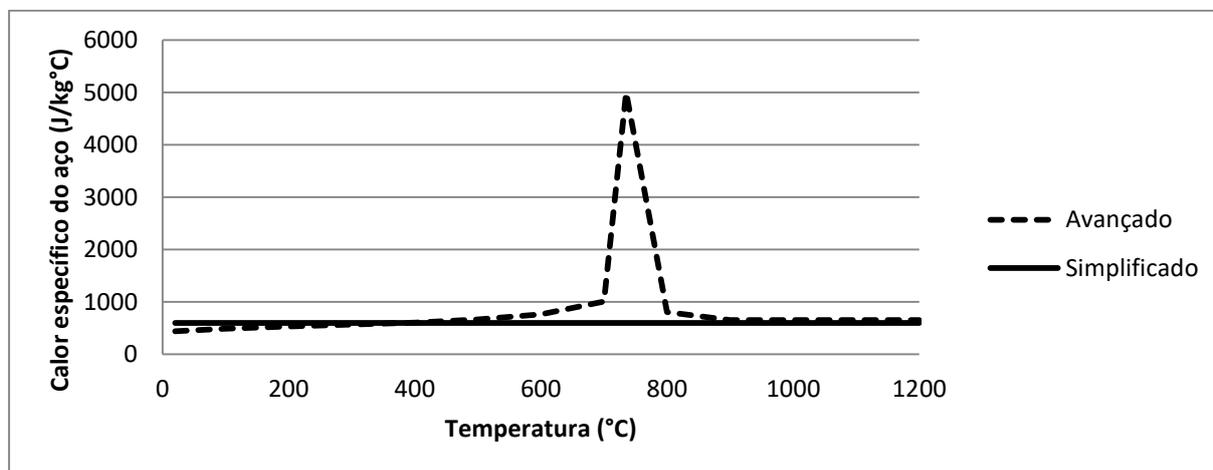
$$c_a = 650 \quad (3.27)$$

Onde  $\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

**Tabela 3.6 Variação do calor específico do aço em função da temperatura do aço**

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	Calor específico do aço (J/kg°C)	
	Modelo avançado	Modelo simplificado
20	439,80	600
100	487,62	600
200	529,76	600
300	564,74	600
400	605,88	600
500	666,50	600
600	759,92	600
700	1008,16	600
735	5000,00	600

800	803,26	600
900	650,44	600
1000	650	600
1100	650	600
1200	650	600



**Figura 3.7** Variação do calor específico do aço em função da temperatura

### 3.1.4. PROPRIEDADES DO CONCRETO AFETADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A norma NBR 14323:2013 propõe diretrizes para quantificar as variações das propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) e mecânicas (resistência ao escoamento, módulo de elasticidade e massa específica) do concreto, a fim de conduzir os engenheiros a realizarem projetos mais condizentes com uma situação de incêndio real. Neste projeto, as propriedades do concreto utilizadas nas simulações computacionais foram: condutividade térmica, calor específico e massa específica.

#### 3.1.4.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A norma NBR 14323:2013 permite a adoção de dois modelos para determinação da condutividade térmica.

Uma das proposições admite que a condutividade térmica do concreto não é função de sua temperatura e pode ser considerada constante e igual a:

$$\lambda_a = 1,6W/m^{\circ}C \quad (3.28)$$

A segunda proposição considera que a condutividade térmica do concreto é função de sua temperatura e o modelo é parabólico, conforme mostrado na formulação abaixo:

- Para  $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

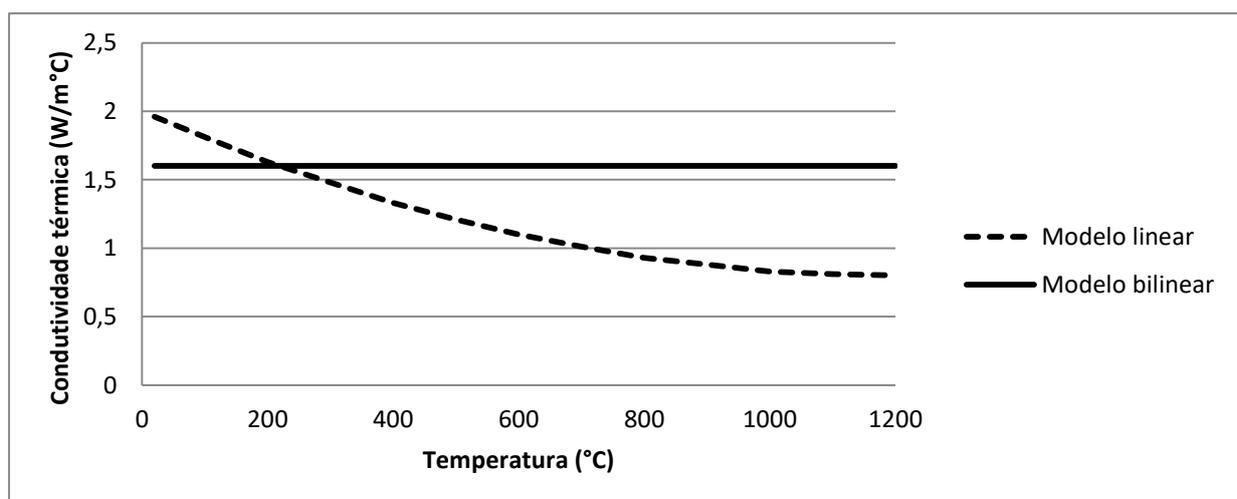
$$\lambda_{cn} = 2 - 0,24x \frac{\theta_c}{120} + 0,012x \left( \frac{\theta_c}{120} \right)^2 \quad (\text{W/m}^{\circ}\text{C}) \quad (3.29)$$

Onde:

$\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

**Tabela 3.7 Condutividade térmica do concreto em função da temperatura**

Temperatura do aço $\theta_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Condutividade térmica do concreto ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	
	Modelo bilinear	Modelo linear
20	1,96	1,6
100	1,81	1,6
200	1,63	1,6
300	1,48	1,6
400	1,33	1,6
500	1,21	1,6
600	1,1	1,6
700	1,01	1,6
800	0,93	1,6
900	0,88	1,6
1000	0,83	1,6
1100	0,81	1,6
1200	0,8	1,6



**Figura 3.8 Condutividade térmica do concreto em função da temperatura**

### 3.1.4.2. CALOR ESPECÍFICO

Segundo a NBR 14323:2013, uma das proposições admite que o calor específico do concreto não é função de sua temperatura e pode ser considerada constante e igual a:

$$c_{cn} = 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (3.30)$$

A segunda proposição considera que o calor específico do concreto é função de sua temperatura, adotando um modelo mais avançado que consiste em uma equação parabólica, conforme mostrado na formulação abaixo:

- Para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$c_{cn} = 900 + 80x \frac{\theta_c}{120} - 4x \left( \frac{\theta_c}{120} \right)^2 \quad (3.31)$$

Onde  $\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

**Tabela 3.8 Calor específico do concreto em função da temperatura**

Temperatura do aço $\theta_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	Calor específico do concreto ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )	
	Modelo avançado	Modelo simplificado
20	913,22	1000
100	963,89	1000
200	1022,22	1000
300	1075,00	1000
400	1122,22	1000
500	1163,89	1000
600	1200,00	1000
700	1230,56	1000
735	1239,94	1000
800	1255,56	1000
900	1275,00	1000
1000	1288,89	1000
1100	1297,22	1000
1200	1300,00	1000

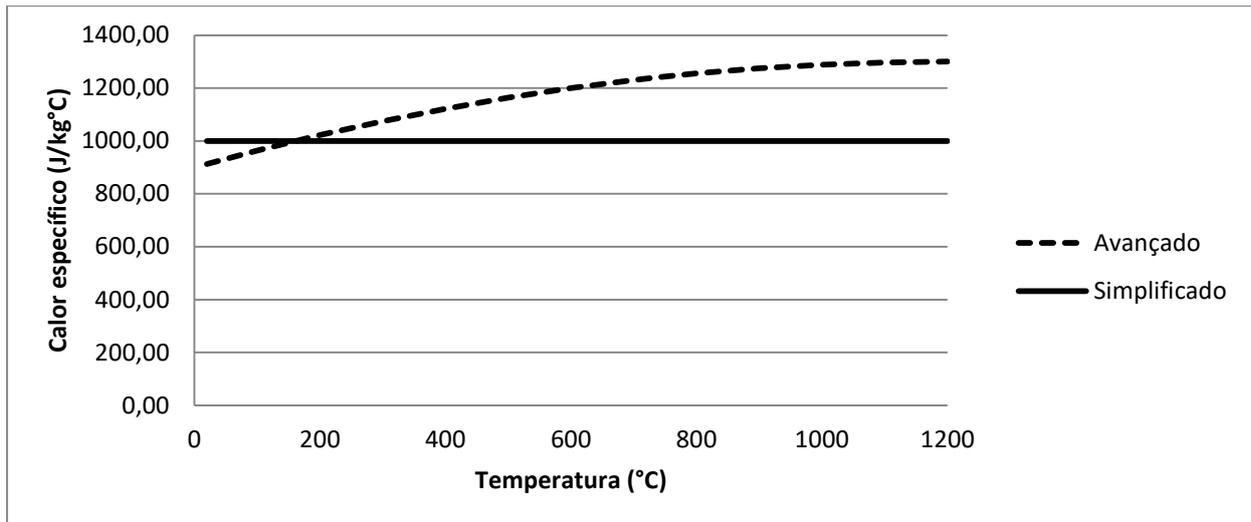


Figura 3.9 Calor específico do concreto em função da temperatura

### 3.1.4.3. MASSA ESPECÍFICA

A norma NBR 14323:2013 considera que a massa específica do concreto não é função da temperatura. Assim, adota-se o valor abaixo para qualquer temperatura:

$$\rho_a = 2400 \text{ kg/m}^3 \quad (3.32)$$

## 3.1.5. VARIAÇÃO TÉRMICA EM ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

### 3.1.5.1. FLUXOS DE CALOR CONDUTIVO

O fenômeno da condução térmica acontece, geralmente, em materiais sólidos devido a maior proximidade entre suas moléculas e é caracterizado pela transferência de calor de partículas situadas em regiões de temperatura mais alta para partículas situadas em regiões de temperatura mais baixa por meio de contato físico direto sem transferência de massa. O contato físico direto entre essas moléculas implicará no aumento da energia cinética das partículas que estavam em regiões mais frias do material, conseqüentemente, aumentando a sua energia interna. (Fonte: Internet 3, ver em referências bibliográficas).

A propriedade física que é utilizada para determinar quais materiais transmitem calor de forma mais eficiente por meio de condução se chama condutividade térmica. Os isolantes térmicos são materiais capazes de limitar o fluxo de calor entre corpos, ou seja, apresentam

baixo valor de condutividade térmica, por exemplo, plástico e isopor. Por outro lado, os materiais que são bons condutores térmicos permitem uma transferência rápida de calor entre corpos, ou seja, apresentam alto valor de condutividade térmica, por exemplo, metais.

A determinação da quantidade de calor transmitida por condução é descrita pela Lei de Fourier, a qual se encontra abaixo:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda_a A_{fc} \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (3.33)$$

Onde,

$\Delta Q/\Delta t$  é a taxa de calor transmitido por condução através de uma área (W);

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

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

$\Delta T/\Delta x$  é o gradiente de temperatura na seção (°C/m).

Vale ressaltar que a condutividade térmica é uma propriedade que depende do material utilizado e da temperatura do material. Na seção 3.1.3.4, discutiu-se como este parâmetro para o material aço varia conforme a temperatura.

### 3.1.5.2. FLUXOS DE CALOR RADIATIVO

O fenômeno de radiação térmica se dá por ondas eletromagnéticas, ou seja, essa forma de transmissão de calor não necessita de um meio físico para se propagar. Todos os corpos que apresentam temperatura diferente de 0K emitem radiações térmicas sendo proporcionais às suas temperaturas.

As ondas eletromagnéticas podem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas por uma superfície. Assim, faz-se necessária a quantificação de cada uma dessas parcelas por meio das propriedades de refletividade ( $\Psi$ ), absortância ou emissividade ( $\epsilon$ ) e transmitância ( $\tau$ ), respectivamente. Sendo que a soma desses três termos deve ser igual a 1.

A formulação que descreve o fluxo de calor por radiação se encontra abaixo:

$$\varphi_r = \epsilon_{res} \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (3.34)$$

Onde,

$\varphi_r$  é o fluxo de calor radiante (W/m<sup>2</sup>);

$\epsilon_{res}$  é a emissividade;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman que é igual a  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$ ;

$\theta_g$  é a temperatura dos gases ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_a$  é a temperatura na superfície do aço ( $^{\circ}\text{C}$ );

Como dito anteriormente, a emissividade de um material pode variar de zero a um. Para se determinar esse valor é necessário determinar o comprimento de onda radiante, ângulo de radiação e temperatura da superfície. Para fins práticos, esse procedimento seria inviável, assim, adota-se um modelo simplificado de análise que considera esse valor como 0,5. (Fonte: Internet 4, ver em referências bibliográficas).

### 3.1.5.3. FLUXOS DE CALOR CONVECTIVO

O fenômeno da convecção térmica ocorre em materiais fluidos, sendo que a transmissão de calor se dá pelo movimento do fluido gerado pela diferença de densidade entre moléculas quentes e frias do material em questão. Uma parcela da massa do fluido se aquece e se torna menos densa, conseqüentemente, criando um movimento de ascensão. Por outro lado, a parcela da massa do fluido que estava mais fria e, conseqüentemente, mais densa tende a entrar em movimento descendente. Esse processo se chama corrente de convecção e cessa quando o fluido atinge uma temperatura de equilíbrio.

O processo descrito é mais facilmente observado e controlado em ambientes fechados, por exemplo, em um quarto que apresenta um aparelho de ar condicionado instalado. No entanto, este processo também acontece em ambientes abertos e em maior escala, por exemplo, a movimentação das massas de ar.

A norma NBR 14323:2013 traz a seguinte formulação para o fluxo convectivo de calor em estruturas de aço submetidas à situação de incêndio:

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (3.35)$$

Onde,

$\varphi_c$  é o fluxo de calor convectivo por unidade de área ( $\text{W/m}^2$ );

$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W/m}^2\text{C}$ );

$\theta_g$  é a temperatura dos gases ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_a$  é a temperatura da superfície do aço ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Sendo que o valor de coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser calculado da seguinte forma:

$$\alpha_c = \frac{H_c}{A_{TC}\Delta T} \quad (3.36)$$

Onde,

$H_c$  é a corrente térmica de convecção (W);

$A_{TC}$  é a área da superfície exposta à troca de calor (m<sup>2</sup>);

$\Delta T$  é a diferença de temperaturas entre a superfície e a massa de fluido (°C).

Vale ressaltar que a norma NBR 14323:2013 permite que este parâmetro assumo o valor de 25 W/m<sup>2</sup>°C utilizando um método simplificado. Esta consideração é de suma importância, uma vez que a quantidade de fatores que influenciam nesse parâmetro é alta e de difícil determinação, dado a variabilidade de caso a caso. Por exemplo, quanto ao fluido, tem-se que avaliar a densidade, calor específico, condutividade térmica, dentre outros.

A convecção térmica é uma das principais formas de transferência de calor para a estrutura metálica de uma edificação em um caso de incêndio, uma vez que os materiais combustíveis normalmente estarão dispostos no piso do pavimento e a laje atuará como isolante térmico, dado que o concreto é material refratário. Por outro lado, os pilares e vigas do pavimento incendiado estarão expostos de forma direta aos gases quentes produzidos durante o incêndio. (Fonte: Internet 5, ver em referências bibliográficas).

### **3.1.6. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO**

#### **3.1.6.1. MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: ESTRUTURA DE AÇO SEM PROTEÇÃO**

A norma NBR 14323:2013 prevê que a elevação da temperatura em um perfil metálico sem proteção, o qual apresenta uma distribuição uniforme de temperatura em sua seção transversal, é dada pela seguinte formulação:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(\mu / A)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (3.37)$$

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (3.38)$$

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (3.39)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (3.40)$$

Onde,

$\mu/A$  é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio, em 1/m;

$\mu$  é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço, em m;

$A$  é a área da seção transversal do elemento estrutural, em m<sup>2</sup>;

$\rho_a$  é a massa específica do aço, em kg/m<sup>3</sup>;

$c_a$  é o calor específico do aço, em J/kg°C;

$\varphi$  é o valor do fluxo de calor por unidade de área, em W/m<sup>2</sup>;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo, em s, e deve ser menor que  $25000 (\mu/A)^{-1}$  e menor que 5s;

$\varphi_c$  é o componente do fluxo de calor devido à convecção em, W/m<sup>2</sup>;

$\varphi_r$  é o componente do fluxo de calor devido à radiação, W/m<sup>2</sup>;

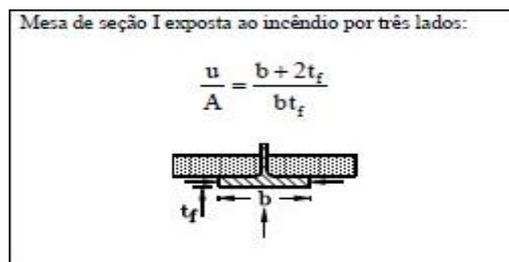
$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser tomado para efeitos práticos igual a 25 W/m<sup>2</sup> °C;

$\theta_g$  é a temperatura dos gases, em °C;

$\theta_a$  é a temperatura na superfície do aço, em °C;

$\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante, podendo ser tomada para efeitos práticos igual a 0,5.

Nota-se que o índice de elevação de temperatura no perfil metálico é diretamente proporcional ao fator de massividade da peça. Conforme citado anteriormente, este parâmetro é obtido pela razão entre o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço e a sua área de seção transversal. A imagem abaixo retrata a formulação para alguns casos.



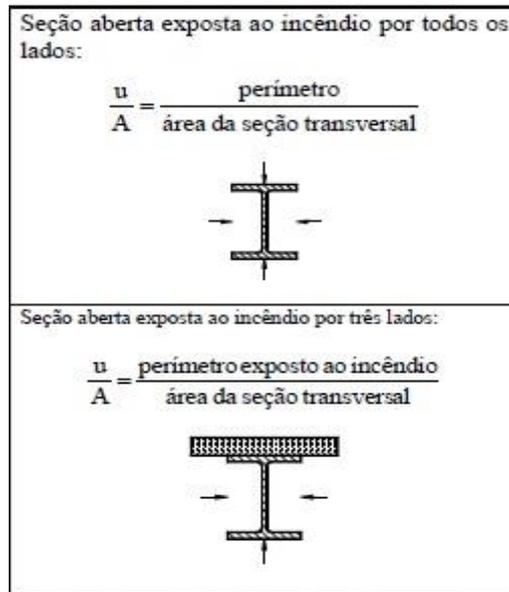


Figura 3.10 Fator de massividade de viga perfil I sem proteção

Fonte: NBR 14323:2013, Tabela 6, p. 35.

De forma geral, vigas metálicas em perfil I apresentam maior fator de massividade em relação a colunas metálicas em perfil H. Assim sendo, as vigas tendem a ser mais degradadas durante um incêndio e colapsarem primeiro, por isso, neste trabalho, optou-se por analisar estes elementos.

### 3.1.6.2. MODELO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO: ESTRUTURA DE AÇO COM PROTEÇÃO

A norma NBR 14323:2013 prevê que a elevação da temperatura em um perfil metálico com proteção, o qual apresenta uma distribuição uniforme de temperatura em sua seção transversal, é dada pela seguinte formulação:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(\mu_m/A)}{t_m c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{\left(1 + \frac{\xi}{4}\right)} \Delta t - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{\frac{4}{\xi} + 1} \quad (3.41)$$

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m (\mu_m/A) \quad (3.42)$$

Onde,

$\mu_m/A$  é o fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de proteção contra incêndio, em 1/m;

$\mu_m$  é o perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio, igual ao perímetro da face interna do material de proteção contra incêndio mais metade dos afastamentos desta face ao perfil de aço, em m;

A é a área da seção transversal do elemento estrutural, em m<sup>2</sup>;

$c_m$  é o calor específico do material de proteção contra incêndio, em J/kg°C;

$t_m$  é a espessura do material de proteção contra incêndio, em m;

$\theta_{a,t}$  é a temperatura do aço no tempo t, em °C;

$\theta_{g,t}$  é a temperatura dos gases no tempo t, em °C;

$\lambda_m$  é a condutividade térmica do material de proteção contra incêndio, em W/m°C;

$\rho_a$  é a massa específica do aço, em kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_m$  é a massa específica do material de proteção contra incêndio, em kg/m<sup>3</sup>;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo, em s, e deve ser menor que  $25000 (u/A)^{-1}$  e menor que 30s;

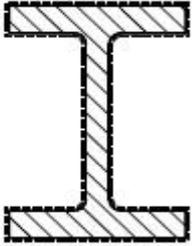
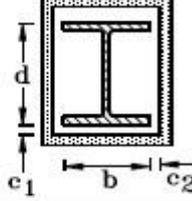
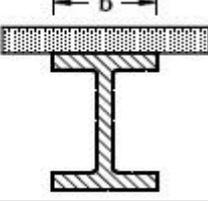
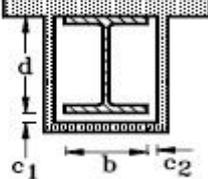
Situação	Descrição	Fator de massividade ( $u_m/A$ )
	Seção com proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(d + c_1 + b + c_2)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo contorno, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d + c_1 + b + 2c_2}{\text{área da seção da peça de aço}}$

Figura 3.11 Fator de massividade de viga perfil I com proteção

Fonte: NBR 14323:2013, Tabela 7, p. 36.

Vale ressaltar que o item 8.5.1.2.7 estabelece que esta metodologia proposta pela norma 14323:2013 não é válida caso o material de proteção contra incêndio seja tinta intumescente. Assim, faz-se necessária a realização de ensaio laboratorial para determinar a elevação de temperatura no perfil. Além disso, no item 8.5.1.2.8, destaca-se a importância da realização de uma análise térmica mais precisa caso a viga envolvida por material de proteção contra incêndio esteja em contato com concreto ou alvenaria.

### 3.1.7. DETERMINAÇÃO DE MOMENTO FLETOR SEGUNDO AS NORMAS NBR 14323:2013 E NBR 8800:2008

Segundo a norma NBR 14323:2013, o cálculo do momento resistente de uma viga metálica em perfil I de alma não esbelta submetida a uma situação de incêndio deve ser realizado segundo três estados limites últimos, sendo eles: flambagem local da mesa comprimida (FLM), flambagem local da alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT). O parâmetro que rege os cálculos de cada estado limite último é o valor de esbeltez  $\lambda$  da peça analisada, sendo que o valor numérico deste parâmetro varia para cada critério analisado, conforme mostrado na figura 3.9.

- Para FLM e FLA

✓ Se  $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{fi,Rd} = \kappa_1 \kappa_2 k_{y,\theta} M_{pl} \quad (3.43)$$

✓ Se  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{fi,Rd} = \kappa_1 \kappa_2 k_{y,\theta} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_{p,fi}}{\lambda_{r,fi} - \lambda_{p,fi}} \right) \right] \quad (3.44)$$

✓ Se  $\lambda \geq \lambda_r$

$$M_{fi,Rd} = k_{E,\theta} M_{cr} \quad (3.45)$$

- Para FLT

✓ Se  $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{fi,Rd} = \kappa_1 \kappa_2 k_{y,\theta} M_{pl} \quad (3.46)$$

✓ Se  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{fi,Rd} = C_b k_{y,\theta} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq \kappa_1 \kappa_2 k_{y,\theta} M_{pl} \quad (3.47)$$

✓ Se  $\lambda \geq \lambda_r$

$$M_{fi,Rd} = k_{E,\theta} M_{cr} \quad (3.48)$$

Onde,

$\lambda_p$  é o valor de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  é o valor de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$k_{y,\theta}$  é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura  $\theta_a$ ;

$k_{E,\theta}$  é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura  $\theta_a$ ;

$M_{cr}$  é o momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente;

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

$M_r$  é o momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal para projeto à temperatura ambiente;

$\kappa_1$  é o fator de correção para temperatura não-uniforme na seção transversal;

$\kappa_2$  é o fator de correção para temperatura não-uniforme ao longo do comprimento da barra;

$C_b$  é o fator de modificação do diagrama de momento fletor não uniforme.

Os parâmetros  $k_{y,\theta}$  e  $k_{E,\theta}$  foram determinados nas seções 3.1.3.1 e 3.1.3.2 deste trabalho, respectivamente. Os valores de  $\kappa_1$  e  $\kappa_2$  são encontrados na norma NBR 14323:2013, sendo eles:  $\kappa_1 = 1,00$  para uma viga com os quatro lados expostos;  $\kappa_1 = 1,15$  para uma viga sem proteção contra incêndio, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com forma de aço incorporada no quarto lado;  $\kappa_1 = 1,40$  para uma viga envolvida por material de proteção contra incêndio, com três lados expostos, com uma laje de concreto ou laje com forma de aço incorporada no quarto lado;  $\kappa_2 = 1,15$  para uma viga estaticamente indeterminada; e,  $\kappa_2 = 1,00$  para todos os outros casos.

Enquanto isso, os demais parâmetros são determinados segundo as recomendações da norma NBR 8800:2008, conforme mostrado na figura abaixo. Vale ressaltar que esta norma traz os valores destes parâmetros para outros tipos de seção, no entanto, optou-se por destacar apenas o caso que será abordado neste trabalho.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_0}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

**Figura 3.12** Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Fonte: NBR 8800:2008, Tabela G.1, p. 134.

A Nota 1 da norma NBR 8800:2008 traz a seguinte formulação:

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (3.49)$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{EJ} \quad (3.50)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (3.51)$$

Onde,

$\lambda_r$  é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$I_y$  é o momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

$J$  é a constante de torção da seção transversal;

$r_y$  é o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$\sigma_r$  é a tensão residual de compressão nas mesas que deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado;

$W$  é o módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$d$  é a altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

$t_f$  é a espessura da mesa.

Os outros parâmetros determinados na Nota 1 da norma NBR 8800:2008 são os seguintes:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 EI_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{JL_b^2}{C_w} \right)} \quad (3.52)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3,0 \quad (3.53)$$

Onde,

$C_b$  é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;

$L_b$  é a distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

$M_{\max}$  é o valor de momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

$M_A$  é o valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

$M_B$  é o valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

$M_C$  é o valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

$R_m$  é um parâmetro igual a 1,00 para seções com dois eixos de simetria.

A Nota 6 da norma NBR 8800:2008 traz a seguinte formulação:

$$M_{cr} = \frac{0,90Ek_c W_c}{\lambda^2} \quad (3.54)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \quad (3.55)$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \text{ sendo que } 0,35 \leq k_c \leq 0,76 \quad (3.56)$$

Onde,

$M_{cr}$  é o momento fletor de flambagem elástica;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$W_c$  é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;

$\lambda$  é o parâmetro de esbeltez da peça;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço.

$\sigma_r$  é a tensão residual de compressão nas mesas que deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado;

$h$  é a altura da alma;

$t_w$  é a espessura da alma;

As vigas metálicas estudadas neste trabalho serão vigas de alma não esbelta, assim, não será necessário entrar em detalhes sobre o anexo H da norma NBR 8800:2008.

## **3.2. ANÁLISE NUMÉRICA VIA ANSYS**

### **3.2.1. SOFTWARE ANSYS**

O desenvolvimento deste trabalho foi baseado em análises térmicas que geraram campos de temperaturas nas seções transversais das vigas metálicas em perfil I estudadas. O método dos elementos finitos se mostra como um recurso valioso ao se realizarem análises numéricas para solução de problemas desta natureza, pois gera resultados acurados do ponto de vista de engenharia. Assim sendo, optou-se pelo uso do *software* ANSYS, uma vez que este dispõe deste método de solução; foi utilizado por outros alunos da Universidade de Brasília para realizarem simulações semelhantes às propostas; e fornece recursos capazes de modelar situações relacionadas a diversos campos do conhecimento de engenharia, por exemplo, eletrônica, mecânica, elétrica e civil.

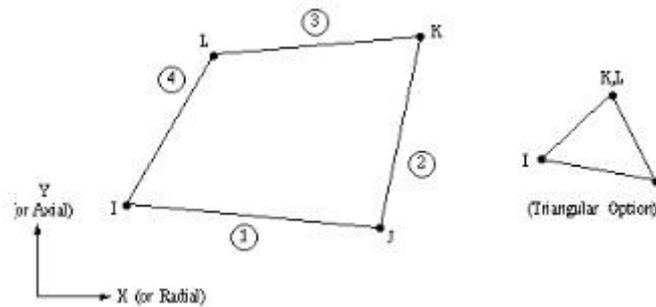
Este *software* apresenta quatro grandes áreas de atuação: estruturas, fluidos, eletromagnetismo e semicondutores. A área de estruturas é subdividida em: análise de esforços solicitantes, vibração, análise térmica, durabilidade, dinâmica, hidrodinâmica, impactos e outros. Assim, nota-se que o *software* ANSYS apresenta grande versatilidade para auxiliar os engenheiros civis na solução de problemas nas mais diversas áreas estudadas por esta ciência.

### **3.2.2. ELEMENTO UTILIZADO**

O *software* ANSYS 17.2 (2016) permite ao usuário a utilização de uma vasta biblioteca de elementos para que se desenvolvam as análises desejadas. Para a análise térmica, dispõe-se de

quarenta elementos sendo eles 1-D, 2-D e 3-D. Após uma leitura detalhada sobre as propriedades destes, destacou-se o PLANE55 2-D *Thermal Solid*.

A imagem do elemento térmico segue abaixo:



**Figura 3.13 Elemento térmico PLANE 55**

As principais entradas e saídas de dados desse elemento serão evidenciadas na tabela abaixo:

**Tabela 3.9 Descrição dos elementos térmicos**

Nome do elemento	PLANE55
Nós	I,J,K,L
Graus de Liberdade	Temperatura
Propriedades do Material	Densidade, calor específico, condutividade térmica
Cargas de Superfície	Convecção nas faces, fluxo de calor nas faces
Cargas no Corpo	Geração de calor
KEYOPT(1)	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)	0- Plano 1- Simetria axial
KEYOPT(4)	0- Sistema de coordenadas do elemento paralelo ao global 1- Sistema de coordenadas do elemento baseado no lado I-J
KEYOPT(8)	0- Não há efeitos de transporte de massa 1- Transporte de massa na direção x e/ou y e/ou z 2- Fluxo de calor com transporte de massa
KEYOPT(9)	0- Elemento com transferência de calor convencional 1- Elemento com características de fluxo de fluido em regime estacionário não linear

## 4. APLICAÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Para a criação de um modelo computacional que contemple os parâmetros abordados ao longo deste trabalho, é necessário que alguns valores sejam fixados. Caso contrário, a multiplicidade de casos se tornaria alta e inviabilizaria a conclusão deste trabalho no tempo proposto. Assim, os perfis analisados são VS 450X51 e VS1400X481. Vale ressaltar que esses perfis apresentam o maior e o menor fator de massividade dentre os perfis listados por Pfeil (2009), respectivamente. Cada perfil foi submetido a três condições de incêndio, sendo estas representadas abaixo:



Figura 4.1 Condições de incêndio analisadas

Além disso, para cada condição de incêndio, cada perfil foi submetido a dois incêndios naturais com os seguintes valores de carga de incêndio ( $q_{fd}$ ) e grau de ventilação (O):

- Incêndio 1:  $q_{fd}=756 \text{ MJ/m}^2$  e  $O=0,02 \text{ m}^{1/2}$ ;
- Incêndio 2:  $q_{fd}=756 \text{ MJ/m}^2$  e  $O=0,13 \text{ m}^{1/2}$ ;

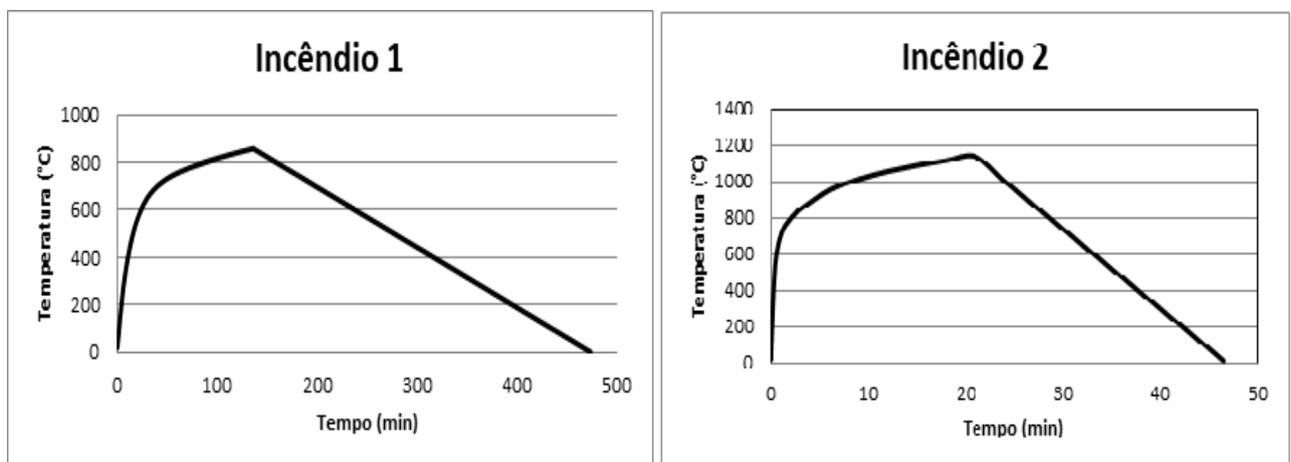


Figura 4.2 Incêndio natural

Vale destacar que o valor de  $q_{fd}$  é formula da seguinte forma, segundo a norma EUROCODE PART 1-2 (2002):

$$q_{fd} = q_{fk} \sigma_{q1} \sigma_{q2} \sigma_n m \quad (4.1)$$

$$q_{td} = q_{fd} \frac{A_f}{A_t} \quad (4.2)$$

Onde,

$q_{fk}$  é a carga característica de incêndio, a qual é igual a 420 MJ/m<sup>2</sup> para um escritório;

$\sigma_{q1}$  é igual a 1,5 para ambientes menores que 250 m<sup>2</sup>;

$\sigma_{q2}$  é igual a 1 para o ambiente de escritório;

$\sigma_n$  é igual a 1,5 para edifícios que não apresentem medidas de prevenção contra incêndio;

$m$  é igual a 0,8;

$A_f$  é igual a área do piso, que será igual a 81 m<sup>2</sup>, dado que se trata de um escritório quadrado de 9m x 9m;

$A_t$  é igual a área total do ambiente, que será igual a 270 m<sup>2</sup>, dado que o pé direito adotado foi de 3 metros de altura e as dimensões de comprimento e largura são de 9 metros.

Uma vez que os perfis de temperatura são gerados, as temperaturas médias das mesas das vigas são determinadas, a fim de determinar os módulos de elasticidade destas, dado que o aquecimento é desigual ao longo do perfil. Em seguida, as formulações desenvolvidas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) são aplicadas, sendo que estas se encontram abaixo:

- NUNES (2005)

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 h}{2L^2} \left[ (E_1 I_1 - E_2 I_2) + \sqrt{(E_1 I_1 + E_2 I_2)^2 + \frac{4L^2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)}{\pi^2 h^2} \sum E_i C_i} \right] \quad (4.3)$$

- CAMPÊLO (2008)

$$P_{cr} = \frac{48\pi^2}{L_b^3 (6 + \pi^2)} \left\{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}] + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \left[ \frac{L_b^2 (6 + \pi^2)}{48} \right] \left[ (EI)_{total} \sum_{i=1}^2 E_i C_i + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L_b^2} \right]} \right\} \quad (4.4)$$

$$M_{cr} = \frac{12\pi^2}{L_b^2 (6 + \pi^2)} \left\{ [E_1 I_1 h - f(EI)_{total}] + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \left[ \frac{L_b^2 (6 + \pi^2)}{48} \right] \left[ (EI)_{total} \sum_{i=1}^2 E_i C_i + \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 \pi^2}{L_b^2} \right]} \right\} \quad (4.5)$$

- RODRIGUES (2013)

$$q_{cr} = \frac{60\pi^4}{L_b^4(\pi^4 + 45)} \{E_1 I_1 h - f(EI)_{total} + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (EI)_{total}}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]}\} \quad (4.6)$$

$$M_{cr} = \frac{15\pi^4}{2L_b^2(\pi^4 + 45)} \{E_1 I_1 h - f(EI)_{total} + \sqrt{[E_1 I_1 h - f(EI)_{total}]^2 + \frac{(\pi^4 + 45)}{30} \left[ E_1 I_1 E_2 I_2 h^2 + \frac{L_b^2 (EI)_{total}}{\pi^2} \sum_{i=1}^2 E_i C_i \right]}\} \quad (4.7)$$

Sendo que,

$$(EI)_{total} = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad (4.8)$$

$$C_i = \frac{J_i}{2(1 + \nu)} \quad (4.9)$$

$$J = \frac{b_{f1} t_{f1}^3}{3} + \frac{b_{f2} t_{f2}^3}{3} + \frac{b_w t_w^3}{3} \quad (4.10)$$

Onde,

$E_1$  é o módulo de elasticidade do aço da mesa superior;

$E_2$  é o módulo de elasticidade do aço da mesa inferior;

$h$  é a distância entre os centros das mesas superior e inferior;

$C_i$  é a constante torcional reduzida;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson;

$b_{f1}$  é a largura da mesa superior;

$b_{f2}$  é a largura da mesa inferior;

$t_{f1}$  é a espessura da mesa superior;

$t_{f2}$  é a espessura da mesa inferior;

$b_w$  é o comprimento da alma;

$t_w$  é a espessura da alma;

$f$  é distância do ponto de aplicação da carga crítica ao eixo horizontal da mesa inferior;

$L_b$  é o comprimento sem travamento da viga estudada.

Por fim, os valores encontrados aplicando as formulações supracitadas serão comparados com os resultados obtidos segundo as normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008.

Vale ressaltar que as propriedades térmicas da alvenaria de tijolos foram consideradas independentes da elevação da temperatura. Conforme o anexo B da norma NBR 15220:2003, consideraram-se tijolos com as seguintes propriedades térmicas: densidade de massa aparente de 1600 kg/m<sup>3</sup>, calor específico de 0,90 W/(m.K) e calor específico de 920 J/(kg.K).

## 4.2. PERFIL VS 450X51

O perfil VS 450X51 apresenta as seguintes propriedades geométricas: altura ( $h$ ) de 450 mm, largura da mesa ( $b_f$ ) de 200 mm, espessura da mesa ( $t_f$ ) de 9,5 mm e espessura da alma ( $t_w$ ) de 6,3 mm. Além disso, o comprimento ( $L_b$ ) adotado para esta viga foi de 9 metros. Para o estudo deste perfil, optou-se pelo uso de dois modelos. O primeiro modelo é composto por: um segmento de laje; o perfil metálico supracitado; uma camada de ar que envolve o perfil metálico e acompanha a temperatura de cada incêndio; e uma camada de ar situada na parte superior do segmento da laje e apresenta temperatura de 20°C. O segundo modelo conta com os mesmos elementos apresentados no primeiro modelo, mas também um segmento de alvenaria também é considerado. Seguem as imagens que indicam quais nós foram selecionados para a aferição de temperatura.

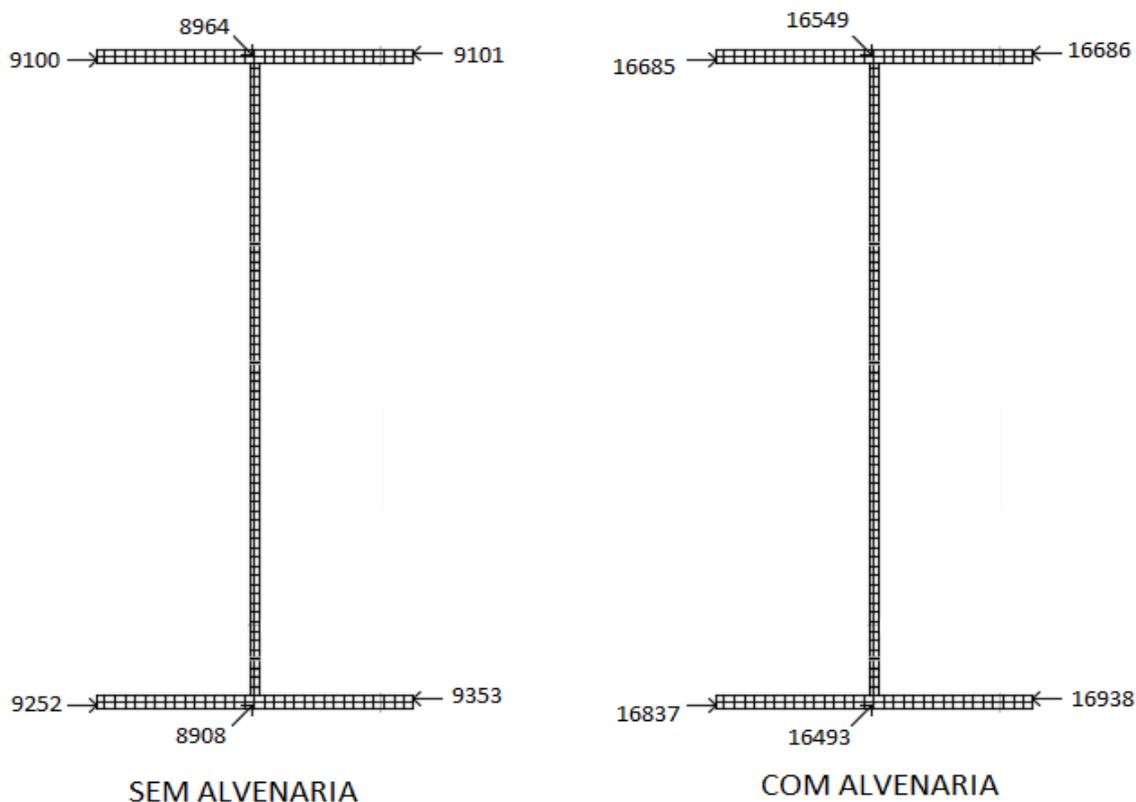


Figura 4.3 Nós selecionados para aferição de temperatura

#### 4.2.1. Caso 1 (sem alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

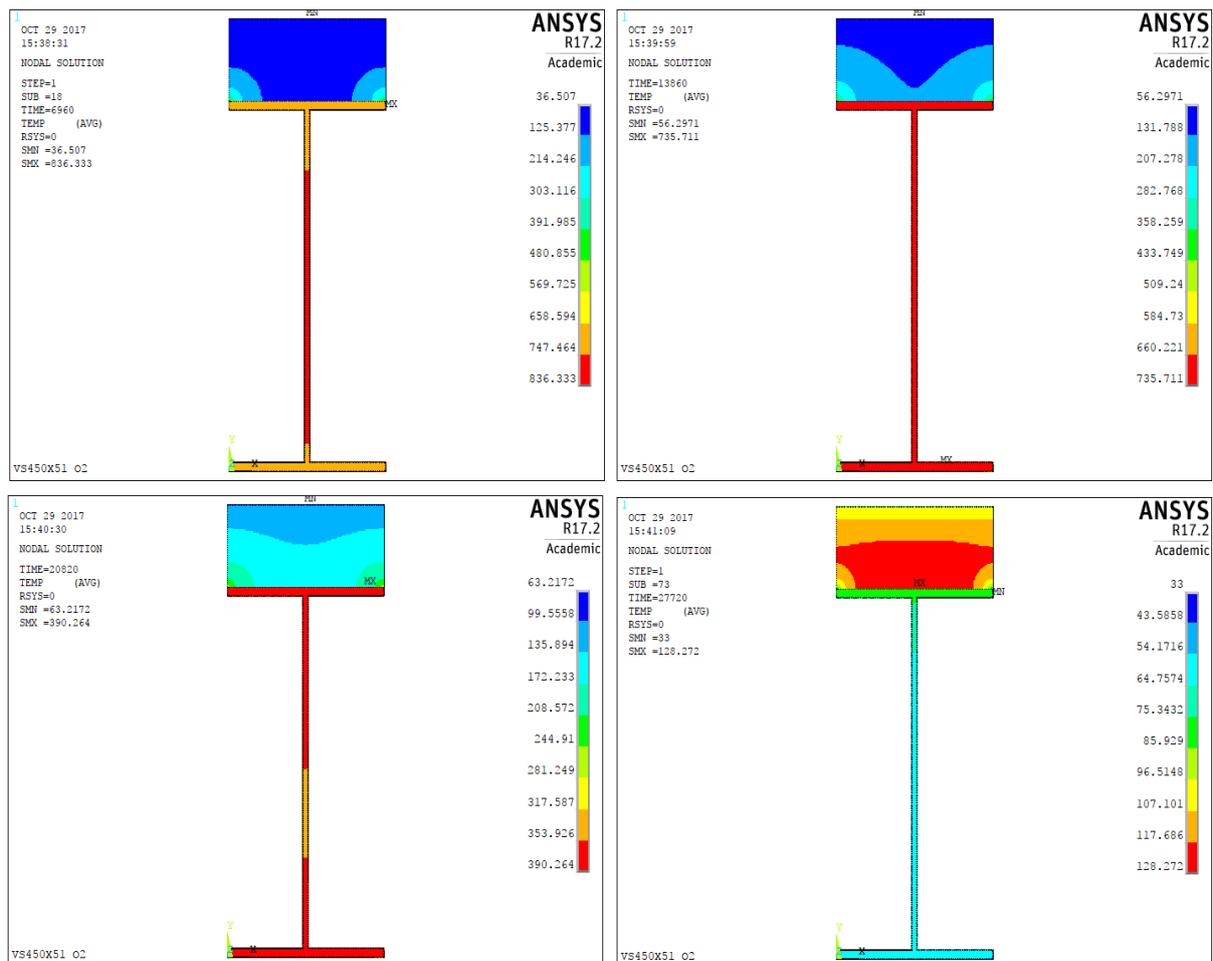
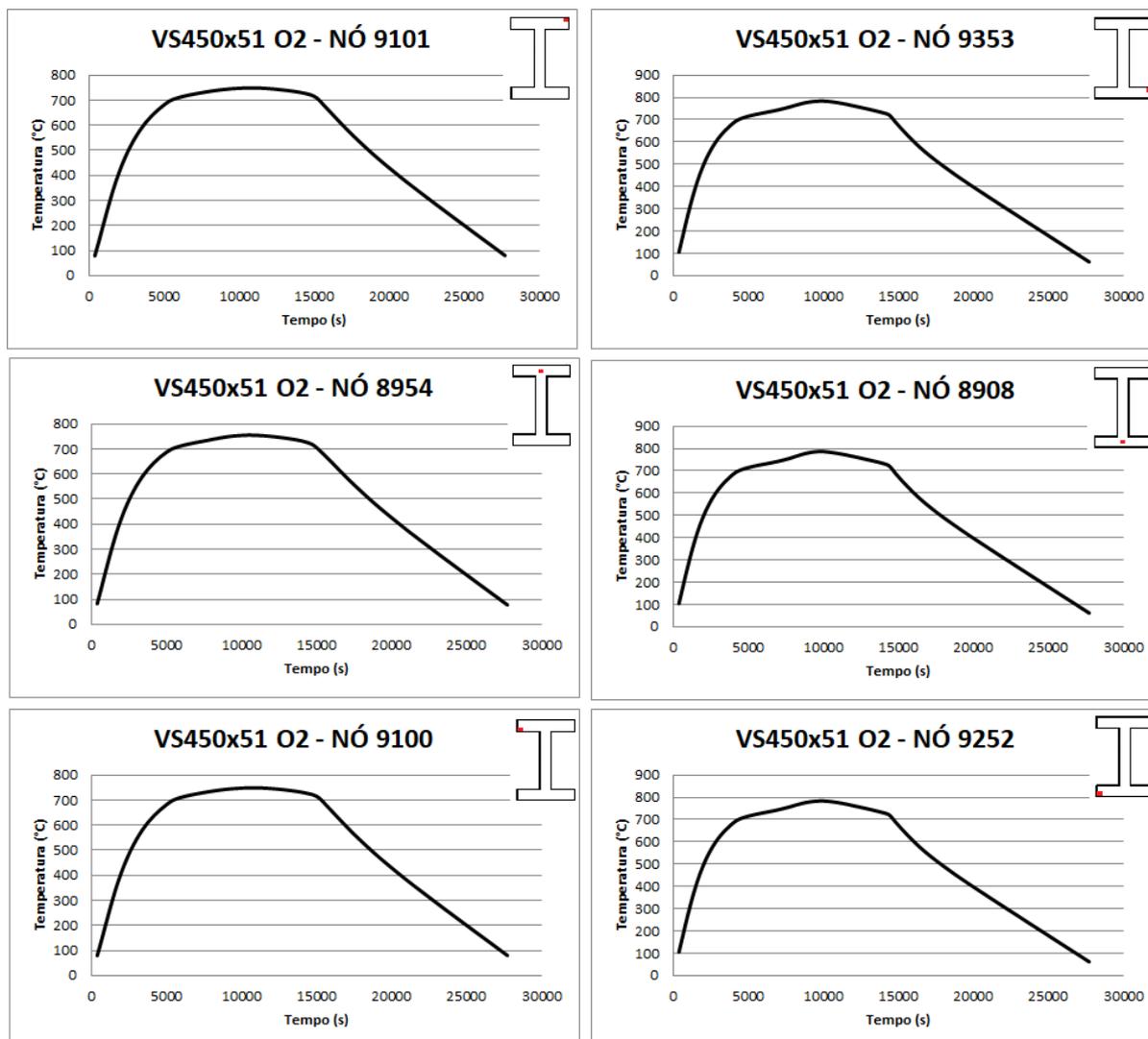


Figura 4.4 Evolução térmica - VS450X51 O2

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 8908, 8954, 9100, 9101, 9252 e 9353 foram traçados.



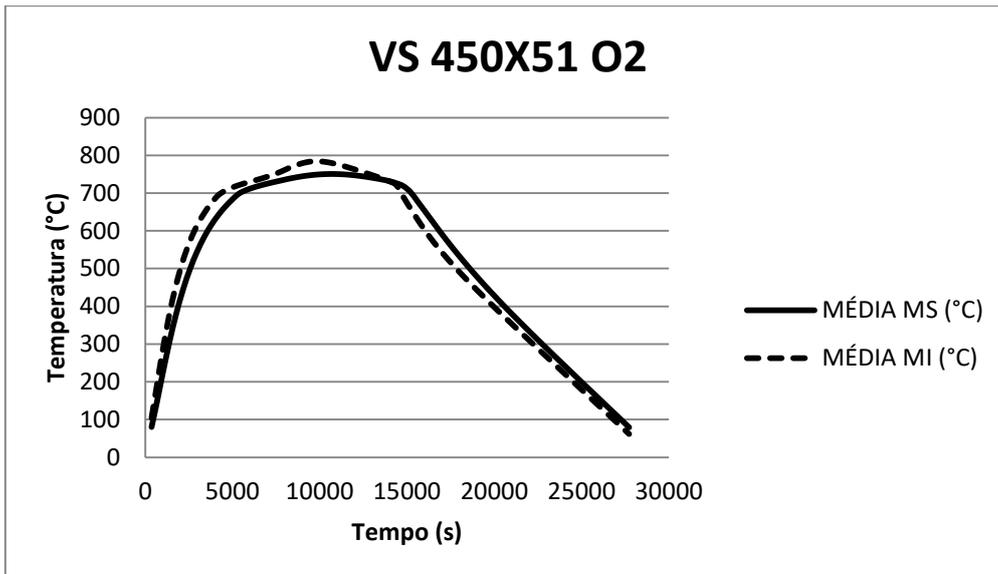
**Figura 4.5 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O2**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.1 Temperaturas máximas - VS450X51 O2**

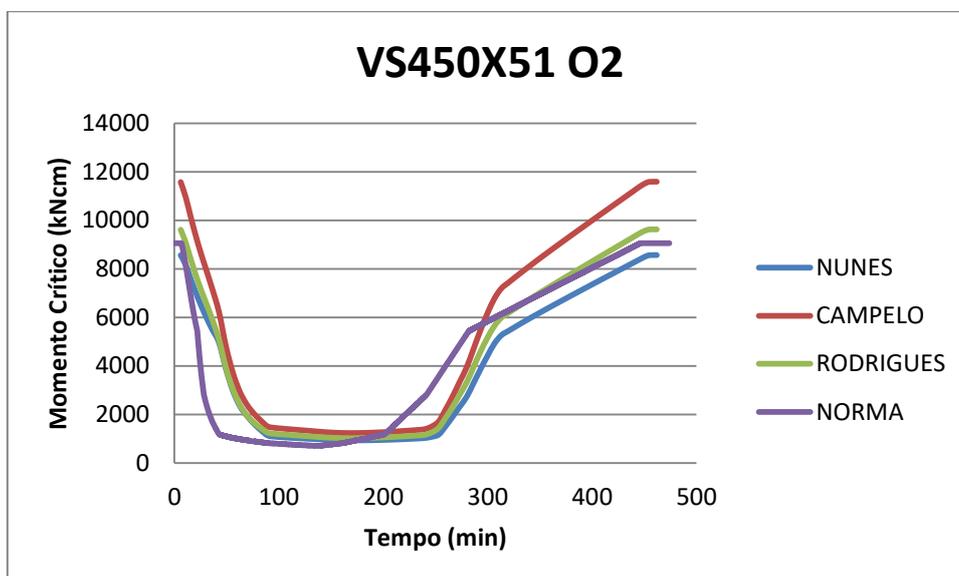
Elemento	9101	8954	9100	9353	8908	9252
Temperatura (°C)	748,59	754,719	748,605	783,516	786,217	783,516

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.6** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.7** Momento fletor crítico

#### 4.2.2. Caso 2 (sem alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

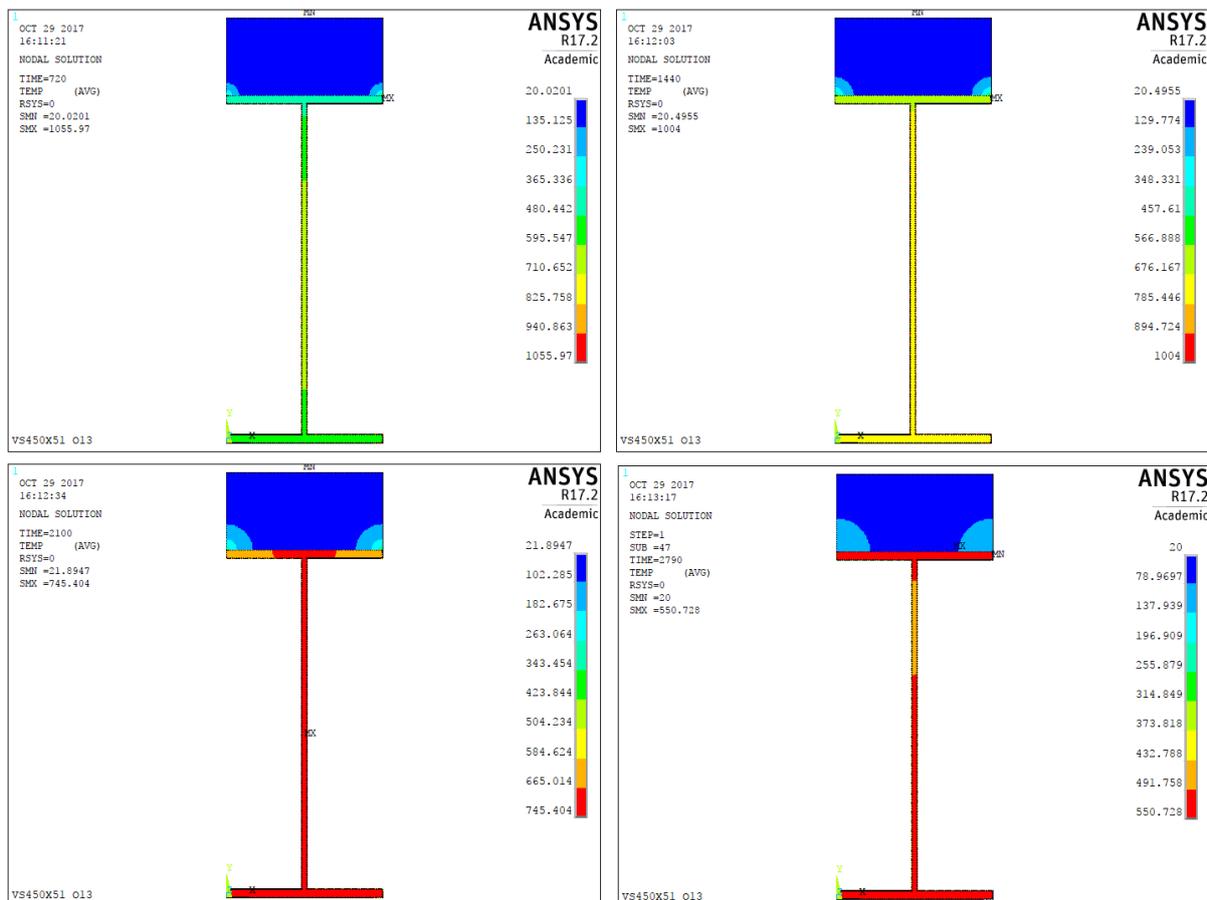
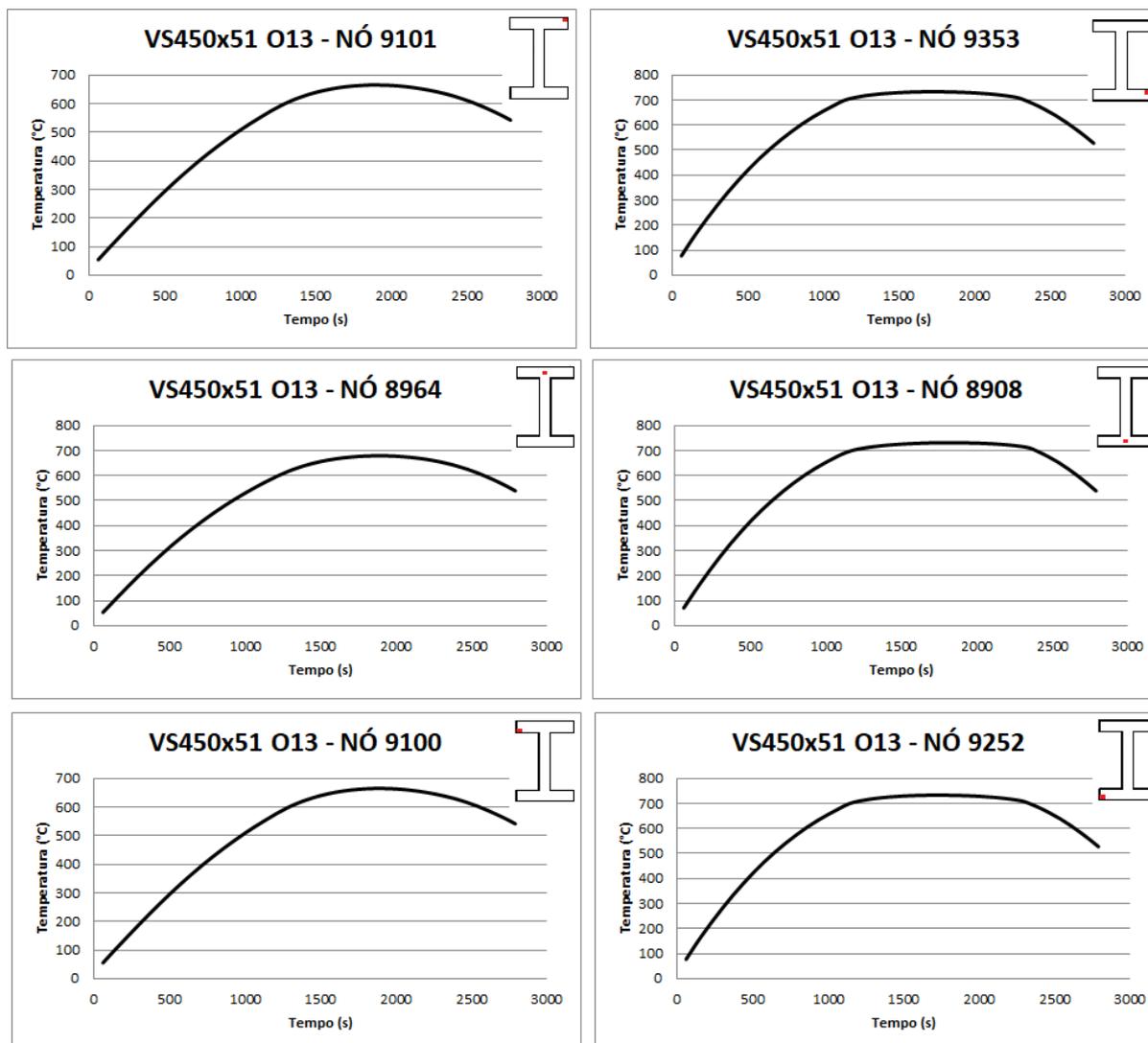


Figura 4.8 Evolução térmica - VS450X51 O13

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 8908, 8964, 9100, 9101, 9252 e 9353 foram traçados.



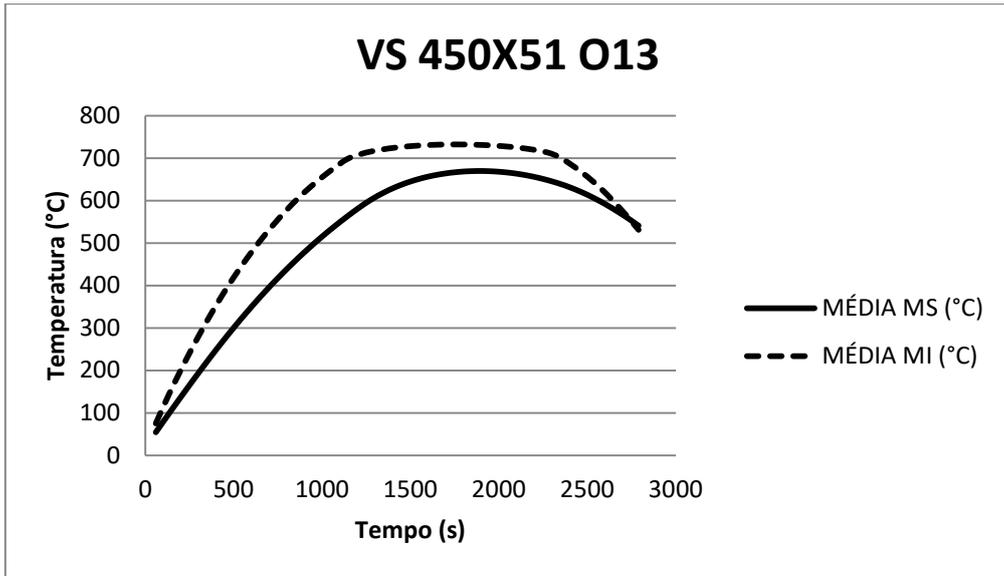
**Figura 4.9 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.2 Temperaturas máximas – VS450X51 O13**

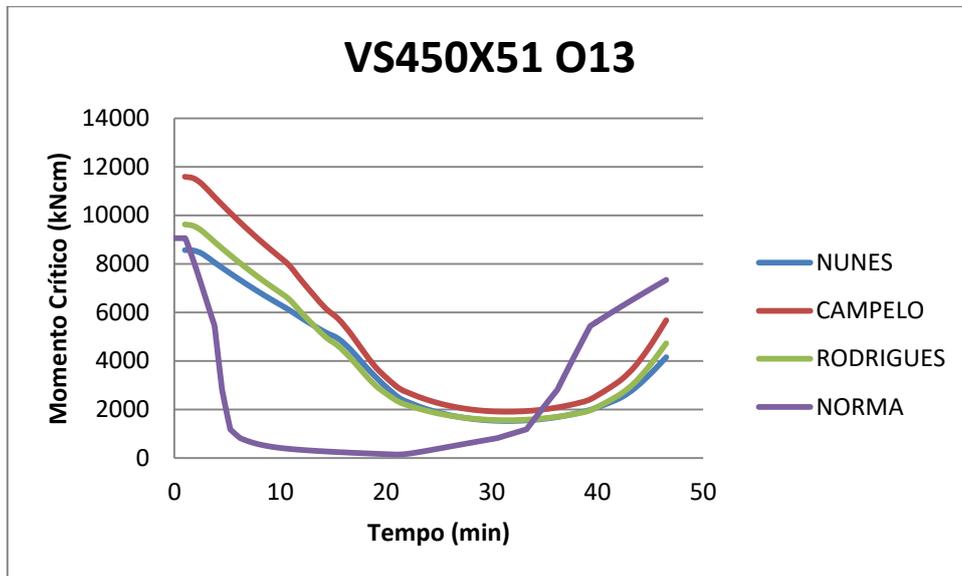
Elemento	9101	8964	9100	9353	8908	9252
Temperatura (°C)	664,811	679,022	664,821	732,746	731,077	732,744

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.10** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.11** Momento fletor crítico

### 4.2.3. Caso 3 (com alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

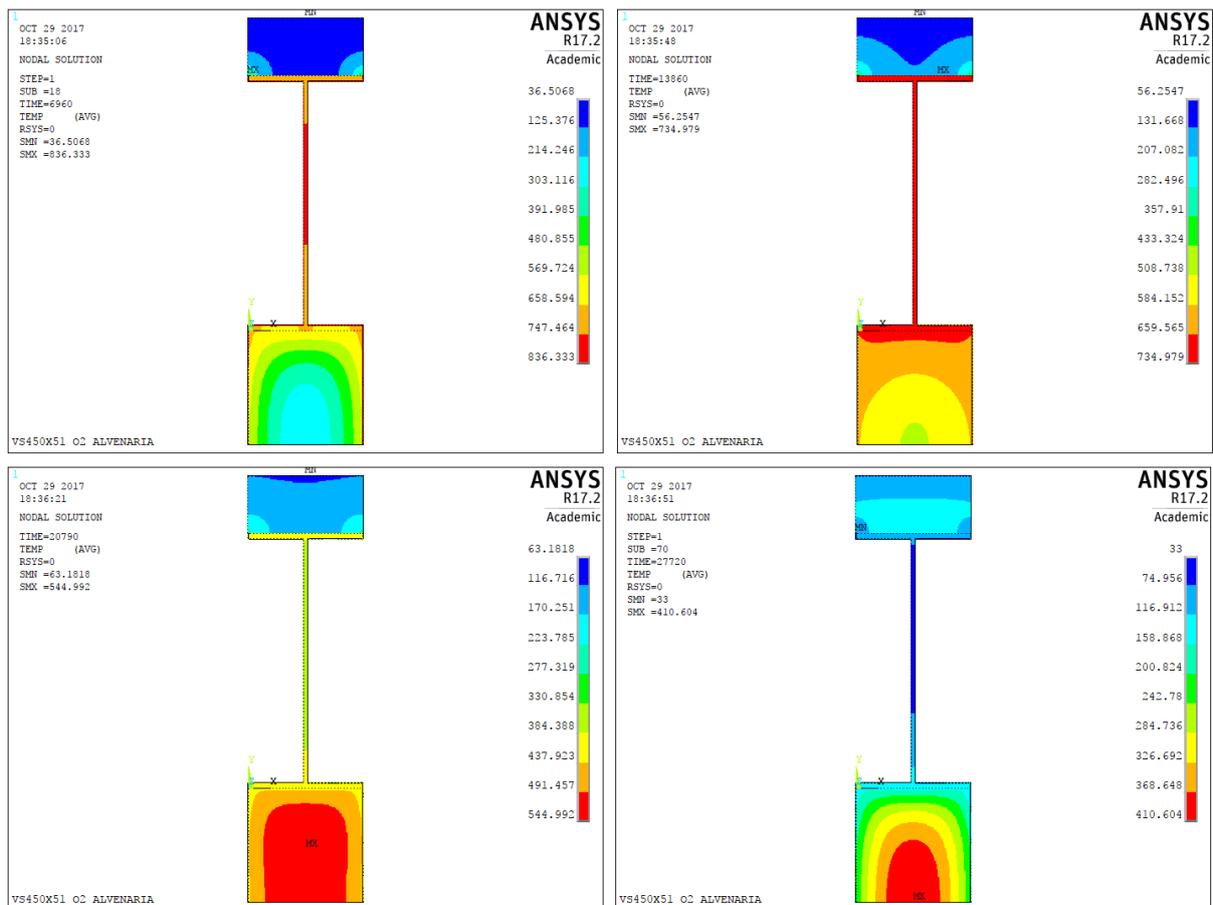
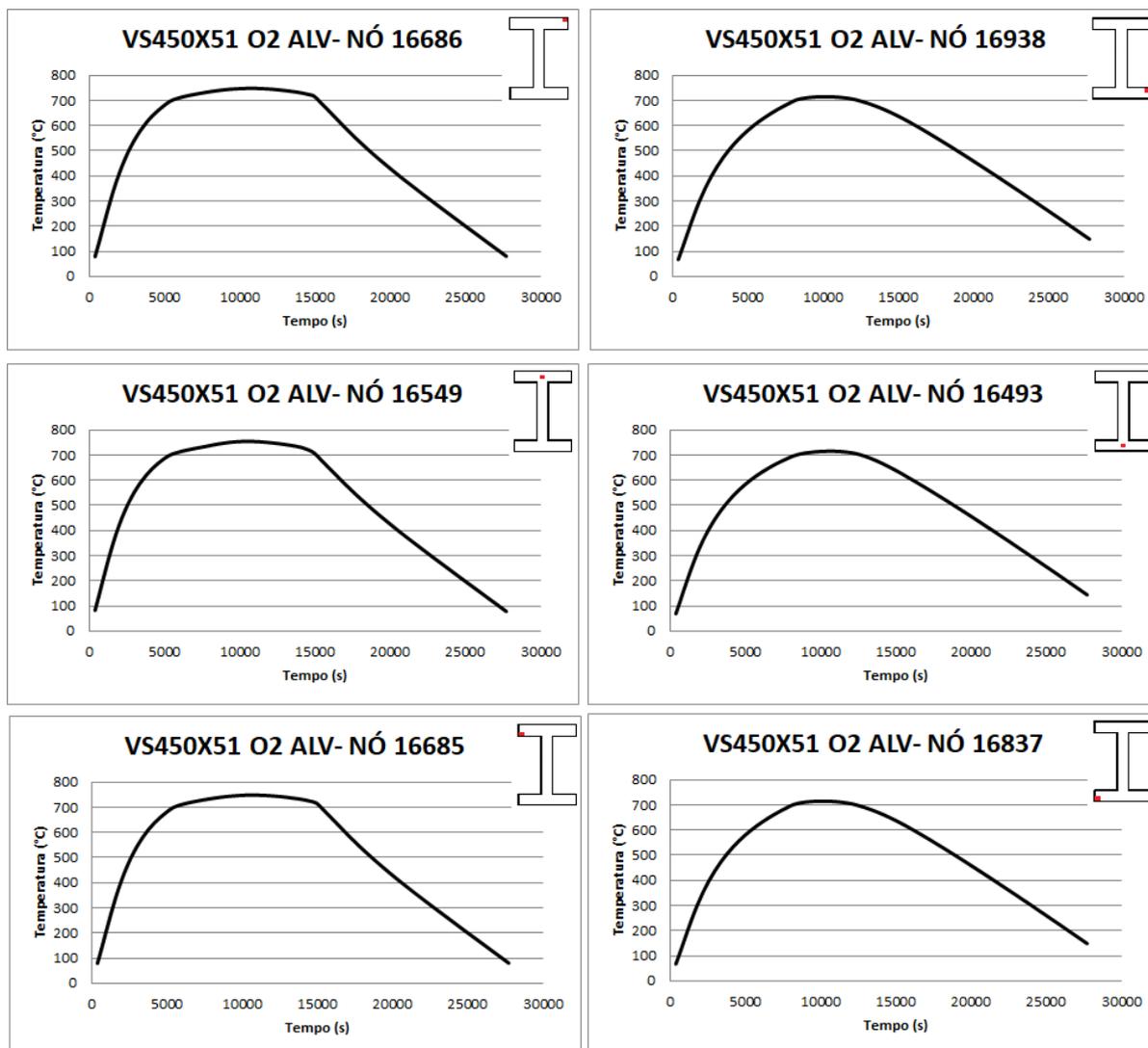


Figura 4.12 Evolução térmica - VS450X51 O2 ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 16493, 16549, 16685, 16686, 16837 e 16938 foram traçados.



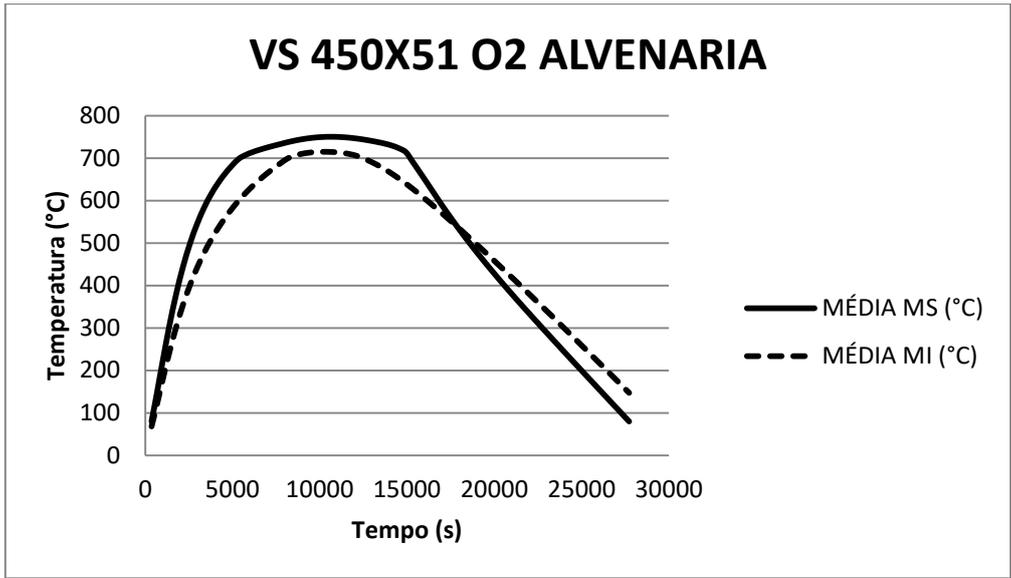
**Figura 4.13 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O2 ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.3 Temperaturas máximas - VS450X51 O2 ALVENARIA**

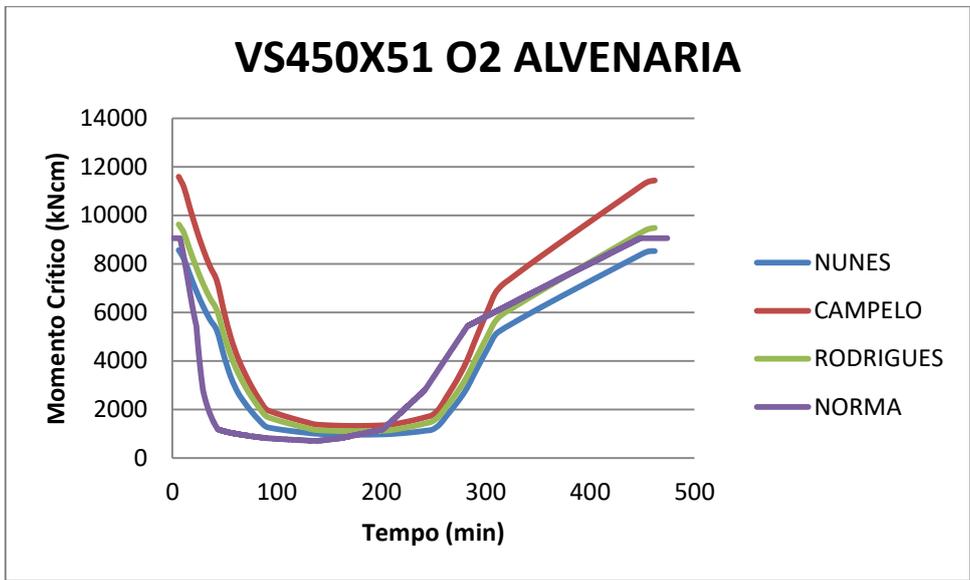
Elemento	16686	16549	16685	16938	16493	16837
Temperatura (°C)	748,156	754,163	748,184	714,858	715,171	714,774

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.14** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2 ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.15** Momento fletor crítico

#### 4.2.4. Caso 4 (com alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

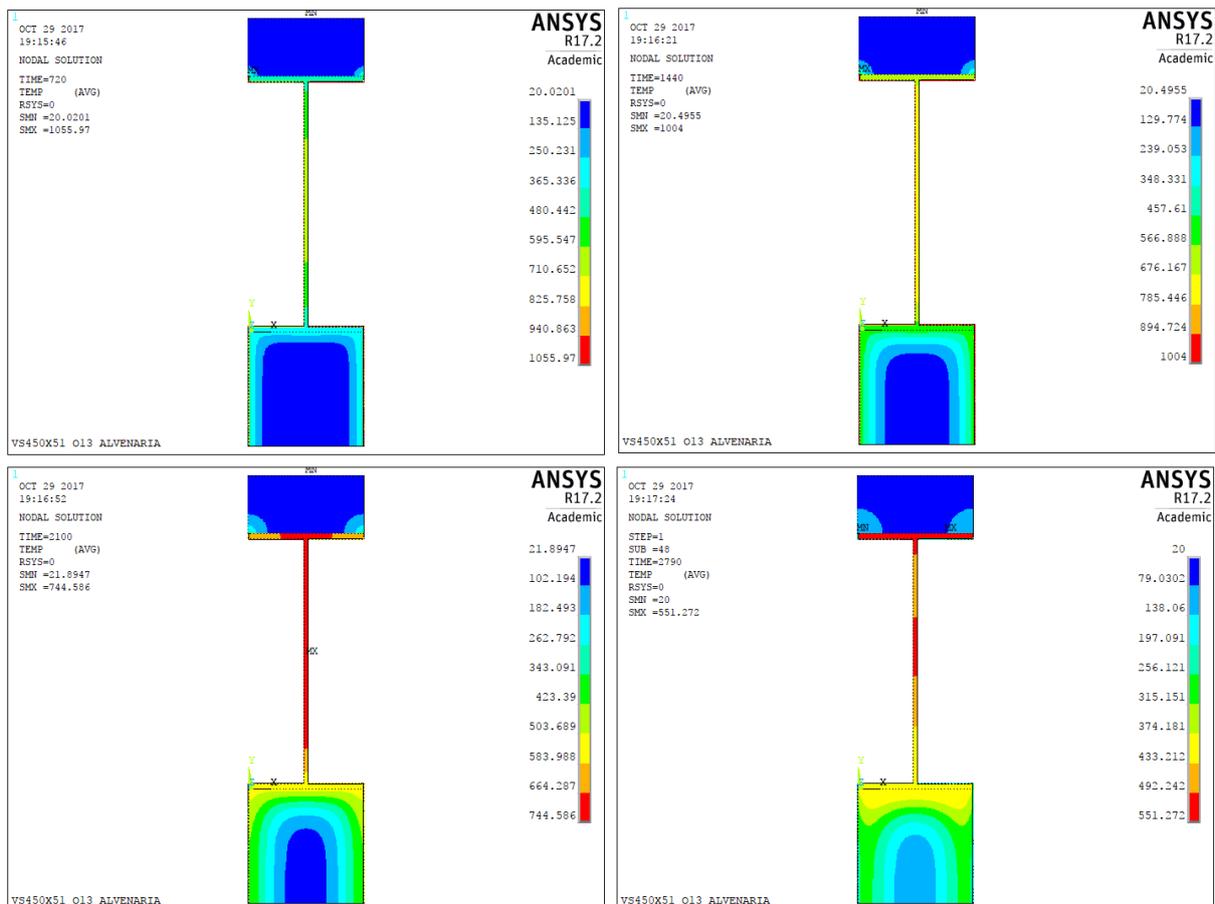
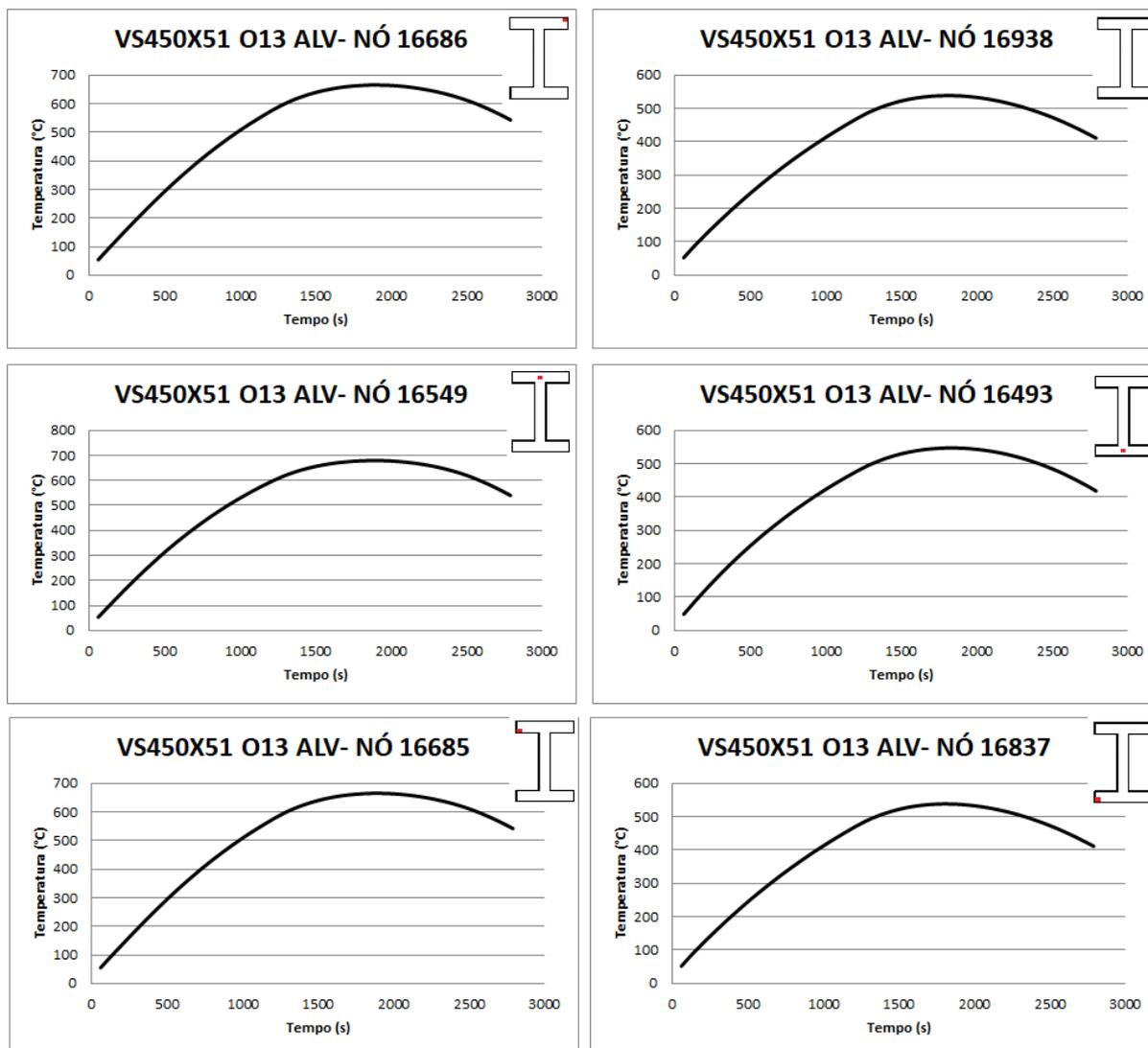


Figura 4.16 Evolução térmica - VS450X51 O13 ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 16493, 16549, 16685, 16686, 16837 e 16938 foram traçados.



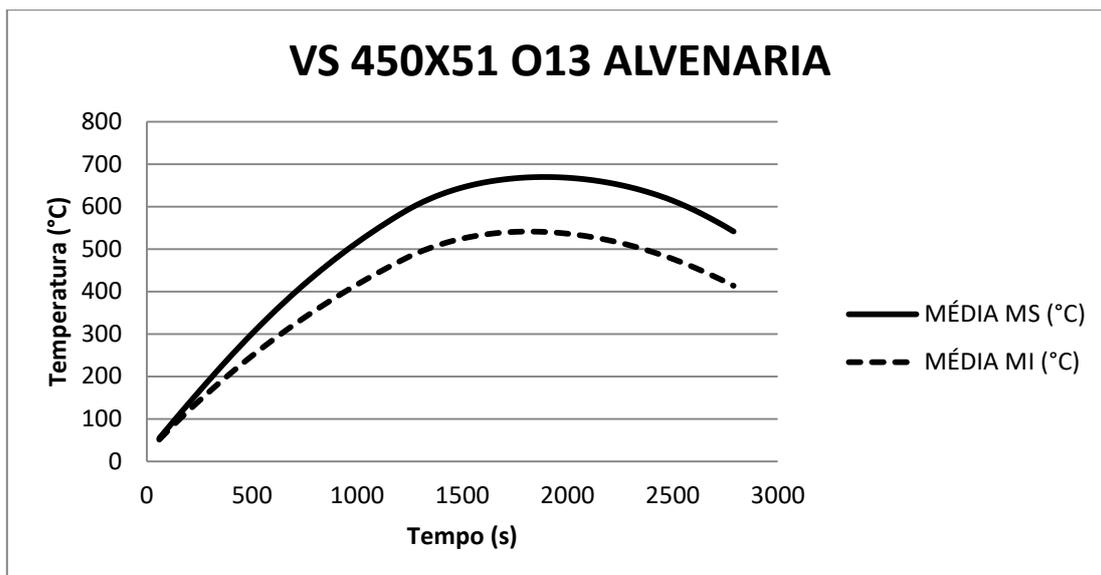
**Figura 4.17 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13 ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.4 Temperaturas máximas - VS450X51 O13 ALVENARIA**

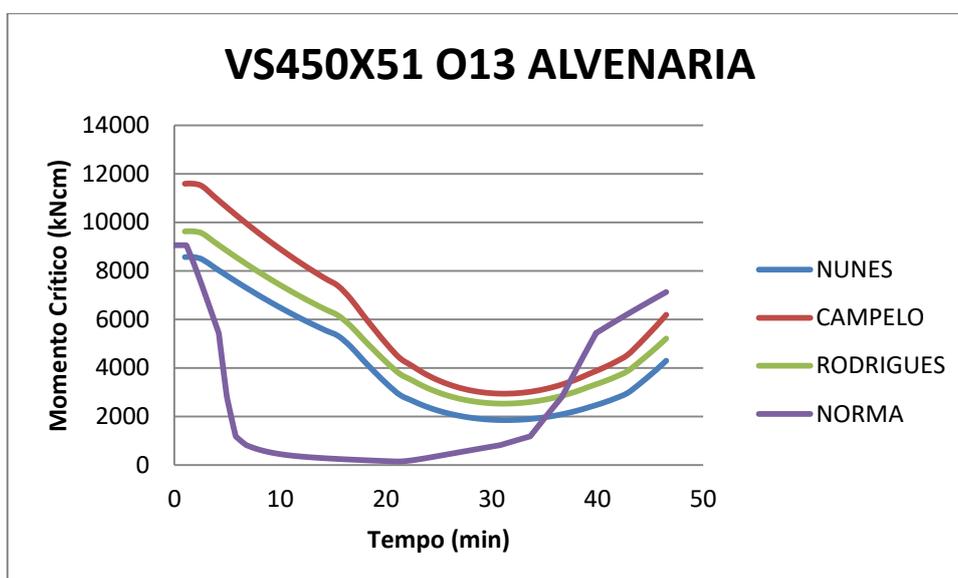
Elemento	16686	16549	16685	16938	16493	16837
Temperatura (°C)	664,808	679,019	664,818	538,215	547,042	538,013

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.18** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13 ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.19** Momento fletor crítico

#### 4.2.5. Caso 5 (com alvenaria e incêndio lateral): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

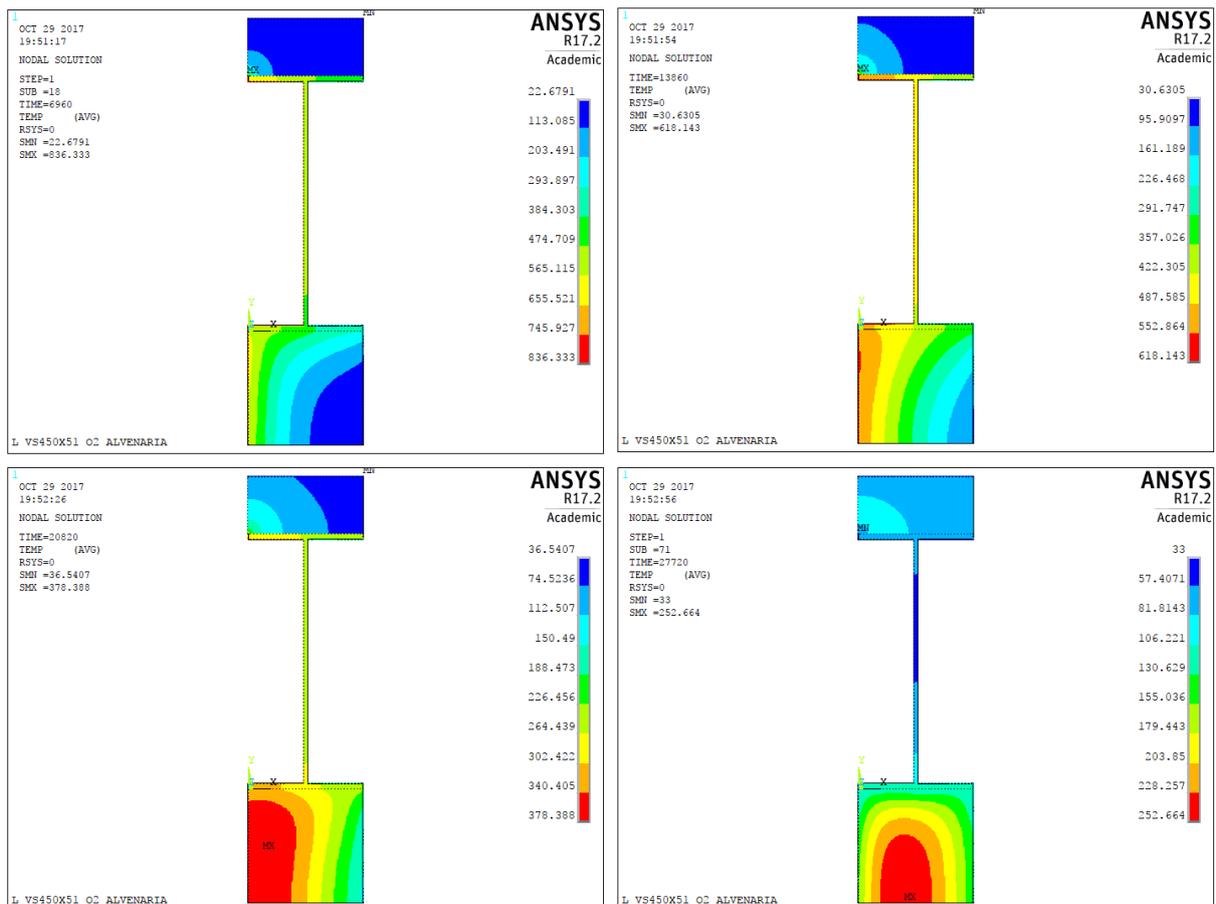
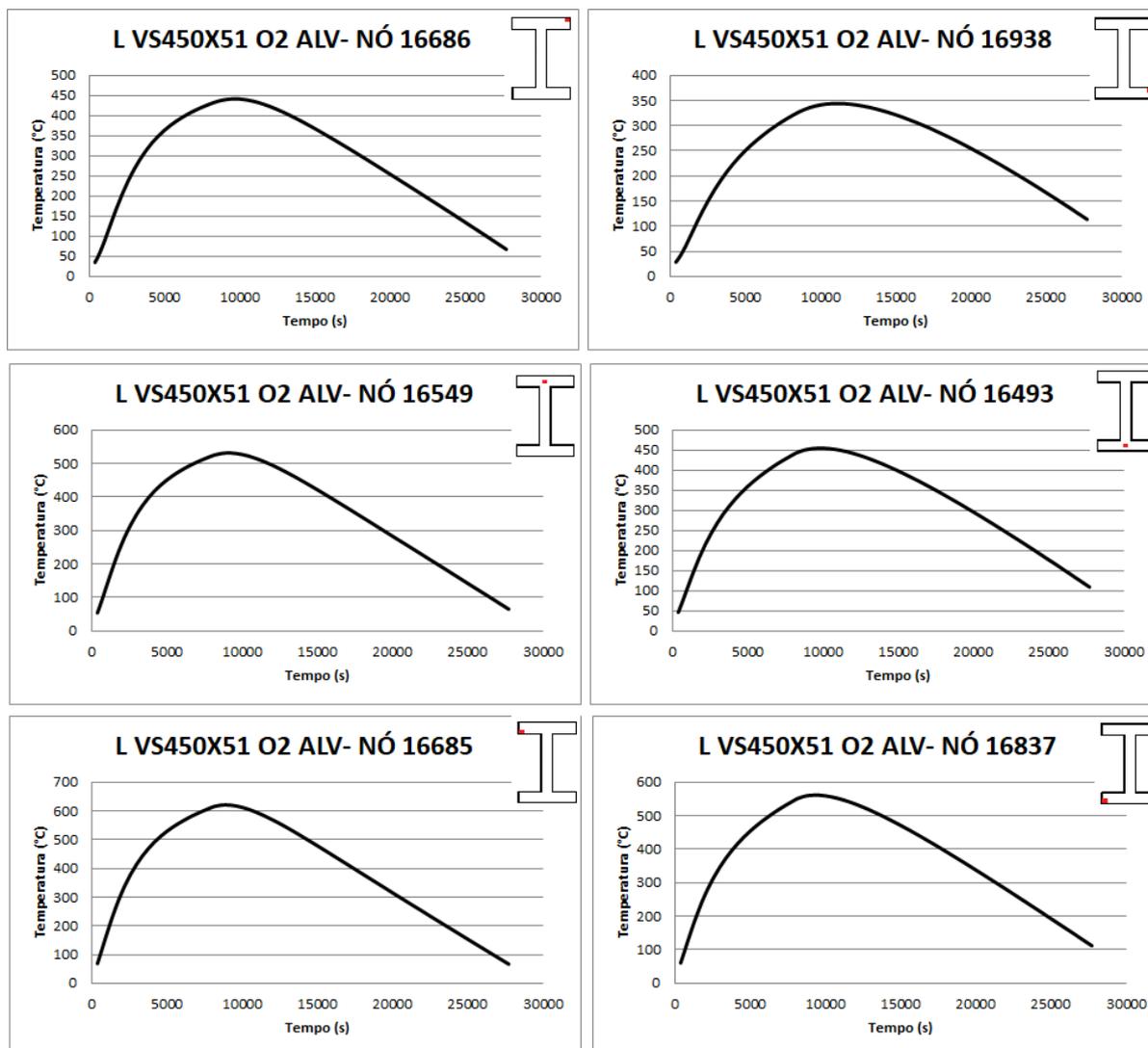


Figura 4.20 Evolução térmica - VS450X51 O2 L ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 16493, 16549, 16685, 16686, 16837 e 16938 foram traçados.



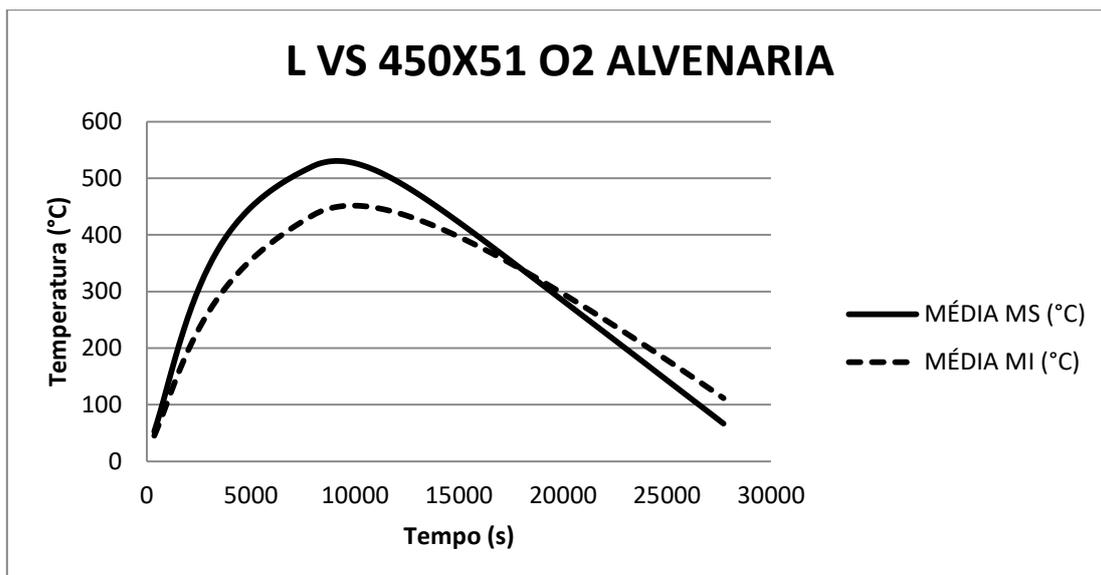
**Figura 4.21 Desenvolvimento da temperatura nos nós -VS450X51 O2 L ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.5 Temperaturas máximas - VS450X51 O2 L ALVENARIA**

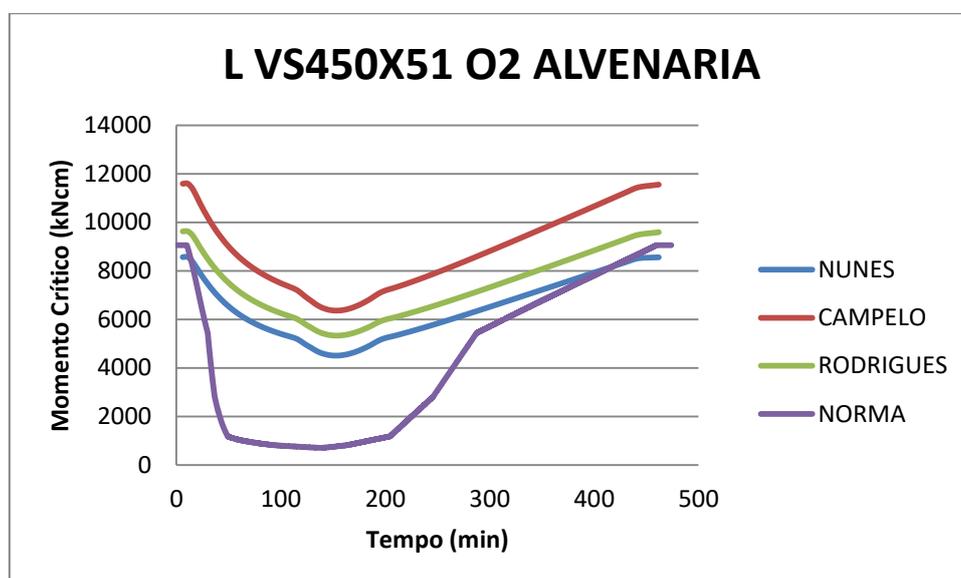
Elemento	16686	16549	16685	16938	16493	16837
Temperatura (°C)	441,447	531,039	620,589	343,96	454,553	561,22

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.22** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O2 L ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.23** Momento fletor crítico

#### 4.2.6. Caso 6 (com alvenaria e incêndio lateral): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 450X51, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

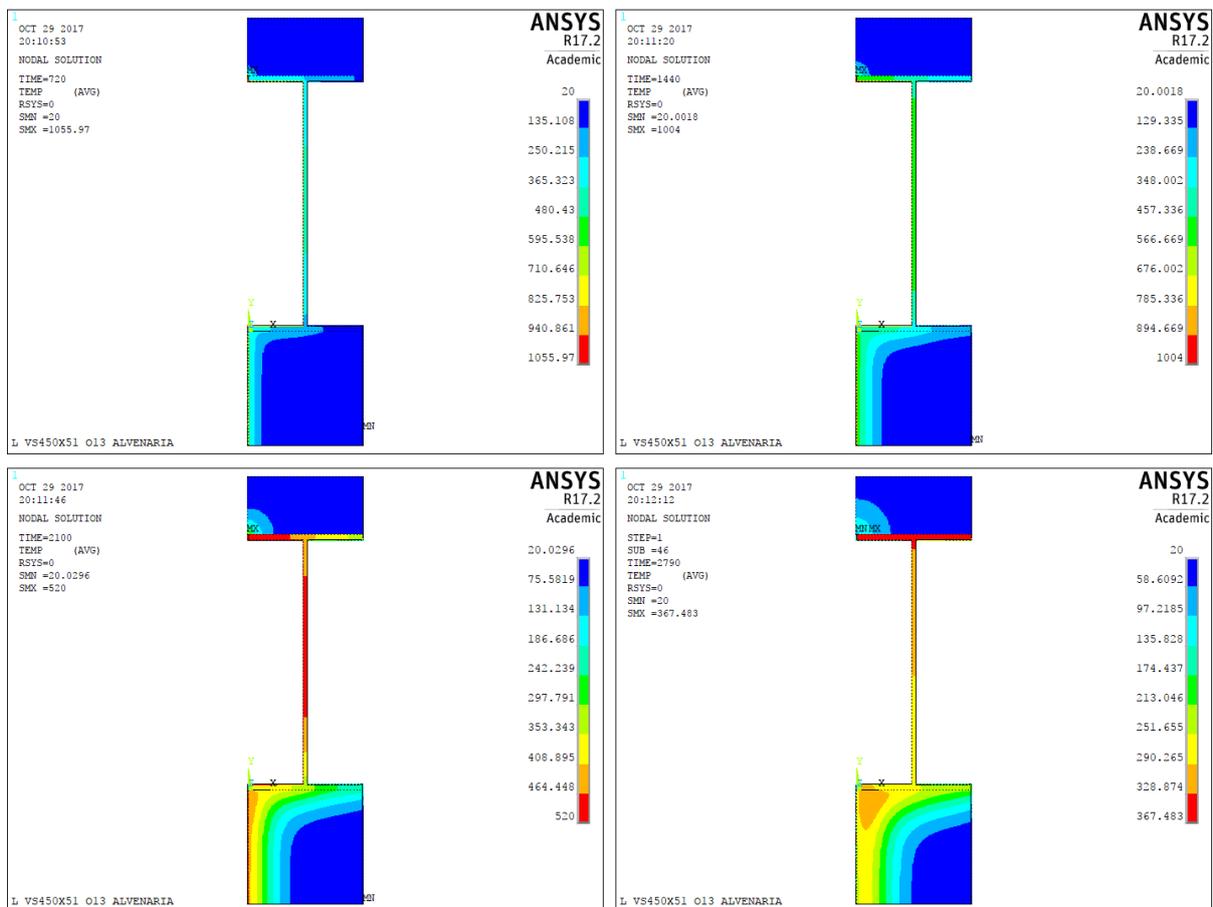
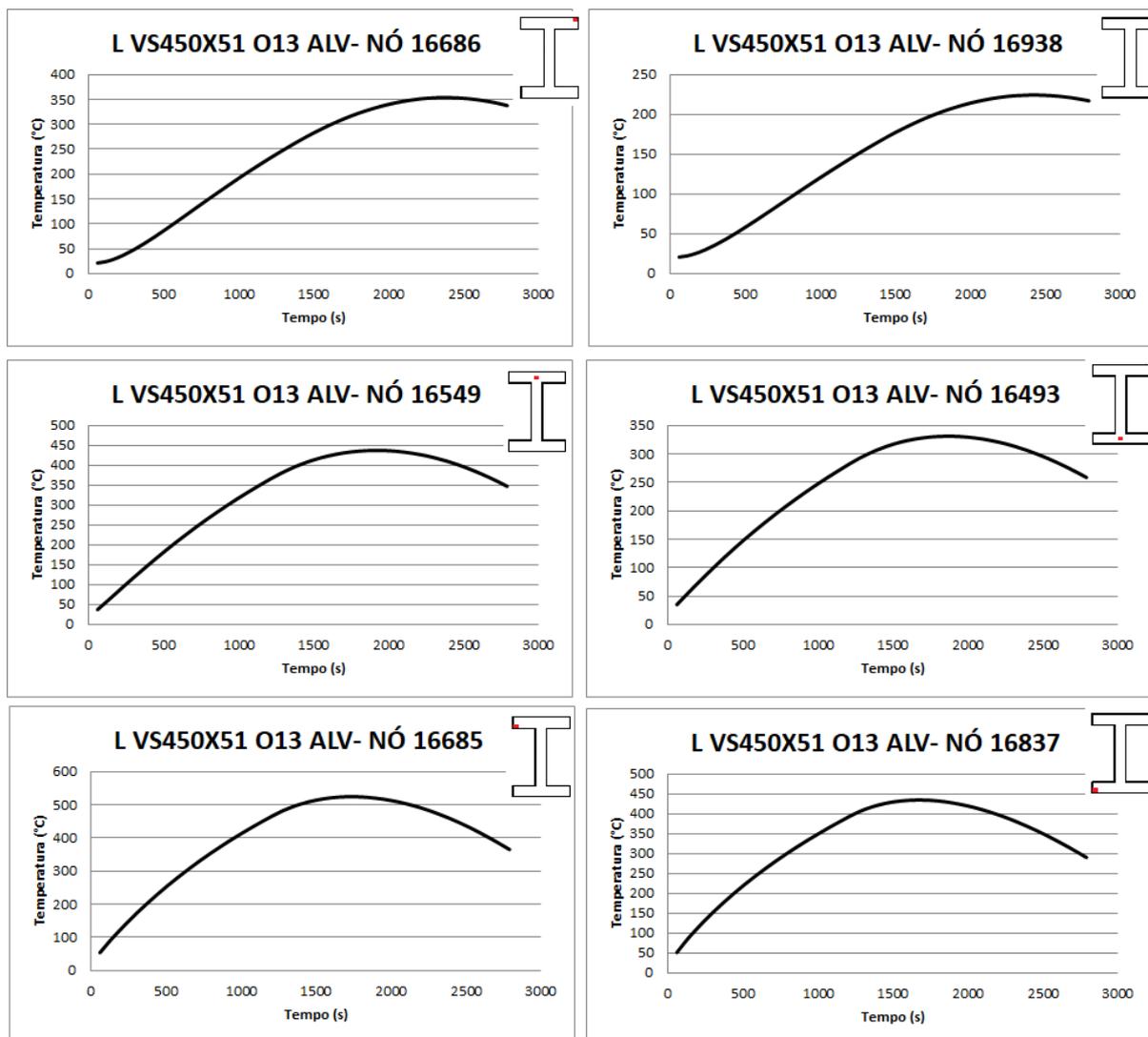


Figura 4.24 Evolução térmica - VS450X51 O13 L ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 16493, 16549, 16685, 16686, 16837 e 16938 foram traçados.



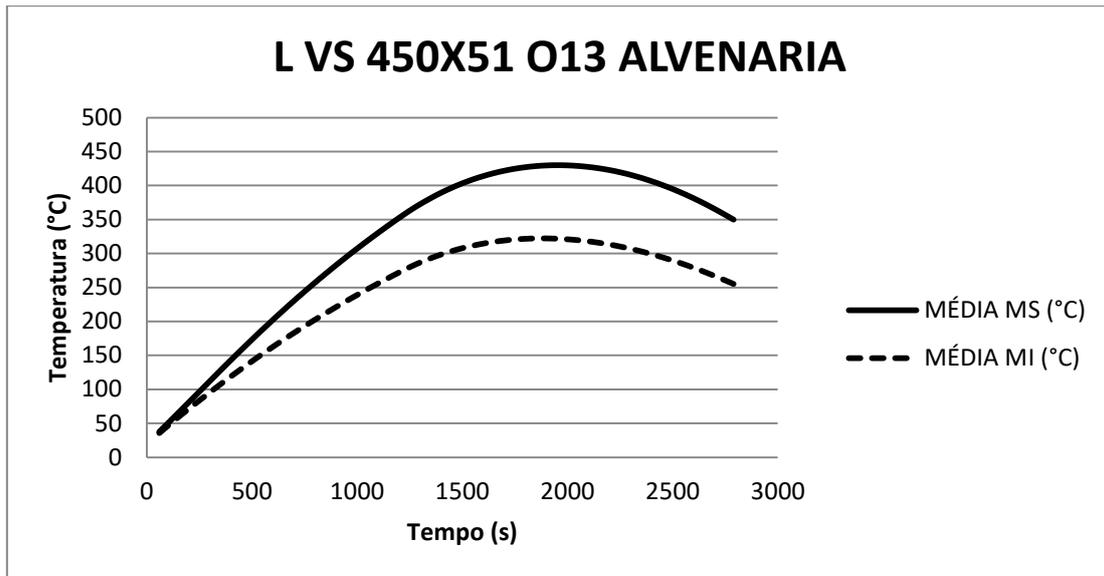
**Figura 4.25 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS450X51 O13 L ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.6 Temperaturas máximas - VS450X51 O13 L ALVENARIA**

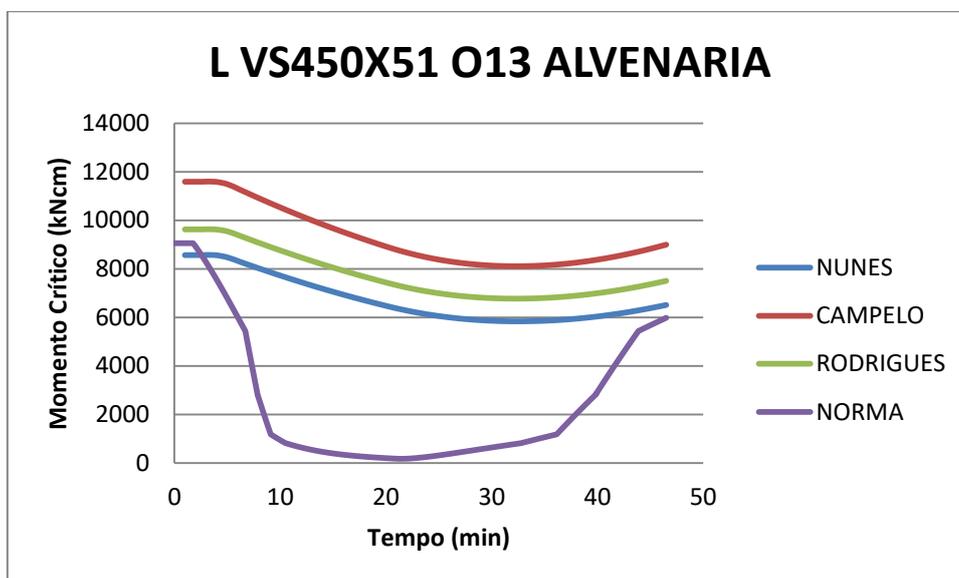
Elemento	16686	16549	16685	16938	16493	16837
Temperatura (°C)	353,676	437,038	524,157	224,148	330,888	434,369

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.26** Temperaturas médias das mesas do perfil VS450X51 O13 L ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.27** Momento fletor crítico

### 4.3. PERFIL VS 1400X481

O perfil VS 1400X482 apresenta as seguintes propriedades geométricas: altura ( $h$ ) de 1400 mm, largura da mesa ( $b_f$ ) de 500 mm, espessura da mesa ( $t_f$ ) de 45 mm e espessura da alma ( $t_w$ ) de 12,5 mm. Além disso, o comprimento ( $L_b$ ) adotado para esta viga foi de 18 metros. Para o estudo deste perfil, optou-se pelo uso de dois modelos. O primeiro modelo é composto por: um segmento de laje; o perfil metálico supracitado; uma camada de ar que envolve o perfil metálico e acompanha a temperatura de cada incêndio; e uma camada de ar situada na parte superior do segmento da laje e apresenta temperatura de 20°C. O segundo modelo conta com os mesmos elementos apresentados no primeiro modelo, mas também um segmento de alvenaria também é considerado. Seguem as imagens que indicam quais nós foram selecionados para a aferição de temperatura.

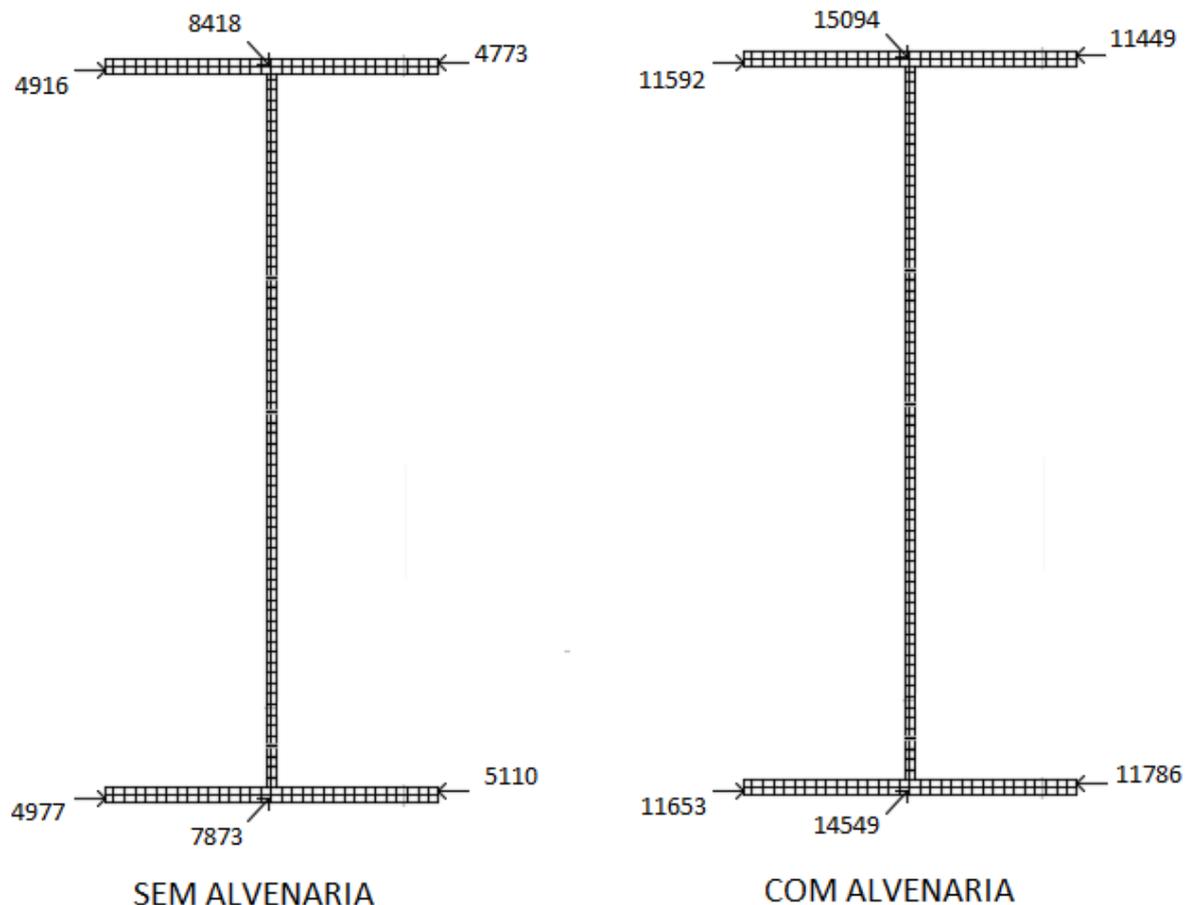


Figura 4.28 Nós selecionados para aferição de temperatura

### 4.3.1. Caso 1 (sem alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X481, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

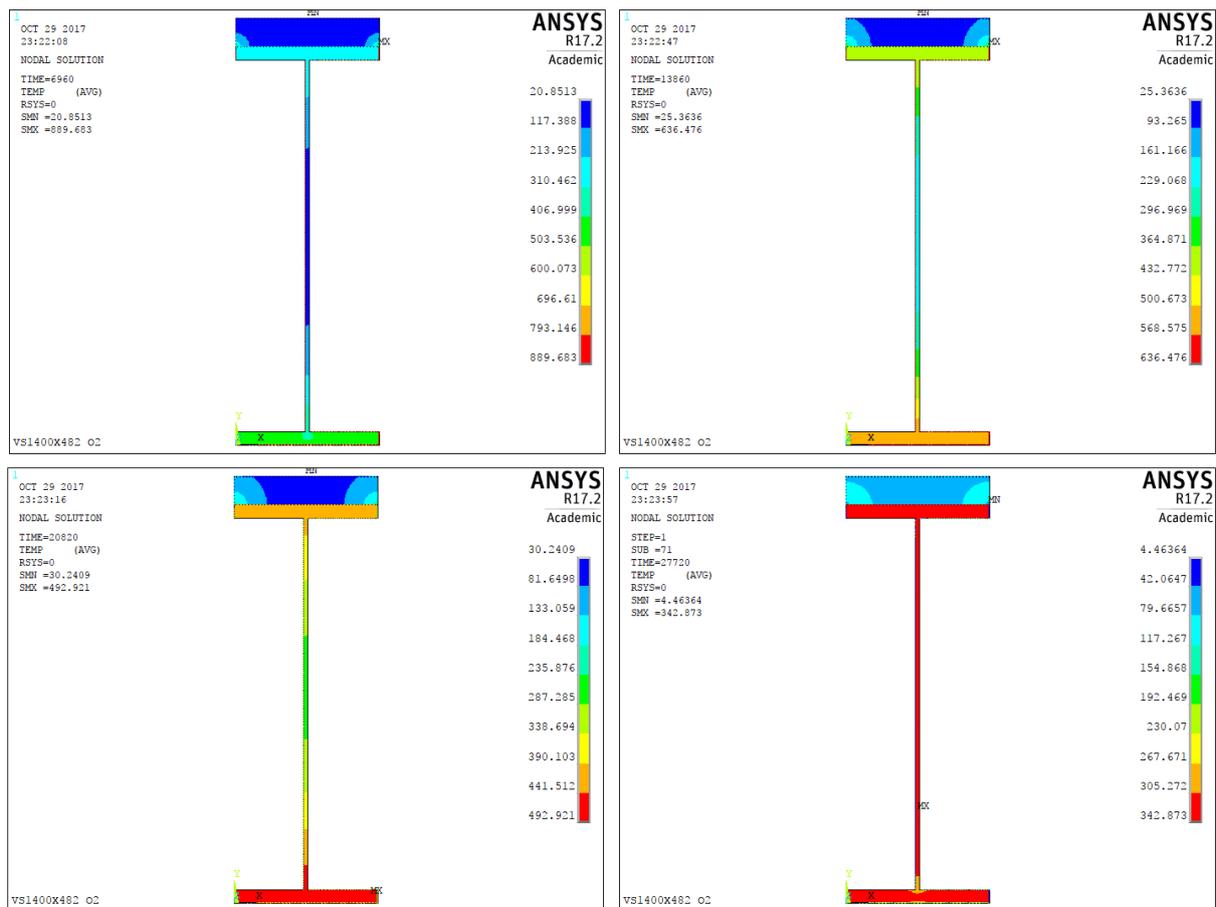
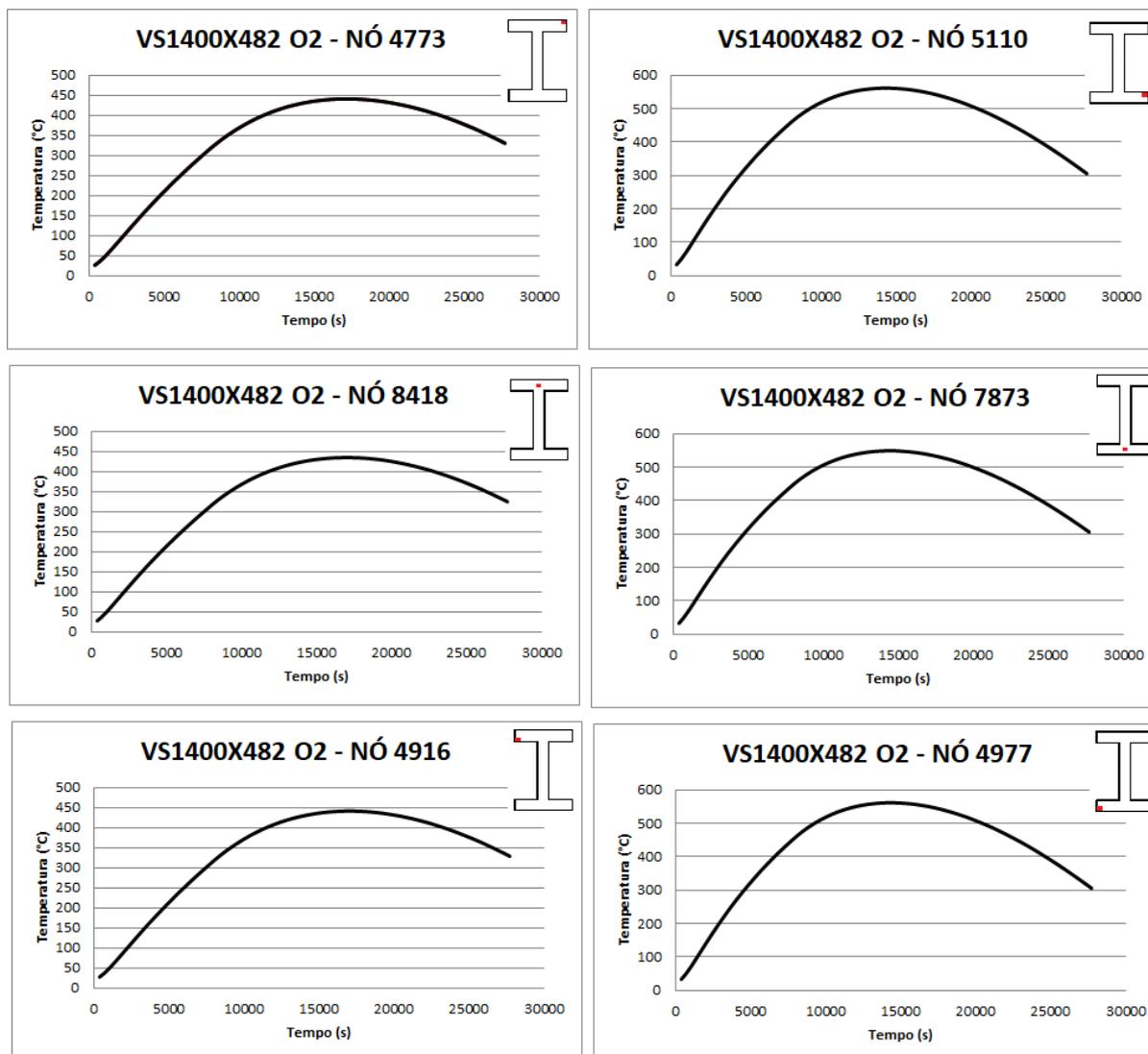


Figura 4.29 Evolução térmica - VS1400X482 O2

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 4773, 4916, 4977, 5110, 7873 e 8418 foram traçados.



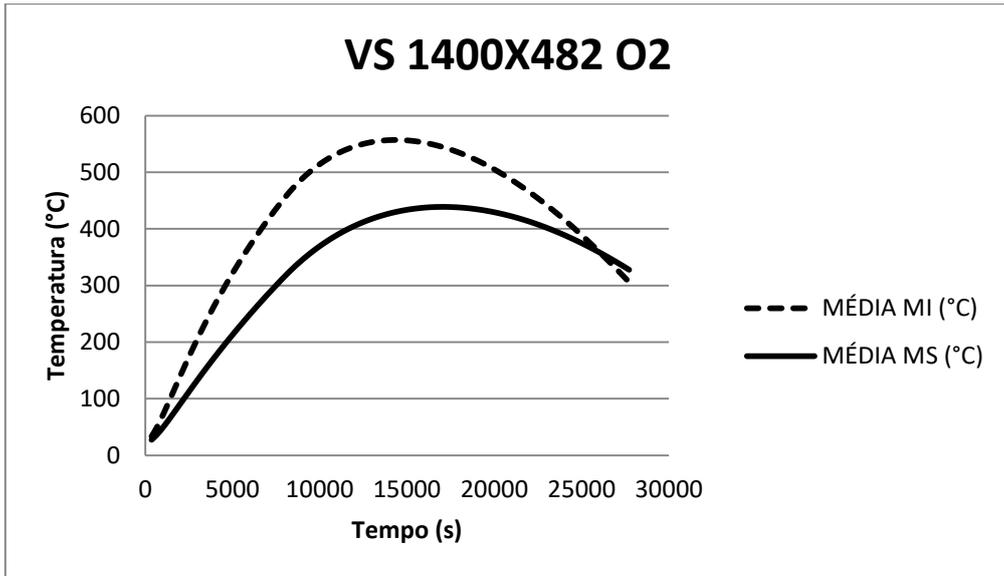
**Figura 4.30 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O2**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.7 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2**

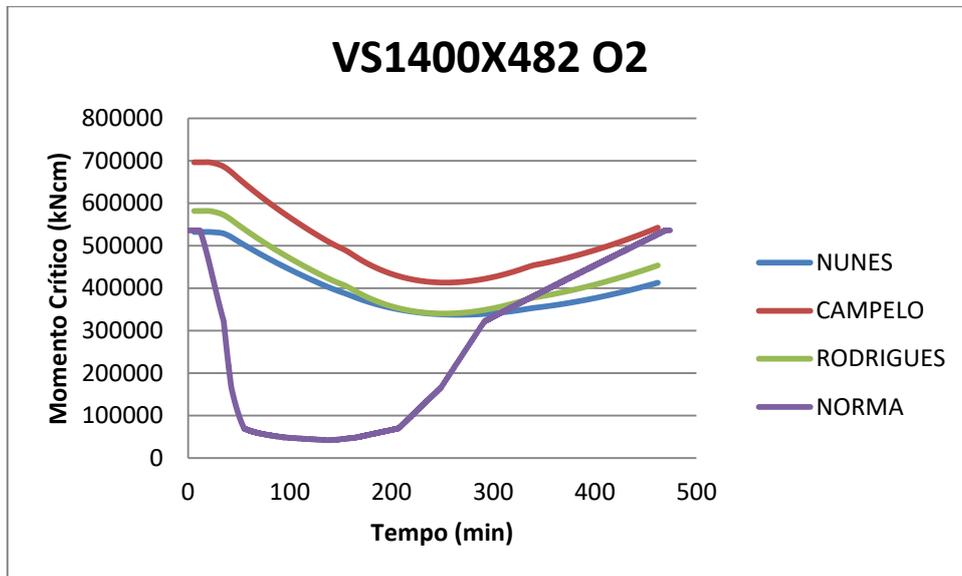
Elemento	4773	8418	4916	5110	7873	4977
Temperatura (°C)	440,81	434,501	441,055	561,113	548,743	561,113

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.31** Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O2

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.32** Momento fletor crítico

#### 4.3.2. Caso 2 (sem alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X482, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

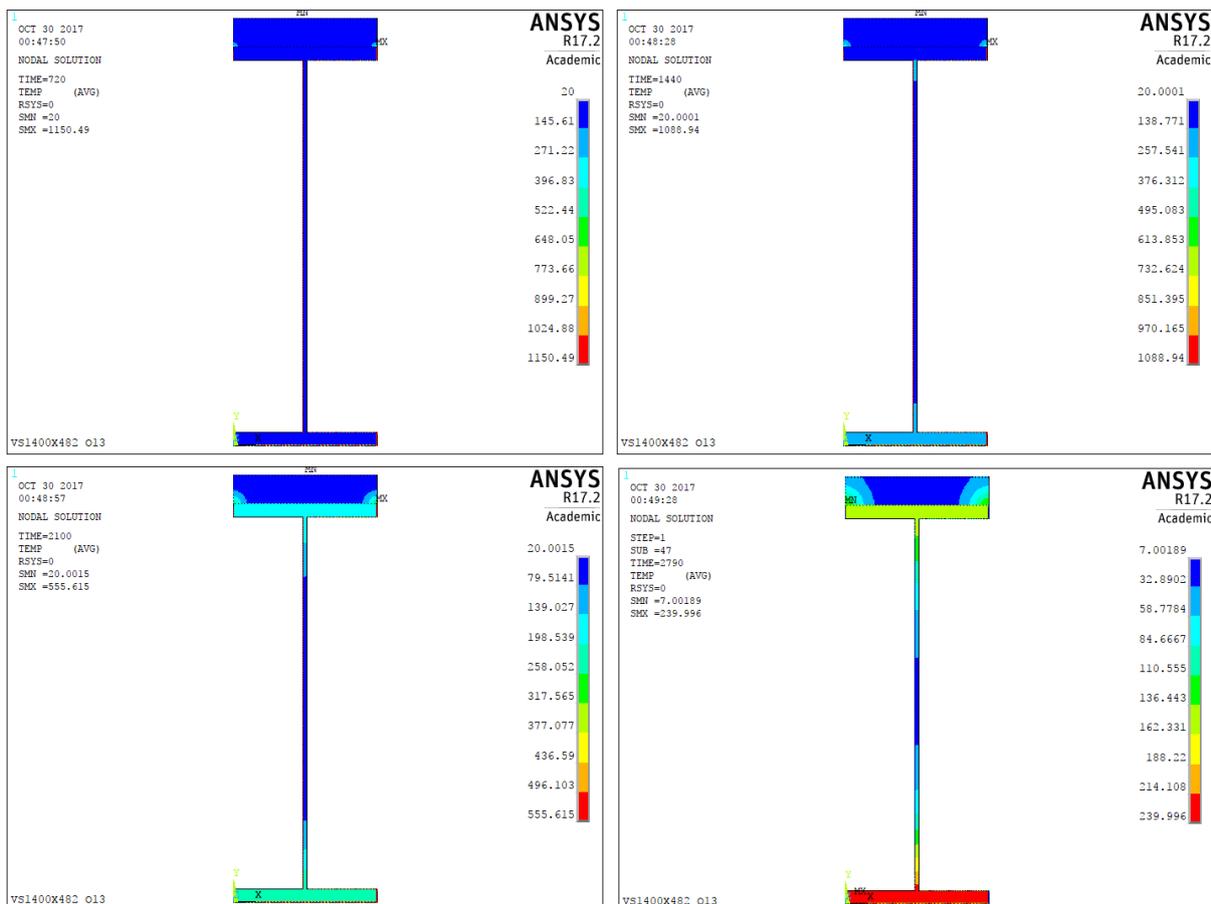
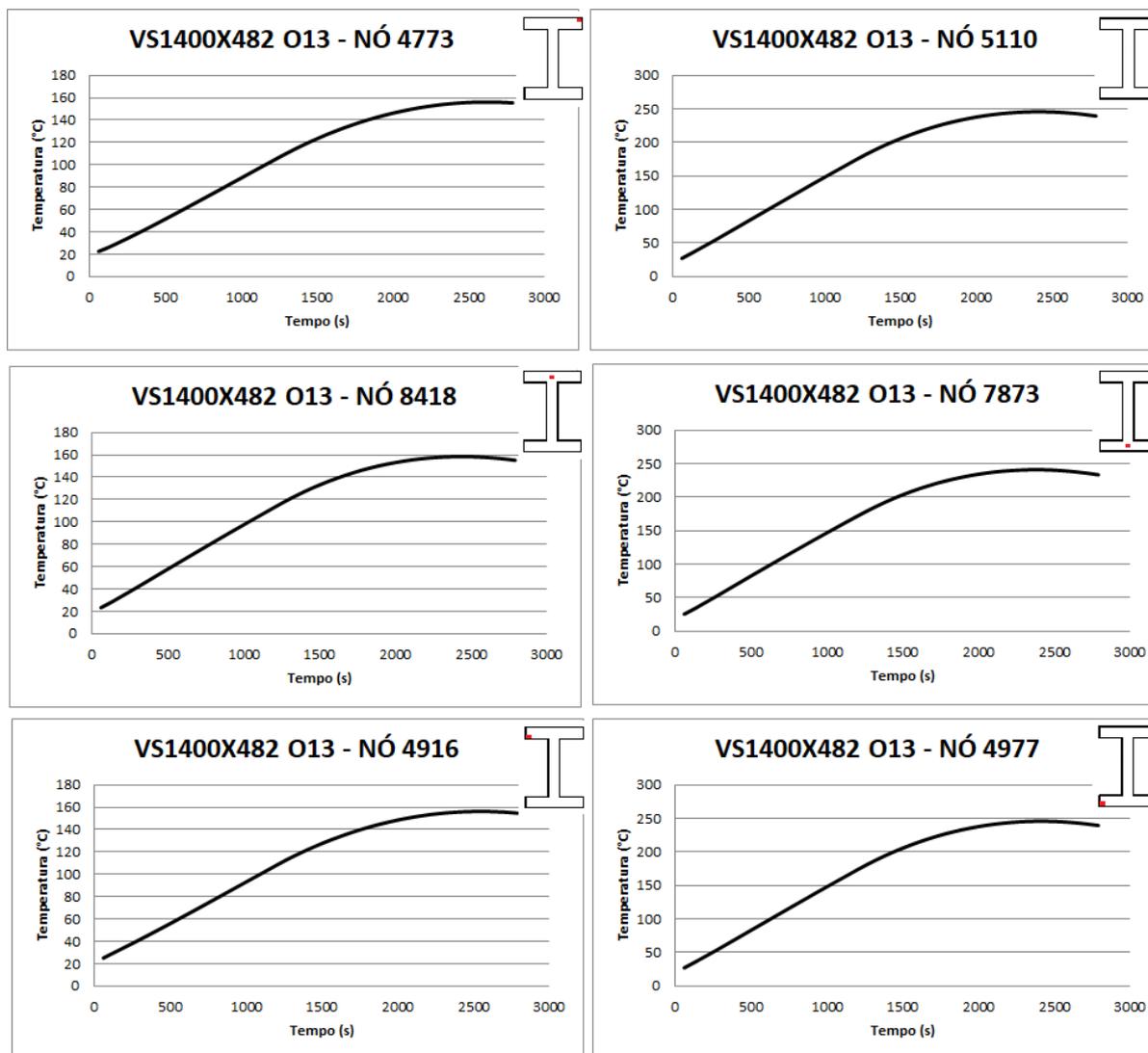


Figura 4.33 Evolução térmica - VS1400X482 O13

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 4773, 4916, 4977, 5110, 7873 e 8418 foram traçados.



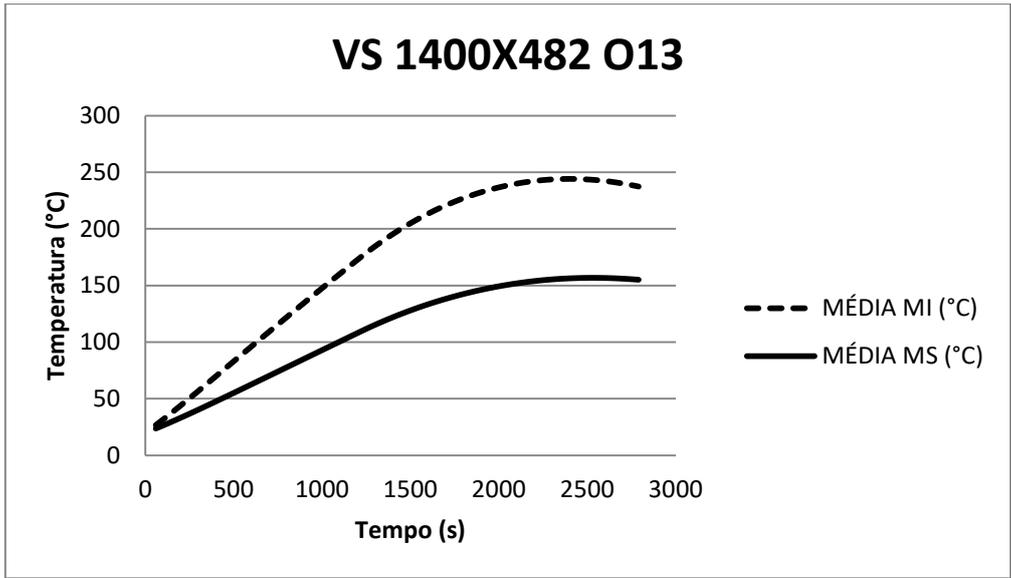
**Figura 4.34 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.8 Temperaturas máximas - VS1400X482 O13**

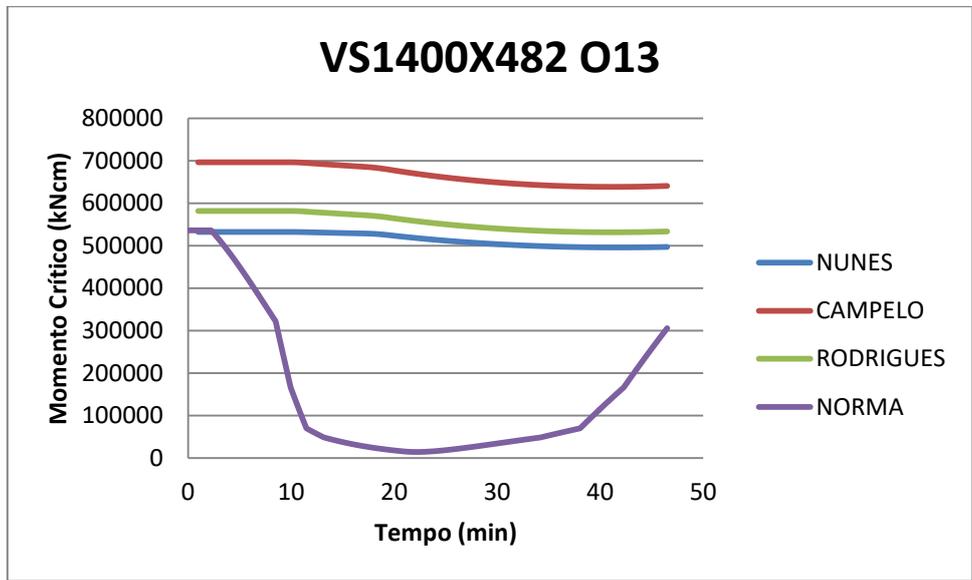
Elemento	4773	8418	4916	5110	7873	4977
Temperatura (°C)	156,068	158,383	156,193	245,717	240,866	245,717

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.35** Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O13

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.36** Momento fletor crítico

### 4.3.3. Caso 3 (com alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X481, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

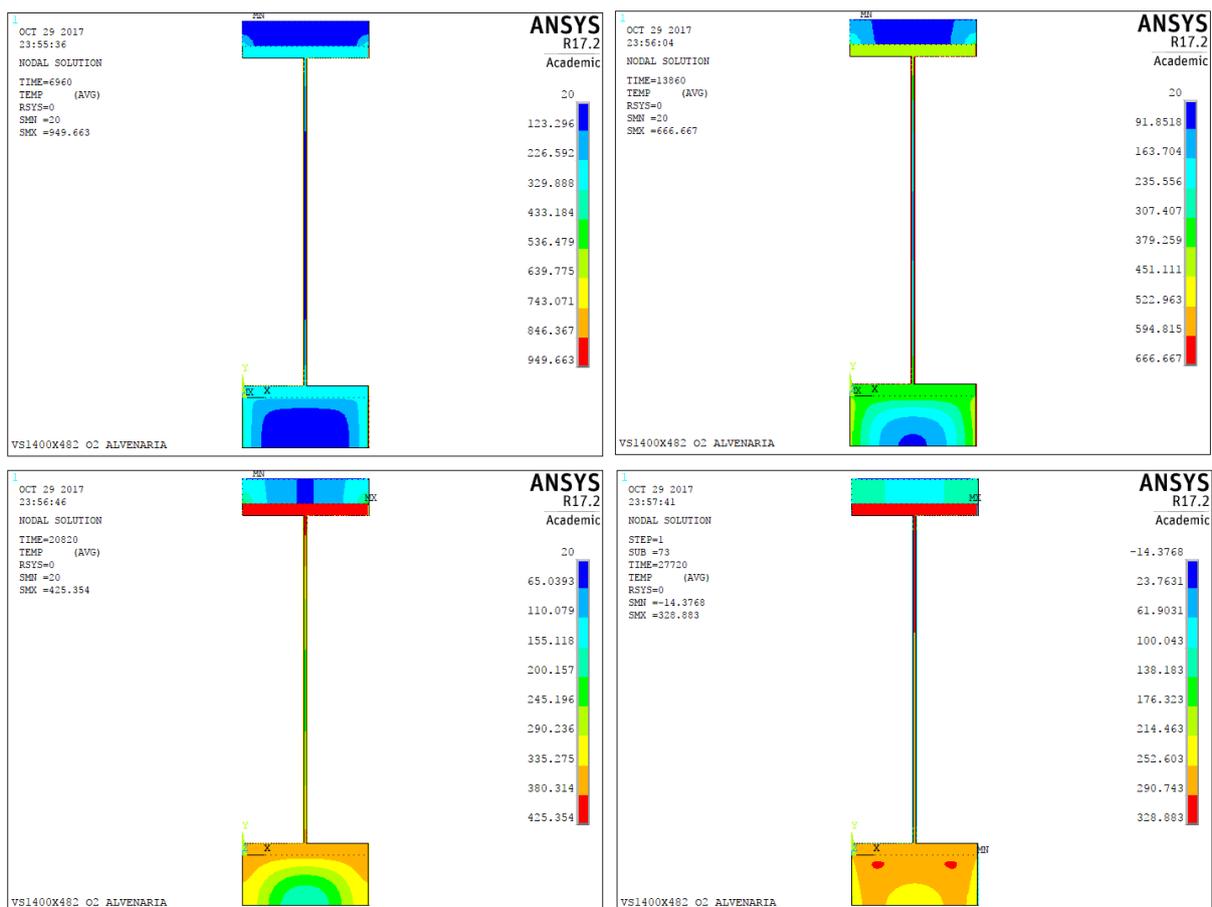
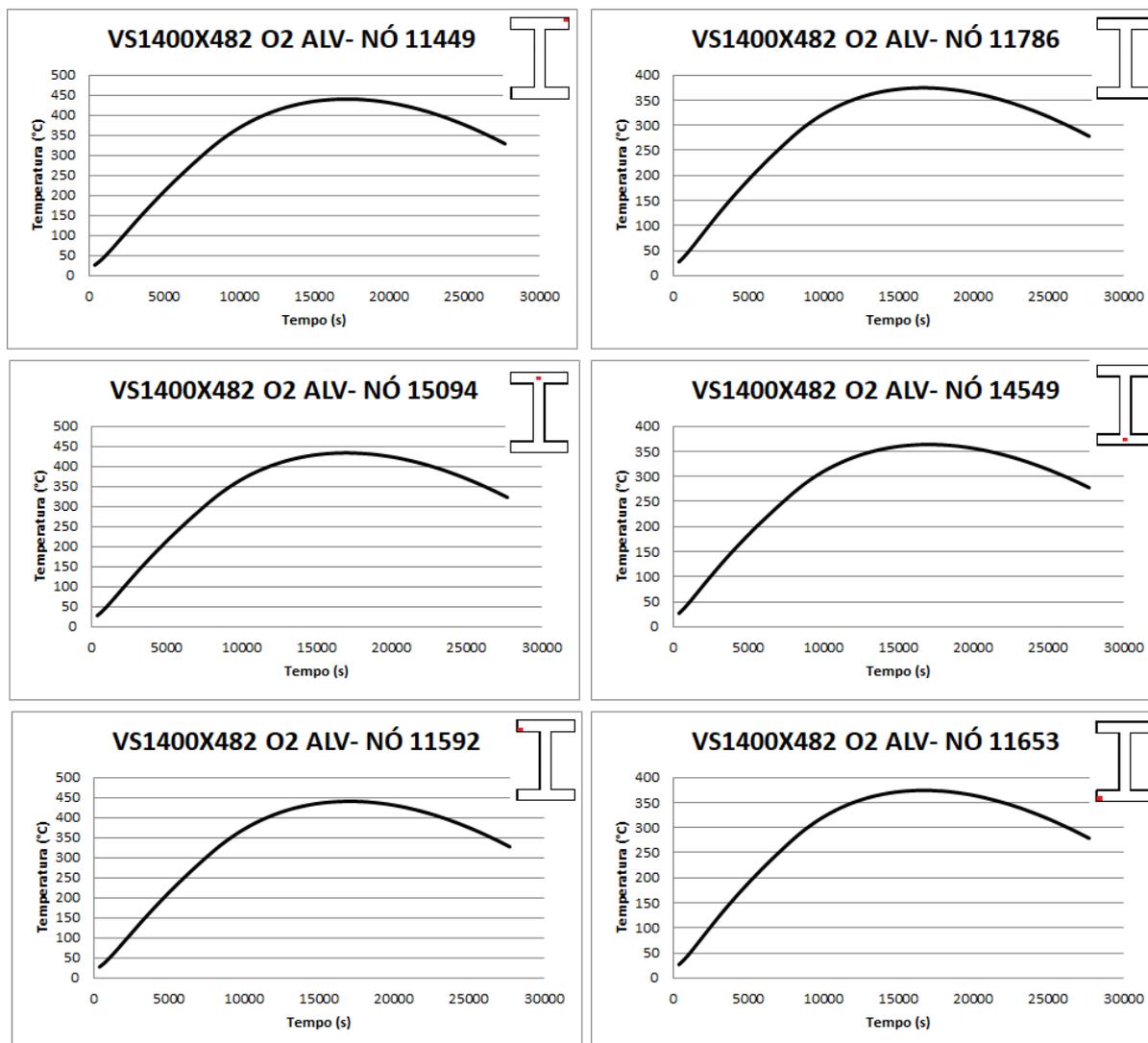


Figura 4.37 Evolução térmica - VS1400X482 O2 ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 11449, 11592, 11653, 11786, 14549 e 15094 foram traçados.



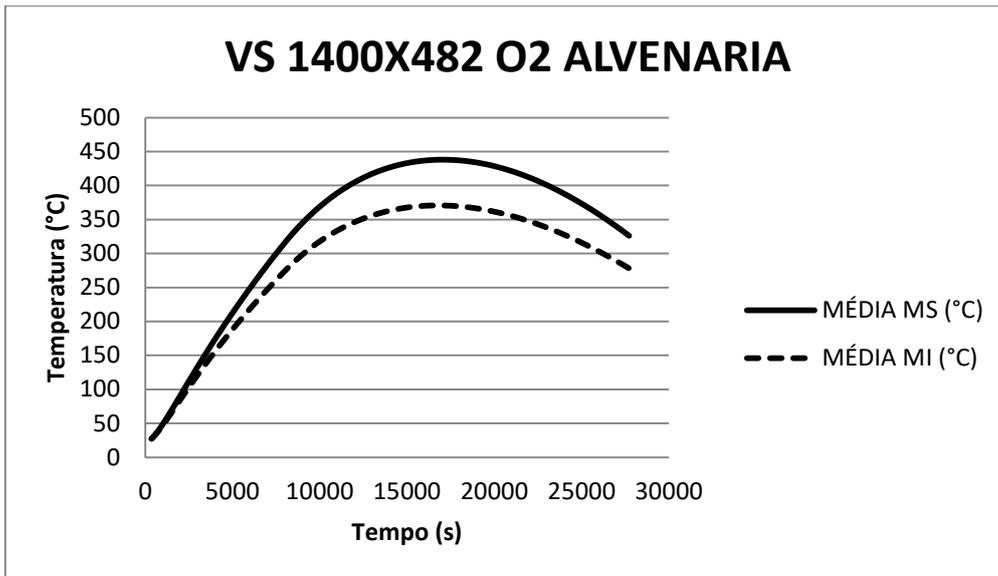
**Figura 4.38 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O2 ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.9 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2 ALVENARIA**

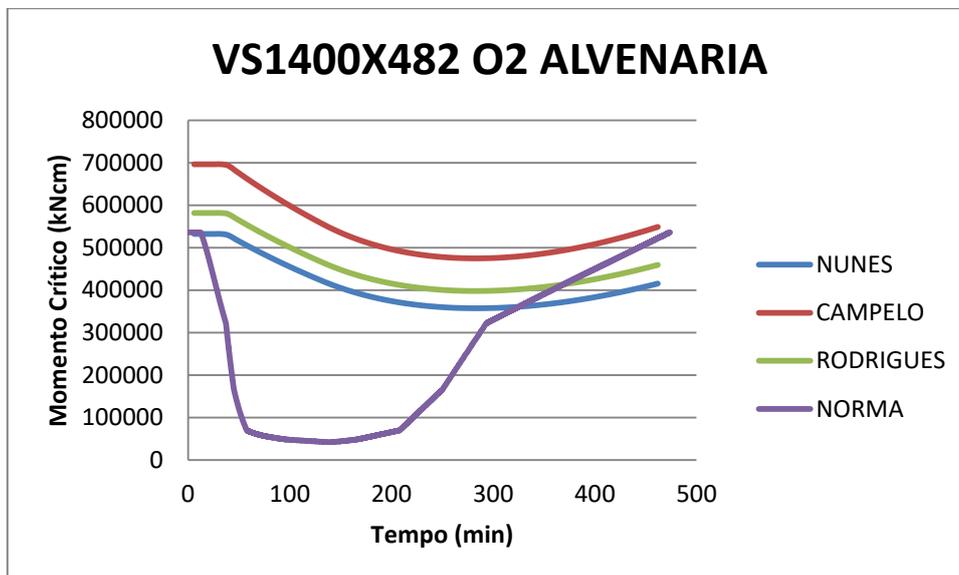
Elemento	11449	15094	11592	11786	14549	11653
Temperatura (°C)	440,183	433,506	440,43	374,56	363,612	374,233

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.39** Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O2 ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.40** Momento fletor crítico

#### 4.3.4. Caso 4 (com alvenaria): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X482, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

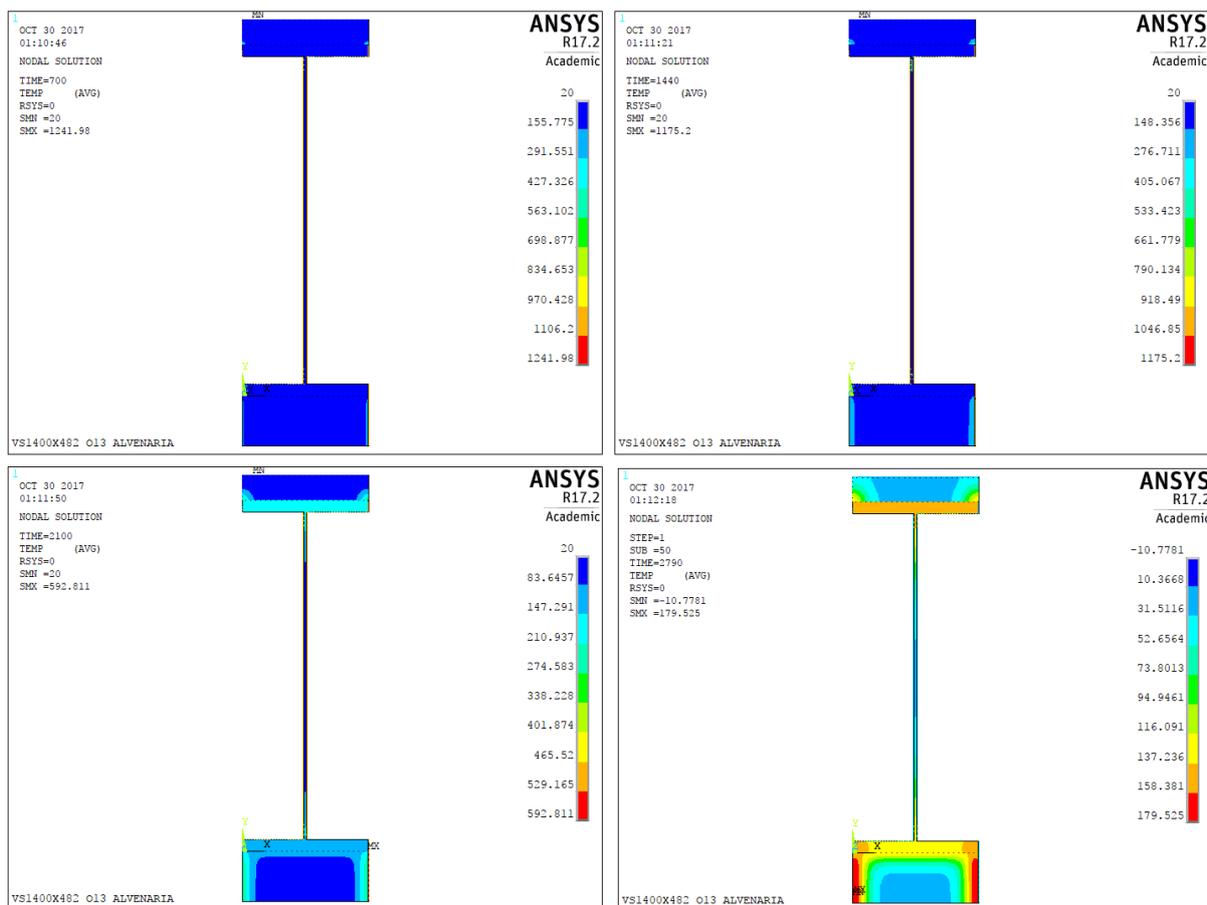
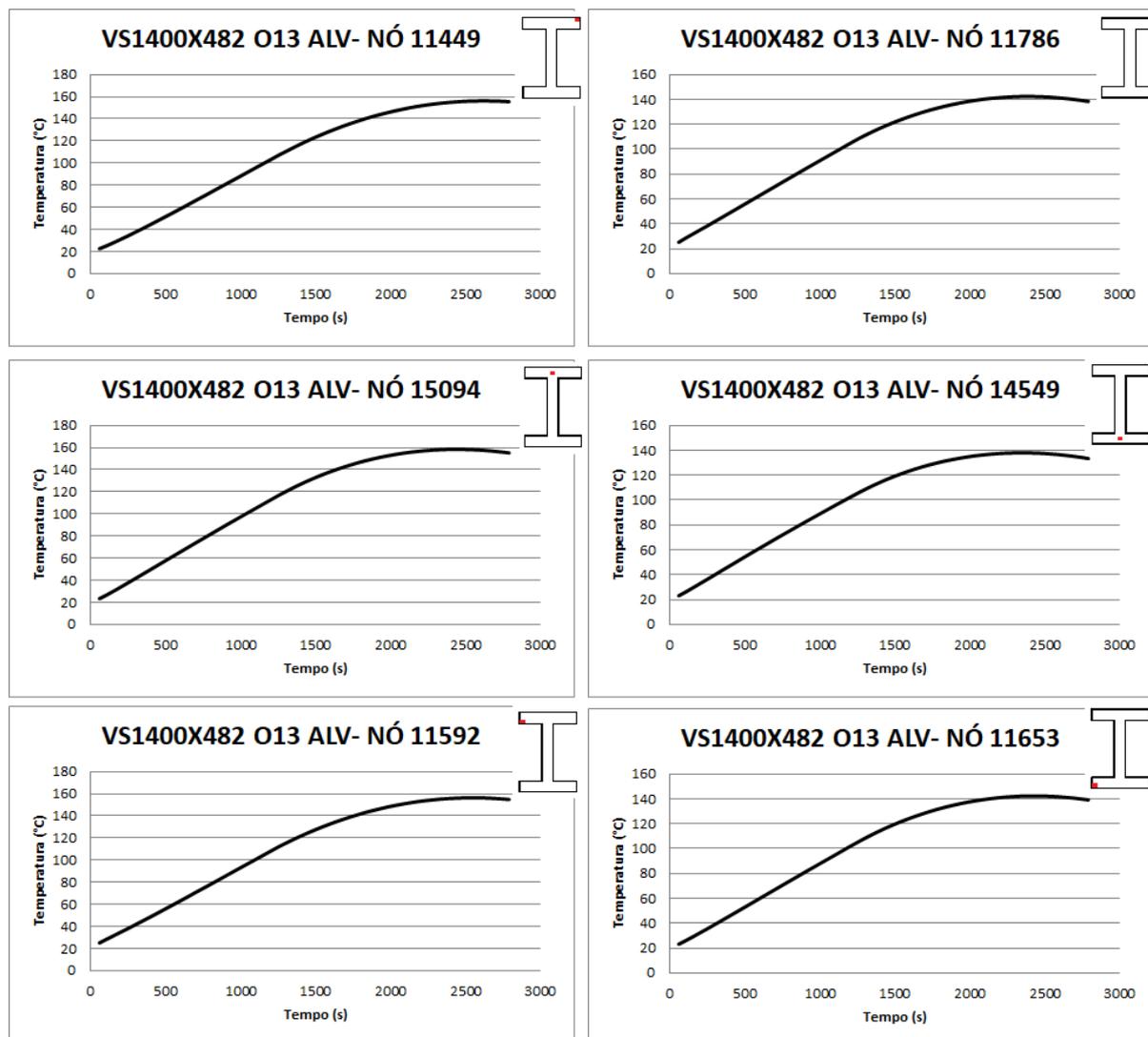


Figura 4.41 Evolução térmica - VS1400X482 O13 ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 11449, 11592, 11653, 11786, 14549 e 15094 foram traçados.



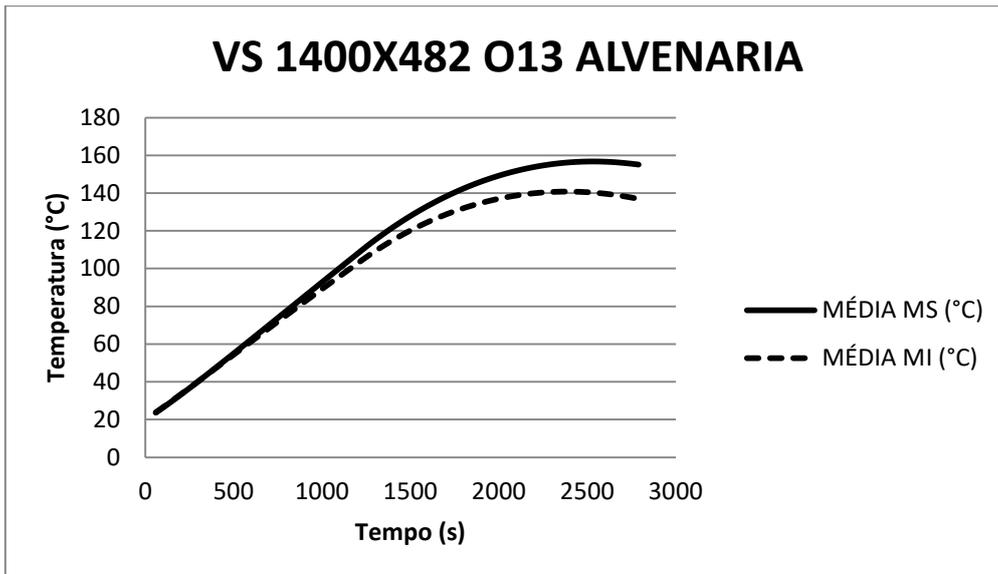
**Figura 4.42 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13 ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.10 Temperaturas máximas -VS1400X482 O13 ALVENARIA**

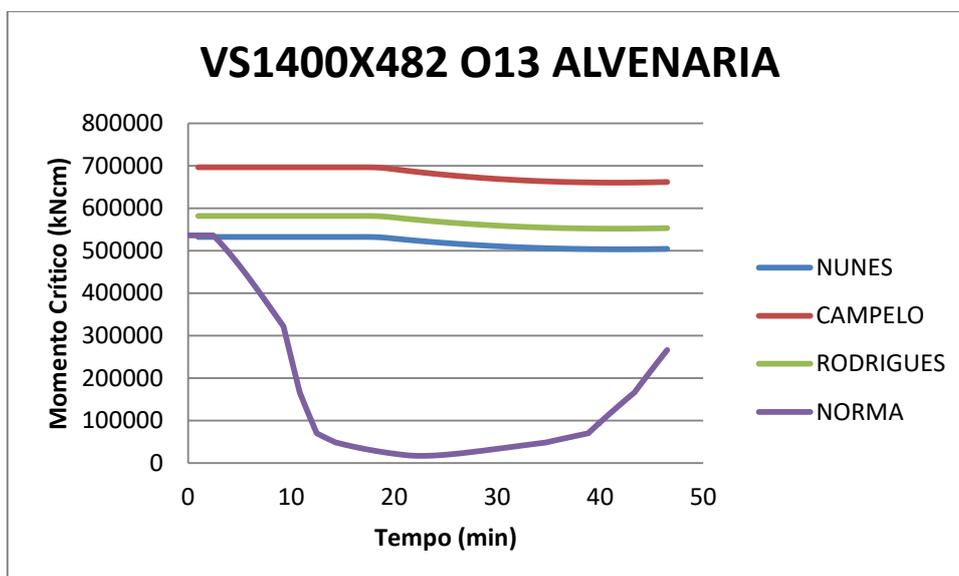
Elemento	11449	15094	11592	11786	14549	11653
Temperatura (°C)	156,128	158,319	156,241	142,309	137,921	142,261

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.43** Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400x482 O13 ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.44** Momento fletor crítico

#### 4.3.5. Caso 5 (com alvenaria e incêndio lateral): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X481, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,02 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 27720 segundos (462 minutos ou 7,7 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 360 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 300 segundos e o maior valor, 400 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 6960 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 13860 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 20820 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 27720 s.

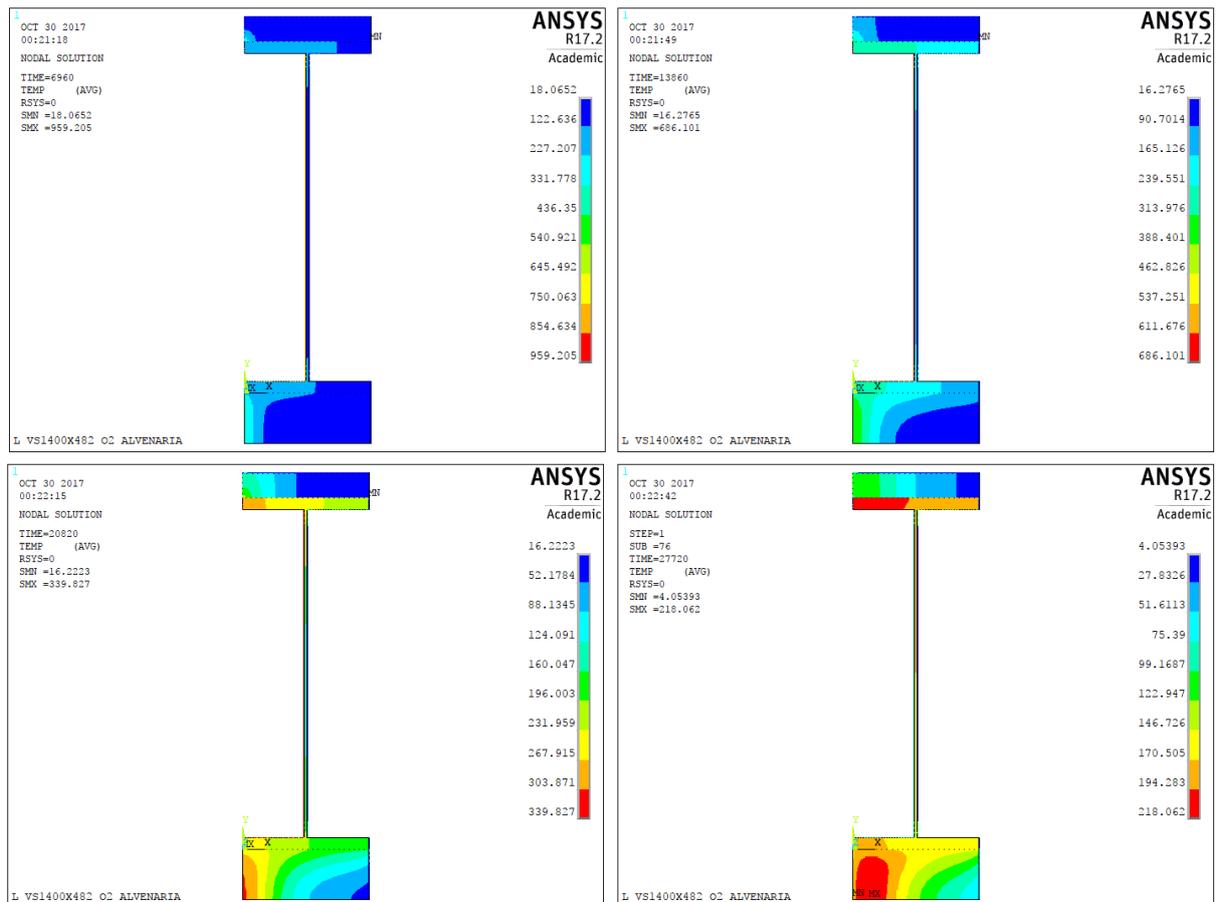
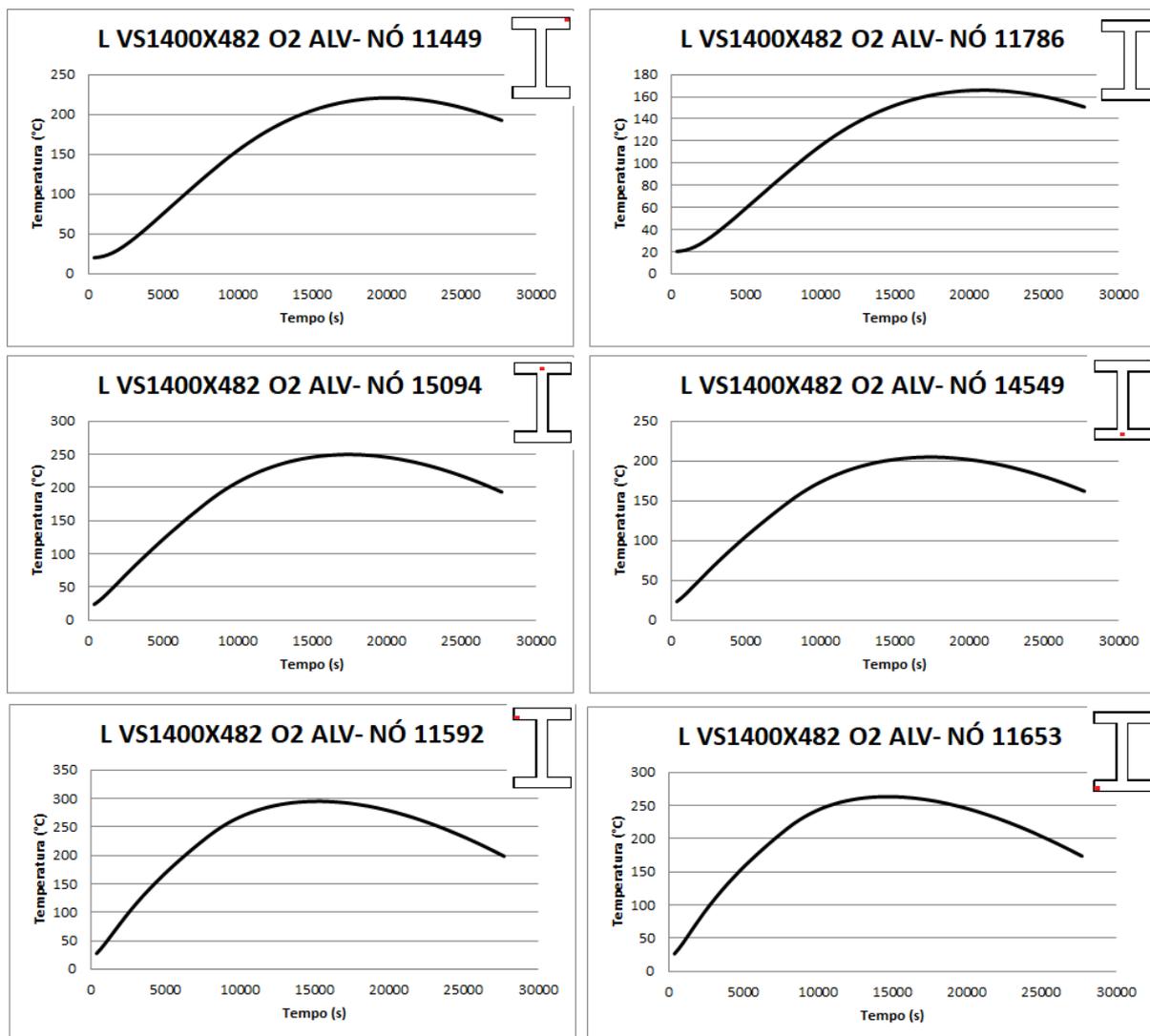


Figura 4.45 Evolução térmica - VS 1400X482 O2 L ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 11449, 11592, 11653, 11786, 14549 e 15094 foram traçados.



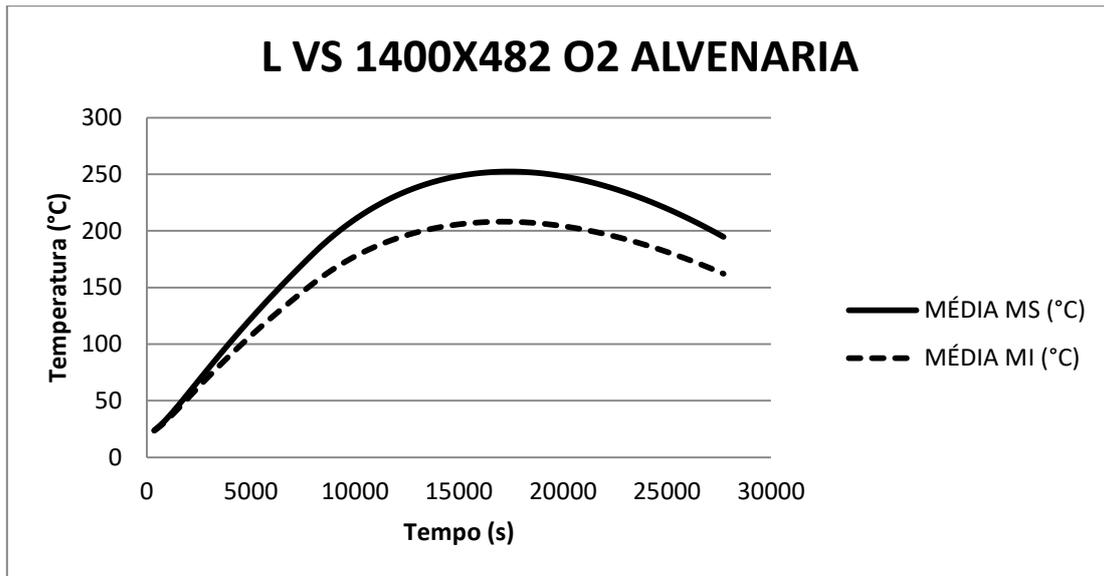
**Figura 4.46 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS 1400X482 O2 L ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.11 Temperaturas máximas - VS1400X482 O2 L ALVENARIA**

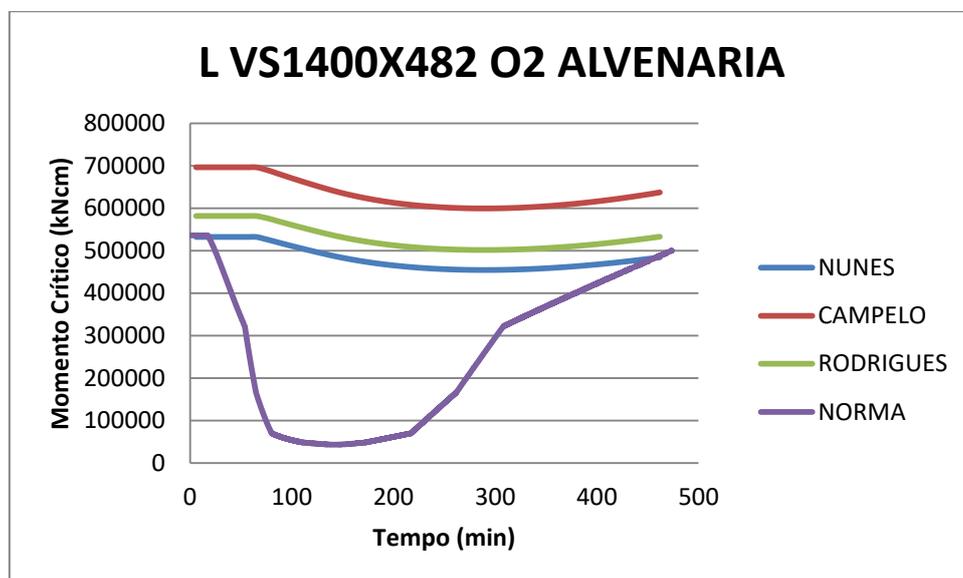
Elemento	11449	15094	11592	11786	14549	11653
Temperatura (°C)	220,776	249,583	294,76	165,896	204,779	263,252

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.47** Temperaturas médias das mesas dos perfis VS1400X482 O2 L ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.48** Momento fletor crítico

#### 4.3.6. Caso 6 (com alvenaria e incêndio lateral): $q_{fd} = 756 \text{ MJ/m}^2$ e $O = 0,13 \text{ m}^{1/2}$

Uma viga, cujo perfil é VS 1400X482, foi submetida a um incêndio, onde a carga específica de incêndio é de  $756 \text{ MJ/m}^2$ , o grau de ventilação é de  $0,13 \text{ m}^{1/2}$  e a duração do evento é de 2790 segundos (46,5 minutos ou 0,775 horas). A curva de evolução do incêndio supracitado está representada na figura 4.2 deste trabalho. Além disso, a duração da simulação computacional gerada no programa ANSYS foi dividida em passos de 60 segundos, sendo que o mínimo valor permitido para o passo foi de 50 segundos e o maior valor, 70 segundos.

A figura abaixo traz a evolução da temperatura na seção transversal do perfil analisado no decorrer do incêndio descrito. A imagem superior à esquerda representa a simulação no instante 720 s, a imagem superior à direita representa a simulação no instante 1440 s, a imagem inferior à esquerda representa a simulação no instante 2100 s e a imagem inferior à direita representa a simulação no instante 2790 s.

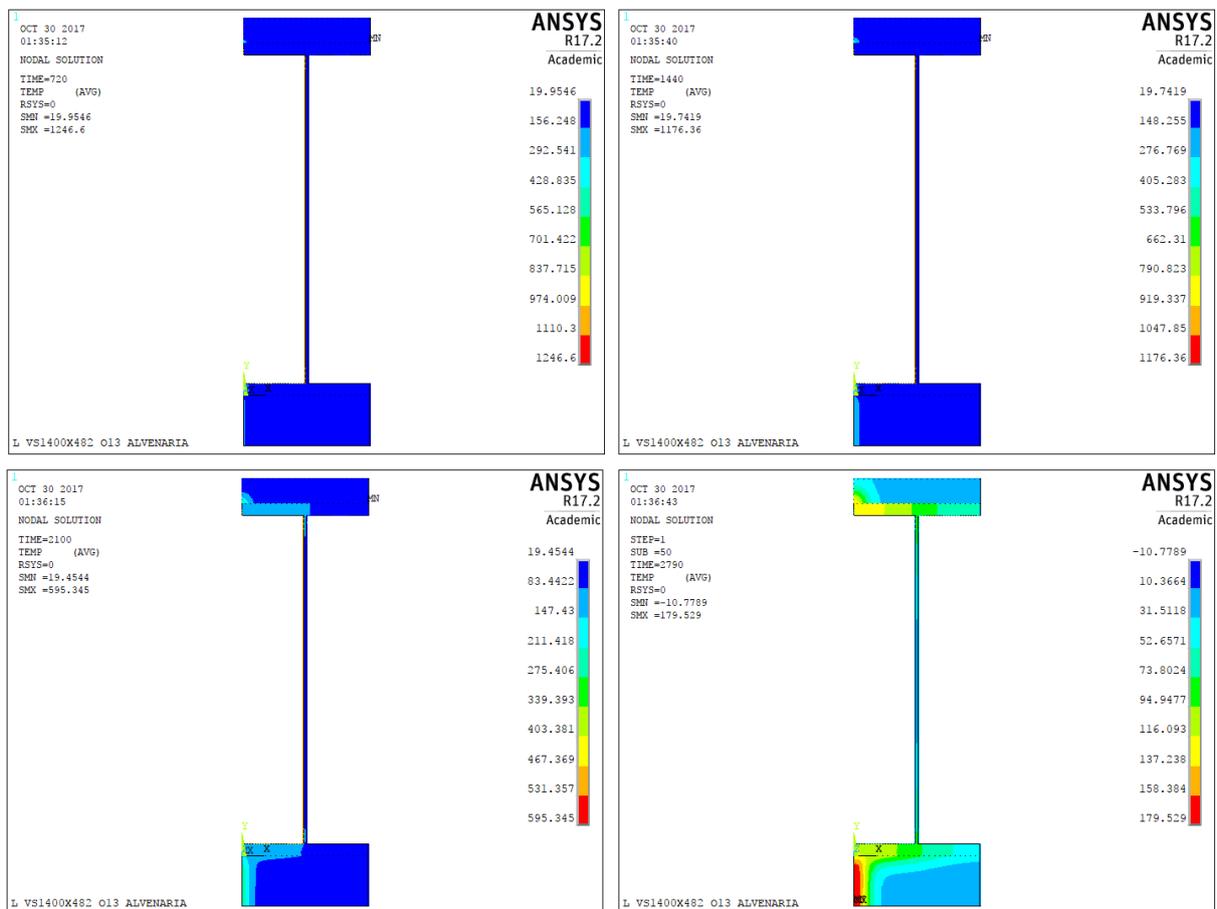
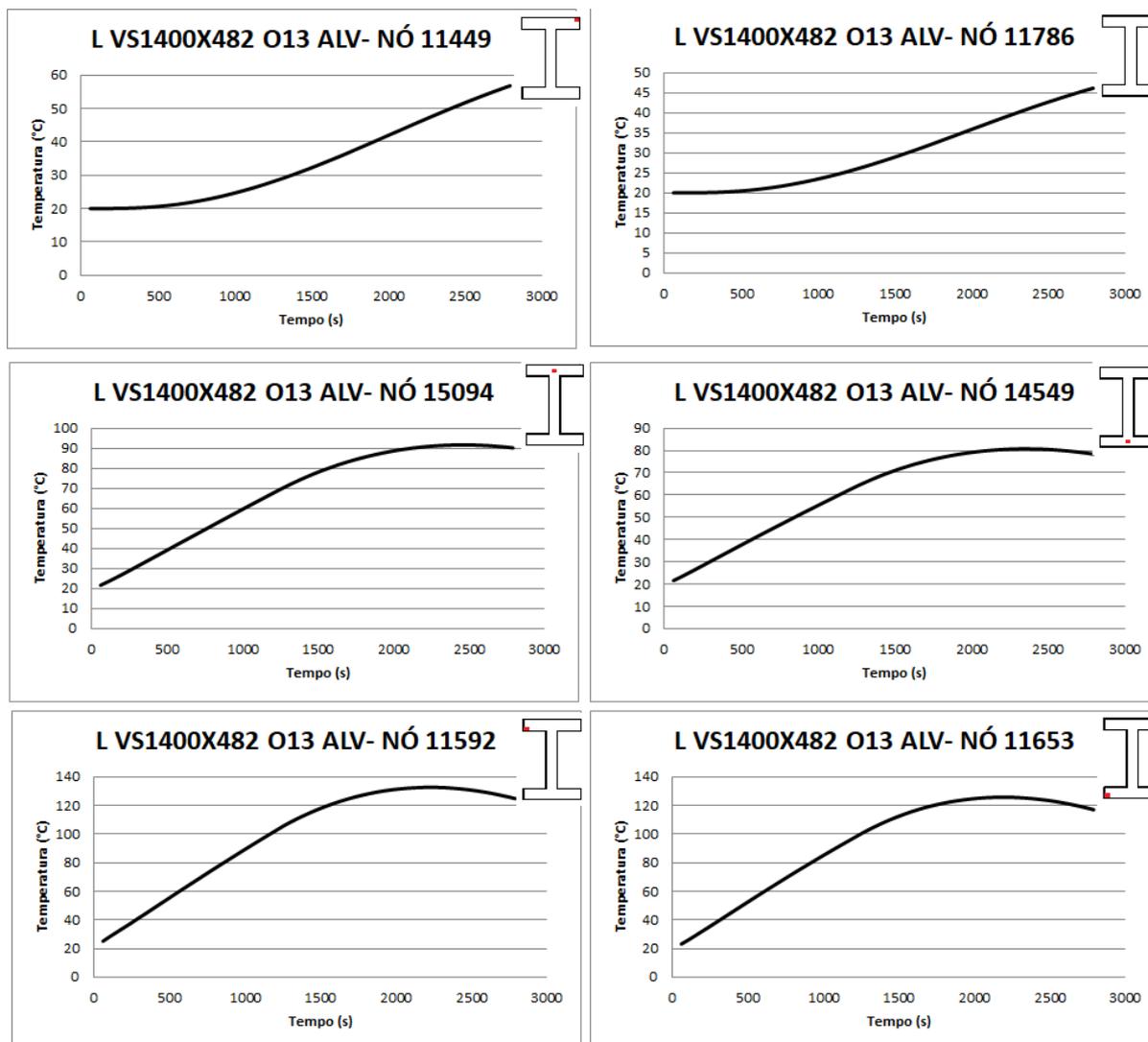


Figura 4.49 Evolução térmica - VS1400X482 O13 L ALVENARIA

Em seguida, os gráficos do desenvolvimento das temperaturas no decorrer do incêndio para os nós 11449, 11592, 11653, 11786, 14549 e 15094 foram traçados.



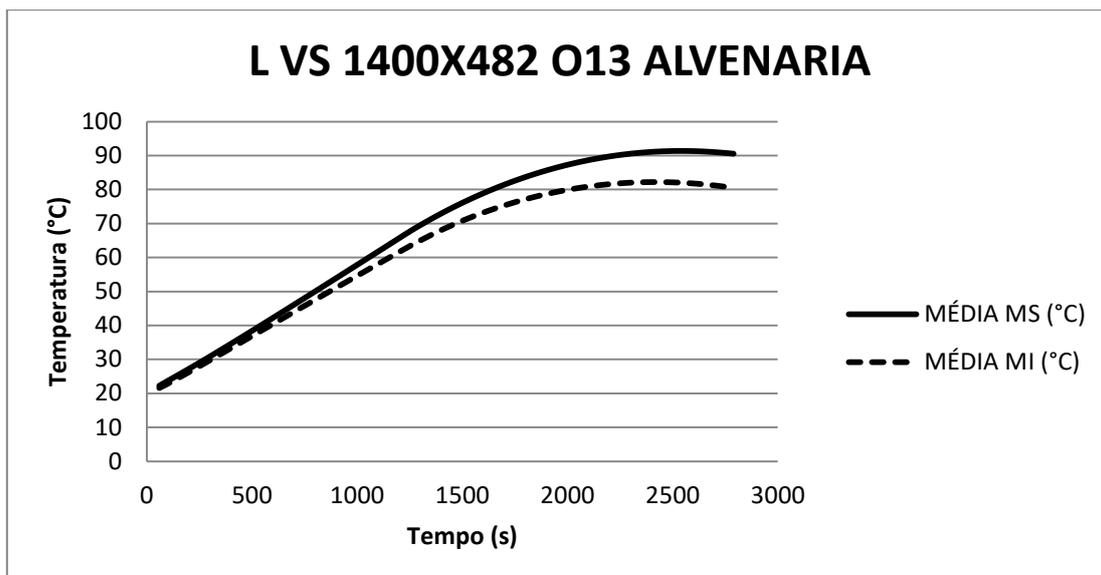
**Figura 4.50 Desenvolvimento da temperatura nos nós - VS1400X482 O13 L ALVENARIA**

Na tabela subsequente, os valores das temperaturas máximas atingidas nos nós supracitados, os quais se encontram presentes nas mesas inferior e superior do perfil, são apresentados.

**Tabela 4.12 Temperaturas máximas - VS1400X482 O13 L ALVENARIA**

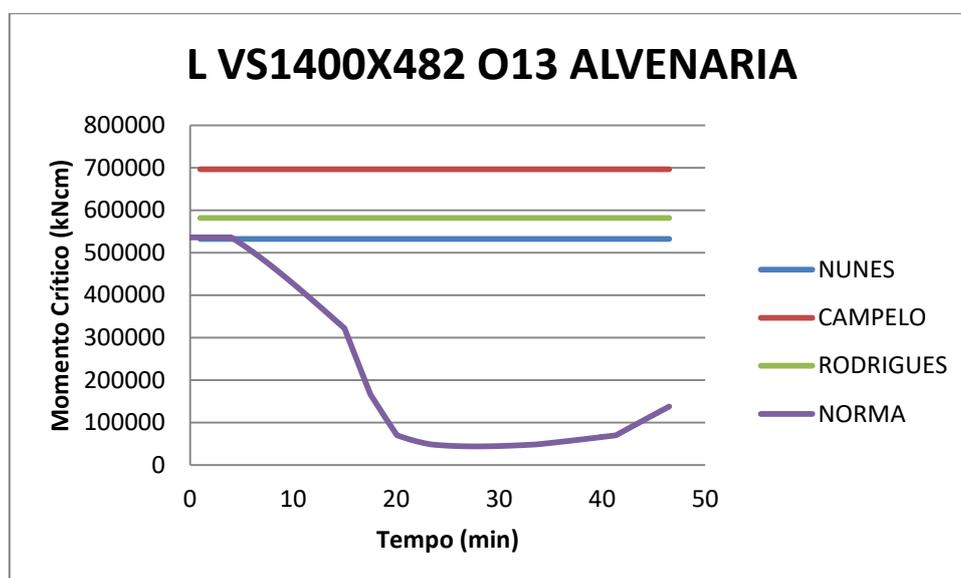
Elemento	11449	15094	11592	11786	14549	11653
Temperatura (°C)	56,7697	91,6597	132,559	46,1347	80,7058	125,649

Conforme mencionado ao longo do trabalho, é necessária a determinação das temperaturas médias das mesas superior e inferior. Assim, foi tomada a média das temperaturas dos três nós presentes em cada mesa para representar a temperatura desta ao longo do tempo. As temperaturas médias das mesas inferior e superior são ilustradas abaixo:



**Figura 4.51** Temperaturas médias das mesas do perfil VS1400X482 O13 L ALVENARIA

Uma vez que as temperaturas das mesas do perfil são estabelecidas, aplicam-se as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para se determinar os momentos críticos para suas respectivas cargas. E por fim, esses valores são comparados com a metodologia proposta pela norma NBR 14323:2013.



**Figura 4.52** Momento fletor crítico

#### 4.4. COMPARAÇÕES ENTRE AS REDUÇÕES PERCENTUAIS NO VALOR DE MOMENTO CRÍTICO

Os resultados apresentados nos itens 4.2 e 4.3 ilustram a variação do momento fletor crítico em função do tempo para os casos estudados. Também é possível analisar esta progressão em termos percentuais. Assim, o valor de momento fletor crítico adotado como parâmetro base para cada caso estudado é calculado para temperatura ambiente de 20 °C.

$$P_{\%} = 1 - \frac{M_{cr,t}}{M_{cr,0}} \quad (4.11)$$

Sendo que,  $M_{cr,t}$  é o momento fletor crítico no tempo analisado e  $M_{cr,0}$  é o momento fletor crítico no tempo inicial.

Uma vez que os gráficos de redução percentual dos valores de momento crítico em função do tempo para as formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) são traçados, nota-se que o comportamento entre eles é praticamente igual. Conforme ilustrado nas figuras presentes neste item. Além disso, esses gráficos são comparados com a metodologia das normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008 nas figuras 4.53 a 4.58.

A tendência de decaimento da capacidade resistente do perfil VS450X51, com a presença de laje no topo, determinado segundo as NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008 se assemelha a simulação para este perfil nessa mesma condição. Vale ressaltar que esta é a situação estudada mais desfavorável, dado que se trata do perfil com menor fator de massividade e mais exposto às chamas.

Por outro lado, conforme o perfil metálico apresenta maior fator de massividade e se encontra menos exposto às chamas, maior é o distanciamento entre os valores obtidos segundo as normas técnicas e os valores determinados pelos métodos de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013). Este fato retrata o caráter conservador dos métodos sugeridos pelas normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008.

Por fim, os máximos valores obtidos por todos os métodos estudados para a redução de momento fletor até 30 minutos e 120 minutos após o início do incêndio são comparados na tabela 4.13. Esses dois marcos temporais selecionados representam os tempos mínimo e máximo, respectivamente, de resistência ao fogo para edificações que contém escritórios. Esses valores se encontram na norma NBR 14432:2001.

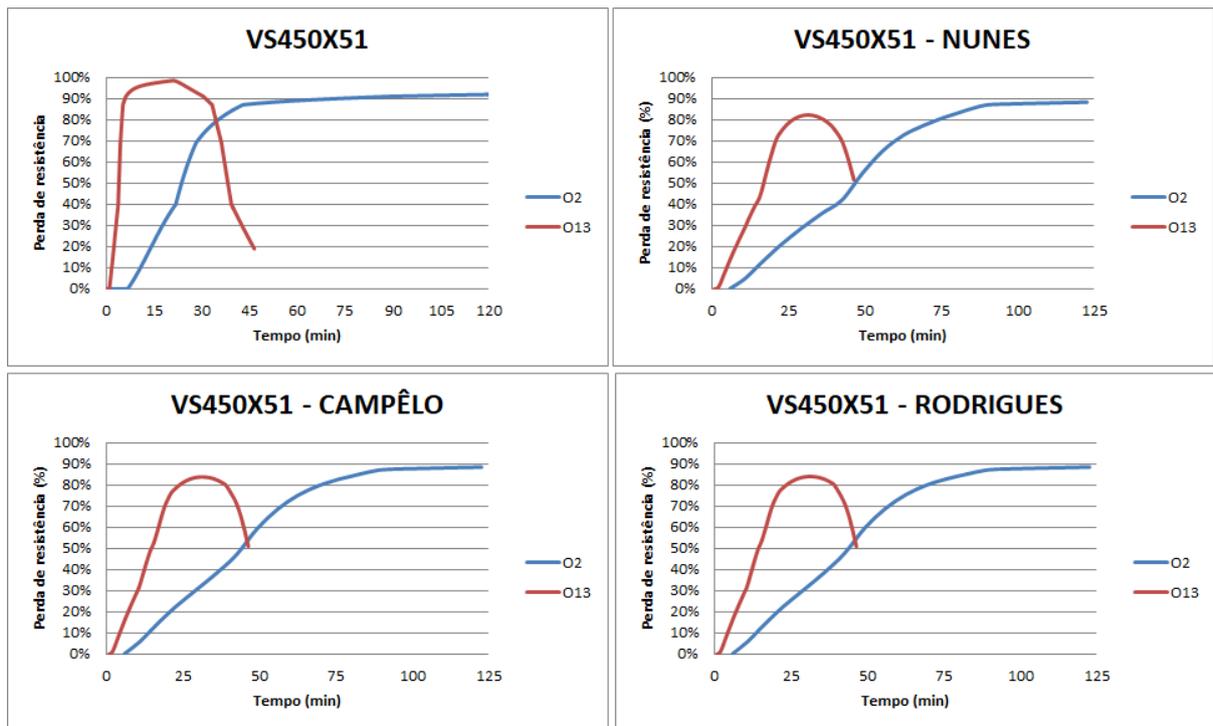


Figura 4.53 Perda de resistência ao longo do tempo - VS450X51

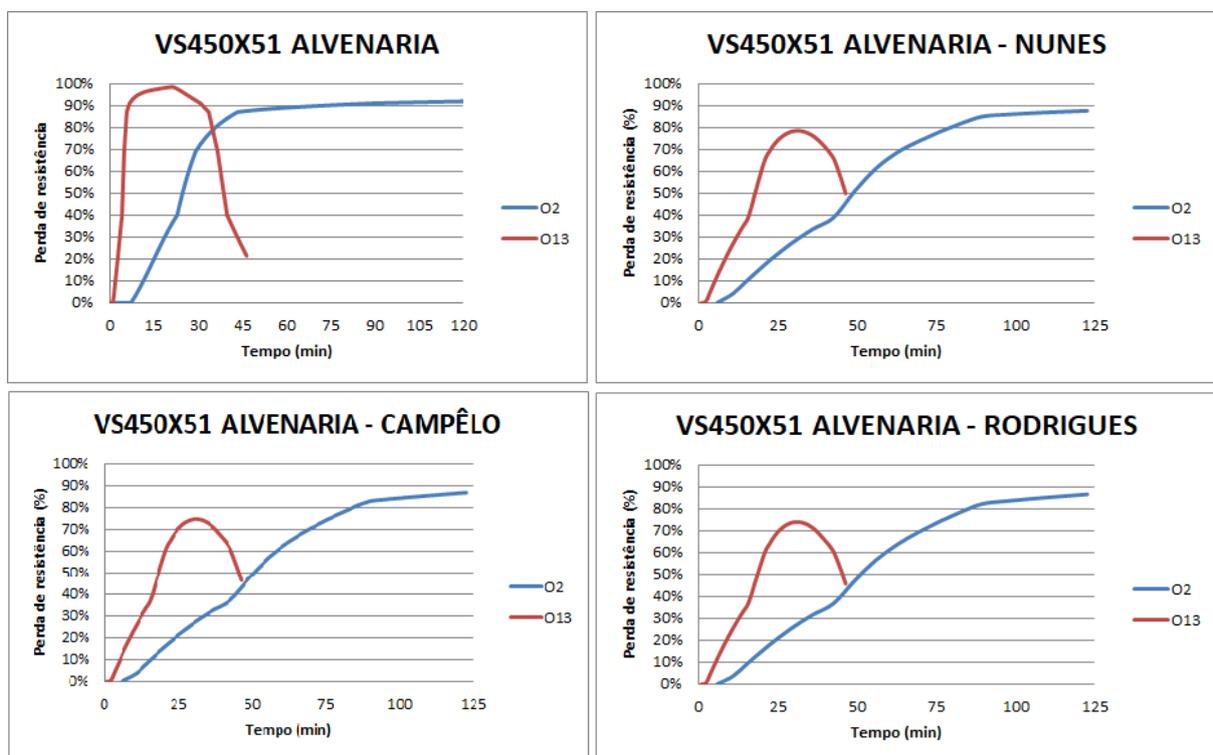


Figura 4.54 Perda de resistência ao longo do tempo - VS450X51 ALVENARIA

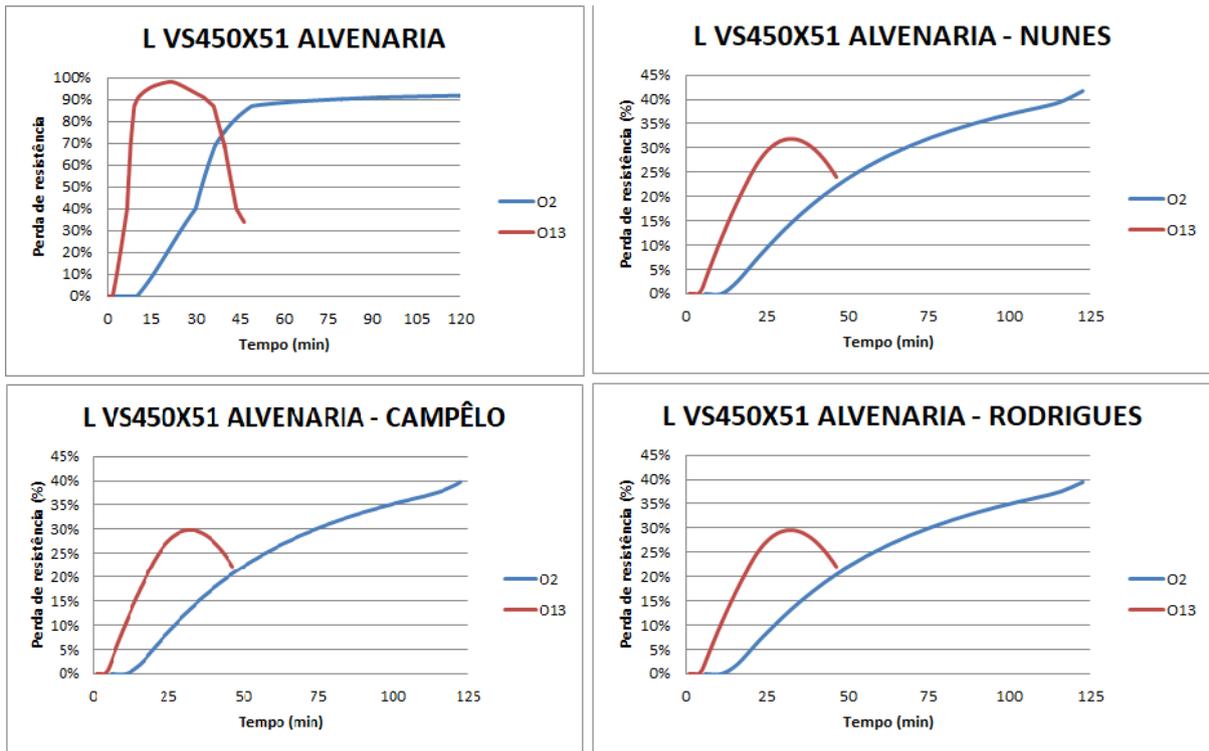


Figura 4.55 Perda de resistência ao longo do tempo - L VS450X51 ALVENARIA

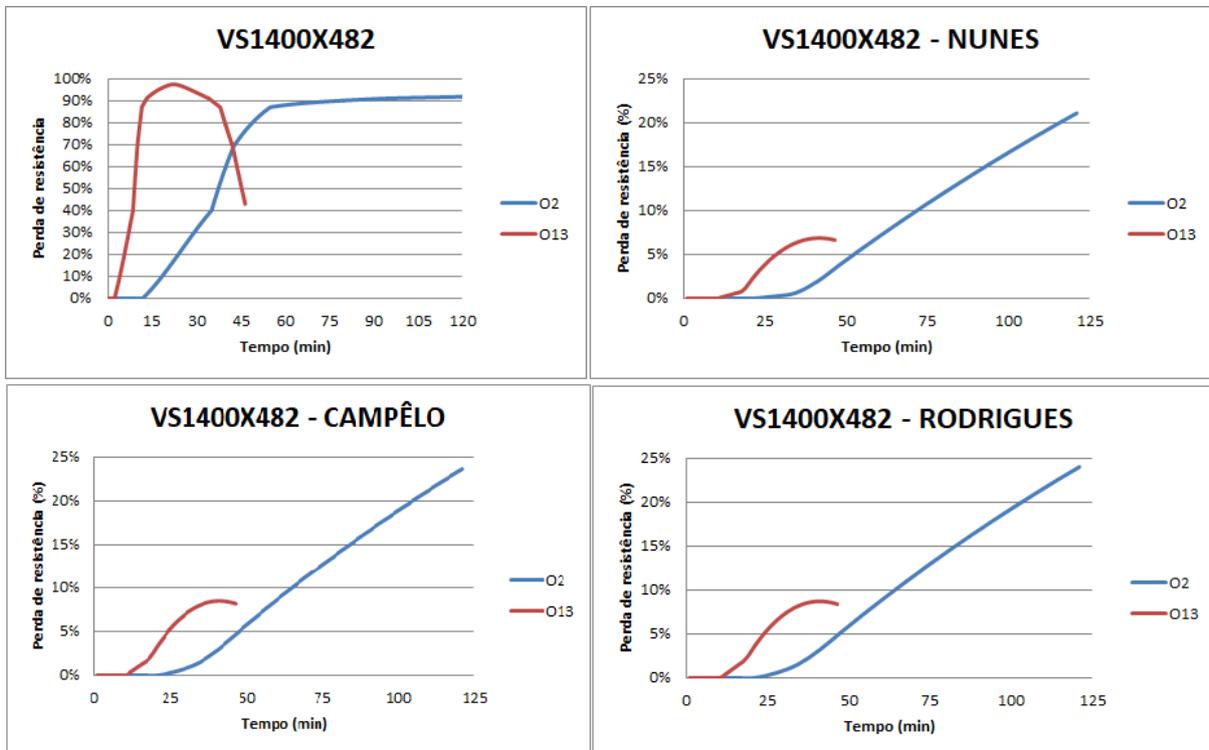


Figura 4.56 Perda de resistência ao longo do tempo - VS1400X482

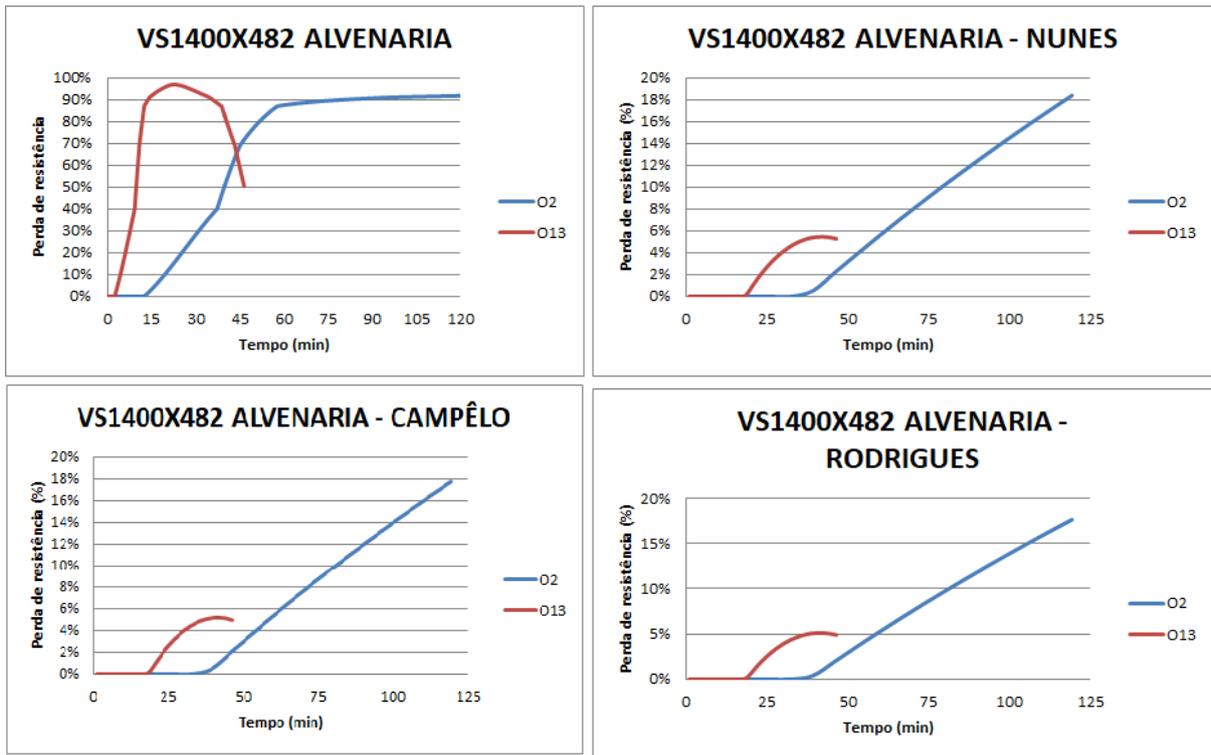


Figura 4.57 Perda de resistência ao longo do tempo - VS1400X482 ALVENARIA

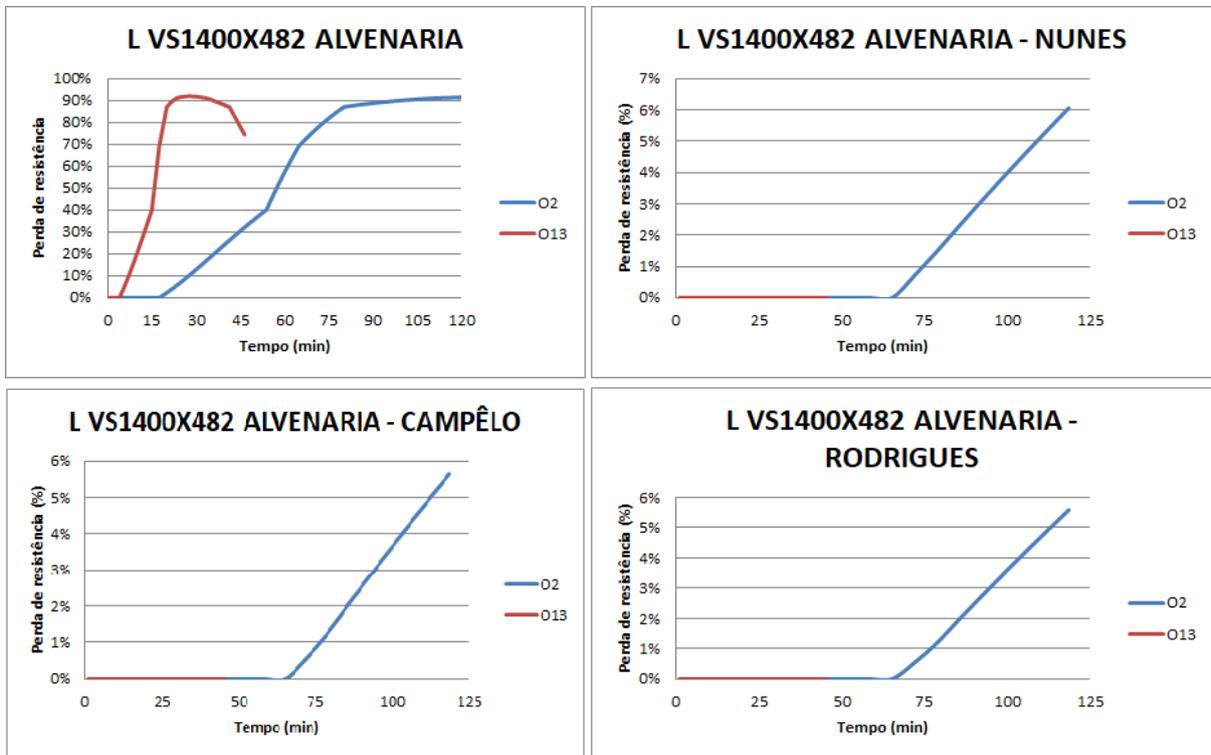


Figura 4.58 Perda de resistência ao longo do tempo - L VS1400X482 ALVENARIA

**Tabela 4.13 Perdas percentuais de capacidade resistente para TRRF de 30 min e 120 min**

TRRF		30 min			120 min			30 min		120 min	
FORMULAÇÃO		NUNES	CAMPELO	RODRIGUES	NUNES	CAMPELO	RODRIGUES	MÁXIMO	NORMA	MÁXIMO	NORMA
VS450X51	O2	28,64%	30,24%	30,47%	88,25%	88,41%	88,44%	30,47%	72,44%	88,44%	91,87%
	O13	82,01%	83,66%	83,88%	82,21%	83,79%	84,00%	83,88%	91,44%	84,00%	98,48%
VS450X51 ALV	O2	27,03%	25,57%	25,35%	87,60%	86,70%	86,54%	27,03%	70,69%	87,60%	91,87%
	O13	78,26%	74,52%	73,79%	78,43%	74,67%	73,93%	78,26%	91,66%	78,43%	98,45%
L VS450X51 ALV	O2	12,48%	11,46%	11,30%	41,73%	39,77%	39,46%	12,48%	40,09%	41,73%	91,81%
	O13	31,61%	29,67%	29,36%	31,88%	29,89%	29,57%	31,61%	92,98%	31,88%	98,12%
VS1400X482	O2	0,60%	1,40%	1,52%	21,07%	23,61%	23,99%	1,52%	31,35%	23,99%	91,75%
	O13	5,55%	7,12%	7,36%	6,86%	8,46%	8,71%	7,36%	93,66%	8,71%	97,37%
VS1400X482 ALV	O2	0,00%	0,00%	0,00%	18,38%	17,73%	17,63%	0,00%	28,16%	18,38%	91,73%
	O13	4,22%	4,03%	4,00%	5,45%	5,16%	5,12%	4,22%	93,81%	5,45%	96,90%
L VS1400X482 ALV	O2	0,00%	0,00%	0,00%	6,77%	6,34%	6,27%	0,00%	12,78%	6,77%	91,38%
	O13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	91,70%	0,00%	91,86%

#### 4.5. METODOLOGIA PARA AJUSTE DAS FORMULAÇÕES PROPOSTAS

As formulações para o cálculo do momento fletor crítico de vigas metálicas em perfil I propostas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008), RODRIGUES (2013) e as normas técnicas brasileiras são complexas, uma vez que diversas variáveis as compõem. Uma possível alternativa para se desenvolver uma metodologia mais simples seria o emprego das curvas de perda de resistência traçadas no item 4.4 deste trabalho, dado que estas curvas podem se mostrar independentes com a variação de algum parâmetro. Para que isto seja viável no futuro, deve-se realizar a regressão da curva de perda de resistência em função de alguns parâmetros como a carga de incêndio, o grau de ventilação e o fator de massividade da viga.

Tem-se que a formulação proposta pela NBR 8800:2008, para o cálculo do momento fletor crítico, é diretamente proporcional ao parâmetro  $C_b$ , conforme apresentado na equação 3.52. O valor deste parâmetro depende da distribuição de momento fletor ao longo da viga estudada, conforme apresentado na equação 3.53. Para o caso de uma carga pontual aplicada à viga, o valor de  $C_b$  é igual a 1,316; para o caso de uma carga distribuída aplicada à viga,  $C_b$  é igual a 1,136; e, para o caso de um momento aplicado à viga,  $C_b$  é igual a 1. Assim, espera-se que a sequência dos maiores para os menores valores de momento fletor crítico sigam a seguinte ordem: CAMPÊLO (2008), RODRIGUES (2013) e NUNES (2005).

Para se traçarem curvas segundo o ajuste proposto, adotou-se o valor de momento fletor crítico a temperatura ambiente conforme estabelecido nas normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008. Em seguida, aplicou-se a respectiva curva de perda de momento fletor crítico ao longo do tempo para os três métodos estudados (NUNES, CAMPÊLO e RODRIGUES), conforme exposto nas imagens do item 4.4. Vale ressaltar que estes valores foram novamente comparados com a metodologia determinada pelas normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008. O valor de  $C_b$  adotado para a curva NORMA foi igual a 1. Sendo o caso mais conservador estabelecido nas normas supracitadas e comparável ao método de NUNES (2005).

Conforme destacado no item 4.4, as taxas de redução de momento fletor crítico ao longo do tempo para os métodos de NUNES, CAMPÊLO e RODRIGUES apresentam valores semelhantes, sendo que a máxima dispersão notada atingiu apenas 4,5% para um caso estudado. De forma geral, a dispersão se encontra em torno de 2%. Isto mostra que a interferência do tipo de carregamento influi pouco na redução deste parâmetro. Dado que as metodologias foram desenvolvidas por três autores diferentes, isto reforça que a taxa de

redução do momento fletor crítico é acurada e constitui um bom parâmetro para a análise proposta neste trabalho.

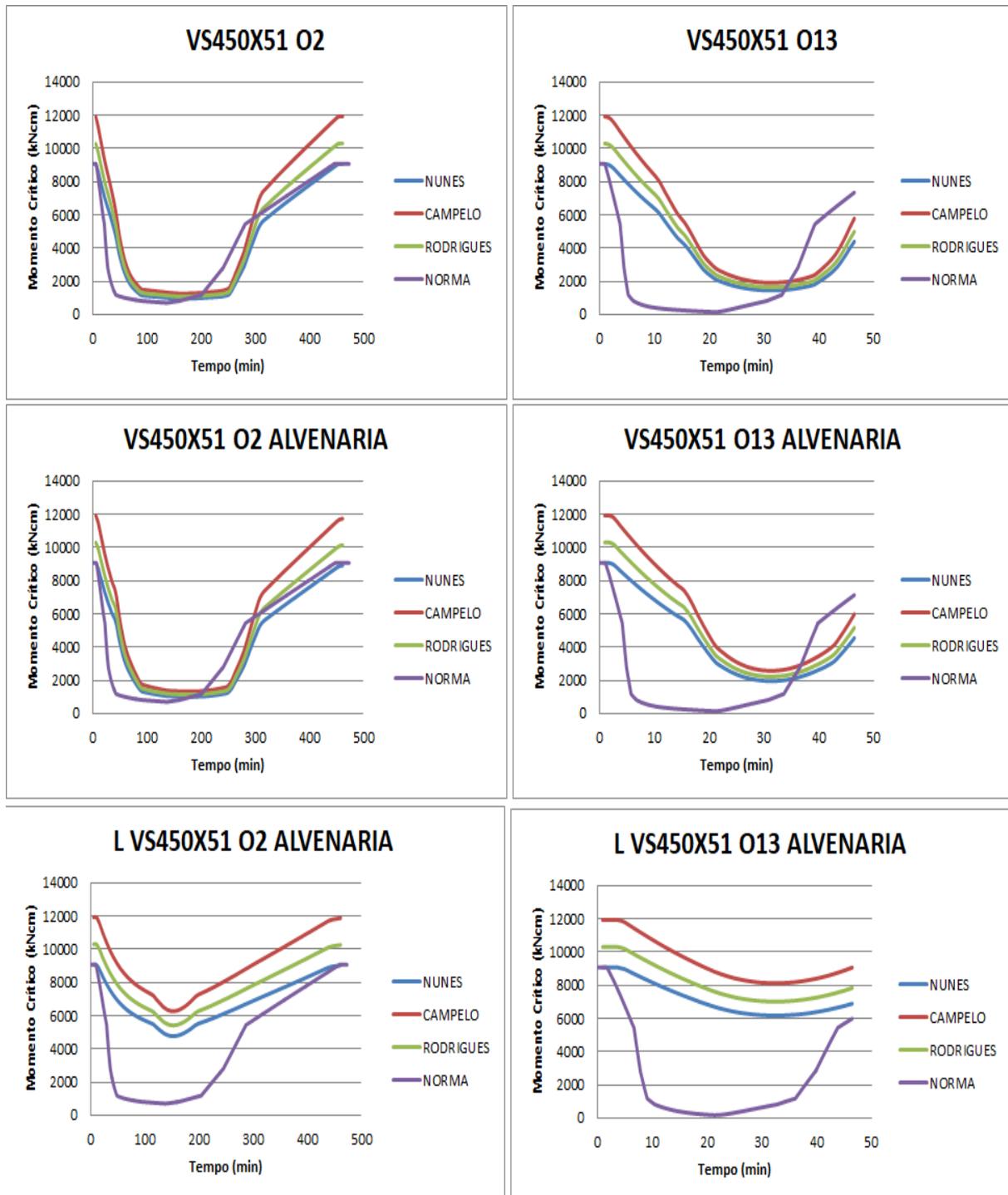


Figura 4.59 Metodologia proposta para o perfil VS450X51

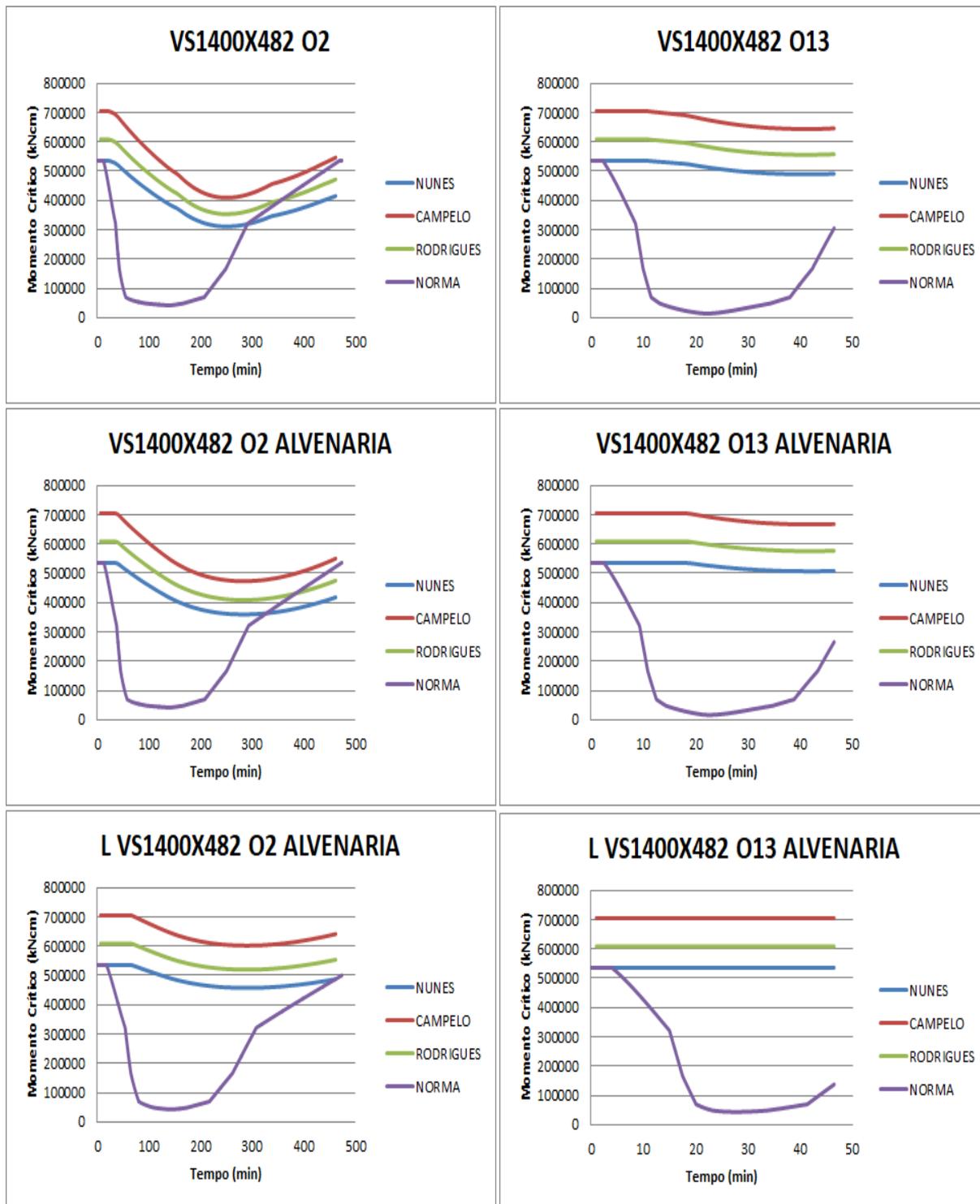


Figura 4.60 Metodologia proposta para o perfil VS1400X482

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso versou sobre a redução do valor de momento fletor crítico para o estado limite último de flambagem lateral com torção de vigas metálicas submetidas à situação de incêndio, uma temática pouco explorada no ambiente acadêmico. Estudos sobre esse e outros estados limite são relevantes para uma melhor compreensão sobre os efeitos nocivos de um incêndio a uma estrutura metálica. Assim, possibilita-se o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de elementos estruturais de forma mais segura e econômica em relação às propostas das normas NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008, as quais são conservadoras.

Atualmente, as edificações estão mais esbeltas e mais altas em comparação com outrora. Consequentemente, o risco de colapso estrutural devido à ocorrência de um incêndio aumenta. No Brasil, nota-se que estruturas metálicas são mais empregadas para edifícios comerciais. Assim sendo, para o desenvolvimento deste trabalho, partiu-se da premissa de ocorrência de incêndios em um escritório, aplicando ventilação máxima e mínima. Além disso, os perfis de viga estudados são os que apresentam maior e menor fator de massividade dentre os perfis listados por Pfeil (2009). Além disso, as mesas das vigas se encontram em diferentes condições de isolamento devido ao contato com um segmento de laje e/ou parede de alvenaria. Consequentemente, existem grandes diferenças de temperaturas ao longo dos perfis analisados, dependendo do caso estudado.

Os trabalhos de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) contribuíram com formulações inéditas sobre o estado limite de flambagem lateral com torção, dado que, para cada formulação, as vigas estão submetidas a diferentes tipos de carregamentos. Neste trabalho, essas formulações foram aplicadas e comparadas com as normas brasileiras. Além disso, os valores obtidos pelas formulações de NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) também foram analisados de forma percentual, conforme a perda de capacidade resistente da viga metálica ao longo do tempo.

Observou-se que os comportamentos percentuais aplicados às três formulações apresentam dispersão de baixa magnitude. Assim, o ajuste proposto se baseia em calcular o momento fletor crítico do perfil a temperatura ambiente, conforme estabelecido pela norma brasileira. Em seguida, aplicou-se a correspondente tendência de degradação de momento fletor crítico para cada método. Uma vez que os métodos foram desenvolvidos por autores diferentes e os

resultados obtidos se mostraram alinhados, optou-se por esta metodologia baseada nas tendências de degradação de momento fletor crítico obtidas pelos autores supracitados.

Por fim, os valores de momento fletor crítico obtidos para os tempos de 30 minutos, 60 minutos, 90 minutos e 120 minutos podem ser correlacionados ao cumprimento ou não do tempo de resistência ao fogo estabelecido pela NBR 14432:2001. Este dado é de suma importância para o projetista, dado que alternativas podem ser adotadas na fase de projeto para atender ao tempo mínimo de resistência designado para o empreendimento em questão. Caso o empreendimento esteja concluído, este tipo de informação interessará às empresas de seguro predial, uma vez que essa informação será levada em consideração na matriz de risco do serviço prestado.

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho explorou as formulações analíticas com solução fechada desenvolvidas por NUNES (2005), CAMPÊLO (2008) e RODRIGUES (2013) para vigas submetidas a momento fletor, carga concentrada e carga distribuída, respectivamente. Vale ressaltar que, nos trabalhos supracitados, foi considerada apenas a situação de incêndio na qual há uma laje sobreposta à viga metálica. Por outro lado, neste trabalho, outras situações foram estudadas, por exemplo, a mesa superior da viga em contato com a laje e a mesa inferior em contato com uma parede de alvenaria. Os perfis I de viga escolhidos foram os que apresentam menor e maior fatores de massividade dentre os perfis metálicos tabelados por Pfeil (2009). Além disso, os graus de ventilação empregados nas simulações são o mínimo e o máximo para o caso estudado. Assim sendo, as análises desenvolvidas refletem as condições mais extremas possíveis.

As sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Desenvolver estudos semelhantes empregando maior variabilidade de cargas específicas de incêndio;
- Desenvolver estudos semelhantes empregando maior variabilidade de graus de ventilação;
- Desenvolver formulação analítica com solução fechada para momento fletor considerando a flambagem das mesas da viga;
- Desenvolver formulação analítica com solução fechada para momento fletor considerando a flambagem da alma da viga;

- Desenvolver formulação analítica com solução fechada para esforço cortante na alma da viga;
- Desenvolver ferramenta computacional capaz de indicar qual será o mecanismo de falha da viga, uma vez que é informado o carregamento atuante, o perfil da viga, seu comprimento e as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais estudados;
- Desenvolver ajustes das curvas de perda de resistência de uma viga ao longo do período de incêndio, a fim de propor formulações mais simples, para a determinação do momento fletor crítico, as quais dependam de um número menor de variáveis;
- Desenvolver ensaios experimentais de perfis de aço em situação de incêndio, a fim de verificar se os modelos desenvolvidos correspondem à realidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS Release 15.0 (2013). *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, Inc., Canonsburg, PA, EUA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323 – *Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432 – *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220 – *Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro, 2003.

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-002<sup>a</sup>/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 165p.

EUROPEAN STANDARD. EUROCODE 1: *Actions on Structures – Part 1-2: General Actions- Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization. Brussels, 2002.

LAWSON, J.R. (2009). *A History of Fire Testing*. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, EUA.

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, 186 p.

PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008*. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009, 627 p.

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

SEITO, A.I.; GILL, A.A.; PANNONI, F.D.; SILVA, R.O.S.B.; CARLO, U.D.; SILVA, V.P. *A segurança contra incêndio no Brasil*. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496p.

VAGAS, M.R.; SILVA, V.P. *Resistência ao fogo das estruturas de aço*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia e Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005. 78p.

INTERNET 1 - <http://www.fire.org.uk/history-of-fire-safety.html>, acessado em 20/05/2017.

INTERNET 2 - [http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab\\_virtual/fogo.html](http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/lab_virtual/fogo.html), acessado em 22/04/2017.

INTERNET 3 - <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/conducao-termica-1.htm>, acessado em 17/04/2017.

INTERNET 4 - <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/radiacao-conducao-conveccao.htm>, acessado em 17/04/2017.

INTERNET 5 - <http://penta3.ufrgs.br/CESTA/fisica/calor/conveccao.html>, acessado em 18/04/2017.