



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALEFF MARQUES DE AMORIM

**ESTUDO DE CASO DE VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURA DE AÇO EM SITUAÇÃO
DE INCÊNDIO: emprego de curva padrão e curvas paramétricas e de métodos
simplificados e avançados**

PALMAS - TO

2019

ALEFF MARQUES DE AMORIM

**ESTUDO DE CASO DE VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURA DE AÇO EM SITUAÇÃO
DE INCÊNDIO: emprego de curva padrão e curvas paramétricas e de métodos
simplificados e avançados**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Dias de
Araújo e Silva
Coorientador: Eng. Pedro Augusto Oliveira
de Carvalho

PALMAS - TO

2019

Amorim, Aleff Marques de

ESTUDO DE CASO DE VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURA DE AÇO
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: emprego de curva padrão e curvas
paramétricas e de métodos simplificados e avançados / Aleff Marques de
Amorim. – Palmas, 2013

92 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, Campus
Palmas, 2019.

Orientador(a): Prof. DSc. Thiago Dias de Araújo e Silva

1. Incêndio 2. Estruturas de aço 3. Proteção contra Incêndio I. Título

ALEFF MARQUES DE AMORIM

**ESTUDO DE CASO DE VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURA DE AÇO EM SITUAÇÃO
DE INCÊNDIO: emprego de curva padrão e curvas paramétricas e de métodos
simplificados e avançados**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Coordenação do curso de Engenharia Civil
do Instituto Federal do Tocantins, *Campus*
Palmas, como exigência à obtenção do grau
de Engenheiro Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. DSc. Thiago Dias de Araújo e Silva

Prof. MSc. Adriano dos Guimarães de Carvalho

Eng. Esp. Germano Alves Côrrea de Sá

RESUMO

Incêndios constituem assunto de grande relevância para a sociedade. Casos nacionais e internacionais divulgados amplamente pela mídia, como o evento ocorrido no edifício Wilton Paes, em São Paulo, ou ainda as fatalidades na boate Kiss, em Santa Maria, alertam a comunidade científica para a busca de maior entendimento sobre o tema. Este fenômeno tem grande relevância em edifícios de estruturas de aço, dada sua alta condutividade térmica e a redução das propriedades térmicas com o aumento da temperatura. Entretanto, as normas pertinentes em vigor trazem abordagens repletas de limitações, as quais geralmente suscitam dimensionamentos muito conservadores da proteção contra incêndio. Diante do exposto, é proposta por este trabalho a verificação de uma estrutura de aço em situação de incêndio, de maneira a buscar um dimensionamento mais realista. Para tanto, será realizada uma comparação entre métodos simplificados de cálculo propostos pelas normas ABNT NBR 14323:2013 e EN 1993-1-2 (2010) e análises avançadas utilizando MEF (Método dos Elementos Finitos), baseando os estudos nas curvas de Incêndio Padrão ISO-834 e de Incêndio Natural. Por fim, será realizado um dimensionamento utilizando tabelas empíricas disponíveis no mercado, seguido da comparação de custos obtidos pelos métodos propostos. Desta forma, busca-se apresentar dimensionamentos condizentes com a realidade, com vistas à redução de custos dispensáveis para proteção, o que pode trazer mais competitividade para o cenário da indústria do aço, ou ainda a obtenção de dimensionamentos mais seguros, condizentes com a realidade da edificação.

Palavras-chave: Incêndio. Aço. Estruturas de aço. Proteção contra incêndio.

ABSTRACT

Fires are a matter of great relevance to society. National and international cases widely publicized by the media, such as the event at Wilton Paes building in São Paulo, or the fatalities at Kiss nightclub in Santa Maria, warns the scientific community to seek greater understanding of the issue. This phenomenon has great relevance in steel structures buildings, given its high thermal conductivity and the reduction of thermal properties as temperature grows. However, relevant regulations use to bring overlapping approaches, which often give rise to very conservative fire protection design. In view of the above, it is proposed by this work the verification of a steel structure in a fire situation, in order to seek a more realistic design. To do so, a comparison between simplified calculation methods proposed by the norms ABNT NBR 14323: 2013 and EN 1993-1-2 (2010) and advanced analyzes using FEM (Finite Element Method) will be made, basing the studies on the standard fire curves ISO-834 and Natural Fire. Finally, a sizing will be done using empirical tables available in the market, followed by the comparison of costs obtained by the proposed methods. In this way, it is sought to present realistic dimensions, with a view to reducing costs that are not necessary for protection, which can bring more competitiveness to the steel industry scenario, or to obtain safer designs, which are consistent with the reality of the building.

Keywords: Fire. Steel. Steel Structures. Fire Protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Metodologias existentes para análise de estruturas de aço em situação de incêndio	19
Figura 2 – Custos gerais em estruturas de aço.....	20
Figura 3 – Triângulo e Tetraedro do fogo	24
Figura 4 – Fases de um incêndio	24
Figura 5 – Métodos de extinção de incêndio.....	25
Figura 6 – Classificação de resistência ao fogo.....	26
Figura 7 - Comparativo entre soluções de estrutura de aço.....	28
Figura 8 – Curva ISO 834	30
Figura 9 – Comparação entre as curvas de incêndio padrão e incêndio natural.....	32
Figura 10 – Dimensões pertinentes a incêndios localizados do Eurocódigo 1.....	37
Figura 11 – Metodologias para análise de estruturas de aço em situação de incêndio.....	39
Figura 12 - Fatores de redução em temperatura elevada	40
Figura 13 – Exemplo de resultado obtido pelo <i>software</i> SAFIR.....	42
Figura 14 - Curvas de velocidade de aquecimento durante o ensaio do incêndio-padrão.....	43
Figura 15 - Configurações mais comuns de proteção para o cálculo do Fator de Massividade	44
Figura 16 – Fluxograma de procedimentos metodológicos.....	45
Figura 17 – Fachada da edificação	47
Figura 18 – Modelo 3D estrutural da edificação	47
Figura 19 – Planta baixa do 1º e 2º Pavimento.....	48
Figura 20 – Pórtico principal A	48
Figura 21 – Pórticos principais B	49
Figura 22 – Pórtico principal C	49
Figura 23 – Vista lateral da edificação	49
Figura 24 – Fluxo de inserção de dados no Elefir-EN	52
Figura 25 – Exemplo de <i>output</i> do Elefir-EN	54
Figura 26 – Discretização da seção transversal em elementos finitos.....	55
Figura 27 – Interface do Wizard2007.....	55
Figura 28 – Interface do FEST2D	56
Figura 29 – Interface do Diamond.....	58
Figura 30 – Compartimentação dos ambientes para análise de incêndio parametrizado	59

Figura 31 – Dados de compartimentação no <i>software</i> Elefir-EN.....	59
Figura 32 – Parâmetros de carga de incêndio no <i>software</i> Elefir-EN	61
Figura 33 – Deformada do pórtico A sob análise ISO 834 avançada, sem proteção	65
Figura 34 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico A, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	65
Figura 35 – Deformada do pórtico A sob análise de curvas paramétricas avançada para incêndio nos dois pavimentos, sem proteção	67
Figura 36 – Curvas de incêndio para o método simplificado – Viga 01 do Pórtico A.....	68
Figura 37 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico A, análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	68
Figura 38 – Deformada do pórtico B sob análise ISO 834 avançada, sem proteção.....	70
Figura 39 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	70
Figura 40 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada no compartimento A, sem proteção	72
Figura 41 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimento A), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	72
Figura 42 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada no compartimento B, sem proteção	74
Figura 43 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimento B), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	74
Figura 44 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada nos compartimentos C e D, sem proteção	76
Figura 45 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimentos C e D), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	77
Figura 46 – Deformada do pórtico C sob análise ISO 834 avançada, sem proteção.....	79
Figura 47 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico C, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	79
Figura 48 – Deformada do pórtico C sob análise de curvas paramétricas avançada nos compartimentos C e D, sem proteção	81
Figura 49 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimentos C e D), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita).....	82
Figura 50 – Curva de Incêndio Localizado para o Pilar 01 no 2º pavimento.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - TRRF para diferentes ocupações, segundo a ABNT NBR 14432:2000	27
Quadro 2 – Modelos analíticos (métodos simplificados)	29
Quadro 3 – Fatores δq_1 e δq_2	33
Quadro 4 – Fatores δq_n	33
Quadro 5 – Influência das medidas de proteção ativa no cálculo da carga de incêndio	34
Quadro 6 - Carta de cobertura para placas de gesso.....	44
Quadro 7 – Carta de cobertura para argamassa projetada (500 °C)	83
Quadro 8 – Composição de custo unitário de proteção passiva contra incêndio em vigas com argamassa projetada, espessura 10mm	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ações na estrutura.....	50
Tabela 2 – Propriedades da envoltória	60
Tabela 3 – Áreas dos compartimentos.....	60
Tabela 4 – Levantamento de custos por metodologia empregada.....	62
Tabela 5 – Resumo dos perfis dimensionados	63
Tabela 6 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico A.....	64
Tabela 7 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico A.....	66
Tabela 8 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico B	69
Tabela 9 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B (Compartimento A).....	71
Tabela 10 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B (Compartimento B).....	73
Tabela 11 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B (Compartimentos C e D)	75
Tabela 12 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico C	78
Tabela 13 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico C (Compartimentos C e D)	80
Tabela 14 – Espessura dos revestimentos obtido através da carta de cobertura.....	84
Tabela 15 – Custo de revestimento contra incêndio de acordo com metodologia empregada.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas latinas

A_f	área do piso do compartimento;
A_t	área total (incluindo vedações e aberturas);
A_v	área total das aberturas verticais em todas as paredes;
D	diâmetro de incêndio
L_h	projeção horizontal da chama;
L_f	comprimento da chama segundo o eixo;
H_i	potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível.
M_i	massa total de cada componente i do material combustível;
Q	taxa de liberação de calor
Q_D^*	taxa de liberação de calor relacionado com o diâmetro D do incêndio localizado;
Q_H^*	taxa de liberação de calor relacionado com a altura H do compartimento;
Q_c	parcela da taxa de liberação de calor Q transmitida por convecção;
$Q_{f,k}$	valor da carga de incêndio específica;
H	altura do compartimento (do piso ao teto);
O	fator de abertura;
T	temperatura.

Letras minúsculas latinas

$\dot{h}_{net}$	fluxo de calor efetivo por unidade de área;
$\dot{h}$	fluxo de calor por unidade de área;
h_{eq}	média ponderada das alturas das aberturas;
$q_{f,d}$	valor da carga de incêndio de projeto;
$q_{f,k}$	valor da carga de incêndio específica;
t_{max}	instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases

z_0	origem virtual da altura z ;
r	distância horizontal entre o eixo vertical de incêndio e o ponto no teto em que é calculado o fluxo térmico;
t	tempo;
z	altura;
z'	posição vertical da fonte de calor virtual;
m	fator de combustão, tomado igual a 0,8 para materiais celulósicos.

Letras maiúsculas do alfabeto grego

θ_g	temperatura dos gases no compartimento de incêndio, ou na proximidade do elemento, função do fator de abertura O e da absortividade térmica b ;
θ_m	temperatura da superfície do elemento;
θ_{max}	temperatura máxima;
Γ	fator de conversão do tempo,
Φ	fator de vista.

Letras minúsculas do alfabeto grego

α_c	coeficiente de transferência de calor por convecção;
δ_{q1}	fator adimensional relacionado ao risco de ativação de incêndio por influência do tamanho das compartimentações;
δ_{q2}	fator adimensional relacionado ao risco de ativação de incêndio por influência do tipo de ocupação do edifício;
δ_{qn}	fator adimensional que considera o produto das medidas de proteção ativa
ε_f	emissividade das chamas;
ε_m	emissividade da superfície do elemento;
σ	constante de Stephan Boltzmann ($=5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$).

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
CEN	<i>European Committee for Standardization</i> (Comitê Europeu de Normalização)
CTIF	<i>Comité Technique International de prevention et d'extinction de Feu</i> . Associação Internacional de Incêndio e Serviços de Resgate;
EC1	Eurocódigo 1
ELU	Estado-Limite Último
EN	Norma Européia
ISO	International organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos;
NBR	Norma Brasileira;
SAFIR	<i>Safety Fire Resistance</i> . Programa baseado no método dos elementos finitos para análise térmica e estrutural desenvolvido por Franssen;
SCI	Segurança contra Incêndio;
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	PROBLEMA DE PESQUISA	19
3	JUSTIFICATIVA.....	20
4	OBJETIVOS.....	22
	4.1. Objetivo Geral.....	22
	4.2. Objetivos Específicos	22
5	REVISÃO DE LITERATURA	23
	5.1. Conceitos gerais	23
	5.1.1. Considerações sobre o fogo	23
	5.1.2. Classificação de resistência ao fogo.....	25
	5.1.3. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo - TRRF	26
	5.1.4. Sistemas de proteção contra incêndio	27
	5.2. Análise Térmica	28
	5.2.1. Curva de Incêndio-Padrão ISO 834	29
	5.2.2. Curvas de Incêndio Natural.....	31
	5.3. Análise Mecânica	38
	5.3.1. Métodos de dimensionamento simplificados.....	40
	5.3.2. Método avançado de dimensionamento	41
	5.3.3. Método empírico de dimensionamento.....	42
6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
	6.1. Caracterização da pesquisa	46
	6.2. Fundamentação.....	46
	6.3. Estudo de caso	46
	6.3.1. Caracterização do objeto estudado.....	46
	6.3.2. Dimensionamento Estrutural.....	50

6.3.3.	Dimensionamento em situação de incêndio.....	50
6.3.4.	Dimensionamento empírico e análise de custos	61
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
7.1.	Dimensionamento à temperatura ambiente	63
7.2.	Pórtico A.....	63
7.2.1.	Curva ISO-834	63
7.2.2.	Curva Paramétrica.....	66
7.3.	Pórtico B	68
7.3.1.	Curva ISO 834	68
7.3.2.	Curvas Paramétricas no Compartimento A.....	71
7.3.3.	Curvas Paramétricas no Compartimento B.....	73
7.3.4.	Curvas Paramétricas nos Compartimentos C e D	75
7.4.	Pórtico C	77
7.4.1.	Curva ISO 834	77
7.4.2.	Curva Paramétrica.....	79
7.5.	Incêndio Localizado.....	82
7.6.	Cartas de Cobertura.....	83
7.7.	Análises de custo para revestimento contra fogo.....	84
8	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Diversos casos de incêndio transcorreram a história da humanidade. Grandes incêndios como os ocorridos nas cidades de Londres e Chicago ocorridos respectivamente nos anos de 1666 e 1871, para citar alguns dos mais emblemáticos, são exemplos de como o fogo descontrolado pode ser devastador, abarcando consigo diversas vidas humanas (MACHI JÚNIOR et al., 2014).

Eventos de ampla relevância suscitaram inclusive a elaboração de estudos mais aprofundados sobre SCI (Segurança Contra Incêndio). “Ao longo do século XX, muitos dos avanços na proteção contra incêndio aconteceram como reação à ocorrência de grandes incêndios” (CAMPOS, 2012, p.9). De acordo com Campos (2012), o incêndio do Chiado, em Portugal, foi fator crucial para a elaboração do Decreto-Lei nº 426/89, que trata das ‘Medidas Cautelares de Segurança contra Incêndios em Áreas Urbanas Antigas’.

Em Portugal, a Segurança contra Incêndios ganhou força após o grande incêndio do Chiado no centro histórico de Lisboa [...], em 1988, que começou no edifício Grandela e [...] atingiu outros 17 edifícios, causando grande impacto social e desencadeando diversos estudos que levaram à tomada de medidas preventivas não só na região como em todo o país (SANTANA et al., 2008, pg. 3).

Múltiplos incidentes como estes também aconteceram no Brasil, desde o Edifício Joelma, em 1974, passando pelas fatalidades na boate Kiss, e mais recentemente, com a ruína do Edifício Wilton Paes de Almeida em maio de 2018, o qual era considerado um ‘marco da arquitetura modernista’ (MURARO, 2018).

Para edificações construídas em estruturas de aço, do ponto de vista estrutural, este risco é intensificado por inúmeros fatores. Apesar de apresentar diversas propriedades superiores a outros sistemas estruturais consagrados, como leveza, agilidade e precisão na construção, redução de custos com fundações devido ao peso e maior facilidade em vencer vãos, sua elevada condutividade térmica é considerada uma desvantagem a ser ponderada (MESQUITA, 2013).

Esta propriedade térmica carrega consigo a necessidade de uma maior atenção no que tange a possíveis situações de incêndio, visto que altas temperaturas afetam drasticamente as características de resistência deste material. Como afirmam Bellei et al (2008, p. 199), muitos dos tipos de aços comerciais “têm sua resistência reduzida em 50% a partir da temperatura média de 550°C”.

Ademais, conforme exposto por Del Carlo (2008, p. 10), “a formação de arquitetos e de engenheiros tem dado pouca ênfase para a SCI nas edificações, isso nos têm levado a práticas com baixa exigência em relação ao controle do risco de incêndio”. Assim, percebe-se uma

crescente preocupação com os estudos acadêmicos relacionados à resistência de estruturas de aço em situação de incêndio, com vistas à segurança de seus ocupantes e dos bens inclusos nestas edificações.

“É, pois, fundamental, saber avaliar a resistência das estruturas metálicas quando sujeitas à ação do fogo, tendo em vista que o objetivo principal da segurança contra incêndio nos edifícios é a limitação dos riscos para as pessoas e para a sociedade, para os bens vizinhos e, quando necessário, para os bens diretamente expostos ao incêndio” (VILA REAL, 2003, p. 1).

Atualmente, existem três abordagens para análise e dimensionamento de estruturas de aço sob ação do fogo: a primeira a partir de regras prescritivas, a segunda baseada no desempenho dos elementos ou uma terceira através da realização de ensaios padronizados para aferição das propriedades dos materiais. Todas estas abordagens são normatizadas, nacional e internacionalmente.

A Norma Brasileira ABNT NBR 14323:2013 “estabelece os requisitos para o projeto das estruturas de aço [...] em situação de incêndio [...] conforme os requisitos de resistência ao fogo, prescritos pela ABNT NBR 14432” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000, p.1). A partir desta norma são definidas as metodologias aceitas nacionalmente para dimensionamento desse tipo de estrutura. Além desta, outras normas são amplamente difundidas e utilizadas internacionalmente, como as Normas Europeias EN 1991-1-2:2010 e EN 1993-1-2:2010, que tratam respectivamente das ações em estruturas expostas ao fogo e da verificação da resistência ao fogo em estruturas de aço.

As análises segundo metodologias prescritivas preveem a verificação de elementos individuais da estrutura, baseadas em uma curva de incêndio normalizado. Este tipo de metodologia não leva em conta a existência de elementos de proteção passiva, nem tampouco considera elementos de proteção ativa, como *sprinklers* ou sistemas de detecção. Ainda, de acordo com Vila Real (2003), limita-se a temperatura do aço à temperatura de colapso do elemento exposto ao incêndio padrão, sem considerar as circunstâncias e particularidades em que a estrutura é sujeita ao incêndio, como qual o tipo do incêndio ou quais as consequências de carregamento ou de interação.

Alternativamente a esta metodologia, é possível realizar a análise de estruturas de aço em situação de incêndio de acordo com uma perspectiva que considere o desempenho dos elementos estruturais, sujeitando-os a cenários mais realistas.

“[...]a nível internacional, a regulamentação de segurança contra incêndio em edifícios tem evoluído no sentido de se libertar progressivamente das exigências de caráter prescritivo, passando a basear-se mais no desempenho dos elementos de construção,

deixando ao projetista a liberdade de escolha das soluções mais adequadas a cada caso” (VILA REAL, 2003, p. 2-3).

Este tipo de análise é baseado no comportamento físico do material. Numa abordagem baseada em desempenho, são consideradas diversas variáveis, entre elas a temperatura do aço. É levada em conta ainda a avaliação das medidas passivas e ativas de segurança, culminando, geralmente, em estratégias mais racionais e econômicas. A ABNT NBR 14323:2013 define os métodos avançados de cálculo como aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio, seja para elementos individuais ou para estruturas completas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

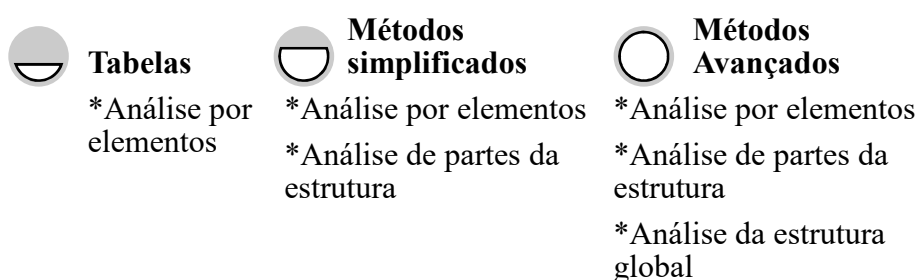
A evolução destes modelos de análise vem acompanhada de um notável progresso acadêmico no desenvolvimento de métodos analíticos voltados à SCI nos últimos anos, e ao aparecimento de programas de cálculo baseados no Método de Elementos Finitos - MEF, para simular o comportamento das estruturas em situação de incêndio. Entretanto, ainda existem pontos a serem estudados nesta área do conhecimento, dada a indução ao dimensionamento simplificado por parte das prescrições normativas, acompanhado da comodidade e facilidade alvitradas por dimensionamentos empíricos baseados em tabelas. Estas aplicações tendem ao superdimensionamento da proteção passiva, com resultados geralmente negativos em relação aos custos de implantação das proteções determinadas.

Diante do exposto, este trabalho propõe-se a demonstrar que, em análises de estruturas de aço sob a ação do fogo, estudos baseados no desempenho do material tem mais propensão à eficácia do que modelos prescritivos e empíricos. Será, portanto, realizada uma comparação entre estes métodos através do dimensionamento de um edifício industrial em estruturas de aço, utilizando para isso as curvas de incêndio padrão e natural, a fim de evidenciar a viabilidade econômica das abordagens avaliadas.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Dentre os tipos de análise disponíveis, os projetos de proteção passiva de estruturas de aço submetidas a situações de incêndio têm sido realizados, em maior parte, segundo enfoques empíricos ou prescritivos, com temperaturas críticas pré-definidas. Estes podem seguir diferentes métodos, conforme Figura 1, os quais analisam a estrutura através de seus elementos individuais ou de uma maneira global. Ainda assim, estas proposições não levam em conta diversos fatores, como os esforços atuantes em situação de incêndio, ou ainda as características físicas da edificação, como aberturas, revestimentos e seus sistemas de proteção ativa.

Figura 1 – Metodologias existentes para análise de estruturas de aço em situação de incêndio



Fonte: Baseado em VILA REAL, 2003, p.5.

Este tipo de análise é, em geral, simplificado, baseando-se em ações térmicas através de curvas de incêndio nominais, como a curva de incêndio padrão, ISO 834. Destarte, notam-se implicações diretas nos resultados, com inclinação voltada ao conservadorismo, o que acaba por gerar soluções mais dispendiosas.

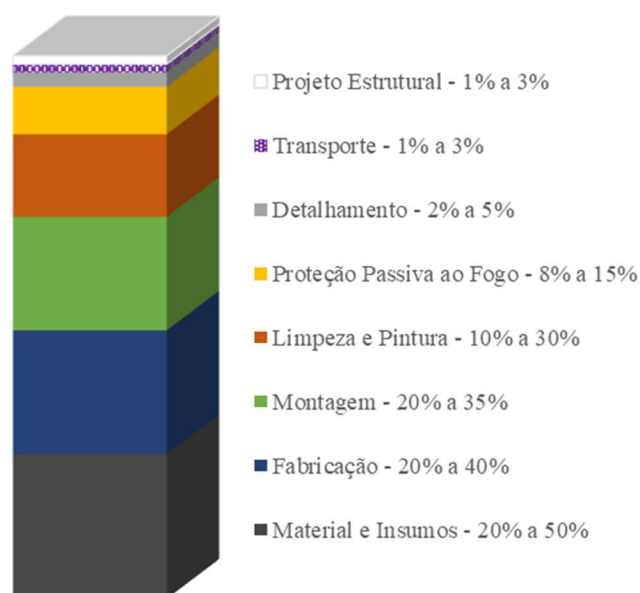
3 JUSTIFICATIVA

A segurança contra incêndio em edificações é tema de relevância global. Dados levantados pela CTIF (Associação Internacional de Incêndio e Serviços de Resgate) estimam um total de 79 a 136 mil mortes em situações de incêndio no ano de 2015 (CENTRE OF FIRE STATISTICS, 2017). Para mais, Seito (2008) aponta as edificações como os locais de maior incidência de incêndios, sejam eles de pequeno ou grande porte.

À vista do exposto, observa-se na comunidade científica internacional o crescimento de uma corrente de pesquisadores em busca de um melhor conhecimento do comportamento das estruturas em situação de incêndio. O desenvolvimento de *softwares* como SAFIR (FRANSSEN, 2005), demonstra a grande importância dada a este tema perante os especialistas.

Além disto, os gastos com proteção passiva em estruturas de aço ainda acrescentam muito ao custo total do sistema, tornando-o por vezes menos competitivo do que outros sistemas estruturais. Há, portanto, uma busca por parte da indústria da construção metálica, de tornar mais competitivos os edifícios em aço. A Figura 2 demonstra que cerca de 8 a 15% dos custos em estruturas de aço são provenientes da proteção passiva ao fogo, os quais poderiam facilmente serem reduzidos caso houvesse uma análise mais aprofundada do desempenho dos materiais aplicados e das características do local.

Figura 2 – Custos gerais em estruturas de aço



Fonte: Adaptado de BELLEI et al, 2008, p. 26.

Desta forma, a busca pela aplicação de metodologias com foco em melhores resultados para projetos de proteção passiva em estruturas de aço, cumpre função tanto acadêmica, quanto

financeira e social. Posto que os métodos empíricos desconsideram completamente diversos fatores importantes ao dimensionamento das proteções passivas, que as normas brasileiras baseiam grande parte de suas prescrições em métodos simplificados, é proposto por este estudo evidenciar a distinção das análises de cálculo baseadas no desempenho dos materiais a fim de obterem-se sistemas de proteção mais economicamente viáveis, buscando aumentar assim a competitividade das estruturas em aço.

4 OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Realizar a verificação do dimensionamento de um galpão industrial em estrutura de aço sob ação do fogo, utilizando para isso duas metodologias: formulações simplificadas das normas ABNT NBR 14323:2013 e EN 1993-1-2:2010, e métodos avançados de engenharia baseados em Método dos Elementos Finitos (MEF). Para todos os casos será dimensionada a necessidade de proteção passiva para a estrutura, os quais serão comparados entre si e com tabelas empíricas de proteção passiva disponíveis no mercado brasileiro. O estudo será realizado de acordo com as curvas de incêndio padrão e de incêndio natural.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar a modelagem e dimensionamento de uma estrutura a temperatura ambiente;
- Dimensionar a estrutura ao fogo sob os aspectos prescritivos da norma através da metodologia simplificada proposta pelas normas ABNT NBR 14323:2013 e EN 1993-1-2:2010;
- Dimensionar a estrutura ao fogo sob métodos avançados de cálculo baseados em MEF;
- Comparar o dimensionamento segundo as duas metodologias propostas;
- Confrontar os resultados dos métodos propostos a partir da utilização da curva de incêndio padrão ISO-834 e das curvas paramétricas.
- Comparar os resultados obtidos com modelos empíricos, através de tabelas, disponíveis no mercado.
- Realizar orçamento dos custos de proteção passiva de acordo com as metodologias propostas, a fim de identificar qual delas apresenta maior viabilidade financeira.

5 REVISÃO DE LITERATURA

O atual capítulo expõe os pontos mais relevantes relacionados à análise estrutural de pórticos de aço em situação de incêndio, descrevendo conceitos básicos a serem empregados durante o trabalho e definindo as curvas de incêndio. Serão abordados ainda os procedimentos utilizados para verificar a resistência mecânica das estruturas de aço em situação de incêndio através de métodos de cálculo simplificados e avançados.

A norma ABNT NBR 14323:2013 (p. 1) define os projetos em situação de incêndio como “a verificação da estrutura aos estados limites últimos aplicáveis em temperatura elevada”. A segurança em situação de incêndio para os elementos assim dimensionados deve atender as condições expostas por esta e outras normas correlatas, a fim de possibilitar a fuga dos ocupantes da edificação em segurança, evitando a ruína estrutural, além de proporcionar segurança às operações de combate ao incêndio e a minimização de danos a edificações adjacentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Isto aliado à busca pela limitação do risco de perda da propriedade exposta ao fogo.

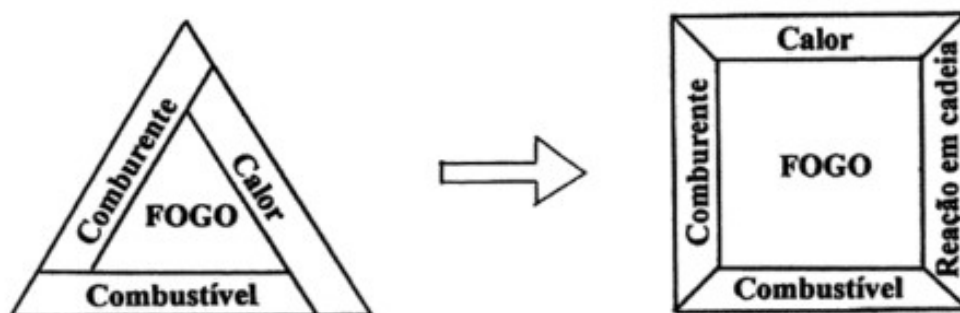
5.1. Conceitos gerais

5.1.1. Considerações sobre o fogo

Existem diversas definições a respeito do fogo. A norma ABNT NBR 13860 (ABNT, 1997, p. 6) descreve o fogo como “o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. Já a norma ISO 8421-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1987, p.2) o define como “processo de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado de fumaça, chama ou ambos. A mesma norma define incêndio como “combustão que se desenvolve de maneira descontrolada no tempo e espaço” (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, p.2).

Em todo caso, é importante entender a maneira como este é desenvolvido e propagado de acordo com o tempo. Para que venha a existir, é necessário que ocorra simultaneamente a presença de material combustível, comburente e uma fonte de calor, de modo que sua propagação ocorre em função da transferência de calor, causando uma reação em cadeia (BRENTANO, 2007). Estes elementos compõem o triângulo e tetraedro do fogo (Figura 3).

Figura 3 – Triângulo e Tetraedro do fogo

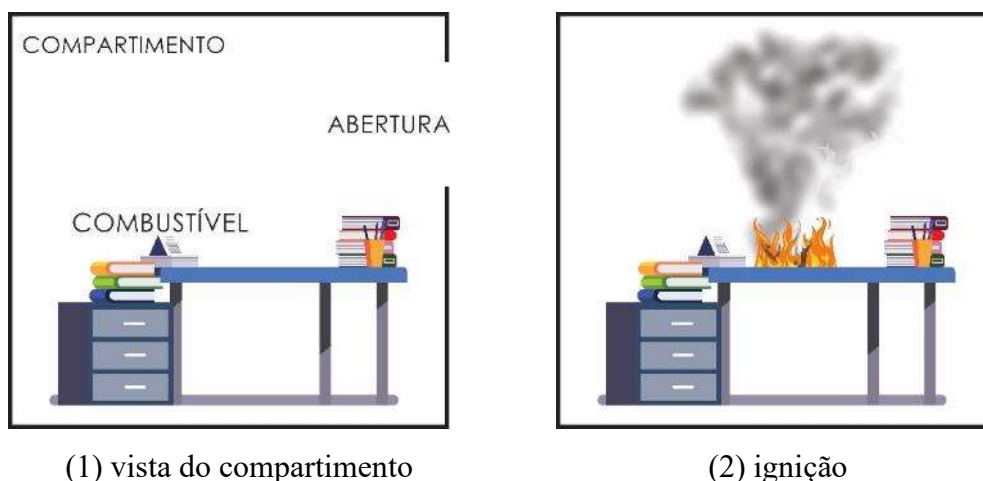


Fonte: BRENTANO, 2007.

A propagação de um incêndio sobrevém através da transmissão de calor, a qual pode acontecer por convecção, radiação ou condução. O fluxo de calor por convecção acontece através da movimentação dos gases quentes, os quais tendem a subir por serem menos densos, gerando o contato com outros elementos construtivos. O calor por radiação se propaga por ondas de um corpo a alta temperatura para outro de temperatura mais baixa. Por fim, o calor transferido por condução trafega de uma região de maior temperatura para uma de menor temperatura em um material sólido (SILVA, 2010).

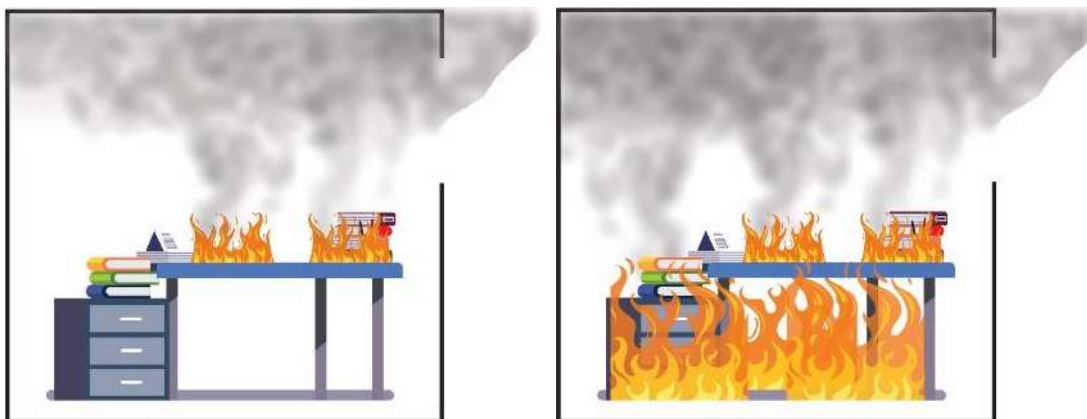
No que tange à maneira como um incêndio evolui, este pode ser dividido em diferentes fases para um dado compartimento, conforme Figura 4.1. A primeira etapa é a de ignição (Figura 4.2), quando ocorre uma elevação progressiva da temperatura, geralmente originada em um ponto específico (CADORIN, 2003). Este foco pode ou não se espalhar, caso o material em chamas se queime completamente sem transferir o calor a outros materiais, conforme Figura 4.3 (SILVA, 2010). No caso de propagação, a temperatura dos gases no ambiente se eleva, causando uma ignição súbita de diversos materiais, fenômeno conhecido como *flashover* (BLES, 2002).

Figura 4 – Fases de um incêndio



(1) vista do compartimento

(2) ignição



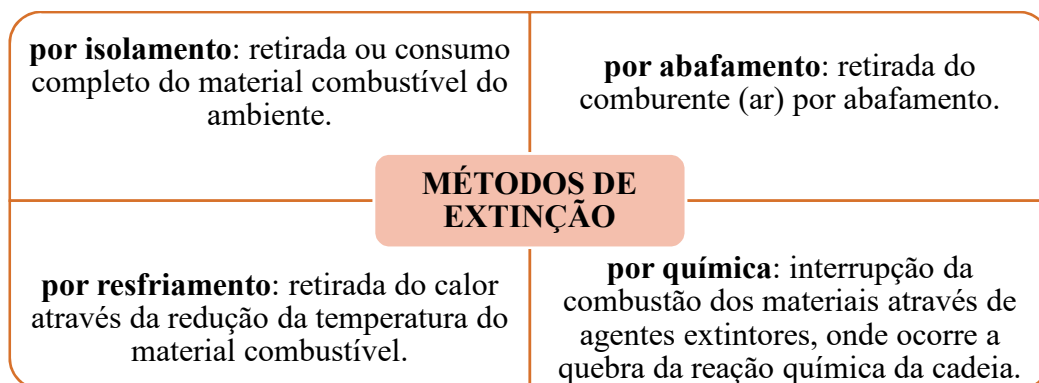
(3) fogo localizado

(4) fogo desenvolvido

Fonte: Adaptado de CADORIN, 2003.

Neste ponto o fogo se torna completamente desenvolvido (Figura 4.4), com uma temperatura aproximadamente constante, seguido por uma fase de resfriamento natural (Figura 5), ocasionado pela eliminação de pelo menos uma das formas fundamentais de propagação de incêndio, ou da interrupção da reação em cadeia (BRENTANO, 2007).

Figura 5 – Métodos de extinção de incêndio



Fonte: Baseado em BRENTANO, 2007.

5.1.2. Classificação de resistência ao fogo

Os critérios para classificação da resistência ao fogo de componentes e elementos da construção estão relacionados às funções de retenção de calor e dos gases quentes nos compartimentos, de modo que não haja exposição destes a pessoas e objetos nas faces não expostas ao fogo (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013).

Elementos ou sistemas estáveis ao fogo são capazes de manter seu caráter funcional durante o tempo exposto ao incêndio. Aqueles que apresentam isolamento térmico impedem que o calor seja transmitido por radiação e condução através da superfície do elemento

construtivo. Por fim, elementos estanques são aqueles que não permitem que chamas e gases quentes desenvolvidos no interior do ambiente sejam liberados por fissuras ou aberturas.

Figura 6 – Classificação de resistência ao fogo



Fonte: Adaptado de CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, p. 90-91.

Em função desses critérios, os elementos construtivos podem ser classificados como Corta-Fogo, Pára-Chamas ou Estável ao Fogo (Figura 6). Preferem-se, logo, para aplicação de sistemas ou elementos com função de resistência a situações de incêndio, aqueles com características corta-fogo, visto que estes englobam todos os atributos de estanqueidade, isolamento térmico e estabilidade.

5.1.3. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo - TRRF

Os materiais empregados na estrutura das edificações e nas compartimentações devem estar em acordo com a norma ABNT NBR 14432:2000, que trata das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos. Esta norma apresenta o conceito de TRRF, o qual é expresso pelo tempo mínimo no qual um elemento submetido ao fogo deve resistir sem que este perca suas características de segurança. Normalmente esse tempo é determinado por ensaio em fornos controlados, obedecendo o crescimento da temperatura a uma curva de incêndio padronizada (item 5.2.1).

Para tanto, a norma classifica as edificações quanto à ocupação, de modo a apontar tempos mínimos de resistência ao fogo coerentes com os seus respectivos usos (Quadro 1). Por fim, esta norma isenta dos requisitos de resistência ao fogo por ela expressos, as edificações que atendam às condições mínimas nela expostas, como em edifícios com área total igual ou menor a 750m² ou edificações térreas, salvo exceções elencadas.

Quadro 1 - TRRF para diferentes ocupações, segundo a ABNT NBR 14432:2000

Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, em minutos					
NBR 14432:2000	Altura de edificação - metros				
	≤ 6	6 < h ≤ 12	12 < h ≤ 23	23 < h ≤ 30	h > 30
Nº aproximado de andares	2	2 a 4	4 a 8	8 a 11	11+
Residências	30	30	60	90	120
Hotéis	30	60 (30)	60	90	120
Comércio varejista	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Escritórios	30	60 (30)	30	90	120
Escolas	30	30	60	90	120
Garagem aberta lateralmente	30	30	30	30	60
Garagem não aberta lateralmente	30	60 (30)	60	90	120
Indústrias ($q_u < 1200 \text{ MJ/m}^2$)	30	30	60	90	120
Depósitos (baixo risco)	30	30	30	30	60

Fonte: PANNONI, 2007.

5.1.4. Sistemas de proteção contra incêndio

Os sistemas de proteção contra incêndio têm a função de dificultar a propagação do incêndio, mantendo assim a estabilidade da edificação (GILL et al, 2008). Estes são basicamente constituídos de sistemas de proteção passiva e ativa.

Para as situações onde a estrutura do edifício não for capaz de resistir os carregamentos impostos pela carga de incêndio por um tempo maior do que o estipulado pela ABNT NBR 14432:2000, torna-se necessário a aplicação de sistemas de proteção. Neste tópico serão apresentadas algumas das medidas de segurança contra incêndio mais utilizadas.

Os sistemas de proteção passiva são medidas de proteção que abrangem desde a resistência ao fogo dos elementos construtivos, até adequações arquitetônicas voltadas à elaboração de rotas de fuga e compartimentação, cuja atuação independe de qualquer ação externa (SILVA, 2010).

“As medidas passivas de proteção contra incêndio são aquelas incorporadas diretamente ao sistema construtivo. Funcionais em situação de uso normal do edifício, reagem passivamente ao desenvolvimento do incêndio, não estabelecendo situações propícias ao seu crescimento e propagação; não permitindo o colapso estrutural do edifício; facilitando a fuga dos usuários e garantindo a aproximação e ingresso no edifício para o desenvolvimento das ações de combate” (ONO, 2008, p.127 apud BERTO, 1991)

Vila Real (2003) faz referência à economia obtida em optar por medidas de proteção passiva, se comparadas em relação ao aumento da massa de aço nos elementos a fim de aumentar a resistência das estruturas de aço. Na Figura 7 é traçado um comparativo entre as soluções mais utilizadas para proteção dos elementos estruturais.

Figura 7 - Comparativo entre soluções de estrutura de aço

Placa de Silicato de Cálcio	Argamassa Projetada	Revestimento Intumescente
+ • Instalação limpa • TRRF até 120 minutos	+ • Baixo custo • Resistência Térmica e acústica • TRRF até 240 minutos	+ • Facilidade na manutenção / limpeza • Arquitetura permanece aparente • Leve e fino • Otimiza o espaço da construção • Permite acabamento da cor desejada • Não retém sujeiras • TRRF até 120 minutos
- • Esconde a estrutura metálica • Sem flexibilidade para acompanhar as estruturas • Demora para instalação das placas • Espessuras muito elevadas, necessitando em alguns casos, redimensionamento das cargas estruturais.	- • Fragilidade ao contato físico • Aplicação gera muita sujeira • Dificuldade em manter as mesmas espessuras • Aparência não agradável • Requer mais espaço	- • Requer aplicadores qualificados • Verificação de qualidade da aplicação • Tempo de secagem maior • Deve haver compatibilidade com <i>primer</i> utilizado

Fonte: CKC, 2013.

Já os sistemas de proteção ativa abrangem as medidas de proteção que agem durante a ocorrência de incêndio, os quais podem ser acionados manual ou automaticamente. Segundo Silva (2010), um sistema de proteção ativa é essencialmente constituído de instalações prediais para detecção e alarme do incêndio, para combate ao fogo e para orientação do abandono.

5.2. Análise Térmica

A análise térmica é o estudo do desenvolvimento e da distribuição de temperatura nas peças estruturais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

A resistência ao fogo dos elementos estruturais é estudada através da reação ao calor dos materiais. Desta forma, mudanças no comportamento das estruturas são esperadas de acordo com o nível de carregamento térmico exposto aos compartimentos. As características mecânicas do material aquecido são reduzidas e esforços solicitantes de origem térmica são desenvolvidos, o que provoca uma sobrecarga na estrutura aquecida, por meio das ações térmicas descritas pelos fluxos de calor (COSTA, 2006).

Para facilitar a simulação dos efeitos da ação térmica de um incêndio sobre a estrutura, o aquecimento é caracterizado por modelos matemáticos, formulados de maneira a descrever a variação de temperatura do compartimento em função do tempo (COSTA, 2006). Estas curvas

podem ser padronizadas ou parametrizadas pelas características específicas ao local de incêndio. Reis (2011) lista alguns dos modelos utilizados no último século para análise de compartimentos em situação de incêndio (Quadro 2).

Quadro 2 – Modelos analíticos (métodos simplificados)

Curvas de incêndio nominais	Curva de incêndio padrão ISO 834
	Curva de incêndio ASTM E119
	Curva de incêndio de hidrocarbonetos
	Curva de incêndio para elementos exteriores
Curvas paramétricas	Swedish fire curves
	EC1
	Babrauskas
	Law
	Lie
	Ma e Mäkeläinen
	BFD Curves
	iBMB Curves

Fonte: Adaptado de REIS, 2011.

Neste tópico são apresentadas as aplicações e limitações das curvas de incêndio a serem empregadas neste trabalho, a saber, a curva de incêndio-padrão ISO 834 e as curvas de incêndio paramétricas adotadas no Anexo A do Eurocódigo 1 (EC1).

5.2.1. Curva de Incêndio-Padrão ISO 834

As curvas de incêndio nominais são funções analíticas que exprimem relações de temperatura em razão do tempo, as quais recebem o termo nominal por não serem capazes de representar um incêndio real (REIS, 2011). Silva (2001, p.31) define estas curvas como “modelos de incêndio para os quais se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeite as curvas padronizadas para ensaio”. Estes modelos são idealizados para análises experimentais e podem ser descritos por diversas curvas padronizadas, conhecidas internacionalmente.

Entre as curvas nominais mais utilizadas, estão as orientadas para compostos celulósicos, hidrocarbonetos, materiais reativos ao fogo e para elementos exteriores, diferenciadas basicamente por sua taxa de aquecimento e fluxo de calor liberado durante a combustão (COSTA, 2006). Sua principal característica é possuir somente o ramo ascendente

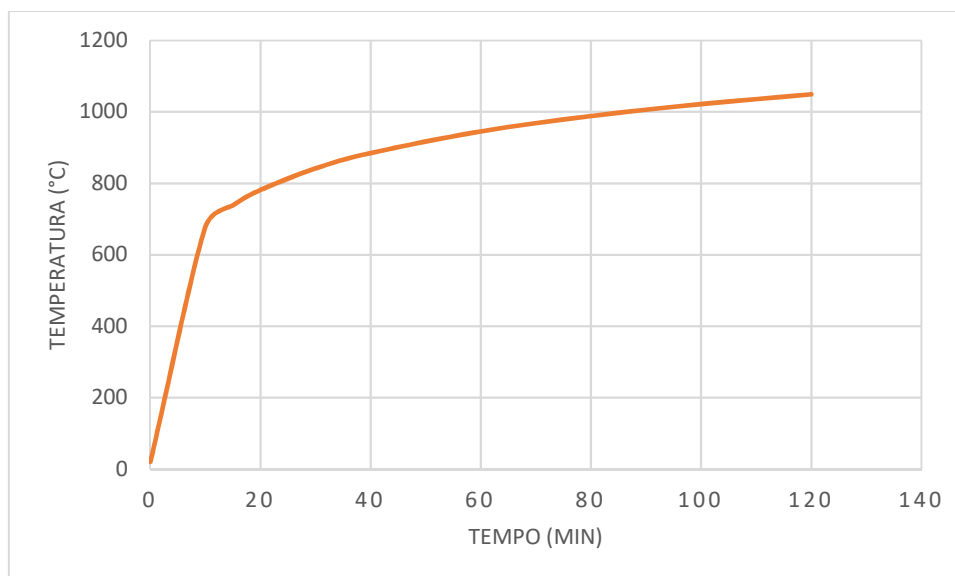
(Figura 8), iniciando sua trajetória temperatura-tempo apenas após o *flashover*. Uma das curvas mais difundidas, a qual é amplamente adotada no Brasil, é a curva de incêndio-padrão ISO 834.

A norma ISO 834, que especifica uma metodologia de teste para determinação da resistência ao fogo de elementos construtivos, propõe a curva de aquecimento padrão para os fornos onde são realizados estes testes (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1990). Esta curva é expressa pela equação (5.1), onde (T) é a temperatura média do forno, em graus Celsius, a qual depende do tempo (t) e da temperatura inicial, admitida a 20°C pela norma.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (5.1)$$

Junior e Molina (2012) mencionam este tipo de curva de incêndio como caminho para a padronização dos procedimentos de ensaio realizados em diferentes locais, tornando possível a comparação dos resultados obtidos para um mesmo material. Entretanto, esta curva apresenta algumas limitações.

Figura 8 – Curva ISO 834



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há a necessidade de um debate mais apurado quanto ao uso de curvas de incêndio-padrão em dimensionamentos estruturais em situação de incêndio, principalmente no que diz respeito à não existência da fase de resfriamento nestas curvas. A inclusão desta etapa contribuiria para a consideração de que há uma retardação de eventual ruína do elemento incendiado, dado que estes elementos geralmente apresentam recuperação no estágio de resfriamento (JUNIOR, 2011).

Conforme elencado por Reis (2011), estas curvas exigem consideração de todo o compartimento, ainda que de grandes dimensões, além de desconsiderarem completamente características inerentes às especificidades do local, como a carga de incêndio e as condições de ventilação. Assim posto, as curvas de incêndio-padrão, como a ISO 834, se mostram incapazes de simular o real comportamento do elemento estrutural analisado em situação de incêndio.

5.2.2. Curvas de Incêndio Natural

A norma ABNT NBR 14432 (2000, p.3) define as curvas de incêndio natural como a “variação de temperatura que simula o incêndio real, função da geometria, ventilação, características térmicas dos elementos de vedação e da carga de incêndio específica”. Segundo este tipo de análise, existem diferentes estudos para o cálculo da temperatura em compartimentos de incêndio, os quais podem ser classificados como simplificados ou avançados.

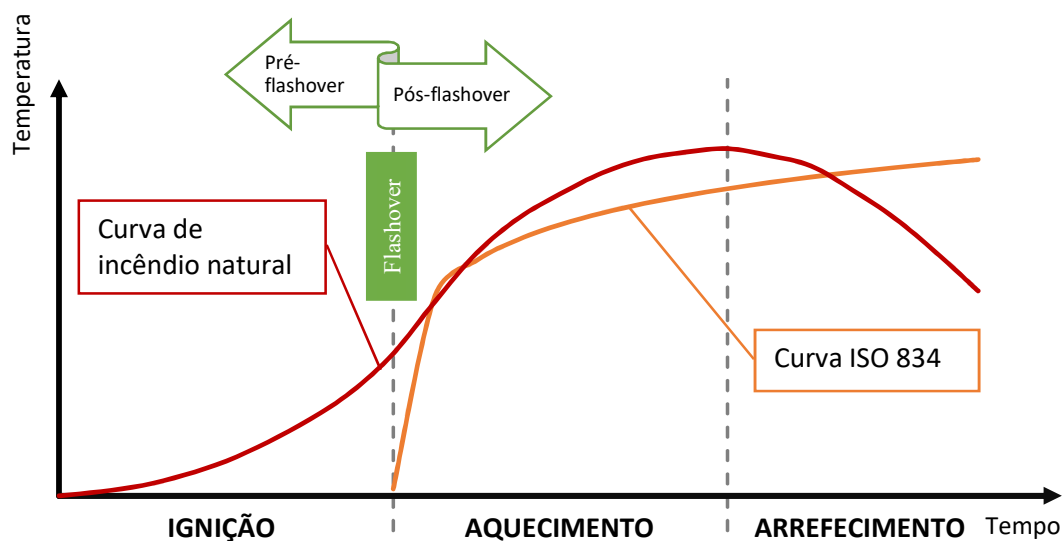
Entre os modelos de incêndio simplificados estão as curvas de incêndio paramétricas e as curvas de incêndio localizado. Silva (2016) evidencia a distinção destes modelos se comparados a uma abordagem prescritiva, por considerarem diversos parâmetros físicos para caracterização do incêndio, como a taxa de liberação de calor, área de incêndio, propriedades da envolvente, área das aberturas e altura do compartimento.

A aprovação da utilização da análise baseada no desempenho, que se sustenta no desenvolvimento do incêndio natural, veio permitir aos projetistas de estruturas caracterizar os diversos cenários de incêndio de uma forma mais realista, encontrando soluções mais econômicas sem comprometer a segurança da estrutura em situação de incêndio (REIS, 2011, p. 22).

As curvas de incêndio natural admitem, racionalmente, que os gases que envolvem o fogo não têm sua temperatura sempre crescente com o tempo. Antes, a temperatura dos gases respeita as curvas temperatura-tempo naturais, baseadas em ensaios que buscam simular a situação real de um compartimento em chamas (SILVA, 2001).

Na Figura 9 há uma comparação entre uma curva paramétrica e a curva de incêndio-padrão ISO 834. É possível notar com clareza na curva de incêndio natural as fases de ignição, aquecimento e posterior arrefecimento, enquanto que a curva de incêndio padrão conta somente com o ramo ascendente, além de desconsiderar completamente a etapa de ignição.

Figura 9 – Comparação entre as curvas de incêndio padrão e incêndio natural



Fonte: Baseado em SILVA, 2001, p. 29 e 36.

Carvalho (2018) cita a carga de incêndio e o grau de ventilação como alguns dos principais influenciadores das curvas de incêndio natural. Serão apresentadas considerações sobre estes a seguir.

I. Cargas de Incêndio

A norma ABNT NBR 14432 (2000) apresenta tabelas com cargas de incêndio dos elementos para diversos tipos de uso/ocupação. O conhecimento e aplicação destes valores é de fundamental importância para uma análise crítica da estrutura. Em casos onde não esteja descrita na norma ou se opte por calculá-la, a carga de incêndio específica pode ser determinada pela expressão:

$$Q_{f,k} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \quad (5.2)$$

Onde:

$Q_{f,k}$ é o valor da carga de incêndio específica;

M_i é a massa total de cada componente i do material combustível;

H_i é o potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível;

A_f é a área do piso do compartimento.

O Anexo E da Norma Europeia EN1991-1-2 (2010) também trata das cargas de incêndio. O valor da densidade de carga de incêndio é dado por:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{qn} \quad [MJ/m^2] \quad (5.2)$$

Em que:

$q_{f,k}$ é o valor da carga de incêndio específica [MJ/m^2];

m é o fator de combustão, tomado igual a 0,8 para materiais celulósicos;

δ_{q1} é um fator relacionado ao risco de ativação de incêndio por influência do tamanho das compartimentações (Quadro 3);

δ_{q2} é um fator relacionado ao risco de ativação de incêndio por influência do tipo de ocupação do edifício (Quadro 3);

δ_{qn} é um fator que considera o produto das medidas de proteção ativa (Quadro 4).

Quadro 3 – Fatores δ_{q1} e δ_{q2}

Área do pavimento do compartimento A_f [m^2]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1} (compartimento)	Exemplos de tipo de ocupação	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2} (ocupação)
25	1,10	Galeria de arte, museu, piscina	0,78
250	1,50	Escritório, residência, hotel, indústria do papel	1,00
2500	1,90	Fábrica de máquinas e motores	1,22
5000	2,00	Laboratório químico, oficina de pintura	1,44
10 000	2,13	Fábrica de pirotécnica ou tintas	1,66

Fonte: CEN, 2010a.

Quadro 4 – Fatores δ_{qn}

Extinção automática de incêndio		Detecção automática de incêndio		Extinção manual de incêndio					
Sistema automático de extinção com água δ_{n1}	Redes independentes de fornecimento de água 0 1 2 δ_{n2}	Detecção e alarme automáticos de incêndio		Transmissão automática de alarme aos bombeiros δ_{n5}	Bombeiros no local δ_{n6}	Bombeiros fora do local δ_{n7}	Vias de acesso seguras δ_{n8}	Dispositivos de combate a incêndios δ_{n9}	Sistema de exaustão de fumos δ_{n10}
		Pelo calor δ_{n3}	Pelo fumo δ_{n4}						
0,61	1,0 0,87 0,7	0,87 ou 0,73		0,87	0,61 ou 0,78		0,9 ou 1 ou 1,5	1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5

Fonte: CEN, 2010a.

Vila Real (2015) estudou a influência da consideração de medidas ativas de segurança no cálculo da carga de incêndio para um escritório (Quadro 5), verificando assim que esta pode ser reduzida substancialmente de acordo com as medidas contempladas.

Quadro 5 – Influência das medidas de proteção ativa no cálculo da carga de incêndio

Sem proteção ativa				
Brigadistas				
Vias de acesso seguras				
Deteção automática e alarme por fumo				
Meios de 1ª Intervenção				
Sistema de extinção automática por água				
Transmissão automática do alarme para os bombeiros				
$q_{f,d}$ (MJ/m ²)	1567	815	397	210

Fonte: Adaptado de VILA REAL, 2015.

II. Aberturas

A quantidade de aberturas em um compartimento influencia diretamente na intensidade e duração de um incêndio. Isto é dado pelo aumento de oxigênio adicionado ao ambiente, o que aumenta a temperatura e diminui a duração do sinistro (COSTA, 2006).

A norma EN 1991–1–2:2010 estabelece um fator de abertura para fins de cálculo, dado por:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (5.3)$$

Onde:

- O Fator de abertura [m^{1/2}];
- A_v Área total das aberturas verticais em todas as paredes [m²];
- h_{eq} Média ponderada das alturas das aberturas [m];
- A_t Área total (incluindo vedações e aberturas) [m²].

É importante salientar que a área das aberturas pode variar durante o episódio de incêndio, o que influencia na severidade do fogo. Fatores como vidros quebrados pela temperatura ou para intervenção de bombeiros aumentariam estas áreas (REIS, 2011). Cadorin (2003) conclui que ambientes com aberturas superiores a 15% acabam por reduzir a temperatura dos ambientes, por aumentar o fluxo de oxigênio além do necessário para combustão, o que direciona o fluxo de calor para fora do compartimento.

5.2.2.1. Curva de Incêndio Paramétrica, Anexo A do EC1

Este modelo de curva paramétrica é proposto pela norma EN 1991-1-2:2010, a qual limita sua aplicação a compartimentos com no máximo 500m² de planta, sem aberturas horizontais e com pé direito máximo de 4 metros. É considerado ainda que toda a carga de incêndio no ambiente será consumida. A norma propõe equações para as fases de aquecimento e de arrefecimento.

Na fase de aquecimento, a curva temperatura-tempo é definida por:

$$\theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (5.4)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad [\text{h}] \quad (5.5)$$

Onde:

θ_g temperatura dos gases no compartimento de incêndio [°C];

Γ fator de conversão do tempo;

t tempo.

Este fator de conversão do tempo leva em consideração o fator de abertura, limitando este entre 0,02 e 0,20. Considera ainda um fator de absorvidade térmica da superfície envolvente, composto pelas características físicas do material da envolvente, como massa específica, calor específico e condutibilidade térmica.

A temperatura crítica da curva é dada no instante em que $t^* = t_{max}^*$, o qual é definido por:

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad [\text{h}] \quad (5.6)$$

$$t_{max} = \max \left[\left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \right); t_{lim} \right] \quad [\text{h}] \quad (5.7)$$

Nesta equação, $q_{t,d}$ relaciona as cargas de incêndio do compartimento com a área da superfície do pavimento. O tempo limite t_{lim} varia de acordo com a taxa de crescimento do incêndio. O tempo máximo também varia de acordo com sua maior fonte de energia, se controlado pela carga de incêndio ou pela ventilação.

As curvas na fase de arrefecimento ocorrem em função da t^* , definida anteriormente. Estas curvas se dão através das equações a seguir:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^* \cdot x), \text{ para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (5.8)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* \cdot x), \text{ para } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (5.9)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* \cdot x), \text{ para } t_{max}^* \geq 2 \quad (5.10)$$

Onde:

θ_g temperatura dos gases no compartimento de incêndio, ou na proximidade do elemento, função do fator de abertura O e da absorvidade térmica b ;

θ_{max} temperatura máxima;

Sendo x obtido em função do tempo limite, tempo máximo e fator de conversão do tempo.

5.2.2.2. Incêndio localizado

À exceção de circunstâncias especiais, todo incêndio em um edifício tem início em um pequeno fogo localizado, o qual deixa de o ser quando ocorre o *flashover* (FRANSSEN e VILA REAL, 2015). A norma EN 1991-1-2:2010 define este tipo de incêndio como aquele que envolve “apenas uma área limitada da carga de incêndio do compartimento” (CEN, 2010a, p. 17).

Esta norma indica que as ações térmicas de um incêndio localizado devem ser levadas em conta nos casos em que seja “improvável a ocorrência de combustão generalizada” (CEN, 2010a, p.17). Entretanto, Franssen e Vila Real (2015) consideram esta afirmação vaga, dado que um fogo localizado próximo a uma coluna principal pode direcionar ao colapso desta coluna, e eventualmente, de toda a estrutura. Portanto, sugere-se que as cargas de incêndio localizado sejam consideradas quando o *flashover* ainda não ocorreu.

Caldas (2008) lembra da importância de considerar os incêndios localizados em ambientes de grandes dimensões, como estádios e edifícios-garagem, visto que nestes a possibilidade da ocorrência de incêndio generalizado é relativamente baixa.

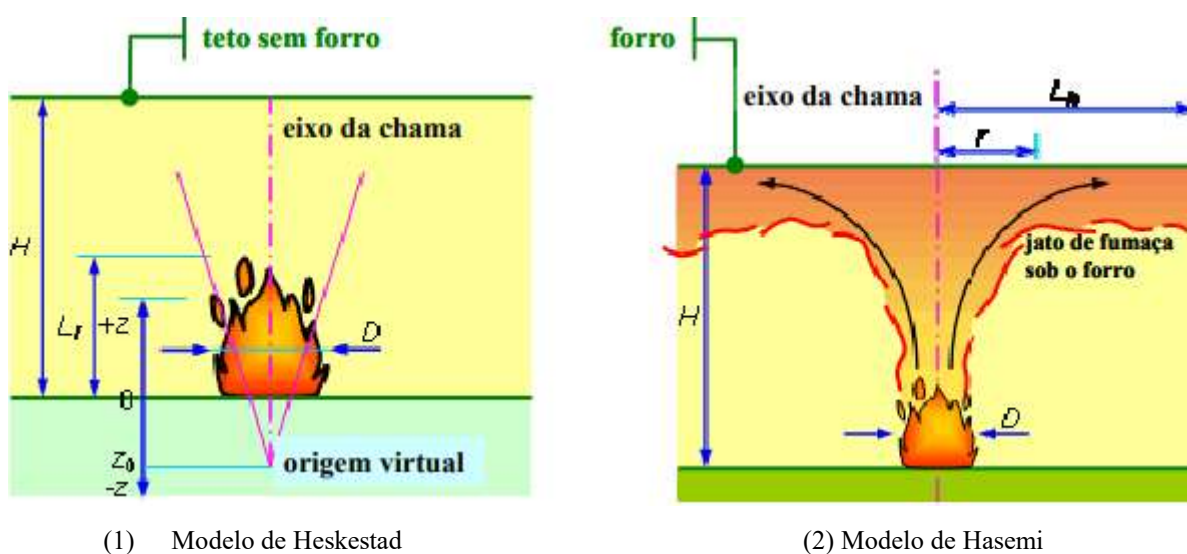
Geralmente as estruturas são dimensionadas de acordo com as curvas de incêndio-padrão ou curvas paramétricas, porém todos estes modelos são derivados para compartimentos relativamente pequenos, onde o *flashover* pode ocorrer, com temperaturas altas e uniformes. Em grandes compartimentos, Sjöström et al (2012) recomendam a antecipação de fogos localizados, a fim de considerar a exposição a fogos de grande intensidade, as quais dependem tanto da temperatura quanto das dimensões e exposição das chamas.

As ações térmicas de um incêndio localizado podem ser determinadas através das equações dispostas no Anexo C da norma EN1991-1-2:2010. Esta estipula o cálculo do comprimento de chamas para o compartimento, dado pela equação a seguir:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5} \quad (5.11)$$

sendo D o diâmetro do incêndio [m] e Q a taxa de liberação de calor, estipulada conforme Anexo E.4 da norma 1991-1-2:2010 (Figura 10).

Figura 10 – Dimensões pertinentes a incêndios localizados do Eurocódigo 1.



FONTE: CALDAS, 2008 apud CEN, 2010a.

Caso a chama não atinja o forro do compartimento, a temperatura na pluma¹ ao longo do eixo é definida pelo modelo de Heskestad (CEN, 2010a; REIS, 2011):

$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.12)$$

Onde Q_c é a parcela da taxa de liberação de calor referente à energia de convecção, z é definido pela altura [m] ao longo do eixo da chama e z_0 é a origem virtual da fonte de fogo, conforme Figura 10.1.

Caso a chama atinja o forro do compartimento, utiliza-se o modelo de Hasemi, conforme Figura 10.2 e Equações de 5.13 a 5.18 (CEN, 2010a; REIS, 2011).

¹ Coluna de fluido na qual se tem os produtos da combustão (i.e., partículas sólidas, fumaça e gases tóxicos), originada a partir da chama desenvolvida na superfície do pacote combustível em queima (TAVARES, 2003 apud QUINTIERE, 1998)

Fluxo de calor $\dot{h}$ [W/m²] recebido pela superfície exposta no teto:

$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100\,000 & \text{se } y \leq 0,30 \\ \dot{h} &= 136\,300 - 121\,000 y & \text{se } 0,30 < y < 1,0 \\ \dot{h} &= 15\,000 y^{-3,7} & \text{se } y \geq 1,0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Onde y é um parâmetro adimensional definido por:

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (5.14)$$

r distância horizontal entre o eixo vertical do incêndio e o ponto no teto em que é calculado o fluxo térmico (Figura 10.2)

H distância entre a origem do incêndio e o teto (Figura 10.2)

L_h comprimento horizontal da chama, definida pela Equação 5.15 (Figura 10.2)

$$L_h = (2,9 H (Q_H^*)^{0,33}) - H \quad [\text{m}] \quad (5.15)$$

z' é a posição vertical da fonte de calor virtual [m], obtida por:

$$\begin{aligned} z' &= 2,4D(Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) & \text{para } Q_D^* < 1,0 \\ z' &= 2,4D(1,0 - Q_D^{*2/5}) & \text{para } Q_D^* \geq 1,0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

As taxas de liberação de calor adimensionais Q_H^* e Q_D^* são obtidas através de:

$$\begin{aligned} Q_H^* &= Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \\ Q_D^* &= Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5}) \end{aligned} \quad (5.17)$$

D diâmetro da chama exposto da Figura 10.

Por fim, o fluxo de calor efetivo é calculado por:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) - \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_m + 273)^4 - 293^4] \quad (5.18)$$

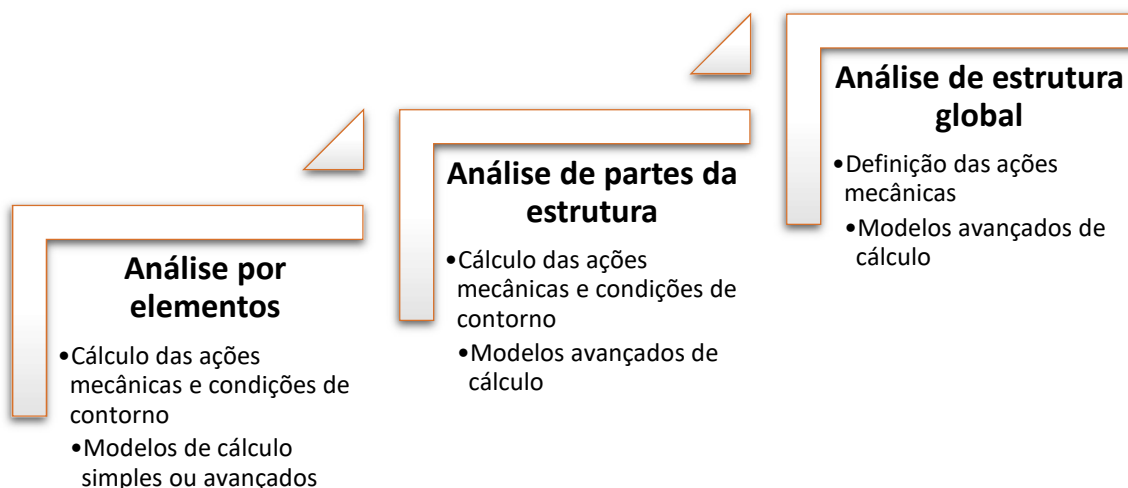
5.3. Análise Mecânica

É fundamental para os estudos do impacto da elevação de temperatura nas estruturas de aço, entender como estas se comportam ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Segundo

Martins (2000), para que a estrutura suporte as cargas adicionais por um tempo mínimo estabelecido, a fim de condicionar a fuga do edifício, é necessário verificar tanto a resistência dos componentes estruturais, como o comportamento das ligações e a estabilidade da estrutura sob condições de elevadas temperaturas.

As normas EN 1993-1-2:2010 e ABNT NBR 14323:2013 apresentam três maneiras diferentes de verificação das estruturas em situação de incêndio (Figura 11). Destas, estabelecem as etapas para o cálculo da resistência ao fogo dos elementos estruturais em aço para elementos isolados, as quais são realizadas por meio da aplicação de equações simplificadas dispostas nestas normas (COUTO, 2011).

Figura 11 – Metodologias para análise de estruturas de aço em situação de incêndio

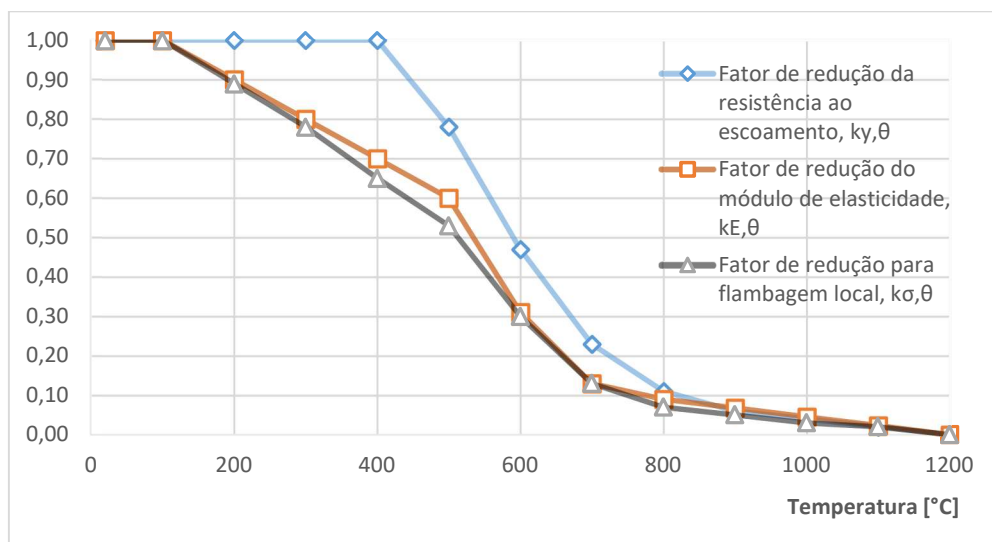


Fonte: Baseado em VILA REAL, 2003, p.5.

Silva (2016) lembra que a norma EN 1993-1-2:2010 não informa se a análise por elementos isolados disposta na norma é suficiente para aplicação de incêndio natural, se limitando a fazer referência quanto a isso somente para incêndios nominais.

O calor transmitido à estrutura é dado por condução aos outros elementos, consequentemente reduzindo a resistência dos materiais, além de gerar esforços decorrentes, por exemplo, de alongamentos axiais, o que diminui a rigidez dos elementos (SILVA, 2016). É possível notar na Figura 12 a influência das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas do aço. Todas as propriedades apresentadas são reduzidas para além da metade em temperaturas acima de 600°C, por exemplo.

Figura 12 - Fatores de redução em temperatura elevada



Fonte: Baseado em ABNT NBT 14323:2013.

As condições de segurança apresentadas pela norma ABNT NBR 14323:2013 para verificação isolada dos esforços solicitante são expressas de forma que o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio deve sempre ser menor que o esforço resistente de cálculo para o ELU (Estado-Limite Último) em consideração.

5.3.1. Métodos de dimensionamento simplificados

Silva (2016) elenca as principais hipóteses para o cálculo do valor da resistência segundo a norma ABNT NBR 14323:2013: i) a temperatura é considerada uniforme na seção transversal; ii) o valor de cálculo da resistência à temperatura normal é modificado para considerar as propriedades mecânicas do aço a elevadas temperaturas; iii) considera-se que o valor das ações não se altera durante o incêndio e consequentemente os efeitos dessas ações se mantêm constantes ao longo do incêndio.

Ademais, as normas brasileira e europeia para dimensionamento de estruturas em incêndio apresentam muitas semelhanças. Silva (2015) apresenta um estudo comparativo quanto ao cálculo de elementos isolados sob ação do fogo para ambas as normas, concluindo a similaridade dos resultados obtidos.

É importante salientar que todos os cálculos de dimensionamento simplificados podem ser agilizados com a utilização de *softwares* de análise térmica, como é o caso do programa Elefir-EN (VILA REAL e FRANSSSEN, 2011).

5.3.2. Método avançado de dimensionamento

A norma ABNT NBR 14323 define os métodos avançados de dimensionamento como “aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura e do cenário do incêndio” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 28). Estes podem ser usados tanto para elementos individuais quanto para estruturas completas, sejam elas internas, externas ou de compartimentação.

A utilização destes métodos se dá pela necessidade de uma aproximação confiável do comportamento esperado pela estrutura em situação de incêndio. Devem ser capazes de exprimir tanto a análise térmica quanto o comportamento mecânico da estrutura, e podem ser usados com qualquer curva de aquecimento, desde que sejam conhecidas as propriedades do material para dada temperatura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

O modelo deve ser capaz de considerar as ações térmicas relevantes e a variação das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura. Deve-se levar em conta ainda os efeitos das tensões e deformações induzidas termicamente decorrentes do aumento de temperatura e das temperaturas diferenciais. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Para dimensionamento da estrutura através de métodos avançados, optou-se por utilizar o *software* SAFIR (FRANSSEN, 2005). Este foi desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica, o qual é capaz de acomodar vários elementos para simulações, procedimentos de cálculo e vários modelos de materiais para incorporar no comportamento (SILVA, 2016).

O programa é constituído por dois módulos de cálculo distintos, um para a análise do comportamento térmico da estrutura e outro para a análise do seu comportamento mecânico (LOPES et al, 2005). O *software* é capaz de realizar a análise estrutural e térmica de estruturas de concreto, aço, madeira e alumínio (JÚNIOR, 2011). Seu módulo de análise térmica pode considerar curvas de temperatura-tempo inseridas pelo usuário, e seu módulo estrutural disponibiliza elementos para análises bidimensionais e tridimensionais (Figura 13).

Figura 13 – Exemplo de resultado obtido pelo *software* SAFIR



Fonte: UNIVERSITÉ DE LIÈGE, s.d.

É calculada a evolução não uniforme de temperaturas para cada seção da estrutura, as quais são lidas pelo programa, donde se fazem os cálculos do comportamento mecânico. (LOPES et al, 2005).

O comportamento mecânico [...] é calculado de acordo com a geometria da estrutura, condições de suporte, cargas solicitantes e resistência do material utilizado, considerando um aumento progressivo da temperatura simulando alterações físicas na estrutura, em decorrência do aumento da temperatura, com aumento dos deslocamentos até culminar no colapso (CARVALHO, 2018, p. 25).

Por ser baseado em MEF, o SAFIR é capaz de discretizar a seção dos elementos em fibras, associando as propriedades do material analisado. Quanto ao colapso, o critério é definido como sendo o instante em que a sua matriz de rigidez deixa de ser positiva, não sendo mais possível estabelecer o equilíbrio da estrutura (LOPES et al, 2005). Este não ocorre necessariamente no instante da ruína de um elemento para estruturas hiperestáticas, visto que o *software* considera o rearranjo das tensões.

5.3.3. Método empírico de dimensionamento

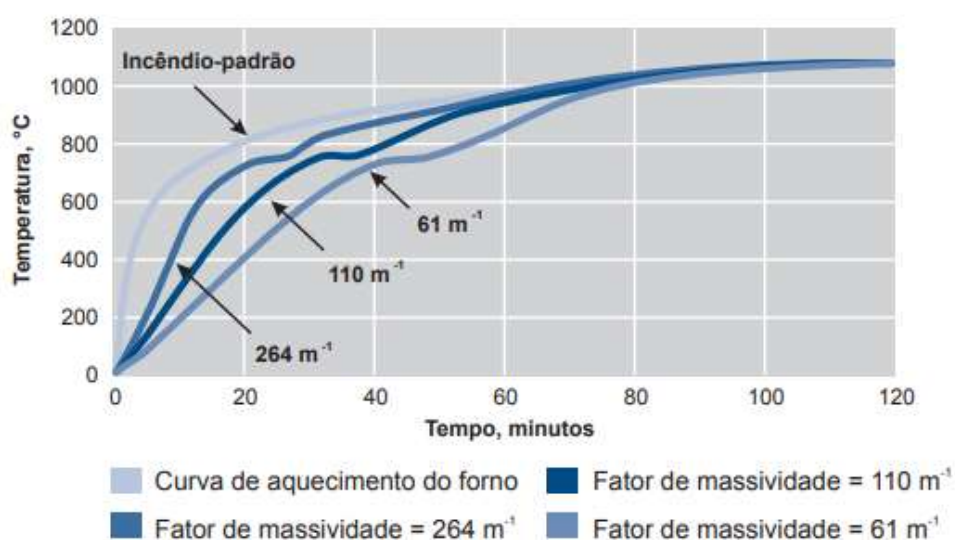
Os dimensionamentos empíricos da espessura da proteção passiva são baseados em ensaios realizados nacionalmente à luz da norma ABNT NBR 5628:2001, que trata dos métodos de determinação da resistência ao fogo para componentes construtivos estruturais.

É utilizado um forno com sistema de aquecimento constituído por queimadores de baixa pressão e exaustão por dutos, onde se inserem diferentes amostras de perfis com diferentes espessuras de material de proteção (VARGAS e SILVA, 2003). Os fornos utilizam a curva de

incêndio-padrão, e as temperaturas médias são analisadas por uma equação empírica, por meio da qual se montam cartas de cobertura.

As variações em espessura de revestimento se dão devido às características do material de revestimento e quanto ao fator de massividade do elemento estrutural. O fator de massividade é definido pela razão entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal do elemento estrutural. A Figura 14 exemplifica a importância deste fator para o estudo da transferência de calor, visto que seções mais robustas, as quais tem baixo fator de massividade, apresenta menor velocidade de aquecimento do que seções mais esbeltas (PANNONI, 2015).

Figura 14 - Curvas de velocidade de aquecimento durante o ensaio do incêndio-padrão



Fonte: PANNONI, 2015.

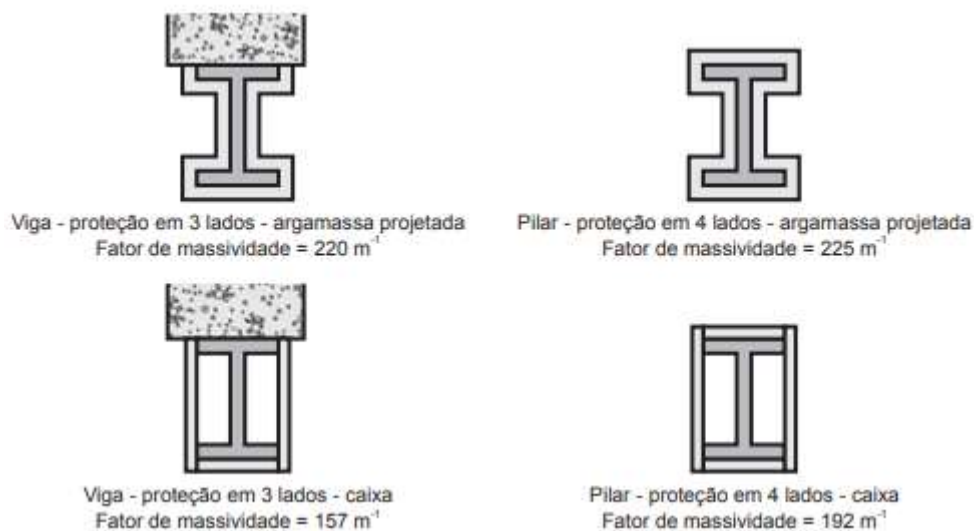
Caso se apresente necessário o uso de material de revestimento para proteção passiva, utilizam-se as cartas de cobertura (Quadro 6), as quais relacionam, portanto, o fator de massividade da seção do elemento com o TRRF, informando a espessura do material de proteção térmica (CARVALHO, 2018). Estas são geralmente publicadas pelos próprios fabricantes de proteção antitérmica. A Figura 15 ilustra quatro configurações de proteção para um perfil W.

Quadro 6 - Carta de cobertura para placas de gesso

Fator de massividade	TRRF (minutos)				Espessura
	550 °C				
	30	60	90	120	
	260	165			12,5mm
		195			15mm
		260	200		12,5 + 12,5mm
			260		15 + 12,5mm
				110	15 + 15mm
				190	12,5 + 12,5 + 12,5mm
				225	15 + 12,5 + 12,5mm
			260	15 + 15 + 12,5mm	

Fonte: ASFP, 2018.

Figura 15 - Configurações mais comuns de proteção para o cálculo do Fator de Massividade

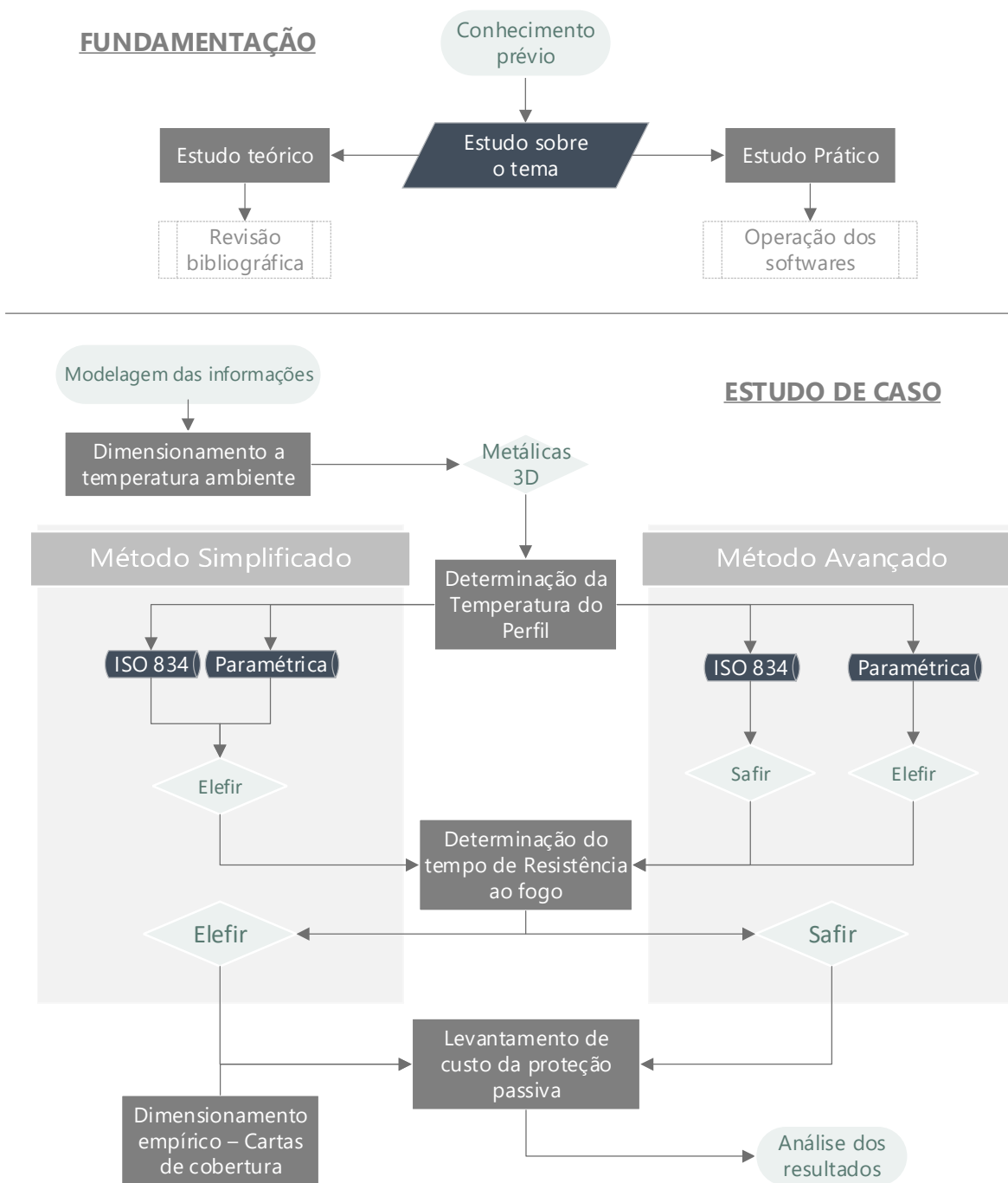


Fonte: PANNONI, 2015.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada busca obter fundamentos e dados que permitam mostrar os benefícios da utilização de modelos avançados de cálculo e aplicação de curvas paramétricas para dimensionamento de estruturas de aço sob a ação do fogo. Para isso foram organizados os seguintes procedimentos ordenados através de um fluxo de trabalho (Figura 16).

Figura 16 – Fluxograma de procedimentos metodológicos



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1. Caracterização da pesquisa

Em relação aos seus objetivos, esta pesquisa é classificada como exploratória, dado que busca oferecer soluções sobre o aspecto da análise de estruturas sob ação do fogo. A pesquisa se propõe a orientar e formular hipóteses a respeito da utilização de procedimentos mais eficazes para este tipo de estudo.

A metodologia adotada parte de uma análise científica, originada da aplicação sistemática de conhecimentos prévios adquiridos, voltada para a observação dos resultados a serem obtidos, e complementada por uma análise indutiva, a qual busca compreender padrões na pesquisa. Para tanto, será empregada uma abordagem quantitativa, focada no caráter objetivo do objeto de estudo.

6.2. Fundamentação

A fim de estruturar o conhecimento científico necessário para o desenvolvimento do objeto da pesquisa, realizou-se o levantamento dos pontos mais relevantes no que concerne à análise de estruturas de aço em situação de incêndio, através da descrição de conceitos, procedimentos de cálculo e afins. Este estudo se baseia em livros relacionados, artigos científicos, normas, jornais, entre outros.

Para aplicação dos estudos, foram especificadas as tecnologias a serem empregadas no dimensionamento e análise do objeto de estudo. Desta forma, ante o proposto pelo trabalho e baseando-se no conhecimento prévio, foram determinados os *softwares* para realização do dimensionamento a temperatura ambiente e dimensionamento sob ação do fogo.

6.3. Estudo de caso

6.3.1. Caracterização do objeto estudado

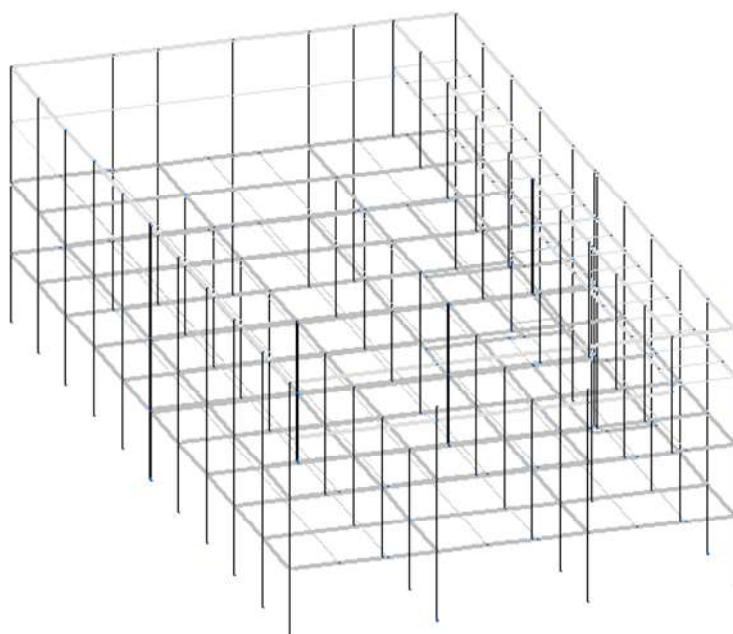
O estudo foi realizado utilizando como modelo estrutural um edifício industrial localizado na cidade de Palmas - TO. Tal edificação é destinada à fabricação de óculos, composta por pavimento térreo, dois pavimentos superiores e laje técnica, com área de 1710,00m² por pavimento, e Área Total de 5182,00m². Com 17,20 metros de altura, dos quais 9,2m até o piso do último pavimento, sua estrutura possui 11 (onze) pórticos principais, espaçados 5,7m entre si, além de duas escadas de acesso (Figuras 17 a 23).

Figura 17 – Fachada da edificação



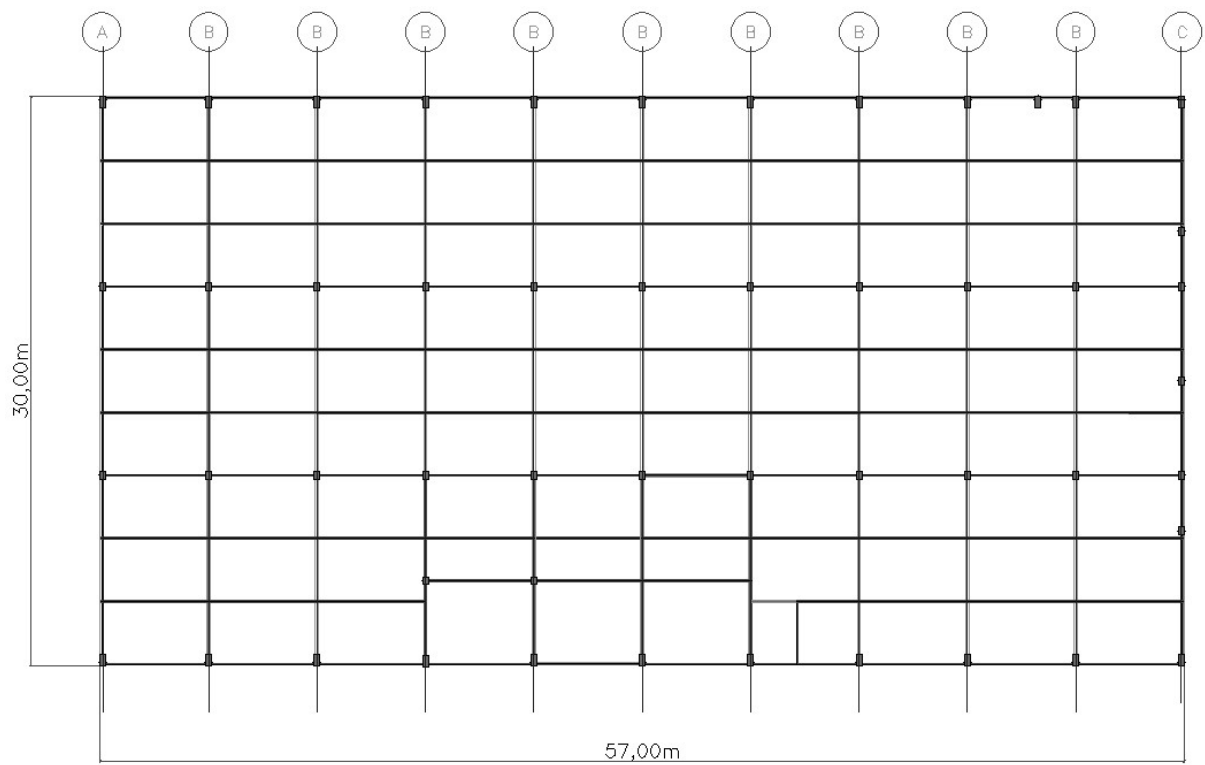
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 18 – Modelo 3D estrutural da edificação



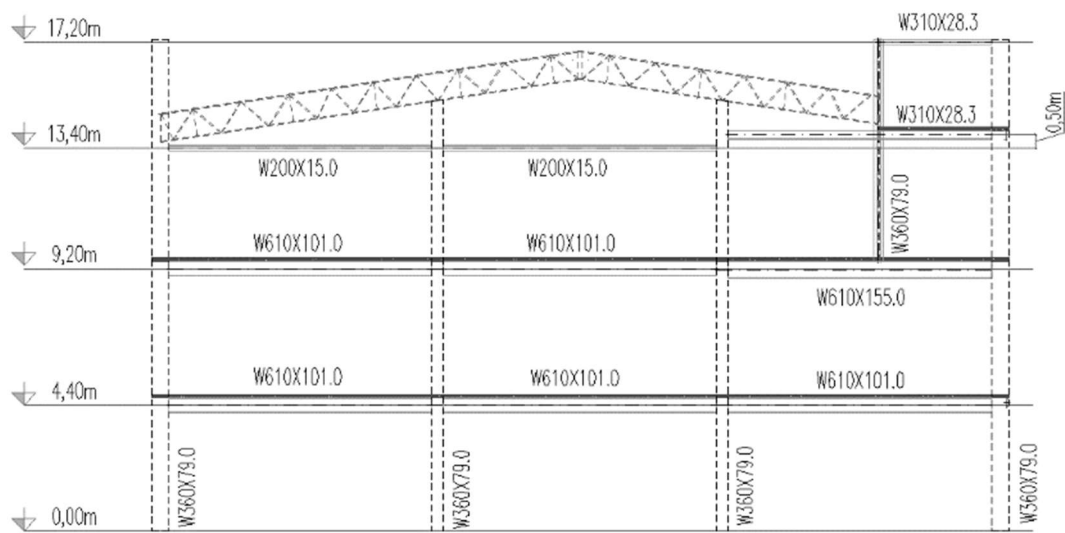
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Planta baixa do 1º e 2º Pavimento



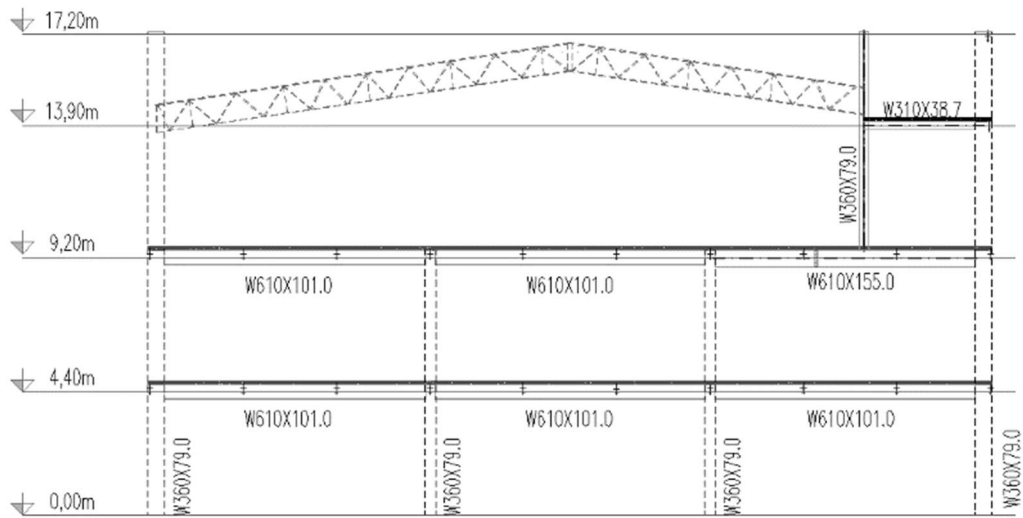
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Pórtico principal A



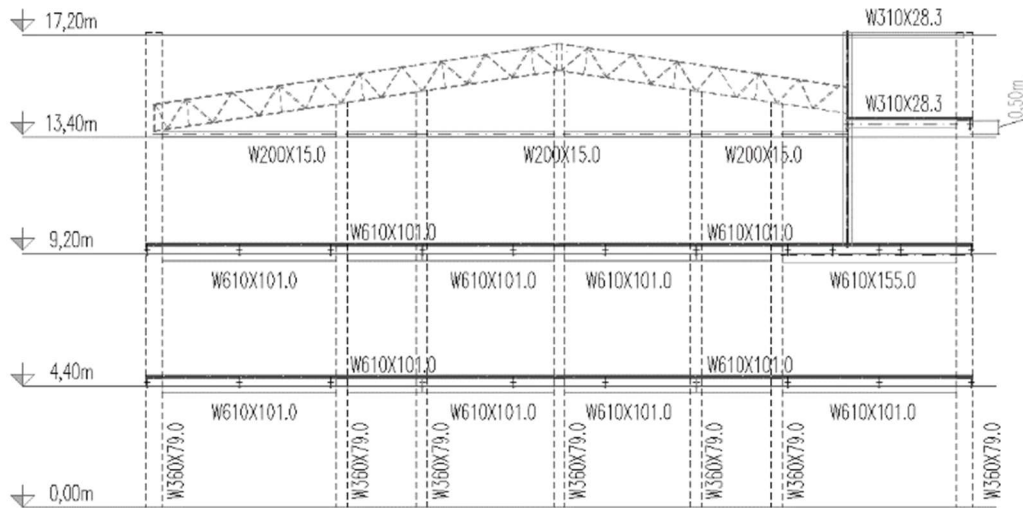
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Pórticos principais B



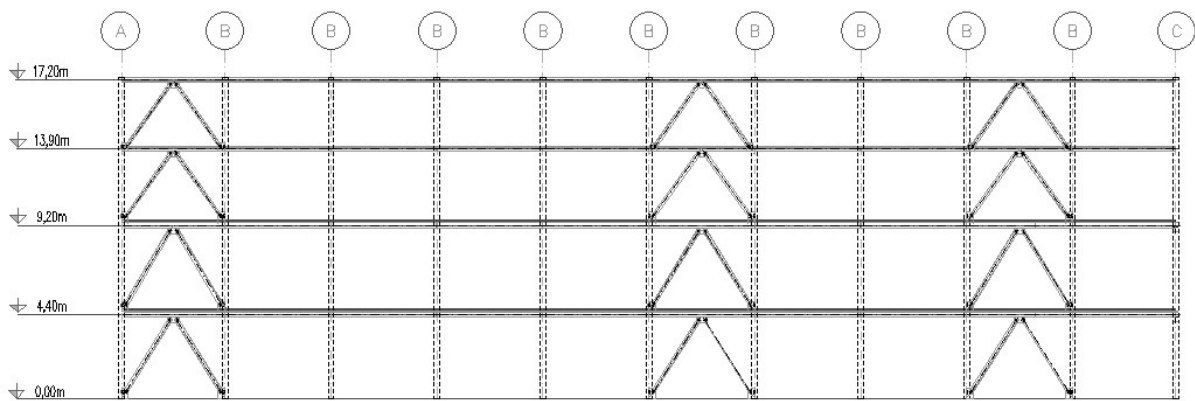
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Pórtico principal C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Vista lateral da edificação



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2. Dimensionamento Estrutural

Inicialmente foi realizado o dimensionamento da estrutura em aço a temperatura ambiente, considerando as sobrecargas das lajes de piso e cobertura, conforme ABNT NBR 8800:2008. Foi realizada uma análise linear, considerando os efeitos de segunda ordem globais e as imperfeições locais. Para tal, foi utilizada a ferramenta de cálculo Metálicas 3D (CYPE, 2014), conforme a norma supracitada.

O peso das estruturas secundárias (telha, divisórias e alvenaria) foi definido conforme ABNT NBR 6120:1980. A Tabela 1 apresenta um resumo das ações definidas para o dimensionamento. A escolha dos perfis foi definida a partir da combinação mais desfavorável encontrada.

Tabela 1 – Ações na estrutura

	AÇÕES	CARGA	UNIDADE
Peso próprio	Cobertura	0,10	kN/m ²
	Alvenaria	2,13	kN/m ²
	Laje Técnica	0,76	kN/m ²
	Laje 2º Piso	0,76	kN/m ²
	Laje 1º Piso	0,76	kN/m ²
Sobrecarga	Cobertura	0,29	kN/m ²
	Laje Técnica	3,92	kN/m ²
	Laje 2º Piso	3,92	kN/m ²
	Laje 1º Piso	3,92	kN/m ²
Vento	0º	0,45	kN/m ²
	90º	0,45	kN/m ²

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3. Dimensionamento em situação de incêndio

Foram utilizadas duas metodologias para verificação das estruturas de aço em situação de incêndio, a saber, uma simplificada e uma avançada. Inicialmente fez-se necessária a definição do TRRF por métodos simplificados, conforme as prescrições normativas concernentes à segurança estrutural das edificações, baseado na NBR 14432:2000 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Segundo esta norma, o TRRF mínimo para esta edificação é de 60 minutos.

Quanto ao dimensionamento na situação de incêndio, os esforços solicitantes de cálculo foram obtidos por uma análise estrutural global elástica linear, considerando o efeito de segunda ordem local, desprezando imperfeições iniciais. Inicialmente foi definida a combinação de

incêndio a ser empregada segundo as referências normativas, dada a utilização da edificação. Em consequência, foram calculados os esforços solicitantes em todas as barras dos pórticos a serem estudados.

Em ambas as metodologias foram utilizadas tanto a curva de incêndio padrão ISO 834, como a curva de incêndio natural, para definição das ações térmicas. A seguir serão descritas as etapas percorridas para obtenção dos resultados.

Foi desconsiderada a análise de incêndio na laje técnica dado que a mesma contempla dois reservatórios superiores. Portanto, não é factível que se faça análise similar aos demais pavimentos. Quanto ao 2º pavimento, a probabilidade de um incêndio de grandes proporções é baixa, dada sua grande área e as medidas de proteção ativa na edificação, além da isenção de TRRF para coberturas sem função de piso, conforme item 10.1 da NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Portanto, para este pavimento será analisado incêndio localizado em um dos pilares. A norma supracitada também isenta, em seu Anexo A, a necessidade de TRRF maior que 60 minutos para as vigas não pertencentes ao sistema responsável pela estabilidade estrutura da edificação.

6.3.3.1. Análise segundo a ISO 834

Na metodologia simplificada, foi utilizado o *software* Elefir-EN (VILA REAL e FRANSSEN, 2011). O dimensionamento em situação de incêndio foi realizado de acordo com as formulações da norma EN 1993-1-2:2010, considerando a temperatura uniforme em toda a seção. Conforme Silva (2015), há grande similaridade nos resultados obtidos se comparados com a norma ABNT NBR 14323:2013.

A inserção dos parâmetros no *software* segue os passos a seguir. As análises são realizadas para todos os elementos individualmente. Inicialmente são inseridos os parâmetros relativos à seção transversal e esforços solicitantes do elemento (Figura 24.1), seguidos pela definição de camadas expostas ao fogo e de camada de proteção passiva (Figura 24.2). Em caso de aplicação da camada de proteção, definem-se as características do material de proteção (Figura 24.3), seguindo, por fim, para a determinação da curva de incêndio a ser utilizada (Figura 24.4).

Figura 24 – Fluxo de inserção de dados no Elefir-EN

The 'Bending and shear' dialog box is shown with the following settings:

- Profile: **W**
- Cross-section: **W 530 x 210 x 101**
- Steel: **Other...**
- Bending about the: ☒ Major axis ☐ Weak axis
- Adaptation factors:
 - Non-uniform temperature across the cross-section: $k_1 = 0.7$
 - Non-uniform temperature along the beam: $k_2 = 1.0$
 - Define** button
- Design shear: $V_{fi,Ed} = 45$ kN
- Bending moment: $M_{fi,Ed} = 128.43$ kNm
- Calculation:
 - ☐ Critical temperature function of the loads
 - ☒ Fire resistance time function of the loads
 - ☐ Resistance function of steel temperature
 - ☐ Resistance function of time
- Main Menu** button
- Next** button

(1) inserção dos esforços solicitantes e parâmetros do elemento

The 'Fire exposure' dialog box is shown with the following settings:

- Fire exposure:
 - ☐ Fire on all sides
 - ☒ Fire on three sides
- Fire protection:
 - ☐ No protection
 - ☒ Contour encasement
 - ☐ Hollow encasement
- Back** button
- Next** button

A diagram of an I-beam cross-section is shown on the right, with the top flange highlighted in orange to indicate fire exposure.

(2) inserção dos parâmetros de exposição

Protection

File View Help

Protection material:

Name: vermiculite and gypsum - IGNIVER

☒ Choose a thickness Thickness: 10 mm

☐ Evaluate thickness

Characteristics:

Thermal conductivity: $\lambda_p = .22 \text{ W/mK}$

Unit mass: $\rho_p = 745 \text{ kg/m}^3$

Specific heat: $c_p = 1100 \text{ J/kgK}$

Moisture content: $p = 15 \%$

Modify

Back Next

(3) inserção dos parâmetros da camada de proteção

Fire Curves

File View Help

Profile: W 530 x 210 x 101
Critical time for 776.1 °C

Profile with contour encasement, exposed to fire on three sides

vermiculite and gypsum - IGNIVER with a thickness of 10 mm

Modify Modify Modify

Temperature-time curves:

☒ Standard fire curve, ISO 834

☐ Hydrocarbon fire curve

☐ Parametric fire curve

☐ User defined fire curve

☐ Localised fire

Consider the effect of moisture content?

☐ Yes

☒ No

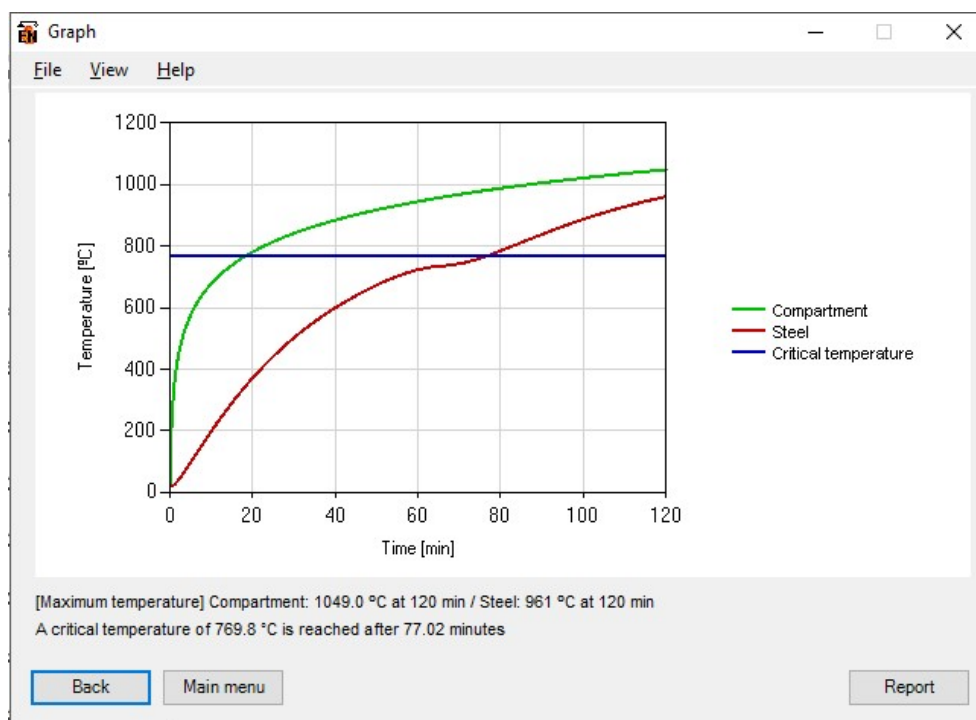
Back Calculate

(4) definição da curva de incêndio a ser empregada

Fonte: Capturado pelo autor.

Com estas informações, o programa retorna os dados de fator de emissividade², temperatura no compartimento, temperatura crítica do perfil e tempo para atingir esta temperatura (Figura 25).

Figura 25 – Exemplo de *output* do Elefir-EN

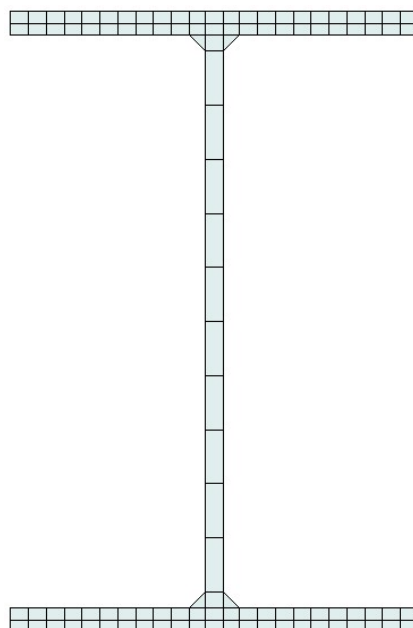


Fonte: Capturado pelo autor.

Em seguida foi realizada a mesma verificação utilizando métodos avançados de cálculo, fazendo uso do MEF, por meio do programa SAFIR (FRANSSEN, 2005). Assim como Silva (2016), para este cálculo foi considerada uma seção transversal discretizada em 108 elementos finitos. Para tanto, os banzos superior e inferior da seção transversal foram particionados em 46 elementos e a alma em 12 elementos, de formato regular; o raio de concordância entre a alma e os banzos foi discretizado por um elemento finito triangular (Figura 26). Neste caso também não foram consideradas as diferenças de temperatura nas ligações, porém é considerada a diferença de temperatura ao longo da seção.

² A emissividade (ϵ_m) é uma grandeza adimensional que mede a eficiência da superfície como um irradiador. Os valores da emissividade estão compreendidos no intervalo de 0 a 1 (COSTA, 2008).

Figura 26 – Discretização da seção transversal em elementos finitos

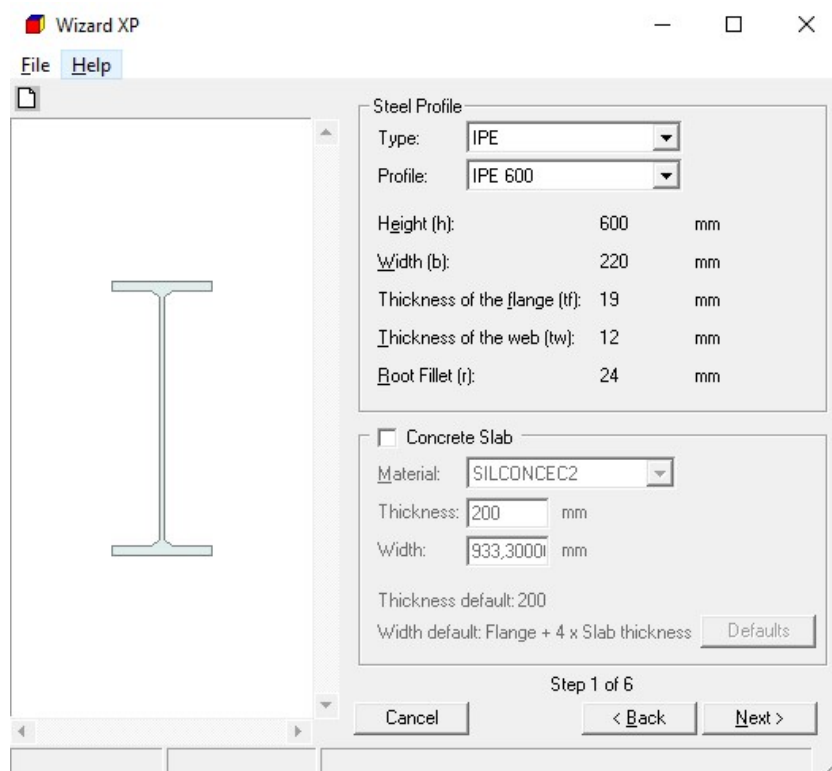


Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos parâmetros para o *software* SAFIR segue os passos a seguir. Inicialmente utiliza-se o módulo Wizard2007 do SAFIR (Figura 27) para definir ficheiros para cada um dos perfis, nos quais são inseridas dimensões, número de elementos finitos e criados arquivos únicos para quantidade de faces expostas. Os ficheiros de perfis são editados individualmente em um editor de textos, inserindo os fatores de correção para efeito de sombra³ obtidos no Elefir e alterando a curva de incêndio para os casos em que se considerar a proteção dos elementos. Desta forma, considera-se a influência da camada de proteção através da utilização da curva de temperatura do perfil protegido. Em sequência, são lançados no SAFIR os arquivos dos perfis, o qual retorna os arquivos dos perfis com as curvas de temperatura. O SAFIR não possui interface, se limitando a ler os dados dos arquivos criados e gerar um arquivo separado com os resultados. Entretanto, existem módulos separados, os quais auxiliam na elaboração dos perfis e pórticos para análise. Para estes são criadas duas versões, alterando suas propriedades no editor de textos para HOT, quando se deseja analisar em situação de incêndio, ou COLD, para elementos não submetidos ao incêndio em dada ocasião.

³ “O efeito de sombra é causado pela obstrução local à radiação térmica devido ao formato do perfil de aço”. (REGOBELLO, R., 2007, p. 68)

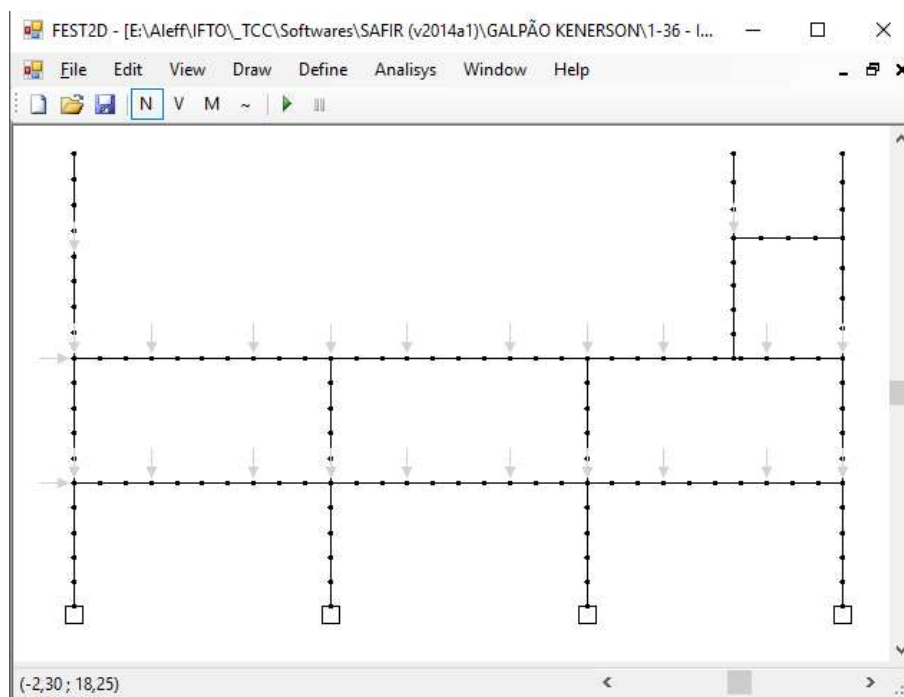
Figura 27 - Interface do Wizard2007



Fonte: Capturado pelo autor.

Cria-se o arquivo padrão do pórtico no editor de textos, o qual contém as informações básicas do pórtico a ser analisado com localização dos nós, barras e apoios. Em seguida, este é aberto no módulo FEST2D do SAFIR (Figura 28), no qual são inseridas cargas e peso próprio da combinação de incêndio, dividindo os elementos em dimensões menores, e definindo as seções calculadas anteriormente no SAFIR para cada barra. Nesta etapa são definidas três situações de incêndio para os pórticos, a saber, uma para o pavimento térreo, outra para o primeiro pavimento, e uma última considerando incêndio nos dois pavimentos simultaneamente, através da atribuição dos parâmetros dos perfis.

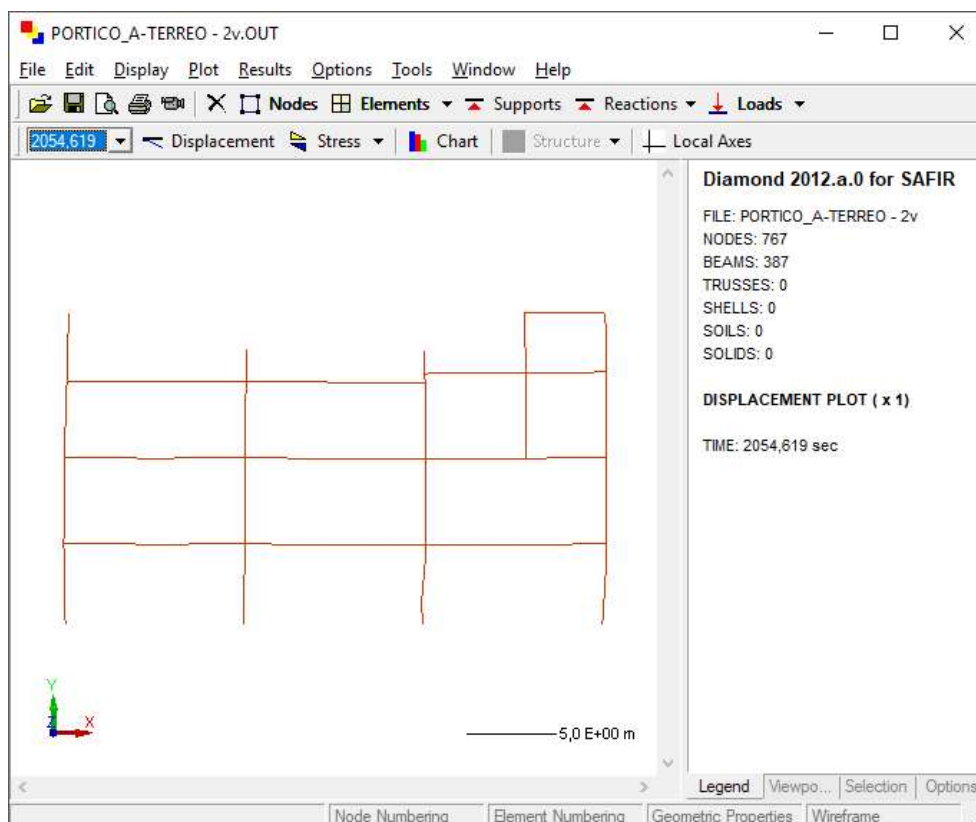
Figura 28 - Interface do FEST2D



Fonte: Capturado pelo autor.

Com os arquivos dos pórticos configurados, calcula-se a estrutura no SAFIR, gerando os arquivos dos pórticos com os resultados. Estes são visualizados através do módulo Diamond (Figura 29), o qual cumpre função de interface para visualização da deformada dos pórticos e tempo para ruptura. Por realizar uma análise interativa, seu critério de parada se dá no instante de ruptura do primeiro elemento. Dadas as análises, torna-se possível definir com maior rigor quais elementos proteger prioritariamente. Repete-se então a análise com o elemento protegido e identifica-se a necessidade de proteção do próximo, até que se atinja o tempo mínimo requerido.

Figura 29 – Interface do Diamond

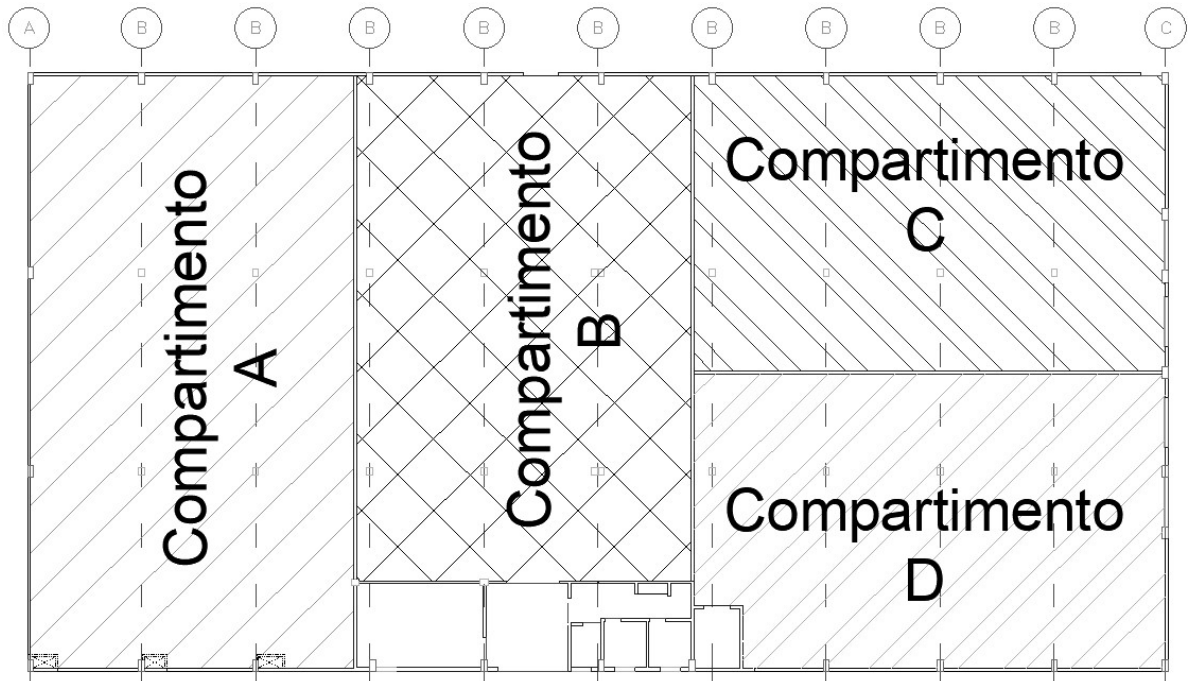


Fonte: Capturado pelo autor.

6.3.3.2. Análise por meio das curvas paramétricas

Dadas as limitações impostas pelo método de análise utilizando curvas paramétricas, buscou-se compartimentar a edificação de maneira a atender aos requisitos da EN 1993-1-2:2010. Desta forma, os pavimentos analisados foram compartimentados em quatro regiões (Figura 30), definindo o pé direito como 4 metros. Desse modo, a análise dos pórticos acrescenta a variável do compartimento em sua análise, a qual é inserida no *software* Elefir-EN na etapa seguinte à definição de análise por curva paramétrica (Figura 31).

Figura 30 – Compartimentação dos ambientes para análise de incêndio parametrizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Dados de compartimentação no *software* Elefir-EN

Compartment

File View Help

Compartment geometry:

Height: 4 m

Depth: 17.6 m

Width: 25 m

Layers and openings:

Select: Floor Define

Select to copy: Ceiling Wall 1 Wall 2 Wall 3 Wall 4 Copy

☐ Copy openings

Defined:	Type	Openings
Floor	1	-
Ceiling	2	-
Wall 1	3	
Wall 2	3	1
Wall 3	3	
Wall 4	3	3

Back Next

Fonte: Capturado pelo autor.

Foram considerados na envoltória o fechamento em alvenaria com revestimento argamassado, sendo o piso em concreto leve e o forro em gesso, cujas características estão

listadas na Tabela 2, cujos parâmetros foram retirados do *software* Elefir-EN. As áreas dos compartimentos e suas respectivas áreas de abertura estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 2 – Propriedades da envoltória

	espessura (cm)	massa unitária (kg/m ³)	condutividade (W/mK)	calor específico (J/kgK)
Paredes	15	1680	0.79	872
Piso	10	1600	0.8	840
Forro	1.5	900	0.25	1000

Fonte: Baseado em VILA REAL, 2011.

Tabela 3 – Áreas dos compartimentos

Compartimento	Pvto.	Área do compartimento (m ²)	Área de aberturas (m ²)
A	-	429.26	140.25
B	-	440.00	43.94
C	Térreo	346.01	59.2
	1º Pvto.	346.01	51.16
D	Térreo	346.01	61.80
	1º Pvto.	346.01	61.60

Fonte: Elaborado pelo autor.

A carga de incêndio específica foi definida segundo a Tabela C.1 da ABNT NBR 14432” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000, p.1) de acordo com a utilização da edificação. Desta forma, foi estipulada para todos os compartimentos uma carga de 1.000MJ/m² referente a ambientes com artigos de plástico em geral, material predominante no edifício em questão, o qual enquadra o edifício na classificação I-1 da norma supracitada. Os fatores relacionados ao risco de ativação de incêndio e às medidas de proteção ativa foram definidos de acordo com os elementos existentes na edificação estudada, sendo adotada uma taxa de propagação de incêndio média, de 20 minutos (Figura 32). Assim, considerou-se para a edificação estudada, a existência de reserva técnica de incêndio, brigada de incêndio interna com transmissão automática de alarme, escada para saída de emergência e sistema de exaustão de fumaça, além da existência de equipamentos de combate a incêndio e de rotas de fuga.

Figura 32 – Parâmetros de carga de incêndio no *software* Elefir-EN

Fonte: Capturado pelo autor.

Em seguida foi realizada a mesma verificação utilizando métodos avançados de cálculo por meio do SAFIR, de maneira análoga ao executado para a análise utilizando a curva ISO 834. Entretanto, o SAFIR, por não possuir análise através de curvas paramétricas nativamente, necessita dos dados das curvas de temperatura dos perfis gerados pelo Elefir-EN. Portanto, foram criados novos ficheiros para os perfis utilizando os parâmetros dos compartimentos.

A partir deste ponto, foram modificados os parâmetros dos pórticos utilizados previamente para análise segundo a ISO 834, introduzindo os dados das curvas paramétricas no FEST2D, e criadas as situações de incêndio, considerando em acréscimo a simultaneidade dos compartimentos no pórtico. Os dados foram calculados em seguida pelo SAFIR, e analisados através do Diamond.

6.3.4. Dimensionamento empírico e análise de custos

Por fim, foi dimensionada a proteção passiva da estrutura através dos métodos empíricos, utilizando-se de cartas de cobertura. O material a ser empregado como revestimento foi a argamassa projetada, em função do custo e da fácil localização de mão-de-obra. Para

determinação das camadas, utilizou-se a massividade dos perfis e comparou-se com os valores da carta de cobertura disponibilizada por Placo (2018).

Dimensionados todos os elementos de revestimento contra fogo através dos métodos propostos, foi realizada uma análise do custo para a implementação. Para tanto, foram utilizados bancos de dados de custos do mercado da construção, os quais foram organizados conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Levantamento de custos por metodologia empregada

CURVA	MÉTODO	CUSTO PARA PROTEÇÃO
ISO 834	Simplificado	R\$ -
	Avançado	R\$ -
Incêndio Natural	Simplificado	R\$ -
	Avançado	R\$ -
Tabela Comercial	Empírico	R\$ -

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui dispostos serão categorizados pórtico a pórtico, onde serão comparados e discutidos os efeitos das análises dos diferentes métodos empregados.

7.1. Dimensionamento à temperatura ambiente

Os perfis estruturais dimensionados segundo a NBR 8800:2008 são apresentados na Tabela 5. Observou-se a necessidade de vigas robustas nos pavimentos 1º e 2º dos Pórticos A, B e C. Nos pórticos das extremidades, tais vigas são submetidas ao carregamento das paredes, e nos pórticos intermediários há elevada incidência de sobrecarga, o que contribuiu para o tamanho das seções.

Tabela 5 – Resumo dos perfis dimensionados

Pórtico A	Segmento	Viga 01	Viga 02	Viga 03	Viga 04	Pilares 01 a 05
	Perfil	W610X101	W610X155	W200X15	W310X28.3	W360X79
Pórtico B	Segmento	Viga 01	Viga 02	Viga 03	Pilares 01 a 05	-
	Perfil	W610X101	W610X155	W310X38.7	W360X79	-
Pórtico C	Segmento	Vigas 01 a 03	Viga 04	Viga 05	Viga 06	Pilares 01 a 07
	Perfil	W610X101	W610X155	W200X15	W310X28.3	W360X79
Vigas Secundárias	Segmento	Viga 01	-	-	-	-
	Perfil	W310X21	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2. Pórtico A

7.2.1. Curva ISO-834

Para determinação das temperaturas nas seções transversais do Pórtico A segundo a curva ISO-834, considerou-se que os pilares e as vigas estavam expostos ao incêndio em três faces. Lançando mão da metodologia simplificada, as temperaturas críticas observadas variaram de 790,1°C para o perfil W360X79 utilizado no pilar 01 do pavimento térreo, à 981,5°C para o mesmo perfil, utilizado no pilar 01 no 1º pavimento. Quanto ao TRRF definido, observou-se que o Pórtico A não alcançou o requisito mínimo de segurança (tempo mínimo equivalente a 60 minutos) em nenhum de seus pavimentos analisados, indo a colapso no tempo de 32,05 minutos nas vigas V1 (Tabela 6).

Verificou-se, portanto, que há a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, para que seja assegurada a estabilidade a um tempo requerido de 60 minutos, exceto no pilar 01 no 1º pavimento. A espessura mínima de 10mm foi adotada para os revestimentos empregados conforme exposto na Tabela 6, em detrimento do processo executivo. Assim, todos os dados obtidos abaixo desse valor foram arredondados para 10mm.

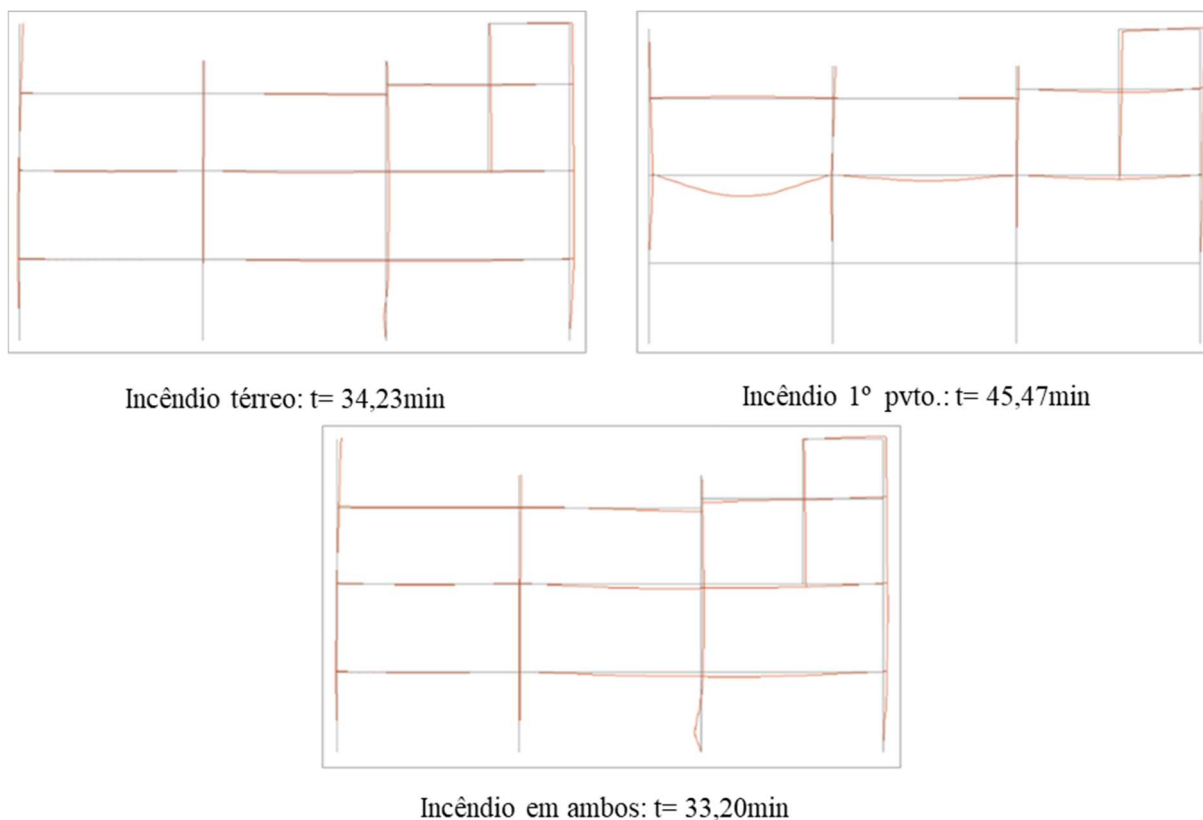
Tabela 6 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico A

Elemento	Perfil	T. Crít. (°C)	ISO 834			
			SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
			Sem Revestimento	Com Revestimento	Sem Revestimento	Com Revestimento
			Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1	W610X101	793.0	32.05	10	34,23 (térreo) 45,47 (1º pvto) 33.20 (ambos)	10
V2	W610X155	795.6	37.02	10		10
P1-T	W360X79	870.7	40.22	10		-
P2-T	W360X79	797.8	34.35	10		10
P3-T	W360X79	790.1	33.67	10		10
P5-T	W360X79	846.9	37.3	10		-
P1-1P	W360X79	981.5	79.58	-		-
P2-1P	W360X79	899.1	48.65	10		10
P3-1P	W360X79	886.7	43.4	10		10
P5-1P	W360X79	942.8	56.63	10		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando a curva ISO 834 a partir do método avançado, observou-se que o Pórtico A não alcançou o requisito mínimo de segurança (tempo mínimo equivalente a 60 minutos) em nenhum de seus pavimentos analisados, indo a colapso no tempo de 34,23 minutos em incêndio no térreo, 45,47 minutos em incêndio no primeiro pavimento e 33,20 minutos (Figura 33) para incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente. Estes tempos refere-se ao momento em que, durante a análise do pórtico, o primeiro elemento entrou em colapso. Constatou-se, portanto a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 6. A definição dos elementos a serem protegidos pelo método avançado se deu de maneira sequencial, onde se realizava a proteção do primeiro elemento colapsado e se calculava novamente a estrutura, partindo para a proteção do segundo elemento e assim até que o pórtico suportasse o tempo requerido.

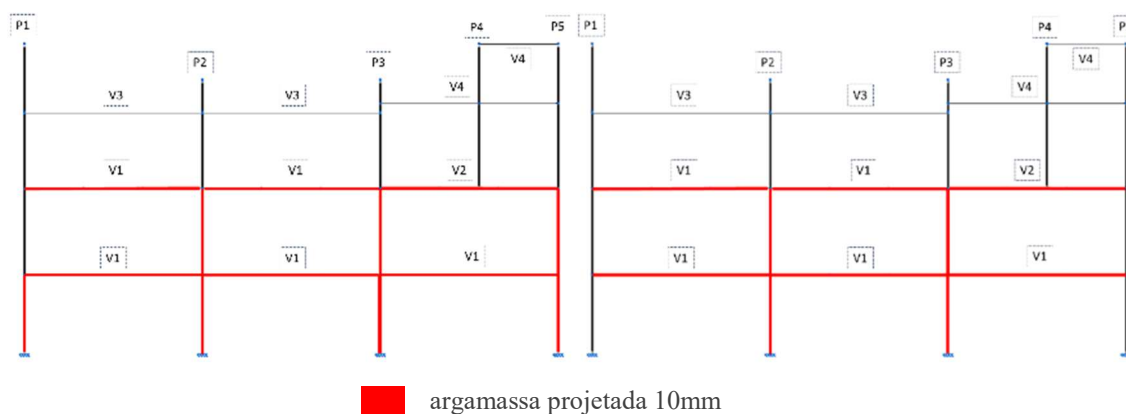
Figura 33 – Deformada do pórtico A sob análise ISO 834 avançada, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a redução na necessidade de proteção nos pilares da extremidade para o método avançado, a qual se deu provavelmente pela consideração da sobreposição de efeitos possibilitada pelo MEF, visto que estes pilares estão submetidos a menores esforços (Figura 34).

Figura 34 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico A, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2.2. Curva Paramétrica

Quanto à verificação utilizando curvas paramétricas, considerou-se o compartimento A para o pórtico em ambos pavimentos, cujas características da envoltória e dimensões estão expostas respectivamente nas Tabela 2 e Tabela 3. A Tabela 7 apresenta as temperaturas críticas e máximas do aço e o tempo de resistência ao fogo da estrutura. As temperaturas máximas variaram de 780.6°C para o Pilar 03 no térreo a 981.5°C para o Pilar 01 no 1º pavimento. Já as temperaturas máximas estão entre 1000.94°C para a Viga 01 até 983.59°C para todos os pilares.

Verificou-se a necessidade de proteção da estrutura em todos os elementos do pórtico, para que seja assegurada a estabilidade a um tempo requerido de 60 minutos.

Tabela 7 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico A

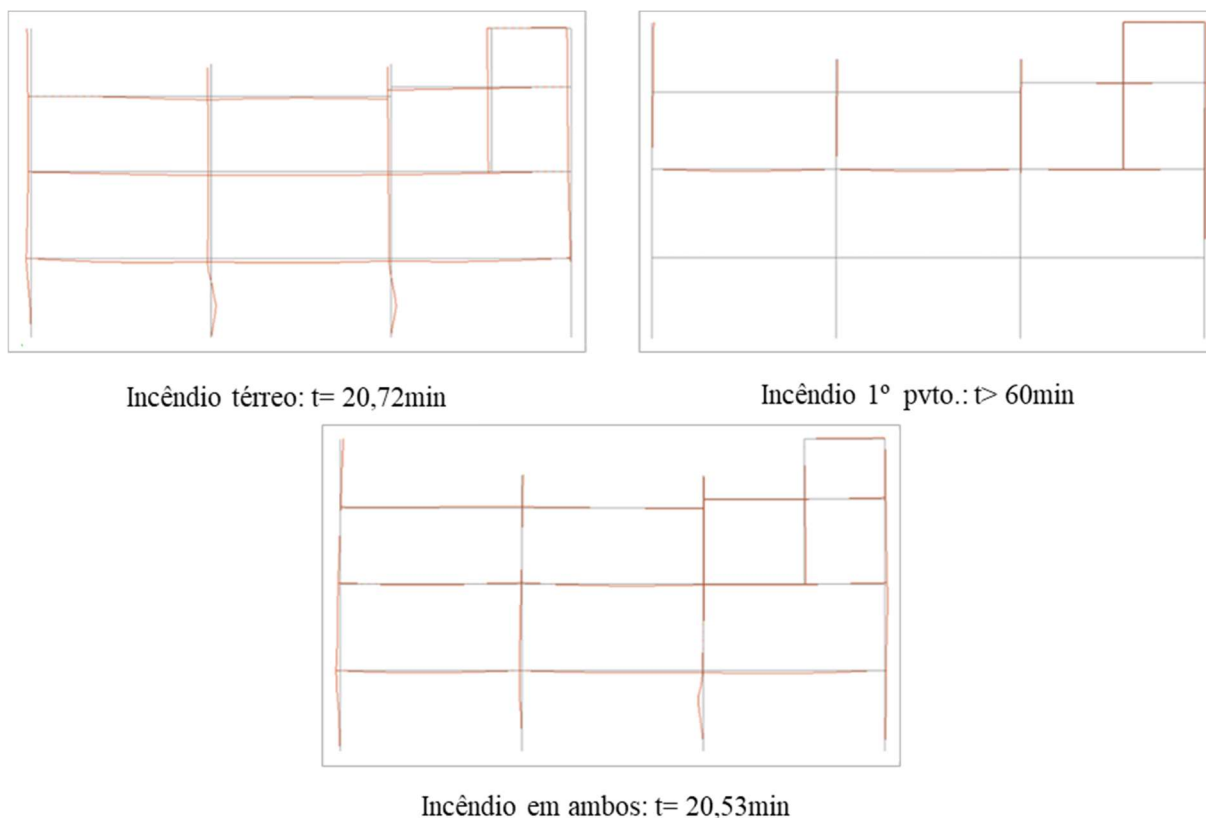
Elemento	Perfil	Compartimento	T. Crít. (°C)	T. Máx. (°C)	CURVA PARAMÉTRICA			
					SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
					Sem revestimento	Com Revestimento	Sem revestimento	Com Revestimento
					Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1	W610X101	A	793.0	1000.94	12.70	10	20,72 (térreo) >60(1º pvto.) 20.53(ambos)	-
V2	W610X155	A	795.6	959.38	15.50	10		-
P1-T	W360X79	A	851.2	983.59	15.50	10		-
P2-T	W360X79	A	789.1	983.59	14.10	10		10
P3-T	W360X79	A	780.6	983.59	13.90	10		10
P5-T	W360X79	A	824.0	983.59	14.90	10		-
P1-1P	W360X79	A	981.5	983.59	20.00	10		-
P2-1P	W360X79	A	899.1	983.59	16.80	10		-
P3-1P	W360X79	A	873.3	983.59	16.10	10		-
P5-1P	W360X79	A	926.5	983.59	17.60	10		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando as curvas paramétricas a partir do método avançado, o Pórtico A alcançou o requisito mínimo de segurança sem necessidade de revestimento no primeiro pavimento, indo a colapso no tempo de 20,72 minutos em incêndio no térreo e 20,53 minutos (Figura 35) para incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente. Estes tempos referem-se ao momento em que, durante a análise do pórtico, o primeiro elemento entrou em colapso. Constatou-se, portanto a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 7. A definição de todos os elementos a serem protegidos pelo método avançado se deu de maneira sequencial, onde se realizava a proteção

do primeiro elemento colapsado e se calculava novamente a estrutura, partindo para a proteção do segundo elemento e assim até que o pórtico suportasse o tempo requerido.

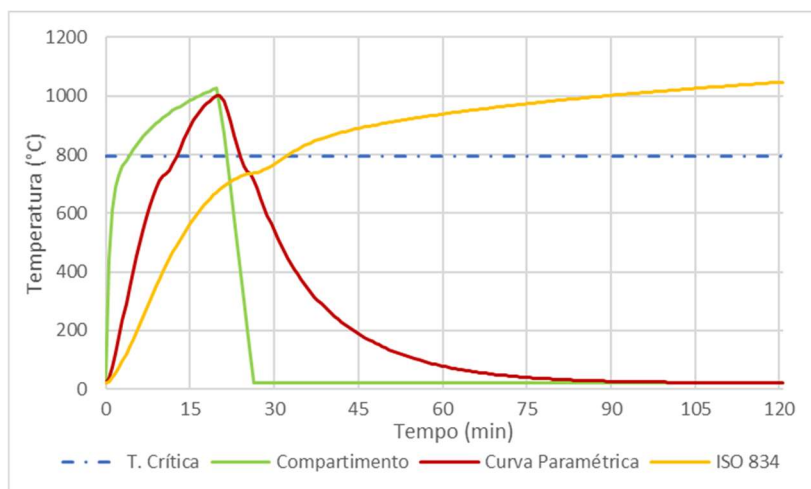
Figura 35 – Deformada do pórtico A sob análise de curvas paramétricas avançada para incêndio nos dois pavimentos, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

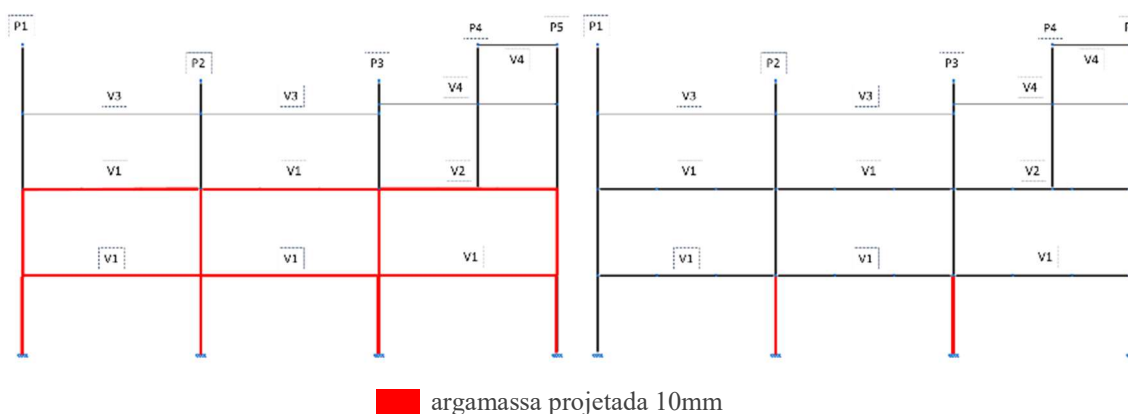
Tem-se na Figura 36 a comparação entre as curvas de temperatura-tempo para a viga 01 no pórtico em questão. Observa-se a intensidade, velocidade e impacto do *flashover* para a curva paramétrica, a qual atinge temperaturas elevadas em um curto espaço de tempo, o que justifica o aumento da necessidade de revestimento contra incêndio para a análise simplificada. Este processo acontece de maneira bastante aproximada em todos os elementos de todos os pórticos analisados. Entretanto, há uma redução drástica na necessidade de proteção dos elementos para o método avançado neste caso, a qual pode se justificar pela proximidade entre as temperaturas máximas e críticas dos elementos no primeiro pavimento, além da sobreposição de efeitos possibilitada pelo MEF (Figura 37).

Figura 36 – Curvas de incêndio para o método simplificado – Viga 01 do Pórtico A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico A, análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3. Pórtico B

O pórtico em questão repete sua geometria ao longo da edificação, estando submetido às mesmas cargas, entretanto compreende compartimentos diferentes em si. Desta forma, este foi analisado conforme a Curva ISO 834 sem influência da compartimentação, seguido de três análises distintas, de acordo com o compartimento em que o pórtico se encontra.

7.3.1. Curva ISO 834

Para determinação das temperaturas nas seções transversais do pórtico B segundo a curva ISO-834, considerou-se que as vigas e os pilares de extremidade estavam expostos ao incêndio em três faces, e os pilares de centro expostos em quatro faces. Lançando mão da

metodologia simplificada, as temperaturas críticas observadas variaram de 762,6°C para o perfil W610X155 utilizado na viga 02, à 930,9°C para o perfil W360X79, utilizado no pilar 01 no 1º pavimento. Quanto ao TRRF definido, observou-se que o Pórtico B não alcançou o requisito mínimo de segurança (tempo mínimo equivalente a 60 minutos) em nenhum de seus pavimentos analisados, indo a colapso no tempo de 30,68 minutos no pilar 03 no térreo (?F 8). Verificou-se, portanto, a necessidade de proteção da estrutura no pórtico para todos os elementos.

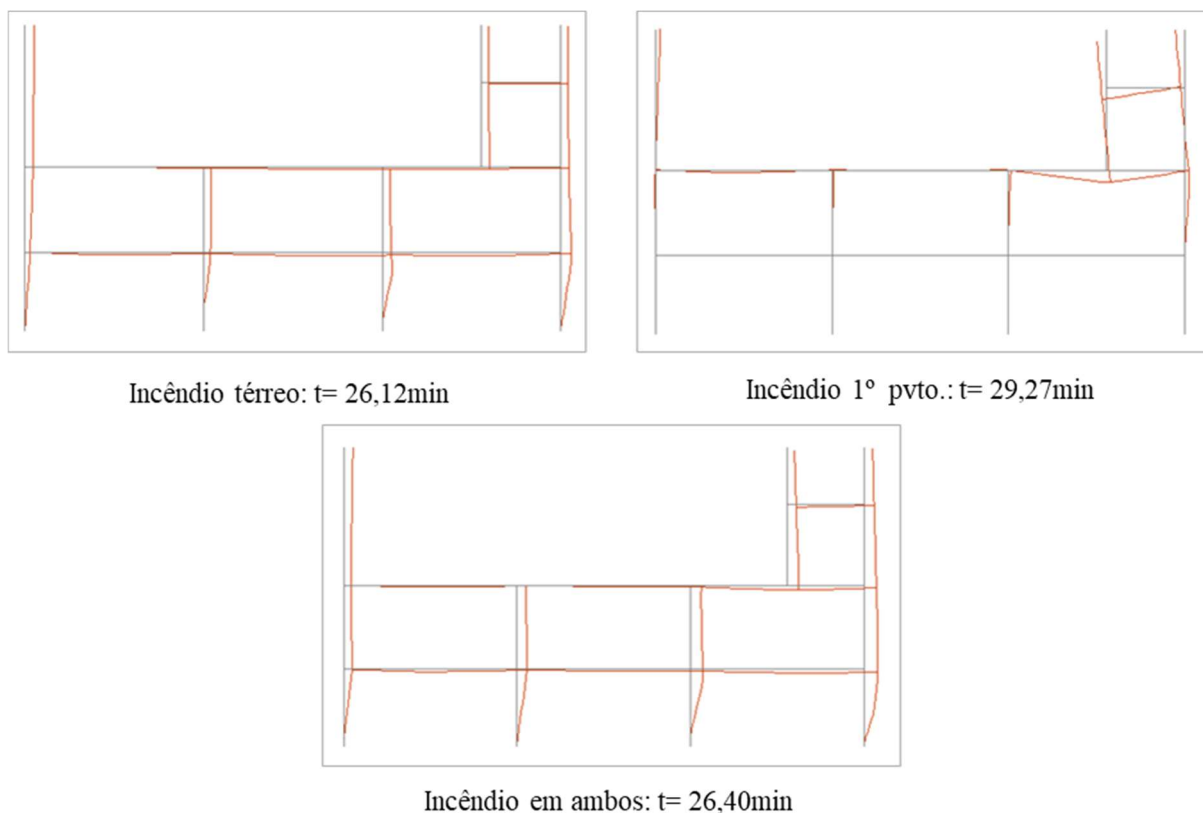
?F 8 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico B

Elemento	Perfil	T. Crít. (°C)	ISO 834			
			SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
			Sem Revestimento	Com Revestimento	Sem Revestimento	Com Revestimento
			Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1	W610X101	795.3	32.23	10	26.12 (térreo) 29.27 (1ºpvto) 26.4 (ambos)	15
V2	W610X155	762.6	34.27	10		10
P1-T	W360X79	805.8	35.70	10		10
P2-T	W360X79	788.2	31.65	10		10
P3-T	W360X79	775.7	30.68	10		10
P5-T	W360X79	784.1	33.93	10		10
P1-1P	W360X79	930.9	58.15	10		10
P2-1P	W360X79	918.9	54.18	10		10
P3-1P	W360X79	878.8	42.58	10		10
P5-1P	W360X79	864.3	41.98	10		10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando a curva ISO 834 a partir do método avançado, o Pórtico B não alcançou o requisito mínimo de segurança em nenhum de seus pavimentos analisados, indo a colapso no tempo de 26,12 minutos em incêndio no térreo, 29,27 minutos em incêndio no primeiro pavimento e 26,40 minutos considerando incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente (Figura 38). Constatou-se, portanto a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na ?F 8.

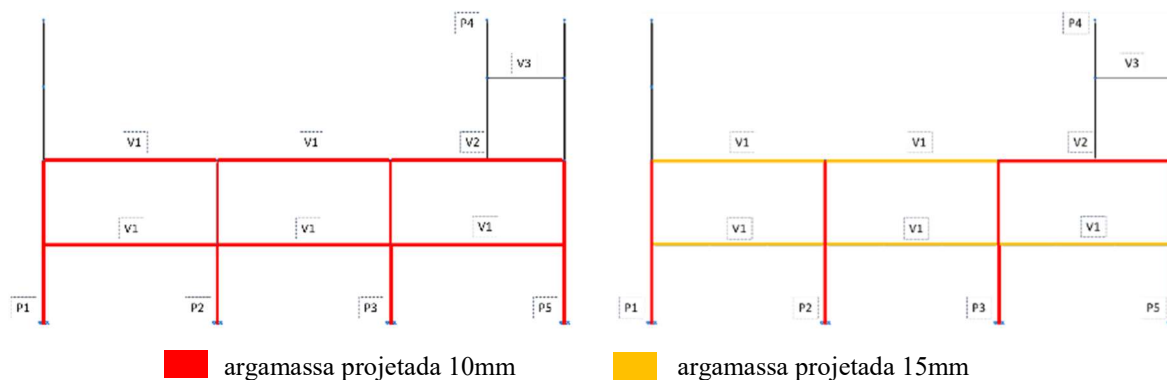
Figura 38 – Deformada do pórtico B sob análise ISO 834 avançada, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se o acréscimo na necessidade de proteção nas vigas principais para o método avançado, a qual pode se justificar pela consideração da sobreposição de efeitos possibilitada pelo MEF, dada a elevada solicitação de esforços nestes elementos (Figura 39). Ressalta-se assim a importância de se realizar análises que possibilitam maior nível de precisão, a fim de garantir a segurança dos resultados obtidos.

Figura 39 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3.2. Curvas Paramétricas no Compartimento A

Quanto à verificação utilizando curvas paramétricas para os pórticos contidos no compartimento A, as temperaturas críticas variaram de 762,6°C para a viga 02 até 930,9°C para o pilar 01 no 1º pavimento. Já as temperaturas máximas estão entre 1000,94°C para a viga 01 até 983.59°C para os pilares de extremidade. Verificou-se a necessidade de proteção da estrutura em todos os elementos do pórtico, para que seja assegurada a estabilidade a um tempo requerido de 60 minutos, conforme Tabela 9.

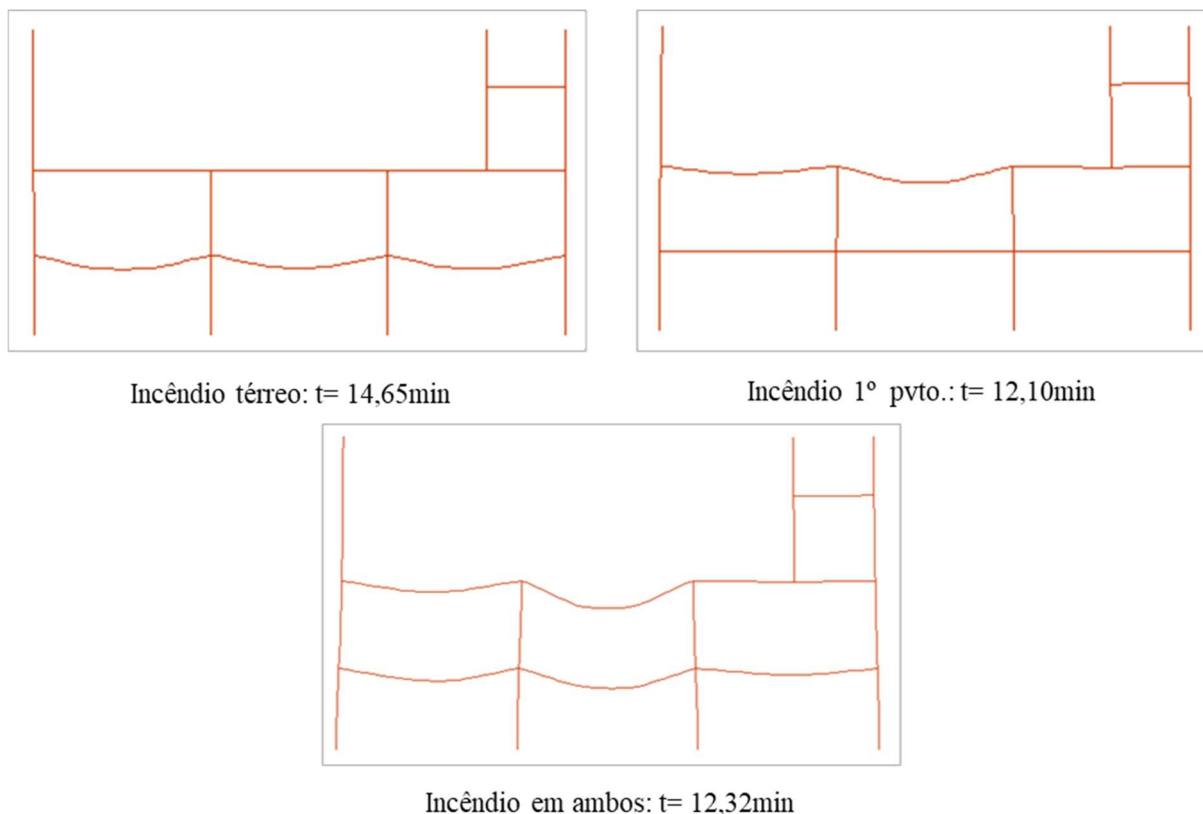
Tabela 9 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B
(Compartimento A)

Elemento	Perfil	T. Crít. (°C)	T. Máx. (°C)	CURVA PARAMÉTRICA			
				SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
				Sem revestimento	Com Revestimento	Sem revestimento	Com Revestimento
				Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1	W610X101	795.3	1000.94	12.70	10	14.65(térreo) 12.10(1ºpvto) 12.32(ambos)	10
V2	W610X155	762.6	959.38	14.60	10		10
P1-T	W360X79	805.8	983.59	14.50	10		-
P2-T	W360X79	788.2	1000.99	12.50	10		10
P3-T	W360X79	836.4	1000.99	12.30	10		10
P5-T	W360X79	784.1	983.59	14.00	10		10
P1-1P	W360X79	930.9	983.59	17.80	10		-
P2-1P	W360X79	918.9	1000.99	15.70	10		10
P3-1P	W360X79	878.8	1000.99	14.50	10		10
P5-1P	W360X79	864.3	983.59	15.80	10		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando o método avançado, o Pórtico B não alcançou o requisito mínimo de segurança para nenhum dos casos, indo a colapso no tempo de 14,65 minutos em incêndio no térreo, 12,32 minutos para incêndio no 1º pavimento e 12,32 minutos para incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente (Figura 40). Constatou-se, portanto a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 9.

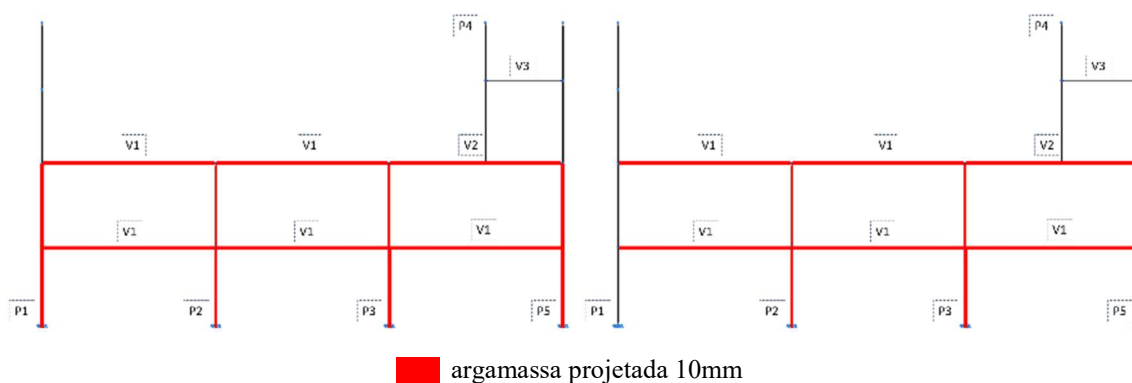
Figura 40 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada no compartimento A, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tem-se na Figura 41 a comparação entre a necessidade de revestimento contra incêndio de acordo com as abordagens simplificada e avançada. Observa-se a redução na necessidade de proteção nos pilares da extremidade para o método avançado, a qual pode se justificar pela sobreposição de efeitos possibilitada pelo MEF. Esta, se comparada aos resultados obtidos pela análise segundo a ISO 834, também apresenta economia.

Figura 41 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimento A), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3.3. Curvas Paramétricas no Compartimento B

Quanto à verificação utilizando curvas paramétricas para os pórticos contidos no compartimento B, as temperaturas críticas variaram de 762,6°C para a viga 02 até 930,9°C para o pilar 01 no 1º pavimento. Já as temperaturas máximas estão entre 1073,32°C para a viga 02 até 1075,55°C para a viga 01 e os pilares centrais. Verificou-se a necessidade de proteção da estrutura em todos os elementos do pórtico, para que seja assegurada a estabilidade a um tempo requerido de 60 minutos, conforme Tabela 10.

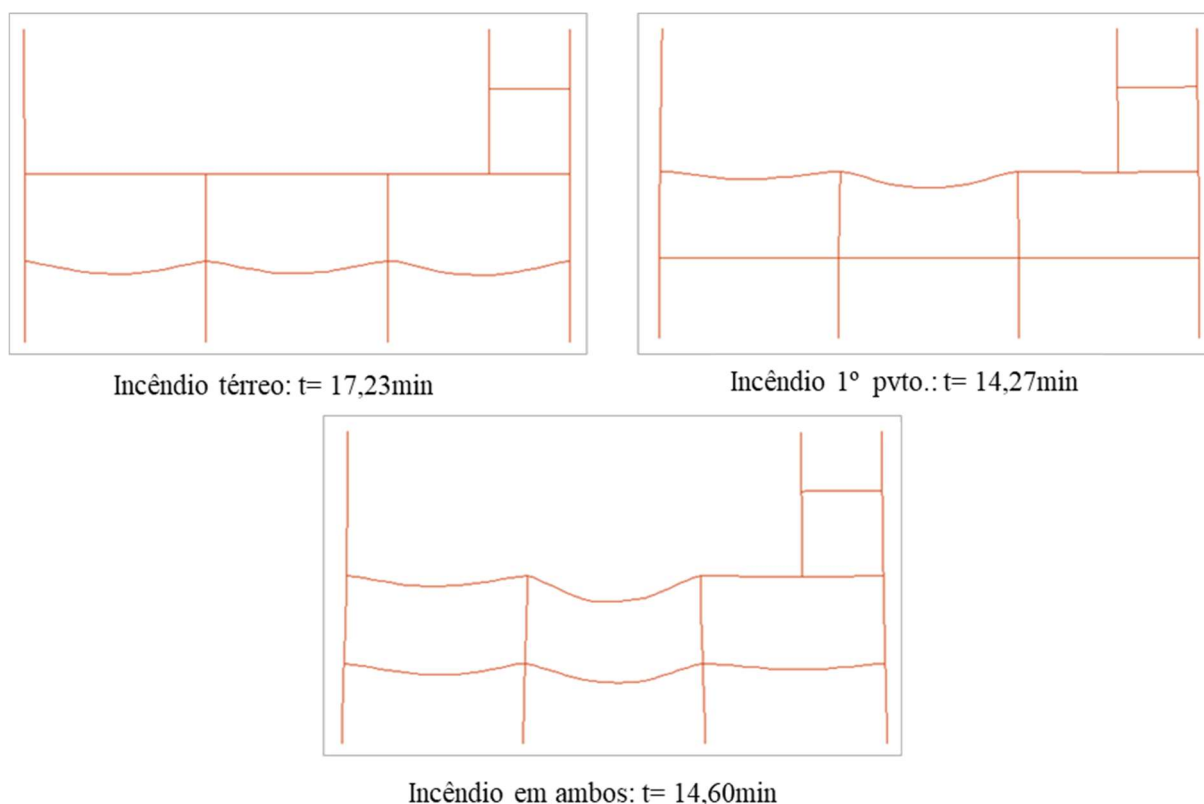
Tabela 10 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B
(Compartimento B)

Elemento	Perfil	T. Crít. (°C)	T. Máx. (°C)	CURVA PARAMÉTRICA			
				SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
				Sem revestimento	Com Revestimento	Sem revestimento	Com Revestimento
				Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1	W610X101	795.3	1075.55	16.80	15	17.23(térreo); 14.27(1ºpvto); 14.6(ambos)	20
V2	W610X155	762.6	1073.32	18.90	15		10
P1-T	W360X79	805.8	1074.37	19.00	10		10
P2-T	W360X79	788.2	1075.55	16.50	15		10
P3-T	W360X79	775.7	1075.55	16.10	15		10
P1-1P	W360X79	930.9	1074.37	24.80	10		10
P2-1P	W360X79	918.9	1075.55	22.20	10		10
P3-1P	W360X79	878.8	1075.55	19.90	10		10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando o método avançado para este compartimento, o Pórtico B também não alcançou o requisito mínimo de segurança em nenhum dos casos, indo a colapso no tempo de 17,23 minutos em incêndio no térreo, 14,27 minutos para incêndio no 1º pavimento e 14,60 minutos para incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente (Figura 42). Constatou-se, portanto, a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 10.

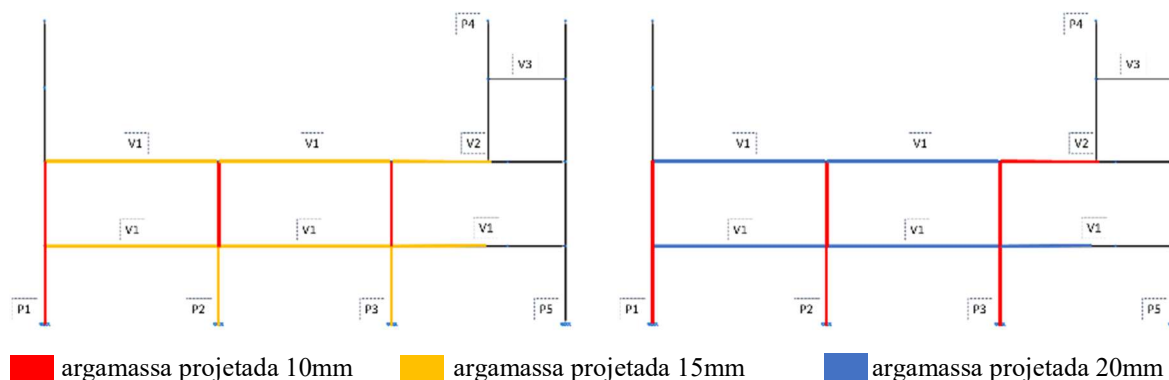
Figura 42 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada no compartimento B, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme representado na Figura 43, enquanto que o método simplificado resultou em revestimentos contra incêndio de 15mm nas vigas e pilares centrais, houve redução da necessidade de proteção dos pilares para o método avançado, porém com acréscimo na espessura do revestimento nas vigas 01.

Figura 43 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimento B), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3.4. Curvas Paramétricas nos Compartimentos C e D

Tal qual é possível observar na Figura 30, os pórticos intermediários da região posterior da edificação abrangem os compartimentos C e D simultaneamente. Assim, esta análise leva em conta as simulações de situação de incêndio para cada compartimento nos pavimentos. Deste modo, obtêm-se as temperaturas críticas e máximas conforme presente na Tabela 11. Segundo o método simplificado, verificou-se a necessidade de proteção da estrutura em todos os elementos do pórtico para que seja assegurada a estabilidade ao tempo requerido de 60 minutos. Segundo esta análise, o pórtico entraria em colapso aos 8,60 minutos no pilar 03 localizado no térreo.

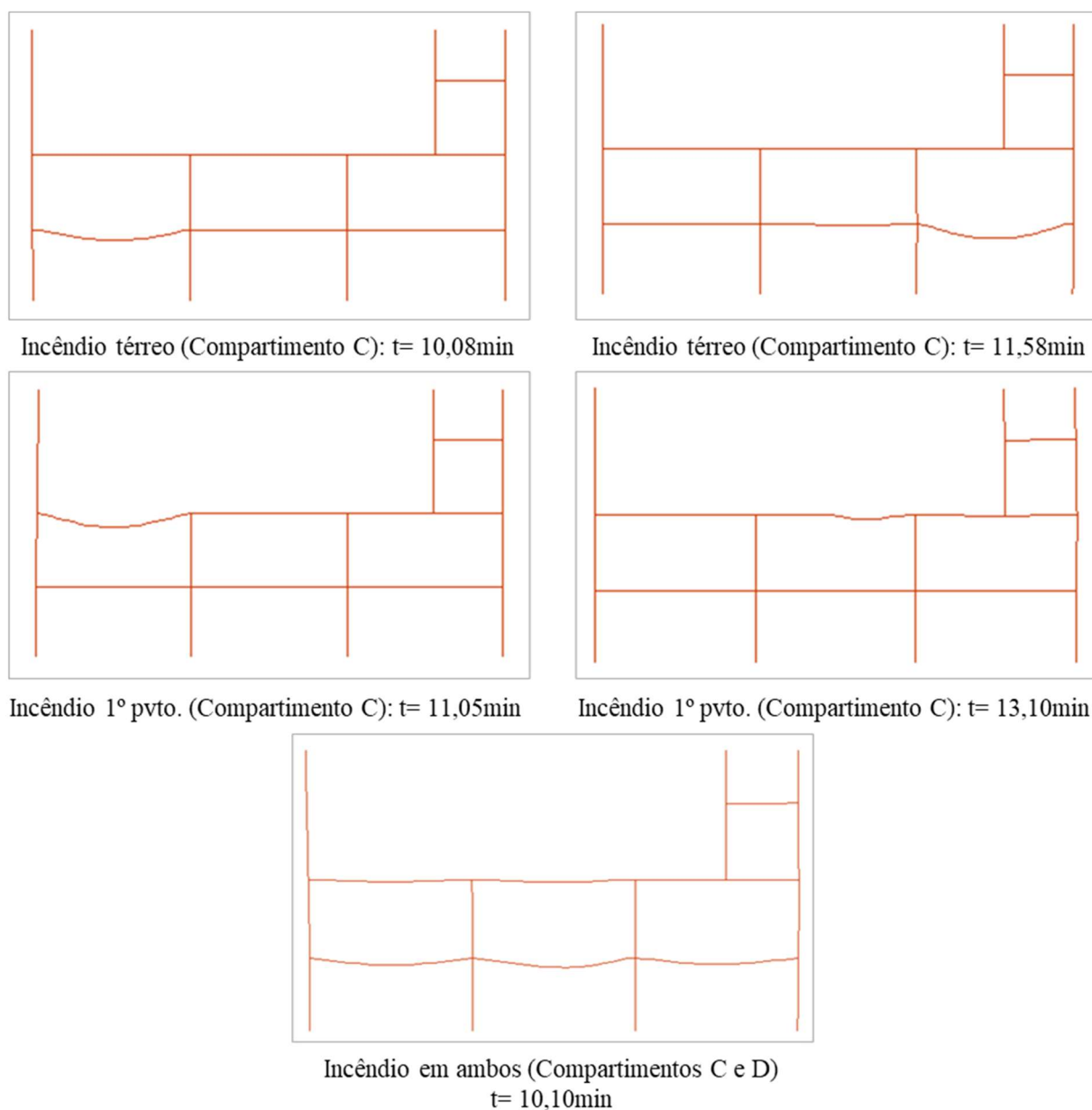
Tabela 11 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico B
(Compartimentos C e D)

Elemento	Perfil	Compartimento	T. Crít. (°C)	T. Máx. (°C)	CURVA PARAMÉTRICA			
					SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
					Sem revestimento	Com Revestimento	Sem revestimento	Com Revestimento
					Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1-T	W610X101	C	795.3	1165.2	9.20	10	10.08(térreo); 11.05(1ºpvto);	15
V1-1P	W610X101		795.3	1134.5	10.90	10		20
P1-T	W360X79		805.8	1162.1	10.60	10		10
P2-T	W360X79		788.2	1165.2	9.10	10		10
P1-1P	W360X79		930.9	1132.6	15.00	10		10
P2-1P	W360X79		918.9	1134.5	13.10	10		10
V1-T	W610X101	D	795.3	1171.4	8.90	10	11.58(térreo); 13.10(1ºpvto)	15
V1-1P	W610X101		795.3	1147.3	10.10	10		15
V2	W610X155		762.6	1142.9	11.80	10		10
P3-T	W360X79		775.7	1171.4	8.60	10		10
P5-T	W360X79		784.1	1168.6	10.00	10		10
P3-1P	W360X79		878.8	1147.3	11.40	10		10
P5-1P	W360X79		864.3	1145.2	12.60	10		10

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a verificação da situação de incêndio empregando o método avançado, o Pórtico B também não alcançou o requisito mínimo de segurança em nenhum dos casos. No compartimento C, este vai a colapso no tempo de 10,08 minutos em incêndio no térreo e 11,05 minutos para incêndio no 1º pavimento. Já para o compartimento D, este se colapsa aos 11,58 minutos no térreo e aos 13,10 minutos no 1º pavimento. Por fim, considerando incêndio em todos os compartimentos, o tempo de colapso seria de 10,10 minutos (Figura 44). Constatou-se, portanto, a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 11.

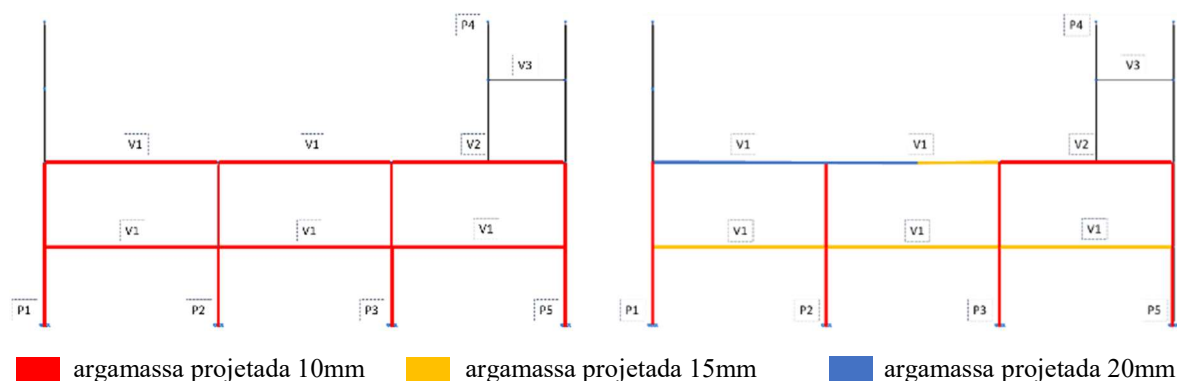
Figura 44 – Deformada do pórtico B sob análise de curvas paramétricas avançada nos compartimentos C e D, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dada a comparação entre a necessidade de revestimento contra incêndio de acordo com as abordagens simplificada e avançada presentes na Figura 45, observa-se o aumento na necessidade de proteção das vigas para o método avançado, em especial no compartimento C superior.

Figura 45 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimentos C e D), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.4. Pórtico C

O pórtico posterior abrange os compartimentos C e D. Desta forma, este foi analisado conforme a Curva ISO 834 sem influência da compartimentação, seguido das variações de curvas paramétricas de acordo com o compartimento em que o pórtico se encontra. Considerou-se para tanto a exposição ao fogo de todos os elementos em três faces. O pilar 04, localizado na intermediação dos dois compartimentos, foi analisado exposto nos dois lados, sendo considerada sua situação mais crítica entre as duas.

7.4.1. Curva ISO 834

Para determinação das temperaturas nas seções transversais do pórtico C segundo a curva ISO-834, e lançando mão da metodologia simplificada, as temperaturas críticas observadas variaram de 836,7°C para o perfil W360X79 utilizado no pilar 05 no térreo, à 1126,7°C para o perfil W610X105, utilizado nas vigas 02. Quanto ao TRRF definido, observou-se que o Pórtico C não alcançou o requisito mínimo de segurança (tempo mínimo equivalente a 60 minutos) em nenhum de seus pavimentos analisados, indo a colapso no tempo de 38,57 minutos no pilar 05 no térreo (Tabela 12). Verificou-se, portanto, a necessidade de proteção da estrutura no pórtico para todos os elementos de forma a atingir o tempo mínimo requerido de 60 minutos.

Tabela 12 – Resultados para análise segundo a ISO 834 do Pórtico C

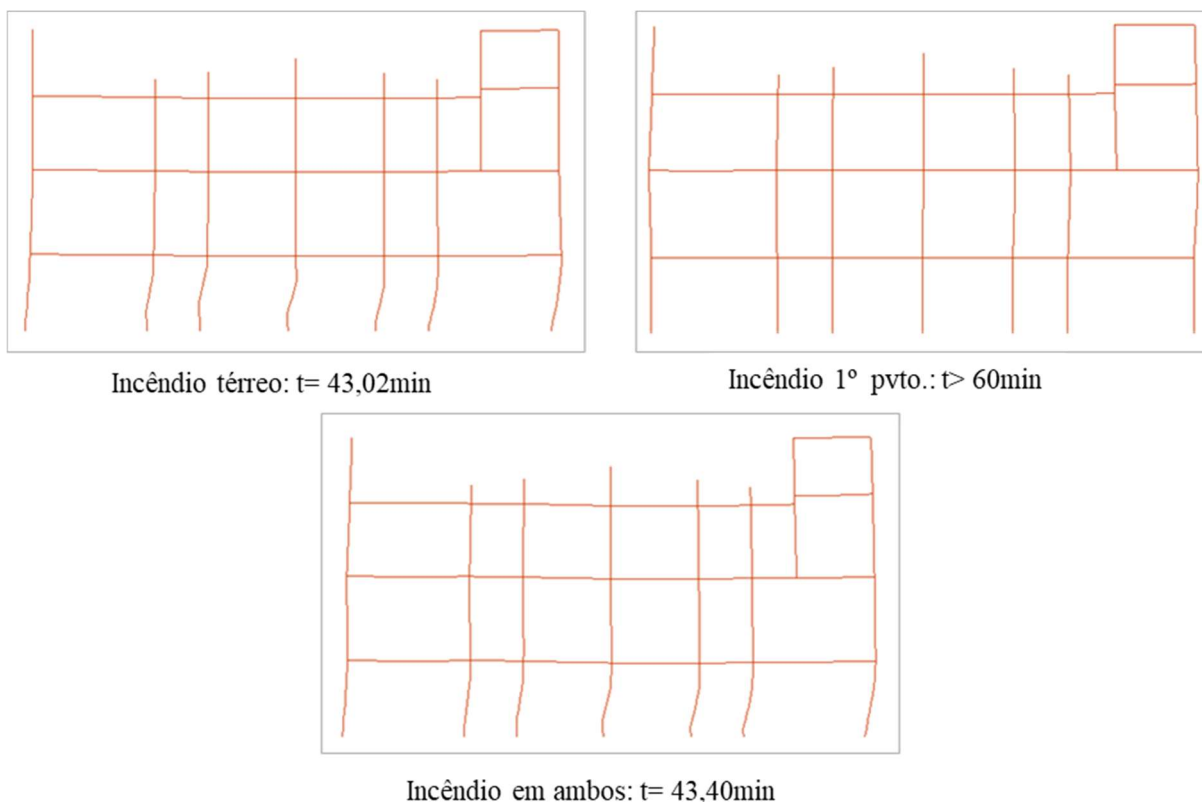
Elemento	Perfil	T. Crít. (°C)	ISO 834			
			SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
			Sem Revestimento	Com Revestimento	Sem Revestimento	Com Revestimento
			Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1-T	W610X101	869.8	40.85	10	43,02(térreo); >60(1ºpvto); 43,40(ambos)	-
V2-T	W610X101	1126.7	203.50	-		-
V3-T	W610X101	999.3	88.50	-		-
V1-1P	W610X101	869.8	40.85	10		-
V2-1P	W610X101	1126.7	203.50	-		-
V3-1P	W610X101	999.3	88.50	-		-
V4-1P	W610X155	864.3	43.9	10		-
P1-T	W360X79	869.1	42.72	10		-
P2-T	W360X79	861.3	41.55	10		10
P3-T	W360X79	898.5	47.28	10		-
P4-T	W360X79	870.3	42.90	10		-
P5-T	W360X79	836.7	38.57	10		10
P7-T	W360X79	854.4	40.63	10		-
P1-1P	W360X79	1017.8	100.27	-		-
P2-1P	W360X79	1010.6	95.77	-		-
P3-1P	W360X79	1028	107.05	-		-
P4-1P	W360X79	1019.9	101.65	-		10
P5-1P	W360X79	945.3	63.47	-		-
P7-1P	W360X79	983.8	80.7	-		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a verificação da situação de incêndio utilizando a curva ISO 834 a partir do método avançado, o Pórtico C alcançou o requisito mínimo de segurança no 1º pavimento, entretanto este vai a colapso no tempo de 43,02 minutos em caso de incêndio no térreo, ou ainda de 43,40 minutos em caso de incêndio em ambos os pavimentos simultaneamente (Figura 46). Constatou-se, portanto a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 8.

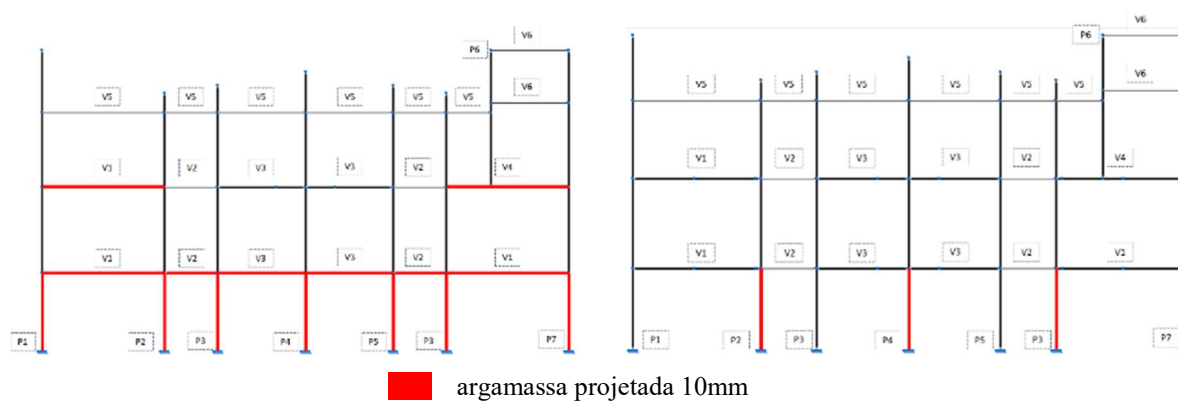
A baixa necessidade de proteção, principalmente nos elementos do 1º pavimento, se justifica pela baixa solicitação aos elementos em questão. Conforme exposto na Figura 47, nenhum dos pilares do 1º pavimento necessita de proteção para este caso, reduzindo ainda mais sua necessidade levando em conta o rearranjo dos esforços possibilitado pela metodologia avançada.

Figura 46 – Deformada do pórtico C sob análise ISO 834 avançada, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico C, análise ISO 834 simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.4.2. Curva Paramétrica

Quanto à análise utilizando curvas paramétricas para o pórtico C, esta se dá levando em consideração a influência dos compartimentos em que se encontra o pórtico. obtêm-se as temperaturas críticas e máximas conforme presente na Tabela 13. Segundo o método simplificado, verificou-se a necessidade de proteção da estrutura em todos os elementos do

pórtico para que seja assegurada a estabilidade ao tempo requerido de 60 minutos. Conforme esta análise, o pórtico entraria em colapso aos 9,90 minutos na viga 01 localizado no térreo.

Tabela 13 – Resultados para análises segundo curvas paramétricas do Pórtico C
(Compartimentos C e D)

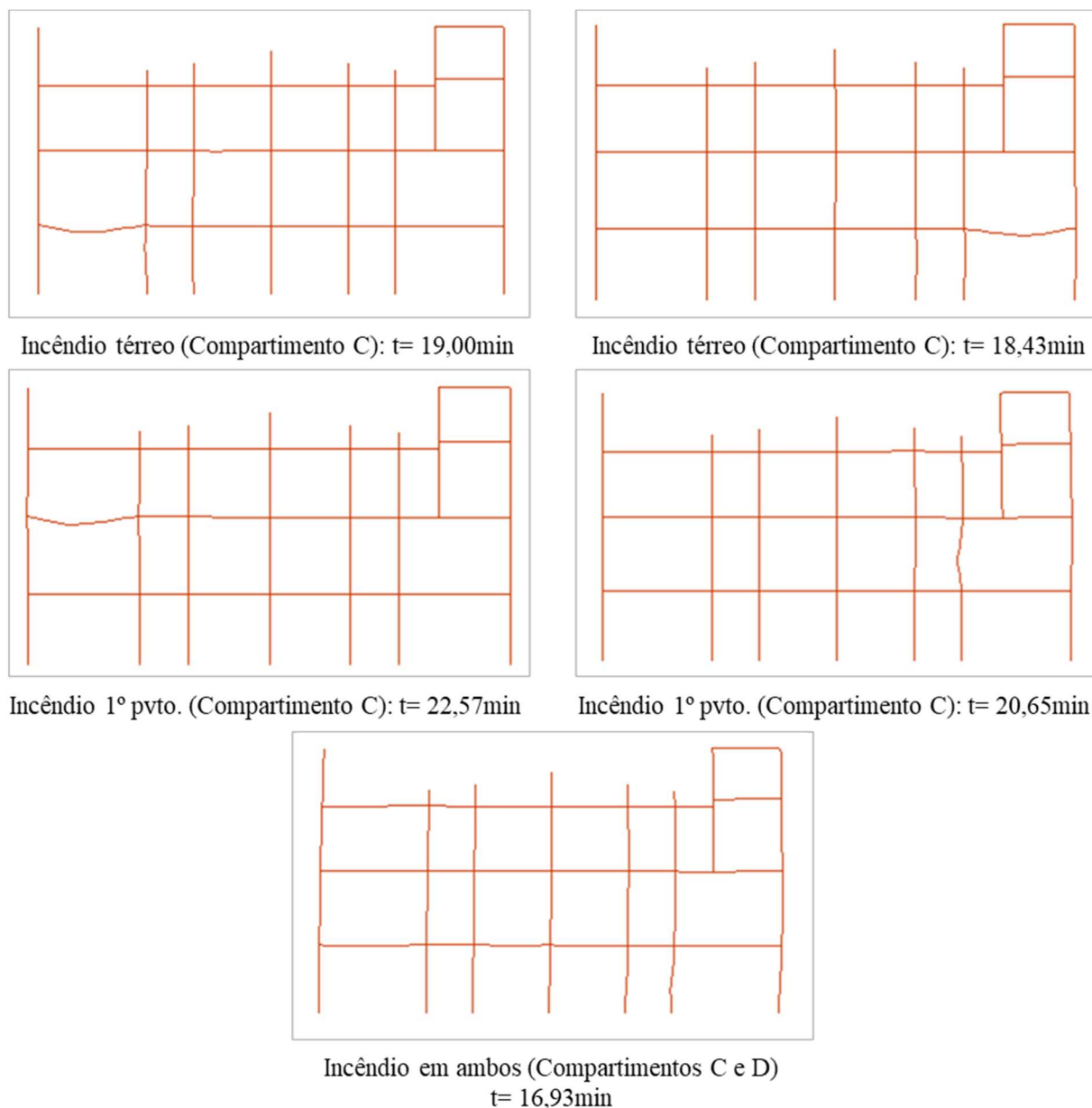
Elemento	Perfil	Compartimento	T. Crít. (°C)	T. Máx. (°C)	CURVA PARAMÉTRICA			
					SIMPLIFICADO		AVANÇADO	
					Sem revestimento	Com Revestimento	Sem revestimento	Com Revestimento
					Tempo (min)	Espessura (mm)	Tempo (min)	Espessura (mm)
V1-T	W610X101	C	869.8	1165.16	10.20	10	19.00(térreo); 22.57(1ºpvto);	10
V2-T	W610X101		1126.7	1165.16	19.90	10		10
V3-T	W610X101		999.3	1165.16	12.60	10		10
V1-1P	W610X101		869.8	1134.47	12.10	10		10
V2-1P	W610X101		1126.7	1134.47	28.90	10		10
V3-1P	W610X101		999.3	1134.47	15.70	10		10
P1-T	W360X79		869.1	1162.11	11.50	10		-
P2-T	W360X79		861.3	1162.11	11.40	10		10
P3-T	W360X79		898.5	1162.11	12.00	10		-
P4-T	W360X79		870.3	1162.11	11.50	10		10
P1-1P	W360X79		1014.1	1132.6	17.6	10		-
P2-1P	W360X79		1006.9	1132.6	17.3	10		10
P3-1P	W360X79		1032	1132.6	18.8	10		-
P4-1P	W360X79		1011.7	1132.6	17.7	10		10
V1-T	W610X101	D	869.8	1171.4	9.9	10	18.43(térreo); 20.65(1ºpvto);	10
V2-T	W610X101		1126.7	1171.4	18.6	10		10
V3-T	W610X101		999.3	1171.4	12.2	10		10
V1-1P	W610X101		869.8	1147.3	11.3	10		10
V2-1P	W610X101		1126.7	1147.3	24.7	10		10
V3-1P	W610X101		999.3	1147.3	14.3	10		10
V4-1P	W610X155		864.3	1142.9	13.7	10		10
P3-T	W360X79		898.5	1168.6	11.6	10		-
P4-T	W360X79		870.3	1168.6	11.2	10		10
P5-T	W360X79		836.7	1168.6	10.7	10		10
P7-T	W360X79		854.4	1168.6	11	10		-
P3-1P	W360X79		1035.2	1145.2	17	10		-
P4-1P	W360X79		1015.8	1145.2	16.2	10		10
P5-1P	W360X79		950.7	1145.2	14.2	10		10
P7-1P	W360X79		980.2	1145.2	15	10		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a verificação da situação de incêndio empregando o método avançado, o Pórtico C também não alcançou o requisito mínimo de segurança em nenhum dos casos. No compartimento C, este vai a colapso no tempo de 19,00 minutos em incêndio no térreo e 22,57 minutos para incêndio no 1º pavimento. Já para o compartimento D, este se colapsa aos 18,43 minutos no térreo e aos 20,65 minutos no 1º pavimento. Por fim, considerando incêndio em todos os compartimentos, o tempo de colapso seria de 16,93 minutos

(Figura 48). Constatou-se, portanto, a necessidade de proteção da estrutura no pórtico, cujas espessuras estão listadas na Tabela 13.

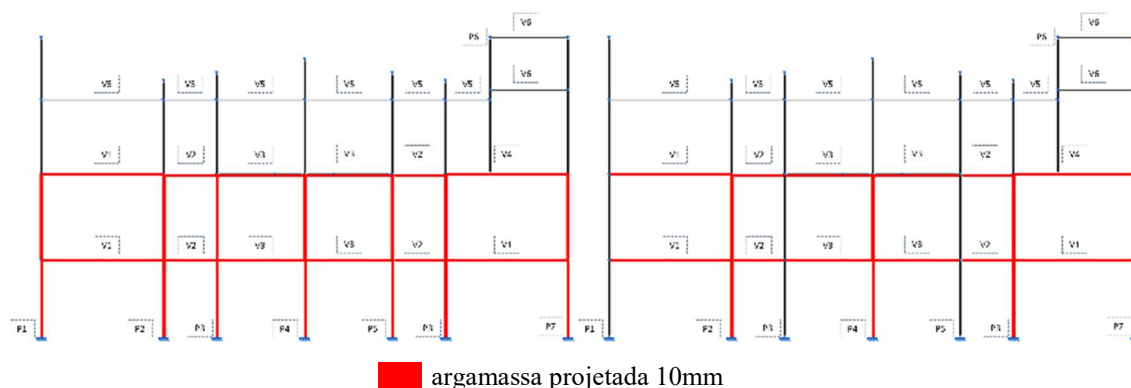
Figura 48 – Deformada do pórtico C sob análise de curvas paramétricas avançada nos compartimentos C e D, sem proteção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o método avançado de cálculo através das curvas paramétricas, foi possível alcançar uma redução da necessidade de revestimento contra incêndio em quatro pilares, conforme representado na Figura 49. Entretanto, esta quantidade ainda é maior do que o apresentado na curva ISO 834, em detrimento das características do incêndio de combustão imediata.

Figura 49 – Necessidade de proteção passiva nos elementos do Pórtico B (Compartimentos C e D), análise com curvas paramétricas simplificada (esquerda) e avançada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

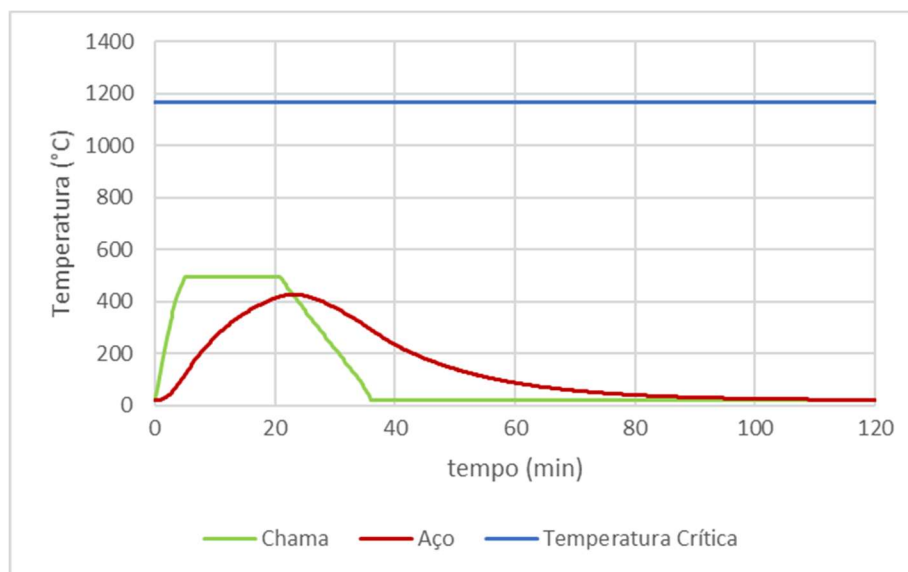
7.5. Incêndio Localizado

Foram utilizadas neste estudo, para fins de análise utilizando as curvas paramétricas no 2º pavimento, as recomendações de Incêndio Localizado descrito no Eurocódigo EN-1991-1-2:2010. Para tanto, foi submetido a incêndio o Pilar 01 do Pórtico B.

Para tal, empregou-se o modelo de Heskestad (CEN, 2010a; REIS, 2011), onde a chama não atinge o teto do compartimento. A área total de aberturas verticais considerada foi de 269,48m² com altura média das aberturas de 2,20m, área máxima de incêndio equivalente a 4m², distância entre a origem do incêndio e o teto de 4,20m, densidade da carga de incêndio de 1.000,00MJ/m² e altura ao longo do eixo da chama de 2,0m.

Os resultados da análise para o pilar em questão podem ser vistos na Figura 50, cujo gráfico foi obtido através do *software* Elefir-EN (VILA REAL e FRANSSEN, 2011). A temperatura máxima no perfil foi de 427,4°C atingida aos 22,98 minutos sendo, portanto, insuficiente para atingir sua temperatura crítica de 1163,8°C. A altura máxima da chama atingiu 1,42m, e a temperatura máxima no compartimento é de 492,3°C entre 5 e 21 minutos, a partir do qual começa a diminuir até a extinção. Analisando o mesmo perfil segundo a curva ISO 834, este atingiria sua temperatura crítica após 260,32 minutos de incêndio, portanto não necessita de proteção.

Figura 50 – Curva de Incêndio Localizado para o Pilar 01 no 2º pavimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.6. Cartas de Cobertura

Alternativamente aos métodos empregados até agora, empregou-se uma carta de cobertura para argamassas projetadas de proteção contra incêndio (Quadro 7). Este método facilita em muito o processo de dimensionamento do revestimento de proteção contra fogo, por considerar somente o fator de massividade da seção do elemento e o tempo requerido de resistência ao fogo para determinar a espessura de revestimento. A carta utilizada refere-se ao mesmo material utilizado nos métodos anteriores, porém fixa sua temperatura crítica em 500°C.

Quadro 7 – Carta de cobertura para argamassa projetada (500 °C)

Massividade (m ²)	Resistência ao fogo (minutos)				
	R 15	R 30	R 45	R 60	R 90
80	10	10	11	14	19
85	10	10	11	14	20
90	10	10	12	15	20
95	10	10	12	15	20
100	10	10	12	15	21
110	10	10	13	16	21
120	10	10	13	16	22
130	10	10	13	16	22
140	10	11	13	16	22
150	10	11	14	17	23
160	10	11	14	17	23
170	10	11	14	17	23
180	10	11	14	17	23

Fonte: Adaptado de Placo (2018).

Para o estudo em questão, definiu-se a massividade dos elementos, sendo estabelecida para as vigas e pilares de extremidade a exposição em 3 lados, e para os pilares centrais a exposição nos 4 lados. Dado o TRRF para o edifício em questão de 60 minutos, obteve-se as espessuras dos revestimentos (Tabela 14).

Tabela 14 – Espessura dos revestimentos obtido através da carta de cobertura

Perfil	Exposição	Massividade (m ¹)	Argamassa Projetada (mm)
W610X101	3 lados	150.36	17
W610X155	3 lados	107.74	16
W360X79	3 lados	167.13	17
W360X79	4 lados	175.28	17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, dada a ocorrência de incêndio, considerando o dimensionamento estabelecido neste tópico, conclui-se a necessidade de revestimento contra incêndio para todos os elementos estudados, a fim de se garantir o tempo requerido de 60 minutos.

7.7. Análises de custo para revestimento contra fogo

Os custos relacionados à proteção passiva foram orçados a partir da composição de preços representada no Quadro 8. Esta composição considera a projeção pneumática de argamassa composta por uma base de gesso, vermiculita e aditivos especiais, e varia seus rendimentos de acordo com a espessura a ser empregada e com o elemento a ser protegido, se pilar ou viga. O custo unitário utilizado foi aquele disponível no dia da pesquisa, o qual pode variar de acordo com fabricante e local.

Quadro 8 – Composição de custo unitário de proteção passiva contra incêndio em vigas com argamassa projetada, espessura 10mm

Un	Descrição	Rendimento	Preço Unitário (R\$)	Preço Insumo (R\$/m²)
kg	Argamassa Igniver "PLACO", composta por uma base de gesso, vermiculita e aditivos especiais, reação ao fogo classe A1, para proteção passiva contra o fogo através de projeção.	7,000	2,34	16,38
h	Misturadora-bombadora para argamassas e gessos projetados, de 3 m³/h.	0,159	17,96	2,86
h	Aplicador de produtos isolantes.	0,191	22,85	4,36
h	Ajudante de aplicador de produtos isolantes.	0,191	17,94	3,43
%	Custos diretos complementares	2,000	27,03	0,54
Custo de manutenção decenal: R\$ 6,34 nos primeiros 10 anos.			Total:	27,57

Fonte: CYPE, 2019

Geradas todas as composições necessárias, foram verificados os comprimentos dos perfis a serem protegidos de acordo com as metodologias estudadas, bem como definidos os perímetros dos perfis. Assim, multiplicou-se o metro linear e o perímetro dos elementos pelo valor da composição, resultando nos valores encontrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Custo de revestimento contra incêndio de acordo com metodologia empregada

Perfil	Custo (R\$)				
	Cartas de Cobertura	ISO 834 - Simplificado	ISO 834 - Avançado	Curva Paramétrica - Simplificado	Curva Paramétrica - Avançado
Pórtico A					
W610X101	R\$ 4,047.06	R\$ 2,673.47	R\$ 2,673.47	R\$ 2,673.47	R\$ -
W610X155	R\$ 889.70	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ -
W360X79	R\$ 2,260.93	R\$ 1,431.68	R\$ 818.10	R\$ 1,636.20	R\$ 391.27
<i>Total</i>	R\$ 7,197.69	R\$ 4,731.84	R\$ 4,118.27	R\$ 4,936.37	R\$ 391.27
Pórtico B - Compartimento A					
W610X101	R\$ 4,047.06	R\$ 2,673.47	R\$ 3,597.59	R\$ 2,673.47	R\$ 2,673.47
W610X155	R\$ 889.70	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ 626.69
W360X79 - 3L	R\$ 1,130.46	R\$ 818.10	R\$ 818.10	R\$ 818.10	R\$ 195.63
W360X79 - 4L	R\$ 1,199.79	R\$ 868.28	R\$ 868.28	R\$ 868.28	R\$ 868.28
<i>Subtotal</i>	R\$ 7,267.02	R\$ 4,986.54	R\$ 5,910.66	R\$ 4,986.54	R\$ 4,364.07
<i>Total (2x)</i>	R\$ 14,534.04	R\$ 9,973.08	R\$ 11,821.33	R\$ 9,973.08	R\$ 8,728.15
Pórtico B - Compartimento B					
W610X101	R\$ 3,687.32	R\$ 2,435.83	R\$ 3,277.81	R\$ 3,277.81	R\$ 4,052.72
W610X155	R\$ 395.42	R\$ 278.53	R\$ 278.53	R\$ 3,841.79	R\$ 278.53
W360X79 - 3L	R\$ 565.23	R\$ 409.05	R\$ 409.05	R\$ 409.05	R\$ 409.05
W360X79 - 4L	R\$ 1,199.79	R\$ 868.28	R\$ 868.28	R\$ 1,026.83	R\$ 818.10
<i>Subtotal</i>	R\$ 5,847.77	R\$ 3,991.69	R\$ 4,833.66	R\$ 8,555.48	R\$ 5,558.40
<i>Total (3x)</i>	R\$ 17,543.32	R\$ 11,975.06	R\$ 14,500.99	R\$ 25,666.43	R\$ 16,675.20
Pórtico B - Compartimentos C e D					
W610X101	R\$ 4,047.06	R\$ 2,673.47	R\$ 3,597.59	R\$ 3,597.59	R\$ 3,852.75
W610X155	R\$ 889.70	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ 626.69	R\$ 626.69
W360X79 - 3L	R\$ 1,130.46	R\$ 818.10	R\$ 818.10	R\$ 818.10	R\$ 818.10
W360X79 - 4L	R\$ 1,199.79	R\$ 868.28	R\$ 868.28	R\$ 868.28	R\$ 868.28
<i>Subtotal</i>	R\$ 7,267.02	R\$ 4,986.54	R\$ 5,910.66	R\$ 5,910.66	R\$ 6,165.82
<i>Total (4x)</i>	R\$ 29,068.09	R\$ 19,946.17	R\$ 23,642.66	R\$ 23,642.66	R\$ 24,663.27
Pórtico C					
W610X101	R\$ 4,292.34	R\$ 1,976.75	R\$ -	R\$ 2,835.50	R\$ 2,835.50
W610X155	R\$ 620.09	R\$ 436.79	R\$ -	R\$ 436.79	R\$ 436.79
W360X79	R\$ 4,199.28	R\$ 1,453.42	R\$ 586.90	R\$ 2,863.35	R\$ 1,227.15
<i>Total</i>	R\$ 9,111.71	R\$ 3,866.95	R\$ 586.90	R\$ 6,135.64	R\$ 4,499.44
TOTAL GERAL	R\$ 68,343.15	R\$ 55,748.07	R\$ 59,508.68	R\$ 69,643.97	R\$ 54,862.70

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os custos encontrados variaram de R\$ 54.862,70 para o sistema de revestimento utilizando as curvas paramétricas através do método de cálculo avançado, até R\$ 69.643,97 para o mesmo sistema utilizando métodos simplificados de cálculo.

A estrutura metálica dimensionada possui peso equivalente a 198.033,90 kg. Considerando o valor do aço a R\$ 3,85/kg, segundo CYPE (2019), o custo estimado para a estrutura é de R\$ 762.430,52. Isto posto, o sistema de revestimento contra incêndio dimensionado através de cartas de cobertura equivale a 8,96% do custo da estrutura. Segundo o modelo que considera a curva ISO 834, o custo equivale a 7,31% para o modelo simplificado e 7,81% para o modelo avançado. Os modelos embasados nas curvas paramétricas variaram de 9,13% a 7,20% para os métodos simplificado e avançado, respectivamente.

Houve variação de 6,32% entre os métodos de cálculo que utilizaram a curva ISO 834, enquanto que os modelos que utilizaram curvas paramétricas variaram 21,22% entre si.

8 CONCLUSÕES

De forma a garantir a segurança das edificações em situação de incêndio, suas estruturas devem ser capazes de assegurar a estabilidade por um tempo mínimo, a fim de que seja possível a evacuação total de seus usuários. O presente estudo buscou analisar e comparar maneiras de se dimensionar estruturas de aço de modo a alcançar tal objetivo.

As análises de tempo de resistência ao fogo utilizando a curva de incêndio padrão ISO 834 alcançaram resultados diversos de acordo com a metodologia empregada. Para uma abordagem simplificada através da análise por elementos houve maior necessidade de proteção nos pórticos das extremidades do edifício, se comparado ao mesmo modelo utilizando metodologia avançada. Entretanto, o modelo avançado considerou maior necessidade de proteção para os pórticos intermediários, dada a consideração da reordenação dos esforços pela aplicação das cargas de incêndio na estrutura, visto que esta curva apresenta característica sempre ascendente. Em detrimento disto, o modelo avançado utilizando a curva ISO 834 se mostrou mais oneroso do que o simplificado utilizando a mesma curva.

Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos através das curvas paramétricas, há uma inversão nos resultados observados. Em detrimento das características dos compartimentos e da carga de incêndio, o modelo considera a ocorrência de um *flashover* súbito na edificação, o qual eleva a temperatura de quase todos os elementos analisados acima de suas temperaturas críticas. Assim, o modelo simplificado acaba por considerar a necessidade de proteção em todos estes, encarecendo o modelo e o tornando o mais oneroso dentre todos. Todavia, em diversos casos, a temperatura máxima destes perfis passa em pouco a crítica, seguida de um rápido resfriamento através da consideração dos diversos elementos ativos de proteção contra incêndio. Através do emprego do MEF utilizando a metodologia avançada, o rearranjo dos esforços e a redistribuição de temperatura acabou por reduzir a necessidade de proteção em alguns elementos, tornando este o modelo mais econômico dentre os estudados.

Os dimensionamentos de revestimento contra incêndio embasados nas cartas de cobertura apresentaram o segundo maior custo de proteção, distante apenas 1,9% do mais oneroso aqui estudado. Através desta análise, todos os elementos observados apresentaram necessidade de revestimento, o que se justifica pela aplicação de um único parâmetro, o qual leva em consideração a massividade dos perfis como critério para definição da proteção. Em vista disso, a aplicação deste método, apesar de bastante simplificado, tende a incorrer em custos desnecessários em grande parte dos casos.

É importante considerar que o presente estudo utiliza como base para aplicação das metodologias uma edificação em específico, com características inerentes a ela. Portanto, pesquisas subsequentes empregando edifícios diferentes podem apresentar resultados divergentes. Ainda, sugere-se como complemento a este estudo o aprofundamento nas diversas variáveis que compõem a construção das curvas paramétricas, visto que alterações nas aberturas, materiais, áreas e sistemas ativos de proteção contra incêndio impactam diretamente nos resultados observados.

Conclui-se por fim, através deste estudo, o impacto que as análises embasadas em curvas paramétricas têm no custo e na própria segurança da edificação, visto que este é o modelo que mais se aproxima das condições reais das edificações. Os modelos de análises por elementos podem ou não serem mais conservadores, dependendo completamente das características do ambiente analisado, com uma provável minimização de custos através do emprego de métodos avançados que consideram o rearranjo dos esforços, como observado através desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASFP – ASSOCIATION FOR SPECIALIST FIRE PROTECTION. **Fire Protection for structural steel in building**. Vol 2. 4ª ed. 2018. Disponível em: <http://asfp.associationhouse.org.uk/default.php?cmd=210&doc_category=119>. Acesso em: 20/07/2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860: Glossário de Termos Relacionados Com a Segurança Contra Incêndio**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008.
- BLESA, J. M. B. **Flashover: desarrollo y control**. 2002. Disponível em: <<http://www.olerdola.org/documentos/basset2.pdf>>. Acesso em: 15/07/2018.
- BRENTANO, T. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. 3. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- CADORIN, J-F. **Compartment Fire Models for Structural Engineering**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universite de Liege. Belgica. 2003
- CALDAS, R. B. **Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.
- CAMPOS, A. T. **Enquadramento da legislação de segurança contra incêndios em edifícios existentes no Porto: estudo de caso: propostas alternativas para adaptação às exigências regulamentares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Porto. Portugal. 2012.

CARVALHO, P. A. de O. **Análise comparativa de estrutura metálica em situação de incêndio: curva ISO 834 x curvas paramétricas**. Palmas, 2018.

CEN, European Committee for Standardisation. **EN 1991-1-2:2010**, Eurocode 1, Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire". ICS: 13.220.50; 91.010.30; 91.808.40. 2010a.

CEN, European Committee for Standardisation. **EN 1993-1-2:2010**, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design". ICS: 13.220.50; 91.010.30; 91.080.10. 2010b.

CENTRE OF FIRE STATISTICS (International Association of Fire and Rescue Services). **World Fire Statistics, Report nº 22, 2017**. Disponível em: <http://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report22_world_fire_statistics_2017.pdf>. Acesso em: 19/06/2018.

CKC. **Proteção Passiva e Soluções Inovadoras para Aumentar a Segurança Contra Incêndio**. Corpo de Bombeiros Militar – GO. 2013. 47 slides. Disponível em: <<https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2013/10/seguranca-contra-incendio.pdf>>. Acesso em: 29/07/2018.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU, 2006, São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Anais... São Paulo, 2006.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COUTO, C. **Resistência mecânica em situação de incêndio. Estabilidade de pórticos metálicos em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica e Mista) - Universidade de Coimbra, Coimbra. 2011.

CYPE. **Metálicas 3D**. Versão 2014. [S.l.]: Disponível em: <<http://metal3d.cype.pt/>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

CYPE. **Gerador de Preços**. Disponível em: <<http://www.brasil.geradordeprecos.info/>>. Acesso em: 02 mar. 2019.

DEL CARLO, U. **A segurança contra incêndio no Brasil**. In: SEITO, A. et al. A segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008a. p. 9-17.

FRANSSEN, J.-M. **SAFIR, A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire**. Engineering Journal, A.I.S.C., vol. 42, 2005. p. 143-158.

FRANSSEN, J-M; VILA REAL, P. **Fire Design of Steel Structures: Eurocode 1: Actions on structures; Part 1-2: General actions -- Actions on structures exposed to fire; ECCS – European Convention for Constructional Steelwork**. 2 ed. 2015.

GILL et al. **Aprendendo com os grandes incêndios**. In: SEITO, A. et al. A segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 19-33.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. ISO 834**. Geneva: ISO/TC, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **General terms and phenomena of fire. ISO 8421-1**. Geneva: ISO/TC, 1987

JUNIOR, A. L. M.; MOLINA, J. C. **Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão do NBR 5628:2001**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 4. 2012. p. 37-53.

JÚNIOR, O. K. **Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2011.

LOPES, N. et al. **Modelação numérica do comportamento ao fogo de uma estrutura em aço inoxidável em situação de incêndio**. In: actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista. 2005.

MACHI JÚNIOR, A. et al. **Segurança contra incêndio em Unidades Básicas de Saúde**. Journal of Human Growth and Development, v. 24, n. 1, p. 93-7, 2014.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais. 2000

MESQUITA, A. **Verificação da resistência de estruturas de aço ao fogo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Lisboa. Portugal. 2013.

MURARO, C. **Edifício Wilton Paes de Almeida: prédio que desabou em SP foi projetado na década de 1960 e era patrimônio histórico**. Fonte: G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/edificio-wilton-paes-de-almeida-predio-que-desabou-em-sp-foi-projetado-na-decada-de-1960-e-era-patrimonio-historico.ghtml>>. Acesso em: 01/07/2018.

ONO et al. **Arquitetura e Urbanismo**. In: SEITO, A. et al. A segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 123-134.

PANNINI, F. D. **Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio**. GERDAU. 4ª ed. 2007.

PANNONI, F. D. **Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio**. GERDAU. 6ª ed. 2015. Disponível em: <<http://www.skylightestruturas.com.br/downloads/manual-protecao-de-estruturas.pdf>>. Acesso em: 20/07/2018.

PLACO. **Guia Placo: soluções inovadoras em gesso**. Portugal, 2018. Disponível em: <<https://www.placo.pt/guia-placor>>. Acesso em: 04/03/2019.

REGOBELLO, Ronaldo. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio**. 2007. Tese de

Doutorado. Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

REIS, A. S. **Determinação de cenários de incêndio em edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Portugal. 2011.

SANTANA, M. L. A.; RODRIGUES, J. P. C.; COELHO, A. L. **A Segurança contra Incêndios nos Centros Históricos de Portugal e Brasil – Semelhanças e Dificuldades**. 2008.

SEITO, A. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, T. D. de A. e. **Buckling lengths of columns in unbraced steel frames exposed to fire**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Portugal. 2016.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

SILVA, V. P.; ONO, R. **Prevenção contra Incêndio no Projeto de Arquitetura**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010. 72p.

SILVA, V. P. **Estruturas em situação de incêndio; diferenças entre normas brasileira e europeia**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015.

SJÖSTRÖM, J. et al. **Thermal exposure to a steel column from localized fires**. SP Technical Research Institute of Sweden. 2012.

TAVARES, R. M. **Incêndios em ambientes fechados: uma análise da influência do fator ventilação no comportamento da pluma de fogo sob a visão da teoria do caos**. Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

UNIVERSITÉ DE LIÈGE. **SAFIR**. Urban & Environmental Engineering. S.d. Disponível em: <https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/en/safir>. Acesso em: 25/07/2018.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS / Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, Rio de Janeiro, 2003. 76 p.

VILA REAL, P. **As partes relativas à verificação da resistência ao fogo da nova geração dos Eurocódigos Estruturais**. Rio Grande do Sul: III CILASCI, 2015.

VILA REAL, P. **Incêndio em estruturas metálicas - cálculo estrutural**. 4. ed. Lisboa: Editora Orion, 2003.

VILA REAL, P.; FRANSSEN, J. M. **Elefir-EN V1.4.5**: Software for Fire Design of Steel Structural Members According the Eurocode 3. Disponível em <<http://elefiren.web.ua.pt/>>. 2011