

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**IASMIM TEREZINHA MACHADO**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

IASMIM TEREZINHA MACHADO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE AÇO EM  
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto

PATO BRANCO

2018

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Análise do Comportamento de uma Estrutura de Aço em Situação de Incêndio

Iasmim Terezinha Machado

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 20/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Robson Gonçalves Trentin  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. MsC. Maurício Pegoraro  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Gilmar e Lucelia, e ao meu irmão Gabriel,  
pelo apoio incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me acompanhado e abençoado em todos os momentos e trilhado meu caminho até aqui.

Agradeço aos meus pais, Gilmar e Lucelia, por toda a compreensão, dedicação, incentivo e força durante todos esses anos, especialmente a minha mãe por toda a paciência e por sempre, mesmo longe, se fazer presente todos os dias me motivando. Agradeço ao meu irmão Gabriel, que sempre me apoiou, incentivou e esteve ao meu lado dando forças para continuar.

Agradeço a todos os meus familiares que estiveram comigo dando apoio e incentivo, em especial ao meu primo Josias, quem me apresentou a engenharia mecânica, e quem eu gostaria muito que ainda estivesse aqui para comemorar este momento.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que estiveram comigo de alguma maneira me incentivando e acompanhando durante essa jornada compartilhando as alegrias e dificuldades, sem vocês com certeza a experiência não seria a mesma.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador Diego Rizzotto Rossetto, pelo tempo dedicado e ensinamentos compartilhados tanto na realização deste trabalho quanto nas disciplinas e também a todos os professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR que compartilharam seus conhecimentos e contribuído para meu crescimento pessoal e profissional.

## EPÍGRAFE

*"May your efforts defy impossibilities, remember that the great things of man were conquered from what seemed impossible"*  
(Charles Chaplin)

## RESUMO

MACHADO, Iasmim T. Análise do comportamento de uma estrutura de aço em situação de incêndio. 2018. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Quando exposto a temperatura elevada o aço tende a ter redução em algumas de suas propriedades, como módulo de elasticidade e resistência ao escoamento, tais propriedades são muito importantes quando se trata da estabilidade de uma estrutura. Assim, este trabalho apresenta a análise do comportamento de um galpão comercial varejista constituído por pórticos treliçados, situado na cidade de Pato Branco, Paraná, com perfis formados a frio em situação de incêndio. O estudo é realizado a partir do método simplificado de cálculo proposto pela NBR 14323:2013 e pelo método avançado através do *software* computacional ANSYS, que simula uma situação mais real da condição. O objetivo do trabalho é verificar o comportamento da estrutura através de cada método e se há diferenças entre eles, pois teoricamente tais diferenças não devem ocorrer. Então, a partir de análise pelos dois métodos em situação de incêndio e verificação da estrutura em temperatura ambiente foi possível concluir que é extremamente importante que estruturas sejam dimensionadas para situação de incêndio, pois a estrutura dimensionada para temperatura ambiente, não suportou os esforços quando submetida a temperaturas elevadas. Foi possível também perceber que há divergências entre os métodos de cálculo simplificado e avançado. Pelo método simplificado a estrutura suportou os esforços sem apresentar falha quando exposta a um tempo de 10 minutos, 6 vezes menor que o recomendado pela norma para a ocupação da estrutura, porém quando verificado pelo método avançado a estrutura não suportou nem o tempo de 10 minutos sem apresentar falha.

**Palavras-chave:** Perfil formado a frio. Temperatura elevada. Método simplificado de cálculo. Método avançado de cálculo. Incêndio.

## ABSTRACT

MACHADO, Iasmim T. Analysis of the behavior of a steel structure in a fire situation. 2018. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

When the steel is exposed to a high temperature, tends to have a reduction in some of its properties to elasticity and resistance to flow, such properties are very important when it comes to the stability of a structure. Thus, this work presents an analysis of the behavior of a commercial shed, consisting of trellised patients, located in the city of Pato Branco, Paraná, with cold formed profiles formed in a fire situation. The study is carried out using the simplified method of calculation proposed by NBR 14323: 2013 and the advanced method through ANSYS computational software, which simulates the more real situation of the condition. The objective of the work is to verify the behavior of the structure through each method and if there are differences between them, theoretically such differences should not occur. Then, from the analysis by the two methods in fire situation and verification of the structure at room temperature, it was possible to conclude that it is extremely important that structures be dimensioned for fire situation, because the structure dimensioned to ambient temperature did not support the efforts when submitted to high temperatures. By the simplified method, the structure supported the efforts without presenting failure when exposed to a time of 10 minutes, 6 times lower than the one recommended by the norm for the occupation of the structure, but when verified by the advanced method the structure did not support nor the time of 10 minutes without fault.

**Keywords:** Cold formed steel. High temperature. Simplified calculation method. Advanced calculation method. Fire



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo do fogo .....	23
Figura 2 - Curva de desenvolvimento de um incêndio .....	24
Figura 3 - Modelo de incêndio natural .....	25
Figura 4 - Modelo de incêndio padrão.....	26
Figura 5 - Tipos de elementos finitos .....	33
Figura 6 - Modos de falha em perfis U a 250 °C .....	35
Figura 7 - Modos de falha em perfis U a 400 °C .....	36
Figura 8 - Modos de falha em perfis U a 550 °C .....	36
Figura 9 - Modos de falha no perfil I enrijecido, em temperatura ambiente.....	37
Figura 10 - Modos de falha perfil tipo caixão, em temperatura ambiente.....	38
Figura 11 - Deformações no perfil I após ser submetido a temperaturas elevadas...39	
Figura 12 - Falha local na alma e distorcional no conjunto mesa-enrijecedor .....	39
Figura 13 - Deformações no perfil caixão após ser submetido à temperaturas elevadas.....	40
Figura 14 - Falha local na alma e na mesa e distorcional conjunto mesa-enrijecedor .....	40
Figura 15 - Pórtico - Vista frontal.....	50
Figura 16 - Pórtico - Vista Isométrica .....	50
Figura 17 - Dimensões do pórtico em milímetros (mm).....	51
Figura 18 - Perfil U simples .....	52
Figura 19 - Perfil cantoneira .....	53
Figura 20 - Caso crítico de combinação de cargas .....	58
Figura 21 - Deformação total em temperatura ambiente .....	59
Figura 22 - Deformação em torno do eixo x em temperatura ambiente .....	59
Figura 23 - Deformação em torno do eixo y em temperatura ambiente .....	59
Figura 24 - Deformação em torno do eixo z em temperatura ambiente .....	60
Figura 25 - Pórtico treliçado em 3D.....	66
Figura 26 - Incêndio na parte interna da estrutura .....	67
Figura 27 - Face exposta ao incêndio .....	67
Figura 28 - Distribuição de temperatura no perfil .....	68
Figura 29 - Fluxo de calor total.....	68
Figura 30 - Deformação total do perfil .....	69
Figura 31 - Deformação total a temperatura de 939,14 °C.....	70
Figura 32 - Comparação entre a deformação total da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C.....	70
Figura 33 - Deformação direcional no eixo x.....	71
Figura 34 - Comparação entre a deformação direcional no eixo x da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C .....	71
Figura 35 - Deformação direcional no eixo y.....	72
Figura 36 - Comparação entre a deformação direcional no eixo y da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C .....	72

Figura 37 - Deformação direcional no eixo z.....	73
Figura 38 - Comparação entre a deformação direcional no eixo z da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C .....	73
Figura 39 - Tensões solicitantes na estrutura a 939,14°C.....	74
Figura 40 - Deformação total a 443,15 °C .....	75
Figura 41 - Deformação direcional no eixo x para 443,15 °C .....	75
Figura 42 - Deformação direcional no eixo y para 443,15 °C .....	76
Figura 43 - Deformação direcional no eixo z para 443,15 °C .....	76
Figura 44 - Tensões solicitantes na estrutura a 443,15°C.....	77
Figura 45 - Isopletas da velocidade básica do vento no Brasil.....	86
Figura 46 - Coeficiente de pressão externa - Paredes .....	87
Figura 47 - Coeficiente de pressão externa - Telhado .....	88
Figura 48 - Coeficientes de pressão externa - Telhado.....	88
Figura 49 - Coeficientes de pressão interna - Vento a 0° .....	89
Figura 50 - Coeficientes de pressão interna - Vento a 90° .....	89
Figura 51 - Carregamento devido ao vento a 0° .....	89
Figura 52 - Carregamentos devido ao vento a 90° .....	90
Figura 53 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo x.....	109
Figura 54 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo y.....	110
Figura 55 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo z.....	110
Figura 56 - Deformação direcional do perfil - Eixo x.....	111
Figura 57 - Deformação direcional do perfil - Eixo y.....	111
Figura 58 - Deformação direcional do perfil - Eixo z.....	112

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) em minutos .....	29
Quadro 2 - Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local .....	44
Quadro 3 - Fatores de redução .....	45
Quadro 4 - Dimensões perfil U .....	52
Quadro 5 - Dimensões perfil cantoneira .....	53
Quadro 6 - Valores do coeficiente de flambagem local para barras sob compressão centrada .....	94
Quadro 7 - Valores do coeficiente de flambagem local da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia .....	97
Quadro 8 - Fatores de redução do aço .....	102
Quadro 9 - Fatores de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local .....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Físicas do Aço à Temperatura Ambiente .....	53
Tabela 2 - Carregamentos atuantes na estrutura .....	56
Tabela 3 - Combinações de ações últimas normais .....	57
Tabela 4 - Deformação em temperatura ambiente .....	60
Tabela 5 - Esforços solicitantes de cálculo em temperatura ambiente.....	60
Tabela 6 - Esforços resistentes de cálculo em temperatura ambiente .....	61
Tabela 7 - Temperatura do aço .....	62
Tabela 8 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 939,14 °C.....	64
Tabela 9 - Esforços solicitantes de cálculo em temperatura elevada .....	64
Tabela 10 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 787,51 °C.....	64
Tabela 11 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 443,15 °C.....	65
Tabela 12 - Propriedades do aço em temperatura elevada .....	66
Tabela 13 - Deformações a temperatura de 939,14 °C .....	73
Tabela 14 - Propriedades do aço a temperatura de 443,15 °C .....	74
Tabela 15 - Deformações à temperatura de 443,15 °C .....	76
Tabela 16 - Diferença percentual entre as deformações a 939,14 °C e 443,15 °C ...	78
Tabela 17 - Diferença percentual entre as deformações a temperatura ambiente e a 939,14 °C .....	78
Tabela 18 - Diferença percentual entre as deformações a temperatura ambiente e a 443,15 °C .....	79
Tabela 19 - Cargas críticas de vento.....	90
Tabela 20 - Esforços resistentes de cálculo - temperatura ambiente.....	100
Tabela 21 - Fatores de redução .....	103

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society Testing and Materials
EUROCODE	European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLE	Método da Largura Efetiva
MSE	Método da Seção Efetiva
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de seção transversal
AC	Carga Acidental
$A_{ef}$	Área efetiva área efetiva
$A_g$	Área de seção transversal bruta
$c_a$	Calor específico do aço
$C_b$	Fator de modificação para o momento fletor não uniforme
$C_{pe}$	Coeficiente de pressão externa
$C_{pi}$	Coeficientes de pressão interna
$C_w$	Constante de empenamento da seção
E	Módulo de elasticidade do aço a temperatura ambiente
$E_\theta$	Módulo de elasticidade do aço em temperatura elevada
$F_{Gi,k}$	Valores característicos das ações permanentes
$\chi_{fi}$	Fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio
$\chi_{fi}$	Fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio
$F_{Q1,k}$	Valor característico da ação variável considerada principal para a combinação
$F_{Qj,k}$	Valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal
$f_u$	Resistência a ruptura a temperatura ambiente
$f_y$	Resistência ao escoamento a temperatura ambiente
$f_{y,\theta}$	Resistencia ao escoamento do aço em temperatura elevada
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Largura da alma (altura da parte plana da alma)
$h_c$	Coeficiente médio de transmissão de calor por convecção
J	Constante de torção da seção transversal
k	Condutividade térmica do material
$K_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade
$k_l$	Coeficiente de flambagem local
$K_{sh}$	Fator de correção para o efeito de sombreamento
$k_v$	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem global por torção
$k_{\sigma,\theta}$	Fator de redução
$M_A$	Momento fletor solicitante de cálculo, no 1° quarto do trecho analisado
$M_B$	Momento fletor solicitante de cálculo, no centro do trecho analisado

$M_C$	Momento fletor solicitante de cálculo, no 3° quarto do trecho analisado
$M_e$	Momento fletor de flambagem lateral com torção em regime elástico
$M_{fi,Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo em temperatura elevada
$M_{fi,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo em temperatura elevada
$M_l$	Momento fletor de flambagem local elástica
$M_{max}$	Momento fletor solicitante de cálculo máximo no trecho analisado
$M_{Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo a temperatura ambiente
$M_{Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo a temperatura ambiente
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo a temperatura ambiente
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo a temperatura ambiente
$N_e$	Força axial de flambagem global elástica
$N_{ex}$	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x
$N_{ey}$	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y
$N_{ez}$	Força axial de flambagem global elástica por torção
$N_{fi,Rd}$	Força axial resistente de cálculo em temperatura elevada
$N_{fi,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo em temperatura elevada
$N_l$	Força axial de flambagem local elástica
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo a temperatura ambiente
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo a temperatura ambiente
PP	Peso Próprio
$q_c$	Taxa de transferência de calor por convecção
$q_k$	Taxa de calor transmitida por condução
$q_r$	Taxa de transferência de calor por radiação
$r_0$	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
$r_x$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo de inércia x
$r_y$	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo de inércia y
$S_1$	Fator topográfico
$S_2$	Fator de rugosidade
$S_3$	Fator estatístico
SC	Sobrecarga
t	Espessura da alma
t	Tempo
u	Perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural
$u/A_g$	Fator de massividade
$V_{0^\circ}$	Vento a 0°
$V_{90^\circ}$	Vento a 90°
$V_{fi,Rd}$	Força cortante resistente de cálculo em temperatura elevadas
$V_{fi,Sd}$	Força cortante solicitante de cálculo em temperatura elevada
$V_o$	Velocidade básica do vento

$V_{Rd}$	Força cortante resistente de cálculo a temperatura ambiente
$V_{Sd}$	Força cortante solicitante de cálculo a temperatura ambiente
$W$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
$W_c$	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida
$W_{c,ef}$	Módulo resistente elástico da seção transversal efetiva em relação às fibras extremas comprimidas
$W_{ef}$	Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
$x_0$	Distância do centro de torção ao centroide na direção do eixo x
$y_0$	Distância do centro de torção ao centroide na direção do eixo y
$\alpha$	Coefficiente de Expansão Térmica
$\alpha_c$	Coefficiente de transferência de calor
$\gamma$	Coefficiente de Poisson
$\gamma_g$	Coefficiente de ponderação devido ao peso próprio
$\gamma_q$	Coefficiente de ponderação devido as ações variáveis
$\Delta T$	Varição de temperatura
$\Delta\theta_{a,t}$	Elevação da temperatura com o tempo
$\epsilon_{res}$	Emissividade resultante
$\theta_a$	Temperatura do aço
$\theta_g$	Temperatura dos gases
$\lambda_0$	Índice de esbeltez à temperatura ambiente
$\lambda_{0,fi}$	Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio
$\rho_a$	Massa específica do aço
$\varphi$	Fluxo de calor
$\varphi_c$	Fluxo de calor devido à convecção
$\varphi_r$	Fluxo de calor devido à radiação
$\chi_{dist}$	Fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional
$\psi_0$	Fator de combinação devido ação do vento e sobrecarga



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.2	JUSTIFICATIVA	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>22</b>
2.1	TRABALHOS CORRELACIONADOS	22
2.2	O INCÊNDIO	23
2.2.1	MODELO DE INCÊNDIO NATURAL	25
2.2.2	MODELO DE INCÊNDIO PADRÃO	26
2.2.3	TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)	28
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	29
2.3.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO	29
2.3.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	30
2.3.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO	31
2.4	ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE TÉRMICA BIDIMENSIONAL	32
2.5	PERFIL DE AÇO FORMADO A FRIO	34
2.5.1	COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO EM TEMPERATURAS ELEVADAS.	35
2.6	MÉTODOS DE CÁLCULO	40
2.6.1	MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO - ABNT NBR 14323:2013	41
2.6.2	MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO - ABNT NBR 14323:2013	48
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>49</b>
3.1	DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	49
3.2	DETERMINAÇÃO DO PERFIL E MATERIAL	51
3.3	DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS	54

3.4	VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	55
3.5	DIMENSIONAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.1	VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	56
4.2	COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA ELEVADA – MÉTODO SIMPLIFICADO .....	61
4.3	COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA ELEVADA – MÉTODO AVANÇADO .....	65
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>
	<b>APENDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS DE VENTO .....</b>	<b>85</b>
	<b>APENDICE B – DIMENSIONAMENTO A TEMPERATURA AMBIENTE .....</b>	<b>91</b>
	<b>APENDICE C – MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE D – MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o incêndio atingiu e destruiu diversas estruturas, no Brasil pode-se citar o caso do Edifício Joelma, que deixou 191 mortos em 1974, a boate Kiss, que em 2013 deixou 242 mortos, e o edifício Wilton Paes de Almeida, que em maio de 2018 desabou completamente após ser atingido por um incêndio.

O combate ao incêndio apresentou evolução durante os anos, porém se não controlado em tempo hábil causa consequências graves. Em 2015, o Brasil era o terceiro país com o maior número de mortes por incêndio, segundo o Instituto Sprinkler Brasil, e de acordo com estatísticas internacionais a cada dez minutos uma pessoa morre devido a incêndios (SILVA; VARGAS; ONO, 2010).

Após diversas tragédias ocorreram mudanças na legislação, normas e nas corporações de bombeiros, porém ainda não há muita ênfase na segurança contra incêndio na formação de arquitetos e engenheiros, que acarreta deficiências nos projetos em relação à segurança contra incêndio (SEITO, et al, 2008).

Visto isto, faz-se necessário o dimensionamento destas estruturas para situação de incêndio, pois quando exposto a temperaturas elevadas o aço sofre alterações nas suas propriedades, apresentando uma redução na sua resistência ao escoamento e módulo de elasticidade, fazendo com que a estrutura entre em colapso rapidamente.

Atualmente no Brasil tem-se em vigência a norma técnica ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento, que prevê condições a serem atendidas para evitar o colapso estrutural, em situação de incêndio. E a norma técnica ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, que permite o dimensionamento das estruturas aço para que suportem o incêndio por um tempo mínimo, para que haja tempo hábil para a estrutura ser ao menos evacuada antes de entrar em colapso.

A NBR 14323 que prevê o dimensionamento em situação de incêndio foi inicialmente formulada para perfis soldados e laminados, apenas em 2013 passou por uma revisão para inclusão de perfis formados a frio, porém muitos fatores ainda são considerados iguais entre os laminados, soldados e formados a frio. Como o processo de fabricação e materiais destes perfis são diferentes, o comportamento deles

também não é o mesmo, ou seja, talvez não seja recomendado ser adotado coeficientes iguais.

Outro problema encontrado no Brasil em relação às estruturas em situação de incêndio se deve ao fato que a grande maioria das normas brasileiras a respeito do assunto foram criadas com base em normas internacionais, que foram criadas com base em ensaios em materiais que nem sempre são usados aqui, ou não apresentam o mesmo desempenho (SILVA; VARGAS; ONO, 2010).

Estruturas de aço estão cada vez mais sendo constituídas por perfis formados a frio, principalmente para coberturas e pilares de edificações de pequeno porte e como estrutura secundária de estruturas de grande porte, devido às vantagens como baixo custo, baixo peso e facilidade de manuseio que ele apresenta quando comparado com os perfis soldados e laminados.

Uma vez que não há muito estudo relacionado ao comportamento deste tipo de perfil em situação de incêndio, este trabalho tem como objetivo desenvolver conhecimento a respeito do assunto. Para isto, será analisado o comportamento de um pórtico de aço formado através de perfis formados a frio com seção U através do método simplificado de cálculo, estudo analítico, que será realizado com base na norma técnica ABNT NBR 14323:2013 e auxílio da ABNT NBR 14762:2010 através do método avançado, método dos elementos finitos com auxílio do *software* computacional ANSYS, onde serão realizadas simulações para observar o comportamento da estrutura. A partir dos resultados obtidos pelos dois métodos será realizada uma comparação dos resultados obtidos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo acerca do comportamento estrutural de uma estrutura em aço com perfil formado a frio em situação de incêndio.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral são necessários os seguintes objetivos específicos:

- I. Realizar um levantamento das normas técnicas disponíveis;
- II. Identificar os principais métodos de cálculos de estruturas de aço em condições de incêndio;
- III. Identificar as principais diferenças entre os métodos de cálculo de estruturas em condições de incêndio;
- IV. Aplicação de um estudo analítico para a análise do comportamento da estrutura em incêndio;
- V. Aplicação do método dos elementos finitos para a análise do comportamento da estrutura em incêndio.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

Quando exposto a elevadas temperaturas o aço tem suas propriedades comprometidas, o que influencia na segurança das estruturas que podem sofrer colapsos prematuros.

Deste modo, como há poucos estudos referentes ao comportamento de estruturas em aço com perfil formado a frio em situação de incêndio, e também pelo fato que grande parte das estruturas em aço na região sudoeste do Paraná fazem utilização de perfil formado a frio. Assim, este trabalho se justifica como uma forma de desenvolver conhecimento sobre o assunto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRABALHOS CORRELACIONADOS

Para a realização deste trabalho foram consultados outros estudos relacionados ao assunto como o executado por Kimura (2009), que realiza uma análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio. Através de modelos numéricos desenvolvidos com o código computacional ANSYS v9.0, comparando os resultados obtidos por meio dos procedimentos normativos das normas ABNT NBR 14323:2013 e EUROCODE 3-1.2.

Mendes (2004) apresenta um estudo sobre perfis formados a frio em situação de incêndio, além de apresentar revestimentos térmicos para este tipo de perfil também apresenta adaptações a ABNT NBR 14762:2001 “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” para situação de incêndio e proteção dos perfis formados a frio em situação de incêndio.

Almeida (2012), analisa o comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico. As análises foram realizadas experimentalmente e através de análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos, como método complementar. Foram realizadas no âmbito normativo avaliações do método de cálculo simplificado proposto pela ABNT NBR 14323:2012 e possibilidade de adequações do EUROCODE 3 parte 1.3:2006 para dimensionamento de estruturas em temperaturas elevadas.

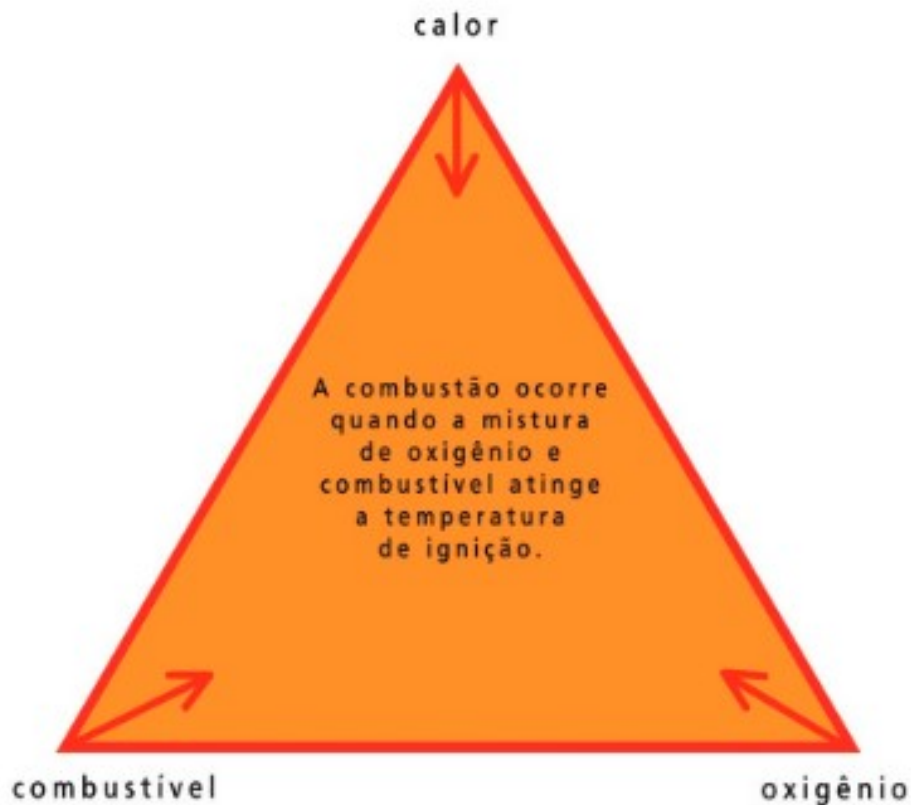
Kimura (2014) em sua tese de doutorado apresenta um estudo acerca do comportamento estrutural de perfis formados a frio com seção transversal composta de U enrijecido em temperaturas elevadas, através de análise experimental e numérica em seções transversais do tipo I enrijecido e tubular retangular do tipo caixão, compostas por dois perfis U enrijecidos. Através dos parâmetros obtidos experimentalmente foram construídos modelos numéricos que foram comparados com os valores obtidos por procedimentos de cálculo das normas em vigor, com o intuito de avaliar a viabilidade da aplicação direta dos procedimentos normativos aos perfis de aço formados a frio.

## 2.2 O INCÊNDIO

Para a análise comportamental de uma estrutura em condição de incêndio é fundamental o conhecimento das características do incêndio. Para que ocorra o incêndio deve-se haver a combinação de fonte de calor, combustível e comburente, quando essa combinação gera aquecimento necessário para que ocorra a combustão, o incêndio se inicia.

Esta combinação de fonte de calor, combustível e comburente são denominadas como o triângulo do fogo, Figura 1, onde esses três elementos essenciais para formação do fogo estão no vértice do triângulo (GOUVEIA, 2006).

**Figura 1 - Triângulo do fogo**



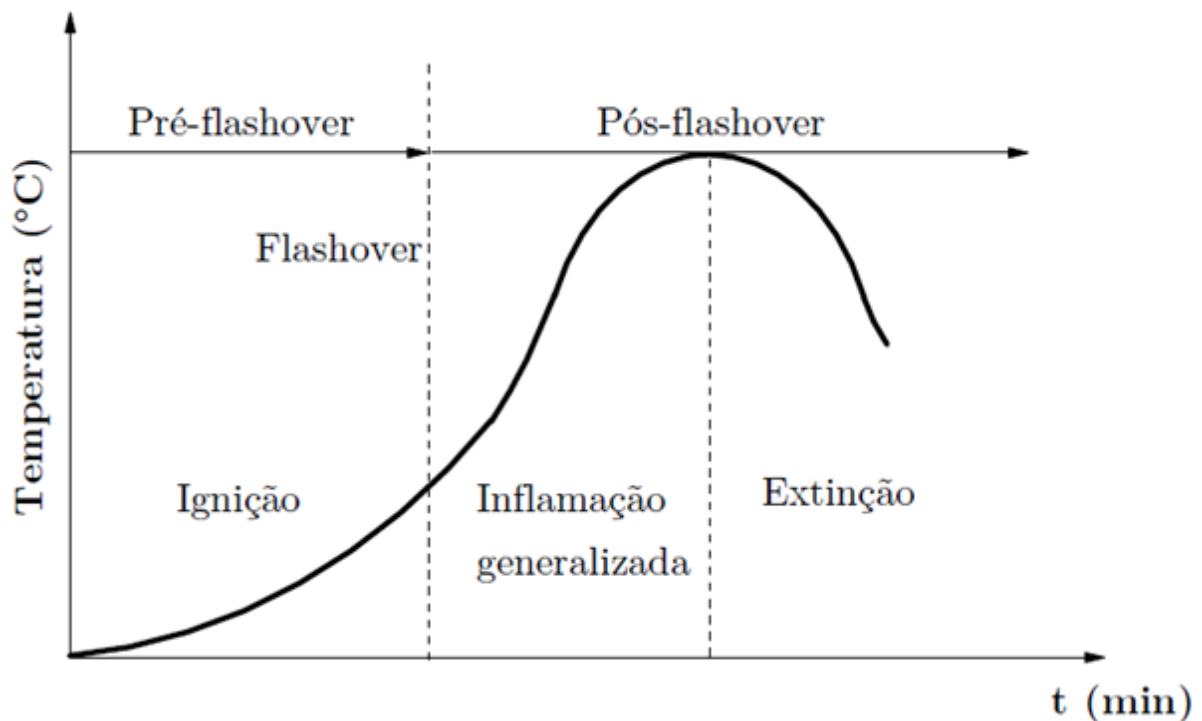
**Fonte: (GOUVEIA, 2006)**

Para que se ocorra à queima de um objeto é necessária uma fonte de calor externa para aumentar a temperatura até atingir o ponto de ignição. Então, ocorre o desenvolvimento das chamas até se tornarem estáveis, após isto, elas se tornam grandes o suficiente para manter a reação de combustão sem que seja necessária fonte de calor externo (KIMURA, 2009).

No que se diz respeito ao estudo de incêndio em estruturas, a principal característica é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo, Figura 2, pois é através dela que se torna possível calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e sua capacidade de resistência a temperaturas elevadas (SILVA, 1997).

O desenvolvimento do incêndio ocorre em três etapas: ignição, passando pelo desenvolvimento e generalização até a extinção, conforme ilustrado na Figura 2 (GOUVEIA, 2006).

Figura 2 - Curva de desenvolvimento de um incêndio



Fonte: (GOUVEIA, 2006)

A primeira etapa do incêndio, denominada como *pré-flashover*, tem em geral uma duração de cinco a vinte minutos até a ignição, nesta etapa inicial o incêndio apresenta um crescimento lento e pode ser subdividido em duas fases: abrasamento e chamejamento. A segunda etapa é onde ocorre a inflamação generalizada (*flashover*), ou seja, onde ocorre o crescimento do incêndio e o ambiente será tomado por labaredas. A terceira etapa se refere à extinção do incêndio através da diminuição gradual da temperatura do ambiente e das chamas (SEITO, et al, 2008).



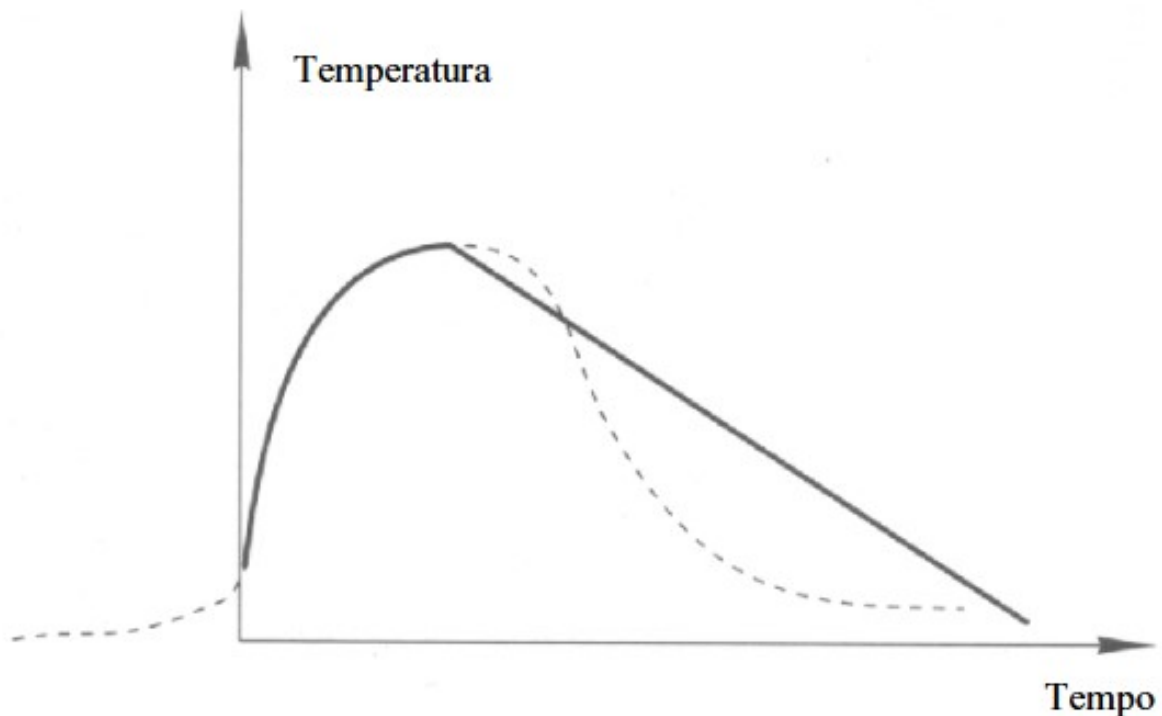
O período que abrange a ignição, o incêndio é lento e pode ser combatido pela proteção contra incêndio, como detectadores de calor e fumaça, chuveiros automáticos e brigadas de incêndio (KIMURA, 2009).

### 2.2.1 MODELO DE INCÊNDIO NATURAL

No modelo de incêndio natural a curva temperatura – tempo é baseada em ensaios (modelos matemáticos aferidos em ensaios) realizados simulando a real situação de incêndio em um compartimento (SILVA, 1997).

A variação de temperatura no incêndio natural varia conforme as características do compartimento, como a geometria, ventilação, elementos de vedação e da carga de incêndio específica (ABNT NBR 14432:2001).

**Figura 3 - Modelo de incêndio natural**



**Fonte: (DIAS, 1997)**

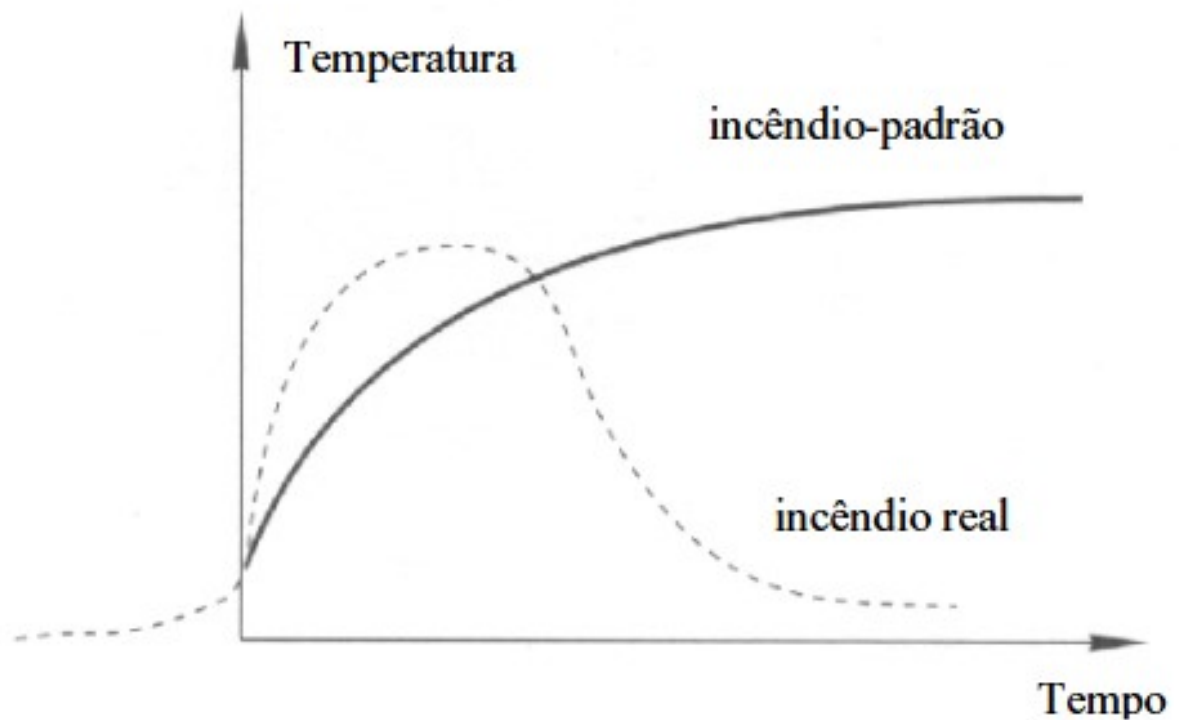
A curva do modelo de incêndio natural pode ser dividida como um ramo ascendente, que se refere à parte em que ocorre o aquecimento e o ramo descendente que corresponde ao resfriamento, conforme pode ser vista na Figura 3 (SILVA, 1997).

## 2.2.2 MODELO DE INCÊNDIO PADRÃO

A curva temperatura – tempo dos gases para o modelo de incêndio padrão foi adotada devido ao fato da curva temperatura – tempo se alterar para cada situação de incêndio estudada, deste modo, na falta de estudos mais realísticos esta curva foi adotada como uma curva padronizada (SILVA, 1997).

Estas curvas apresentam apenas um ramo ascendente, ou seja, a temperatura é sempre crescente e independe das características do compartimento ou do material combustível, conforme pode ser visto na Figura 4 (SILVA, 1997).

**Figura 4 - Modelo de incêndio padrão**



Fonte: (DIAS, 1997)

Esta curva padronizada pode ser modelada conforme a ASTM E119, ISO 834-1:1999 e EUROCODE 1 Part 1-2.

### 2.2.2.1 MODELO DE INCÊNDIO PADRÃO – ASTM E119

A curva padrão temperatura – tempo segundo a *American Society Testing and Materials*, através da ASTM E 119 (2000), pode ser modelada a partir de um número discreto de pontos tabelados que estabelecem a Equação 1.

$$\theta_g = 20 + 750[1 - e^{-3,79533\sqrt{t}}] + 170,41\sqrt{t} \quad (1)$$

Onde a temperatura dos gases ( $\theta_g$ ) é expressa em graus Celsius, e o tempo (t) é expresso em minutos. Esta é a melhor equação para descrever a curva do modelo de incêndio padrão entre as desenvolvidas (BUCHANAN, 2001).

#### 2.2.2.2 MODELO DE INCÊNDIO PADRÃO – ISO 834-1:1999

A curva padrão segundo a *International Organization for Standardization*, através da ISO 834-1:1999, pode ser modelada através da Equação 2, onde a temperatura dos gases ( $\theta_g$ ) é expressa em graus Celsius, e o tempo (t) é expresso em minutos.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

A norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, que estabelece as condições para dimensionamento de elementos de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio, foi modelada com base na ISO 834-1:1999.

#### 2.2.2.3 MODELO DE INCÊNDIO PADRÃO EUROCODE 1 PART 1-2

O Eurocode 1 Part 1-2 propõe a curva padrão temperatura – tempo para três situações: A curva de incêndio padrão que segue o modelo proposto pela ISO 834-1:1999, curva de incêndio para elementos exteriores e curva de incêndio de hidrocarbonetos.

1) A curva de incêndio padrão:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3)$$

2) A curva para elementos externos:

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (4)$$

### 3) Curva de hidrocarbonetos:

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

#### 2.2.3 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) pode ser definido como um tempo fictício mínimo em minutos que a estrutura deve resistir à ação térmica do incêndio padrão sem entrar em colapso, ou seja, é o tempo em que se tem para que a estrutura seja evacuada antes de se romper SEITO et al., 2008).

A curva padrão de temperatura – tempo apresentada na Figura 4 não possui uma temperatura máxima. Assim, apresenta uma dificuldade operacional, então se faz necessário o TRRF, quando esse tempo fictício é combinado com a curva temperatura – tempo também fictícia torna-se possível determinar a temperatura máxima em cada elemento de aço, sendo assim possível dimensionar a estrutura como um incêndio real (SEITO et al., 2008).

O incêndio natural e o incêndio real apresentam uma temperatura máxima, conforme pode ser visto nas Figuras 3 e 4, deste modo com aplicação uniforme da temperatura no elemento combinada com expressões da transferência de calor é possível determinar a curva temperatura – tempo e então a partir da temperatura máxima é possível dimensionar a estrutura para uma temperatura que assegure a resistência ao fogo sem a necessidade de determinar a TRRF (SEITO et al., 2008).

Para estruturas sem revestimento contra incêndio o TRRF é determinado pelo método tabular, que consiste em valores de tempo tabelados que devem ser definidos de acordo com a Quadro 1 apresentada abaixo, conforme a ocupação da edificação e a altura, os tempos de resistência ao fogo são de 30, 60, 90 e 120 minutos (ABNT NBR 14432:2001).

**Quadro 1 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) em minutos**

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

Fonte: (ABNT NBR 14432:2001)

## 2.3 TRANFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor, ou calor, pode ser definida como “energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço” (INCROPERA et al., 2008).

Calor segundo a termodinâmica é transferência de energia, deste modo, também pode ser definida como transferência de calor a ciência que a partir de diferenças de temperatura gera transferência de energia entre corpos materiais (HOLMAN, 1983).

Sempre que um sistema com gradiente de temperatura ou dois sistemas com diferença de temperatura estão em contato, há transferência de energia (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Há três métodos de transferência de calor conhecidos: Condução, convecção e radiação, que são apresentados abaixo.

### 2.3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

Na condução, a transferência de calor ocorre através do meio tanto em um sólido quanto em um fluido em estado estacionário (INCROPERA et al., 2008).

Quando se há um corpo com gradiente de temperatura, com uma região com temperatura mais elevada e com uma região temperatura menor, quando estes corpos entram em contato a energia se transfere do corpo com temperatura mais alta para a região com temperatura mais baixa (BARROSA, 2004; HOLMAN, 1983).

Esta transferência ocorre quando as moléculas do corpo com temperatura mais alta agitam as moléculas do corpo com temperatura mais baixa, através da energia do corpo com temperatura mais alta, esta agitação das moléculas faz com que aumente a energia interna, a partir da elevação da energia cinética média do corpo com menor temperatura (BARROSA, 2004).

A taxa de calor transmitida por condução ( $q_k$ ) pode ser definida pela Lei de Fourier descrita na Equação 6, onde é necessário a área de seção transversal ( $A$ ) e o gradiente de temperatura ( $dT/dX$ ).

$$q_k = -kA \frac{dT}{dX} \quad (6)$$

Para a realização do cálculo é necessário conhecer algumas propriedades dos materiais, como a condutividade térmica do material ( $k$ ). Quanto ao sinal negativo é adotado devido ao fato de a transferência sempre ocorrer da maior temperatura para a menor, satisfazendo a segunda lei da termodinâmica (HOLMAN, 1983).

### 2.3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Na convecção, a transferência ocorre quando há transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido, consistindo em dois mecanismos operando simultaneamente, o primeiro é o modo condutivo, em que a energia é transferida devido ao movimento molecular aleatório e em sobreposto a este modo tem-se a energia transferida pelo movimento macroscópico, do fluido (INCROPERA et al., 2008; KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Quando a mobilidade das partículas no fluido é grande, o contato com a superfície sólida das partículas aquecidas tendem a migrar para locais onde as temperaturas são mais baixas, gerando a transferência de calor por convecção, devido à transferência de energia gerada a partir da movimentação das partículas (BARROSA, 2004).

Quando um grande número de moléculas se move devido a forças externas, com uma grande variação de densidade devida à variação de temperatura tem-se a convecção livre (ou natural). Porém, quando essa movimentação ocorre devido à diferença de pressão que pode ser causada, por exemplo, por uma bomba ou por um ventilador, ou por uma combinação dos dois tem-se então a convecção forçada (INCROPERA et al., 2008; KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Assim, a taxa de transferência de calor por convecção ( $q_c$ ) entre uma superfície sólida e um fluido pode ser determinada a partir da Equação 7, proposta por Isaac Newton, em 1701. Para o cálculo é necessário a área de transmissão de calor ( $A$ ) e a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido ( $\Delta T$ ).

$$q_c = \bar{h}_c A \Delta T \quad (7)$$

E também, o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção ( $h_c$ ), que é obtido através da geometria da superfície, velocidade do fluido, temperatura do fluido entre outras propriedades do fluido (BARROSA, 2004).

### 2.3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

Na radiação, a energia é emitida tanto em superfícies sólidas quanto em líquidos e gases, pela matéria em temperaturas não nulas mesmo quando os corpos estão separados entre eles no espaço, ou seja, a radiação não necessita de um meio material (BARROSA, 2004; INCROPERA et al., 2008).

O fato de o calor ser transferido em regiões onde há vácuo perfeito é devido à radiação térmica que através da diferença de temperatura que propaga a radiação eletromagnética (HOLMAN, 1983).

A quantidade de energia em forma de calor radiante que deixa uma superfície é dependente da temperatura absoluta e da natureza da superfície (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Um radiador perfeito, corpo negro, é capaz de emitir e absorver a quantidade máxima de radiação em qualquer comprimento de onda, em qualquer temperatura, deste modo à taxa de transferência de calor de um radiador perfeito pode ser dada pela Equação 8, para a realização do cálculo se faz necessário o conhecimento da

constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ), a área total da superfície ( $A_1$ ) e a temperatura absoluta do corpo ( $T_1$ ), em kelvin (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

$$q_r = \sigma A_1 T_1^4 \quad (8)$$

Quando se tem dois corpos com a temperatura da superfície diferente a irradiação de um corpo negro ocorre para um envoltório fechado que também absorve toda a energia radiante incidente nele, a taxa líquida de transferência de calor radiante pode ser determinada pela Equação 9 (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

$$q_r = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

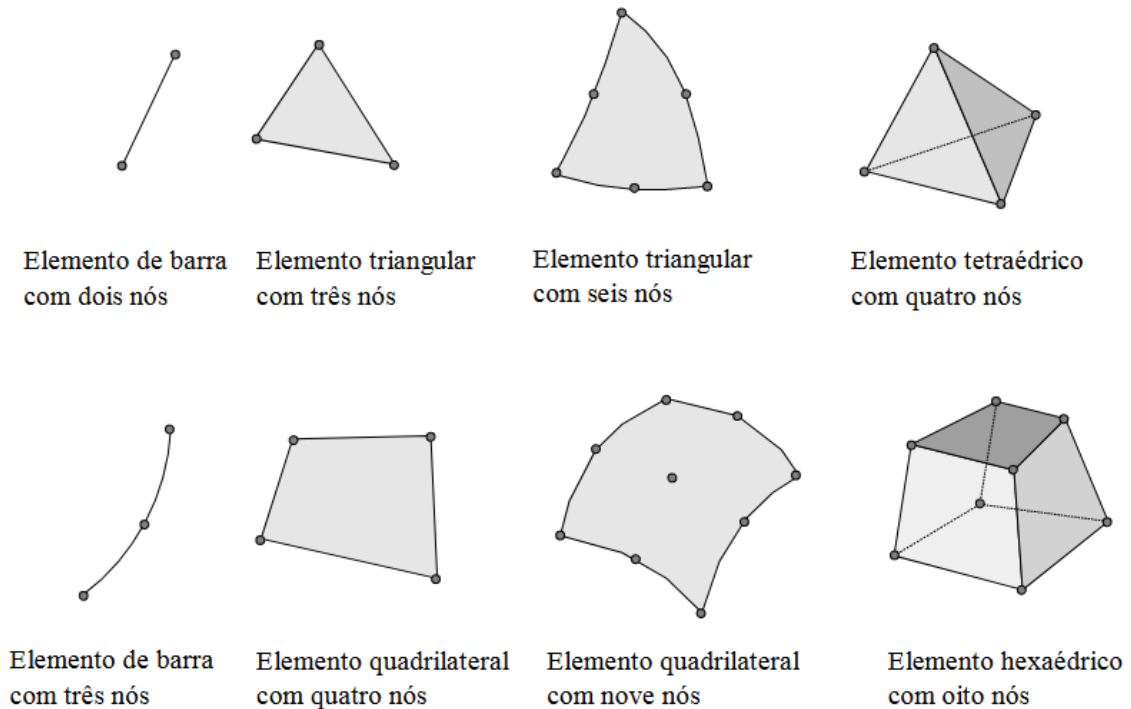
Neste caso é necessária a temperatura do corpo externo ( $T_2$ ) e a temperatura do corpo interno ( $T_1$ ), além da constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ) e a área total ( $A$ ).

## 2.4 ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE TÉRMICA BIDIMENSIONAL

A principal ideia do Método dos Elementos Finitos (MEF) é dividir, ou discretizar, o domínio do problema em regiões com geometrias mais simples, como: triangular, cúbico, quadricular e entre outras, dependendo do tipo e dimensão do problema, a Figura 5 apresenta alguns tipos de elementos finitos (SOUZA, 2003).



**Figura 5 - Tipos de elementos finitos**



**Fonte: (SOUZA, 2003)**

Há diversos tipos de elementos para a construção de modelos bidimensionais de análise térmica, tanto para análise térmica estacionária quanto análise térmica transiente (KIMURA, 2009).

O domínio geralmente se refere a uma estrutura física, enquanto a temperatura, fluxo de calor, deslocamento físico e velocidade do fluido, por exemplo, são denominados variáveis de campo. Estas variáveis são dependentes de interesse e governadas pela equação diferencial. Os valores destas variáveis de campo devem ser definidos nos limites de campo e são chamados de condições de contorno (HUTTON, 2004).

A precisão do método depende de diversos fatores presentes na malha, como: tamanho e tipo dos elementos, quantidade de nós e quantidade de elementos. Quanto mais refinada a malha, ou seja, quanto mais elementos a malha possuir, mais precisos serão os resultados, pois a medida que se aumenta os graus de liberdade do sistema a solução aproximada obtida pelo MEF tende a convergir para a solução exata (SILVA, 2014; SOUZA, 2003).

Quando se utiliza MEF para problemas de condução de calor as principais incógnitas do problema são as temperaturas avaliadas nos nós da malha. A

formulação do problema deve ser feita de acordo com a maneira em que ocorre a transferência de calor (condução, convecção e radiação) (SOUZA, 2003; HUTTON, 2004).

Para condução de calor as condições de contorno podem ser de duas maneiras, pela condição de Dirichlet, quando a temperatura nos limites é conhecida e pela condição de Neumann, quando o fluxo de calor é imposto (LEWIS; NITHIARASU; SEETHARAMU, 2004)

## 2.5 PERFIL DE AÇO FORMADO A FRIO

Devido a sua facilidade fabricação os perfis de aço são cada vez mais usados, este tipo de perfil pode ser projetado para cada aplicação específica sendo fabricado com facilidade em diversas seções transversais e com as dimensões adequadas uma vez que sua fabricação é rápida e econômica, pois são fabricados a partir de chapas finas de aço são leves e fácil manuseio. Eles são completamente eficientes para construções de pequeno e médio porte como galpões, coberturas, mezaninos entre outras aplicações (SILVA; SILVA, 2008).

A conformação a frio realizada na produção dos perfis formados a frio provoca encruamento alterando as propriedades do aço, como o aumento da resistência ao escoamento e a ruptura e redução da ductilidade (YU; LABOUBE, 2010).

Deste modo, é recomendada a utilização de aços com qualificação estrutural e com propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio para o dimensionamento de estruturas de aço com perfis formados a frio. Entre os requisitos que o aço deve apresentar são: uma relação entre resistência à ruptura e resistência ao escoamento maior ou igual 1,08, quanto ao alongamento após a ruptura ele depende da base de medida, para base de medida igual a 50 mm não deve ser menor que 10%, já para a base de medida igual a 200 mm não deve ser menor que 7%. Aços sem qualificação estrutural também podem ser utilizados se atenderem os requisitos das propriedades mecânicas. Neste caso não devem ser adotados aços com resistência ao escoamento com valores superiores a 180 MPa e resistência a ruptura superior a 300 MPa (ABNT NBR 14762:2010).

No Brasil, tem-se a ABNT NBR 6355:2012 “Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização” que estabelece requisitos de uma série de perfis formados a frio indicando as suas dimensões e principais características. A norma também prevê

a padronização da nomenclatura dos perfis designando os nomes da seguinte maneira: tipo do perfil x dimensões dos lados x espessura, dimensões em milímetros (mm). Por exemplo, U 250x100x8,00 indica que é um perfil do tipo U com 250 mm de alma, 100 mm de mesa e 8 mm de espessura.

### 2.5.1 COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO EM TEMPERATURAS ELEVADAS.

Quando em situação de incêndio perfis formados a frio apresentam redução na resistência e módulo de elasticidade, este fato está relacionado com o fator de massividade da seção transversal. Este fator é resultante da relação entre o perímetro da seção transversal exposto ao fogo e a área da seção transversal do perfil exposto ao fogo, quanto maior este fator mais rápido ocorre à elevação da temperatura do aço (MENDES, 2004).

Com a redução das propriedades estes perfis tendem a perder a estabilidade por modos de falha local, distorcional e globais de flexão, torção e flexo torção, estes tipos de falha podem ocorrer tanto em temperaturas elevadas quanto por temperatura ambiente (ALMEIDA, 2012; KIMURA, 2014).

Feng et al. (2003) realizou 52 ensaios em perfis formados a frio em temperaturas elevadas (250 °C, 400 °C, 550 °C), nas Figuras 6, 7 e 8 abaixo é possível ver alguns modos de falha em 250 °C, 400 °C e 550 °C respectivamente.

**Figura 6 - Modos de falha em perfis U a 250 °C**

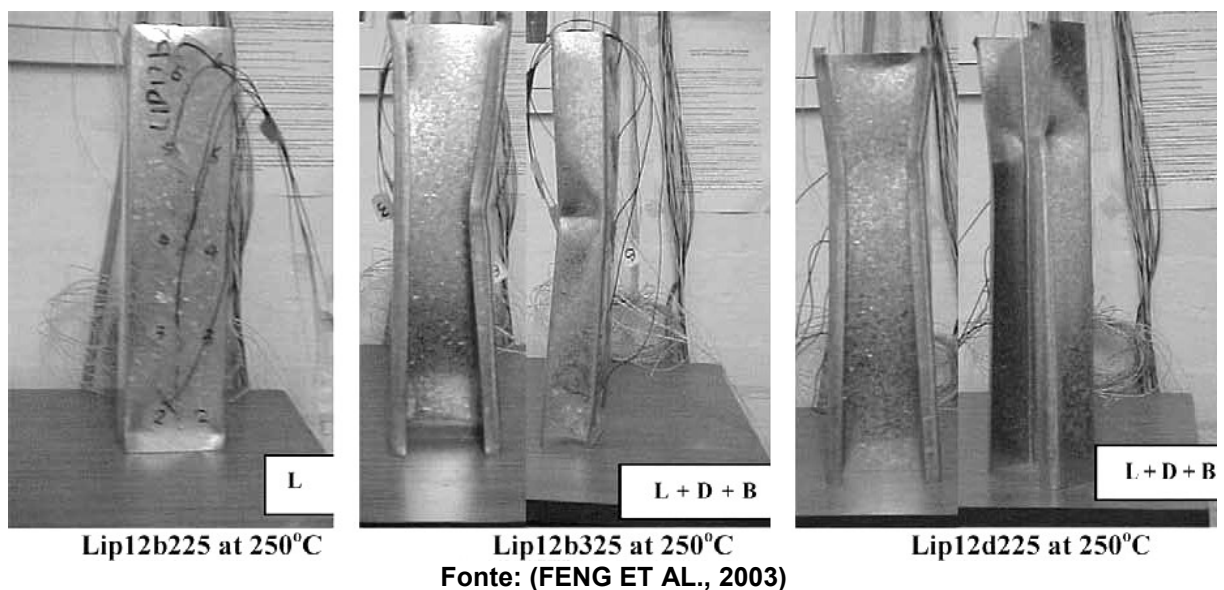
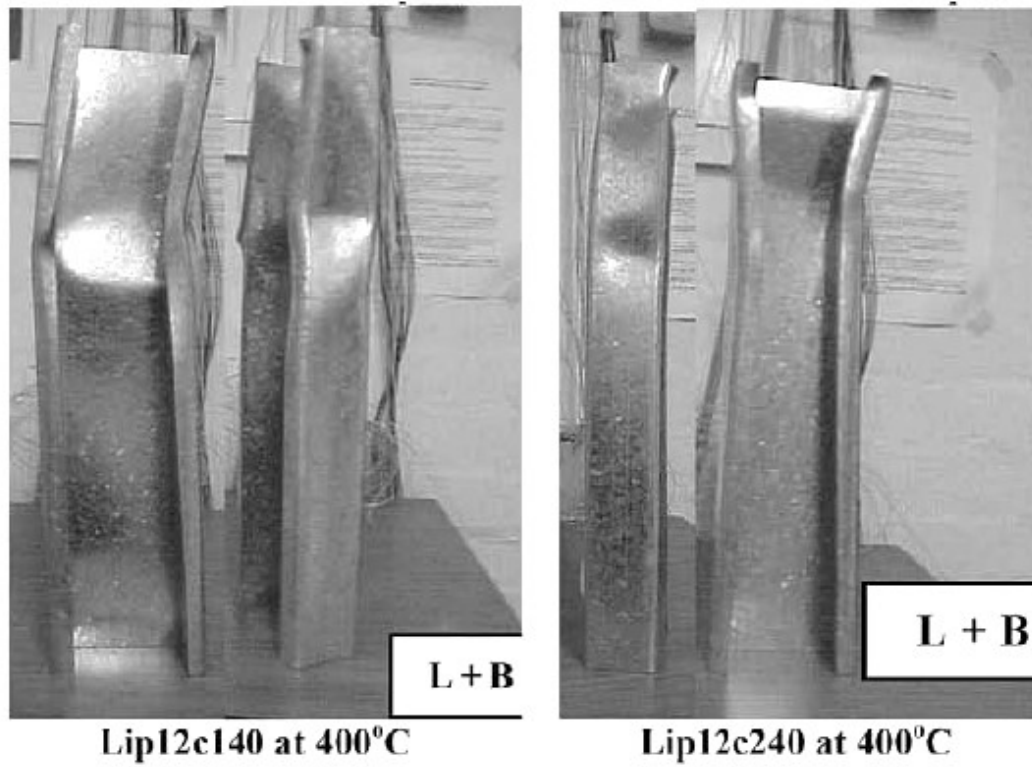
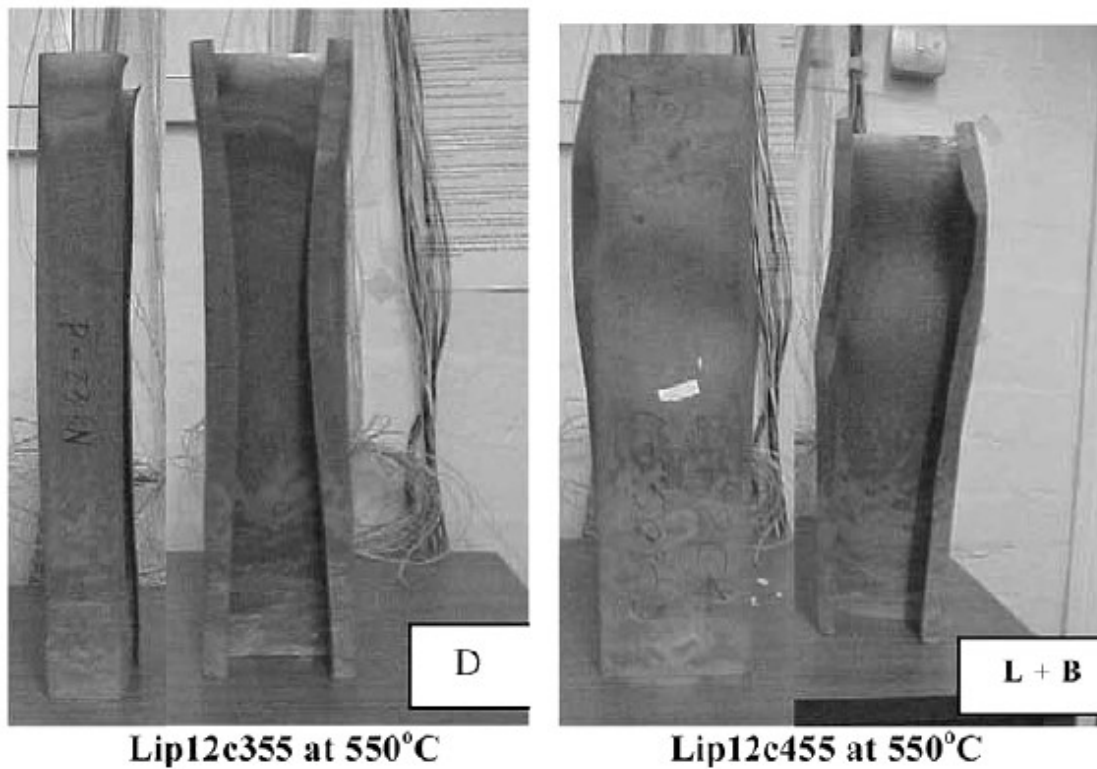


Figura 7 - Modos de falha em perfis U a 400 °C



Fonte: (FENG ET AL., 2003)

Figura 8 - Modos de falha em perfis U a 550 °C



Fonte: (FENG ET AL., 2003)

Kimura (2014) realizou testes experimentais em perfis do tipo I enrijecido e tubular retangular do tipo caixão, compostos por dois perfis U enrijecidos unidos por solda intermitente, foram realizados nos perfis 17 ensaios de compressão, cinco em temperatura ambiente e 12 em temperaturas elevadas. Na Figura 9, pode-se ver o modo de falha local na alma e distorcional e modo de falha por flexão respectivamente, em temperatura ambiente de perfis I, formados através de dois perfis U formados a frio.

**Figura 9 - Modos de falha no perfil I enrijecido, em temperatura ambiente**

**(a) Modo de falha local na alma e distorcional**



**(b) Modo de falha por flexão**



Fonte: (KIMURA, 2014)

Ainda em temperatura ambiente nos perfis do tipo caixão, o experimento de Kimura (2014) apresentou modo de falha local na alma e modo de falha local na mesa, conforme a Figura 10.

**Figura 10 - Modos de falha perfil tipo caixão, em temperatura ambiente**

**(a) Modo de falha local na alma**



**(b) Modo de falha local na mesa**



Fonte: (KIMURA, 2014)

Nos ensaios realizados em temperatura elevada assim como nos ensaios em temperatura ambiente o perfil I apresentou instabilidade local na alma em um dos perfis U, e também apresentou instabilidade distorcional do conjunto mesa-enrijecedor, as deformações sofridas pelo perfil I após ser submetido a temperaturas elevadas e os modos de falha podem ser vistos nas Figuras 11 e 12.



**Figura 11 - Deformações no perfil I após ser submetido a temperaturas elevadas.**



**Fonte: (KIMURA, 2014).**

**Figura 12 - Falha local na alma e distorcional no conjunto mesa-enrijecedor**



**Fonte: (KIMURA, 2014)**

O perfil caixão em temperatura elevada apresentou modo de falha distorciocional no perfil U comprimido, além do modo de falha local que também foi observado no ensaio à temperatura ambiente, o perfil caixão após ser submetido à temperatura elevada e os modos de falha podem ser observado nas Figuras 13 e 14 abaixo.

**Figura 13 - Deformações no perfil caixão após ser submetido à temperaturas elevadas**



Fonte: (KIMURA, 2014)

**Figura 14 - Falha local na alma e na mesa e distorcional conjunto mesa-enrijecedor**



Fonte: (KIMURA, 2014)

## 2.6 MÉTODOS DE CÁLCULO

Para o dimensionamento de estruturas em aço utilizando perfis formados a frio têm-se duas normas: ABNT NBR 14762:2010 para o dimensionamento em temperatura ambiente e ABNT NBR 14323:2013 para o dimensionamento em temperaturas elevadas.



A ABNT NBR 14323:2013 apresenta os métodos de cálculo simplificado e avançado para estruturas de aço em temperaturas elevadas utilizando perfis formados a frio, estes dois métodos são descritos abaixo.

## 2.6.1 MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO - ABNT NBR 14323:2013

Abaixo está apresentado o método de cálculo simplificado para estruturas com perfis formados a frio de acordo com a norma técnica ABNT NBR 14323:2013.

### 2.6.1.1 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Quando submetido à temperatura elevada o aço sofre alterações em suas propriedades, como redução no módulo de elasticidade e resistência ao escoamento. A ABNT NBR 14323 permite determinar a resistência de escoamento e módulo de elasticidade do aço quando exposto em temperaturas elevadas.

Para taxa de aquecimento entre 2 °C/min e 50 °C/min a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade em incêndio podem ser obtidos conforme apresentado nas Equações 10 e 11.

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} f_y \quad (10)$$

Onde

$f_{y,\theta}$  é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

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

$k_{y,\theta}$  é o fator de redução da resistência ao escoamento.

$$E_\theta = k_{E,\theta} E \quad (11)$$

Onde

$E_\theta$  é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura de 20 °C;

$K_{E,\theta}$  é o fator de redução do módulo de elasticidade.

Onde os valores dos fatores de redução podem ser obtidos a partir da temperatura do aço ( $\theta_a$ ) conforme apresentado nos Quadros 2 e 3 abaixo.

### 2.6.1.2 BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO – PERFIS NÃO SUJEITOS A FLAMBAGEM LOCAL

Para os perfis atendidos pela ABNT NBR 14762:2001, barras comprimidas não estão sujeitas a flambagem local em situação de incêndio quando os índices de esbeltez reduzidos ( $\lambda_p$ ) de todos os componentes da seção transversal ou da seção transversal completa não são superiores a  $0,85 \lambda_{p,lim}$ , onde o  $\lambda_{p,lim}$  é o máximo valor de  $\lambda_p$  a temperatura ambiente que não implica na redução recorrente da flambagem local.

Assim, pode se determinar a força axial resistente de cálculo em situação de incêndio para perfis que não estão sujeitos a flambagem local através da Equação 12.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (12)$$

Em que o fator de redução ( $\chi_{fi}$ ) associado à resistência à compressão em situação de incêndio pode ser obtido através das Equações 13, 14 e 15.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}} \quad (13)$$

Com

$$\varphi_{0,fi} = 0,5(1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) \quad (14)$$

E

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (15)$$

Em que o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio ( $\lambda_{0,fi}$ ) depende do índice de esbeltez à temperatura ambiente ( $\lambda_0$ ) determinado de acordo com o

comprimento de flambagem em situação de incêndio, e pode ser definido através da Equação 16.

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} \quad (16)$$

Para barras de aço axialmente comprimidas com perfis formados a frio sujeitos a flambagem distorcional, a força axial resistente de cálculo pode ser calculada através da equação abaixo, e deve ser menor que a obtida para perfis sujeitos a flambagem local, obtida através da Equação 17.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{dist} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (17)$$

Onde o fator de redução da força axial de compressão resistente ( $\chi_{dist}$ ), associado à flambagem distorcional é calculado conforme a ABNT NBR 14762:2010.

### 2.6.1.3 BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO – PERFIS SUJEITOS A FLAMBAGEM LOCAL

Para os perfis previstos pela a ABNT NBR 14762:2001, que em situação de incêndio apresentam flambagem local a força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{fi,Rd}$ ) considerando o estado-limite último de instabilidade da barra como um todo deve ser calculada através da Equação 18.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} A_{ef} f_y \quad (18)$$

O fator de redução associado à resistência a compressão ( $\chi_{fi}$ ), é determinado conforme a Equação 13, porem o índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ) deve ser determinado para a temperatura ambiente conforme a ABNT NBR 14762:2010.

A área efetiva ( $A_{ef}$ ) da seção transversal é obtida através da multiplicação da área bruta pelo fator de redução total (Q), com base no método das larguras efetivas ou das seções efetivas conforme a ABNT NBR 14762:2010.

O fator de redução ( $K_{\sigma,\theta}$ ) vem da relação da resistência ao escoamento em temperaturas elevadas com a resistência ao escoamento a 20 °C, ou através da temperatura pelo Quadro 2 abaixo.

**Quadro 2 - Fator de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local**

Temperatura do aço $\theta_a$ °C	Fator de redução <sup>a</sup> $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000
100	1,000
200	0,890
300	0,780
400	0,650
500	0,530
600	0,300
700	0,130
800	0,070
900	0,050
1 000	0,030
1 100	0,020
1 200	0,000

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: (ABNT NRB 14323:2013)

Para barras de aço axialmente comprimidas com perfis formados a frio, sujeitos a flambagem distorcional, a força axial resistente de cálculo é obtida através da equação abaixo e deve ser menor que a força axial de compressão resistente de cálculo obtida através da Equação 19.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{dist} k_{\sigma,\theta} A_g f_y \quad (19)$$

Onde o fator de redução da força axial de compressão resistente ( $\chi_{dist}$ ) deve ser calculado conforme previsto pela ABNT NBR 14762:2010.

#### 2.6.1.4 BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE TRAÇÃO

Para barras de aço tracionadas axialmente a força axial resistente de cálculo ( $N_{fi,Rd}$ ) para o estado-limite ultimo de escoamento da área bruta é determinado pela Equação 20.

$$N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A_g f_y \quad (20)$$

O fator de redução ( $K_{y,\theta}$ ) é obtido através da relação da resistência ao escoamento em temperaturas elevadas com a resistência ao escoamento a 20 °C, ou através da temperatura pelo Quadro 3 abaixo.

**Quadro 3 - Fatores de redução**

Temperatura do aço $\theta_a$ °C	Fator de redução da resistência ao escoamento <sup>a</sup> $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade <sup>a</sup> $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: (ABNT NRB 14323:2013)

### 2.6.1.5 BARRAS SUBMETIDAS A MOMENTO FLETOR E FORÇA CORTANTE

Em barras de aço com perfis formados a frio o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio é determinado pela Equação 21.

$$M_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} W_{c,ef} f_y \quad (21)$$

Onde

$W_{c,ef}$  é o módulo resistente elástico da seção transversal efetiva em relação às fibras extremas comprimidas;

$\chi_{fi}$  é o fator de redução associado à resistência a compressão, obtido conforme a Equação 13, porem fazendo:

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} \quad (22)$$

A força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio é determinada conforme as equações abaixo.

Para a seguinte condição a força cortante é determinada pela Equação 23.

$$\frac{h}{t} \leq 1,08 \left( \frac{k_{E,\theta} E k_v}{k_{y,\theta} f_y} \right)^{0,5}$$

$$V_{fi,Rd} = 0,6 \frac{k_{y,\theta} f_y h t}{\gamma} \quad (23)$$

Para a condição abaixo a força cortante é determinada pela Equação 24.

$$1,08 \left( \frac{k_{E,\theta} E k_v}{k_{y,\theta} f_y} \right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,40 \left( \frac{k_{E,\theta} E k_v}{k_{y,\theta} f_y} \right)^{0,5}$$

$$V_{fi,Rd} = \frac{0,65 t^2 (k_{y,\theta} f_y)^{0,5}}{\gamma} \quad (24)$$

Para a condição abaixo a força cortante é determinada pela Equação 25.

$$\frac{h}{t} > 1,40 \left( \frac{k_{E,\theta} E k_v}{k_{y,\theta} f_y} \right)^{0,5}$$

$$V_{fi,Rd} = \frac{\left[ \frac{0,905 k_{y,\theta} f_y t^3}{h} \right]}{\gamma} \quad (25)$$

Onde  $\gamma=1,10$  para todas as condições apresentadas.

### 2.6.1.6 ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO

Para elementos estruturais pertencentes a estruturas internas sem revestimento contra fogo, a elevação da temperatura ( $\Delta\theta_{a,t}$ ), em graus Celsius, para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , em segundos, é determinada através da Equação 26.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{\left(\frac{u}{A_g}\right)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (26)$$

O fator de correção para o efeito de sombreamento ( $k_{sh}$ ) neste caso (perfil U) deve ser tomado como 1,0, para perfis I ou H ele pode ser determinado conforme a ABNT NBR 14323:2013. O fator de massividade ( $u/A_g$ ) é definido pela relação do perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural e a área bruta da seção transversal do elemento estrutural. A massa específica ( $\rho_a$ ) do aço pode ser definida como  $7850 \text{ kg/m}^3$  independente da temperatura. O calor específico ( $c_a$ ) do aço pode ser determinado de acordo com a temperatura do aço ou pode ser considerado de forma simplificada,  $600 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$  independente da temperatura do aço.

O intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), expresso em segundos, não deve ser tomado como maior que 5 segundos ao se usar a Equação 26, pois o fator de massividade não pode ser tomado como menor que  $10 \text{ m}^{-1}$ .

O fluxo de calor por unidade de área, expresso em watts por metro quadrado, é determinado conforme a Equação 27.

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (27)$$

Onde o fluxo de calor devido à convecção ( $\varphi_c$ ) é determinado pela Equação 28 e o fluxo de calor devido à radiação ( $\varphi_r$ ) pela Equação 29.

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (28)$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[ (\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right] \quad (29)$$

Onde o coeficiente de transferência de calor ( $\alpha_c$ ) pode ser tomado para efeitos práticos, como  $25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , para o caso de incêndio padrão, ou  $35 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , para o caso de incêndio natural. A temperatura dos gases ( $\theta_g$ ) é definida conforme expresso na Seção 2.2, e ( $\theta_a$ ) é a temperatura na superfície do aço. A emissividade resultante ( $\epsilon_{res}$ ), para efeitos práticos pode ser tomada igual 0,7.

## 2.6.2 MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO - ABNT NBR 14323:2013

Métodos avançados de dimensionamento são os métodos que propõem uma análise real da estrutura e do cenário do incêndio. Estes métodos podem incluir modelos separados para a análise térmica e para a análise estrutural.

O modelo para análise térmica é baseado nos princípios da transferência de calor a partir do desenvolvimento e da distribuição da temperatura nas peças estruturais considerando as ações térmicas e a variação das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura.

O modelo para análise estrutural refere-se ao comportamento mecânico da estrutura ou de alguma de suas partes e, é baseado nos princípios da mecânica dos sólidos, considerando as alterações das propriedades mecânicas devido à elevação da temperatura. Este modelo deve considerar os efeitos combinados de ações mecânicas, as propriedades do material com o aumento da temperatura, os efeitos da não linearidade geométrica e os efeitos da não linearidade do material.

A validação dos métodos avançados de dimensionamento deve ser feita com base em resultados confiáveis, que devem ser conferidos rigorosamente para que não contrariem os princípios básicos da engenharia. Os métodos verificados devem ao mínimo referirem-se as temperaturas, aos descolamentos e os TRRF.



### 3 METODOLOGIA

Este trabalho é composto por uma investigação exploratória de análise numérica e verificação dos procedimentos normativos para o dimensionamento de estruturas de aço com perfis U formados a frio em condição de incêndio.

Para isto foi realizada uma pesquisa bibliográfica referente ao tema e um levantamento das principais normas técnicas nacionais e internacionais e seus principais métodos de cálculo para dimensionamento de estruturas de aço com perfis formados a frio em situação de incêndio.

O planejamento do trabalho se deu em etapas, primeiramente foi definida a estrutura a ser analisada e o material dos perfis. Após foi realizada uma verificação para ver se a estrutura não apresenta falhas em temperatura ambiente, conforme a ABNT NBR 14762:2010 e então, a estrutura será analisada a partir do método simplificado de cálculo, que se refere à aplicação da solução analítica, conforme a ABNT NBR 14323:2013 com auxílio da ABNT NBR 14762:2010.

Em seguida a análise foi realizada através do método de cálculo avançado, que propõe uma análise real da situação e seu cenário, para este método será realizado uma análise via método dos elementos finitos com auxílio do *software* computacional ANSYS.

Por fim, foi realizado um estudo comparativo do comportamento da estrutura entre os resultados obtidos através do método de cálculo simplificado e do método de cálculo avançado.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

O primeiro passo para a realização deste trabalho foi a determinação da estrutura para estudo. A estrutura foi definida como um galpão constituído por pórticos treliçados com duas águas e as seguintes características:

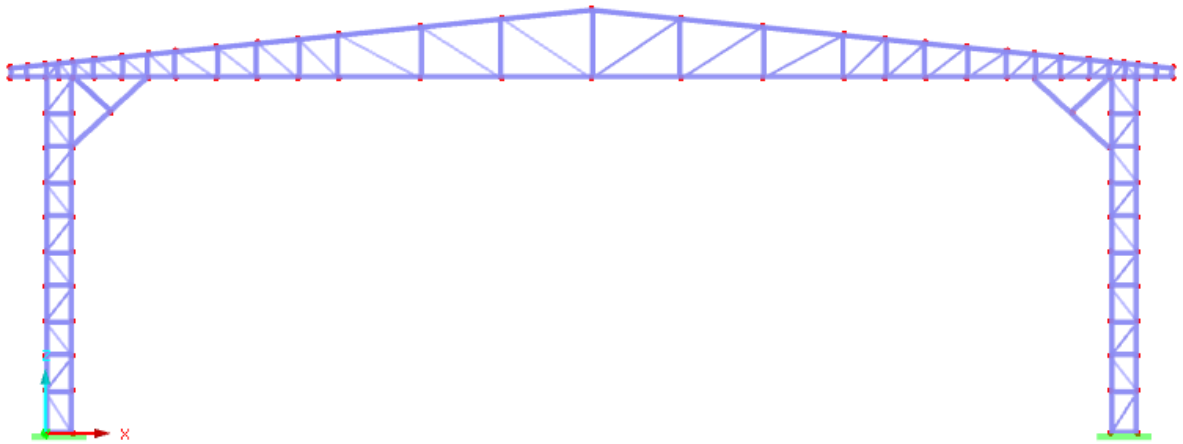
- Localização da estrutura: Pato Branco, Paraná;
- Comprimento: 25 metros;
- Largura: 20 metros;
- Altura: 6,5 metros;

- Espaçamento entre pórticos: 5 metros.

A estrutura foi analisada sem revestimento de proteção contra incêndio, uma vez que a maioria destes galpões não contam com a proteção.

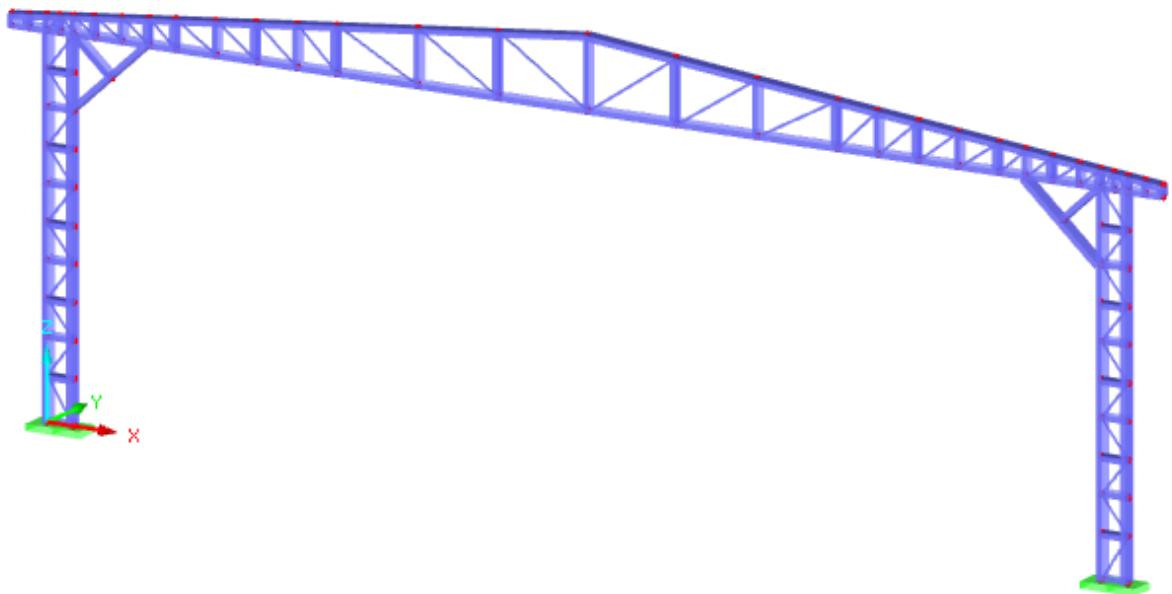
A estrutura dos pórticos pode ser vista nas Figuras 15 e 16, o desenho foi obtido com auxílio do *software* RFEM- Dlubal em sua versão demonstrativa.

**Figura 15 - Pórtico - Vista frontal**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

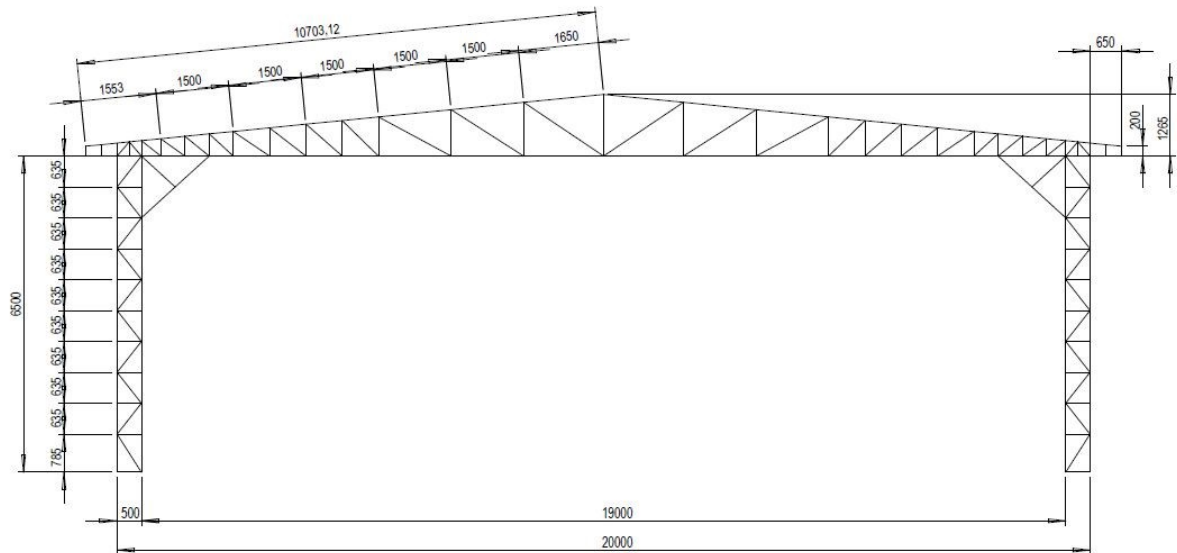
**Figura 16 - Pórtico - Vista Isométrica**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

As dimensões do pórtico estão ilustradas na Figura 17, o desenho foi obtido com auxílio do *software* SolidWorks.

**Figura 17 - Dimensões do pórtico em milímetros (mm)**



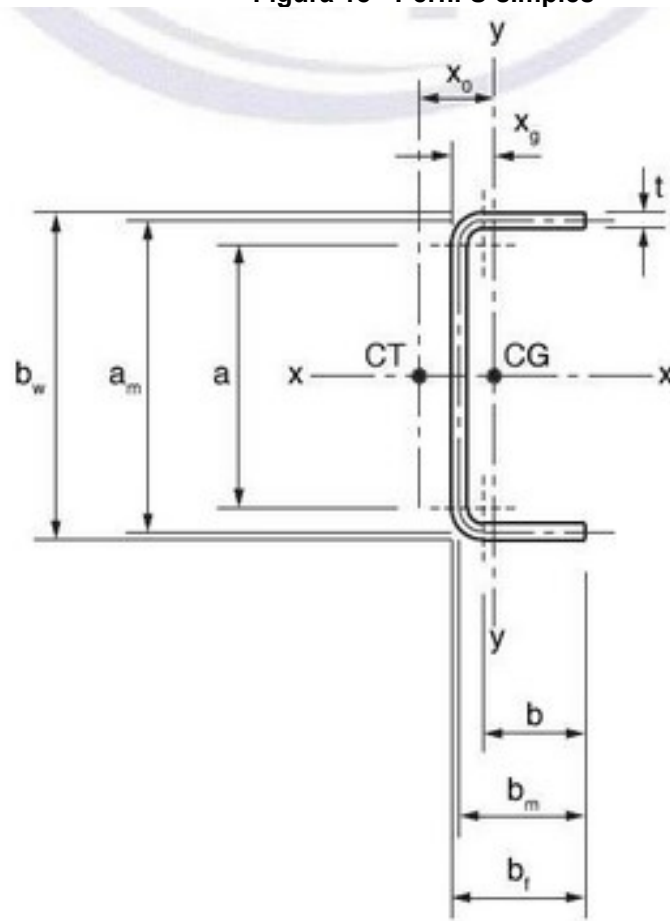
**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

### 3.2 DETERMINAÇÃO DO PERFIL E MATERIAL

Foram adotados perfis U formados a frio, a escolha se motivou por ser um perfil bastante comum em estruturas metálicas compostas por pórticos treliçados e não ser estudado em situações de incêndio. Foram utilizados três tipos de perfis na estrutura os perfis U 250x100x8,00; U 200x100x8,00 e o perfil L 50x3,75, os perfis foram selecionados de acordo com a ABNT NBR 6355:2012, e podem ser vistos nas Figuras 18 e 19 abaixo.

As principais dimensões dos perfis obtidas na norma estão apresentadas nos Quadros 4 e 5.

Figura 18 - Perfil U simples



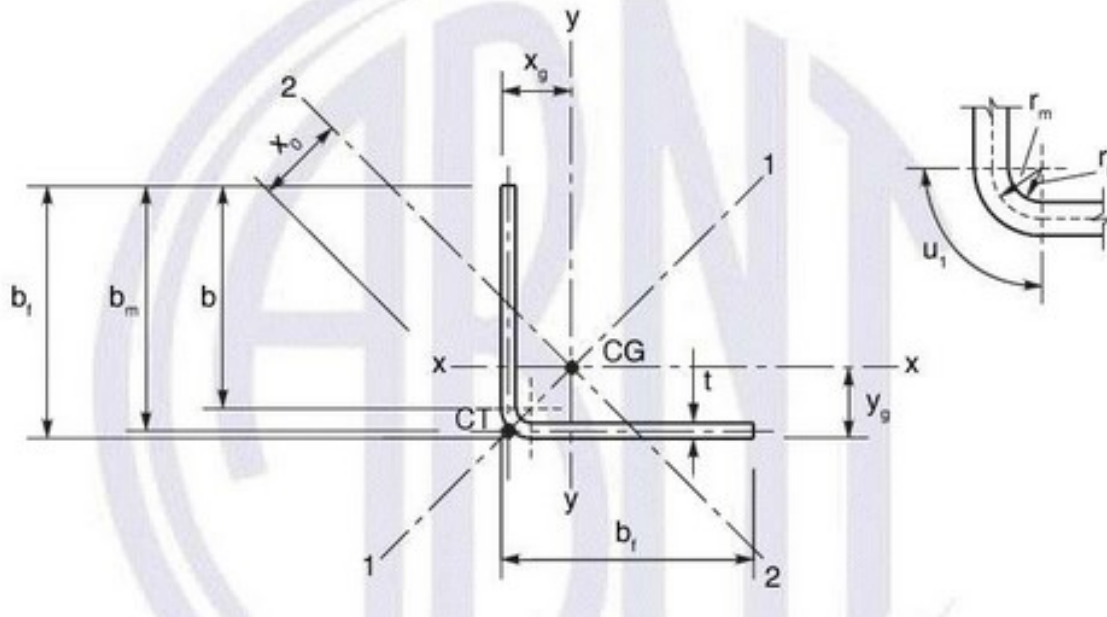
Fonte: (ABNT NBR 6355:2012)

Quadro 4 - Dimensões perfil U

Perfil			Eixo X			Eixo y					
	m (kg/m)	A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	r <sub>x</sub> (cm)	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	r <sub>y</sub> (cm)	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	C <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	r <sub>o</sub> (cm)
200X100X8,00	23,25	29,62	1783,03	178,3	7,76	286,79	40,39	3,11	6,613	19025,36	10,35
250X100X8,00	26,39	33,62	3031,02	242,48	9,49	308,79	41,74	3,03	7,165	32599,97	11,42

Fonte: (ABNT NBR 6355:2012)

Figura 19 - Perfil cantoneira



Fonte: (ABNT NBR 6355:2012)

Quadro 5 - Dimensões perfil cantoneira

Perfil			Eixo x/Eixo y					
	L	m (kg/m)	A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> =I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> =W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	r <sub>x</sub> =r <sub>y</sub> (cm)	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	C <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )
50X3,75	2,76	3,52	8,53	2,39	1,56	0,16	0	2,81

Fonte: (ABNT NBR 6355:2012)

O material dos perfis foi selecionado um aço estrutural CF26 através da norma ABNT NBR 6649:1999, com as propriedades apresentadas na Tabela 1. A escolha deste material se motivou pela resistência ao escoamento, este valor é o mínimo para um aço ser considerado aço estrutural.

Tabela 1 – Propriedades Físicas do Aço à Temperatura Ambiente

Propriedades Mecânicas do Aço à Temperatura Ambiente	
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3
Massa Específica ( $\rho$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade (E)	200 GPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G)	77 GPa
Resistência a Ruptura ( $f_u$ )	400 Mpa
Resistência ao Escoamento ( $f_y$ )	260 Mpa
Coefficiente de Expansão Térmica ( $\alpha$ )	1,2X10 <sup>-5</sup> 1/C°

Fonte: (ABNT NBR 6649:1999)

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

Para fazer a verificação do comportamento da estrutura em situação de incêndio primeiramente deve ser verificado se a estrutura resiste à temperatura ambiente, para isso foi determinado os esforços presentes na estrutura que são os das cargas: permanente (peso próprio), acidental, sobrecarga e variável (vento e temperatura).

Para a carga de vento foram adotados dois casos, vento a 0° e vento a 90°. Os cálculos da carga de vento foram obtidos a partir do *software* Visual Ventos, e podem ser vistos detalhadamente no apêndice A.

Após então deve se determinar as combinações possíveis na estrutura, para isso devem ser determinados os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação adotados. Esses valores foram determinados conforme a NBR 8681:2003.

Os coeficientes de ponderação são:

- Peso próprio da estrutura metálica:  $\gamma_g=1,25$ ;
- Ações variáveis (vento):  $\gamma_q=1,40$ ;
- Ações variáveis (sobrecarga):  $\gamma_q=1,50$ .
- 

Os fatores de combinação são:

- Vento:  $\psi_0=0,6$
- Sobrecarga:  $\psi_0=0,8$

Com isso é determinado às combinações de ações últimas normais através da Equação 30, de acordo com a ABNT NBR 14762:2010.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + (\gamma_{q1} F_{Q1,k}) + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (30)$$

Onde

$F_{Gi,k}$  são os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$  representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

### 3.4 VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA AMBIENTE

Para verificar a estrutura em situação de incêndio deve primeiramente verificar se a estrutura não apresenta falha em temperatura ambiente. Assim, primeiramente foi verificado seu comportamento em temperatura ambiente de acordo com a ABNT NBR 14762:2010 que prevê o dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

As verificações de cargas e esforços atuantes na estrutura, bem como se os perfis selecionados suportam os carregamentos em temperatura ambiente foram realizados com auxílio do *software* Dlubal RFEM e também verificado analiticamente de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, os resultados obtidos bem como a verificação detalhada estão apresentadas no apêndice B.

### 3.5 DIMENSIONAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Para verificar a segurança estrutural em situação de incêndio primeiramente deve se determinar o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), este tempo foi determinado pelo método tabular conforme a ABNT NBR 14432:2001, que depende da ocupação da estrutura, área de pavimento e altura da edificação.

Então, foi selecionado o modelo de incêndio padrão para o estudo e realizada a verificação do comportamento da estrutura em situação de incêndio conforme o método simplificado da ABNT NBR 14762:2010 apresentados na Seção 2.6 acima e os cálculos detalhados no apêndice C.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA AMBIENTE

Para verificar a estrutura em temperatura ambiente foi considerado apenas os casos críticos das cargas de vento, tanto para vento a 0° quanto para vento a 90°, determinadas no apêndice A. Assim, os carregamentos presentes na estrutura estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Carregamentos atuantes na estrutura**

<b>Carregamento</b>	<b>Carga (kN/m)</b>
Acidental	0,250
Paredes Vento 0°	-3,23
Paredes Vento 90°	4,04 e -1,62
Peso Próprio	0,267
Sobrecarga	0,240
Telhado Vento 0°	-3,23
Telhado Vento 90°	-4,17 e -1,62

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

As combinações de carga obtidas a partir da Equação 30 combinando os valores apresentados na Tabela 2 e os coeficientes de ponderações apresentados acima se tem então, demonstrados na Tabela 3 os valores para ações ultimas normais.



**Tabela 3 - Combinações de ações últimas normais**

<b>Combinação</b>	<b>Carregamento</b>
1	1,25.PP
2	1,25.PP+1,50.SC
3	1,25.PP+1,00.AC
4	1,25.PP+1,40.V <sub>0°</sub>
5	1,25.PP+1,40.V <sub>90°</sub>
6	1,25.PP+1,50.SC+1,00 AC
7	1,25.PP+1,50.SC+1,40.V <sub>0°</sub>
8	1,25.PP+1,50.SC+1,40.V <sub>90°</sub>
9	1,25.PP+1,50.(0,8).SC+1,40.V <sub>0°</sub>
10	1,25.PP+1,50.(0,8).SC+1,40.V <sub>90°</sub>
11	1,25.PP+1,50.SC+1,40.(0,6).V <sub>0°</sub>
12	1,25.PP+1,50.SC+1,40.(0,6).V <sub>90°</sub>
13	1,25.PP+1,50.SC+1,40.V <sub>0°</sub> +1,00.AC
14	1,25.PP+1,50.SC+1,40.V <sub>90°</sub> +1,00.AC
15	1,25.PP+1,50.(0,8).SC+1,40.V <sub>90°</sub> +1,00.AC
16	1,25.PP+1,50.(0,8).SC+1,40.V <sub>0°</sub> +1,00.AC
17	1,25.PP+1,50.SC+1,40.(0,6).V <sub>0°</sub> +1,00.AC
18	1,25.PP+1,50.SC+1,40.(0,6).V <sub>90°</sub> +1,00.AC

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Onde

PP corresponde ao Peso Próprio;

SC corresponde a Sobrecarga;

AC corresponde a Carga Acidental;

V<sub>0°</sub> corresponde ao Vento a 0°;

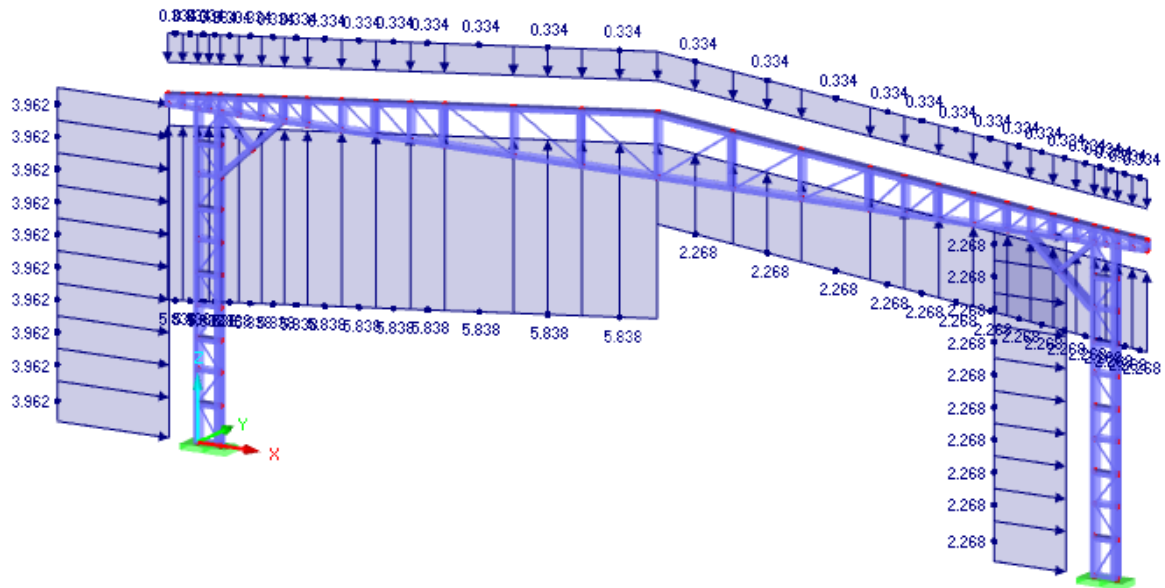
V<sub>90°</sub> corresponde ao Vento a 90°.

Aplicando os carregamentos da Tabela 2 e as combinações de carga da Tabela 3 na estrutura com o auxílio do *software* Dlubal RFEM foi possível determinar o comportamento da estrutura mediante as cargas e verificar se os perfis selecionados suportam as cargas aplicadas em temperatura ambiente, para então realizar a verificação em situação de incêndio.

A partir dos valores obtidos pelo software foi selecionado o caso crítico de combinação de carga e com os valores obtidos foi comprovada a verificação de que os perfis selecionados não apresentam falhas em temperatura ambiente, a verificação passo a passo conforme a ABNT NBR 14762:2010 está apresentada no apêndice A.

O caso crítico de cargas foi o caso 5, ou seja, o caso que apresentou maiores esforços solicitantes, está apresentado na Tabela 3 e demonstrado na Figura 20.

**Figura 20 - Caso crítico de combinação de cargas**

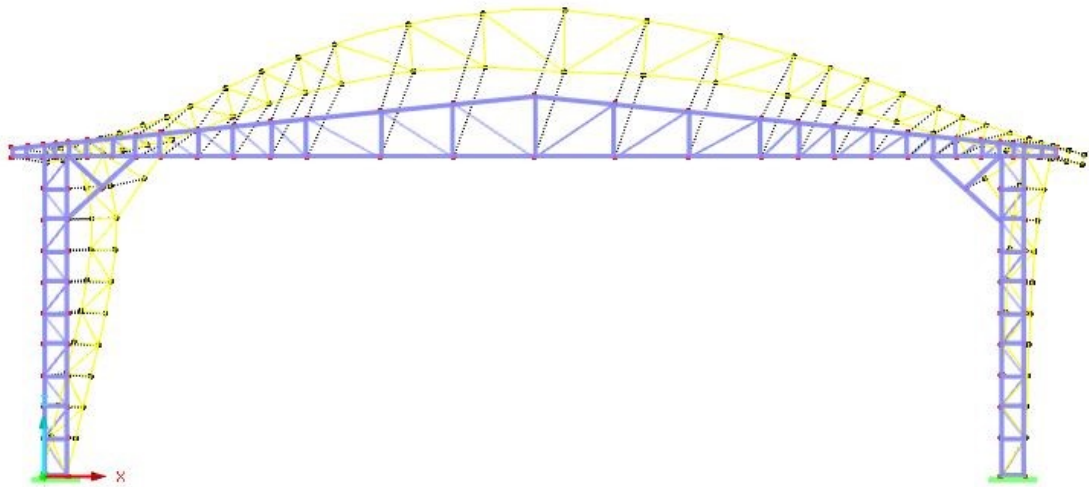


**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Com a combinação de carga crítica demonstrada na Figura 20, a deformação total apresentada pela estrutura quando em temperatura ambiente para os esforços solicitantes esta apresentada na Figura 21.

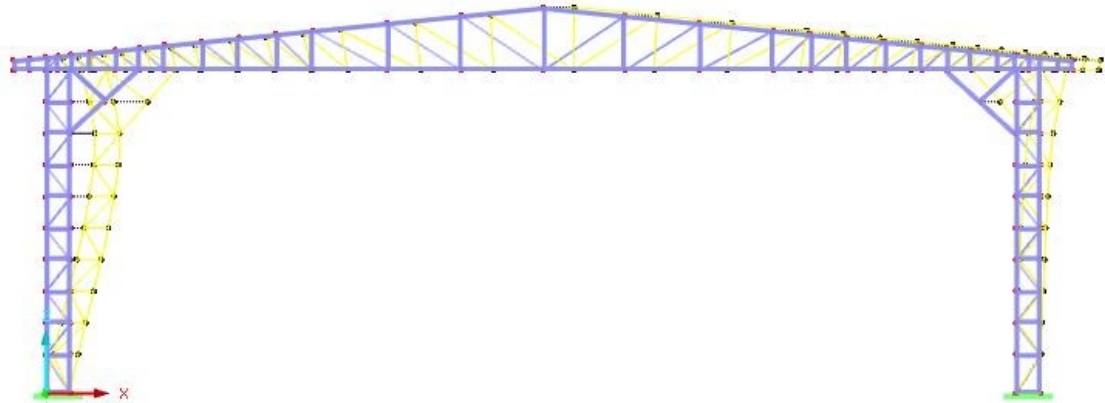
As deformações em torno do eixo x, eixo y e eixo z devido aos esforços estão apresentadas nas Figuras 22, 23 e 24 respectivamente.

**Figura 21 - Deformação total em temperatura ambiente**



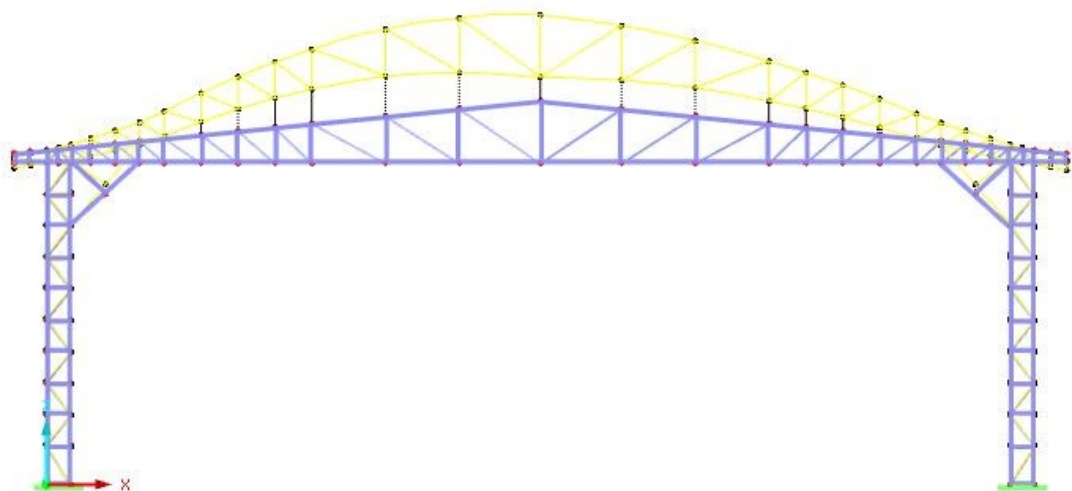
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 22 - Deformação em torno do eixo x em temperatura ambiente**



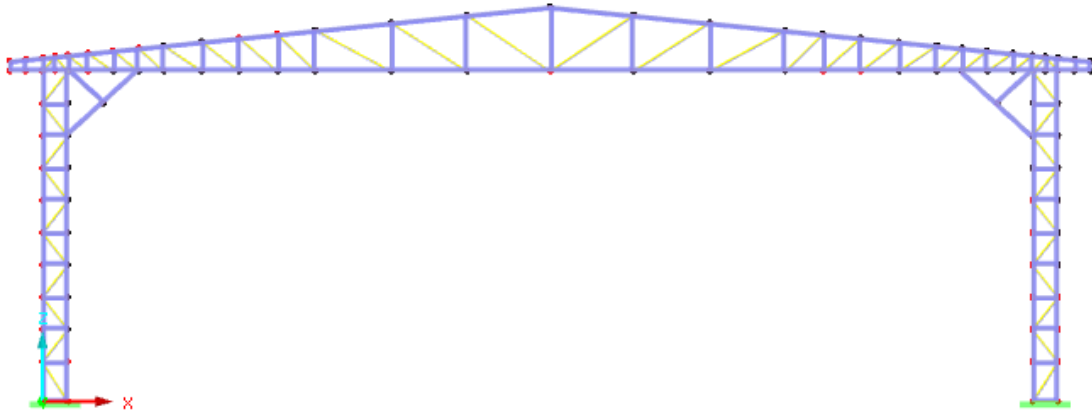
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 23 - Deformação em torno do eixo y em temperatura ambiente**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 24 - Deformação em torno do eixo z em temperatura ambiente**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

O caso crítico de cargas demonstrado na Figura 20 apresentou as deformações exibidas na Tabela 4 e os valores solicitantes de cálculo apresentados na Tabela 5.

**Tabela 4 - Deformação em temperatura ambiente**

Deformação	Máximo (mm)	Mínimo (mm)
Total	13,80	0,00
Direcional eixo x	7,10	0,00
Direcional eixo y	13,10	-1,10
Direcional eixo z	0,00	0,00

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

**Tabela 5 - Esforços solicitantes de cálculo em temperatura ambiente**

Esforços Solicitantes de cálculo	Carga
$M_{Sd}$	4,50 kN.m
$N_{c,Sd}$	155,97 kN
$N_{t,Sd}$	62,02 kN
$V_{Sd}$	15,55 kN

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

A partir da NBR 14762:2010, que prevê o dimensionamento de estruturas de aço com perfis formados a frio em temperatura ambiente é então possível determinar os esforços resistentes de cálculo atuantes na estrutura exibidos na Tabela 6, os cálculos detalhados estão apresentados no apêndice B do presente trabalho.

**Tabela 6 - Esforços resistentes de cálculo em temperatura ambiente**

Esforços Resistentes de cálculo	Carga
$M_{Rd}$	57,313 kN.m
$N_{c,Rd}$	337,389 kN
$N_{t,Rd}$	794,655 kN
$V_{Rd}$	278, 858 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Conforme determinado pela norma em questão para que a estrutura não apresente falha devido aos esforços devem ser satisfeitas as seguintes condições:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

Como pode ser visto nos valores apresentados nas Tabelas 5 e 6 todas as condições apresentadas são satisfeitas, portanto a estrutura não apresenta falha em temperatura ambiente devido aos esforços solicitantes e os perfis selecionados podem ser utilizados.

Vale ressaltar que conforme disposto pela norma perfis com seção U simples não são passíveis de flambagem distorcional, deste modo estes perfis não necessitam de verificação para este caso.

#### 4.2 COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA ELEVADA – MÉTODO SIMPLIFICADO

Para verificar o comportamento da estrutura em situação de incêndio será utilizado o modelo de incêndio padrão, apresentado na Seção 2.2.2, pois é o modelo previsto na norma brasileira.

Para o estudo foi determinada a ocupação do galpão como sendo comercial varejista, conforme determinado pela ABNT NBR 14432:2000 foi determinada a ocupação como sendo classe C-2, lojas de departamento ou centro de compras com carga específica de incêndio de 600 MJ/m<sup>2</sup>.

Deste modo foi determinado pelo Quadro 1 apresentado na Seção 2.2.3 segundo a ABNT NBR 14432:2000 que o TRRF=60 minutos, ou seja, o tempo mínimo que a estrutura deve resistir ao fogo. Então, a partir da Equação 2 foi possível determinar a temperatura dos gases  $\theta_g = 945,34$  °C.

Após foi determinado o fator de massividade e então a temperatura do aço ( $\theta_a$ ) conforme a Equação 26 para o TRRF 60, a partir destes valores foi possível realizar as verificações necessárias. Na Tabela 7 estão apresentados os valores obtidos de temperatura do aço para o fator de massividade de  $153,48 \text{ m}^{-1}$  e a temperatura dos gases ( $\theta_g$ ).

**Tabela 7 - Temperatura do aço**

**Fator de massividade =  $153,48 \text{ (m}^{-1}\text{)}$**

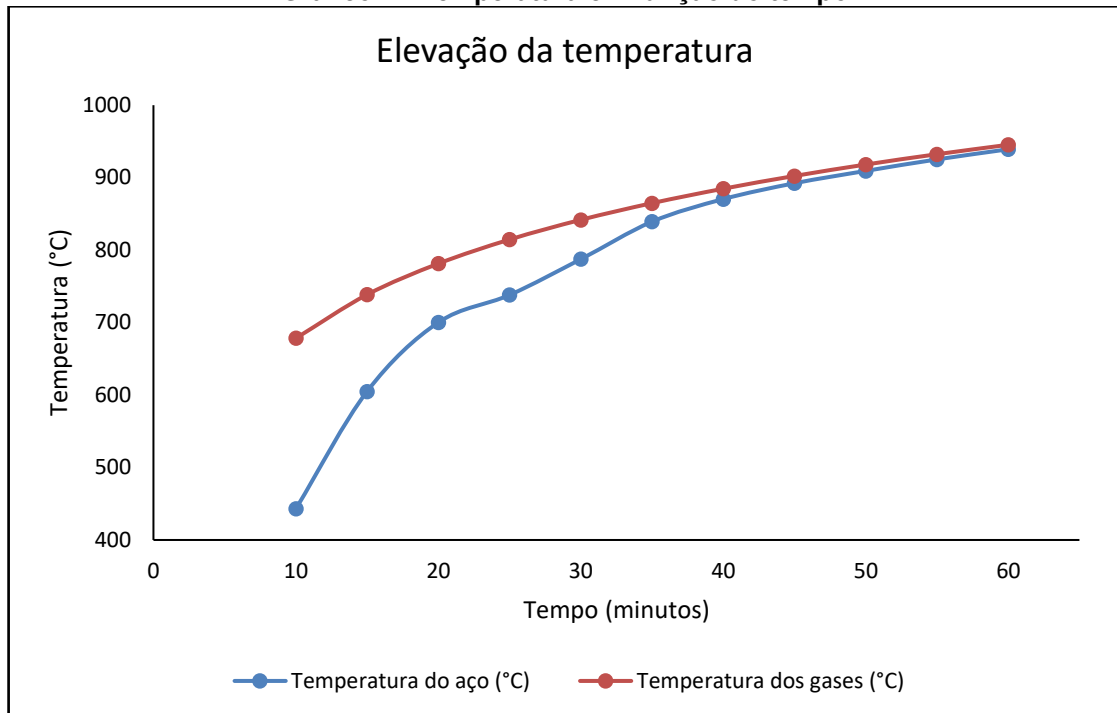
<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura do aço (°C)</b>	<b>Temperatura dos gases (°C)</b>
10	443,15	678,43
15	605,04	738,56
20	700,23	781,35
25	738,11	814,60
30	787,51	841,80
35	839,25	864,80
40	870,42	884,74
45	892,28	902,34
50	909,28	918,08
55	925,14	932,33
60	939,14	945,34

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Para determinar os valores da temperatura do aço ( $\theta_a$ ) apresentados na Tabela 7 o tempo (t) na Equação 26 foi utilizado em segundos e foi iniciado em zero e seguiu um padrão com um  $\Delta t$  de 5 segundos, porém na Tabela 7 estão apresentados apenas alguns valores considerados mais importantes. Para determinar a temperatura dos gases ( $\theta_g$ ) foi utilizada a Equação 2, para este caso o tempo (t) é utilizado em minutos.

O Gráfico 1 apresenta a elevação da temperatura do aço e dos gases em função do tempo para um fator de massividade de  $153,48 \text{ m}^{-1}$ , quando exposto ao incêndio padrão.

Gráfico 1 - Temperatura em função do tempo



**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Assim como para temperatura ambiente, os perfis estão isentos da flambagem distorcional em situação de incêndio. Então, conforme a ABNT NBR 14323:2013 os esforços solicitantes de cálculo devem ser menores ou iguais que os esforços resistentes de cálculo, conforme apresentado abaixo.

$$N_{fi,Sd} \leq N_{fi,Rd}$$

$$N_{fi,Sd} \leq N_{fi,Rd}$$

$$V_{fi,Sd} \leq V_{fi,Rd}$$

$$M_{fi,Sd} \leq M_{fi,Rd}$$

Aplicando o método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 obteve-se os esforços resistentes de cálculo apresentados na Tabela 8 para a temperatura de 939,14 °C, o cálculo detalhado da obtenção dos valores apresentados encontra-se no apêndice C.

**Tabela 8 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 939,14 °C**

<b>Esforços Resistentes de cálculo</b>	<b>Carga</b>
$M_{fi,Rd}$	2,08 kN.m
$N_{fi,Rd}$ (compressão)	10,284 kN
$N_{fi,Rd}$ (tração)	45,454 kN
$V_{fi,Rd}$	15,607 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Os esforços solicitantes de cálculo para situação de incêndio conforme previsto na ABNT NBR 14323:2013 podem ser considerados da seguinte maneira, 20% no valor dos esforços em temperatura ambiente devido às ações do vento, e 70% dos esforços permanentes, assim na Tabela 9 estão apresentados os esforços solicitantes de cálculo em situação de incêndio.

**Tabela 9 - Esforços solicitantes de cálculo em temperatura elevada**

<b>Esforços Solicitantes de cálculo</b>	<b>Carga</b>
$M_{fi,Sd}$	3,78 kN.m
$N_{fi,Sd}$ (compressão)	131,01 kN
$N_{fi,Sd}$ (tração)	52,09 kN
$V_{fi,Sd}$	13,06 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Ao verificar as condições, a estrutura apresenta falha quando exposta a temperatura de 939,14 °C devido à força axial de tração no pilar direito, a força axial de compressão no pilar esquerdo, devido momento fletor e a força cortante ambos no pilar esquerdo, ou seja, o perfil selecionado suporta os esforços quando em temperatura ambiente, quando exposto ao incêndio por 60 minutos o perfil apresentará falha.

Reduzindo o TRRF para 30 minutos, a temperatura do aço ( $\theta_a$ ) conforme a Tabela 7 será de 787,51 °C, realizando a verificação proposta pelo método simplificado se obteve os resultados apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 787,51 °C**

<b>Esforços resistentes de cálculo</b>	<b>Carga</b>
$M_{fi,Rd}$	3,818 kN.m
$N_{fi,Rd}$ (compressão)	24,721 kN
$N_{fi,Rd}$ (tração)	109,265 kN
$V_{fi,Rd}$	37,518 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**



Com a redução de tempo e conseqüentemente da temperatura do aço o perfil nesta condição ainda apresenta falha, mas neste caso devido a força axial de compressão no pilar esquerdo.

O procedimento de análise aplicado nas situações acima foi feito para um TRRF de 20 minutos e uma temperatura do aço ( $\theta_a$ ) de 700,23 °C, e para um TRRF de 15 minutos e uma temperatura do aço ( $\theta_a$ ) de 605,04 °C, para ambos os casos a estrutura apresentou falha devido a força axial de compressão no pilar esquerdo.

Então, foi aplicado um TRRF de 10 minutos e uma temperatura do aço ( $\theta_a$ ) de 443,15 °C, neste caso ele apresentou os valores contidos na Tabela 11.

**Tabela 11 - Esforços resistentes de cálculo para temperatura de 443,15 °C**

Esforços resistentes de cálculo	Carga
$M_{fi,Rd}$	29,65 kN.m
$N_{fi,Rd}$ (compressão)	179,972 kN
$N_{fi,Rd}$ (tração)	795,449 kN
$V_{fi,Rd}$	273,131 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Verificando as condições, para um TRRF 10 com temperatura do aço de 443,15 °C a estrutura suporta os esforços solicitantes com os perfis selecionados. Neste caso, a temperatura dos gases obtida através da Equação 2 é de 678,43 °C.

Para a utilização determinada do galpão, comercial varejista, o TRRF é determinado pela norma como sendo de 60 minutos, portanto o projeto da estrutura teria que ser revisto para suportar este tempo quando exposto a temperaturas elevadas.

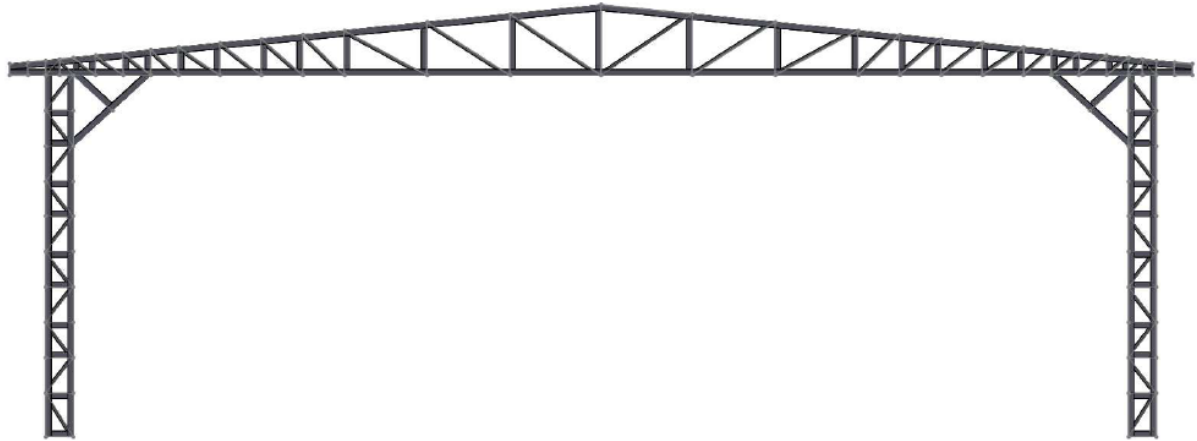
Segundo a NBR 14323:2013 a resistência do aço é reduzida em 50% quando expostas a temperaturas acima de 550 °C, realizando os procedimentos de cálculo para uma temperatura de 550 °C a estrutura não suporta a temperatura.

#### 4.3 COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EM TEMPERATURA ELEVADA – MÉTODO AVANÇADO

Para analisar o comportamento da estrutura em situação de incêndio através do método avançado, que sugere uma situação mais real primeiramente foi desenhada a estrutura em 3D no software SolidWorks, conforme ilustrado na Figura

25, então foi exportada para análise através do método dos elementos finitos no ANSYS.

**Figura 25 - Pórtico treliçado em 3D**



**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Conforme citado acima quando em situação de incêndio as propriedades do material sofrem alterações, para realizar a análise do comportamento da estrutura em incêndio foi necessário então determinar o módulo de elasticidade e resistência ao escoamento para temperatura estudada no TRRF 60.

Os valores da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade para a temperatura de 939,14 °C foram obtidos conforme a ANBT NBR 14323:2013 apresentado acima na Seção 2.6.1.1 e estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Propriedades do aço em temperatura elevada**

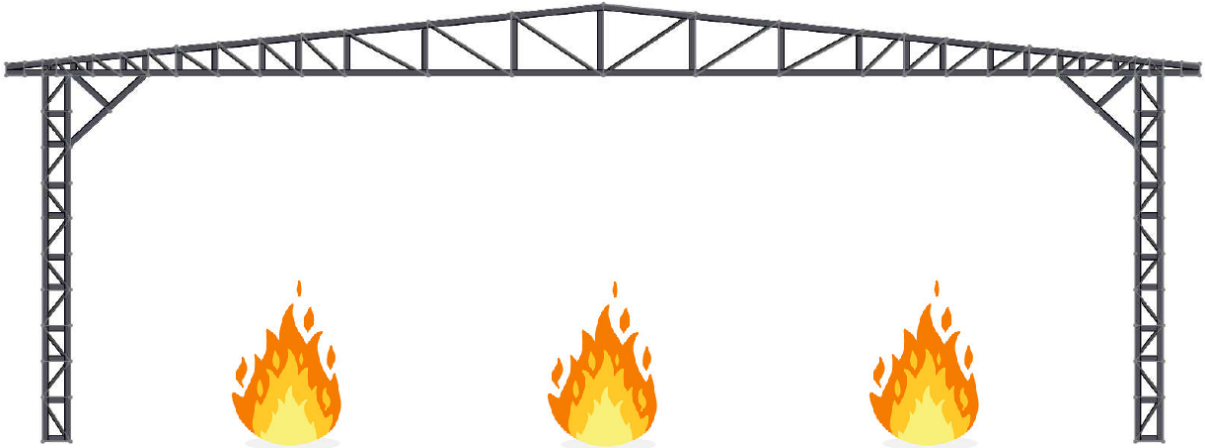
**Temperatura do aço de 939,14 °C**

Módulo de elasticidade ( $E_{\theta}$ )	11,8 GPa
Resistencia ao escoamento ( $f_{y,\theta}$ )	13,5 MPa

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)**

Para realizar a análise foi considerado que o incêndio se inicia na parte interna da estrutura conforme demonstrado na Figura 26, deste modo, inicialmente o perfil está exposto ao incêndio apenas em uma face, conforme ilustrado na Figura 27.

**Figura 26 - Incêndio na parte interna da estrutura**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

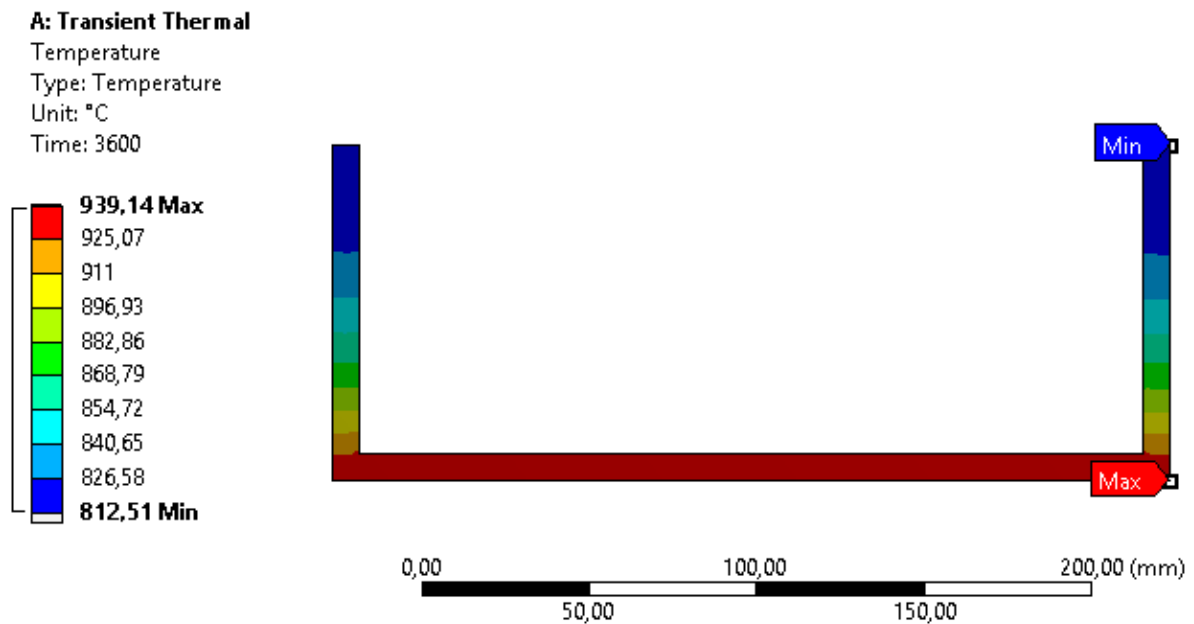
**Figura 27 - Face exposta ao incêndio**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

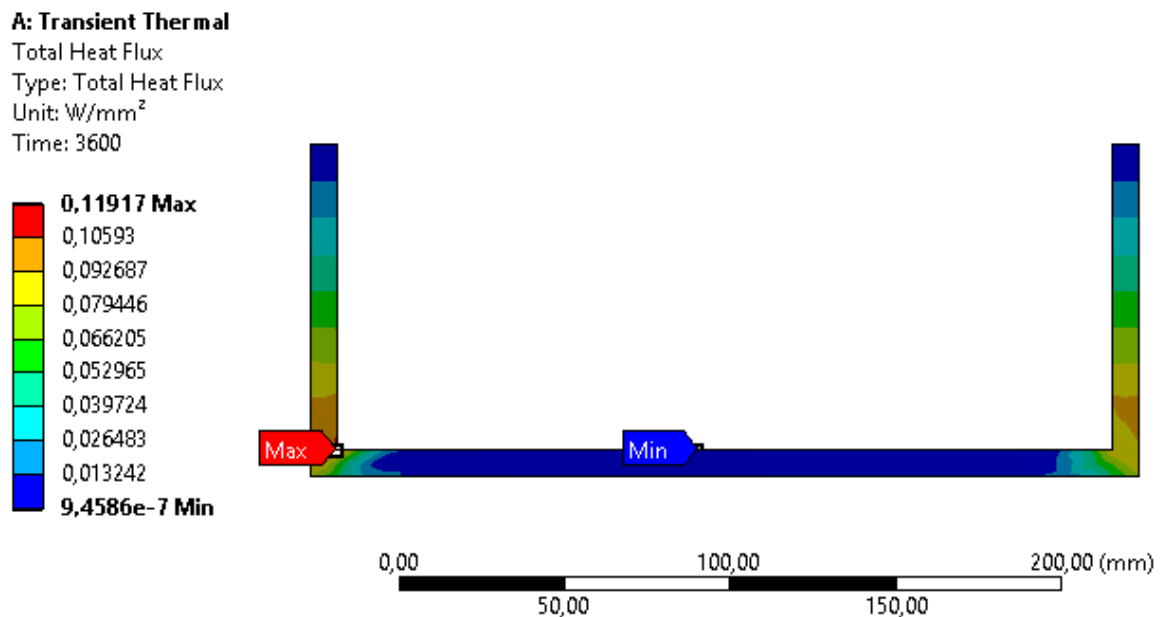
Deste modo, quando aplicada a temperatura apenas em uma face a distribuição de temperatura no perfil ocorre conforme ilustrado na Figura 28 e o fluxo de calor total conforme demonstrado na Figura 29.

Figura 28 - Distribuição de temperatura no perfil



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Figura 29 - Fluxo de calor total

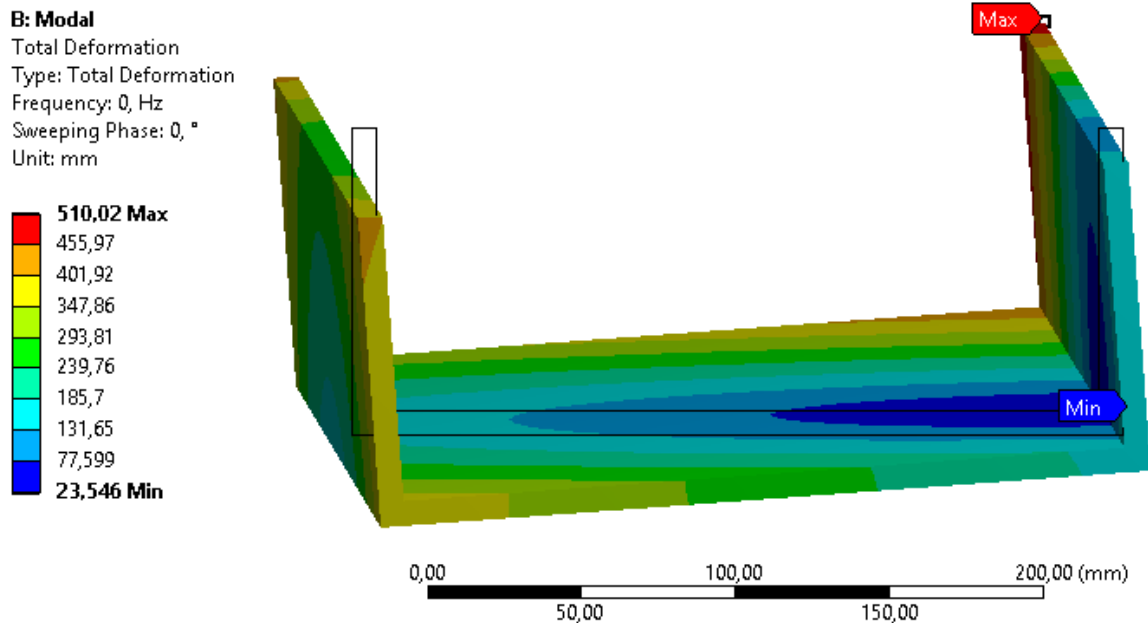


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

O fluxo de calor no perfil nas direções x, y e z, respectivamente, quando expostos a temperatura de 939,14 °C e TRRF 60 estão apresentados no apêndice D.

Quando o perfil é exposto de maneira uniforme em todo o corpo a temperatura de 939,14 °C em um tempo de 60 minutos, com o módulo de elasticidade e resistência ao escoamento apresentados na Tabela 12, a deformação total está ilustrada na Figura 30 e a deformação direcional nos eixos x, y e z apresentadas no apêndice D.

**Figura 30 - Deformação total do perfil**

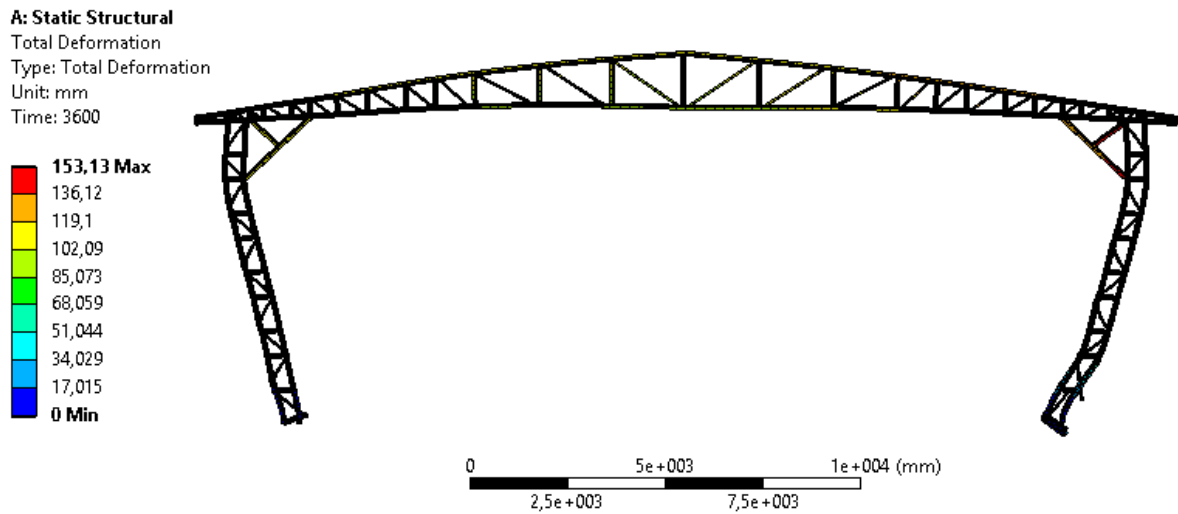


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Após visualizar como o calor age no perfil foi então, adicionado à estrutura no ANSYS o carregamento crítico apresentado na Tabela 3 e as condições de temperatura, 939,14 °C para um TRRF de 60 minutos.

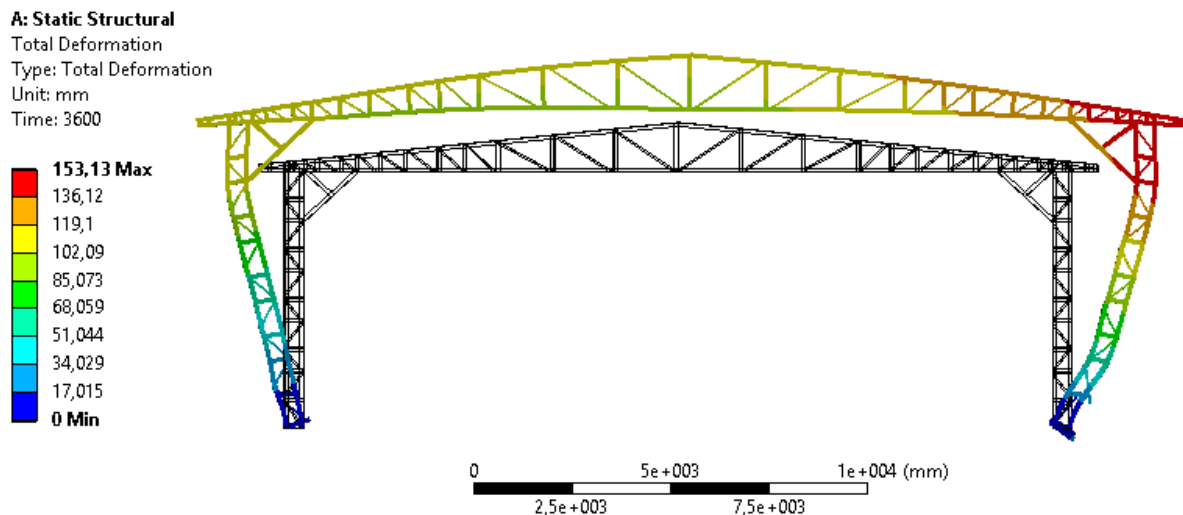
Então, pode se analisar o comportamento da estrutura, na Figura 31 tem se a deformação total da estrutura na condição estudada e na Figura 32 tem se a comparação da estrutura em temperatura ambiente e a quando exposta ao incêndio.

**Figura 31 - Deformação total a temperatura de 939,14 °C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 32 - Comparação entre a deformação total da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

A deformação direcional para a condição estudada está demonstrada nas Figuras 33 e 34 para o eixo x, nas Figuras 35 e 36 para o eixo y e nas Figuras 37 e 38 para o eixo z.

Pode se perceber pelas figuras apresentadas que a estrutura apresenta falha para a condição de incêndio de 939,14 °C e um TRRF de 60 minutos, assim como já demonstrado pelo método analítico de cálculo nos pilares direito e esquerdo onde estão concentrados os esforços críticos.

**Figura 33 - Deformação direcional no eixo x**

**A: Static Structural**

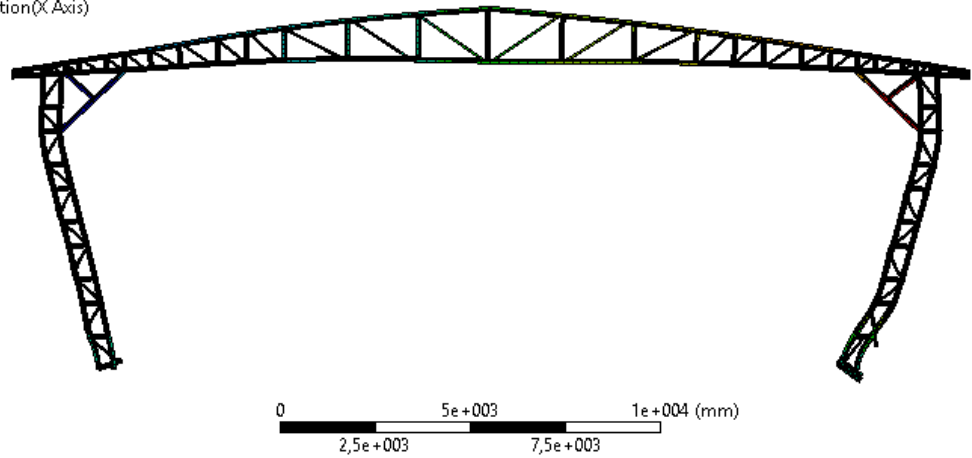
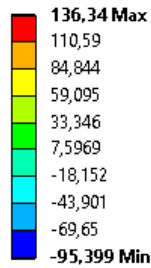
Directional Deformation

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 3600



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 34 - Comparação entre a deformação direcional no eixo x da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C**

**A: Static Structural**

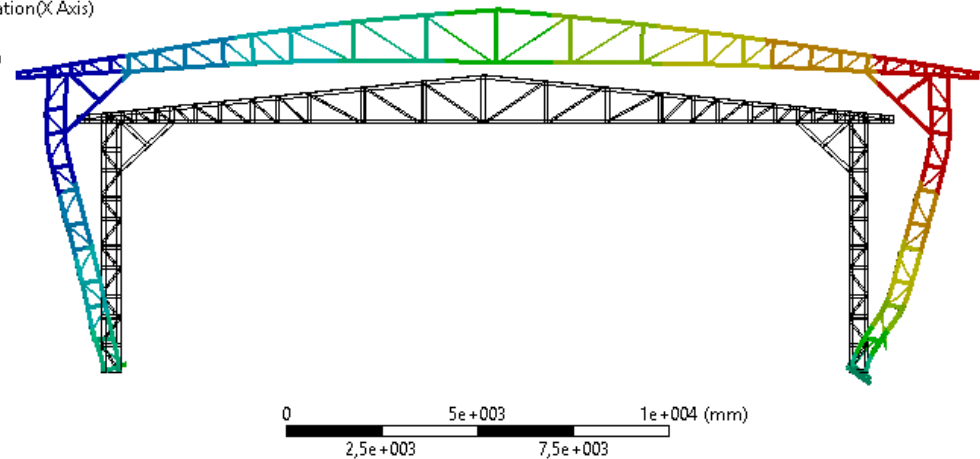
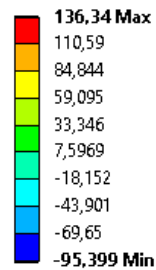
Directional Deformation

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 3600



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 35 - Deformação direcional no eixo y**

**A: Static Structural**

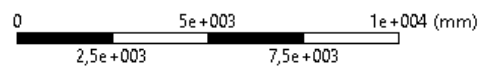
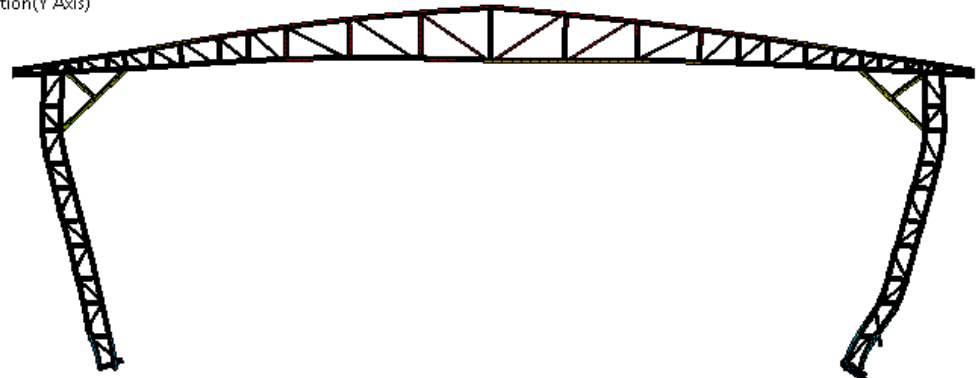
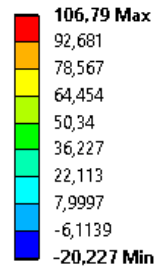
Directional Deformation

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 3600



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 36 - Comparação entre a deformação direcional no eixo y da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C**

**A: Static Structural**

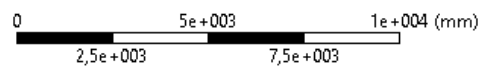
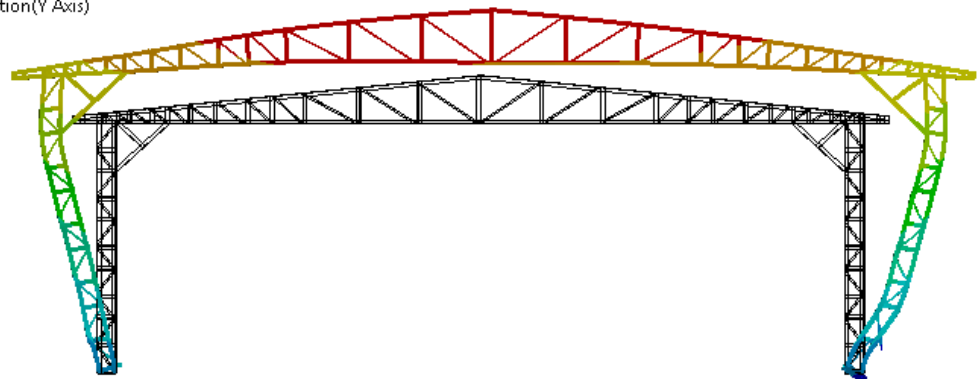
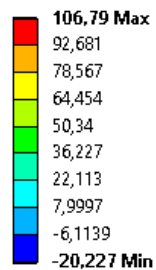
Directional Deformation

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

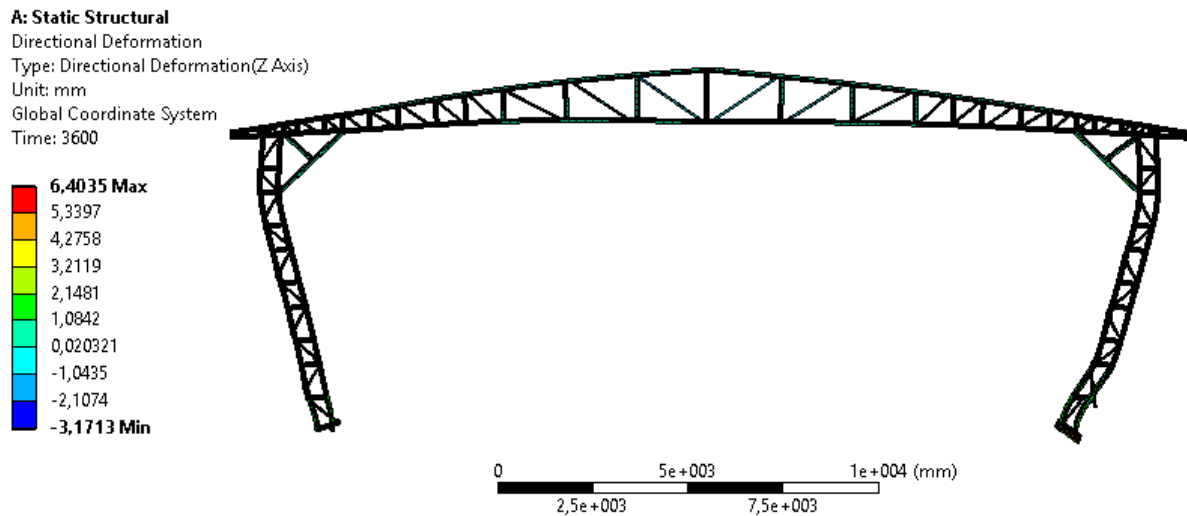
Time: 3600



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

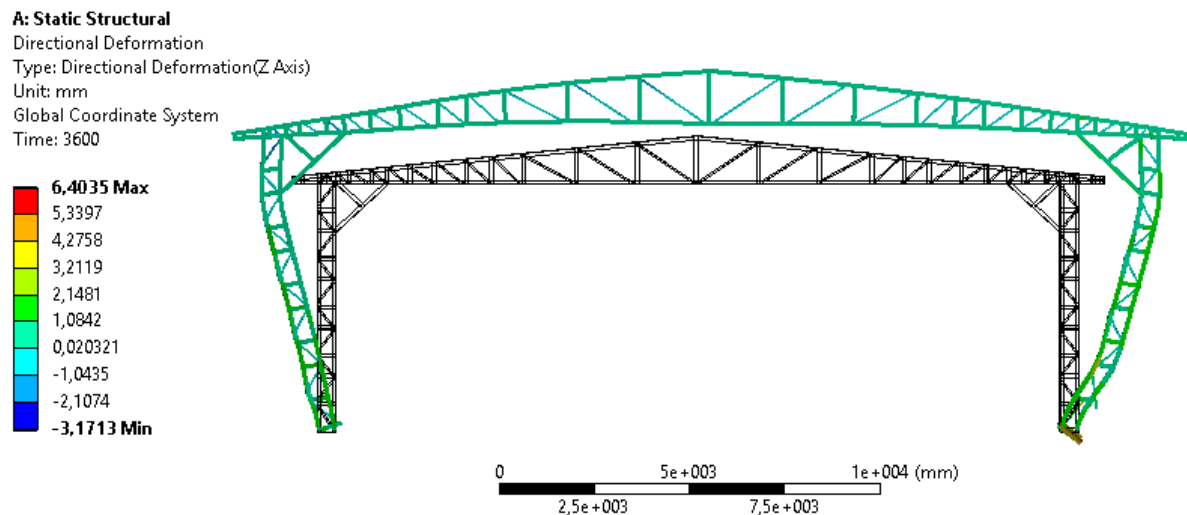


Figura 37 - Deformação direcional no eixo z



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Figura 38 - Comparação entre a deformação direcional no eixo z da estrutura em temperatura ambiente e a 939,14 °C



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

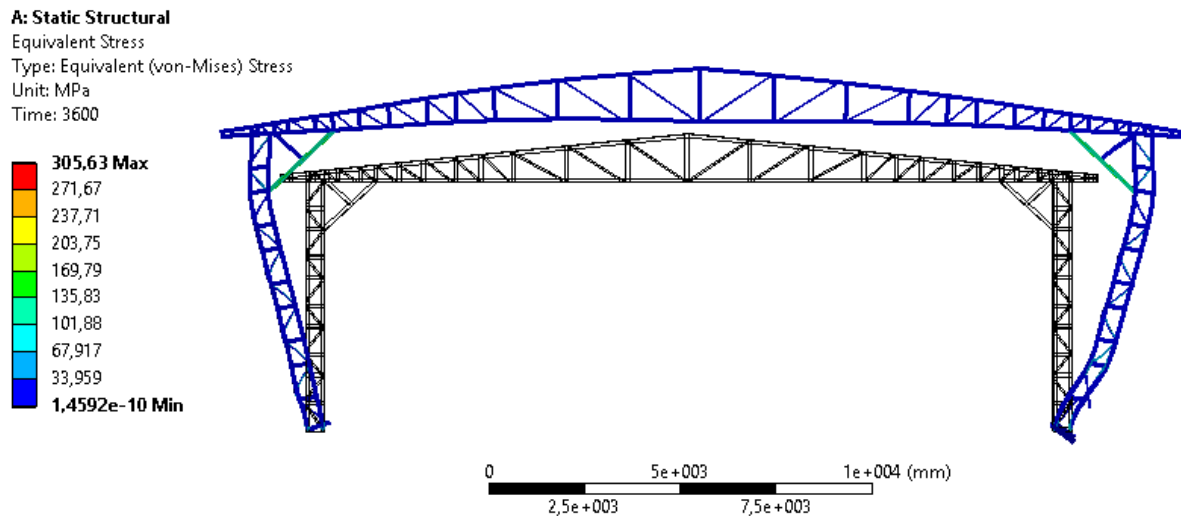
Conforme demonstrado nas Figuras acima, quando exposta a 939,14 °C a estrutura estudada apresenta as deformações máximas e mínimas apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Deformações a temperatura de 939,14 °C

Deformação	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Total	153,13	0,00
Direcional eixo x	136,34	-95,399
Direcional eixo y	106,79	-20,227
Direcional eixo z	6,4035	-3,1712

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 39 - Tensões solicitantes na estrutura a 939,14°C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Conforme pode ser visto na Figura 39 as tensões solicitantes na estrutura para o caso de TRRF 60 e 939,14 °C é maior que a tensão resistente (resistência ao escoamento) apresentada na Tabela 12. Assim, indicando que a estrutura não suporta os esforços e apresenta falhas.

Pelo método analítico a estrutura não apresenta falha quando exposto ao incêndio por 10 minutos e uma temperatura de 443,15 °C para esta condição o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento estão apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14 - Propriedades do aço a temperatura de 443,15 °C**  
**Temperatura de 443,15 °C**

Módulo de elasticidade ( $E_{\theta}$ )	131,4 GPa
Resistencia ao escoamento ( $f_{y,\theta}$ )	236,6 MPa

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Realizando a simulação para esta condição a estrutura apresenta os resultados ilustrados na Figura 40, deformação total, e nas Figuras 41, 42 e 43 para deformação direcional nos eixos e, y e z respectivamente.

**Figura 40 - Deformação total a 443,15 °C**

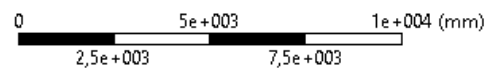
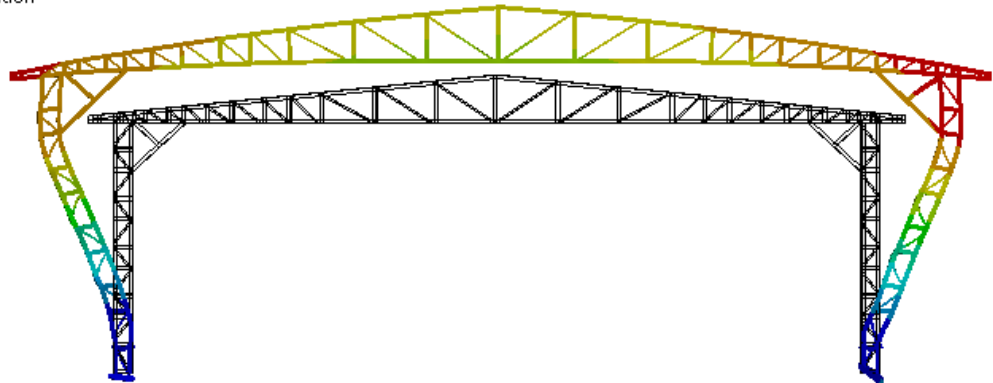
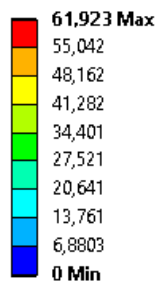
**A: Static Structural**

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 600



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 41 - Deformação direcional no eixo x para 443,15 °C**

**A: Static Structural**

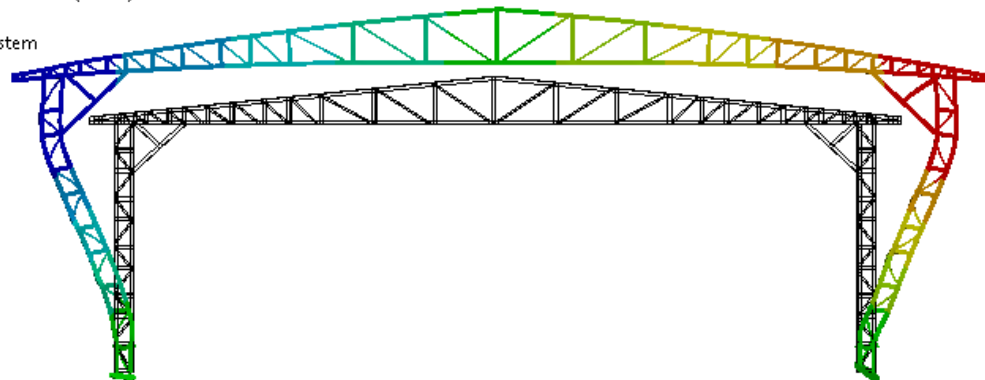
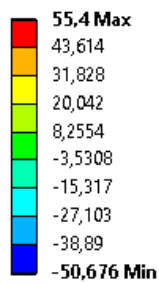
Directional Deformation

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

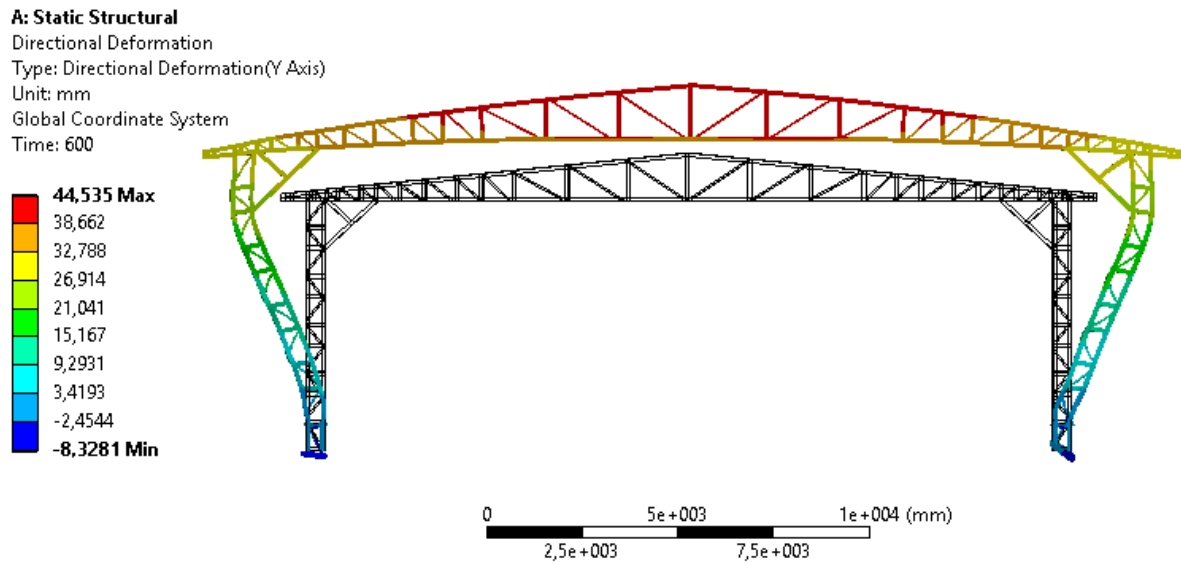
Global Coordinate System

Time: 600



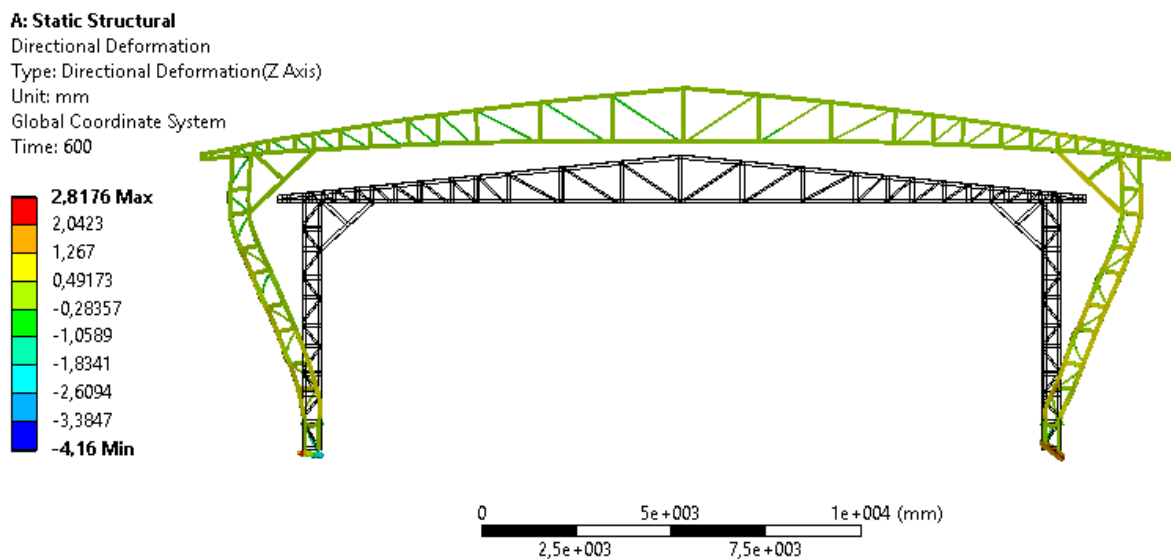
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 42 - Deformação direcional no eixo y para 443,15 °C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 43 - Deformação direcional no eixo z para 443,15 °C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

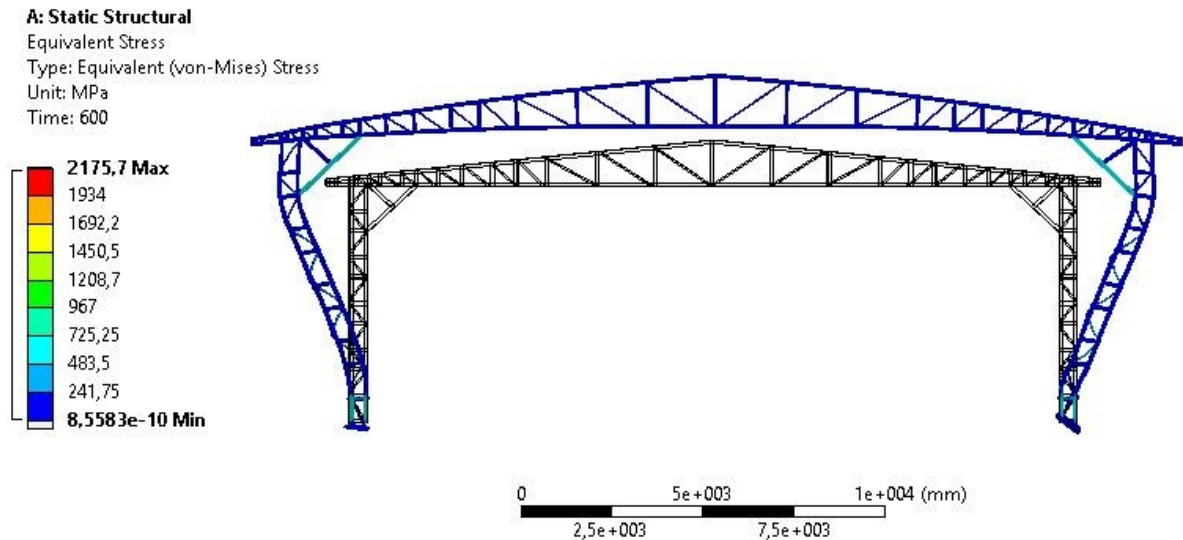
Para este caso as deformações máximas e mínimas estão apresentadas na Tabela 15.

**Tabela 15 - Deformações à temperatura de 443,15 °C**

Deformação	Máxima (mm)	Mínima (mm)
Total	61,923	0,0000
Direcional eixo x	55,400	-50,676
Direcional eixo y	44,535	-8,3281
Direcional eixo z	2,8176	-4,1600

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

**Figura 44 - Tensões solicitantes na estrutura a 443,15°C**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Conforme pode ser visto na Figura 44 as tensões solicitantes na estrutura para o caso de TRRF 10 e 443,15 °C é maior que a tensão resistente (resistência ao escoamento) apresentada na Tabela 14. Assim, indicando que a estrutura não suporta os esforços e apresenta falhas.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao verificar o comportamento da estrutura em temperatura ambiente os perfis selecionados suportaram as cargas atuantes na situação crítica, porém quando verificado o comportamento em situação de incêndio tanto pelo método analítico quanto pelo método avançado (ANSYS) a estrutura apresentou falha para o TRRF 60 e temperatura do aço de 939,14 °C nos dois pilares.

Pelo método analítico a estrutura com os perfis selecionados suporta os esforços solicitantes quando exposta ao incêndio por 10 minutos e uma temperatura de 443,15 °C, porém quando analisado pelo método avançado a estrutura não suporta os esforços apresentando falha nos pilares, deste modo há uma divergência nos resultados entre os métodos. Estas divergências não deveriam ocorrer uma vez que o método avançado, que simula uma situação real, deveria comprovar o método analítico.

Tais divergências entre os resultados podem ocorrer pelo fato que a ABNT NBR 14323:2013 foi inicialmente elaborada para perfis soldados e laminados,

posteriormente passou por revisão e adotou perfis formados a frio. Porém alguns coeficientes não foram alterados, fato que pode influenciar na análise uma vez que estes perfis possuem processos de fabricação diferentes.

Outro fato importante que deve ser considerado se deve as normas brasileiras terem sido elaboradas com base em normas internacionais, e estas normas elaboradas com base em ensaios experimentais com alguns materiais utilizados diferentes dos materiais utilizados no Brasil.

A Tabela 16 abaixo demonstra a diferença percentual entre as deformações da estrutura obtidos a partir do método avançado para o TRRF de 60 e 10 minutos.

**Tabela 16 - Diferença percentual entre as deformações a 939,14 °C e 443,15 °C**

Deformação	$\Delta\%$ Máxima	$\Delta\%$ Mínima
Total	59,56%	0,00%
Direcional eixo x	59,37%	46,88%
Direcional eixo y	58,30%	58,83%
Direcional eixo z	56,00%	31,18%

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

A diferença percentual entre as deformações apresentadas pela estrutura em temperatura ambiente e pela temperatura de 939,14 °C está apresentada na Tabela 17.

**Tabela 17 - Diferença percentual entre as deformações a temperatura ambiente e a 939,14 °C**

Deformação	$\Delta\%$ Máxima	$\Delta\%$ Mínima
Total	90,99%	0,00%
Direcional eixo x	94,79%	100,00%
Direcional eixo y	87,73%	94,56%
Direcional eixo z	100,00%	100,00%

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

A diferença percentual entre as deformações apresentadas pela estrutura em temperatura ambiente e pela temperatura de 443,15 °C está apresentada na Tabela 18.

**Tabela 18 - Diferença percentual entre as deformações a temperatura ambiente e a 443,15 °C**

<b>Deformação</b>	<b>Δ% Máxima</b>	<b>Δ% Mínima</b>
Total	77,71%	0,00%
Direcional eixo x	87,18%	100,00%
Direcional eixo y	70,58%	86,79%
Direcional eixo z	100,00%	100,00%

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).**

Analisando os valores obtidos na Tabela 16 pode se perceber que a temperatura do TRRF 10 para TRRF 60 aumentou em praticamente 50% do valor, verificando as deformações pode se analisar que assim como a temperatura elas também apresentaram um aumento em torno de 60% em da temperatura de 939,14 °C para 443,15 °C.

Quando se verifica em relação a temperatura ambiente (20 °C) para o TRRF 10 as deformações ficaram entre 70 e 100 % e quando verificada para o TRRF 60 as deformações já ficaram entre 90 e 100 %.

## 5 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado sobre o comportamento de pórticos treliçados constituídos por perfis de aço formados a frio, em temperaturas elevadas foi possível analisar o desempenho da estrutura quando exposta ao incêndio padrão em diferentes temperaturas e tempos requeridos de resistência ao fogo, bem como também seu comportamento em temperatura ambiente.

Quando dimensionado conforme a ANBT NBR 14762:2010 para temperatura ambiente os perfis selecionados suportaram os esforços solicitantes de cálculo, não apresentando falha pelos modos analisados, isto indica que para esta situação os perfis selecionados são adequados para utilização.

Porém quando analisada para a temperatura de 939,14 °C, determinada a partir do TRRF conforme indicado pela ABNT NBR 14323:2001 de acordo com a ocupação da estrutura, pelos dois métodos (simplificado e avançado) o pórtico apresentou falha nos pilares, onde estão presentes os maiores esforços solicitantes, ou seja, o perfil selecionado para construção em temperatura ambiente não é suficiente para manter a estrutura segura quando exposto ao incêndio pelo tempo determinado pela norma, este tempo se refere o tempo requerido de resistência ao fogo, que é o tempo mínimo que a estrutura deve suportar sem entrar colapso, ou seja, é um tempo para que a estrutura seja evacuada antes de desabar.

Pelo método simplificado a estrutura analisada não suportou sem falha os TRRF 20 e TRRF 15, a estrutura só suportou os esforços quando exposta ao TRRF 10 e uma temperatura do aço de 443,15 °C, ou seja, um tempo 6 vezes menor que o tempo recomendado para a ocupação da estrutura pela norma. Porém, quando verificada pelo método avançado através do *software* ANSYS, que tem como objetivo simular uma situação real, a estrutura não suportou o TRRF 10 sem apresentar falhas, ou seja, há divergências entre os métodos de cálculo.

Pode-se então concluir a partir da análise do comportamento da estrutura que mesmo suportando os esforços em temperatura ambiente os perfis selecionados não são suficientes para o dimensionamento da estrutura, sinalizando que as estruturas devem ser dimensionadas considerando situação de incêndio ou utilizar materiais de proteção ao fogo.



Porem vale ressaltar que foi realizada uma análise extremamente conservadora, não levando em consideração a troca de calor com o ambiente e considerando toda a estrutura exposta a temperatura de maneira uniforme. Como sugestão para trabalhos futuros pode-se realizar uma análise do comportamento da estrutura utilizando material de proteção ao fogo e também uma análise menos conservadora, incluindo a troca de calor entre o meio e a distribuição transiente de temperatura no perfil.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Saulo José de Castro. Análise do Comportamento a Temperaturas Elevadas de Elementos de Aço Formados a Frio Comprimidos Considerando Restrição ao Alongamento Térmico. 2012. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. ASTM E119: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, 2000.

ANSYS inc. Versão 18.1. Canonsburg, Pensilvânia, Estados Unidos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6649: Bobinas e chapas finas a frio de aço-carbono para uso estrutural - Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, 2012.

BARROS, Rafael Cesário. Avaliação numérica avançada do desempenho de estruturas de aço sob temperaturas elevadas. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, Ouro Preto, 2016.

BUCHANAN, Andrew H.. Structural Design for Fire Safety. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

Dlubal RFEM: Software de Análise Estrutural de Construções, Versão 5.13. 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Action on structures. Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels, 2002.

GOUVEIA, Antonio Maria Claret. Análise de Risco de Incêndio em Sítios Históricos. Brasília: Iphan/ Monumenta, 2006. 104 p. (Cadernos Técnicos, 5).

HOLMAN, Jack Philip. Transferência de Calor. São Paulo: Mcgraw-hill do Brasil, 1983. tradução de: Luiz Fernando Milanez; revisão técnica: José Maria Saiz Jabardo.

HUTTON, David V.. Fundamentals of finit element analysis. New York: Mcgraw-hill, 2004. 488 p.

INCROPERA, Frank P. et al. Fundamento de Transferência de Calor e de Massa. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. Tradução e revisão técnica de: Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834-1: Fire resistance tests - Elements of building constructuion - Part 1: General requirements. Genève, 1999.

KIMURA, Érica Fernanda Aiko. Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio. 2009. 225 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

KIMURA, Érica Fernanda Aiko. Comportamento estrutural de perfis formados a frio com seção transversal composta de U enrijecido em temperaturas elevadas. 2014. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S.. Principles of heat transfer. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

LEWIS, Roland W.; NITHIARASU, Perumal; SEETHARAMU, Kankanhally N.. Fundamentals of the finite element method for heat an fluid flow. Chichester: Wiley, 2004. 329 p.

MENDES, Cristiane Lopes. Estudo teórico sobre perfis formados a frio em situação de incêndio. 2004. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SEITO, Alexandre Itiu et al. A Segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496 p.

SILVA, Cristina Raquel Santos. Desenvolvimento de formulações de elementos finitos para problemas de transferência de calor. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2014.

SILVA, Edson Lubas; SILVA, Valdir Pignatta e. Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355. Rio de Janeiro: lbs/cbca, 2008. 119 p. (Série Manual de Construção em Aço).

SILVA, Valdir Pignatta e. Estruturas de aço em situação de incêndio. 1997. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, Valdir Pignatta e; VARGAS, Mauri Resende; ONO, Rosária. Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura. Rio de Janeiro: lbs/cbca, 2010. 72 p. (Série Manual de Construção em Aço).

SOLIDWORKS. Versão 2018. Estados Unidos: SolidWorks Corporation, 2018.

SOUZA, Remo Magalhães de. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003. (apostila).

Visual Ventos. Determinação de forças devido ao vento. 2018.

YU, Wei-wen; LABOUBE, Roger A.. Cold-formed Steel Design. 4. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 528 p.

## APENDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS DE VENTO

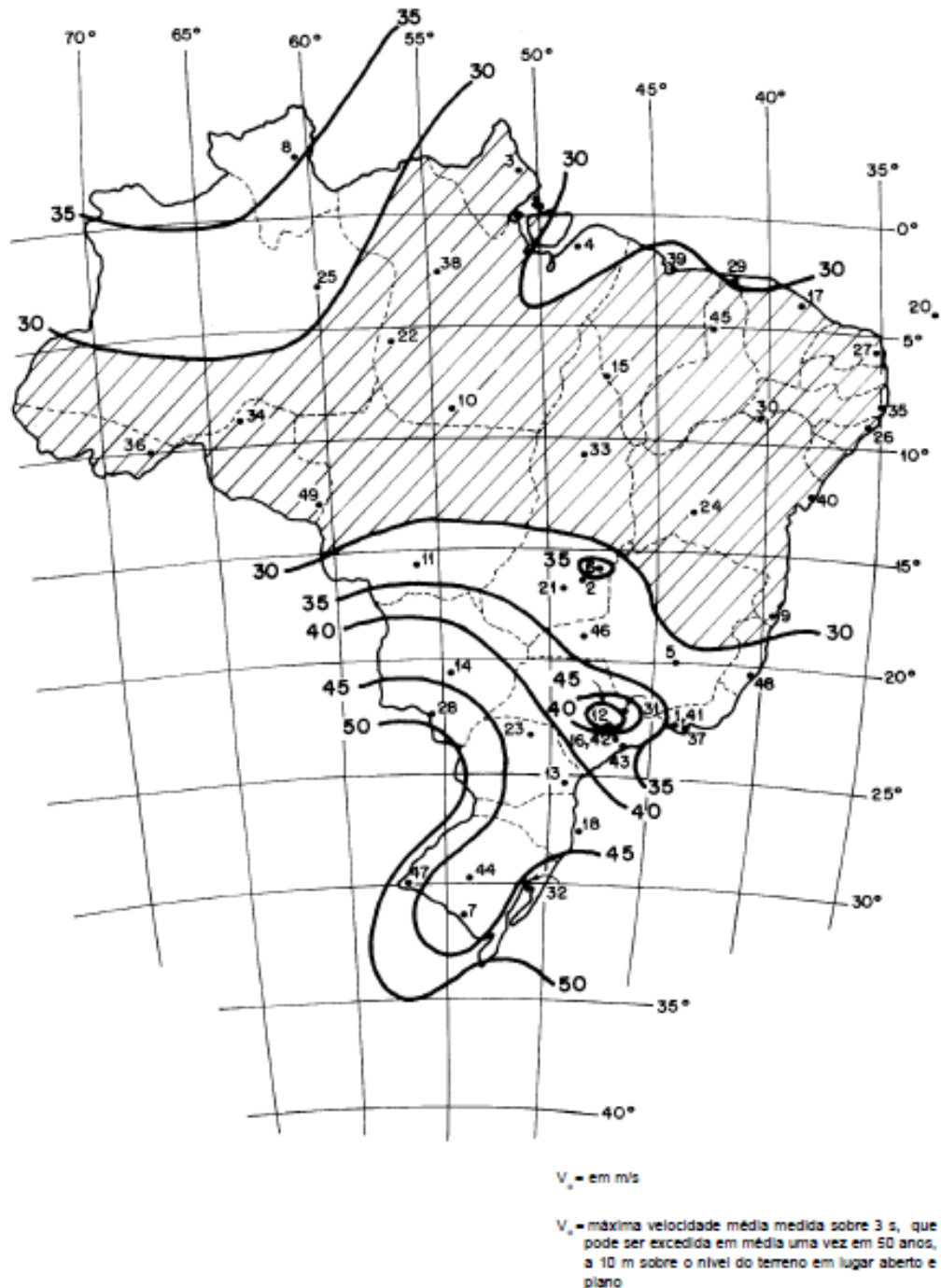
Este apêndice apresenta o dimensionamento das cargas de vento presentes na estrutura, para este dimensionamento foram realizadas algumas considerações a respeito da localização e ambiente onde a estrutura estará presente conforme apresentado abaixo.

- A partir da Figura 45 e a localização da estrutura, Pato Branco - Paraná foi determinada a velocidade básica do vento ( $V_0$ ) como  $V_0=45$  m/s;
- O fator topográfico ( $S_1$ ) considerando as variações do relevo do terreno foi determinado como  $S_1=1,00$ , para terrenos planos ou fracamente acidentado;
- O fator de rugosidade ( $S_2$ ) que determina a rugosidade do terreno foi determinado como categoria IV e categoria B, pois a maior dimensão da estrutura está entre 20 e 50 metros. Deste modo,  $S_2=0,81$ ;
- O fator estatístico ( $S_3$ ) considera a vida útil e grau de segurança, ele foi definido como grupo 2, para edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação, assim  $S_3=1,00$ .

A velocidade básica do vento corresponde à velocidade de uma rajada de 3 segundos, essa velocidade é em média excedida uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

Na Figura 45, está ilustrado o gráfico de isopletas da velocidade básica do vento no Brasil.

Figura 45 - Isopletas da velocidade básica do vento no Brasil

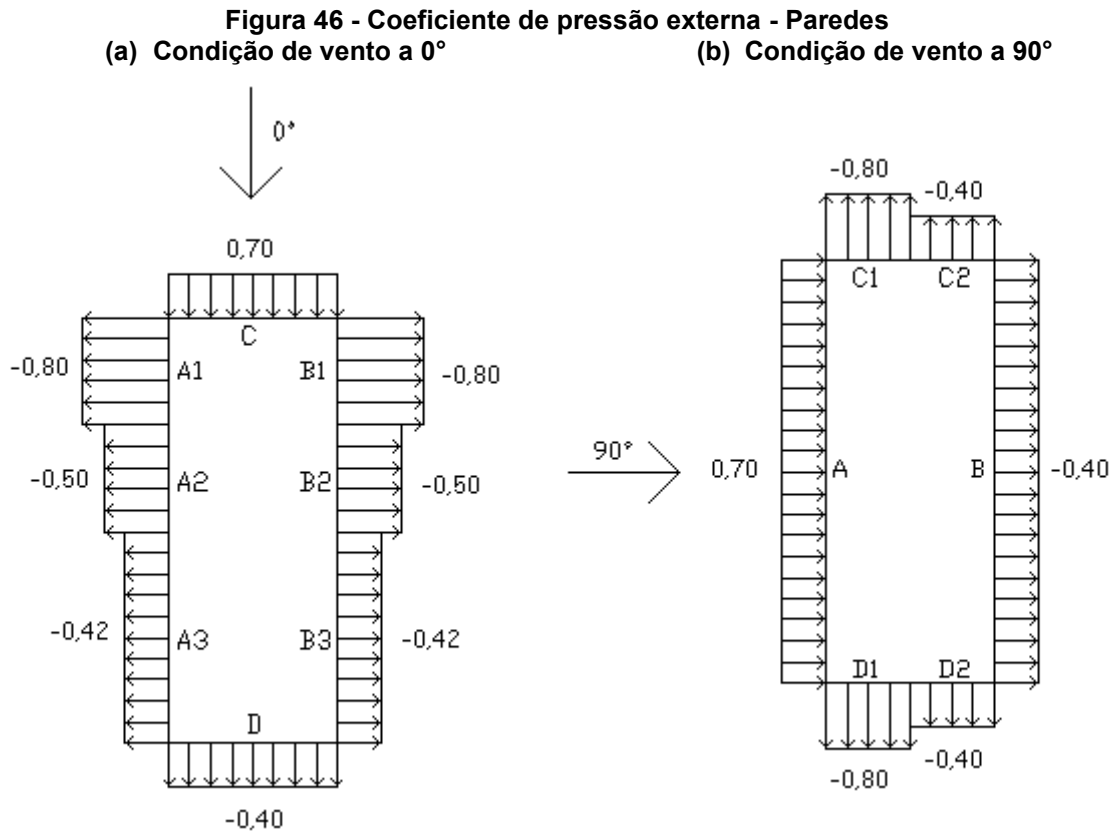


Fonte: (NBR ABNT 6123, 1987)

Deste modo, com o auxílio do software visual ventos e a norma técnica ABNT NBR 6123:1987, foram obtidos os coeficientes de pressão externa – paredes e os coeficientes de pressão externa – telhado demonstrados nas Figuras 46 e 47, para as condições de vento a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

A força do vento é dependente da diferença de pressão nas faces opostas da edificação sendo estudados, estes coeficientes são determinados tanto para superfícies internas quanto para as externas.

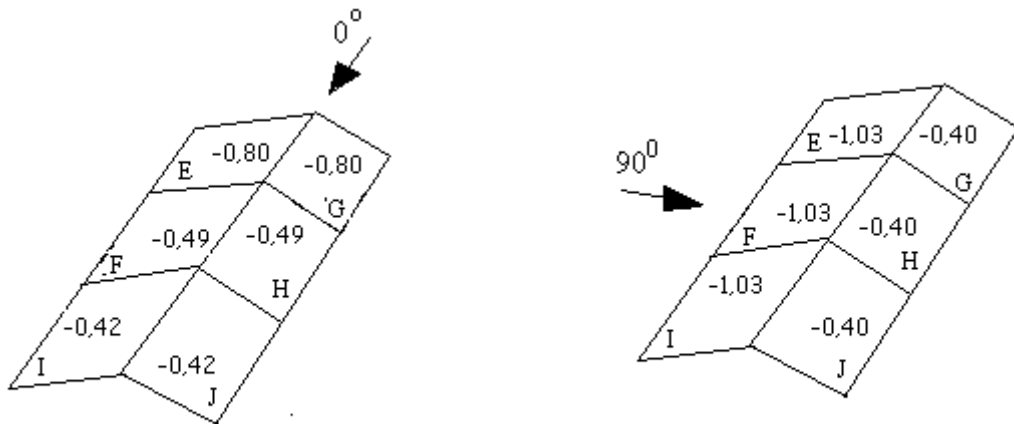
Coefficientes de pressão externa ou interna com valores positivos indicam sobrepressões, valores negativos indicam sucção.



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

O coeficiente externo – paredes médio é de -0,90.

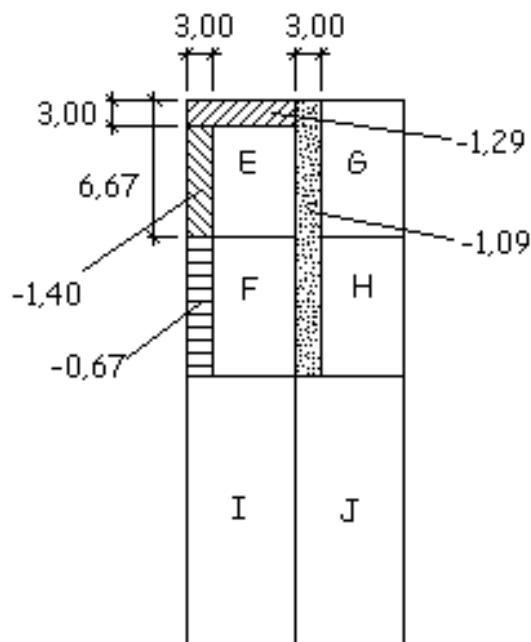
**Figura 47 - Coeficiente de pressão externa - Telhado**  
 (a) Condição de vento a  $0^\circ$  (b) Condição de vento a  $90^\circ$



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

E o coeficiente de pressão externa – telhado médio é:

**Figura 48 - Coeficientes de pressão externa - Telhado**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Para os coeficientes de pressão interna foi definido que as quatro paredes são igualmente permeáveis, isto significa que a pressão interna pode ser considerada uniforme, para este caso os coeficientes de pressão interna ( $C_{pi}$ ) são -0,3 ou 0, deve se considerar o valor mais nocivo.

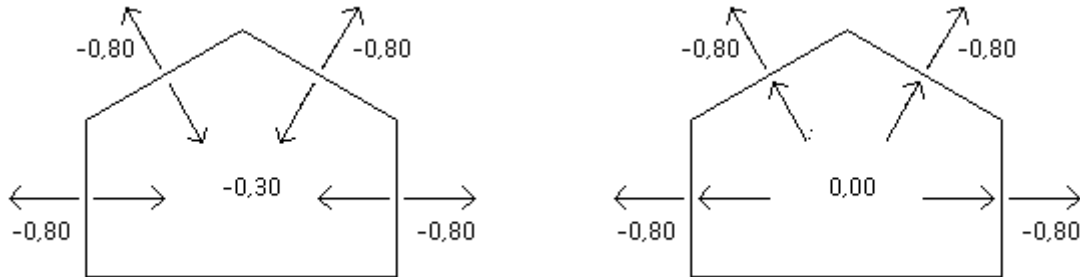


Com o auxílio do Visual Ventos foram determinados os coeficientes para os dois casos conforme ilustrado na Figura 49 para vento a  $0^\circ$  e na Figura 50 para vento a  $90^\circ$ .

**Figura 49 - Coeficientes de pressão interna - Vento a  $0^\circ$**

(a)  $C_{pi} = -0,30$

(b)  $C_{pi} = 0,00$

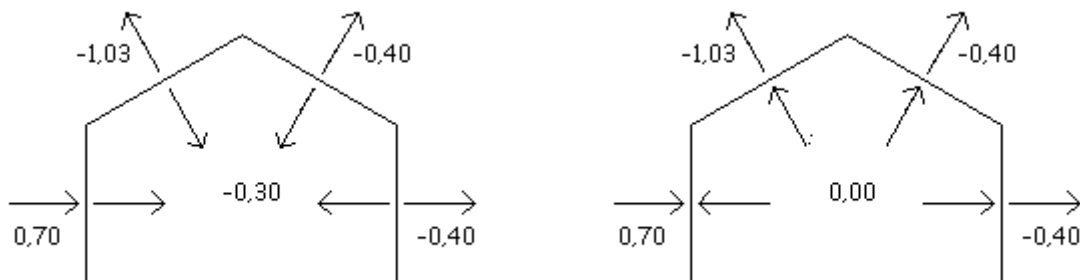


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

**Figura 50 - Coeficientes de pressão interna - Vento a  $90^\circ$**

(a)  $C_{pi} = -0,30$

(b)  $C_{pi} = 0,00$



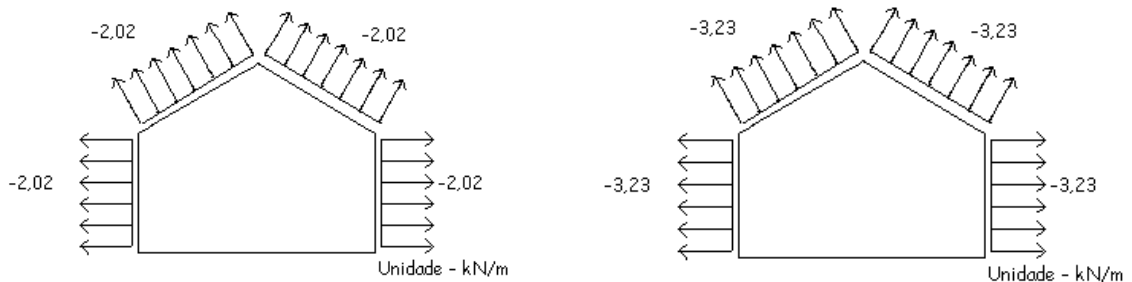
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Assim, os carregamentos resultantes atuantes no telhado e nas paredes devido ao vento estão apresentados nas Figuras 51 e 52 para os casos de vento a  $0^\circ$  e vento a  $90^\circ$ , respectivamente.

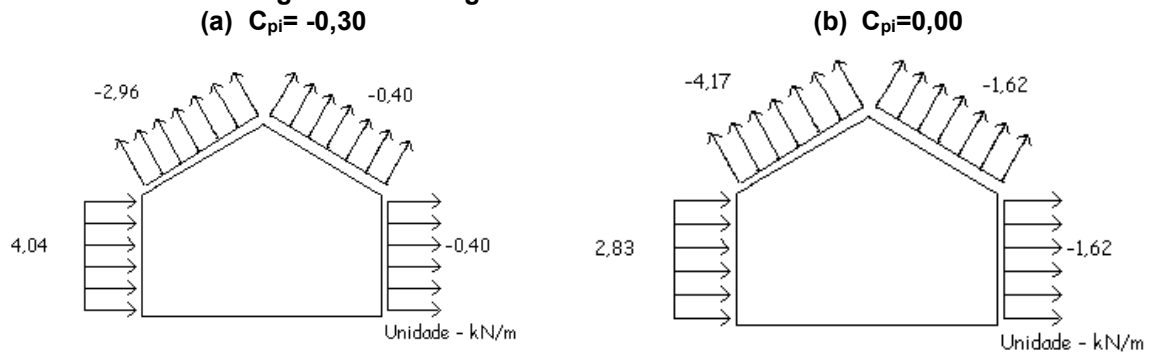
**Figura 51 - Carregamento devido ao vento a  $0^\circ$**

(a)  $C_{pi} = -0,30$

(b)  $C_{pi} = 0,00$



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

**Figura 52 - Carregamentos devido ao vento a 90°**

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Para o dimensionamento foram utilizados os carregamentos críticos de vento. Os carregamentos utilizados estão apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 - Cargas críticas de vento**

Caso	Carga (kN/m)
Paredes Vento 0°	-3,23
Paredes Vento 90°	4,04 e -1,62
Telhado Vento 0°	-3,23
Telhado Vento 90°	-4,17 e -1,62

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

## APENDICE B – DIMENSIONAMENTO A TEMPERATURA AMBIENTE

Para realizar a verificação da estrutura em situação de incêndio, primeiramente foi verificado se os perfis selecionados não apresentavam falha em temperatura ambiente. A verificação em temperatura ambiente foi feita de acordo com a ABNT NBR 14762:2010 que prevê o dimensionamento de estruturas de aço utilizado perfis formados a frio.

A primeira verificação foi para as barras submetidas à força axial de compressão. Para que a estrutura não apresente falha deve se satisfazer a seguinte afirmação:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Onde

$N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo.

Primeiramente, deve-se determinar a força axial de flambagem global elástica ( $N_e$ ), onde é o menor valor das equações 32, 32 e 33.

- a) Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 2,394 \times 10^3 \text{ kN} \quad (31)$$

- b) Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 243,811 \text{ kN} \quad (32)$$

- c) Força axial de flambagem global elástica por torção.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] = 620,401 \text{ kN} \quad (33)$$

Onde

$C_w$  é a constante de empenamento da seção;

$E$  é o módulo de elasticidade;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal;

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

$K_x L_x$  é o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo  $x$ ;

$K_y L_y$  é o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo  $y$ ;

$K_z L_z$  é o comprimento efetivo de flambagem global por torção;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, e é determinado pela Equação 34.

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} = 11,42 \text{ cm} \quad (34)$$

Onde

$r_x$  e  $r_y$  são respectivamente os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia  $x$  e  $y$ ;

$x_0$  e  $y_0$  são respectivamente as distâncias do centro de torção ao centroide, na direção dos eixos principais  $x$  e  $y$ .

Então, deve-se determinar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global ( $\lambda_0$ ), conforme a Equação 35.

$$\lambda_0 = \left( \frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5} = 1,893 \quad (35)$$

Onde

$N_e$  é a força axial de flambagem global elástica, e o menor valor entre as equações 31, 32 e 33.

$A$  é a área bruta da seção transversal da barra.

A partir do índice de esbelteza reduzido, pode-se então determinar o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, calculado através da Equação 36 para o caso  $\lambda_0 \geq 1,5$ .

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = 0,463 \quad (36)$$

A área efetiva da seção transversal da barra foi determinada pelo método da seção efetiva (MSE), conforme apresentado abaixo.

$$\sigma = \chi f_y = 120,424 \text{ MPa} \quad (37)$$

Então se deve determinar a tensão crítica.

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (38)$$

Após então, se deve determinar a força axial de flambagem local elástica, que pode ser calculada de forma direta conforme a Equação 39.

$$N_1 = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A = 497,457 \quad (39)$$

**Quadro 6 - Valores do coeficiente de flambagem local para barras sob compressão centrada**

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b	Caso c	Caso d
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	Seção rack	Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
0,1	4,25	-	-	-
0,2	4,52	6,04	-	5,67
0,3	4,33	5,73	5,76	5,44
0,4	3,71	5,55	5,61	5,29
0,5	2,88	5,40	5,47	5,16
0,6	2,17	5,26	5,35	5,03
0,7	1,67	5,11	5,23	4,87
0,8	1,32	4,89	5,10	4,66
0,9	1,06	4,56	4,85	4,37
1,0	0,88	4,10	4,56	4,00

NOTA 1  $b_f$ ,  $b_w$ ,  $b_s$  e  $D$  são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.

NOTA 2 Para o caso b, os valores são válidos para  $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$ .

NOTA 3 Para o caso c, os valores são válidos para  $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$  e  $0,1 \leq b_f/b_w \leq 0,4$ .

NOTA 4 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Fonte: (ABNT NBR 14762:2010)

Então,

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi A f_y}{N_1} \right)^{0,5} = 0,492 \quad (40)$$

Pelo método da seção efetiva (MSE) como  $\lambda_p \leq 0,776$  pode se considerar  $A_{ef} = A$ . Deste modo, então a força axial de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$  deve ser calculada pela Equação 41.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} = 337,389 \text{ kN} \quad (41)$$

Onde  $\gamma = 1,20$ .

Portanto, satisfaz a condição  $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ , o que significa que o perfil não apresenta falha devido a força axial de compressão.

O valor de  $N_{c,Sd}$  foi obtido com auxílio do software Dlubal RFEM e apresentado acima na Tabela 5.

Para as barras submetidas à força axial de tração deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

Onde

$N_{t,Sd}$  é a força axial de tração solicitante de cálculo em temperatura ambiente;

$N_{t,Rd}$  é a força axial de tração resistente de cálculo em temperatura ambiente.

Assim, se pode determinar a força axial de tração solicitante de cálculo conforme a Equação 42.

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma} = 794,655 \text{ kN} \quad (42)$$

Onde, para escoamento da seção bruta  $\gamma = 1,10$ .

Conforme apresentado na Seção 4.1,  $N_{t,Sd}=62,02$ , deste modo não ocorre falha no perfil selecionado devido a força axial de tração.

Para as barras submetidas à flexão simples, ou seja, barras submetidas a momento fletor e força cortante, as seguintes condições devem ser atendidas.

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Onde

$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo em temperatura ambiente;

$M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo em temperatura ambiente;

$V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo em temperatura ambiente;

$V_{Rd}$  é a força cortante resistente de cálculo em temperatura ambiente.

A força cortante resistente de cálculo ( $V_{Rd}$ ) é determinada conforme apresentado abaixo.

Primeiramente, se deve verificar se a seguinte afirmação é verdadeira.

$$\frac{h}{t} \leq 1,08 \left( \frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5}$$

Onde

$t$  é a espessura da alma;

$h$  é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

$k_v$  é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, onde  $k_v=5,0$  para alma sem enrijecedores transversais, ou para  $\frac{a}{h} > 3$ .

Como a afirmação acima é satisfeita, portanto a força cortante de cálculo é determinada conforme a Equação 43.

$$V_{Rd} = 0,6 \frac{f_y h t}{\gamma} = 272,858 \text{ kN} \quad (43)$$

Onde  $\gamma = 1,10$ .

Conforme obtido pelo Dlubal RFEM e apresentado na Seção 4.1, o valor solicitante de cálculo  $V_{Sd}=15,55$  kN, deste modo a afirmação  $V_{Sd} \leq V_{Rd}$  é verdadeira e, portanto, o perfil não apresenta falha devida a força cortante.

O momento fletor resistente de cálculo é determinado por dois métodos e será utilizado o menor valor. Primeiramente, será definido pelo início de escoamento da seção efetiva.

Deve se primeiro determinar o valor do coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ) através da Quadro 7.



**Quadro 7 - Valores do coeficiente de flambagem local da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia**

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3

NOTA 1  $b_f$ ,  $b_w$  e  $D$  são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.  
 NOTA 2  $\mu = D/b_w$ .  
 NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente.

Fonte: (ABNT NBR 14762:2010)

Para o caso estudado este valor corresponde a 5,60.

Após, deve se determinar o momento fletor de flambagem local elástica ( $M_1$ ), conforme a Equação 44.

$$M_1 = k_1 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} W_c = 251,345 \text{ kN.m} \quad (44)$$

Onde

$W_c$  corresponde ao módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

Então,

$$\lambda_p = \left(\frac{W_{fy}}{M_1}\right)^{0,5} = 0,501 \quad (45)$$

Onde

$W$  corresponde ao módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

Como  $\lambda_p \leq 0,673$ ,  $W_{ef} = W$ .

Onde

$W_{ef}$  corresponde ao módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

Assim, o momento resistente de cálculo no início de escoamento da seção efetiva:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = 57,313 \text{ kN.m} \quad (46)$$

Onde  $\gamma = 1,10$ .

O momento fletor de cálculo referente à flambagem lateral com torção, é calculado da seguinte maneira.

Determinando o fator de modificação para o momento fletor não uniforme ( $C_b$ ).

$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} = 9,267 \quad (47)$$

Onde

$M_{\max}$  é o máximo valor de um momento fletor solicitante de cálculo, no trecho analisado;

$M_A$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, no 1° quarto do trecho analisado;

$M_B$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, no centro do trecho analisado;

$M_C$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, no 3° quarto do trecho analisado.

Então, o momento fletor de flambagem lateral com torção ( $M_e$ ), em regime elástico é determinado conforme a Equação 48.

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 411,588 \text{ kN.m} \quad (48)$$

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,391 \quad (49)$$

Para  $\lambda_0 \leq 0,6$  o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção é  $\chi_{FLT} = 1,0$ .

Deste modo, o momento fletor de flambagem local elástica, calculado por meio de análise de estabilidade elástica conforme a Equação 50.

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c = 251,345 \text{ kN.m} \quad (50)$$

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_l} \right)^{0,5} = 0,501 \quad (51)$$

Para  $\lambda_p \leq 0,673$ , o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida ( $W_{c,ef}$ ) conforme a norma é  $W_{c,ef} = W_c$ .

Assim, pode se calcular o momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} = 57,313 \text{ kN.m} \quad (52)$$

Onde  $\gamma = 1,10$ .

Conforme a norma deve se utilizar o menor valor entre as equações 46 e 52, porem neste caso elas apresentaram o mesmo valor.

Realizadas todas as verificações os esforços resistentes de cálculo estão demonstrados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Esforços resistentes de cálculo - temperatura ambiente**

<b>Esforços Resistentes de cálculo</b>	<b>Carga</b>
$M_{Rd}$	57,313 kN.m
$N_{c,Rd}$	337,389 kN
$N_{t,Rd}$	794,655 kN
$V_{Rd}$	278,858 kN

**Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).**

## APENDICE C – MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

Para verificar o comportamento da estrutura em temperaturas elevadas deve se primeiramente determinar o tipo de incêndio e temperatura dos gases. No presente trabalho foi utilizado o incêndio padrão, pois é o previsto pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2001.

Após deve se determinar o fator de massividade que é a razão entre o perímetro exposto ao incêndio e a área de seção transversal do perfil, no caso estudado foi determinado que o incêndio só atingira um lado do perfil, deste modo o fator de massividade:

$$\text{Fator de massividade} = \frac{u}{A} = \frac{0,516 \text{ m}}{(3,00 \times 10^{-3}) \text{ m}^2} = 153,48 \text{ m}^{-1} \quad (53)$$

Onde:

$u$  é o perímetro exposto ao incêndio, em metros;

$A$  é a área de seção transversal do perfil, em metros quadrados ( $\text{m}^2$ ).

Com o TRRF e o fator de massividade então é possível determinar a temperatura máxima para as estruturas de aço ( $\theta_a$ ). O cálculo foi realizado a partir do procedimento apresentado na ABNT NBR 14323:2013, através da Equação 54.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\left(\frac{u}{A}\right)}{C_a \cdot \rho_a} \varphi \Delta t \quad (54)$$

Onde:

$C_a$  é o calor específico do aço, em joules por quilograma e por graus Celsius ( $\text{J/kg/}^\circ\text{C}$ );

$\rho_a$  é a massa específica do aço, em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ );

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

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

Para o perfil selecionado temperatura dos elementos de aço após 60 minutos é de  $\theta_a=939,14$  °C quando exposto ao incêndio padrão, segundo a NBR 14323:2013 a resistência do aço é reduzida em 50% quando expostas a temperaturas acima de 550 °C.

A partir da temperatura do aço então é possível determinar os fatores de redução apresentados nos Quadros 8 e 9.

**Quadro 8 - Fatores de redução do aço**

Temperatura do aço $\theta_a$ °C	Fator de redução da resistência ao escoamento <sup>a</sup> $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade <sup>a</sup> $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: (ABNT NBR 14323:2013)

**Quadro 9 - Fatores de redução para a resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local**

Temperatura do aço $\theta_a$ °C	Fator de redução <sup>a</sup> $k_{\sigma,\theta}$
20	1,000
100	1,000
200	0,890
300	0,780
400	0,650
500	0,530
600	0,300
700	0,130
800	0,070
900	0,050
1 000	0,030
1 100	0,020
1 200	0,000

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Fonte: (ABNT NBR 14323:2013)

Realizando interpolação linear os fatores de redução para a temperatura do aço são:

<b>Tabela 21 - Fatores de redução</b>	
<b>Fatores de redução para situação de incêndio</b>	
Fator de redução da resistência ao escoamento ( $k_{y,\theta}$ )	0,052
Fator de redução do módulo de elasticidade ( $k_{E,\theta}$ )	0,059
Fator de redução ( $k_{\sigma,\theta}$ )	0,042

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Com os resultados obtidos acima deve se então fazer a verificação da estrutura quando exposta a temperaturas elevadas, neste caso primeiramente será verificada as barras submetidas à força axial de compressão não sujeitas a flambagem local em situação de incêndio.

Barras com perfis previstos na ABNT NBR 14762:2010 que não apresentam flambagem local em situação de incêndio são os que não apresentam índice de esbelteza reduzida ( $\lambda_p$ ) superiores a  $0,85\lambda_{p,lim}$ .

Para determinar se o perfil não apresenta falha quando é axialmente comprimida a seguinte afirmação deve ser satisfeita.

$$N_{c,Sd} \leq N_{fi,Rd}$$

Onde

$N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante de cálculo em temperatura elevada;

$N_{fi,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo em temperatura elevada.

Para determinar a força axial resistente de cálculo deve primeiramente:

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} = 1,745 \quad (55)$$

Onde

$\lambda_{0,fi}$  é o índice de esbelteza reduzido em situação de incêndio;

$\lambda_0$  é o índice de esbelteza reduzido à temperatura ambiente, determinado conforme a ABNT NBR 14762:2010.

Após então se deve determinar o fator de redução associado à resistência a compressão em situação de incêndio ( $\chi_{fi}$ ), conforme abaixo.

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,61 \quad (56)$$

$$\varphi_{0,fi} = 0,5(1 + \alpha\lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) = 2,554 \quad (57)$$



$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}} = 0,226 \quad (58)$$

Então, pode-se determinar a força axial resistente de cálculo ( $N_{fi,Rd}$ ).

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y = 10,284 \text{ kN} \quad (59)$$

Portanto, a condição  $N_{c,Sd} \leq N_{fi,Rd}$  não é satisfeita.

Para perfis sujeitos a flambagem local a força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{fi,Rd}$ ) é determinada pela Equação 60.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} A_{ef} f_y = 8,306 \text{ kN} \quad (60)$$

Onde

$k_{\sigma,\theta}$  é o fator de redução;

$A_{ef}$  é a área efetiva da seção transversal conforme pode ser determinado pela ABNT NBR 14762:2010.

Portanto a condição  $N_{c,Sd} \leq N_{fi,Rd}$  não é satisfeita.

Deve se verificar também a força axial resistente de cálculo ( $N_{fi,Rd}$ ), de uma barra tracionada axialmente, para o estado-limite último de escoamento da seção bruta que deve satisfazer a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{fi,Rd}$$

Onde  $N_{fi,Rd}$  é determinada conforme a Equação 61.

$$N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A f_y = 45,454 \text{ kN} \quad (61)$$

A condição não é satisfeita.

Para situação de incêndio se deve também verificar o efeito do momento fletor e força cortante conforme descrito abaixo.

Para o momento fletor a seguinte condição deve ser satisfeita.

$$M_{fi,Sd} \leq M_{fi,Rd}$$

Onde

$M_{fi,Sd}$  corresponde ao momento fletor solicitante de cálculo em temperatura elevada;

$M_{fi,Rd}$  corresponde ao momento fletor resistente de cálculo em temperatura elevada.

O momento resistente de cálculo em situação de incêndio é dado pela Equação 62.

$$M_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} W_{c,ef} f_y \quad (62)$$

Onde

$W_{c,ef}$  é o módulo resistente elástico da seção transversal efetiva em relação as fibras comprimidas, determina conforme a ABNT NBR 14762:2010.

O momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio é obtido da seguinte maneira.

Primeiro é necessário o momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente ( $M_e$ ), obtido da ABNT NBR 14762 e apresentado no apêndice B. Então,

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{W_{c,ef}}{M_e}} = 0,391 \quad (63)$$

Então, conforme mostrado acima.

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,61 \quad (64)$$

$$\varphi_{0,fi} = 0,5(1 + \alpha\lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) = 0,696 \quad (65)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}} = 0,786 \quad (66)$$

Então, é possível determinar o momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio conforme a Equação 67.

$$M_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} W_{c,ef} f_y = 2,082 \text{ kN.m} \quad (67)$$

A força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio ( $V_{fi,Rd}$ ) é determinada conforme apresentado abaixo e deve satisfazer a seguinte condição.

$$V_{fi,Sd} \leq V_{fi,Rd}$$

Onde

$V_{fi,Rd}$  corresponde a força cortante resistente de cálculo em temperatura elevadas;

$V_{fi,Sd}$  corresponde a força cortante solicitante de cálculo em temperatura elevada.

$$\frac{h}{t} \leq 1,08 \left( \frac{k_{E,\theta} E k_v}{k_{y,\theta} f_y} \right)^{0,5}$$

Onde

$t$  é a espessura da alma;

$h$  é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

$k_v$  é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, onde  $k_v=5,0$  para alma sem enrijecedores transversais, ou para  $\frac{a}{h} > 3$ .

Como a equação é satisfeita, então a força cortante resistente de cálculo ( $V_{fi,Rd}$ ) pode ser determinada pela Equação 68.

$$V_{fi,Rd} = 0,6 \frac{k_{y,\theta} f_y h t}{\gamma} = 15,607 \text{ kN} \quad (68)$$

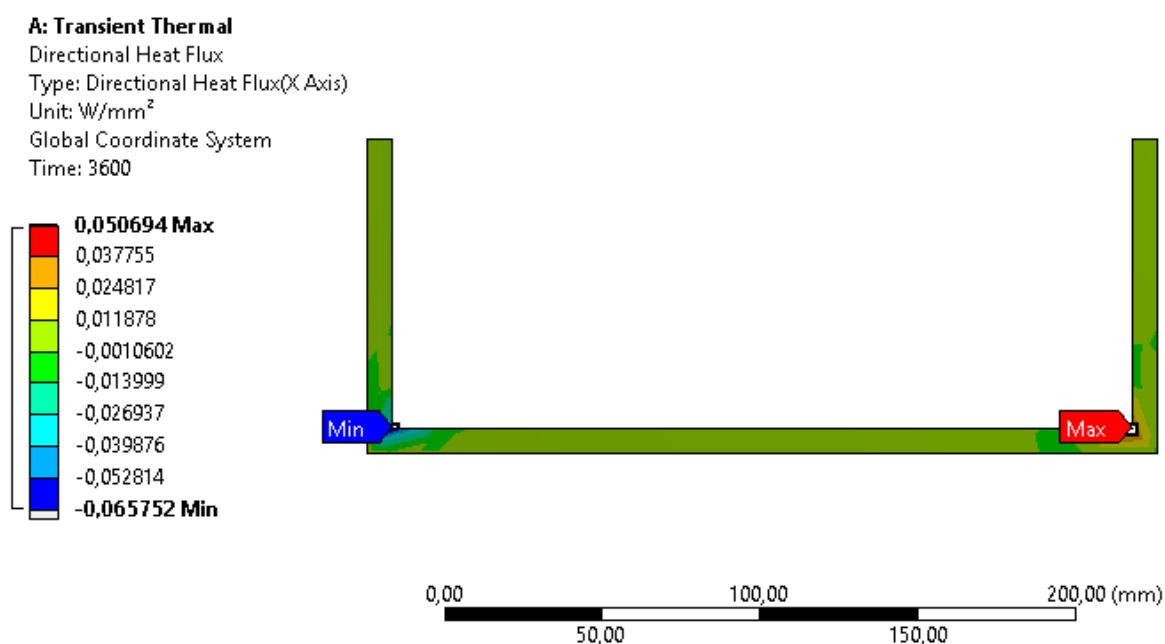
Onde  $\gamma = 1,00$ .

A condição é satisfeita, portanto não apresenta falha devida a força cortante.

## APÊNDICE D – MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

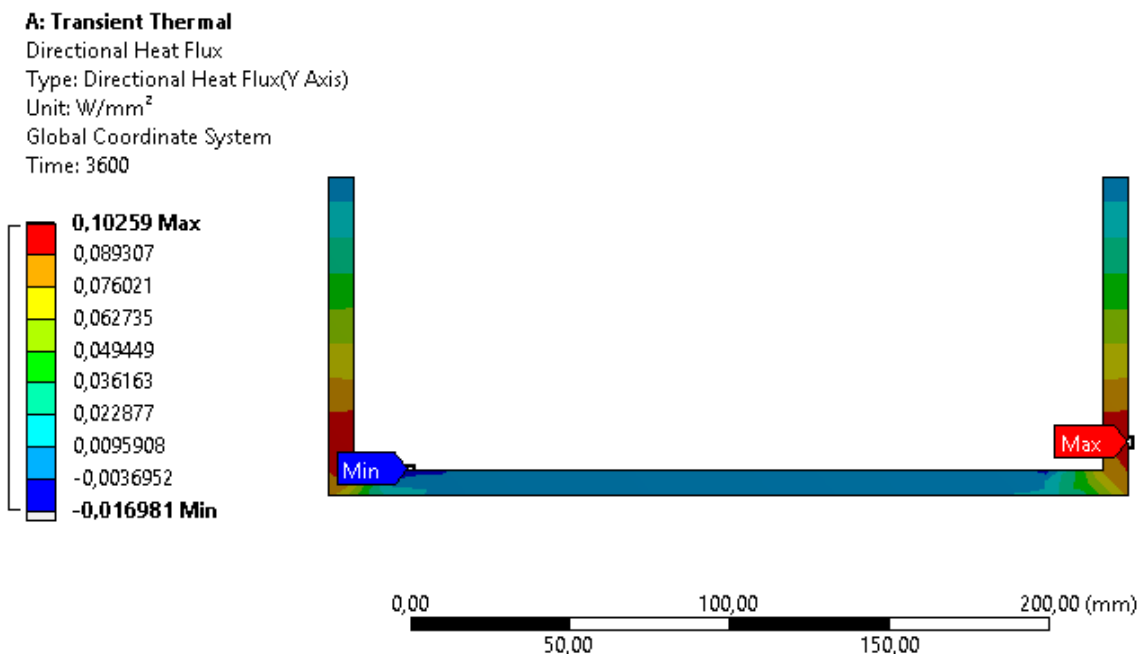
Neste apêndice está apresentado nas Figuras 53, 54 e 55 o fluxo de calor no perfil nas direções x, y e z quando apenas uma face do perfil é exposta ao incêndio por 60 minutos a uma temperatura de 939,14 °C.

**Figura 53 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo x**



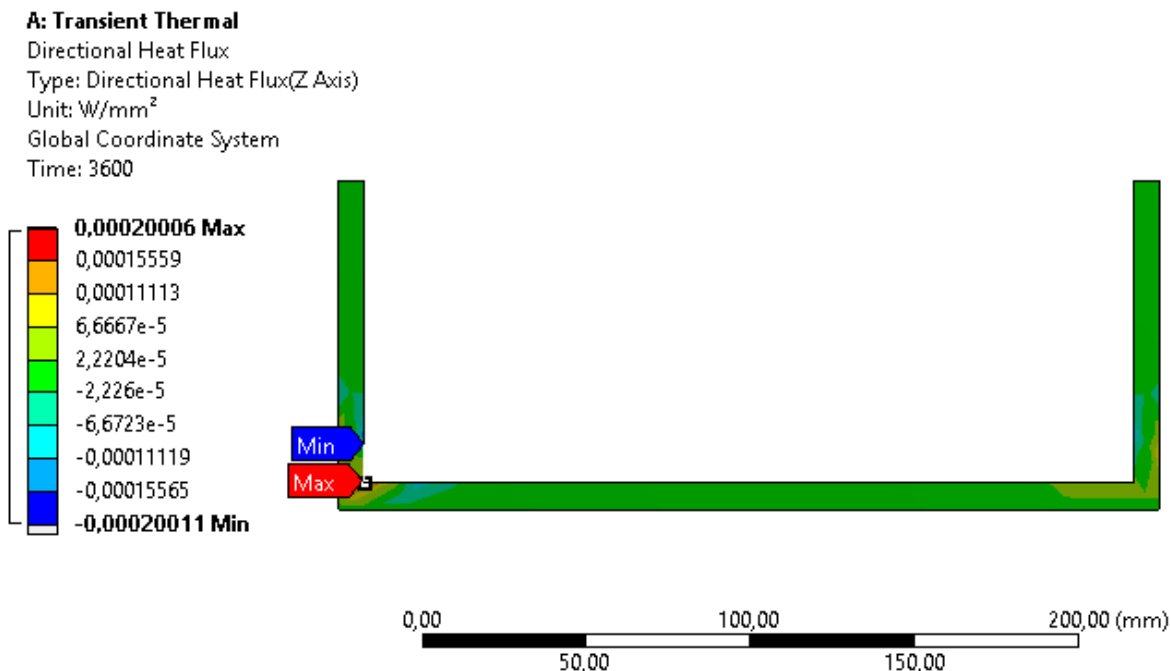
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

**Figura 54 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo y**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

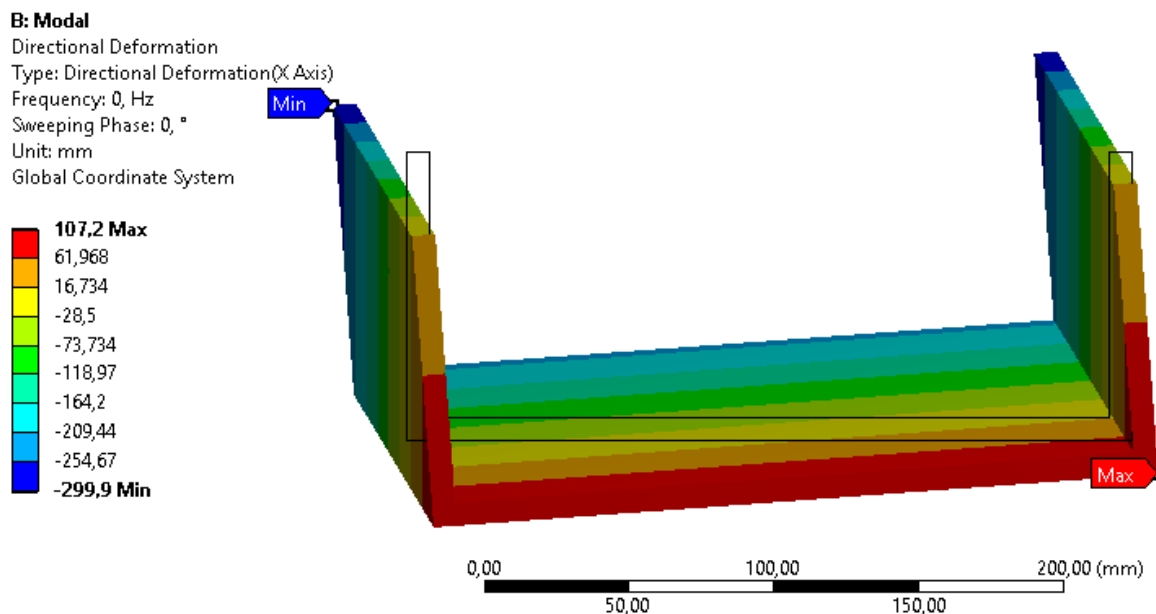
**Figura 55 - Fluxo de calor direcional no perfil - Eixo z**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

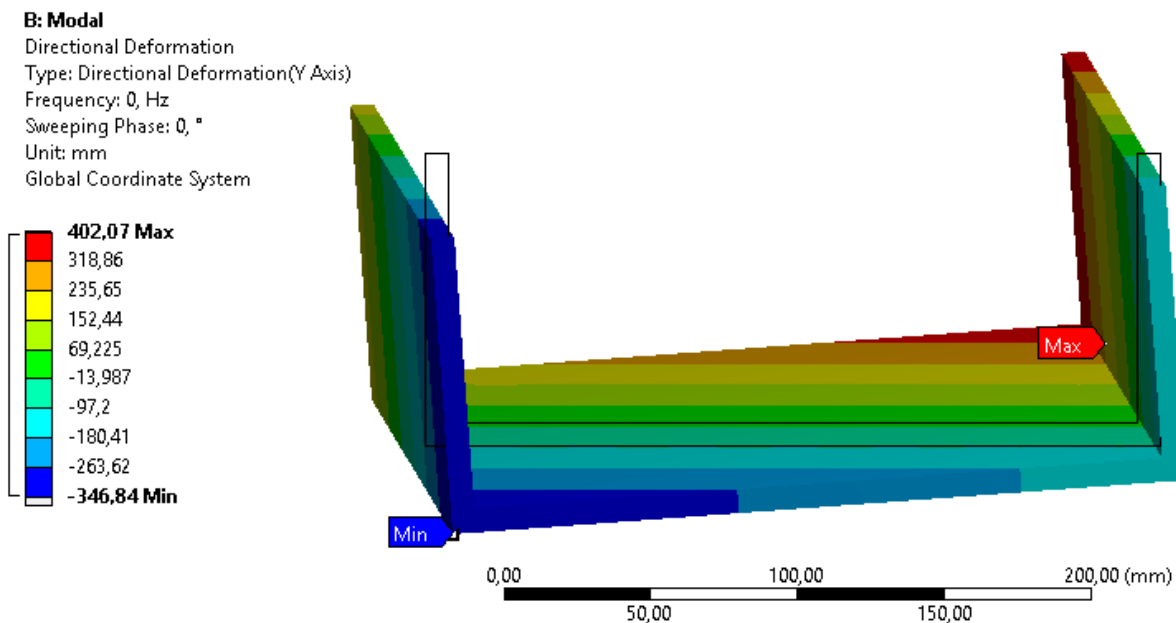
Nas Figuras 56, 57 e 59 está demonstrada a deformação do perfil nas direções x, y e z quando a temperatura de 939,14 °C é aplicada em todo o perfil por 60 minutos.

**Figura 56 - Deformação direcional do perfil - Eixo x**



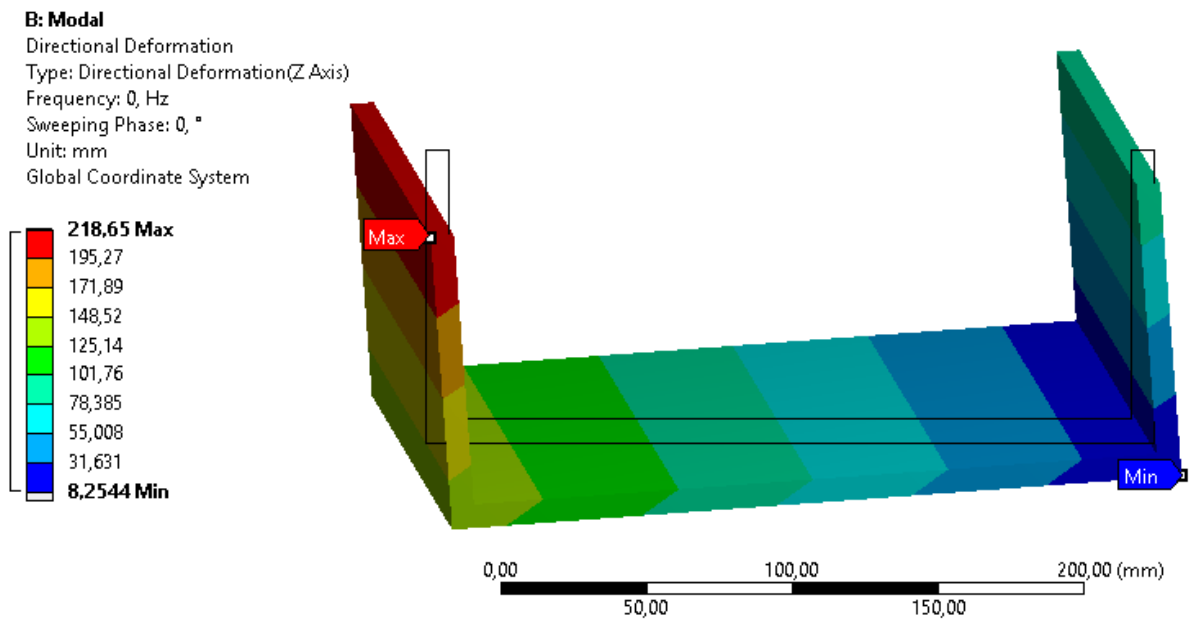
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

**Figura 57 - Deformação direcional do perfil - Eixo y**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Figura 58 - Deformação direcional do perfil - Eixo z



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).