PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE ELEMENTOS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELA NORMA NBR 14323:2013

ÁLVARO TEIXEIRA DE PAIVA

Brasília, 18 de dezembro de 2018

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

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE ELEMENTOS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELA NORMA NBR 14323:2013

ÁLVARO TEIXEIRA DE PAIVA

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA / DF

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

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE ELEMENTOS METÁLICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO PELA NORMA NBR 14323:2013

ÁLVARO TEIXEIRA DE PAIVA

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

APROVADA POR:

_____

LUCIANO MENDES BEZERRA, Ph.D (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

LUCIANO LINS VIEIRA Bel. (UNIP)
(CO-ORIENTADOR)

_____

WILLIAM TAYLOR MATIAS SILVA, Dr.Ing (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

GILBERTO GOMES, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 18 de dezembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

PAIVA, ÁLVARO TEIXEIRA DE

Análise da resistência de elementos metálicos em situação de incêndio pela Norma NBR 14323:2013 [Distrito Federal] 2018.

x, 96p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estruturas Metálicas 2. Modelos de Incêndio

3. Análise de Resistência 4. Aplicação em software

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PAIVA, Á.T. (2018). Análise da resistência de elementos metálicos em situação de incêndio pela Norma NBR 14323:2013. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Álvaro Teixeira de Paiva
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise da resistência de elementos metálicos em situação de incêndio pela Norma NBR 14323:2013
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

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

_____

Álvaro Teixeira de Paiva
Rua 13 Norte, Lote 04, Apartamento 802, Águas Claras – Norte
71909-720 – Brasília/DF – Brasil

RESUMO

Autor: Álvaro Teixeira de Paiva
Orientador: Luciano Mendes Bezerra

O fenômeno de incêndio vem sendo uma preocupação recorrente na construção civil no quesito de segurança da edificação e proteção à vida humana, de modo que há o crescente desenvolvimento de pesquisas e estudos relacionados à avaliação e verificação do comportamento térmico e estrutural de elementos estruturais e construtivos. O presente estudo apresenta a aplicação do conhecimento teórico e científico para a elaboração de modelos padronizados simplificados e consequente análise da elevação de temperatura e do desempenho estrutural de elementos metálicos sob situação de incêndio, baseando-se primordialmente nos procedimentos normativos propostos pelas normas NBR 14323:2013 e NBR 14432:2000. Em paralelo, há a construção de um programa em linguagem computacional para desenvolvimento das curvas de incêndio e a posterior avaliação das solicitações impostas aos elementos estruturais em decorrência da elevação da temperatura do aço durante o incêndio, do tempo de resistência ao fogo e do tempo de colapso estrutural da edificação, bem como a compreensão e discussão acerca da redistribuição dos esforços ocasionada pela exposição às chamas.

ABSTRACT

Author: Álvaro Teixeira de Paiva
Supervisor: Luciano Mendes Bezerra

Fire has been a recurrent concern in civil construction when it comes to edification safety and protection of human life, so that there is a rising development of studies and research associated with the evaluation of thermal and structural behavior in constructive and structural elements. This paper presents the application of scientific and theoretical knowledge for the construction of simplified standardized models and consequent analysis of temperature rise and structural behavior of metallic elements under fire conditions, primarily based on the normative procedures proposed by Brazilian Standards NBR 14323:2013 and NBR 14432:2000. In parallel, there is the development of a program in programmable language to build the natural and standard fire and the posterior evaluation of the imposed forces and bending to structural elements as a result of temperature rise during fire, the time for fire resistance and the time for structural failure, as well as the comprehension and discussion concerning the load redistribution caused by fire exposure.

SUMÁRIO

CAPÍTULO **PÁGINA**

1. INTRODUÇÃO 11
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 11
1.2. ESTADO DA ARTE 13
1.2.1. NORMA 14432:2000 15
1.2.2. NORMA 14323:2013 16
1.3. MOTIVAÇÃO 17
1.4. OBJETIVOS 18
1.5. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS 19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1. CARACTERÍSTICAS DO FENÔMENO DE INCÊNDIO 20
2.1.1. MODELO DE INCÊNDIO-PADRÃO 22
2.1.2. MODELO DE INCÊNDIO NATURAL 24
2.2. ESTRUTURAS DE AÇO EXPOSTAS AO INCÊNDIO 28
2.2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS 28
2.2.1.1. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E MÓDULO DE ELASTICIDADE 28
2.2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS 30
2.2.2.1. CALOR ESPECÍFICO 30
2.2.2.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA 31
2.2.2.3. ALONGAMENTO 32
2.2.3. FATOR DE MASSIVIDADE 33
2.3. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS 34
2.3.1. ELEMENTOS SEM REVESTIMENTO CONTRA FOGO 34
2.3.2. ELEMENTOS COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO 37
2.4. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO 39
2.4.1. BARRAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO 40
2.4.2. BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO 40
2.4.3. BARRAS SUBMETIDAS A MOMENTO FLETOR E FORÇA CORTANTE 41
2.4.4. COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS SOLICITANTES 43
2.4.5. TEMPERATURA CRÍTICA 44
2.5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO 45
3. MATERIAIS E MÉTODOS 49
3.1. PROGRAMAÇÃO EM VBA 49
3.1.1. PROGRAMAS PARA INCÊNDIO PADRÃO E NATURAL 50
3.2. MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO 54
3.2.1. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA METÁLICA 54
3.2.2. APLICAÇÃO DO FENÔMENO DE INCÊNDIO 60

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 61
4.1. ESTRUTURA SOB INCÊNDIO PADRÃO 63
4.2. ESTRUTURA SOB INCÊNDIO NATURAL 74
4.3. DISCUSSÕES FINAIS 79
5. CONCLUSÃO 81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83
ANEXO A 86
ANEXO B 87
APÊNDICE A 88
APÊNDICE B 89
APÊNDICE C 93
APÊNDICE D 94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ocorrências de incêndio em 2017 11
Figura 2.1 - Curva temperatura-tempo de gases para incêndio real 21
Figura 2.2 - Modelo de incêndio-padrão 23
Figura 2.3 – Curvas de incêndio natural para diferentes fatores de abertura 27
Figura 2.4 - Representação dos fatores de redução em função da temperatura do aço 29
Figura 2.5 - Calor específico do aço 30
Figura 2.6 - Condutividade térmica do aço 31
Figura 2.7 - Alongamento do aço 32
Figura 2.8- Curva temperatura-tempo do aço e dos gases para incêndio-padrão 36
Figura 2.9 – Curva temperatura-tempo para perfil sem revestimento 46
Figura 2.10 – Fluxograma para verificação em situação de incêndio 47
Figura 2.11 - Curva temperatura-tempo para perfil com revestimento 48
Figura 3.1 – Tela para determinação da curva de incêndio natural 51
Figura 3.2 – Linhas de programação para ramo de aquecimento do incêndio natural 53
Figura 3.3 – Planta da edificação 54
Figura 3.4 – Área de contribuição das lajes para vigas adjacentes 56
Figura 3.5 – Configuração dos perfis metálicos da estrutura 59
Figura 4.1 – Definição dos fatores de massividade para os pilares centrais (à esquerda) e para a viga (à direita) 62
Figura 4.2 – Incêndio padrão para o perfil HP 310 x 79,0 (pilares centrais) 63
Figura 4.3 – Incêndio padrão para o perfil W 310 x 44,5 (viga) 63
Figura 4.4 – Diagrama de momentos fletores após o colapso do compartimento 69
Figura 4.5 – Incêndio padrão para pilares centrais com proteção térmica 70
Figura 4.6 – Incêndio padrão para viga com proteção térmica 71
Figura 4.7 – Força axial para viga superior 72
Figura 4.8 – Momento fletor para viga superior 72
Figura 4.9 – Momento fletor para pilares centrais 73
Figura 4.10 – Força axial para pilares centrais 73
Figura 4.11 – Incêndio natural para o perfil HP 310 x 79,0 (pilares centrais) 75
Figura 4.12 – Incêndio natural para o perfil W 310 x 44,5 (viga) 75

Figura AP. 1 – Aba “Incêndio Padrão” 88
Figura AP. 2 – Aba “Base de dados” 88
Figura AP. 3 – Sub Valores_Gráfico (1/2) 89
Figura AP. 4 – Sub Valores_Gráfico (2/2) 89
Figura AP. 5 – Sub Curva_Incêndio (1/2) 90
Figura AP. 6 – Sub Curva_Incêndio (2/2) 90
Figura AP. 7 – Sub Apagar_Conteúdo 90
Figura AP. 8 – Sub Fator_Massividade 91
Figura AP. 9 – Sub Fator_Massividade (1/3) 91
Figura AP. 10 – Sub Fator_Massividade (2/3) 92
Figura AP. 11 – Sub Fator_Massividade (3/3) 92
Figura AP. 12 – Definição do tempo de incêndio 94
Figura AP. 13 – Seleção do perfil metálico e tipo de exposição ao fogo 95
Figura AP. 14 – Acionamento do programa 95
Figura AP. 15 – Resultados da execução do programa 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Número de óbitos por exposição ao fogo por região geográfica 12
Tabela 2.1 - Temperatura dos gases para incêndio-padrão 23
Tabela 2.2 - Valores de tempo limite em função da taxa de crescimento 26
Tabela 2.3 - Fatores de redução em função da temperatura do aço para aços laminados 29
Tabela 2.4 - Fator de massividade para elementos sem revestimento contra fogo 33
Tabela 2.5 - Fator de massividade para elementos com revestimento contra fogo 34
Tabela 2.6 - Temperatura do aço para incêndio-padrão e fator de massividade F 100 m^{-1} 36
Tabela 2.7 - Propriedades de materiais para proteção térmica 38
Tabela 2.8 - Temperatura do aço para incêndio-padrão com F igual a 210,53 m^{-1} 46
Tabela 2.9 - Temperatura do aço para incêndio-padrão para perfil com revestimento 48
Tabela 3.1 – Propriedades do aço MR250 55
Tabela 3.2 – Carregamentos atuantes nos pavimentos-tipo 55
Tabela 3.3 – Carregamentos atuantes na cobertura 56
Tabela 3.4 – Carregamento uniformemente distribuído nas vigas 57
Tabela 3.5 – Características das seções transversais 59
Tabela 4.1 – Fatores de massividade adotados para os perfis metálicos 62
Tabela 4.2 – Elevação de temperatura e fatores de redução em função do tempo para viga (à esquerda) e pilares centrais (à direita) 64
Tabela 4.3 – Comportamento estrutural da viga 65
Tabela 4.4 – Comportamento estrutural dos pilares centrais 65
Tabela 4.5 – Comportamento estrutural da viga adotando a temperatura crítica 67
Tabela 4.6 – Comportamento estrutural dos pilares centrais adotando a temperatura crítica 67
Tabela 4.7 – Comportamento estrutural da viga 215 68
Tabela 4.8 – Comportamento estrutural do pilar 03 68
Tabela 4.9 – Elevação de temperatura da viga (à esquerda) e dos pilares centrais (à direita) revestidos com argamassa de vermiculita 71
Tabela 4.10 - Elevação de temperatura e fatores de redução em função do tempo para viga (à esquerda) e pilares centrais (à direita) – Incêndio natural 76
Tabela 4.11 – Comportamento estrutural da viga – Incêndio natural 77
Tabela 4.12 – Comportamento estrutural dos pilares – Incêndio natural 77
Tabela 4.13 – Comportamento estrutural dos elementos após o colapso dos pilares centrais 79

Tabela A.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação 86
Tabela A.2 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto *..... 87
Tabela B.1 – Carta de Cobertura referencial..... 87

Tabela AP. 1 – Comportamento estrutural do pilar 03 antes da aplicação da temperatura crítica..... 93
Tabela AP. 2 – Comportamento estrutural da viga 215 antes da aplicação da temperatura crítica..... 93

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ef} – área efetiva da seção transversal do perfil metálico
A_f – área do piso do compartimento
A_g – área bruta da seção transversal do perfil metálico
A_v – a área total de aberturas verticais
A_t – a área total do compartimento ou superfície envolvente, incluindo paredes, teto, piso e aberturas
E – módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente h_{eq} é a média ponderada das alturas das aberturas de janelas, dada em metros (m);
H_i – potencial calorífico de cada componente *i* do material combustível
$N_{fi,Rd}$ – força axial resistente de cálculo
$N_{fi,Sd}$ – força axial solicitante de cálculo de tração ou compressão para a situação de incêndio
M_i – massa total de cada componente *i* do material combustível
M_{pl} – momento de plastificação da seção em temperatura ambiente
$M_{x,fi,Rd}$ – momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x em situação de incêndio
$M_{x,fi,Sd}$ – momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x para a situação de incêndio
M_y – momento fletor ao início do escoamento à temperatura ambiente
$M_{y,fi,Sd}$ – momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y para a situação de incêndio
$M_{y,fi,Rd}$ – momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y em situação de incêndio
O – fator de abertura
$R_{fi,d}$ – esforço resistente de cálculo do elemento estrutural isolado para determinado estado-limite último em situação de incêndio
$R_{fi,d,0}$ – esforço resistente de cálculo para a temperatura inicial de 20 ºC
$S_{fi,d}$ – esforço solicitante de cálculo para a situação de incêndio
W – módulo resistente elástico mínimo da seção bruta
$W_{c,ef}$ – módulo resistente elástico da seção transversal efetiva relacionado às fibras externas comprimidas
b – parâmetro atribuído às propriedades térmicas do compartimento
c – calor específico do material de vedação do compartimento
c_a – calor específico do aço
c_m – calor específico do material de revestimento
f_y – resistência ao escoamento do aço do perfil à temperatura ambiente
$k_{E,\theta}$ – fator de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente
k_{sh} – fator de correção para efeitos de sombreamento
$k_{y,\theta}$ – fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente
$k_{\sigma,\theta}$ – fator de redução para a resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local

l_a – comprimento da peça de aço a 20 °C
$q_{t,d}$ – carga de incêndio específica
t – instante de tempo ou tempo para modelo de incêndio natural
t_{lim} – tempo limite da fase de aquecimento do modelo de incêndio natural
t_m – espessura do material de revestimento
$t_{máx}$ – tempo máximo para incêndio natural
t* – tempo expandido para modelo de incêndio natural
$t^*_{máx}$ – tempo máximo expandido
u – perímetro exposto ao incêndio do perfil metálico
u_m – perímetro efetivo do material de revestimento
Δl_a – expansão térmica da peça de aço provocada pela temperatura
Γ – coeficiente de expansão
α_c – coeficiente de transferência de calor por convecção
χ_{fi} – fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio
χ_{dist} – fator de redução associado à flambagem distorcional da força resistente de compressão
ε_{res} é a emissividade resultante
$\gamma_{M,fi}$ é o fator de segurança parcial para as propriedades do material para a situação de incêndio
φ – valor do fluxo de calor por unidade de área
φ_c – componente do fluxo de calor devido à convecção
φ_r – componente do fluxo de calor devido à radiação
κ – fator de correção para distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal
$\lambda_{0,fi}$ – índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio
λ – índice de esbeltez da peça
λ_a – condutividade térmica do aço
λ_m – condutividade térmica do material de revestimento contra fogo
$\lambda_{p,fi}$ – índice de esbeltez correspondente à plastificação
$\lambda_{r,fi}$ – índice de esbeltez correspondente ao início do escoamento em situação de incêndio
θ_0 – temperatura inicial no tempo t = 0
θ_a – temperatura do aço
$\theta_{a,cr}$ – temperatura crítica do aço para o elemento metálico sob situação de incêndio
$\theta_{a,t}$ – temperatura do aço em dado instante t
θ_g – temperatura dos gases
$\theta_{g,t}$ – temperatura dos gases em dado instante t
$\theta_{máx}$ – temperatura máxima
ρ_a – massa específica do aço
ρ_m – massa específica do material de revestimento contra fogo

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo do fenômeno de incêndio em estruturas metálicas é crescente na construção civil brasileira, seja pelo aumento da utilização de tais estruturas no Brasil, como pela própria necessidade de avaliações mais expressivas do desempenho estrutural das edificações, com o intuito de garantir parâmetros intrínsecos à segurança da vida humana e ao patrimônio. Assim, os principais objetivos para o dimensionamento de elementos expostos às chamas são a evacuação dos usuários, a ação segura de operações de combate ao incêndio e a redução da ação térmica em edificações adjacentes.

De acordo com o Instituto Sprinkler Brasil, responsável por divulgar estatísticas anuais de incêndios, em 2017 foram contabilizadas 724 ocorrências de incêndio estruturais noticiadas pela imprensa (Figura 1.1), em que o maior número de notícias se referia a estabelecimentos comerciais, porém sem diferenciação quanto ao material predominante da estrutura. Quando comparado com as estatísticas da última aferição – 1349 incêndios em todo o Brasil – em 2015, o número de ocorrências é consideravelmente menor, possivelmente impulsionado por ações conjuntas de proteção térmica ativa e passiva.

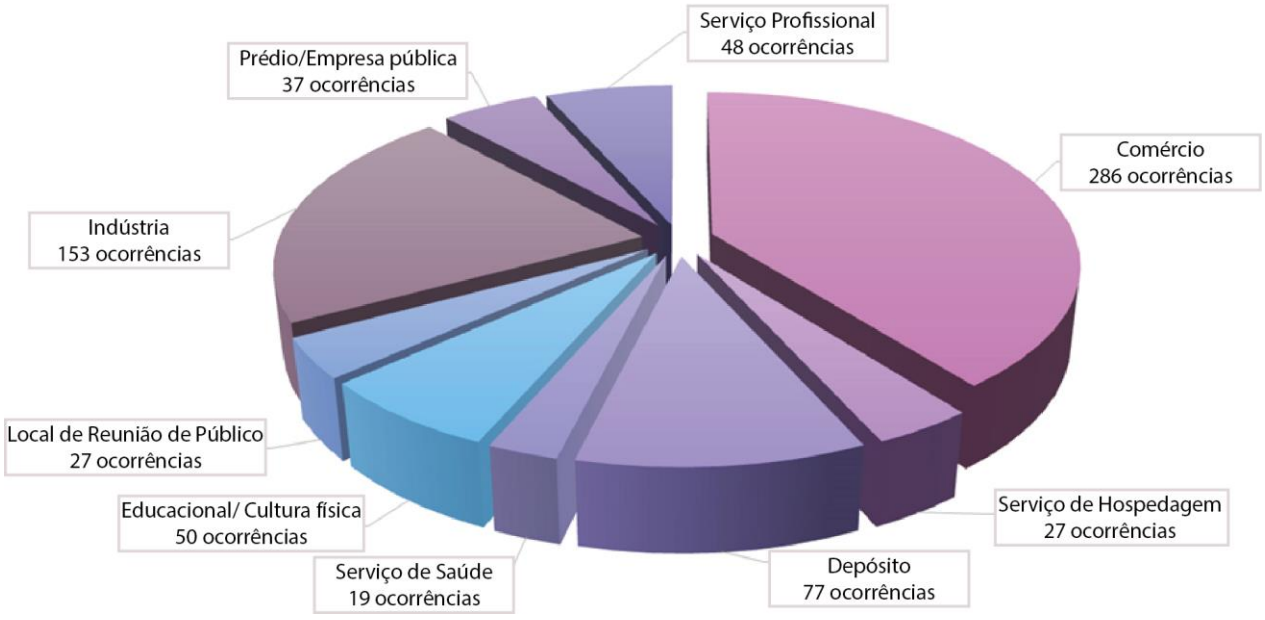


Figura 1.1 – Ocorrências de incêndio em 2017

Fonte: ISB (2017)

Mais além, um levantamento realizado por meio do Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM) e do DATASUS – Tecnologia de Informação a Serviço do Sistema Universal de Saúde – identificou o número de óbitos associados à exposição ao fogo em construções no período de 1996 a 2016, conforme representado na Tabela 1.1. A tabela indica um comportamento relativamente constante ao longo do período para incêndios não-controlados, com um pico em 2013, enquanto o número de óbitos por exposição a fogo controlado cresceu a partir de 2007.

Tabela 1.1 – Número de óbitos por exposição ao fogo por região geográfica

Óbitos por Causas Externas - Brasil											
Óbitos p/Ocorrênc por Categoria CID10 e Ano do Óbito											
Período:1996-2016											
Categoria CID10	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
X00 - Exposição a fogo não-controlado em um edifício ou outro tipo de construção	65	73	59	61	65	54	49	61	76	70	103
X02 - Exposição a fogo controlado em um edifício ou outro tipo de construção	5	4	5	6	10	14	9	5	8	9	7

Categoria CID10	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
X00 - Exposição a fogo não-controlado em um edifício ou outro tipo de construção	97	73	51	75	100	53	335	89	58	76	1743
X02 - Exposição a fogo controlado em um edifício ou outro tipo de construção	24	22	23	18	7	24	14	24	23	21	282

Fonte: MS/SVS/CGIAE - Sistema de Informações sobre Mortalidade – SIM

Por mais que a média anual de óbitos seja próxima a 100 e significativamente pequena quando comparada ao número de ocorrências, as informações confirmam a constante necessidade de aprimorar as características das edificações para garantia da estabilidade estrutural e proteção da vida humana. Também é possível ressaltar que apesar de não eliminar completamente o risco de incêndio, o dimensionamento adequado do edifício e a existência de medidas de proteção contra incêndio são imprescindíveis para a diminuição de tal risco.

Logo, os dados apresentados evidenciam a importância deste projeto em avaliar a resistência dos elementos metálicos quando sob situação de incêndio, identificando em conjunto as temperaturas críticas a serem atingidas pelos elementos e o seu tempo de resistência ao fogo. Mais ainda, o presente projeto busca se tornar uma contribuição à análise de elementos estruturais metálicos para os modelos simplificados de incêndio.

1.2. ESTADO DA ARTE

O fenômeno de incêndio comumente representa um risco à vida humana e ao patrimônio do ser humano, de modo que a preocupação com a segurança para casos de incêndio não é algo recente e as exigências e medidas de proteção tornaram-se cada vez mais recorrentes no contexto nacional e mundial. KIRCHHOF (2004) discursa sobre o início das exigências de proteção contra incêndio por volta de 1666, pela ocorrência de um grande incêndio na cidade de Londres, porém com o surgimento das primeiras normas para testes de resistência ao fogo somente em 1911, quando a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) instituiu a norma "*Standard tests for fireproof constructions*". Em 1932, a *British Standard Institution* acabou por publicar a norma BS 476, denominada "*Fire tests on buildings materials and structures*", baseando-se em ensaios de elementos isolados em fornos e ainda utilizada atualmente com as devidas revisões e ampliações (RIGOBELLO, 2007).

Conforme KIMURA (2009), em 1975 a *International Organization for Standartization* (ISO) estabeleceu uma norma internacional para padronização da metodologia de ensaio de resistência em situação de incêndio, sendo a primeira versão da ISO 834:1975, intitulada "*Fire resistance tests, elements of building construction*". Tal norma é considerada referência para diversos estudos de dimensionamento e para a própria norma brasileira de projeto de elementos estruturais de aço e mistos de edifícios em situação de incêndio, a NBR 14323:2013. A ISO 834:1975 passou então por revisões e substituições, de modo que a norma vigente é a ISO 834:2014.

Já no âmbito nacional, KIRCHHOF (2004) cita que os regulamentos como Código do Corpo de Bombeiros e Código de Obras Civis eram adaptados de seguradoras americanas até o ano de 1970, quando em 1980 foi instaurada a norma brasileira NBR 5627, denominada "Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo". Apesar do aparente avanço, tal norma foi cancelada em 2001 por apresentar exigências mínimas de cobrimento e dimensões que inviabilizavam economicamente a utilização do aço na construção civil.

Em conformidade com a busca pela segurança em situação de incêndio para elementos metálicos, em 1999 foi apresentada a norma brasileira sobre incêndio NBR 14323, intitulada "Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio". A norma abordava o dimensionamento de elementos metálicos e elementos mistos de aço e concreto,

bem como a variação de propriedades mecânicas e térmicas do aço com o aumento da temperatura e o cálculo de elevação da temperatura do aço, sendo então revisada e substituída pela edição de 2013. RIGOBELLO (2007) aponta que após a publicação da NBR 14323:1999, identificou-se a necessidade de criação de uma norma para a determinação da ação térmica em edifícios, publicando-se em 2000 a NBR 14432, denominada "Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações", em que ambas serão explicitadas ainda nesta seção.

Todavia, é importante evidenciar que as exigências de algumas normas para a resistência ao fogo de elementos estruturais de aço e mistos em situação de incêndio ainda são definidas a partir de métodos de dimensionamento para elementos estruturais isolados, desconsiderando-se a interação entre os elementos e tornando projetos antieconômicos para a aplicação da construção em aço. KIRCHHOF (2004) e RIGOBELLO (2007) expõem o atual desenvolvimento de procedimentos mais racionais e econômicos para o dimensionamento em situação de incêndio, fundamentando-se em estudos e ensaios mais realísticos para a análise do comportamento de estruturas de aço e mistas quando sob situação de incêndio.

SILVA (1997) avaliou em sua tese o comportamento de estruturas de aço submetidas a altas temperaturas, apresentando curvas de temperatura-tempo dos gases quentes envolvidos no incêndio e elaborando um método simplificado de dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio a partir de adaptações de normas internacionais.

NUNES (2005) desenvolveu um código computacional baseado no método dos elementos finitos para a análise térmica de vigas metálicas em perfil I sob situações diversas de incêndio natural. O estudo constatou que o cálculo do momento nominal, considerando-se a possibilidade do aquecimento desigual das mesas do perfil e a assimetria de rigidez das mesas, retorna valores significativamente maiores que os valores recomendados pela norma brasileira (em que se assume distribuição uniforme da temperatura).

RIGOBELLO (2007) apresenta uma análise numérica da elevação de temperatura para seções transversais de elementos estruturais de aço, mistos de aço e concreto e em caráter complementar, de madeira. Ainda que os modelos simplificados de cálculo presentes na NBR 14323:1999 retornassem resultados satisfatórios quando comparados ao modelo numérico para casos normativos, o estudo afirma a necessidade de empregar um modelo avançado de cálculo para os casos não-normativos estudados.

CAMPÊLO (2008) realizou um estudo numérico e analítico para determinação da carga crítica nominal em vigas de aço em perfil I com carga concentrada em situações de incêndio natural. De maneira similar a NUNES (2005), também houve a consideração do aquecimento desigual das mesas do perfil e a consequente assimetria da rigidez das mesmas, retornando cargas críticas nominais maiores que as previstas pela norma brasileira.

CALDAS (2008) desenvolveu modelos numéricos não-lineares para análises térmicas e mecânicas de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio, baseando-se no método das diferenças finitas e elementos finitos para a análise da transferência de calor e validando os modelos por comparações com resultados numéricos e experimentais da literatura.

KIMURA (2009) avaliou numericamente o comportamento de pilares de aço sob situação de incêndio para determinadas condições de compartimentação do ambiente. As análises térmicas e estruturais dos elementos foram comparadas com os procedimentos normativos da norma NBR 14323:1999, de modo que as disposições da norma não conduzem ao real valor de temperatura e ao real comportamento estrutural para as situações estudadas em que há distribuição não-uniforme da temperatura.

VIEIRA et al. (2016) efetuaram um estudo comparativo entre os procedimentos normativos da NBR 14323:1999 e a versão atualizada da NBR 14323:2013 para a resistência de elementos de aço sob situação de incêndio. Os resultados apresentados indicam que o método simplificado exposto na norma mais recente é menos conservador, fato verificado pela utilização do fator de sombreamento para o acréscimo da temperatura do aço.

MELO (2017) realizou a modelagem de vigas de aço em perfil I para o cálculo do momento crítico que causa flambagem local por torção nas vigas sob situação de incêndio natural. Utilizando um programa de elementos finitos, as vigas foram sujeitas a diversos carregamentos em múltiplas situações de incêndio e como resultado, foram elaborados mapas de temperatura ao longo dos perfis e o cálculo dos momentos críticos, estes então comparados com os valores obtidos pelo procedimento proposto na norma brasileira.

1.2.1. NORMA 14432:2000

A norma NBR 14432:2000 é responsável por atribuir condições para elementos estruturais e de compartimentação em situação de incêndio para evitar o colapso estrutural da edificação. Para tanto, os critérios presentes na norma para a resistência ao fogo de elementos construtivos são

baseados no modelo de incêndio-padrão, indicando o importante conceito de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), dado como "o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão" (NBR 14432:2000). O objetivo da utilização de um tempo de referência fundamenta-se em definir um período em que se permite a evacuação segura dos usuários, bem como o combate ao incêndio e a diminuição dos impactos associados à ação térmica nas edificações adjacentes.

Além disso, a norma estabelece a consideração da severidade e do potencial destrutivo dos incêndios para a definição do TRRF preconizado pela norma, sendo estes vinculados a aspectos como: tipo de uso e ocupação, área, altura da edificação, profundidade do subsolo, facilidade de acesso para combate ao incêndio, entre outros. Os anexos presentes na norma referem-se à tabela dos TRRF, à classificação das edificações quanto a sua ocupação e às cargas de incêndio específicas – determinadas como a divisão do valor da carga de incêndio pela área do piso considerado. Ainda que para o incêndio-padrão não seja considerada a carga de incêndio, a mesma é importante para o modelo de incêndio natural simplificado. Desse modo, o Anexo A deste estudo apresenta as tabelas referentes à determinação do TRRF para diversas edificações.

1.2.2. NORMA 14323:2013

A norma NBR 14323:2013 teve sua primeira versão em 1999, sendo tecnicamente revisada e substituída pela atual edição de 2013. O escopo da norma refere-se ao estabelecimento dos requisitos para o projeto e dimensionamento de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio com base no método dos estados-limites. É válido ressaltar que para os projetos em situação de incêndio há somente a verificação dos estados-limites últimos aplicáveis a altas temperaturas, não havendo a necessidade de verificação dos estados-limites de serviço. Mais além, os métodos simplificados da norma limitam-se ao dimensionamento de estruturas sob incêndio pela análise de elementos isolados e assumindo-se uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal da barra.

O documento apresenta os fatores de redução da resistência ao escoamento do aço e do módulo de elasticidade do aço. Em seguida, a norma discursa sobre as combinações de ações para determinação dos estados-limites últimos, recorrendo em seguida ao cálculo dos esforços solicitantes e esforços resistentes contidos na NBR 8800:2008 de dimensionamento de estruturas de aço e aplicando-se os devidos fatores de redução para solicitações de compressão, tração e momento fletor. Finalmente, a norma também apresenta a metodologia de cálculo para

a elevação da temperatura do aço, os fatores de massividade comuns para a maioria dos elementos estruturais e o dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto.

1.3. MOTIVAÇÃO

O estudo de carregamentos e solicitações de elementos estruturais na engenharia civil já é, por si só, intrínseco ao bom dimensionamento dos elementos estruturais e às condições de estabilidade e previsão de ruptura em construções. É fato conhecido que qualquer estrutura é dimensionada levando-se em consideração a sua projeção de vida útil – aqui incluída a devida manutenção estrutural, os estados limites de desempenho, compatíveis com o material a ser utilizado – e a sua segurança. Entende-se então por segurança estrutural o atendimento simultâneo das seguintes condições (TEATINI, 2016):

- As características originais de projeto são mantidas durante a sua vida útil, a um custo razoável de execução e manutenção;
- Em condições normais de utilização, não apresenta aparência que cause inquietação aos usuários ou ao público em geral, nem falsos sinais de alarme que lancem suspeitas sobre sua segurança;
- Sob utilização indevida, deve apresentar sinais visíveis de aviso de eventuais estados de perigo.

A partir de tais condições, é visível que o conceito de segurança plena ao colapso ou à ruptura inexiste no campo de engenharia estrutural, tendo para um determinado projeto uma probabilidade pré-fixada de colapso, compatível com a natureza da edificação, e a definição de uma ruptura segura, ou seja, que apresente sinais e avisos prévios de ruptura.

Portanto, com a evolução da concepção de segurança e de seus requisitos, o surgimento da verificação de elementos estruturais em situações de incêndio como novo objeto de estudo é imprescindível no quesito de segurança, haja vista que o fenômeno de incêndio é uma preocupação recorrente em edificações e impacta significativamente na segurança das pessoas. Ao analisar o comportamento de elementos estruturais em situações de incêndio, verifica-se que o aço (assim como outros materiais de construção) apresenta a degradação de suas propriedades mecânicas conforme a elevação de temperatura, reduzindo o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento. Logo, a principal preocupação – e também um dos principais parâmetros de cálculo – refere-se ao tempo mínimo para o qual a edificação ainda

não sofreu o esgotamento de sua capacidade resistente e o qual permite a evacuação adequada das pessoas da edificação, além de permitir a ação segura de operações de combate ao incêndio.

No que tange ao estudo de incêndio no Brasil, a criação da NBR 14323:2013 foi um marco para avaliação de elementos em barra quando submetidos a elevações de temperatura. Ainda assim, a norma brasileira possui limitações que podem não representar da maneira mais fiel o comportamento da estrutura exposta ao fogo, como o fato de que os métodos simplificados dispostos na norma são aplicáveis para elementos estruturais isolados. Portanto, a análise de elementos isolados pode não ser suficiente para averiguação do desempenho estrutural e estabilidade de edificações.

Durante a elaboração deste estudo, um caso de colapso de uma edificação devido a incêndio obteve repercussão nacional. O edifício Wilton Paes de Almeida, projetado em 1961 na cidade de São Paulo, encontrava-se em condições irregulares de manutenção quando houve o incêndio na madrugada do dia 1º de maio de 2018 e a estrutura metálica com lajes de concreto colapsou (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; acessado em 05/05/2018; FIALHO, 2007). Diante de tal caso, verifica-se a importância de uma avaliação mais profunda da manutenção adequada do prédio, bem como a própria verificação de quesitos relacionados à segurança de edificações contra incêndio, como tempo de evacuação e ação dos bombeiros, revestimento de materiais contra fogo e as cargas de incêndio presentes.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo geral do projeto é analisar a resistência de elementos metálicos quando expostos às chamas a partir dos procedimentos normativos descritos na norma NBR 14323:2013. Além disso, é possível elencar os seguintes objetivos específicos deste trabalho:

- Elaboração do programa em VBA para determinação da elevação da temperatura do aço para os modelos de incêndio padrão e natural;
- Simulação da situação de incêndio padrão e natural para uma estrutura metálica através do *software SAP2000*;
- Analisar a resistência dos elementos estruturais quando sob situação de incêndio, bem como a redistribuição de esforços decorrente da elevação da temperatura e do colapso dos elementos;
- Avaliar a evolução da temperatura do aço para os modelos de incêndio estudados, buscando a compreensão acerca da influência dos parâmetros de projeto, das características dos perfis metálicos e das propriedades mecânicas e térmicas do aço.

1.5. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente capítulo esclarece o interesse e a importância de estudo de elementos estruturais em situação de incêndio, bem como os objetivos a serem alcançados ao final do projeto. O capítulo também faz referência ao estado da arte sobre o assunto, abordando o início e a evolução dos estudos de incêndio, e seções específicas para as normas brasileiras aplicadas ao trabalho desenvolvido: a norma atualizada para projeto de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio, a NBR 14323:2013, e a norma que prevê a compartimentação dos ambientes para determinação do TRRF, a NBR 14432:2000.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, abordando as características do fenômeno de incêndio e o comportamento das estruturas metálicas quando expostas ao fogo. Mais além, o capítulo apresenta a determinação da elevação da temperatura do aço de perfis metálicos para elementos estruturais com ou sem revestimento contra fogo e as verificações de esforços resistentes e temperatura crítica para os elementos metálicos.

O Capítulo 3 traz o detalhamento dos materiais e das metodologias adotadas no trabalho para o desenvolvimento dos objetivos, identificando a etapa de elaboração dos programas para construção das curvas de incêndio, bem como o dimensionamento da estrutura em temperatura ambiente e a simulação de incêndio no programa *SAP2000*. Ademais, apresenta a estrutura metálica a ser analisada para a avaliação do comportamento dos elementos metálicos sob situação de incêndio natural e padrão.

O Capítulo 4 refere-se aos resultados obtidos para os incêndios simulados na edificação adotada no estudo. Além de efetuar a análise do comportamento térmico e estrutural dos elementos metálicos em situação de incêndio, aborda as principais considerações e comparações entre os modelos de incêndio.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do projeto, abordando os conhecimentos e análises obtidos a partir do estudo de estruturas expostas às chamas, além de propor modificações ao trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

Ao final do projeto encontram-se as referências bibliográficas, bem como os apêndices e anexos. Ademais, há a mídia externa contendo o programa desenvolvido em VBA para construção das curvas de incêndio padrão e natural.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CARACTERÍSTICAS DO FENÔMENO DE INCÊNDIO

Inicialmente, é importante conceituar incêndio e explicitar os componentes para sua existência, bem como a dinâmica do incêndio e os principais fatores que a influenciam. O incêndio é definido como a ocorrência de um processo de combustão em um ambiente que não está preparado ou não idealizado para tal processo (CAMPÊLO, 2008). A reação química de combustão envolve a oxidação da substância combustível em aquecimento pelo agente oxidante (comumente o próprio oxigênio do ar), em que há a emissão de calor, luz, fumaça e outros gases combustíveis, contribuindo para a expansão do incêndio. Além disso, define-se como tetraedro de fogo os quatro componentes necessários para a sua ocorrência: o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. É válido ressaltar a importância desta última para a existência do fogo, dado que através da reação em cadeia a liberação contínua de calor e gases combustíveis permite a continuidade do processo de combustão.

A ação térmica do incêndio em uma estrutura é atribuída ao fluxo de calor provocado pela diferença de temperatura entre os gases quentes e os elementos da estrutura, em que tal fluxo de calor ocorre primordialmente pelos mecanismos de transferência de convecção e radiação. A transferência de calor por convecção é dada entre um sólido e um fluido em movimento nas adjacências deste sólido (RIGOBELLO, 2007), onde para o caso de incêndio tem-se o aquecimento do ar, tornando-o menos denso e tendendo a subir. Ao subir, as moléculas do ar aquecido podem se chocar com os elementos estruturais e transferir calor para a superfície dos mesmos. A radiação se refere à transferência de calor pela emissão de ondas eletromagnéticas de um corpo com maior temperatura para um corpo com menor temperatura, no devido caso, dos gases quentes para os elementos estruturais.

A dinâmica do incêndio refere-se ao comportamento do mesmo quanto à sua propagação em um ambiente (CAMPÊLO, 2008), possuindo três regiões distintas definidas na curva de incêndio real segundo VARGAS e SILVA (2005), representada na Figura 2.1. A região inicial é dada como a fase de ignição do combustível, em que as temperaturas do ambiente permanecem baixas e a influência sobre a edificação é apenas local, não representando, portanto, risco à estrutura. Apesar disso, RIGOBELLO (2011) afirma que tal fase é a mais crítica do ponto de vista da segurança à vida humana, pela produção de gases tóxicos durante o período.

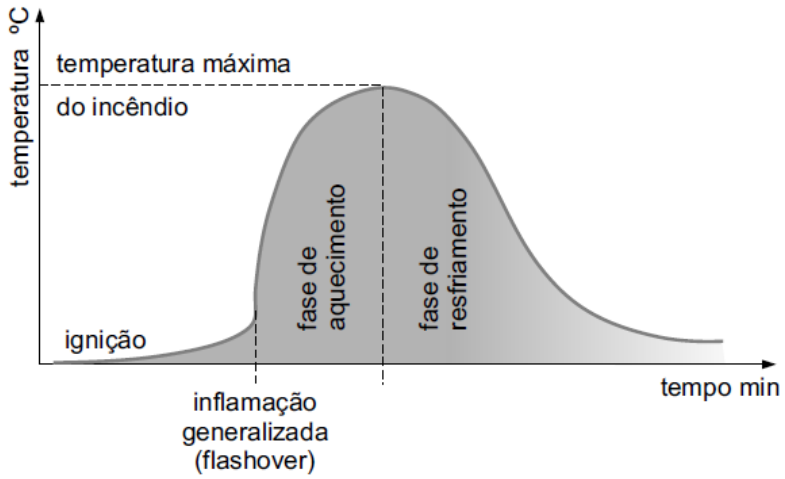


Figura 2.1 - Curva temperatura-tempo de gases para incêndio real

Fonte: (VARGAS; SILVA, 2005)

A segunda região é dada pela fase de aquecimento acelerado dos gases, em que o instante da variação brusca de inclinação da curva de incêndio é chamado de *flashover* ou instante de inflamação generalizada. Nesse ponto, a superfície de toda carga combustível presente no ambiente entra em ignição e, a partir desse instante, o incêndio alcança grandes proporções e a temperatura dos gases eleva-se rapidamente até todo o material combustível extinguir-se (SILVA, 2001). Aqui é importante a apresentação do conceito de carga de incêndio, dado pela NBR 14432:2000 como a "soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos de paredes, divisórias, pisos e tetos". Assim, a carga de incêndio está estritamente associada com a quantidade de material combustível num ambiente, influenciando não somente na temperatura máxima atingida pelo incêndio, como também em sua duração. A terceira região é enfim o resfriamento do ambiente pela redução gradativa da temperatura dos gases, seja pela falta de carga combustível, seja pela falta de oxigênio no compartimento.

O próprio fenômeno de incêndio apresenta variações quanto ao seu comportamento de expansão, ascensão de temperatura e extinção, sendo intrinsecamente dependente de diversos fatores também variáveis conforme o tipo de edificação, seu uso, localização, etc. Assim, é possível citar como principais fatores que podem influenciar no incêndio e na curva de incêndio real as aberturas do ambiente, carga de incêndio, grau de ventilação, tamanho do compartimento, tipo de combustível predominante, proteção térmica e a densidade e distribuição dos combustíveis.

SILVA (2001) aponta a não necessidade de verificações adicionais na estrutura quando a edificação lança mão de dispositivos e medidas de proteção contra incêndio – detectores de calor e fumaça, chuveiros automáticos, brigada de incêndio, entre outros – eficientes para extinguir o fogo na etapa inicial de ignição. Para o caso de as medidas de proteção não serem capazes de extinguir o incêndio, é fundamental a verificação do efeito térmico nos elementos estruturais para a segurança da edificação. Para tanto, convencionou-se o uso de modelos de curvas de incêndio padronizadas, haja vista a alta variabilidade e difícil determinação da curva de incêndio real conforme os fatores citados no parágrafo anterior.

Os modelos simplificados de curvas de incêndio adotados no presente estudo são o modelo de incêndio-padrão e o modelo de incêndio natural, em que ambos acabam por não representar a fase de ignição do incêndio (também chamada de *pré-flashover*), pelo fato das temperaturas não atingirem níveis que afetem a capacidade da estrutura (KIMURA, 2009) e a influência é apenas local. Os modelos simplificados normalmente requerem poucas informações na entrada de dados e há a suposição de que a temperatura dos gases de um compartimento é dada como uniforme (RIGOBELLO, 2011), sendo explicitados nos tópicos a seguir.

2.1.1. MODELO DE INCÊNDIO-PADRÃO

Considera-se incêndio-padrão aquele em que se admite que as temperaturas dos gases respeitam as curvas padronizadas para ensaio (SILVA, 2001). A curva de incêndio-padrão é caracterizada por um único ramo ascendente, admitindo-se o crescimento contínuo da temperatura dos gases ao longo do tempo e a independência da temperatura em relação à carga de incêndio ou a outras características do compartimento.

Portanto, ainda que não represente uma curva de incêndio real, as curvas de incêndio-padrão podem ser empregadas para o fornecimento de parâmetros de projeto. Um exemplo é o método simplificado de dimensionamento para estruturas de aço disposto na norma brasileira NBR 14323:2013, em que a elaboração da curva de incêndio-padrão é baseada na curva padronizada presente na ISO 834. A representação da curva de incêndio-padrão é dada pela Figura 2.2, enquanto a elevação de temperatura dos gases é dada pela equação (2.1) abaixo.

$$\theta_g = \theta_0 + 345\log_{10}(8t + 1) \tag{2.1}$$

onde:

θ_g é a temperatura em graus Celsius dos gases para dado instante t (°C);

θ_0 é a temperatura ambiente inicial (aceita como 20° C);

t é o tempo decorrido em minutos (min).

A Tabela 2.1 abaixo apresenta alguns valores para a temperatura dos gases obtidos a partir da equação anterior, bem como a Figura 2.2 representa o modelo padronizado para o incêndio.

Tabela 2.1 - Temperatura dos gases para incêndio-padrão

Tempo (min)	Temperatura (ºC)	Tempo (min)	Temperatura (ºC)
0	20	50	918
5	576	60	945
10	678	70	968
15	739	80	988
20	781	90	1006
25	815	100	1022
30	842	110	1036
35	865	120	1049
40	885	240	1153
45	902	480	1257

É importante observar que o modelo de incêndio-padrão apresentado na curva temperatura-tempo dos gases não representa a fase de ignição de um incêndio, conforme explicitado na seção anterior. Pelo fato da etapa inicial não atingir temperaturas que afetem a integridade da estrutura, aliado à maior facilidade de controle do incêndio em tal etapa pelas medidas e dispositivos de proteção contra incêndio, a fase de *pré-flashover* não é definida como crítica para o dimensionamento e projeto de estruturas em situação de incêndio.

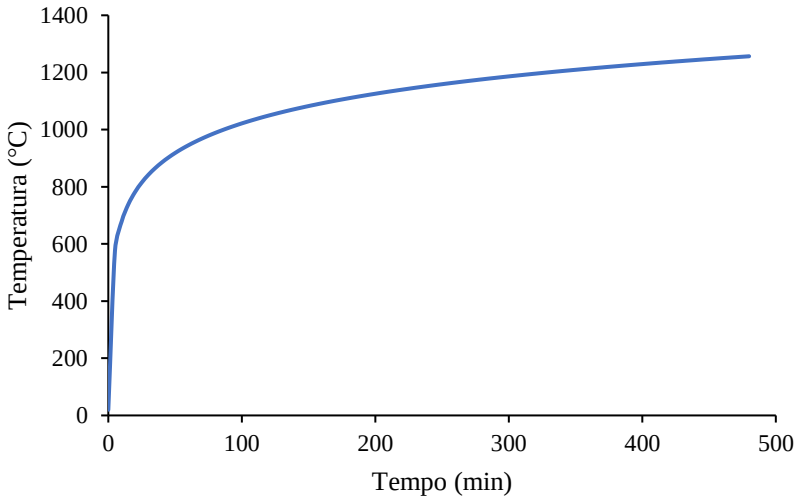


Figura 2.2 - Modelo de incêndio-padrão

2.1.2. MODELO DE INCÊNDIO NATURAL

O incêndio natural é definido a partir das curvas de temperatura-tempo naturais dos gases, elaboradas conforme modelos matemáticos obtidos em ensaios pela simulação de situações reais de incêndio. Os ensaios envolvem a ocorrência de um incêndio em compartimentos com aberturas, mas de modo que não haja possibilidade de propagação do incêndio para o lado externo, por efeito das características de estanqueidade, de isolamento térmico e resistência dos elementos de vedação. Diferentemente do modelo de incêndio-padrão, o modelo de incêndio natural apresenta um ramo ascendente, representando a fase de aquecimento dos gases, e um ramo descendente, representando a fase de resfriamento. Logo, tal modelo é mais próximo da situação real de incêndio e pode ser caracterizado pelos parâmetros de carga de incêndio, grau de ventilação e o tipo de vedação e suas características térmicas.

Ainda que normas como a NBR 14432:2000 apresentem tabelas e cálculos para a carga de incêndio específica, as normas brasileiras não preconizam a determinação das curvas parametrizadas de incêndio natural para elaboração de projetos. Portanto, o presente trabalho aborda sucintamente a obtenção de curvas parametrizadas contidas em CEN EN 1991-1-2:2005, a norma europeia para ações em estruturas expostas ao incêndio. A curva temperatura-tempo prescrita pelas equações a seguir somente são válidas para incêndios em compartimentos de até 500 m² de área em planta, sem aberturas no teto e com pé-direito máximo de 4 m. Além disso, assume-se que toda a carga de incêndio do compartimento é consumida.

Pelo fato de possuir dois ramos distintos, a temperatura dos gases para a etapa de aquecimento é dada pela equação (2.2):

$$\theta_g = 20 + 1.325\left(1 - 0{,}324e^{-2t^*} - 0{,}204e^{-1{,}7t^*} - 0{,}472e^{-19t^*}\right) \qquad (2.2)$$

onde:

θ_g é a temperatura em graus Celsius dos gases para dado instante t (°C).

O tempo t^* é o tempo expandido dado pela multiplicação entre o tempo t em horas (h) e o coeficiente de expansão Γ. Em seguida, tem-se que o coeficiente de expansão é dado pela equação (2.3) a seguir:

$$\Gamma = \left(\frac{O/_{0,04}}{b/_{1.160}}\right)^2 \qquad (2.3)$$

Tem-se que *O* é o fator de abertura, um parâmetro para consideração de aberturas e ventilação em paredes verticais. Para aplicação no Eurocode, o parâmetro deve possuir limites mínimo e máximo de 0,02 e 0,20, respectivamente, de modo que quanto maior o valor de *O*, maior o grau de ventilação do compartimento. O fator de abertura pode ser calculado conforme a equação a seguir:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \tag{2.4}$$

onde:

A_v é a área total de aberturas verticais, expressa em metros quadrados (m²);

h_{eq} é a média ponderada das alturas das aberturas de janelas, dada em metros (m);

A_t é a área total do compartimento ou superfície envolvente, incluindo paredes, teto, piso e aberturas, expressa em metros quadrados (m²).

O parâmetro *b* da equação (2.3) é atribuído às propriedades térmicas do compartimento. FRANSSEN e REAL (2010) afirmam que o parâmetro está associado a facilidade ou não da vedação do compartimento (paredes, teto e pavimento) em absorver parte da energia liberada pelo incêndio, sendo que o valor do fator *b* deve estar entre 100 e 2200 J/m²s$^{1/2}$K. Logo, a equação (2.5) abaixo é aplicável para locais em que as paredes são feitas de um único material:

$$b = \sqrt{c \rho_m \lambda_m} \tag{2.5}$$

onde:

c é o calor específico do material de vedação do compartimento, expresso em joules por quilograma por graus Kelvin (J/kgK);

ρ_m é a massa específica do material de vedação, dada em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

λ_m é a condutividade térmica do material de vedação, expressa em watts por metro por graus Kelvin (W/mK).

O próximo passo é determinar a temperatura máxima $\theta_{máx}$ para a fase de aquecimento, que ocorre ao final do tempo de duração da etapa de aquecimento da curva temperatura-tempo, indicado para quando $t^* = t^*_{máx}$ e pelas seguintes expressões:

$$t^*_{máx} = t_{máx}\, \Gamma \tag{2.6}$$

$$t_{máx} = \max\left[\left(0{,}2 \times 10^{-3} \times q_{t,d}/O\right); t_{lim}\right] \tag{2.7}$$

onde $q_{t,d}$ é a carga de incêndio específica, expressa em megajoules por metro quadrado (MJ/m²) para a área A_t do material de vedação (em m²), ao passo que t_{lim} refere-se ao tempo limite da fase de aquecimento em horas (h), dependente da velocidade de propagação do incêndio em determinado compartimento e associado ao seu tipo de ocupação. A carga de incêndio específica pode ser calculada pela equação descrita na NBR 14432:2000:

$$q_{t,d} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \tag{2.8}$$

onde:

M_i é a massa total de cada componente *i* do material combustível, expresso em quilogramas (kg);

H_i é o potencial calorífico de cada componente *i* do material combustível, em megajoules por quilograma (MJ/kg);

A_f é a área do piso do compartimento, em metros quadrados (m²).

A expressão (2.7) indica que para o caso do tempo de duração igual ao termo $(0{,}2x10^{-3} \times q_{t,d} / O)$ ser maior que o tempo limite, o incêndio é controlado pela ventilação. Caso o tempo de duração seja menor que o tempo limite, o incêndio é então controlado pela carga de incêndio. FRANSSEN e REAL (2010) publicaram os valores do tempo limite t_{lim} em função da taxa de crescimento do incêndio, conforme a Tabela 2.2 adaptada abaixo.

Tabela 2.2 - Valores de tempo limite em função da taxa de crescimento

Taxa de crescimento	t_{lim} (min)	t_{lim} (h)
Lenta - (transporte e espaço público)	25	0,417
Média - (habitações, salas de hospitais, salas de hoteis, escritórios, salas de aula)	20	0,333
Rápida - (biblioteca, shopping, teatro, cinema)	15	0,250

Fonte: modificado (FRANSSEN; REAL, 2010)

Já a segunda etapa da curva de incêndio é dada pelo resfriamento do compartimento, tendo as equações para a curva temperatura-tempo dos gases descritas abaixo:

$$\theta_g = \theta_{máx} - 625(t^* - t^*_{máx}\ X),\ \text{para}\ t^*_{máx} \leq 0{,}5 \quad (2.9)$$

$$\theta_g = \theta_{máx} - 250(3 - t^*_{máx})(t^* - t^*_{máx}\ X),\ \text{para}\ 0{,}5 < t^*_{máx} < 2 \quad (2.10)$$

$$\theta_g = \theta_{máx} - 250(t^* - t^*_{máx}\ X),\ \text{para}\ t^*_{máx} \geq 2 \quad (2.11)$$

onde o novo $t^*_{máx}$ é dado por:

$$t^*_{máx} = \left(0{,}2x10^{-3}\ x\ q_{t,d}/O\right)\Gamma \quad (2.12)$$

e

$$X = 1\ \text{para}\ t_{máx} > t_{lim}, \text{ou}\ X = t_{lim}\ \Gamma/t^*_{máx}\ \text{para}\ t_{máx} = t_{lim} \quad (2.13)$$

A norma descrita em CEN EN 1991-1-2:2002 leva em consideração as situações em que se têm superfícies com diferentes camadas de materiais de vedação ou superfícies com diferentes fatores *b* para paredes, teto e piso, de modo que novos cálculos para o fator *b* na equação (2.3) são dispostos na norma. Além disso, também são disponibilizados os cálculos para o tempo de duração máxima do incêndio a partir do controle por ventilação como por carga de incêndio. Para análise mais completa sobre o assunto, sugere-se a leitura da norma europeia e o texto incluso em FRANSSEN e REAL (2010). O estudo de CAMPÊLO (2008) apresentou diversas curvas de incêndio natural para as variações do fator de abertura do compartimento e as cargas específicas do mesmo, conforme exemplo apresentado na Figura 2.3 abaixo. A comparação das curvas indica que a elevação do fator de abertura influencia diretamente na temperatura máxima atingida no incêndio e inversamente no tempo de duração do incêndio

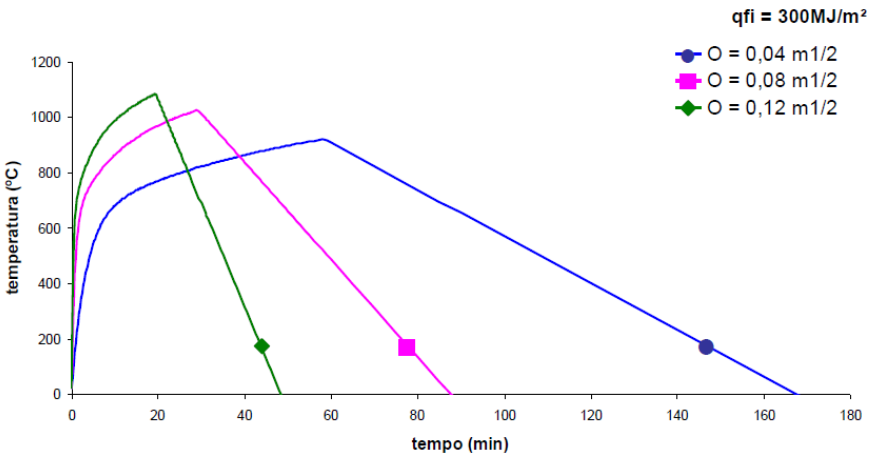


Figura 2.3 – Curvas de incêndio natural para diferentes fatores de abertura

Fonte: (CAMPÊLO, 2008)

2.2. ESTRUTURAS DE AÇO EXPOSTAS AO INCÊNDIO

Em conformidade com o crescimento do uso de estruturas metálicas no Brasil, as normas brasileiras para verificação e dimensionamento de estruturas em aço vêm passando por atualizações para adequar o uso de aço à realidade brasileira. Entretanto, é importante salientar que o aço ainda apresenta características que podem ser desvantajosas em relação a outros materiais (concreto, por exemplo), como a corrosão e a própria resistência ao fogo. Por mais que ambos sofram redução da resistência – ao escoamento para o aço e à compressão para o concreto – e do módulo de elasticidade, tais reduções são mais acentuadas no aço, além da menor temperatura crítica para colapso da estrutura. Desse modo, os tópicos a seguir abordam a ação de temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas e térmicas do aço.

2.2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As principais propriedades de interesse referem-se à massa específica, ao módulo de elasticidade e à resistência ao escoamento. A massa específica do aço pode ser considerada independente da temperatura, em decorrência de sua estrutura microcristalina bem definida e estável a altas temperaturas (DE SOUSA; SILVA, 2015), sendo igual a:

$\rho_a = 7.850\ kg/m^3$

2.2.1.1. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Em concordância com as informações introduzidas anteriormente, os elementos estruturais metálicos, quando sujeitos a temperaturas elevadas, manifestam as seguintes características:

- Redução da resistência ao escoamento do aço (f_y);
- Redução do módulo de elasticidade do aço (E);
- Deformações adicionais por expansão em decorrência do efeito de temperatura.

Assim, tais aspectos devem ser levados em consideração para o dimensionamento de estruturas quando sob situação de incêndio, de modo que a norma NBR 14323:2013 inclui os fatores de redução para os aspectos destacados conforme a Tabela 2.3 abaixo.

Tabela 2.3 - Fatores de redução em função da temperatura do aço para aços laminados

Temperatura do aço θ_a °C	**Fator de redução da resistência ao escoamento** [a] $k_{y,\theta}$	**Fator de redução da resistência ao escoamento para barras sujeitas à flambagem local** [a] $k_{\sigma,\theta}$	**Fator de redução do módulo de elasticidade** [a] $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,890	0,900
300	1,000	0,780	0,800
400	1,000	0,650	0,700
500	0,780	0,530	0,600
600	0,470	0,300	0,310
700	0,230	0,130	0,130
800	0,110	0,070	0,090
900	0,030	0,050	0,068
1000	0,040	0,030	0,045
1100	0,020	0,020	0,023
1200	0,000	0,000	0,000

[a] Para valores intermediários da temperatura de aço, pode ser feita interpolação linear.

É perceptível pela visualização da tabela a influência da elevação da temperatura em estruturas de aço, em que o módulo de elasticidade já passa a se reduzir para a temperatura de 200 °C e os parâmetros são considerados nulos para a temperatura de 1200 °C, indicando a perda de ambas as características e, portanto, evidenciando o cuidado para o dimensionamento adequado da estrutura sob situação de incêndio. Uma representação gráfica da variação dos fatores de redução decorrente da elevação de temperatura é apresentada na Figura 2.4 a seguir.

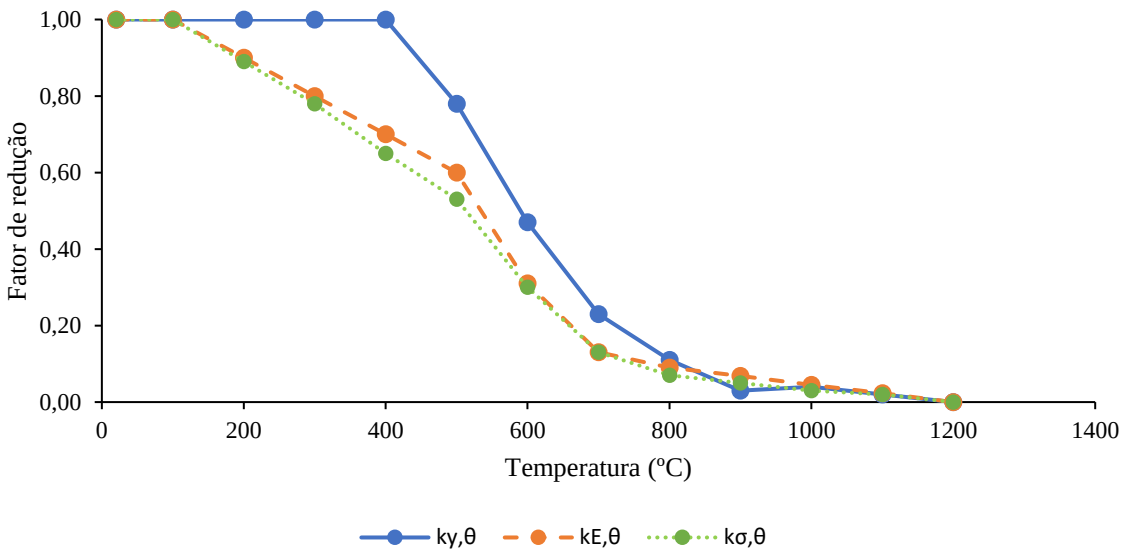


Figura 2.4 - Representação dos fatores de redução em função da temperatura do aço

2.2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS

A norma NBR 14323:2013 apresenta em seu anexo E as variações do alongamento, calor específico e condutividade térmica do aço para os perfis estruturais em decorrência da elevação de temperatura.

2.2.2.1. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico é definido pela relação entre capacidade térmica e a massa de determinado corpo, sendo expresso em joules por quilograma e por graus Celsius (J/ kg °C). Além disso, o mesmo sofre alterações de valor de acordo com a temperatura a qual o objeto está exposto, de modo que a NBR 14323:2013 indica as seguintes expressões para a determinação do calor específico do aço (c_a):

$$c_a = 425 + 7{,}73x10^{-1}\theta_a - 1{,}69x10^{-3}\theta_a^2 + 2{,}22x10^{-6}\theta_a \text{ , para } 20\ °C \leq \theta a < 600\ °C \quad (2.14)$$

$$c_a = 666 + \frac{13.002}{738-\theta_a} \text{ , para } 600\ °C \leq \theta a < 735\ °C \quad (2.15)$$

$$c_a = 545 + \frac{17.820}{\theta_a-731} \text{ , para } 735\ °C \leq \theta_a < 900\ °C \quad (2.16)$$

$$c_a = 650 \text{ , para } 900\ °C \leq \theta_a \leq 1200\ °C \quad (2.17)$$

onde θ_a é a temperatura do aço expressa em graus Celsius (°C).

A norma também permite a adoção de um valor de calor específico simplificado, podendo ser considerado independente da temperatura do aço. Logo, para fins de projeto, pode-se assumir o valor do calor específico como igual a 600 J/ kg °C. A Figura 2.5 representa graficamente as expressões e o valor constante supracitados.

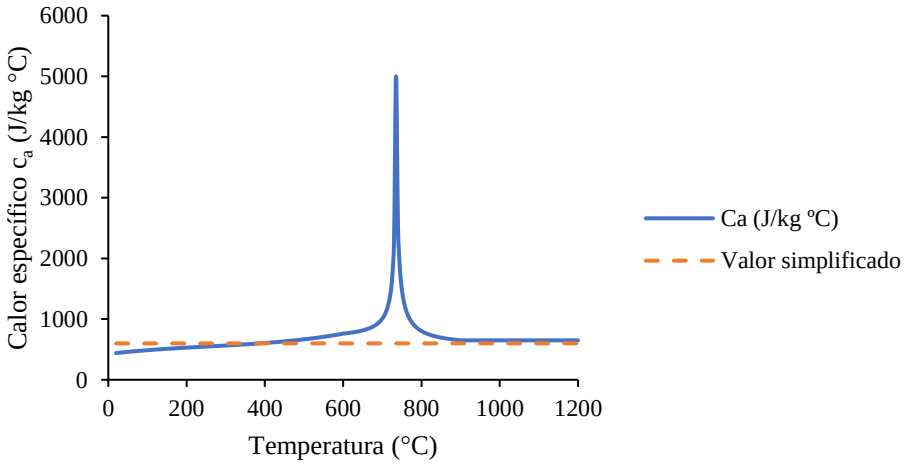


Figura 2.5 - Calor específico do aço

2.2.2.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é dada com a corrente térmica por unidade de área perpendicular ao fluxo de calor e por unidade de gradiente de temperatura (CÂMPELO, 2008). Tem-se que a variação da condutividade térmica também é dependente do aumento da temperatura do aço, de modo que a NBR 14323:2013 dispõe as equações para cálculo a seguir:

$$\lambda_a = 54 - 3{,}33x10^{-2}\theta_a, \text{ para } 20\ °C \leq \theta a < 800\ °C \quad (2.18)$$

$$\lambda_a = 27{,}3, \text{ para } 800\ °C \leq \theta a < 1200\ °C \quad (2.19)$$

onde:

λ_a é a condutividade térmica do aço (W/m °C);

θ_a a temperatura do aço em graus Celsius (°C).

De maneira similar à propriedade térmica do calor específico, a norma permite a adoção de um valor constante e independente do aumento de temperatura do aço para fins de simplificação, igual a 45 W/m °C. A Figura 2.6 apresenta a representação gráfica para os valores de condutividade térmica do aço.

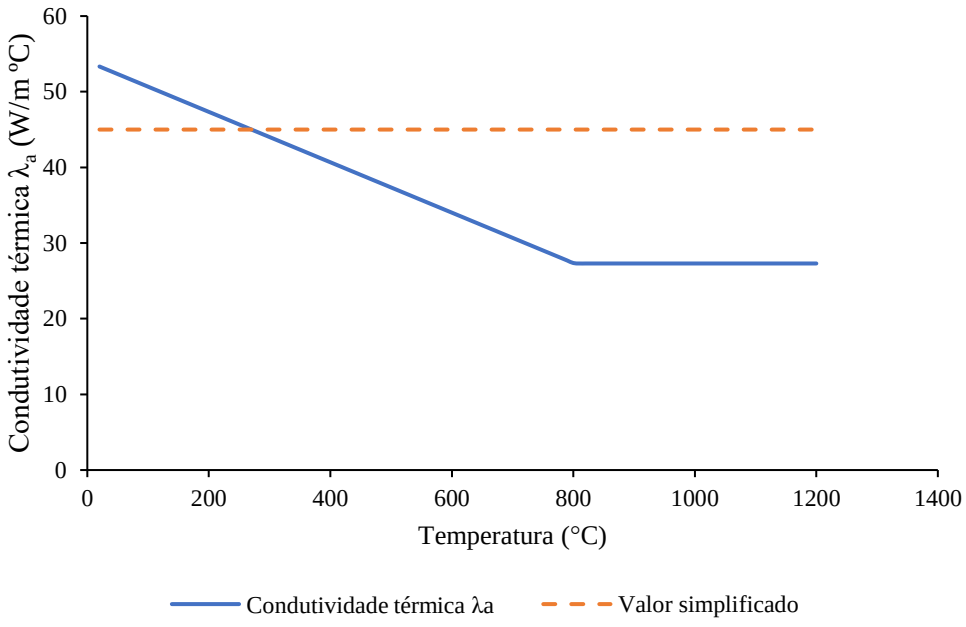


Figura 2.6 - Condutividade térmica do aço

2.2.2.3. ALONGAMENTO

O alongamento do aço pode ser determinado a partir das equações dispostas na norma de incêndio NBR 14323:2013:

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1{,}2x10^{-5}\theta_a + 0{,}4x10^{-8}\theta_a^2 - 2{,}416x10^{-4} \text{ , para } 20\ °C \leq \theta_a < 750\ °C \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 1{,}1x10^{-2} \text{ , para } 750\ °C \leq \theta_a < 860\ °C \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 2x10^{-5} - 6{,}2x10^{-3}\text{, para } 860\ °C \leq \theta_a < 1200\ °C \quad (2.22)$$

onde:

l_a é o comprimento da peça de aço a 20 °C em (m);

Δl_a é a expansão térmica da peça de aço provocada pela temperatura em metros (m);

A norma também permite a simplificação do alongamento do aço de modo a tornar sua relação com a temperatura constante. Logo, é possível adotar o valor da expressão abaixo:

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14x10^{-6}(\theta_a - 20) \quad (2.23)$$

De maneira similar às propriedades anteriores, a Figura 2.7 representa graficamente os valores dispostos conforme as equações da NBR 14323:2013 para o alongamento do aço.

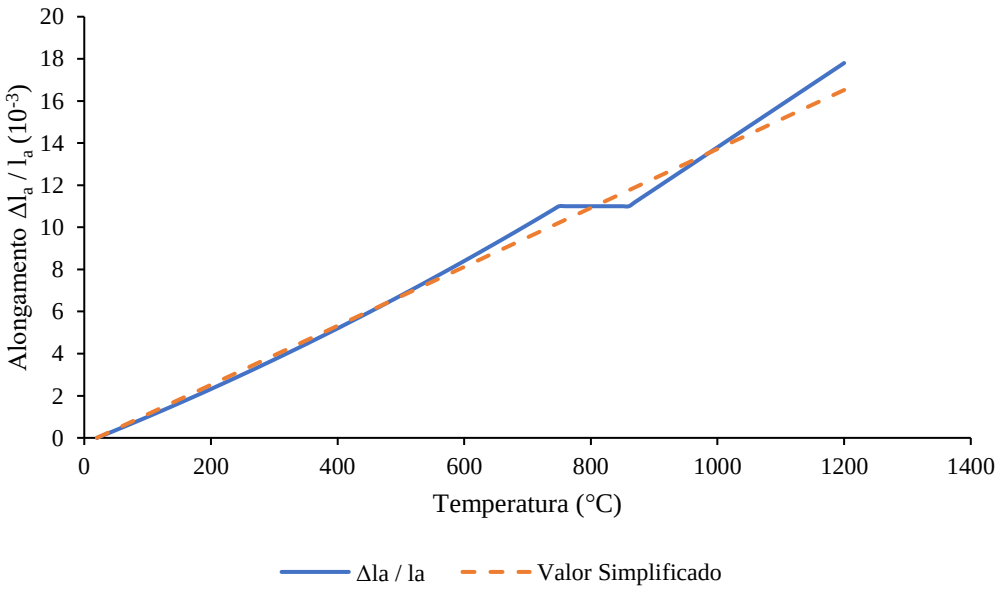


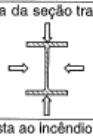
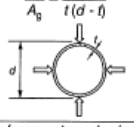
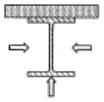
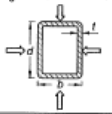
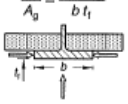
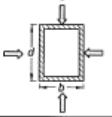
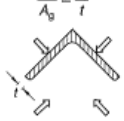
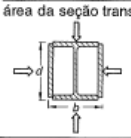
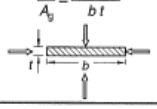
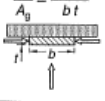
Figura 2.7 - Alongamento do aço

2.2.3. FATOR DE MASSIVIDADE

O conceito de fator de massividade *F*, também conhecido como fator de forma da seção, diz respeito ao perímetro exposto ao incêndio de um elemento metálico estrutural em função da área da seção transversal desse mesmo elemento. Portanto, o fator de massividade é considerado um parâmetro de cálculo e uma simplificação para caracterizar a elevação da temperatura do aço em elementos de barra, em que quanto maior o fator *F*, menos robusto será o elemento e maior será a elevação da temperatura. Em consequência, o fator de massividade se mostra indispensável para o dimensionamento de estruturas metálicas com ou sem revestimento de proteção térmica.

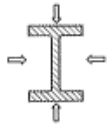
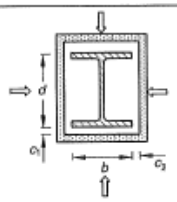
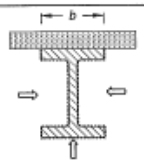
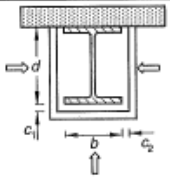
Para isso, a norma NBR 14323:2013 disponibiliza tabelas para a determinação dos fatores de massividade para diversas seções e elementos estruturais, bem como define o cálculo conservador do fator de massividade para elementos pertencentes a elementos de compartimentação, dado pela utilização da área A_g como somente a parte da área delimitada pelo perímetro exposto ao fogo. As Tabelas 2.4 e 2.5 retiradas da norma encontram-se abaixo.

Tabela 2.4 - Fator de massividade para elementos sem revestimento contra fogo

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

Fonte: NBR 14323:2013

Tabela 2.5 - Fator de massividade para elementos com revestimento contra fogo

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

[a] Válido apenas para c_1 e c_2 inferiores ou iguais a $d/4$.

Fonte: NBR 14323:2013

2.3. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

A norma brasileira NBR 14323:2013 apresenta o cálculo para a determinação da elevação de temperatura de elementos estruturais de aço sem revestimento contra fogo e com revestimento contra fogo baseando-se no modelo de incêndio-padrão. A partir da ação térmica derivada do fluxo de calor de um incêndio e para uma distribuição uniforme da temperatura na seção transversal de um elemento estrutural, o aumento de temperatura por radiação e por convecção para um determinado período de tempo pode ser determinado conforme os tópicos a seguir.

2.3.1. ELEMENTOS SEM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Para um dado intervalo de tempo Δt, a elevação da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ de um elemento metálico sem revestimento pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh}\frac{\left({}^{u}/_{A_g}\right)}{c_a\,\rho_a}\varphi\Delta t \qquad (2.24)$$

onde:

k_{sh} é um fator de correção para efeitos de sombreamento, tomado neste estudo como igual a 1,0;

u/A_g é o fator de massividade de elementos estruturais, em metros a menos um (m^{-1});

u é o perímetro exposto ao incêndio do perfil metálico, expresso em metros (m);

A_g é a área da seção transversal do perfil metálico, expressa em metros quadrados (m^2);

c_a é o calor específico do aço, conforme as considerações do item 3.2.2.1 deste trabalho, em joules por quilograma por graus Celsius (J/ kg °C);

ρ_a é a massa específica do aço em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), igual a 7.850 kg/m^3 para qualquer temperatura do aço;

φ é o valor do fluxo de calor por unidade de área, expresso em watts por metro quadrado (W/m^2);

Δt é o intervalo de tempo em segundos (s).

A norma preconiza a utilização de intervalos de tempo para a elevação da temperatura e consequente elaboração da curva temperatura-tempo do aço em elementos estruturais sem revestimento contra fogo não maiores que 5 segundos. Além disso, apresenta o cálculo para o valor do fluxo de calor, dado pela soma da parcela relativa à convecção φ_c (W/m^2) e da parcela relativa à radiação φ_r (W/m^2):

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \tag{2.25}$$

Ademais, as componentes do fluxo de calor podem ser calculadas pelas equações (2.26) e (2.27):

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \tag{2.26}$$

e

$$\varphi_r = 5{,}67\text{x}10^{-8}\varepsilon_{res}\left[\left(\theta_g + 273\right)^4 - (\theta_a + 273)^4\right] \tag{2.27}$$

onde:

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo adotado para efeitos práticos como 25 W/m^2 °C, em casos de incêndio-padrão, ou 35 W/m^2 °C para casos de incêndio natural;

ε_{res} é a emissividade resultante, tomada para efeitos práticos como igual a 0,7.

Como forma de exemplificação, efetuou-se os cálculos para um elemento estrutural de aço com fator de massividade igual a 100 m^{-1}. Para o exemplo de aplicação, adotou-se o valor

simplificado para o calor específico do aço, igual a 600 J/kg °C e o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção como 25 W/m² °C. A Tabela 2.6 apresenta alguns valores dos resultados e a Figura 2.8 apresenta a curva temperatura-tempo do aço para o tempo de duração do incêndio de 120 minutos.

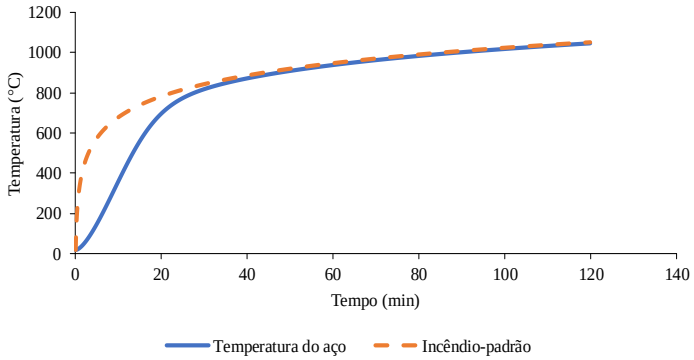


Figura 2.8- Curva temperatura-tempo do aço e dos gases para incêndio-padrão

Pela análise da Tabela 2.6 e da curva temperatura-tempo, é perceptível que para os minutos iniciais após o *flashover* do incêndio, a temperatura do aço não acompanha a taxa de elevação da temperatura dos gases do compartimento. Entretanto, aos 20 minutos após o início da etapa já é possível identificar a temperatura de 698 °C para o aço, em que é válido afirmar a redução tanto da resistência ao escoamento do aço do elemento estrutural (com fator de redução próximo a 0,130) como do módulo de elasticidade (fator de redução próximo a 0,230), fazendo o uso da interpolação linear para os fatores de redução da Tabela 2.3.

Tabela 2.6 - Temperatura do aço para incêndio-padrão e fator de massividade F 100 m^{-1}

Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)	φ (W/m²)	$\Delta\theta_{a,t}$ (°C)	Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)	φ (W/m²)	$\Delta\theta_{a,t}$ (°C)
0	20	20	0	0	90	404	41	17096	2
5	97	20	2361	0	100	419	45	18096	2
10	147	21	4108	0	200	517	92	25503	3
15	185	21	5543	1	300	576	152	30092	3
20	215	22	6782	1	400	619	219	32884	3
25	240	23	7885	1	500	651	291	34188	4
30	261	24	8885	1	600	678	364	34112	4
35	280	25	9804	1	1200	781	698	16095	2
40	297	26	10658	1	2400	885	873	3351	0
45	312	27	11458	1	3600	945	939	2082	0
50	325	28	12210	1	4800	988	984	1528	0
60	349	31	13600	1	6000	1022	1019	1209	0
70	370	34	14862	2	7200	1049	1047	1001	0
80	388	38	16022	2					

2.3.2. ELEMENTOS COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Para um dado intervalo de tempo Δt, a elevação da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ de um elemento metálico com revestimento contra fogo pode ser determinada pela equação (2.28) a seguir:

$$\Delta\theta_{a,t} = \lambda_m \frac{\left(u_m/A_g\right)}{t_m c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t}-\theta_{a,t})\Delta t}{1+\left(\xi/4\right)} - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{\left(4/\xi\right)+1} \quad (2.28)$$

para o qual o termo ξ é dado pela equação (2.29):

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m \left(u_m/A_g\right) \quad (2.29)$$

onde:

u_m/A_g é o fator de massividade para elementos envolvidos com material de revestimento contra fogo, em metros a menos um (m^{-1});

u_m é o perímetro efetivo do material de revestimento, expresso em metros (m) e igual ao perímetro da face interna do revestimento,

c_m é o calor específico do material de revestimento, dado em joules por quilograma por graus Celsius (J/kg °C);

ρ_m é a massa específica do material de revestimento contra fogo, expressa em quilograma por metro cúbico (kg/m^3);

t_m é a espessura do material de revestimento, dada em metros (m);

λ_m é a condutividade térmica do material de revestimento contra fogo, expressa em watts por metro por graus Celsius (W/m °C);

$\theta_{g,t}$ é a temperatura dos gases em dado instante t em graus Celsius (°C);

$\theta_{a,t}$ é a temperatura do aço em dado instante t em graus Celsius (°C);

Portanto, como método alternativo para o dimensionamento da estrutura para resistir a elevadas temperaturas, é possível fazer uso de materiais, que ao envolverem os elementos estruturais, atuam como proteção contra o fogo e assim evitam o colapso da edificação em situação de incêndio (RIGOBELLO, 2007). Desse modo, VARGAS e SILVA (2005) elencaram as principais características para os materiais de proteção térmica, a saber:

- Baixa massa específica;
- Baixa condutividade térmica;
- Alto calor específico;
- Adequada resistência mecânica (quando expostos a impactos);
- Garantia de integridade durante a evolução do incêndio;
- Custo compatível.

É perceptível pela própria análise da equação (2.29) que, para valores baixos da condutividade térmica e valores altos do calor específico dos materiais de proteção térmica, a elevação da temperatura de elementos estruturais de aço tende a ser menor. Como referência, a Tabela 2.7 apresenta as propriedades dos principais materiais utilizados como proteção contra fogo, baseada em REAL (2003).

Tabela 2.7 - Propriedades de materiais para proteção térmica

Material	Massa específica (kg/m³)	Condutividade térmica (W/m °C)	Calor específico (J/kg °C)
Materiais projetados			
Fibra mineral	300	0,12	1200
Argamassa de vermiculita	350	0,12	1200
Perlita	350	0,12	1200
Materiais projetados de alta densidade			
Vermiculita (ou perlita) e cimento	550	0,12	1100
Vermiculita (ou perlita) e gesso	650	0,12	1100
Placas			
Vermiculita (ou perlita) e cimento	800	0,20	1200
Silicato fibroso ou silicato de cálcio fibroso	600	0,15	1200
Fibrocimento	800	0,15	1200
Placas de gesso	600	0,20	1700
Placas de fibra compactada			
Silicato fibroso, lã mineral, lã de rocha	150	0,20	1200
Concreto	2300	1,60	1000
Concreto leve	1600	0,80	840
Blocos de concreto	2200	1,00	1200
Tijolo cerâmico vazado	1000	0,40	1200
Tijolo cerâmico maciço	2000	1,20	1200

É válido salientar as considerações prescritas na NBR 14323:2013 em referência aos materiais de revestimento contra fogo. Primeiramente, quaisquer propriedades mecânicas ou térmicas de tais materiais devem ser determinadas por ensaio. Em seguida, o cálculo para elevação da temperatura do aço pode ser alterado para a consideração de materiais que apresentem umidade, retardando assim o aumento de temperatura, desde de que devidamente determinado o retardamento por meio de ensaios de laboratório. Por fim, o cálculo descrito nessa seção não é aplicável para matérias de proteção térmica como pinturas intumescentes (que aumentam de volume) ou qualquer outro material de mesmo comportamento. Para um maior detalhamento e conhecimento sobre materiais de proteção térmica, sugere-se a leitura dos textos contidos em REAL (2003), VARGAS e SILVA (2005) e RIGOBELLO (2007).

Mais além, SOARES (2014) elenca as características gerais dos materiais de proteção térmica como sistema passivo de segurança ao incêndio, bem como realiza a associação entre os fatores de massividade dos perfis metálicos e espessuras referenciais de revestimentos de proteção contra fogo, baseadas em PANNONI (2007). É importante frisar o caráter referencial das espessuras apontadas no Anexo B, visto a alta variabilidade dos tipos de materiais, bem como dos diferentes fabricantes, de maneira que para estudos mais específicos e condizentes com a realidade, espera-se o desenvolvimento de ensaios em laboratório para obtenção das propriedades mecânicas e térmicas do material de revestimento a ser utilizado para a consequente elaboração da Carta de Cobertura, tabela que apresenta a relação entre o fator F e a espessura da proteção térmica.

2.4. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As principais verificações para a estabilidade e não-ruptura da estrutura presentes na situação de incêndio se referem aos esforços resistentes dos elementos metálicos isolados, ao carregamento ou solicitação da edificação e a análise da temperatura crítica a ser atingida pelo elemento metálico. Simplificadamente, todo e qualquer elemento metálico deve atender a expressão (2.30) abaixo para os estados-limites últimos do aço:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \tag{2.30}$$

onde:

$S_{fi,d}$ é o esforço solicitante de cálculo para a situação de incêndio, calculado conforme as combinações de ações dispostas na NBR 14323:2013;

$R_{fi,d}$ é o esforço resistente de cálculo do elemento estrutural isolado para determinado estado-limite último em situação de incêndio.

Os esforços resistentes para as estruturas metálicas em situação de incêndio devem ser determinados a partir das verificações dos estados-limites últimos previstos pelas normas NBR 8800:2008 ou NBR 14762, à exceção da verificação de ruptura da seção líquida, desconsiderada pela NBR 14323:2013 para situação de incêndio. De maneira sucinta, os cálculos dos esforços resistentes para os tipos de carregamentos são dispostos nos tópicos a seguir de acordo com o procedimento normativo da NBR 14323:2013. Os devidos cálculos para parâmetros como fatores de redução, índices de esbeltez, etc., podem ser encontrados nas normas citadas nos períodos anteriores.

2.4.1. BARRAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO

A força axial resistente de cálculo, $N_{fi,Rd}$, de uma barra tracionada para o estado-limite último de escoamento da seção de área bruta é dada pela seguinte equação:

$$N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A_g f_y \tag{2.31}$$

2.4.2. BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

A norma NBR 14323:2013 apresenta a divisão dos cálculos para perfis não sujeitos à flambagem local e sujeitos à flambagem local, em que a diferenciação dos perfis é dada conforme previsto nas normas NBR 8800:2008 e NBR 14762. Para o primeiro caso, a força axial resistente de cálculo $N_{fi,Rd}$ para o estado-limite último de instabilidade da barra é expressa por:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi}\, k_{y,\theta}\, A_g\, f_y \tag{2.32}$$

onde χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, devidamente calculado na NBR 14323:2013.

Para perfis previstos na NBR 14762 sujeitos à flambagem distorcional, a força axial resistente deve ser a menor entre a equação (2.32) e a equação seguinte:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{dist}\, k_{y,\theta}\, A_g\, f_y \tag{2.33}$$

onde χ_{dist} é o fator de redução associado à flambagem distorcional da força resistente de compressão, calculado conforme NBR 14762.

Para perfis sujeitos à flambagem local, a força axial resistente de compressão para o estado-limite último de instabilidade da barra é dada por:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi}\, k_{\sigma,\theta}\, A_{ef}\, f_y \tag{2.34}$$

onde:

χ_{fi} é o fator de redução para a resistência à compressão, porém com o índice de esbeltez reduzido à temperatura ambiente, λ_0, calculado de acordo com a NBR 14762;

$k_{\sigma,\theta}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal, obtida de acordo com a aplicabilidade da NBR 8800:2008 ou NBR 14762.

Para os perfis dispostos na NBR 14762 sujeitos à flambagem distorcional, a força resistente deve ser a menor entre a equação (2.34) e a seguinte:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{dist}\, k_{\sigma,\theta}\, A_g\, f_y \tag{2.35}$$

2.4.3. BARRAS SUBMETIDAS A MOMENTO FLETOR E FORÇA CORTANTE

No presente tópico, a NBR 14323:2013 divide a determinação do momento fletor resistente de cálculo $M_{fi,Rd}$ de barras fletidas para perfis previstos na NBR 8800:2008 e para perfis da NBR 14762. Para o primeiro caso, a partir da comparação do índice de esbeltez λ com os índices de esbeltez correspondentes à plastificação $\lambda_{p,fi}$ e ao início do escoamento $\lambda_{r,fi}$ em situação de incêndio (detalhadamente determinados na NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008), tem-se o momento fletor resistente de cálculo:

- Para os estados-limites aplicáveis de flambagem local:

$M_{fi,Rd} = \kappa\, k_{y,\theta} M_{pl}$, se $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$; (2.36)

$M_{fi,Rd} = \kappa\, k_{y,\theta} M_y$, se $\lambda_{p,fi} \leq \lambda \leq \lambda_{r,fi}$; (2.37)

$M_{fi,Rd} = \kappa\, k_{\sigma,\theta} M_y$, se $\lambda \geq \lambda_{r,fi}$ (exceto para flambagem local da alma). (2.38)

onde:

M_{pl} é o momento de plastificação da seção em temperatura ambiente;

κ é o fator de correção que considera o efeito benéfico de uma distribuição de temperatura não uniforme na seção transversal;

M_y é o momento fletor ao início do escoamento à temperatura ambiente.

- Para o estado limite de flambagem lateral com torção:

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (2.39)$$

onde χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão sob situação de incêndio com a devida alteração descrita na NBR 14323:2013 para o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio $\lambda_{0,fi}$.

Para os perfis previstos na NBR 14762, o momento fletor resistente de cálculo é expresso:

- Para barras submetidas à flambagem local sob flexão em situação de incêndio:

$$M_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} W_{c,ef} f_y \quad (2.40)$$

onde $W_{c,ef}$ é o módulo resistente elástico da seção transversal efetiva relacionado às fibras externas comprimidas de acordo com a NBR 14762 e com o fator de redução χ_{fi} obtido a partir da NBR 14323:2013.

- Para barras que apresentam flambagem local e sujeitas à flambagem distorcional:

$$M_{fi,Rd} = \chi_{dist} k_{\sigma,\theta} W f_y \quad (2.41)$$

onde W é o módulo resistente elástico mínimo da seção bruta.

- Para perfis que não apresentam flambagem local, substitui-se o fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ por $k_{y,\theta}$ nas equações (2.40) e (2.41).

Por fim, o esforço cortante resistente de cálculo é determinado em conformidade com os cálculos desenvolvidos na NBR 14762 ou na NBR 8800:2008, a que for aplicável, adotando-se os devidos valores para fatores como módulo de elasticidade, índice de esbeltez e resistência ao escoamento do aço para a situação de incêndio.

2.4.4. COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS SOLICITANTES

A NBR 14323:2013 também apresenta a metodologia de combinação de esforços solicitantes para os perfis previstos na NBR 8800:2008 e para os previstos na NBR 14762 com um ou dois eixos de simetria. Para o primeiro caso, a combinação da força axial de tração ou compressão e o momento fletor em torno de um ou dos dois eixos centrais de inércia deve satisfazer as seguintes expressões:

- Para $\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} \geq 0{,}2$

$$\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}}\right) \leq 1{,}0 \qquad (2.42)$$

- Para $\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} < 0{,}2$

$$\frac{N_{fi,Sd}}{2N_{fi,Rd}} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (2.43)$$

onde:

$N_{fi,Sd}$ é a força axial solicitante de cálculo de tração ou compressão para a situação de incêndio;

$M_{x,fi,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x para a situação de incêndio;

$M_{y,fi,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y para a situação de incêndio;

$M_{x,fi,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x em situação de incêndio;

$M_{y,fi,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y em situação de incêndio.

Para as mesmas situações definidas anteriormente, a combinação de esforços para os perfis previstos na NBR 14762 deve atender a expressão:

$$\frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{M_{x,fi,Rd}} + \frac{M_{y,fi,Sd}}{M_{y,fi,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (2.44)$$

2.4.5. TEMPERATURA CRÍTICA

A temperatura crítica de um elemento estrutural isolado sob situação de incêndio refere-se à temperatura máxima para a qual o elemento estrutural apresenta a máxima redução permitida da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço. Caso haja a necessidade de verificação de um elemento estrutural para um dado incêndio (aqui definindo-se o TRRF para a edificação no modelo de incêndio padrão ou aplicando a metodologia para o modelo de incêndio natural), a temperatura crítica pode ser obtida a partir da equação relativa ao fator de redução da resistência ao escoamento do aço $k_{y,\theta}$ (FRANSSEN; REAL, 2010):

$$k_{y,\theta} = \frac{S_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{S_{fi,d}}{A_g f_y / \gamma_{M,fi}} \tag{2.45}$$

onde:

$R_{fi,d,0}$ é o esforço resistente de cálculo para a temperatura inicial de 20 ºC;

$\gamma_{M,fi}$ é o fator de segurança parcial para as propriedades do material para a situação de incêndio, adotado como igual a 1,0.

E a temperatura crítica é dada por:

$$\theta_{a,cr} = 39{,}19 \ln\left[\frac{1}{0{,}9674\, k_{y,\theta}{}^{3{,}833}} - 1\right] + 482 \tag{2.46}$$

onde $\theta_{a,cr}$ é a temperatura crítica do aço para o elemento metálico sob situação de incêndio, expressa em graus Celsius (ºC).

A temperatura crítica deve ser então comparada com a temperatura máxima obtida pelo modelo de incêndio padrão ou pelo modelo de incêndio natural para verificar se o elemento estrutural suporta a elevação de temperatura imposta pelo fenômeno de incêndio. Caso a temperatura crítica seja menor que as temperaturas máximas dos modelos, tem-se que o elemento não satisfaz o quesito de segurança sob situação de incêndio. É válido salientar que a adoção do método descrito acima é válida para elementos submetidos à tração, em que a flambagem distorcional não atua como potencial estado de falha, de modo que para os demais casos, sugere-se a leitura contida em FRANSSEN e REAL (2010).

2.5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Objetivando uma melhor compreensão e elucidação dos conceitos discorridos ao longo do trabalho, elaborou-se um exemplo de dimensionamento de uma barra sujeita à tração sob situação de incêndio. A barra tracionada refere-se a um tirante responsável pelo contraventamento de uma estrutura de aço e para uma carga axial solicitante de tração em situação de incêndio ($N_{fi,Sd}$) de 300 kN, pretende-se a aplicação do modelo de incêndio-padrão de modo que os seguintes dados são fornecidos:

1. A estrutura é construída em aço A36, com tensão de escoamento do aço de 250 MPa;
2. O tempo de exposição ao incêndio é igual a 30 minutos;
3. O perfil do tirante encontra-se exposto ao incêndio por todos os lados;
4. A barra de aço não apresenta revestimento de proteção contra fogo;

A etapa inicial destina-se à estimativa inicial da área da seção bruta do perfil para resistir ao esforço solicitado pelo estado limite de ruptura da seção bruta:

$$N_{fi,Sd} \leq N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A_g f_y \tag{2.47}$$

$$300 \leq k_{y,\theta} A_g \ \frac{25\ kN}{cm^2} \tag{2.48}$$

Adotando-se uma cantoneira de perfil laminado L com abas iguais 102x102 mm e espessura 9,5 mm, tem-se a área da seção bruta igual a 18,45 cm² e, portanto, o fator de redução para a tensão ao escoamento do aço torna-se igual a:

$$\frac{300}{25 \text{ x } 18{,}45} \leq k_{y,\theta} \rightarrow k_{y,\theta} \geq 0{,}65 \tag{2.49}$$

Para o devido fator de redução, calcula-se a temperatura crítica da barra de aço conforme a equação (2.46):

$$\theta_{a,cr} = 39{,}19 \ln\left[\frac{1}{0{,}9674 \text{ x } 0{,}65^{3{,}833}} - 1\right] + 482 \rightarrow \theta_{a,cr} = 539{,}96\ °C \tag{2.50}$$

Logo, a temperatura máxima que a barra pode atingir para não comprometer ainda mais as propriedades mecânicas e térmicas do aço e consequentemente, não resistir aos esforços solicitantes, é de 539,96 °C. A próxima etapa destina-se à determinação da temperatura efetivamente atingida pelo elemento metálico para o incêndio com período de duração de 30 minutos. Portanto, tem-se a resolução para o modelo simplificado de incêndio-padrão.

- Modelo de incêndio padrão

Para o devido perfil e de acordo com a Tabela 2.4, o fator de massividade *F* é definido por:

$$\frac{u}{A_g} = \frac{2}{t_0} \tag{2.51}$$

onde t_0 é a espessura do perfil, igual a 9,5 mm. Logo, o fator de massividade do perfil é de 210,53 m^{-1}. O próximo passo é determinar a curva temperatura-tempo do aço, em que se adotou o calor específico do aço como constante e igual a 600 J/ kg °C, representada na Figura 2.9 e com valores relevantes na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Temperatura do aço para incêndio-padrão com F igual a 210,53 m^{-1}

Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)	Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)
0	20	20	70	370	50
5	97	21	80	388	57
10	147	21	90	404	64
15	185	23	100	419	71
20	215	24	200	517	164
25	240	26	300	576	273
30	261	28	400	619	383
35	280	30	500	651	483
40	297	32	600	678	565
45	312	35	1200	781	766
50	325	38	1800	842	834
60	349	43			

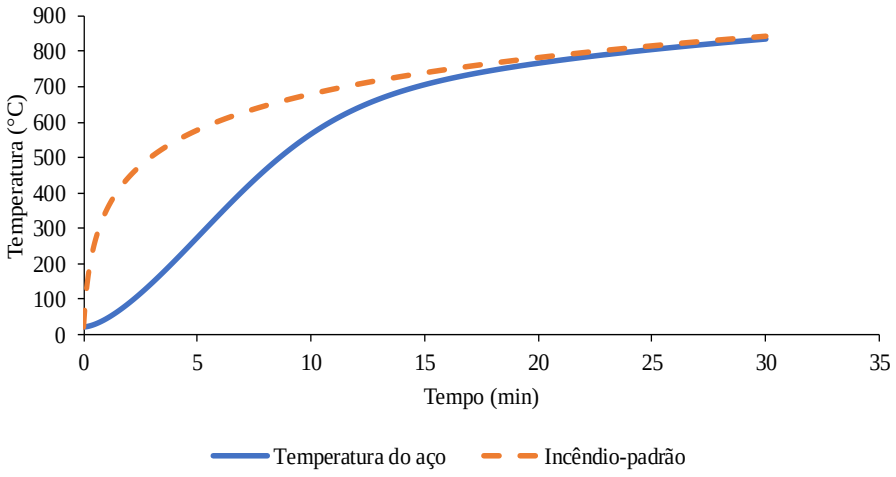


Figura 2.9 – Curva temperatura-tempo para perfil sem revestimento

Portanto, conforme apresentado na Tabela 2.8, a temperatura atingida pelo perfil metálico quando exposto ao incêndio-padrão de 30 minutos é igual a 834 °C, significativamente maior que a temperatura crítica calculada anteriormente.

A partir de tal passo, pode-se prosseguir de duas maneiras: adotar um novo perfil e executar novamente o procedimento de cálculo para determinação da temperatura crítica e temperatura atingida pelo incêndio; ou atribuir uma proteção térmica como revestimento contra fogo para o devido elemento metálico. Desse modo, elucida-se os procedimentos para a verificação no modelo de incêndio padrão através do fluxograma da Figura 2.10 a seguir.

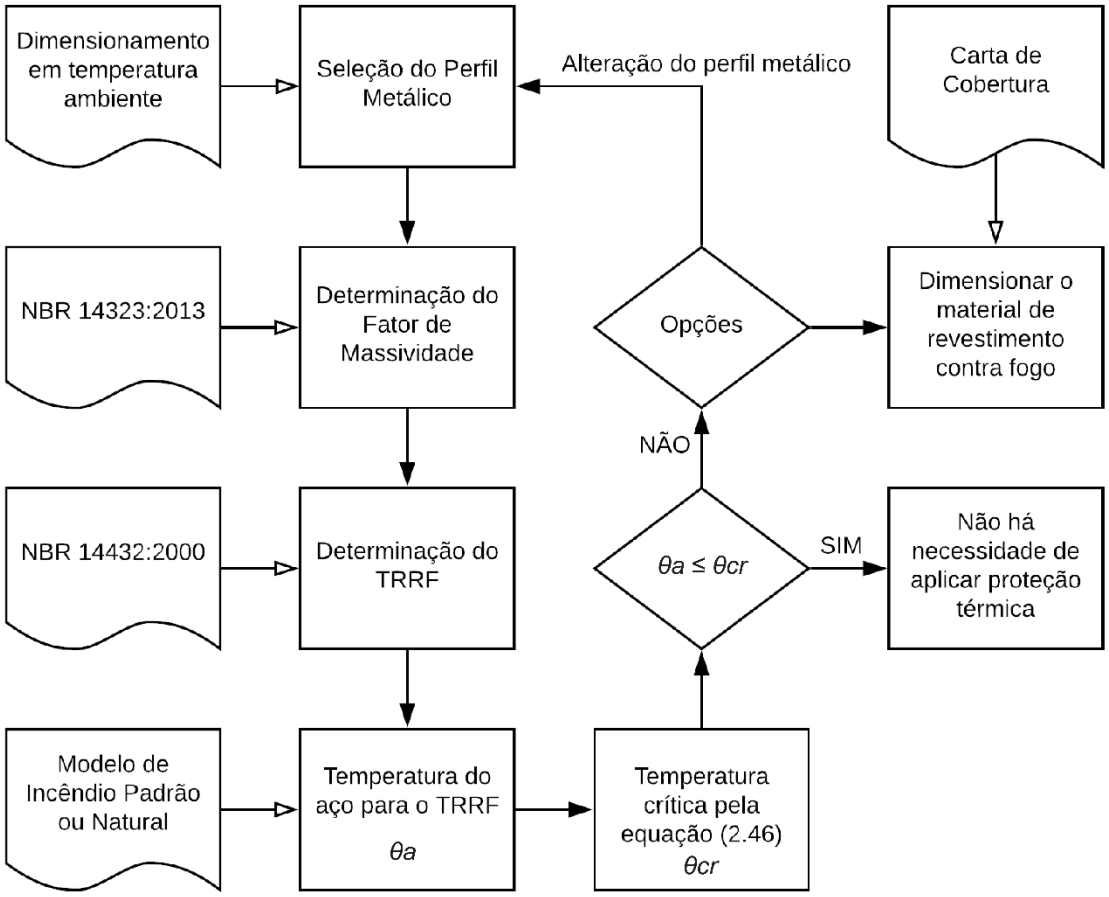


Figura 2.10 – Fluxograma para verificação em situação de incêndio

Para o devido exemplo, optou-se pela projeção de argamassa de vermiculita como material de revestimento, em que a partir das propriedades presentes na Tabela 2.7, do fator de massividade da Tabela 2.5 e das equações (2.28) e (2.29), é possível obter uma nova curva temperatura-tempo e novos valores de temperatura atingida pelo perfil metálico. Adotando-se a espessura de 10 mm para o material de revestimento, a Tabela 2.9 e a Figura 2.11 apresentam os resultados.

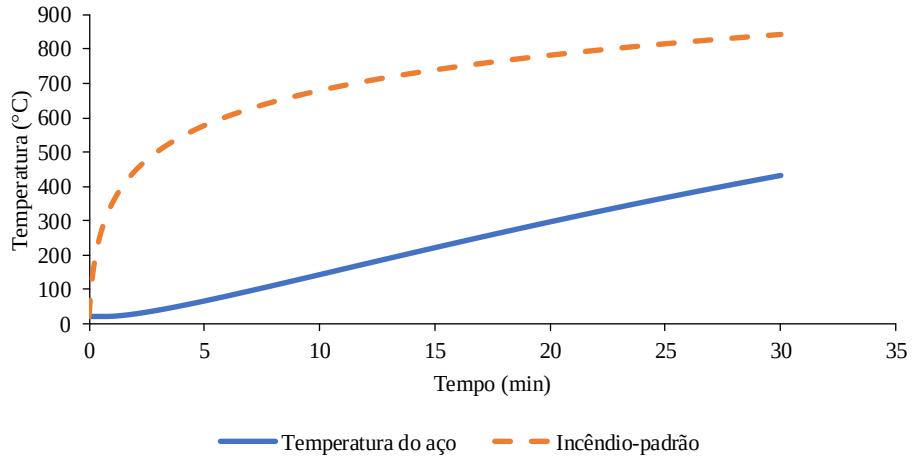


Figura 2.11 - Curva temperatura-tempo para perfil com revestimento

Pela curva temperatura-tempo, é perceptível a diminuição da taxa de elevação da temperatura do aço no período de duração do incêndio. Já a Tabela 2.9 demonstra de maneira mais quantitativa a devida variação da temperatura, em que não é perceptível o aumento de temperatura até os primeiros 70 segundos do incêndio. Isto porque, de acordo com a norma NBR 14323:2013, para uma variação de temperatura dos gases maior que zero, a variação de temperatura do aço deverá ser superior ou igual a zero, ainda que tal variação tenha tido valores iniciais negativos pela equação (2.28). É lógico concluir que a temperatura do aço não deveria diminuir com o aumento da temperatura dos gases durante o incêndio, de modo que os valores iniciais foram substituídos por zero e apenas retratam a capacidade dos materiais de revestimento em retardar e diminuir a transmissão de calor para a estrutura de aço.

Tabela 2.9 - Temperatura do aço para incêndio-padrão para perfil com revestimento

Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)	Tempo (s)	θ_g (°C)	θ_a (°C)
0	20	20	70	370	21
5	97	20	80	388	22
10	147	20	90	404	23
15	185	20	100	419	25
20	215	20	200	517	42
25	240	20	300	576	65
30	261	20	400	619	90
35	280	20	500	651	116
40	297	20	600	678	142
45	312	20	1200	781	296
50	325	20	1800	842	431
60	349	20			

Assim, lançando mão do material de revestimento contra fogo, a temperatura atingida de 431 °C é menor que a temperatura crítica e tal dimensionamento passa a ser válido para a situação de incêndio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. PROGRAMAÇÃO EM VBA

Concomitantemente à modelagem da estrutura a ser analisada e à simulação de incêndio no *software SAP2000*, este estudo buscou o desenvolvimento de um programa simplificado para a construção das curvas de incêndio padrão e natural conforme as determinações presentes em NBR 14323:2013 e em CEN EN 1991-1-2:2005. Portanto, o programa foi desenvolvido a partir da ferramenta VBA (sigla para *Virtual Basic for Applications*) do programa Microsoft Office Excel¸ dado como uma linguagem de programação computacional para as aplicações dos programas do pacote Office (Excel, Power Point, Word, etc.) e responsável pela elaboração de novas funções ou automatização de comandos.

Os códigos de programação dizem respeito ao uso da linguagem de programação computacional para a execução de comandos de maneira automatizada pelo programa Excel. Os processos desenvolvidos na linguagem VBA são implementados por meio de sub-rotinas ou funções (ZAMBONI, 2011), de modo que as principais estruturas destinadas à organização e construção dos códigos do projeto são os módulos, as *subs* e as *functions*. Os módulos são componentes responsáveis pelo armazenamento dos códigos de procedimento ou rotina (*subs*) e códigos de funções (*functions*). Enquanto as *subs* são definidas como um grupo de declarações dentro do VBA que executam uma ação, as *functions* executam cálculos e devem retornar um único valor ao final de sua execução.

Para o devido projeto, a ferramenta VBA foi utilizada com o intuito de permitir ao usuário a inserção de parâmetros de projeto relevantes à verificação do incêndio para um dado TRRF e um determinado perfil do elemento metálico. Como resultado, o programa retorna a curva do modelo de incêndio de interesse e a consequente elevação de temperatura do aço, apresentando também os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade conforme a evolução do incêndio. Os tópicos a seguir elucidam a metodologia para o desenvolvimento do código de programação, bem como a estrutura das planilhas disponíveis ao usuário.

3.1.1. PROGRAMAS PARA INCÊNDIO PADRÃO E NATURAL

Inicialmente foi definida a divisão das abas da planilha em Excel para utilização do usuário e armazenamento das informações relevantes ao estudo. Desse modo, foram criadas seis abas, enumeradas a seguir:

- A primeira aba destinou-se à construção da curva de incêndio padrão em conformidade com a NBR 14323:2013, denominada "Incêndio Padrão". Nessa aba o usuário pode inserir o tempo requerido em minutos, e as características do elemento metálico de interesse, sendo estes: bitola do perfil metálico e tipo de exposição (caixa ou aberto e três ou quatro lados);
- A segunda aba destinou-se à construção da curva de incêndio natural, denominada "Incêndio Natural". Similarmente à aba anterior, o usuário é responsável por inserir os seguintes dados: tempo de avaliação do incêndio, bitola do perfil metálico, tipo de exposição, calor específico do material de revestimento do ambiente (em J/kg °C), carga de incêndio específica (em MJ/m²) e o fator de abertura do ambiente;
- A terceira aba destinou-se à consulta do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) para os diferentes tipos de edificação, conforme adaptação da tabela presente na NBR 14432:2000, denominada "Tabela TRRF";
- A quarta aba também se destina à consulta da classificação quanto à ocupação da edificação, denominada "Classificação quanto à ocupação", complementar a aba anterior e adaptada da NBR 14432:2000;
- A quinta aba destina-se aos resultados dos cálculos da curva de incêndio e temperatura do aço para o modelo de incêndio padrão, denominada "Cálculos". Para a aba, são colocados os dados do tempo de incêndio em segundos, a temperatura dos gases, a temperatura do aço, o fluxo de calor e a variação de temperatura do aço obtidos a partir do código de programação associado ao incêndio padrão;
- Já a sexta aba é similar à aba anterior, porém para o modelo de incêndio natural, denominada "Cálculos_Natural". Além disso, o tempo de incêndio para definição da curva é dado em minutos;
- Por fim, a sétima aba é destinada à base de dados adaptada da tabela de bitolas de perfis metálicos da empresa Gerdau AçoMinas.

É válido salientar que por se tratar de um estudo introdutório sobre o fenômeno de incêndio, optou-se pela utilização de uma base de dados simplificada, abordando somente perfis W e HP

e o fator de massividade para perfis expostos do tipo aberto ou caixa e com 3 ou 4 lados expostos ao incêndio. Conforme a necessidade do usuário ou evolução dos programas, é possível expandir a base de dados para abranger outros perfis metálicos, bem como outras configurações de exposição ao incêndio.

Outro ponto de relevância refere-se ao tempo de incêndio natural. O próprio modelo apresenta uma fase de aquecimento e uma fase de resfriamento do incêndio, de modo que o final do incêndio é dado ao final da fase de aquecimento e decorre da queima completa do material combustível ou da falta de oxigênio no compartimento. Logo, escolher um TRRF como o tempo de avaliação do incêndio para o modelo natural simplificado pode não representar efetivamente o tempo de duração do incêndio, visto que as características do ambiente em chamas podem impactar em uma fase de aquecimento inferior ou superior ao TRRF. Portanto, é plausível a colocação de um tempo de avaliação maior – no caso, 120 minutos – e avaliar a temperatura atingida pelos elementos estruturais para um TRRF de 60 minutos.

Desse modo, como ferramenta para determinação das curvas de incêndio padrão e natural, as planilhas do programa serão desprotegidas para futuras modificações e adequações aos interesses do usuário, havendo a verificação cautelosa de não alterar aspectos determinantes à execução do comando de construção dos resultados dos programas. Mais além, a Figura 3.1 abaixo exemplifica a aba "Incêndio Natural" e as outras telas visíveis ao usuário são apresentadas como o Apêndice A deste estudo.

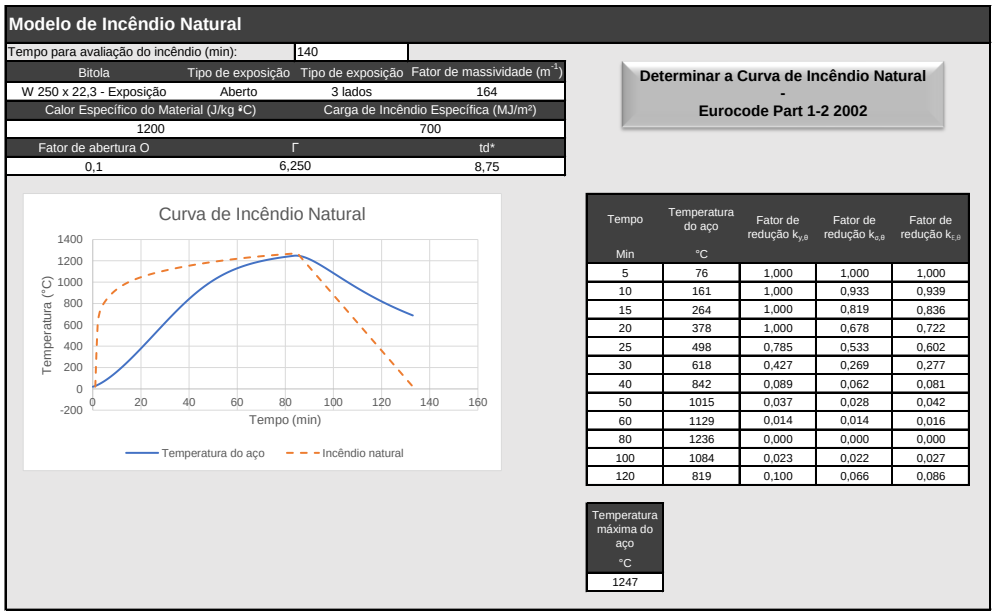


Figura 3.1 – Tela para determinação da curva de incêndio natural

A etapa seguinte refere-se efetivamente ao desenvolvimento dos códigos de programação necessários à execução dos comandos pertinentes ao projeto. Logo, os códigos de procedimentos foram subdivididos em módulos e *subs* como maneira de melhorar a organização da área de trabalho destinada à programação. Ao todo foram inseridos 4 módulos com suas respectivas *subs*, conforme a disposição a seguir:

- Módulo 1: o primeiro módulo foi elaborado para representar graficamente a curva de incêndio e a temperatura dos gases do modelo de incêndio padrão, bem como retornar o fator de massividade para o devido elemento metálico e os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade em um dado período de tempo e a uma dada temperatura. Tal módulo recebe a sub do Módulo 2, além de armazenar as seguintes *subs*:
  - *Sub* Valores_Gráfico: abriga os procedimentos para cálculo das elevações da temperatura dos gases e temperatura do aço a partir das equações já descritas nos itens 3.1.1 e 3.3.1 deste estudo, colocando tais resultados na aba "Cálculos". Além disso, há a execução em conjunto das *subs* subsequentes;
  - *Sub* Curva_Incêndio: trata-se das linhas de programação responsáveis pela seleção e formatação dos dados para a representação gráfica da curva de incêndio para os gases e para o perfil metálico, esta disposta na aba "Incêndio Padrão";
  - *Sub* Apagar_Conteúdo: esta *sub* destina-se à exclusão de dados previamente calculados pela execução anterior da *sub* Valores_Gráfico, haja vista que há a possibilidade de interferência dos dados prévios nos resultados das outras *subs*;
  - *Sub* Fator_Massividade: a seguinte *sub* é responsável por buscar o fator de massividade na aba "Base de dados" para o perfil metálico selecionado pelo usuário, de modo que tal *sub* deve ser aplicada anteriormente aos cálculos da elevação de temperatura do aço.
- Módulo II: o segundo módulo foi construído para determinar os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade conforme a elevação da temperatura do aço.
  - *Sub* Fator_Redução: é a única *sub* do módulo. Desse modo, a partir de um determinado tempo de incêndio definido pelo usuário na aba "Incêndio Padrão", é possível buscar o valor da temperatura do aço na aba "Cálculos" e determinar os fatores de redução de acordo com a proposição da Tabela 2.3 deste estudo. Os resultados são então dispostos na tabela da aba "Incêndio Padrão".

Os módulos 3 e 4 são similares aos módulos dispostos anteriormente, sendo elaborados para a representação do modelo de incêndio natural. Portanto, as principais alterações presentes no código de programação se referem somente à metodologia de cálculo da elevação da temperatura dos gases pelo incêndio natural – apresentada na seção 3.1.2 deste projeto – e à utilização das abas associadas ao incêndio natural – as abas "Incêndio Natural" e "Cálculos_Natural". A Figura 3.2 disposta abaixo retrata uma parcela do código de programação para elaboração dos dados do modelo de incêndio natural, responsável pelo cálculo do ramo de aquecimento do incêndio. Analogamente ao Apêndice A, as *subs* desenvolvidas no projeto são apresentadas como o Apêndice B.

```
Sheets("Incêndio Natural").Activate

i = Cells(3, 3).Value

td = Cells(9, 4).Value

fator_t = Cells(9, 2).Value

If Cells(3, 3).Value = "" Or Cells(3, 3).Value = 0 Then GoTo Pular

    ' Temperatura do aço, sendo a temperatura inicial igual a 20 graus Celsius
    teta_A = 20
    teta_G = 20

    Fator_Massividade_Natural

    fator = Cells(5, 4).Value

    Sheets("Cálculos_Natural").Activate

    Apagar_Conteúdo

    For t = 0 To i

    If teta_G > 0 Then

    texp = (t / 60) * fator_t

    If texp <= td Then

    ' Cálculo da temperatura dos gases no tempo "t"
    teta_G = 20 + 1325 * (1 - 0.324 * Exp(-0.2 * texp) - 0.204 * Exp(-1.7 * texp) - 0.472 * Exp(-19 * texp))
```

Figura 3.2 – Linhas de programação para ramo de aquecimento do incêndio natural

Novamente, é cabível assumir que o código de programação adotado no projeto pode ser otimizado para obter melhores resultados, bem como reduzir o número de linhas de programação, haja vista a possibilidade de adotar procedimentos distintos para um mesmo objetivo. Além disso, em adaptações ou análises futuras pode-se, por exemplo, adotar os valores de calor específico apresentados no item 2.2.2.1 ao invés do valor simplificado de 600 J/ kg °C. Por fim, deve-se elucidar que a versão utilizada para desenvolvimento das curvas de incêndio do programa Excel é a versão 2016, de modo que o funcionamento do programa em VBA está sujeito ao uso da mesma versão do Excel.

3.2. MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO

3.2.1. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA METÁLICA

O programa SAP2000 foi escolhido como o software adequado para a verificação do comportamento estrutural dos elementos metálicos quando sob situação de incêndio e para a consequente comparação entre os modelos de incêndio estudados. O SAP2000 é um programa de elementos finitos com interface 3D capaz de realizar integralmente modelagem, análise e dimensionamento de estruturas de diversos materiais, como concreto armado e elementos metálicos. Apesar da possibilidade de utilização de estruturas 3D no *software*, optou-se pela avaliação do desempenho estrutural e térmico de um pórtico 2D devido aos elevados esforços computacionais e tempos de execução dos comandos para a estrutura.

Desse modo, para a correta inserção dos parâmetros de projeto no software¸ foi definida a edificação a ser analisada. Optou-se pela verificação do comportamento estrutural de um edifício comercial com lajes maciças de concreto armado e vigas e pilares metálicos, destinado a escritórios com 7 pavimentos, pé direito de 2,85 m por andar e com dimensões em planta de 16,00 m por 14,00 m, conforme apresentado na Figura 3.3 abaixo.

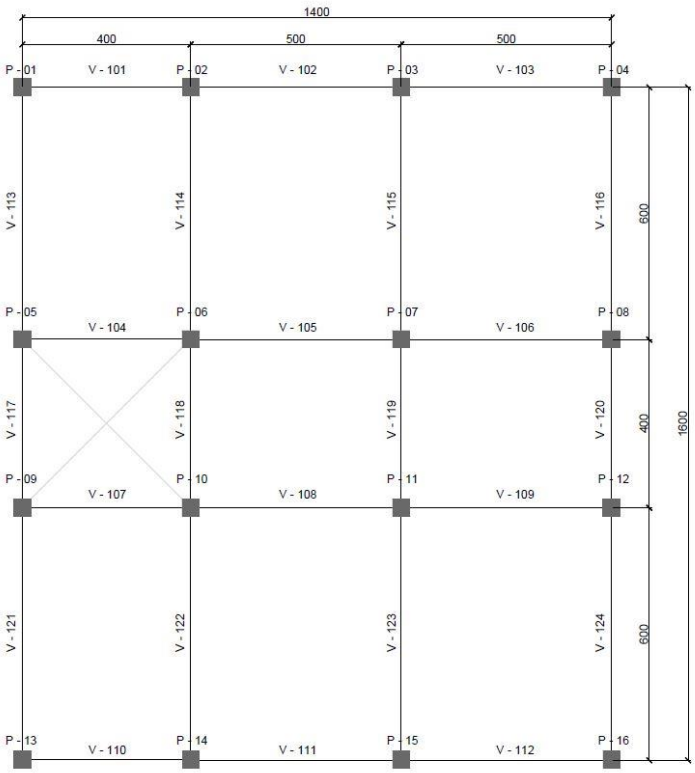


Figura 3.3 – Planta da edificação

Primeiramente, definiu-se o tipo de aço utilizado para os elementos metálicos a serem avaliados. Conforme os aços especificados de acordo com a NBR 8800:2008, optou-se pelo aço para perfis laminados de uso estrutural e geral MR250, que possui as seguintes propriedades mecânicas e térmicas explicitadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Propriedades do aço MR250

Propriedades	Símbolo	Valor	Unidade
Coeficiente de dilatação térmica	α	1,17E-05	$°C^{-1}$
Coeficiente de Poisson	v	0,30	-
Massa específica	ρ	7.850	kg/m³
Módulo de elasticidade	E	200.000	MPa
Resistência ao escoamento	f_y	250	MPa
Resistência à ruptura	f_u	400	MPa

Em seguida foi feita a determinação dos carregamentos atuantes na estrutura decorrentes do peso próprio, ação do vento e tipo de uso da edificação. Logo, lançou-se mão da NBR 6120:1980 para utilização do peso específico de determinados materiais, bem como a definição de valores mínimos de cargas verticais para o uso da edificação como escritório. Mais além, admitiu-se lajes de concreto armado com espessura de 15 cm revestidas de piso de tacos e forro de fibro-cimento, paredes de alvenaria de tijolos furados diretamente sob as vigas e a aplicação simplificada de carga de vento descendente sob as lajes de cada pavimento-tipo. Já para a cobertura, retirou-se o carregamento das paredes de alvenaria, do piso e do contrapiso, adicionando um carregamento associado ao telhado. As informações descritas estão resumidas nas Tabelas 3.2 e 3.3 a seguir.

Tabela 3.2 – Carregamentos atuantes nos pavimentos-tipo

Cargas atuantes nas lajes	Espessura (cm)	Peso Específico (kN/m³)	Carregamento (kN/m²)
Peso próprio - Laje de concreto armado	15,00	25,00	3,75
Revestimento de piso de tacos	-	-	0,70
Forro de fibro-cimento	0,60	-	0,18
Sobrecarga de uso e ocupação - Escritório	-	-	2,00
Ação do vento	-	-	2,00
Cargas atuantes nas vigas			
Peso próprio - Vigas metálicas	-	78,50	SAP2000
Tijolos furados 14x19x19 cm	14,00	13,00	1,82
Alvenaria - Argamassa de cimento e areia	6,00	21,00	1,26

Tabela 3.3 – Carregamentos atuantes na cobertura

Cargas atuantes nas lajes	Espessura (cm)	Peso Específico (kN/m³)	Carregamento (kN/m²)
Peso próprio - Laje de concreto armado	15,00	25,00	3,75
Forro de fibro-cimento	0,60	-	0,18
Telhado	-	-	0,40
Ação do vento	-	-	2,00
Cargas atuantes nas vigas			
Peso próprio - Vigas metálicas	-	78,50	SAP2000

Com os carregamentos atuantes apresentados nas tabelas acima, a próxima etapa é referente à distribuição das cargas aplicadas nas lajes para as vigas adjacentes a partir da determinação das reações de apoio das lajes. A NBR 6118:2014 indica o chamado processo das áreas para definição das reações de apoio para lajes maciças, havendo a consideração das reações serem uniformemente distribuídas ao longo do comprimento das vigas de apoio. Logo, a Figura 3.4 diz respeito às áreas de contribuição de cada laje para as vigas adjacentes.

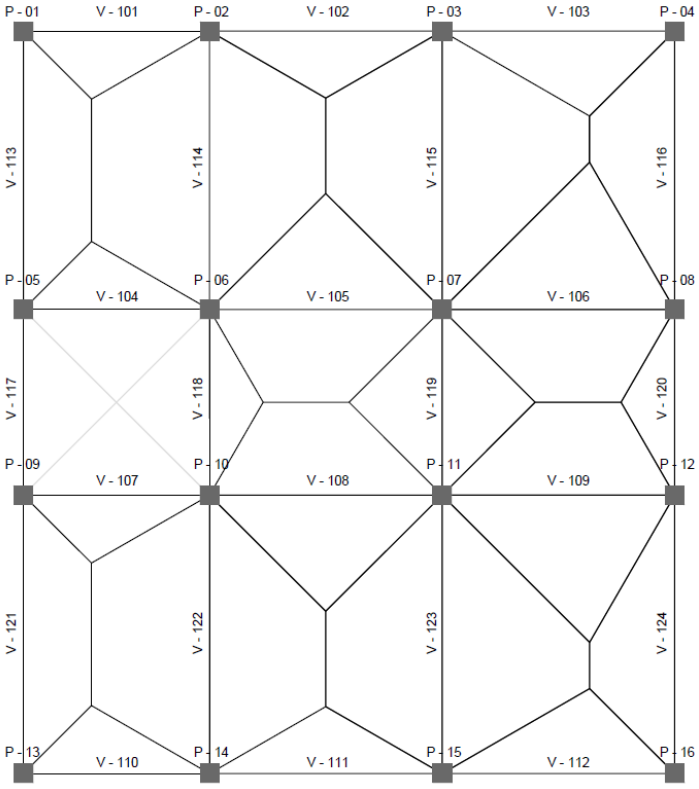


Figura 3.4 – Área de contribuição das lajes para vigas adjacentes

Como as componentes dos carregamentos são iguais para as lajes de um mesmo pavimento, a análise das áreas de contribuição da planta da Figura 3.4 indica que o pórtico composto pelas vigas 115, 119 e 123 é o mais solicitado da edificação, além de ser um pórtico simétrico. Desse modo, tal estrutura 2D foi selecionada para avaliação do comportamento estrutural da edificação e o carregamento final para cada viga de interesse é apresentado na Tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4 – Carregamento uniformemente distribuído nas vigas

Pavimento-tipo						
Viga	Comprimento (m)	Área de contribuição (m²)	Ações Permanentes (kN/m)	Ações Variáveis - Sobrecarga (kN/m)	Ações Variáveis - Vento (kN/m)	Total (kN/m)
115	6,00	21,17	25,11	7,06	7,06	39,22
119	4,00	8,00	18,04	4,00	4,00	26,04
123	6,00	21,17	25,11	7,06	7,06	39,22
Cobertura						
Viga	Comprimento (m)	Área de contribuição (m²)	Ações Permanentes (kN/m)	Ações Variáveis - Sobrecarga (kN/m)	Ações Variáveis - Vento (kN/m)	Total (kN/m)
115	6,00	21,17	15,27	7,06	7,06	29,38
119	4,00	8,00	8,66	4,00	4,00	16,66
123	6,00	21,17	15,27	7,06	7,06	29,38

As ações permanentes são dadas pela multiplicação dos carregamentos do peso da laje de concreto armado e dos revestimentos inferior e superior pela área de contribuição da laje, adicionando-se a carga uniformemente distribuída das paredes de alvenaria aplicada diretamente ao longo do comprimento da viga. Já as ações variáveis são dadas pela multiplicação da área de contribuição pelo carregamento correspondente (sobrecarga ou vento).

A etapa seguinte é definida pela utilização da combinação de ações mais crítica para a estrutura, porém é importante ressaltar que devem ser avaliadas uma primeira combinação última normal associada à temperatura ambiente anterior à situação de incêndio – determinada pelas diretrizes da NBR 8681:2003 para dimensionamento de estruturas metálicas – e uma combinação para o fenômeno de incêndio, disposta na NBR 14323:2013. A primeira combinação é usada para o dimensionamento dos elementos metálicos da edificação, sendo que a análise prévia das

combinações disponíveis na NBR 8681:2003 identificou a seguinte configuração de esforços – equação (3.1) – como a mais crítica:

$$F_d=1,5\ F_{Gi,k}+1,5\ F_{Q,k}+0,98\ F_{W,k} \quad (3.1)$$

onde:

F_d é o valor de cálculo das ações;

$F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes;

$F_{Q,k}$ é o valor característico para a ação variável de uso e ocupação;

$F_{W,k}$ é o valor característico para a ação variável de vento.

O próximo passo é a modelagem efetiva da edificação no *software SAP2000*, já que as informações até então obtidas são suficientes para representar a estrutura e permitir o dimensionamento dos perfis metálicos. Assim, o aço MR250 foi atribuído aos elementos estruturais, designou-se uma lista de perfis metálicos W para as vigas e perfis HP para os pilares, aplicou-se as cargas uniformemente distribuídas nas vigas e definiu-se a combinação prevista na equação (3.1). Mais além, o edifício foi construído adotando-se ligações rígidas para as conexões pilar-viga, bem como os pilares que nascem possuem restrições em todas as direções.

O processo final para o dimensionamento é a definição da seção transversal dos elementos metálicos, realizado de maneira automática pelo *software SAP2000*. Partindo da pré-seleção dos perfis metálicos presentes nas listas de perfis W e HP e da combinação última normal de carregamento – ou seja, para a temperatura ambiente –, o programa efetua o dimensionamento baseando-se na especificação AISC 360-10, a especificação estadunidense de 2010 do *American Institute of Steel Construction* (Instituto Americano de Construção em Aço) que define as diretrizes para dimensionamento de estruturas metálicas seja pela metodologia das tensões admissíveis, como pela metodologia dos estados limites.

Ainda que haja divergências quanto aos procedimentos normativos da AISC 360-10 e da NBR 8800:2008, entende-se que o dimensionamento pela especificação estadunidense é mais conservador, garantindo de certo modo a integridade da estrutura quando avaliada pela norma brasileira e que os perfis selecionados pelo programa foram admitidos como referências iniciais para a real seleção dos elementos estruturais. A última colocação pode ser confirmada pelo fato de que, após um teste inicial com a aplicação do incêndio padrão, a estrutura dimensionada pelo *SAP2000* apresentou o colapso da viga avaliada em apenas 5 minutos de incêndio, de modo que

foi necessária a alteração das seções de determinados elementos. Mais além, ainda que o dimensionamento prévio tenha sido realizado com base na AISC 360-10, a verificação do comportamento térmico e estrutural e a determinação dos esforços resistentes serão respaldadas nas diretrizes das normas brasileiras.

Logo, a configuração dos perfis metálicos adotada para o projeto encontra-se representada na Figura 3.5 abaixo, enquanto as características das seções transversais utilizadas estão dispostas na Tabela 3.5.

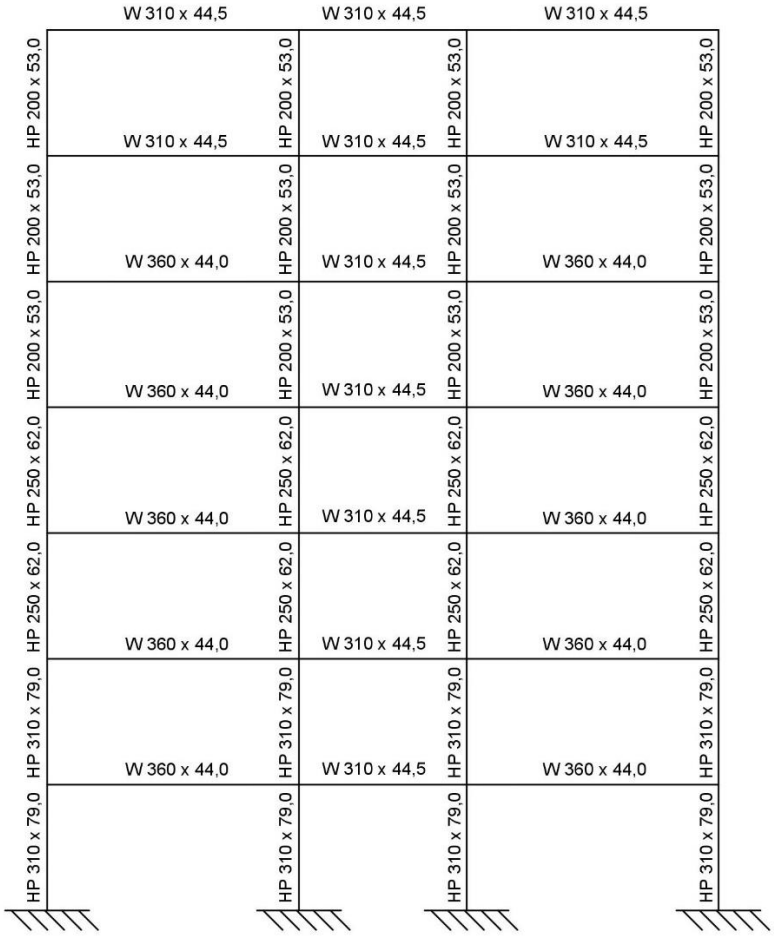


Figura 3.5 – Configuração dos perfis metálicos da estrutura

Tabela 3.5 – Características das seções transversais

Perfil metálico	Massa Linear	Altura do Perfil (h)	Altura da Alma (h_0)	Espessura da Alma (t_0)	Largura das Abas (b_f)	Espessura das Abas (t_f)	Área da Seção	Perímetro
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm²	cm
W 310 x 44,5	44,50	313	291	6,6	166	11,2	57,20	126
W 360 x 44,0	44,00	352	332	6,9	171	9,8	57,70	135
HP 200 x 53,0 (H)	53,00	204	81	11,3	207	11,3	68,10	120
HP 250 x 62,0 (H)	62,00	246	225	10,5	256	10,7	79,60	147
HP 310 x 79,0 (H)	79,00	299	277	11,0	306	11,0	100,00	177

As informações pertinentes restantes das devidas seções transversais para o cálculo dos esforços resistentes como momentos de inércia, raios de giração, módulo plástico *Z*, módulo resistente elástico da seção *W*, entre outras, encontram-se em PFEIL (2009).

3.2.2. APLICAÇÃO DO FENÔMENO DE INCÊNDIO

Ao final das etapas de modelagem e dimensionamento da estrutura, seguiu-se para a simulação do incêndio. Desse modo, lançou-se mão dos programas desenvolvidos para os perfis metálicos selecionados para vigas e pilares da edificação. Optou-se pela seleção do compartimento central do segundo andar como ambiente exposto às chamas, realizando-se a simulação através da aplicação da variação térmica e os fatores de redução para os pilares centrais e a viga superior do compartimento. Para isso, foram definidos períodos de tempo que pudessem representar a evolução do incêndio para ambos os perfis metálicos, entendendo-se que para um mesmo tempo, a elevação da temperatura para os pilares é distinta da elevação da temperatura para a viga, haja vista que as condições de exposição ao fogo são diferentes para cada elemento.

Além disso, é válido acrescentar as seguintes considerações para a simulação:

- Tendo em vista a alta complexidade e a necessidade de maior conhecimento acerca da propagação do incêndio para ambientes adjacentes, bem como as limitações do *software*, admitiu-se que o incêndio é controlado e somente o ambiente central está exposto ao fogo;
- Admitiu-se como temperatura inicial a temperatura ambiente (20 °C). Como a temperatura inicial dos elementos metálicos no *software SAP2000* é igual a 0 °C, os valores aplicados nos pilares e vigas referem-se à variação térmica entre a temperatura do aço em um dado tempo e a temperatura de 20 °C.

Conforme disposto na NBR 14323:2013, as combinações de ações para os estados-limites últimos em situação de incêndio são consideradas como combinações últimas excepcionais e obtidas de acordo com a NBR 8681:2003. Assim, para o fenômeno de incêndio, a combinação de ações para locais em que há elevadas concentrações de pessoas (no devido caso, escritórios) é dada pela equação (3.2):

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + 0{,}28\, F_{Q,k} \qquad (3.2)$$

onde:

$F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes diretas;

$F_{Q,exc}$ é o valor característico das ações térmicas decorrentes do incêndio;

$F_{Q,k}$ é o valor característico das ações variáveis de uso e ocupação do edifício;

γ_{gi} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes. Para o devido projeto, em que as ações permanentes diretas estão agrupadas e as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação não superam 5 kN/m², o valor do coeficiente é igual a 1,20.

Portanto, percebe-se pela equação acima que os esforços solicitantes últimos são constantemente modificados pela variação térmica imposta pelo incêndio, seja pelo próprio componente $F_{Q,exc}$ da equação, como pela redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade dos elementos expostos às chamas. Assim, para cada temperatura a ser analisada, novos cálculos para determinação da combinação de ações devem ser efetuados. Mais além, é importante salientar que a devida combinação deve ser atribuída para todos os elementos estruturais, mesmo os que não estejam diretamente expostos às chamas, com a justificativa de que os novos carregamentos e consequentes redistribuições de esforços estão fundamentalmente relacionados com os esforços decorrentes da restrição à dilatação dos elementos metálicos pela elevação da temperatura, como também com os fatores de redução do aço.

Finalmente, para cada período de tempo definido anteriormente, há a aplicação da variação da temperatura e os valores da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade para os elementos de interesse e são gerados os diagramas dos esforços solicitantes de toda a estrutura. Os resultados são então comparados com os esforços resistentes de cálculo para os elementos estruturais expostos ao incêndio conforme as verificações apresentadas na seção 3.4 e explicitadas de maneira completa na NBR 14323:2013 e na NBR 8800:2008. Já os esforços resistentes do restante dos elementos foram obtidos a partir das prescrições em temperatura ambiente da norma NBR 8800:2008.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A devida seção destinou-se à concretização dos resultados obtidos para o programa das curvas de incêndio padrão e natural e para a simulação de incêndio na estrutura definida a partir do *SAP2000*, bem como a discussão e análise de tais resultados.

Com a definição prévia da estrutura como uma edificação comercial de 7 pavimentos com escritórios e altura total de 21,00 m, a NBR 14432:2000 classifica o edifício no grupo D e na divisão D-1, possuindo um TRRF igual a 60 minutos. Com o propósito de melhor compreensão e aplicação dos conhecimentos adquiridos, optou-se por avaliar o comportamento estrutural e térmico da edificação para o tempo de 120 minutos.

Uma primeira etapa associada à obtenção dos resultados se tratou da abordagem para seleção de fatores de massividade representativos para os perfis metálicos. A NBR 14323:2013 admite a aplicação conservadora da área A_g do cálculo do fator de massividade como apenas a parte da área total delimitada pelo perímetro exposto ao fogo, de modo que tal sugestão foi adotada no projeto de acordo com a Figura 4.1, simplificando as condições dos pilares centrais para paredes de alvenaria somente na direção do pórtico estudado.

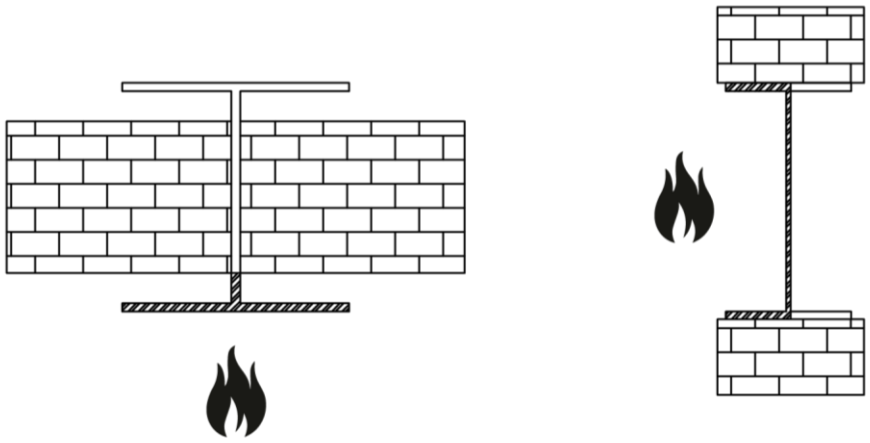


Figura 4.1 – Definição dos fatores de massividade para os pilares centrais (à esquerda) e para a viga (à direita)

Portanto, os casos admitidos para os perfis metálicos foram adicionados à base de dados do programa em VBA, alterando-se somente as áreas e perímetros para cálculo do devido fator de massividade. Os novos dados são apresentados na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 – Fatores de massividade adotados para os perfis metálicos

Perfil Metálico	Área Ag cm²	Perímetro u cm	Fator de Massividade m^{-1}
W 310 x 44,5	38,54	47,28	123
HP 310 x 79,0 (H)	37,90	70,00	185

Com os perfis metálicos selecionados para a viga e os pilares expostos ao incêndio, o programa gerou as curvas de incêndio padrão e incêndio natural para ambos, bem como os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade. A partir desta etapa, é de interesse do estudo seccionar os resultados de acordo com o modelo de incêndio aplicado na estrutura e apresentar discussões e conclusões ao final desta seção.

4.1. ESTRUTURA SOB INCÊNDIO PADRÃO

O modelo de incêndio padrão gerou as representações gráficas dispostas nas Figura 4.2 e Figura 4.3 para os elementos metálicos adotados no estudo. Os gráficos, ainda que não nitidamente, indicam que o perfil dos pilares apresenta uma elevação de temperatura maior nos minutos iniciais do incêndio, porém com a evolução do incêndio as temperaturas atingidas pela viga e pelos pilares são cada vez mais próximas.

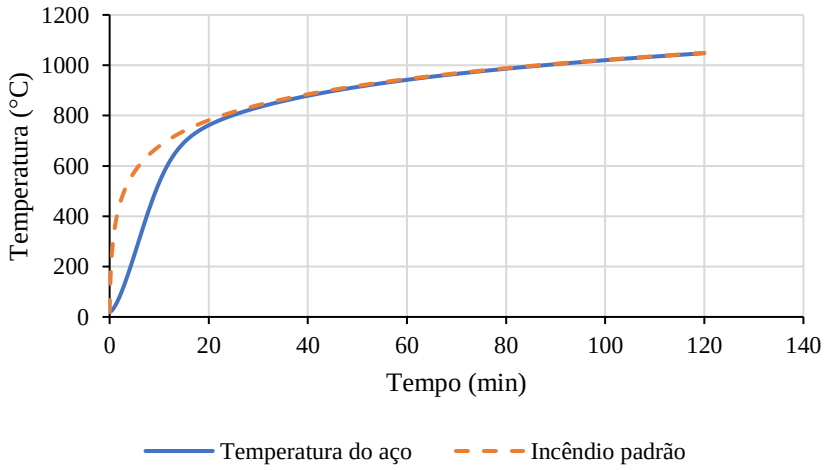


Figura 4.2 – Incêndio padrão para o perfil HP 310 x 79,0 (pilares centrais)

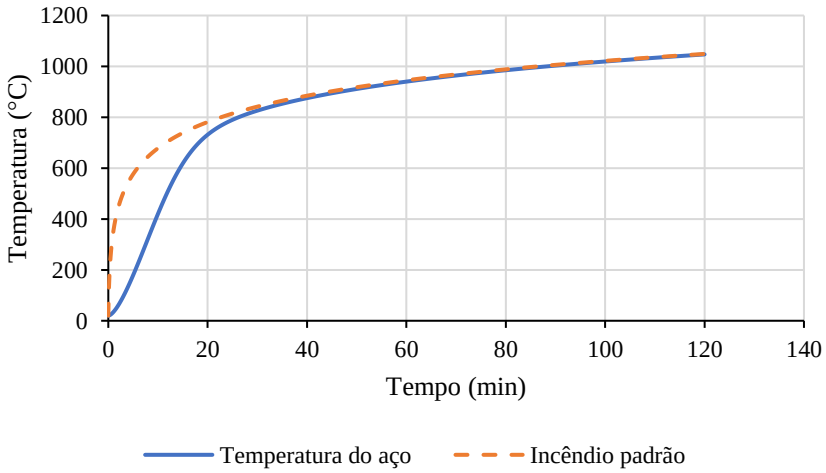


Figura 4.3 – Incêndio padrão para o perfil W 310 x 44,5 (viga)

Além disso, a Tabela 4.2 traz os períodos de tempo selecionados para aplicação no programa *SAP2000* e os respectivos parâmetros a serem considerados para a simulação de incêndio.

Tabela 4.2 – Elevação de temperatura e fatores de redução em função do tempo para viga (à esquerda) e pilares centrais (à direita)

Tempo	Temperatura do aço	Fator de redução	Fator de redução	Fator de redução
Min	°C	ky,θ	kσ,θ	kE,θ
0	20	1,000	1,000	1,000
5	179	1,000	0,913	0,921
10	420	0,955	0,626	0,680
15	619	0,425	0,268	0,277
20	732	0,192	0,111	0,117
25	790	0,122	0,076	0,094
30	826	0,097	0,065	0,084
40	875	0,072	0,055	0,073
50	911	0,058	0,048	0,065
60	940	0,052	0,042	0,059
80	985	0,043	0,033	0,048
100	1019	0,036	0,028	0,041
120	1047	0,031	0,025	0,035

Tempo	Temperatura do aço	Fator de redução	Fator de redução	Fator de redução
Min	°C	ky,θ	kσ,θ	kE,θ
0	20	1,000	1,000	1,000
5	247	1,000	0,838	0,853
10	534	0,675	0,452	0,502
15	693	0,248	0,143	0,143
20	762	0,156	0,093	0,105
25	802	0,109	0,070	0,090
30	833	0,094	0,063	0,083
40	879	0,071	0,054	0,073
50	914	0,057	0,047	0,065
60	942	0,052	0,042	0,058
80	986	0,043	0,033	0,048
100	1020	0,036	0,028	0,041
120	1048	0,030	0,025	0,034

Os fatores de redução foram então multiplicados pelo módulo de elasticidade e pela resistência ao escoamento – a depender se o elemento metálico estava ou não sujeito a flambagem local – e juntamente com a variação de temperatura, foram aplicados no pórtico 2D para simulação do incêndio. Para cada intervalo de tempo, coletou-se os esforços solicitantes para as vigas 215, 219 – visto que se avaliou o segundo andar da estrutura – e para os pilares 03 e 07, bem como efetuou-se os cálculos para obtenção dos esforços resistentes de acordo com as prescrições da NBR 14323:2013 e da NBR 8800:2008. As Tabelas 4.3 e 4.4 abaixo indicam os esforços solicitantes e os esforços resistentes para o ambiente em situação de incêndio, ao passo que os resultados para a viga 215 e para o pilar 03 são apresentados no Apêndice C deste estudo.

Cabe novamente ressaltar que os cálculos são desenvolvidos pela análise de elementos em barra isolados, de modo que as contribuições positivas e negativas da interação das estruturas não são ponderadas para determinação dos esforços resistentes de cálculo.

Tabela 4.3 – Comportamento estrutural da viga

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-1,26	830,17	46,61	309,87	-37,08	96,33
5	179	-77,95	830,17	46,61	309,87	-40,79	96,33
10	420	-179,01	519,38	46,61	296,02	-40,59	92,03
15	619	-213,45	222,88	46,61	131,85	-32,53	40,99
20	732	-212,62	92,21	46,61	59,54	-31,38	18,51
25	790	-213,81	63,08	46,61	37,79	-31,14	11,75
30	826	-215,45	53,78	46,61	30,04	-31,05	9,34
40	875	-216,55	45,61	46,61	22,42	-30,94	6,97
50	911	-215,07	39,63	46,61	17,89	-30,86	5,56
60	940	-211,95	34,84	46,61	16,10	-30,80	5,01
80	985	-203,08	27,41	46,61	13,33	-30,73	4,14
100	1.019	-192,29	23,31	46,61	11,20	-30,68	3,48
120	1.047	-180,36	21,00	46,61	9,48	-30,64	2,95

Tabela 4.4 – Comportamento estrutural dos pilares centrais

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-828,18	2.076,71	22,79	493,35	-34,35	226,04
5	247	-858,92	2.076,71	3,69	493,35	-6,06	226,04
10	534	-894,92	1.983,89	-16,80	471,30	25,23	215,94
15	693	-889,13	514,76	-12,76	122,29	20,27	56,03
20	762	-883,58	323,89	-10,43	76,95	15,67	35,25
25	802	-879,34	253,29	-9,55	60,17	15,40	27,57
30	833	-878,27	201,34	-9,19	47,83	14,84	21,92
40	879	-874,74	150,26	-8,53	35,70	13,83	16,36
50	914	-869,91	119,90	-7,87	28,48	12,82	13,05
60	942	-863,94	107,92	-7,24	25,64	11,85	11,75
80	986	-849,87	89,33	-6,13	21,22	10,14	9,72
100	1.020	-833,72	75,08	-5,23	17,84	8,74	8,17
120	1.048	-815,43	63,52	-4,48	15,09	7,59	6,91

É interessante observar que a dilatação térmica ocasionada pela elevação da temperatura gera esforços de compressão em todas as vigas do pavimento onde ocorre o incêndio, superiores aos esforços de tração, devendo-se avaliar a possibilidade de flambagem local. A relação entre

altura e espessura de 44,09 da seção transversal da viga é maior que a relação *(b/t)* limite para situação de incêndio disposto na NBR 14323:2013, igual a 35,82, logo utilizou-se o fator de redução para elementos sujeitos à flambagem local $k_{\sigma,\theta}$ e a área efetiva da seção transversal para determinação dos esforços resistentes de compressão.

É válido ressaltar que os valores obtidos nas tabelas acima não consideraram a determinação da temperatura crítica de cada elemento estrutural para a qual há o esgotamento da sua capacidade resistente. Mais além, a avaliação da resistência dos elementos não deve ser feita somente para cada esforço individual, mas sim para a combinação de esforços solicitantes. Ainda que o exemplo de aplicação apresentado no tópico 2.5 indique o cálculo da temperatura crítica para um esforço axial de tração, as situações mais usuais envolvem mais de um tipo de esforço solicitante, de forma que se utilizou as interações dispostas no item 2.4.5 como diretrizes da verificação estrutural dos elementos metálicos.

Assim, como metodologia para cálculo da temperatura crítica, as células destacadas das tabelas acima identificam o primeiro momento no qual as combinações de esforços solicitantes excedem o limite de 1,00, tendo a força axial de compressão como esforço crítico e direcionador do comportamento estrutural dos pilares e a flexo-compressão da viga excedendo o limite estabelecido. Com isso, torna-se possível delimitar a temperatura crítica para cada elemento metálico e aplicar fatores de redução nulos para os intervalos subsequentes do incêndio.

Primeiramente, definiu-se a temperatura crítica dos pilares centrais. Para a combinação de esforços da inequação (2.42) – visto que a razão entre a força axial solicitante $N_{fi,Sd}$ e a força axial resistente $N_{fi,Rd}$ é maior que 0,2 para o tempo de incêndio de 15 minutos – e que o estado limite de flambagem lateral com torção (FLT) é o mais crítico para o momento fletor, determina-se o fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$:

$$\left(\frac{8}{9} \text{x} \frac{M_{fi,Sd}}{k\, M_y} + \frac{N_{fi,Sd}}{\chi_{fi}\, A_g\, f_y}\right) \text{x} \left(\frac{1}{k_{y,\theta}}\right) \leq 1{,}00 \qquad (4.1)$$

$$k_{y\theta} \geq \frac{8}{9} \text{x} \frac{M_{fi,Sd}}{k\, \chi_{fi} M_{pl}} + \frac{N_{fi,Sd}}{\chi_{fi}\, A_g\, f_y}$$

$$k_{y\theta} \geq 0{,}5079$$

Lançando mão da equação (2.46), obtém-se a temperatura crítica atingida pelo perfil metálico:

$$\theta_{a,cr} = 39{,}19 \ln\left[\frac{1}{0{,}9674 \text{ x } 0{,}5079^{3{,}833}} - 1\right] + 482$$

$\theta_{a,cr}$= 582,14 °C para o tempo de incêndio aproximado de 11,17 minutos

Já para a viga, a combinação de esforços também é definida pela inequação (2.42), no entanto, pelo fato da viga estar sujeita à flambagem local, o fator de redução da resistência ao escoamento passa a ser $k_{\sigma,\theta}$ para o esforço axial, o que inviabiliza a utilização da solução adotada acima para calcular o fator de redução mínimo e em seguida a temperatura crítica. Assim, seria necessário avaliar diversos períodos anteriores ao tempo de 15 minutos tanto pelo programa desenvolvido no VBA como pelo *SAP2000* para aproximar o ponto crítico que satisfaz a inequação em seu limite. Dessa forma, não foi possível obter a temperatura crítica exata para a viga, porém sabe-se que é próxima a 549 °C e ocorre num tempo próximo aos 13 minutos do incêndio padrão.

Cabe apontar que o fator de correção *k* que considera o efeito benéfico da distribuição não uniforme da temperatura na seção foi adotado como igual a 1,0, visto que as configurações de exposição às chamas dos elementos estruturais do projeto não são abordadas na NBR 14323:2013 para selecionar o valor do fator *k*.

Assim sendo, novas configurações de esforços foram obtidas pelo programa *SAP2000*, resumidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 para os mesmos elementos estruturais definidos anteriormente, avaliando o comportamento para o instante imediatamente após a perda de resistência dos pilares centrais e após a temperatura crítica da viga (12 e 13 minutos, respectivamente).

Tabela 4.5 – Comportamento estrutural da viga adotando a temperatura crítica

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-1,26	830,17	46,61	309,87	-37,08	96,33
5	179	-77,95	830,17	46,61	309,87	-40,79	96,33
10	420	-179,01	519,38	46,61	296,02	-40,59	92,03
12	509	-50,37	422,06	46,61	232,68	110,05	72,33
13	549	0,00	0,00	46,61	0,00	-46,61	0,00

Tabela 4.6 – Comportamento estrutural dos pilares centrais adotando a temperatura crítica

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-828,18	2.076,71	22,79	493,35	-34,35	226,04
5	247	-858,92	2.076,71	3,69	493,35	-6,06	226,04
10	534	-894,92	1.983,89	-16,80	471,30	25,23	215,94
12	614	-2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

As células destacadas indicam o colapso do elemento estrutural, de modo que os pilares centrais romperam anteriormente à viga, e esta também colapsou por meio da redistribuição dos esforços ocasionada após a perda da capacidade resistente dos pilares, anteriormente ao alcance de sua temperatura crítica calculada. Mais além, é perceptível que os esforços axiais solicitantes da viga se tornaram consideravelmente menores após a redistribuição de esforços, ao passo que o momento fletor aumentou significativamente. Não obstante, é importante a avaliação dos outros elementos estruturais após a ruptura dos pilares centrais do pavimento, sendo tal avaliação feita pela verificação dos esforços solicitantes para o pilar 03 e a viga 215 e disposta nas Tabelas 4.7 e 4.8 a seguir.

Tabela 4.7 – Comportamento estrutural da viga 215

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-9,02	532,75	98,39	364,32	-92,71	196,08
5	20	-44,20	532,75	102,66	364,32	-105,51	196,08
10	20	-95,47	532,75	107,57	364,32	-125,80	196,08
12	20	-169,04	532,75	-243,14	364,32	-575,25	196,08
13	20	566,50	532,75	-238,62	364,32	-566,50	196,08

Tabela 4.8 – Comportamento estrutural do pilar 03

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-559,77	2.500,00	-34,97	493,35	53,36	302,53
5	20	-529,02	2.500,00	-49,76	493,35	75,02	302,53
10	20	-493,03	2.500,00	-72,55	493,35	109,47	302,53
12	20	-1.385,12	2.500,00	-252,46	493,35	488,74	302,53
13	20	-1.385,12	2.500,00	-236,66	493,35	461,11	302,53

Percebe-se que ambos elementos estruturais rompem por flexão, com esforços solicitantes significativamente maiores que os esforços resistentes. Assim, é possível concluir que o colapso dos pilares centrais ocasionou o colapso dos outros elementos estruturais do pavimento. Como forma de avaliação do comportamento geral da estrutura, foi gerada a representação dos diagramas de momento fletor para toda a estrutura pelo programa *SAP2000*¸ conforme a Figura 4.4 a seguir.

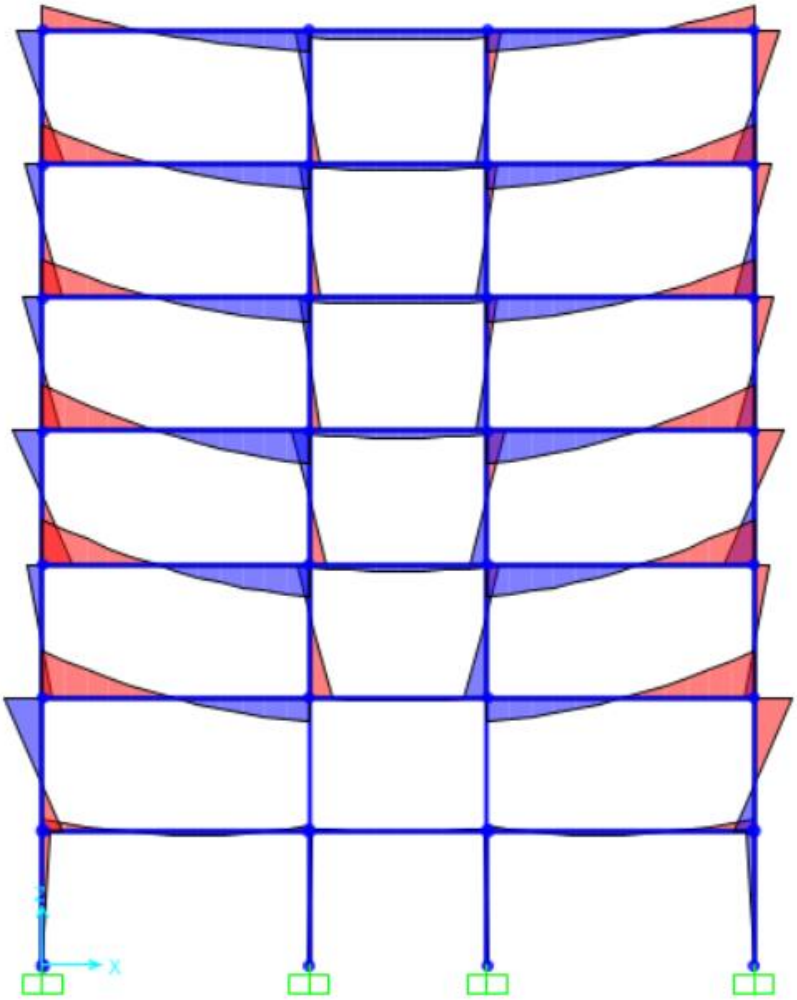


Figura 4.4 – Diagrama de momentos fletores após o colapso do compartimento

É importante observar a inversão do momento nas extremidades internas das vigas adjacentes às vigas centrais, dada pela alteração da configuração de rigidez nas devidas conexões, bem como os valores significativamente altos para os momentos fletores das vigas externas. Mais além, pelo fato dos carregamentos serem idênticos para os pavimentos superiores e das seções transversais das vigas superiores serem menos robustas, há grande possibilidade de colapso progressivo dos pilares e vigas externos destes pavimentos. Também deve-se avaliar que, em uma situação real de ruptura dos pilares de um pavimento, espera-se o colapso das estruturas acima deste.

Quanto ao incêndio padrão em si e à elevação da temperatura do aço, a edificação não satisfaz o quesito de segurança em situação de incêndio, haja vista que o primeiro elemento rompeu para o tempo de incêndio aproximado de 11 minutos, ao passo que o TRRF para o edifício

comercial é de 60 minutos, como também a temperatura atingida pelos elementos metálicos aos 60 minutos é superior à temperatura crítica dos perfis expostos ao fogo. Para tais resultados, é essencial avaliar duas opções disponíveis em concordância com o fluxograma da Figura 2.10: (1) alterar o dimensionamento para seleção de perfis metálicos mais robustos, o que pode inviabilizar economicamente a construção da estrutura metálica, assim como irá superdimensionar a estrutura para as combinações últimas normais de carregamento ou (2) aplicar um revestimento contra fogo para cumprimento do TRRF.

Portanto, como tentativa de satisfazer os requisitos térmicos e estruturais da edificação quando sob situação de incêndio, optou-se por consultar o Anexo B para adoção de uma espessura recomendável para a argamassa de vermiculita, material escolhido para proteção contra o incêndio. Admitindo os fatores de massividade da Tabela 4.1 para as configurações de exposição às chamas do compartimento, optou-se pela espessura de 20 mm para os pilares centrais e de 16 mm para a viga superior. Em vista do fato do programa desenvolvido pelo VBA não incluir a construção da curva de incêndio para elementos com revestimento contra fogo, a elevação da temperatura do aço foi calculada em uma planilha distinta do programa Excel a partir das diretrizes descritas na seção 2.3.2 deste projeto.

Desse modo, as Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados do modelo de incêndio padrão para as configurações supracitadas, além de apresentar a elevação da temperatura dos perfis sem a proteção térmica adotada.

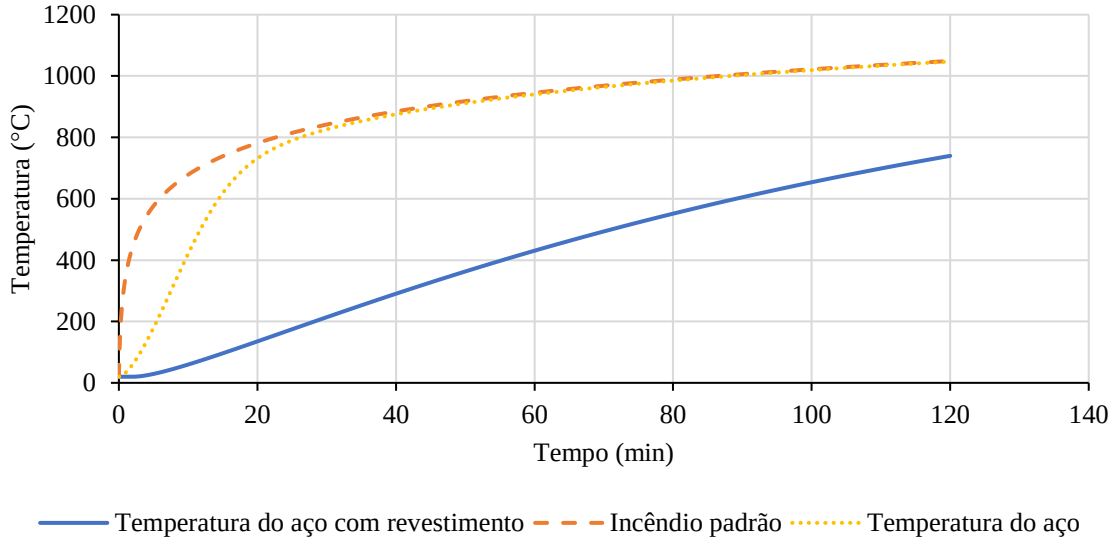


Figura 4.5 – Incêndio padrão para pilares centrais com proteção térmica

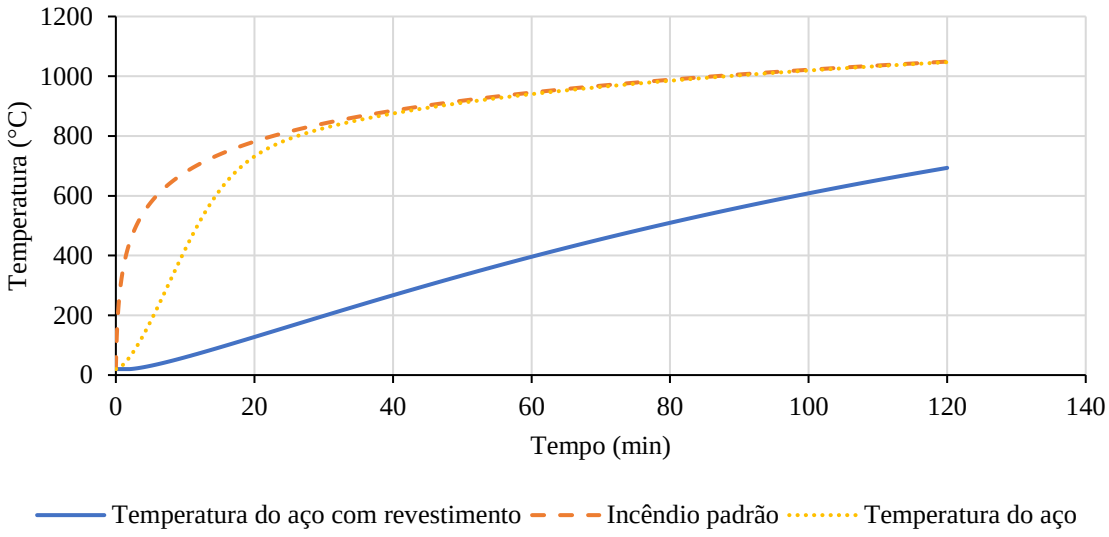


Figura 4.6 – Incêndio padrão para viga com proteção térmica

Para obtenção dos valores interpolados dos fatores de redução, foi possível utilizar a *sub* Fator_Redução do Módulo 2 na planilha destinada ao cálculo da elevação de temperatura para elementos com revestimento de proteção contra fogo. Assim, os resultados são apresentados na Tabela 4.9 a seguir.

Tabela 4.9 – Elevação de temperatura da viga (à esquerda) e dos pilares centrais (à direita) revestidos com argamassa de vermiculita

Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução ky,θ	Fator de redução kσ,θ	Fator de redução kE,θ
5	31	1,000	1,000	1,000
10	60	1,000	1,000	1,000
15	93	1,000	1,000	1,000
20	128	1,000	0,969	0,972
25	163	1,000	0,931	0,937
30	198	1,000	0,892	0,902
40	267	1,000	0,816	0,833
50	334	1,000	0,736	0,766
60	396	1,000	0,655	0,704
80	510	0,750	0,508	0,572
100	608	0,450	0,286	0,295
120	693	0,246	0,141	0,142

Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução ky,θ	Fator de redução kσ,θ	Fator de redução kE,θ
5	29	1,000	1,000	1,000
10	60	1,000	1,000	1,000
15	96	1,000	1,000	1,000
20	135	1,000	0,961	0,965
25	175	1,000	0,918	0,925
30	214	1,000	0,875	0,886
40	290	1,000	0,791	0,810
50	363	1,000	0,698	0,737
60	431	0,933	0,613	0,669
80	551	0,621	0,412	0,451
100	654	0,341	0,209	0,213
120	740	0,182	0,106	0,114

Os valores apresentados acima indicam que a espessura maior do revestimento dos pilares centrais gera um retardo superior na elevação da temperatura para os períodos iniciais do incêndio, porém, o fator de massividade é preponderante para definir maiores taxas de variação de temperatura. Em sequência, optou-se pela representação gráfica dos resultados coletados para os esforços solicitantes dos elementos estruturais expostos ao fogo e para os esforços

resistentes calculados. As Figuras 4.7 e 4.8 expõem os esforços para a viga superior, ao passo que as Figuras 4.9 e 4.10 dispõem os esforços dos pilares centrais.

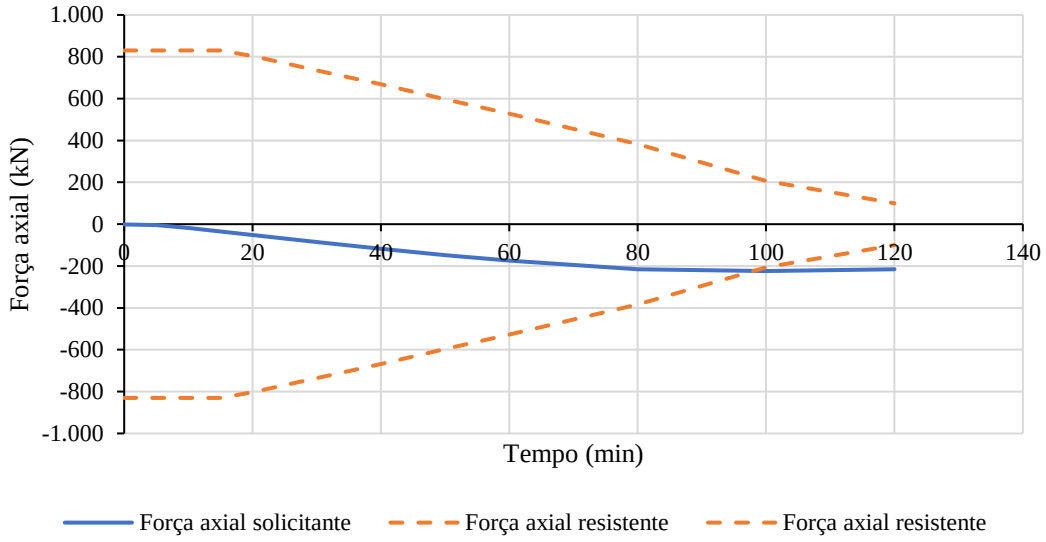


Figura 4.7 – Força axial para viga superior

As retas representativas da força axial resistente na Figura 4.7 indicam a degradação das propriedades mecânicas do aço e a ruptura do elemento por compressão, para o tempo de incêndio próximo a 100 minutos e temperatura de 608 °C, ao passo que a avaliação individual do momento fletor solicitante indicaria o colapso por flexão para o tempo próximo a 100 minutos, conforme verificado na Figura 4.8. Desse modo, a combinação de esforços para um período anterior a 100 minutos resulta na perda do desempenho estrutural da viga. No entanto, a aplicação do revestimento de proteção térmica permitiu a resistência da viga para o TRRF de 60 minutos, sendo prolongada para tempos de incêndio superiores a 80 minutos.

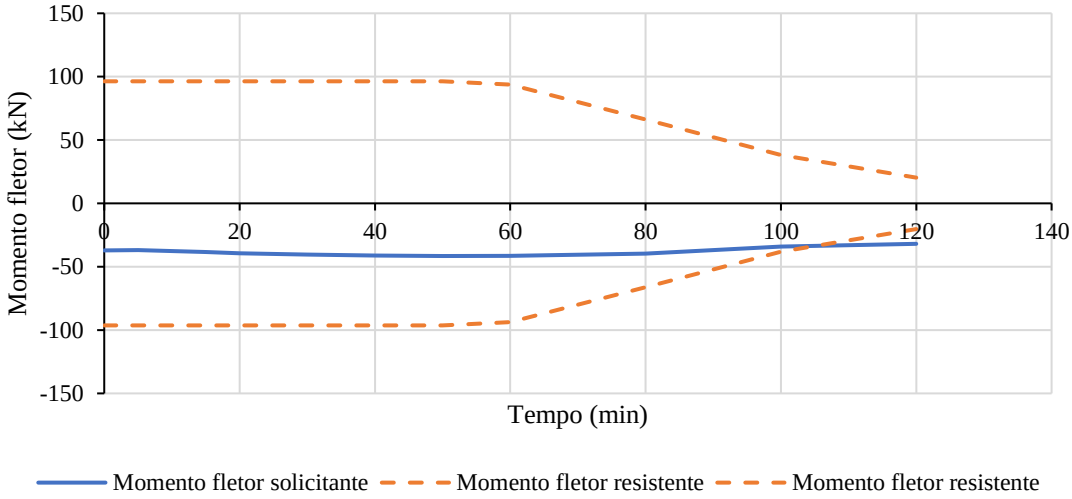


Figura 4.8 – Momento fletor para viga superior

O comportamento estrutural dos pilares centrais, representado pelas Figuras 4.9 e 4.10, é similar ao da viga, em que para o tempo de 120 minutos, os pilares estão cada vez mais próximos de sofrerem colapso por flexão. Apesar disso, tanto a Figura 4.10 como a combinação dos esforços para o tempo próximo a 100 minutos apontam a ruptura dos elementos estruturais, indicando que o revestimento de 20 mm de argamassa de vermiculita foi suficiente para definir um tempo de resistência ao fogo superior que o TRRF de 60 minutos, chegando a resistir por mais que 80 minutos.

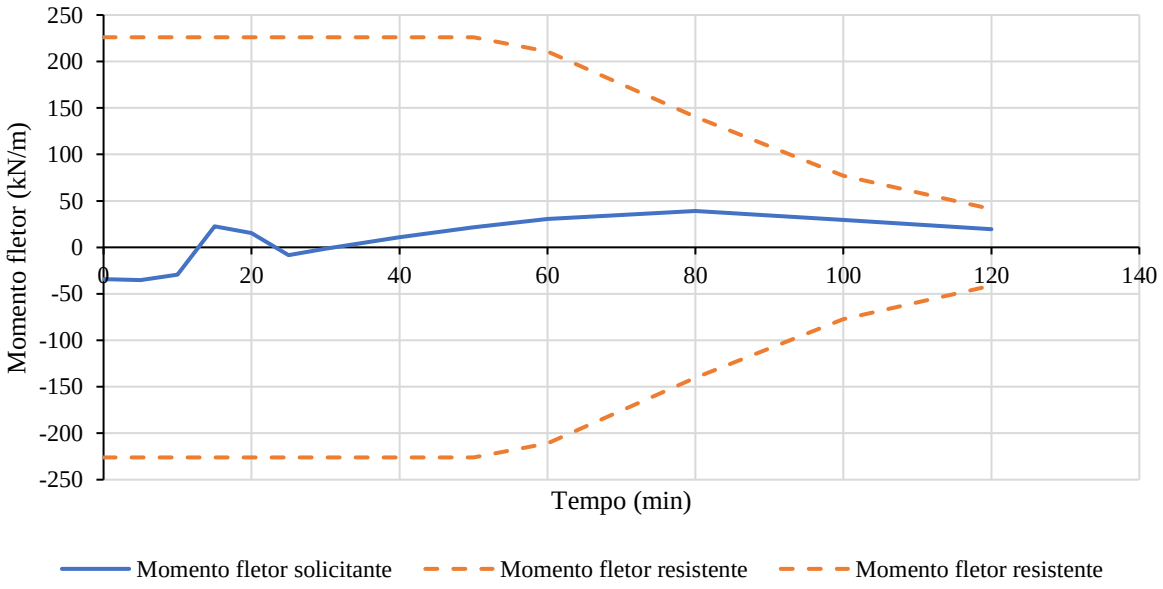


Figura 4.9 – Momento fletor para pilares centrais

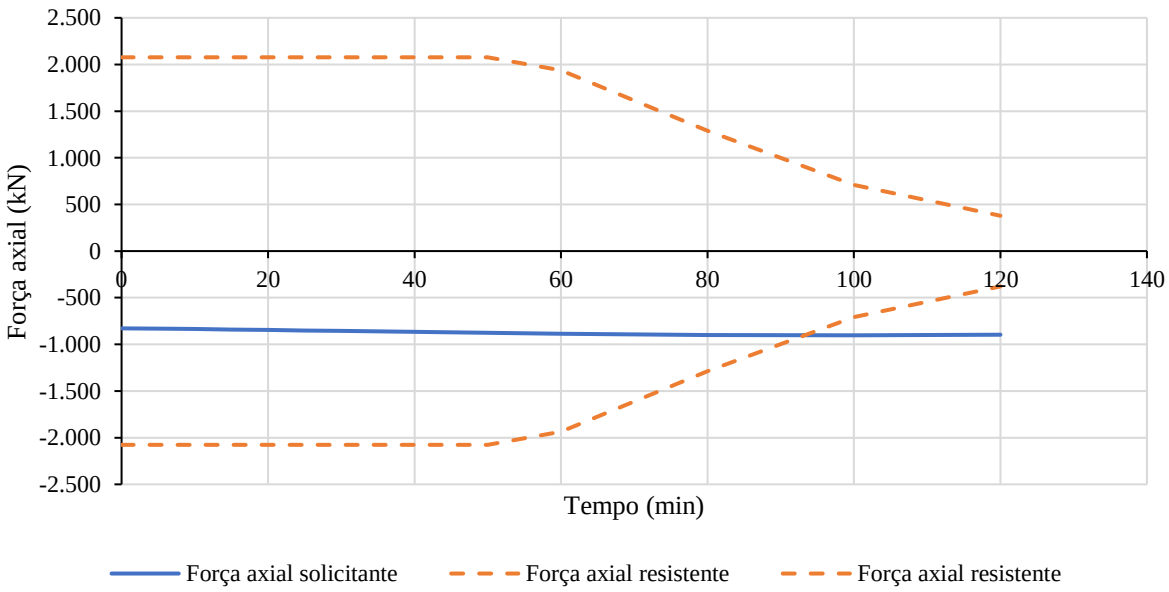


Figura 4.10 – Força axial para pilares centrais

Caso fosse necessário identificar a temperatura crítica dos pilares centrais, é possível utilizar as relações estabelecidas em (4.1) e definir o fator de redução $k_{y\theta}$:

- Fator de redução da resistência ao escoamento igual a 0,550, com a temperatura crítica igual a 568,89 °C e tempo de incêndio de 83,17 minutos.

Os resultados alcançados para os elementos revestidos com proteção térmica apontam para a possibilidade de redução da espessura da argamassa de vermiculita para a devida edificação, haja vista que o tempo mínimo para a estrutura resistir ao fogo é de 60 minutos. Também é possível destacar a obtenção das reais propriedades mecânicas e térmicas de cada material de revestimento para possibilitar o dimensionamento adequado e uso eficiente da Carta de Cobertura. Mais além, para o caso de permitir a resistência ao fogo para um TRRF de 120 minutos, seria possível tanto a aplicação de uma espessura maior de proteção térmica, como a adoção conjunta de selecionar um perfil metálico mais robusto e aplicar um revestimento de proteção contra fogo.

4.2. ESTRUTURA SOB INCÊNDIO NATURAL

Anteriormente à obtenção da curva de incêndio natural, definiu-se as características do compartimento da edificação:

- A NBR 14432:2000 define valores de carga de incêndio especifíca conforme a classificação da edificação. A edificação de divisão D-1 possui carga de incêndio específica de 700 MJ/m²;
- O fator de abertura ou ventilação *O* foi calculado assumindo três portas e uma janela como aberturas que interferem no comportamento do incêndio, de modo que o fator de abertura calculado foi de aproximadamente 0,12,
- O parâmetro *b* para determinação do coeficiente de expansão foi assumido como 1160 $J/m^2s^{1/2}K$.

O procedimento para obtenção dos resultados do modelo de incêndio natural é similar ao apresentado anteriormente para o incêndio padrão, de modo que os gráficos referentes à curva e à elevação da temperatura do aço para os perfis metálicos expostos às chamas estão representados nas Figuras 4.11 e 4.12 abaixo.

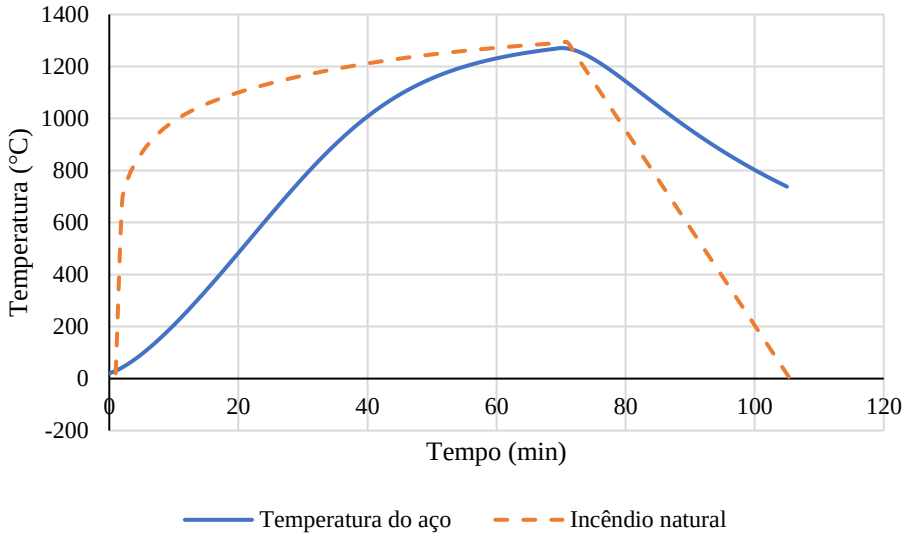


Figura 4.11 – Incêndio natural para o perfil HP 310 x 79,0 (pilares centrais)

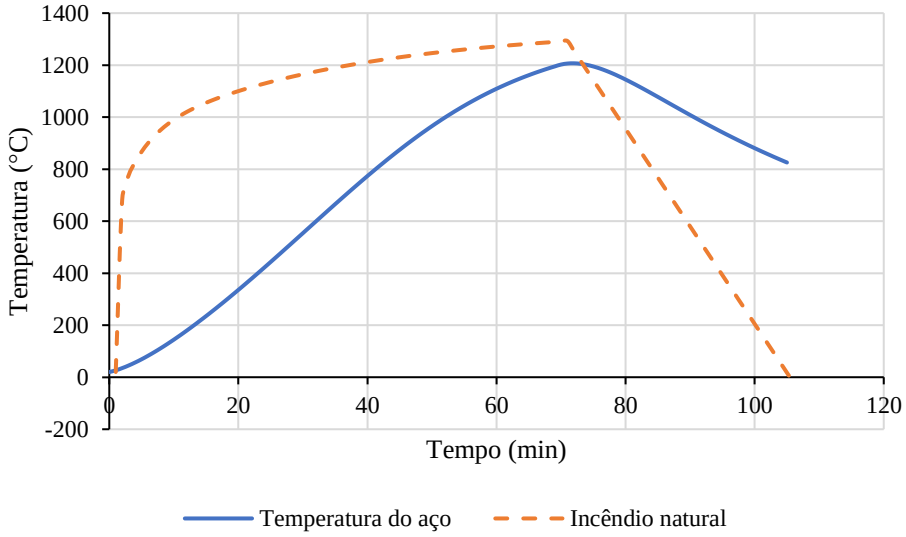


Figura 4.12 – Incêndio natural para o perfil W 310 x 44,5 (viga)

Os gráficos apresentados acima indicam novamente que os pilares possuem uma maior taxa de elevação de temperatura, sendo a diferença de temperatura entre os pilares e a viga significativamente superior que para o modelo de incêndio padrão. Apesar disso, ambos perfis alcançam temperaturas acima de 1000 °C após os 60 minutos iniciais do incêndio. Outro ponto a ser destacado se trata da duração do incêndio para as devidas características da edificação, em que o ramo de aquecimento possui cerca de 70 minutos e onde ambos os perfis atingem temperaturas acima de 1200 °C e possuem fatores de redução nulos, independentemente das capacidades resistentes dos elementos estruturais. Os fatores de redução para os perfis são indicados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Elevação de temperatura e fatores de redução em função do tempo para viga (à esquerda) e pilares centrais (à direita) – Incêndio natural

Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução ky,θ	Fator de redução kσ,θ	Fator de redução kE,θ
0	20	1,000	1,000	1,000
5	69	1,000	1,000	1,000
10	144	1,000	0,951	0,956
15	235	1,000	0,851	0,865
20	336	1,000	0,733	0,764
25	443	0,905	0,598	0,657
30	554	0,612	0,406	x
40	774	0,142	0,086	0,101
50	966	0,047	0,037	0,053
60	1109	0,018	0,018	0,021
80	1145	0,011	0,011	0,013
100	881	0,070	0,054	0,072
120	-	-	-	-

Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução ky,θ	Fator de redução kσ,θ	Fator de redução kE,θ
0	20	1,000	1,000	1,000
5	94	1,000	1,000	1,000
10	206	1,000	0,884	0,894
15	339	1,000	0,729	0,761
20	483	0,817	0,550	0,617
25	630	0,397	0,249	0,256
30	772	0,143	0,087	0,101
40	1008	0,038	0,029	0,043
50	1155	0,009	0,009	0,010
60	1231	0,000	0,000	0,000
80	1143	0,011	0,011	0,013
100	802	0,109	0,070	0,089
120	-	-	-	-

Conforme a análise obtida pelo programa para o incêndio natural, a viga atinge a temperatura máxima de 1207 °C para o tempo de incêndio de 72 minutos, ao passo que os pilares centrais atingem a máxima temperatura de 1271 °C aos 70 minutos. Ainda que seja previsto o ramo de resfriamento dos gases e dos elementos metálicos, não houve a consideração da restauração de qualquer capacidade resistente de tais elementos decorrente da diminuição de temperatura. Desse modo, para os intervalos subsequentes do incêndio, admitiu-se o valor mínimo dos fatores de redução de acordo com a temperatura máxima alcançada pelo perfil metálico. Além disso, o tempo de 120 minutos não apresenta nenhum dado pois, para a configuração da edificação, os gases já haviam atingido a temperatura ambiente.

Novamente, a primeira abordagem do comportamento térmico e estrutural não levou em consideração o esgotamento da capacidade resistente dos pilares e das vigas, aplicando-se os fatores de redução e a variação de temperatura para todos os períodos, conforme os resultados dispostos nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 – Comportamento estrutural da viga – Incêndio natural

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-1,26	830,17	46,61	309,87	-37,08	96,33
5	69	-23,14	830,17	46,61	309,87	-38,08	96,33
10	144	-60,77	789,55	46,61	309,87	-40,19	96,33
15	235	-104,29	706,73	46,61	309,87	-41,67	96,33
20	336	-149,25	608,90	46,61	309,87	-42,24	96,33
25	443	-182,06	496,68	46,61	280,49	-39,44	87,20
30	554	-200,76	336,71	46,61	189,74	-33,80	58,98
40	774	-205,34	71,25	46,61	43,89	-30,68	13,65
50	966	-156,53	30,61	46,61	14,53	-28,40	4,52
60	1.109	-19,03	15,08	46,61	5,63	-27,08	1,75
72	1.207	0,00	0,00	46,61	0,00	46,61	0,00

Tabela 4.12 – Comportamento estrutural dos pilares – Incêndio natural

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-828,18	2.076,71	22,79	493,35	-34,35	226,04
5	94	-839,89	2.076,71	18,69	493,35	-28,43	226,04
10	206	-854,89	2.076,71	8,68	493,35	-13,76	226,04
15	339	-872,50	2.076,71	-2,04	493,35	-4,10	226,04
20	483	-891,22	1.697,13	-11,75	403,18	-18,74	184,73
25	630	-901,19	825,20	-13,30	196,04	20,09	89,82
30	772	-892,92	297,95	-9,84	70,78	15,55	32,43
40	1.008	-864,15	79,92	-6,22	18,99	10,21	8,70
50	1.155	-651,07	18,87	-2,96	4,48	5,30	2,05
60	1.231	-2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
72	1.263	-2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

As tabelas confirmam os resultados de que os esforço críticos dos pilares centrais é a força axial e da viga, o momento fletor e a força axial, ainda que ambos estejam sujeitos a flexo-compressão. Apesar disso, os intervalos de tempo adotados acabam por não representar de maneira ideal o comportamento da estrutura ao longo do incêndio, visto que a temperatura da viga aos 40 minutos já é significativamente maior que a temperatura crítica efetiva dos devidos elementos metálicos – analisando-se o esforço resistente para o período – ao passo que para os pilares centrais a temperatura crítica encontra-se próxima aos 25 minutos.

Também é válido destacar que para o devido modelo, o tempo de incêndio de 80 minutos já apresenta o resfriamento dos gases e dos elementos metálicos, de modo que as temperaturas máximas já haviam sido alcançadas. Assim, selecionou-se o tempo de incêndio de 72 minutos como último ponto de avaliação, em que a viga atingiria sua temperatura máxima e todos os elementos estruturais expostos ao fogo possuiriam fatores de redução nulos e, portanto, não apresentariam qualquer desempenho estrutural.

Em seguida, efetuou-se o cálculo da temperatura crítica para os pilares centrais, definindo-se o período até o alcance da temperatura e aplicando-se os fatores de redução nulos para os períodos posteriores:

- Temperatura crítica para os pilares centrais: $\theta_{a,cr}$ = 580, 53 °C para o tempo aproximado de 23 minutos.

De maneira similar ao empecilho encontrado no modelo de incêndio padrão, não foi possível a definição exata da temperatura crítica para a viga, em que somente foi possível identificar que a temperatura é próxima de 531,75 °C e ocorre próxima aos 29 minutos de incêndio.

Ainda que os parâmetros da estrutura sejam os mesmos para ambos os modelos estudados e que os elementos estruturais atingem as mesmas temperaturas até certo ponto, a diferença de temperatura mais acentuada entre os pilares centrais e a viga no modelo natural influencia diretamente na redistribuição de esforços e consequentemente, na temperatura crítica da estrutura. Portanto, é possível compreender a obtenção de valores distintos da temperatura crítica para cada modelo de incêndio, por mais que tal diferença seja pequena.

Entendendo-se que os esforços decorrentes da restrição à dilatação dos elementos metálicos ocorrem somente enquanto os elementos estruturais ainda estão íntegros, para o caso dos pilares e da viga entrarem em colapso, os esforços solicitantes para a combinação última excepcional são iguais aos obtidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 do modelo de incêndio, assim como a redistribuição final dos esforços também será igual. Logo, optou-se pela avaliação do comportamento estrutural após o colapso dos pilares centrais e anteriormente ao colapso da viga, conforme indicado na Tabela 4.13 a seguir.

Tabela 4.13 – Comportamento estrutural dos elementos após o colapso dos pilares centrais

Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução $k_{y,\theta}$	Fator de redução $k_{\sigma,\theta}$	Fator de redução $k_{E,\theta}$		
23	400	1,000	0,651	0,700		
Perfil metálico	$N_{fi,Sd}$ kN	$N_{fi,Rd}$ kN	$V_{fi,Sd}$ kN	$V_{fi,Rd}$ kN	$M_{fi,Sd}$ kN/m	$M_{fi,Rd}$ kN/m
W 310 x 44,5 - Viga central	113,41	540,09	46,61	309,80	106,90	96,33
HP 310 x 79,0 (H) - Pilares centrais	-2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W 360 x 44,0 - Vigas externas	-36,59	532,75	-247,29	364,32	-569,08	196,08
HP 310 x 79,0 (H) - Pilares externos	-1.385,12	2.500,00	-180,95	493,35	371,48	302,53

Analogamente ao incêndio padrão, o colapso dos pilares centrais resultou na redistribuição dos esforços de modo que as vigas externas e os pilares externos romperam por flexão, gerando um colapso progressivo no pavimento, bem como há a ruptura da viga central superior. Os diagramas de momento fletor gerados pelo programa *SAP2000* para a devida situação também são similares aos da Figura 4.4, sugerindo o consequente colapso das estruturas acima do pavimento em questão.

No que diz respeito à segurança contra incêndio, a estrutura não satisfaz o tempo mínimo requerido de resistência ao fogo, dado que os pilares centrais colapsaram após 23 minutos e induziram o colapso do restante do pavimento. Aqui também cabe a viabilidade de alterar o dimensionamento dos elementos estruturais para perfis mais robustos, principalmente para os pilares, não somente por serem os primeiros a romper, mas também por resistirem a elevadas cargas e por terem significativo impacto na redistribuição dos esforços caso ocorra a ruptura destes.

4.3. DISCUSSÕES FINAIS

Para ambos os modelos de incêndio estudados, verifica-se a elevação dos esforços axiais solicitantes para a viga e os pilares expostos às chamas nos períodos iniciais do incêndio, justificada pelo aumento dos esforços de compressão decorrentes da restrição à dilatação dos elementos estruturais. Durante esse intervalo, também é possível notar a diminuição dos esforços axiais dos pilares externos, bem como a geração de esforços de compressão crescentes nas vigas adjacentes ao compartimento. Entretanto, há um momento em que o aumento da dilatação das barras é menos influente que a redução das propriedades mecânicas do aço, de modo que a redistribuição dos esforços passa a se inverter.

Conforme previamente discutido, a configuração dos esforços no momento do colapso indica a inversão do momento fletor para as vigas dos pavimentos, diretamente influenciada pela alteração da rigidez das conexões. Desse modo, caso a edificação ainda esteja íntegra após o colapso de determinado elemento estrutural, é importante avaliar as novas configurações de rigidez para delimitação dos comprimentos efetivos de flambagem necessários para os cálculos de esforços resistentes.

A verificação do comportamento estrutural dos elementos expostos às chamas para ambos modelos simplificados de incêndio indicou que a viga superior sofreu o colapso assim que os pilares centrais deixaram de resistir aos esforços solicitantes, rompendo prematuramente e desencadeando o colapso progressivo da estrutura. Portanto, a limitação da análise isolada dos elementos estruturais pela NBR 14323:2013 não discorre sobre a possibilidade do colapso de um elemento induzir o colapso estrutural de outro, efetuando-se dimensionamentos conservadores para a análise isolada, mas ainda assim contra a segurança quando avaliadas sob a perspectiva da interação inerente dos elementos em uma estrutura.

Outro ponto importante a ser destacado refere-se ao fato de que a evolução do incêndio – no sentido da elevação da temperatura do compartimento – passa a ser irrelevante em termos de comportamento estrutural após o colapso do elemento estrutural. Tal afirmação fundamenta-se na perda da restrição à dilatação dos elementos em barra, em que estes podem se deformar livremente sem gerar esforços nas conexões. Portanto, ainda que o aumento de temperatura acarretasse a maior dilatação do elemento estrutural, não seriam gerados novos esforços solicitantes. Ainda assim, é possível presumir que em condições reais de incêndio, há a propagação das chamas para outros compartimentos, de modo que a evolução e continuidade do incêndio possui expressiva importância na estabilidade estrutural global da edificação.

No que tange ao comportamento térmico da edificação, é interessante observar que o modelo de incêndio natural atinge temperaturas mais elevadas que o modelo de incêndio padrão para elementos sem revestimento contra fogo, porém em um período de tempo superior. Além disso, deve-se ressaltar que o modelo de incêndio natural, ainda que simplificado, recorre a um maior número de parâmetros para caracterização da edificação, de maneira que ao invés de optar pela substituição dos perfis metálicos para diminuir os fatores de massividade dos elementos estruturais e, consequentemente, reduzir a temperatura máxima atingida pelo incêndio, é possível definir fatores de abertura O menores – diminuindo-se as áreas para ventilação – ou ainda alterar os materiais de vedação do compartimento.

Quanto ao requisito de segurança contra incêndio, a estrutura não satisfez o TRRF de 60 minutos para a edificação de divisão D-1 para ambos os modelos de incêndio, recorrendo-se à atribuição de proteção térmica para as seções expostas ao fogo. Mais além, percebeu-se que a aplicação das diretrizes da NBR 14323:2013 para elementos estruturais revestidos com materiais de proteção térmica não foi considerada válida para o modelo de incêndio natural, aplicando-se a argamassa de vermiculita somente para o incêndio padrão. O teste realizado para o incêndio natural com as mesmas características de revestimento retornou um valor máximo de temperatura do aço próximo a 120 °C para os pilares centrais, resultado extremamente pequeno e que não pôde ser corroborado pela literatura adotada, portanto não sendo abordado no escopo do projeto.

5. CONCLUSÃO

O estudo e avaliação das estruturas metálicas em situação de incêndio é, de certa forma, recente no âmbito da construção civil brasileira. Além disso, as proposições das normas estão voltadas para metodologias simplificadas de dimensionamento dos elementos estruturais expostos às chamas, seja na premissa de que a distribuição da temperatura é uniforme para a seção transversal, seja na avaliação de cada elemento isoladamente ou ainda na determinação da temperatura do aço. Desse modo, as resoluções desenvolvidas a partir das normas brasileiras podem acabar gerando estruturas superdimensionadas e antieconômicas.

A estrutura metálica dimensionada em temperatura ambiente sem revestimento contra fogo não resistiu ao fogo para o TRRF de 60 minutos para os dois modelos de incêndio abordados no estudo. Para as características determinadas da edificação, o caso de incêndio padrão levou ao colapso da estrutura em um tempo menor de incêndio, visto que a taxa de elevação da temperatura do aço foi superior, por mais que as temperaturas máximas atingidas para o modelo de incêndio natural tenham sido maiores.

Os resultados obtidos para ambos os modelos de incêndio apontaram como fator preponderante para o colapso dos elementos metálicos a redução dos esforços resistentes em decorrência da elevação da temperatura. Ademais, observou-se que a utilização de material de proteção térmica exerce grande influência para satisfazer os requisitos de segurança contra incêndio, tornando-se uma opção mais viável em detrimento da alteração do perfil metálico a ser utilizado na estrutura.

O propósito inicial deste trabalho era a investigação acerca da resistência de elementos metálicos quando expostos ao incêndio a partir das diretrizes dispostas na NBR 14323:2013 e NBR 14432:2000. Com o avanço do projeto, foi possível vislumbrar não somente o desempenho térmico e estrutural de cada elemento metálico, mas também discorrer sobre a interação entre os elementos e as consequências associadas para um mesmo pavimento ou até para a estrutura completa. Portanto, ainda que de maneira simplificada, o projeto cumpre os objetivos específicos definidos acerca do aprofundamento do conhecimento da ferramenta VBA, bem como propiciou um maior entendimento sobre os fundamentos relativos ao estudo de incêndio e sua relevância no dimensionamento de estruturas metálicas.

As seguintes alterações visando a melhoria da representatividade dos resultados alcançados podem ser enumeradas abaixo:

- Adotar as expressões das propriedades térmicas descritas na seção 2.2.2 ao invés dos valores simplificados, bem como verificar a variação do coeficiente de dilatação térmica para a elevação de temperatura, visto que foi adotado um valor constante no projeto;
- Efetuar o cálculo para o parâmetro *b* do modelo de incêndio natural a partir das características do material de vedação – equação (2.5) ou com várias camadas de materiais distintos de vedação, utilizar as equações descritas em CEN EN 1991-1-2:2005;
- Realizar o dimensionamento em temperatura ambiente a partir dos procedimentos normativos da NBR 8800:2008 para então aplicar os perfis metálicos selecionados no *software SAP2000*;
- Ampliação da base de dados de perfis metálicos para o programa em VBA.

É importante ressaltar que grande parte das alterações sugeridas também interferem na melhoria e otimização dos programas desenvolvidos em VBA para geração de curvas de incêndio mais representativas em relação aos parâmetros de projeto. Portanto, o processo de aprimoramento dos programas deve ser constante e cada vez mais voltado para a integração dos resultados obtidos no VBA para outros *softwares*.

Já em termos de proposições de trabalhos futuros, é possível elencar as seguintes sugestões:

- Avaliação do desempenho térmico e estrutural em uma estrutura 3D, com a combinação de esforços em múltiplas direções;

- Realizar uma busca mais aprofundada na literatura acerca de modelos padrão de propagação do incêndio ou com metodologias mais complexas, de modo a ser aplicável para estruturas com diversos compartimentos e pavimentos;
- Comparação dos resultados dos modelos de incêndio da estrutura desenvolvida com metodologias numéricas que abordam a distribuição não uniforme da temperatura nas seções transversais, como forma de analisar as temperaturas críticas juntamente com as deformações e esforços gerados pela não uniformidade de tal distribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323 – Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento*. Rio de Janeiro, 1999.

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

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

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

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.

AZEVEDO, M.S. *Estruturas de Aço Externas a Edifícios em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, SP, 302p, 2010.

CALDAS, R. B. *Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio.* Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Estruturas - Universidade Federal De Minas Gerais, p. 249, 2008.

CAMPÊLO, L. S. *Estudo numérico e analítico para determinação em situação de incêndio natural da carga crítica de vigas de aço com carga concentrada*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002a/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, p. 165, 2008.

DE SOUSA, D. A.; SILVA, G. P. Estruturas de concreto em situação de incêndio. p. 137, 2015.

EUROPEAN STANDARD. EUROCODE 1: A*ctions on Structures – Part 1-2: General Actions- Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization. Brussels, 2005.

FIALHO, R. N. *Edifícios de escritórios na cidade de São Paulo*. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, 2007.

FRANSSEN, J.-M.; REAL, P. V. *Fire Design of Steel Structures*. Eletronic. ECCS -European Convention for Construction Steelwork, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 834: *Fire resistance tests - Elements of buiding construction - Part 11: Specific requirements for the assessmente of fire protection to structural steel elements.* 2014.

KIMURA, É. F. A. *Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio.* Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação e Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, p. 225, 2009.

KIRCHHOF, L. D. *Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio.* Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, p. 142, 2004.

NUNES, J. M. DE B. *Uma abordagem numérica e analítica para determinação da temperatura e do momento fletor crítico em vigas de aço em situação de incêndio*. 2005.

MELO, R.C. *Análise de Vigas de Aço Submetidas a Diversas Cargas e Condições de Isolamento em Situação de Incêndio Natural*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p, 2017.

PANNONI, F. D. *Coletânea do uso do Aço - Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em situação de incêndio*.4. ed. São Paulo, 2007.

PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008*. Grupo Gen-LTC, 2009.

REAL, P. V. *Incêndio em estruturas metálicas: cálculo estrutural*. 2003.

RIGOBELLO, R. *Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio*. 2007.

RIGOBELLO, R. *Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio*. Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, p. 272, 2011.

TEATINI, J. C. *Estruturas de Concreto Armado*. Brasília: Universidade de Brasília, 2014.

SILVA, V. P. E. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, sp, p. 188, 1997.

SILVA V.P. *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, Ziguarate Editora, São Paulo, SP, 2001.

SOARES, É. F. *Aspectos gerais dos sistemas de proteção contra incêndio em estruturas metálicas*. 2015.

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

VIEIRA, L. L. et al. *Análise Da Resistência Dos Elementos De Aço Em Situação De Incêndio: Um Estudo Comparativo Entre a Norma ABNT NNBR 14323:2013 e sua versão de 1999.* XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE, 2016.

ZAMBONI, Lincoln Cesar et al. *Planilhas Excel e uso da linguagem VBA em aplicações para as Engenharias*. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Blumenau–SC. 2011.

[1] 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; acessado em 05/05/2018.

ANEXO A

O anexo a seguir destaca as tabelas contidas na norma NBR 14432:2000 referentes à determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

Tabela A.1 – Classificação das edificações quanto à sua ocupação

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hoteis assemelhados	Hoteis, moteis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hoteis residenciais	Hoteis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hoteis, hoteis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Armarinhos, tabacarias, mercearias, fruteiras, butiques e outros
		C-2	Comércio de grande e médio portes	Edifícios de lojas, lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercado e outros
		C-3	Centros comerciais	Centro de compras em geral (shopping centers)
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleireiros laboratórios de análises clínicas sem internação, centro profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agencias bancárias e assemelhados
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
E	Educacional e cultura física	E-1	Escolas em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus, cursos supletivos e pré-universitário e outros
		E-2	Escolas especiais	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira e outras
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais ginástica (artística, dança musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia e outros
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternais, jardins-de-infância
		E-6	Escolas para portadores de deficiências	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
F	Locais de reunião de público	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
		F-2	Templos e auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral
		F-3	Centros esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoferroviárias, aeroportos, estações de transbordo e outros
		F-5	Locais de produção e apresentação de artes cênicas	Teatros em geral cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e outros
		F-6	Clubes sociais	Boates e clubes noturnos em geral, salões de baile, restaurantes dançantes, clubes sociais e assemelhados
		F-7	Construções provisórias	Circos e assemelhados
		F-8	Locais para refeições	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e outros
G	Serviços automotivos	G-1	Garagens sem acesso de público e sem abastecimento	Garagens automáticas
		G-2	Garagens com acesso de público e sem abastecimento	Garagens coletivas sem automação, em geral, sem abastecimento (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-3	Locais dotados de abastecimento de combustível	Postos de abastecimento e serviço, garagens (exceto veículos de carga e coletivos)
		G-4	Serviços de conservação, manutenção e reparos	Postos de serviço sem abastecimento, oficinas de conserto de veículos (exceto de carga e coletivos), borracharia (sem recauchutagem)
		G-5	Serviços de manutenção em veículos de grande porte e retificadoras em geral	Oficinas e garagens de veículos de carga e coletivos, máquinas agrícolas e rodoviárias, retificadoras de motores
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1	Hospitais veterinários e assemelhados	Hospitais, clínicas e consultórios veterinários e assemelhados (inclui-se alojamento com ou sem adestramento)
		H-2	Locais onde pessoas requerem cuidados especiais por limitações físicas ou mentais	Asilos, orfanatos, abrigos geriátricos, reformatórios sem celas e outros
		H-3	Hospitais e assemelhados	Hospitais, casa de saúde, prontossocorros, clínicas com internação, ambulatórios e postos de atendimento de urgência, postos de saúde e puericultura e outros
		H-4	Prédios e instalações vinculadas às forças armadas, polícias civil e militar	Quartéis, centrais de polícia, delegacia distritais, postos policiais e outros
		H-5	Locais onde a liberdade das pessoas sofre restrições	Hospitais psiquiátricos, reformatórios, prisões em geral e instituições assemelhadas
I	Industrial	I-1	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados ou depositados apresentem médio potencial de incêndio	Locais onde a carga de incêndio não atinja 1 200 MJ/m2.
		I-2	Locais onde as atividades exercidas e os materiais utilizados ou depositados apresentem grande potencial de incêndio	Locais onde a carga de incêndio ultrapassa 1 200 MJ/m2.
J	Depósitos	J-1	Depósitos de baixo risco de incêndio	Depósitos sem risco de incêndio expressivo. Edificações que armazenam tijolos, pedras, areias, cimentos, metais e outros materiais incombustíveis
		J-2	Depósitos de médio e alto risco de incêndio	Depósitos com risco de incêndio maior. Edificações que armazenam alimentos, madeira, papel, tecidos e outros

Fonte: modificado (NBR 14432:200)

*Tabela A.2 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), em minuto **

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S2 hs > 10 m	Classe S1 hs < 10 m	Classe P1 h < 6 m	Classe P2 6 m < h < 12 m	Classe P3 2 m < hs < 23 m	Classe P4 23 m < h < 30 m	Classe P5 h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 a B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

*os tempos entre parênteses podem ser usados em subsolo nos quais a área bruta de cada pavimento seja menor ou igual a 500 m2 e em edificações nas quais cada pavimento acima do solo tenha área menor ou igual a 750 m2;

Fonte: modificado (NBR 14432:200)

ANEXO B

Tabela B.1 – Carta de Cobertura referencial

Fator de Massividade	Resistência ao Fogo (min)			
m^{-1}	30	60	90	120
115	10	15	22	29
120	10	15	22	29
125	10	16	23	30
130	10	16	23	31
135	10	16	24	32
140	10	17	24	32
145	10	17	25	33
150	10	17	25	34
155	10	18	26	34
160	10	18	26	35
165	10	18	27	35
170	10	19	27	36
175	10	19	28	37
180	10	19	28	37
185	10	19	28	38
190	10	20	29	38

Fator de Massividade	Resistência ao Fogo (min)			
m^{-1}	30	60	90	120
195	10	20	29	39
200	11	20	30	39
205	11	20	30	40
210	11	21	30	40
215	11	21	31	41
220	11	21	31	41
225	11	21	31	410
230	11	22	32	42
235	11	22	32	42
240	12	22	32	43
245	12	22	33	43
250	12	22	33	43
255	12	23	33	44
260	12	23	33	44
265	12	23	34	45
270	12	23	34	45

Fonte: modificado (PANNONI, 2007)

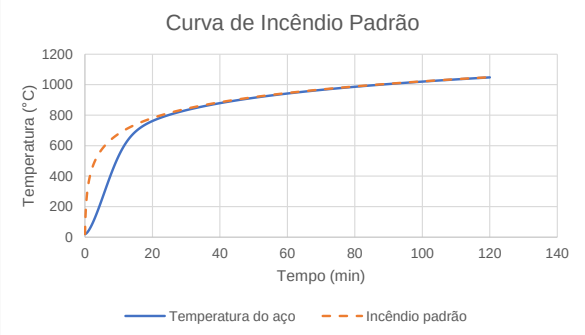
APÊNDICE A

Modelo de Incêndio Padrão

Tempo requerido em minutos: 120

Bitola	Tipo de exposição	Tipo de exposição	Fator de massividade (m^{-1})
HP 310 x 79,0 (H) - Exposição	Aberto	3 lados	185

Determinar a Curva de Incêndio Padrão - NBR 14323:2013



Tempo Min	Temperatura do aço °C	Fator de redução $k_{y,\theta}$	Fator de redução $k_{\alpha,\theta}$	Fator de redução $k_{E,\theta}$
5	247	1,000	0,838	0,853
10	534	0,675	0,452	0,502
15	693	0,248	0,143	0,143
20	762	0,156	0,093	0,105
25	802	0,109	0,070	0,090
30	833	0,094	0,063	0,083
40	879	0,071	0,054	0,073
50	914	0,057	0,047	0,065
60	942	0,052	0,042	0,058
80	986	0,043	0,033	0,048
100	1020	0,036	0,028	0,041
120	1048	0,030	0,025	0,034

Figura AP. 1 – Aba "Incêndio Padrão"

TABELA DE BITOLAS - PERFIS GERDAU AÇOMINAS									Fator de massividade			
									Aberto		Caixa	
BITOLA	Massa Linear (kg/m)	Altura do Perfil (mm)	Altura da Alma h (mm)	Largura das Abas (mm)	Espessura da Alma (mm)	Espessura da Aba (mm)	Área da Seção (cm^2)	Perímetro (cm)	3 lados	4 lados	3 lados	4 lados
W 150 x 13,0	13	148	138	100	4,3	4,9	16,6	67	343	404	239	299
W 150 x 18,0	18	153	139	102	5,8	7,1	23,4	69	251	295	174	218
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	139	152	5,8	6,6	29	88	251	303	157	210
W 150 x 24,0	24	160	139	102	6,6	10,3	31,5	69	187	219	134	166
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	138	153	6,6	9,3	38,5	90	194	234	121	161
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	139	154	8,1	11,6	47,8	91	158	190	100	132
W 200 x 15,0	15	200	190	100	4,3	5,2	19,4	77	345	397	258	309
W 200 x 19,3	19,3	203	190	102	5,8	6,5	25,1	79	274	315	202	243
W 200 x 22,5	22,5	206	190	102	6,2	8	29	79	237	272	177	212
W 200 x 26,6	26,6	207	190	133	5,8	8,4	34,2	92	230	269	160	199
W 200 x 31,3	31,3	210	190	134	6,4	10,2	40,3	93	198	231	137	171
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	181	165	6,2	10,2	45,7	103	189	225	124	160
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	181	166	7,2	11,8	53,5	104	163	194	108	139
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	181	203	7,2	11	58,6	119	168	203	104	139
W 200 x 52,0 (H)	52	206	181	204	7,9	12,6	66,9	119	147	178	92	123
HP 200 x 53,0 (H)	53	204	181	207	11,3	11,3	68,1	120	146	176	90	121
W 200 x 59,0 (H)	59	210	182	205	9,1	14,2	76	120	131	158	82	109
W 200 x 71,0 (H)	71	216	181	206	10,2	17,4	91	122	111	134	70	93
W 200 x 86,0 (H)	86	222	181	209	13	20,6	110,9	123	92	111	59	78
W 250 x 17,9	17,9	251	240	101	4,8	5,3	23,1	88	337	381	261	305
W 250 x 22,3	22,3	254	240	102	5,8	6,9	28,9	89	273	308	211	246
W 250 x 25,3	25,3	257	240	102	6,1	8,4	32,6	89	242	273	189	220
W 250 x 28,4	28,4	260	240	102	6,4	10	36,6	90	218	246	170	198

Figura AP. 2 – Aba "Base de dados"

APÊNDICE B

```
Sub Valores_Gráfico()
Application.ScreenUpdating = False

Dim linha, t, i, teta_G, teta_A, hr, hc, h, delta_teta_A, dado, fator As Double
linha = 2
i = Cells(3, 2).Value * 60

    ' Temperatura do aço, sendo a temperatura inicial igual a 20 graus Celsius
teta_A = 20

If Cells(3, 2).Value = "" Or Cells(3, 2).Value = 0 Then GoTo Pular

    Fator_Massividade

    fator = Cells(5, 4).Value

    Sheets("Cálculos").Activate

    Apagar_Conteúdo

    For t = 0 To i

    Cells(linha, 1).Value = t / 60
    ' Cálculo da temperatura dos gases no tempo "t"
    teta_G = 20 + 345 * (Log(8 * (t / 60) + 1) / Log(10))

    ' Cálculo do fluxo de calor por radiação
    hr = 5.67 * (10 ^ -8) * 0.7 * ((teta_G + 273) ^ 4 - (teta_A + 273) ^ 4)

    ' Cálculo do fluxo de calor por convecção/ condução (?)
    hc = 25 * (teta_G - teta_A)

    ' Fluxo total de calor
    h = hr + hc

    ' Valor da variação de temperatura do elemento estrutural de aço

    delta_teta_A = (fator * h * 5) / (CLng(7850) * 600)

    Cells(linha, 2).FormulaR1C1 = teta_G
```

Figura AP. 3 – Sub Valores_Gráfico (1/2)

```
    teta_A = teta_A + delta_teta_A

    Cells(linha, 3).FormulaR1C1 = teta_A
    Cells(linha, 4).FormulaR1C1 = h
    Cells(linha, 5).FormulaR1C1 = delta_teta_A

    linha = linha + 1

    t = t + 4

Next
    Curva_Incêndio
    Fator_Redução
Exit Sub

Pular:

    dado = Application.InputBox("Insira um valor para o tempo requerido de resistência em minutos", Title:="Tempo Requerido de Resistênc

    Sheets("Incêndio Padrão").Activate
    Cells(3, 2).Value = dado

Application.ScreenUpdating = True

End Sub
```

Figura AP. 4 – Sub Valores_Gráfico (2/2)

```
Sub Curva_Incêndio()

Dim LR, CR, BR, b As Range
Dim nome, grafico As String

     Sheets("Cálculos").Activate

LR = Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
CR = Cells(Rows.Count, "C").End(xlUp).Row
BR = Cells(Rows.Count, "B").End(xlUp).Row

    Sheets("Incêndio Padrão").Activate

    ActiveSheet.Shapes.AddChart2(240, xlXYScatterSmooth).Select
    ActiveChart.FullSeriesCollection(1).XValues = "=Cálculos!$A$2:$A" & LR
    ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Values = "=Cálculos!$C$2:$C" & CR

    ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
    ActiveChart.FullSeriesCollection(2).XValues = "=Cálculos!$A$2:$A" & LR
    ActiveChart.FullSeriesCollection(2).Values = "=Cálculos!$B$2:$B" & CR

    nome = ActiveChart.Name
    ActiveChart.ChartTitle.Text = "Curva de Incêndio Padrão"

    Sheets("Cálculos").Activate

    Cells(2, 7).Value = nome
    Range("G2").Select
    Selection.TextToColumns Destination:=Range("G2"), DataType:=xlFixedWidth, _
        FieldInfo:=Array(Array(0, 1), Array(15, 1), Array(30, 1)), TrailingMinusNumbers _
        :=True
    grafico = Cells(2, 8).Value

    Sheets("Incêndio Padrão").Activate

    With Selection.Format.TextFrame2.TextRange.Font
        .NameComplexScript = "Arial"
        .NameFarEast = "Arial"
        .Name = "Arial"
    End With
```

Figura AP. 5 – Sub Curva_Incêndio (1/2)

```
    ActiveChart.SetElement (msoElementPrimaryCategoryAxisTitleAdjacentToAxis)
    ActiveChart.SetElement (msoElementPrimaryValueAxisTitleAdjacentToAxis)
    ActiveChart.Axes(xlValue).HasTitle = True
    ActiveChart.Axes(xlCategory).AxisTitle.Select
    ActiveChart.Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Text = "Tempo (min)"
    Selection.Format.TextFrame2.TextRange.Characters.Text = "Tempo (min)"
    ActiveChart.Axes(xlValue).AxisTitle.Select
    ActiveChart.Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Text = "Temperatura (°C)"
    Selection.Format.TextFrame2.TextRange.Characters.Text = "Temperatura (°C)"

    ActiveChart.SetElement (msoElementLegendBottom)
    ActiveChart.Legend.Select

    ActiveChart.Legend.LegendEntries(1).Select
    ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Name = "=""Temperatura do aço"""
    ActiveChart.FullSeriesCollection(2).Name = "=""Incêndio padrão"""

    ActiveChart.Axes(xlValue).Select
    ActiveChart.Axes(xlValue).MajorUnit = 200
    ActiveSheet.Shapes(grafico).IncrementLeft -366.6
    ActiveSheet.Shapes(grafico).IncrementTop -10
    ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Select
    ActiveChart.ChartArea.Select
    ActiveChart.ChartType = xlXYScatterSmoothNoMarkers

    ActiveChart.FullSeriesCollection(2).Select
    With Selection.Format.Line
        .Visible = msoTrue
        .DashStyle = msoLineDash
    End With

End Sub
```

Figura AP. 6 – Sub Curva_Incêndio (2/2)

```
Sub Apagar_Conteúdo()

Dim AR, BR As Range

AR = Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row

Range("$A$2:$H" & AR).Select

Selection.ClearContents

End Sub
```

Figura AP. 7 – Sub Apagar_Conteúdo

```
Sub Fator_Massividade()

Dim perimetro, lados As String

    Sheets("Incêndio Padrão").Activate
    Cells(5, 4).Activate

perimetro = Cells(5, 2).FormulaR1C1

lados = Cells(5, 3).FormulaR1C1

    If perimetro = "Aberto" Then

        If lados = "3 lados" Then
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(RC[-3],'Base de dados'!C[-3]:C[9],10,FALSE)"
        Else
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(RC[-3],'Base de dados'!C[-3]:C[9],11,FALSE)"
        End If

    ElseIf perimetro = "Caixa" Then

        If lados = "3 lados" Then
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(RC[-3],'Base de dados'!C[-3]:C[9],12,FALSE)"
        Else
        ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(RC[-3],'Base de dados'!C[-3]:C[9],13,FALSE)"
        End If

    End If

End Sub
```

Figura AP. 8 – Sub Fator_Massividade

```
Sub Fator_Redução()
Application.ScreenUpdating = False
Dim a, b, c, d, e, f, temp, f1, f2, f3 As Double
Dim tabela, cell As Range
Sheets("Incêndio Padrão").Activate
Set tabela = Range("G13", "G24")
For Each cell In tabela
    temp = cell.Value
    If temp = 20 Or temp <= 100 Then
    a = 0
    b = 1
    c = 0
    d = 1
    e = 0
    f = 1
    ElseIf temp = 100 Or temp <= 200 Then
    a = 0
    b = 1
    c = (0.9 - 1) / 100
    d = 1 - 100 * c
    e = (0.89 - 1) / 100
    f = 1 - (100 * e)
    ElseIf temp = 200 Or temp <= 300 Then
    a = 0
    b = 1
    c = (0.8 - 0.9) / 100
    d = 0.9 - 200 * c
    e = (0.78 - 0.89) / 100
    f = 0.89 - 200 * e
    ElseIf temp = 300 Or temp <= 400 Then
    a = 0
    b = 1
    c = (0.7 - 0.8) / 100
    d = 0.8 - 300 * c
    e = (0.65 - 0.78) / 100
    f = 0.78 - 300 * e
    ElseIf temp = 400 Or temp <= 500 Then
    a = (0.78 - 1) / 100
    b = 0.78 - 500 * a
    c = (0.6 - 0.7) / 100
    d = 0.7 - 400 * c
    e = (0.53 - 0.65) / 100
    f = 0.65 - 400 * e
```

Figura AP. 9 – Sub Fator_Massividade (1/3)

```
    ElseIf temp = 500 Or temp <= 600 Then
    a = (0.47 - 0.78) / 100
    b = 0.47 - 600 * a
    c = (0.31 - 0.6) / 100
    d = 0.6 - 500 * c
    e = (0.3 - 0.53) / 100
    f = 0.53 - 500 * e
    ElseIf temp = 600 Or temp <= 700 Then
    a = (0.23 - 0.47) / 100
    b = 0.23 - 700 * a
    c = (0.13 - 0.31) / 100
    d = 0.31 - 600 * c
    e = (0.13 - 0.3) / 100
    f = 0.3 - 600 * e
    ElseIf temp = 700 Or temp <= 800 Then
    a = (0.11 - 0.23) / 100
    b = 0.11 - 800 * a
    c = (0.09 - 0.13) / 100
    d = 0.13 - 700 * c
    e = (0.07 - 0.13) / 100
    f = 0.13 - 700 * e
    ElseIf temp = 800 Or temp <= 900 Then
    a = (0.06 - 0.11) / 100
    b = 0.06 - 900 * a
    c = (0.068 - 0.09) / 100
    d = 0.09 - 800 * c
    e = (0.05 - 0.07) / 100
    f = 0.07 - 800 * e
    ElseIf temp = 900 Or temp <= 1000 Then
    a = (0.04 - 0.06) / 100
    b = 0.04 - 1000 * a
    c = (0.045 - 0.068) / 100
    d = 0.068 - 900 * c
    e = (0.03 - 0.05) / 100
    f = 0.05 - 900 * e
    ElseIf temp = 1000 Or temp <= 1100 Then
    a = (0.02 - 0.04) / 100
    b = 0.02 - 1100 * a
    c = (0.023 - 0.045) / 100
    d = 0.045 - 1000 * c
    e = (0.02 - 0.03) / 100
    f = 0.03 - 1000 * e
```

Figura AP. 10 – Sub Fator_Massividade (2/3)

```
    ElseIf temp = 1100 Or temp <= 1200 Then
    a = (0 - 0.02) / 100
    b = 0 - 1200 * a
    c = (0 - 0.023) / 100
    d = 0.023 - 1100 * c
    e = (0 - 0.02) / 100
    f = 0.02 - 1100 * e
    ElseIf temp > 1200 Then
    a = 0
    b = 0
    c = 0
    d = 0
    e = 0
    f = 0
    End If
    If temp = "-" Then
    cell.Offset(0, 1).Value = "-"
    cell.Offset(0, 2).Value = "-"
    cell.Offset(0, 3).Value = "-"
    Else
    f1 = a * temp + b
    f2 = c * temp + d
    f3 = e * temp + f
    cell.Offset(0, 1).Value = f1
    cell.Offset(0, 2).Value = f3
    cell.Offset(0, 3).Value = f2
    End If
Next
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

Figura AP. 11 – Sub Fator_Massividade (3/3)

APÊNDICE C

Tabela AP. 1 – Comportamento estrutural do pilar 03 antes da aplicação da temperatura crítica

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-559,77	2.500,00	-34,97	493,35	53,36	302,53
5	20	-529,02	2.500,00	-49,76	493,35	75,02	302,53
10	20	-493,03	2.500,00	-72,55	493,35	109,47	302,53
15	20	-498,82	2.500,00	-90,61	493,35	139,80	302,53
20	20	-504,37	2.500,00	-92,97	493,35	144,16	302,53
25	20	-508,61	2.500,00	-95,11	493,35	148,03	302,53
30	20	-509,67	2.500,00	-96,31	493,35	150,10	302,53
40	20	-513,21	2.500,00	-98,11	493,35	153,36	302,53
50	20	-518,04	2.500,00	-99,12	493,35	155,45	302,53
60	20	-524,01	2.500,00	-99,70	493,35	156,93	302,53
80	20	-538,07	2.500,00	-100,18	493,35	159,00	302,53
100	20	-554,23	2.500,00	-100,27	493,35	160,60	302,53
120	20	-572,52	2.500,00	-100,32	493,35	162,36	302,53

Tabela AP. 2 – Comportamento estrutural da viga 215 antes da aplicação da temperatura crítica

Tempo	Temperatura do aço	$N_{fi,Sd}$	$N_{fi,Rd}$	$V_{fi,Sd}$	$V_{fi,Rd}$	$M_{fi,Sd}$	$M_{fi,Rd}$
Min	°C	kN	kN	kN	kN	kN/m	kN/m
0	20	-9,02	532,75	98,39	364,32	-92,71	196,08
5	20	-44,20	532,75	102,66	364,32	-105,51	196,08
10	20	-95,47	532,75	107,57	364,32	-125,80	196,08
15	20	-127,24	532,75	108,79	364,32	-127,95	196,08
20	20	-130,12	532,75	106,93	364,32	-124,93	196,08
25	20	-132,90	532,75	106,40	364,32	-124,11	196,08
30	20	-134,85	532,75	106,33	364,32	-124,29	196,08
40	20	-137,20	532,75	105,88	364,32	-123,61	196,08
50	20	-137,72	532,75	105,16	364,32	-121,92	196,08
60	20	-137,11	532,75	104,21	364,32	-119,42	196,08
80	20	-134,02	532,75	101,87	364,32	-112,93	196,08
100	20	-129,58	532,75	99,11	364,32	-105,05	196,08
120	20	-124,45	532,75	-99,97	364,32	-108,08	196,08

APÊNDICE D

O presente apêndice foi desenvolvido para ilustrar a utilização do programa em VBA para determinar a curva dos modelos simplificados de incêndio e os fatores de redução ao longo da evolução do incêndio. Assim, para o caso do incêndio padrão, as seguintes etapas devem ser seguidas:

- O primeiro passo é selecionar o tempo de análise do incêndio, pelo preenchimento da célula apresentada em Figura AP. 12, conforme o TRRF ou qualquer outro tempo de interesse;

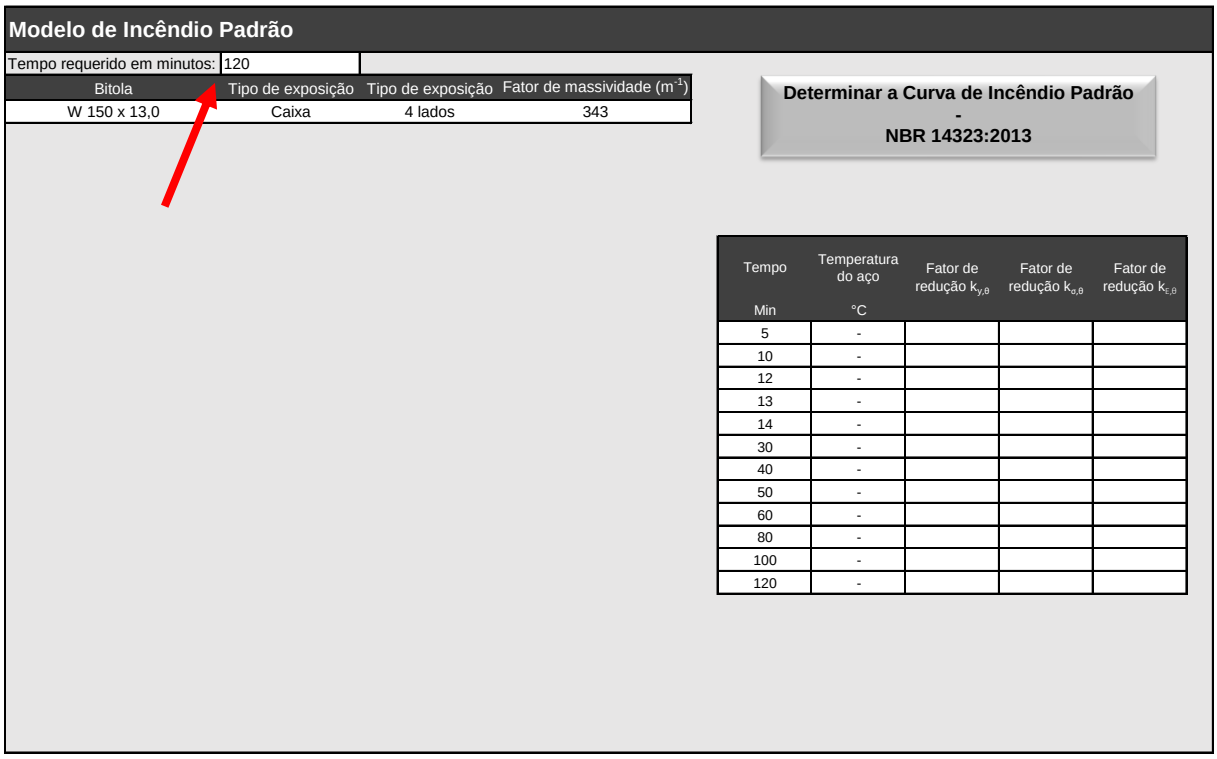


Figura AP. 12 – Definição do tempo de incêndio

- O próximo passo é selecionar o perfil metálico do elemento estrutural, conforme a Figura AP. 13. Em seguida, seleciona-se as duas características da exposição ao incêndio, escolhendo-se entre "Aberto"ou "Caixa" e "3 lados" ou "4 lados", também demonstradas na figura a seguir.

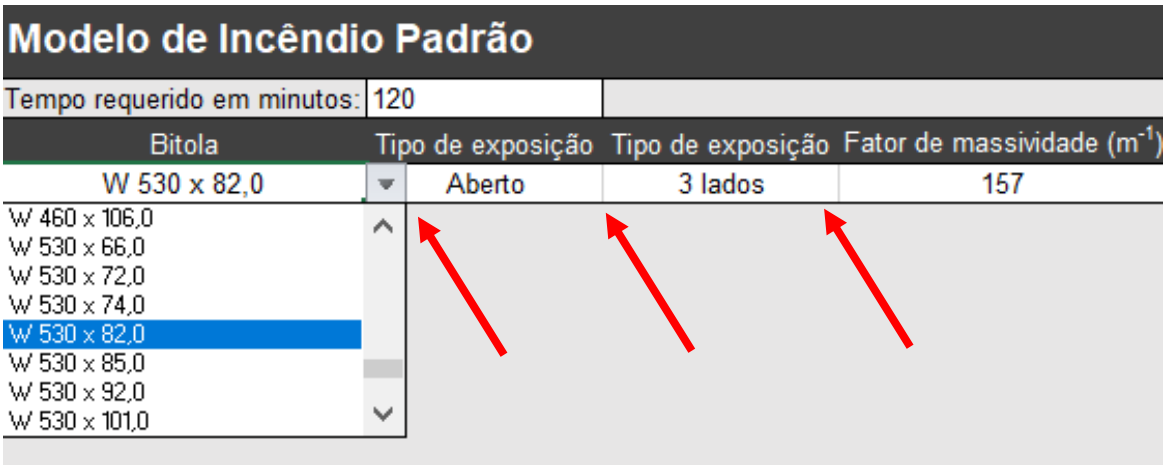


Figura AP. 13 – Seleção do perfil metálico e tipo de exposição ao fogo

- A próxima etapa é acionar o programa pela tecla destacada na Figura AP. 14, gerando as curvas de elevação da temperatura dos gases e do aço, bem como o preenchimento da tabela com as temperaturas do aço e com os fatores de redução para tempos definidos de incêndio. Além disso, o fator de massividade é obtido a partir da base de dados dos perfis metálicos e preenche a célula designada para tal parâmetro.

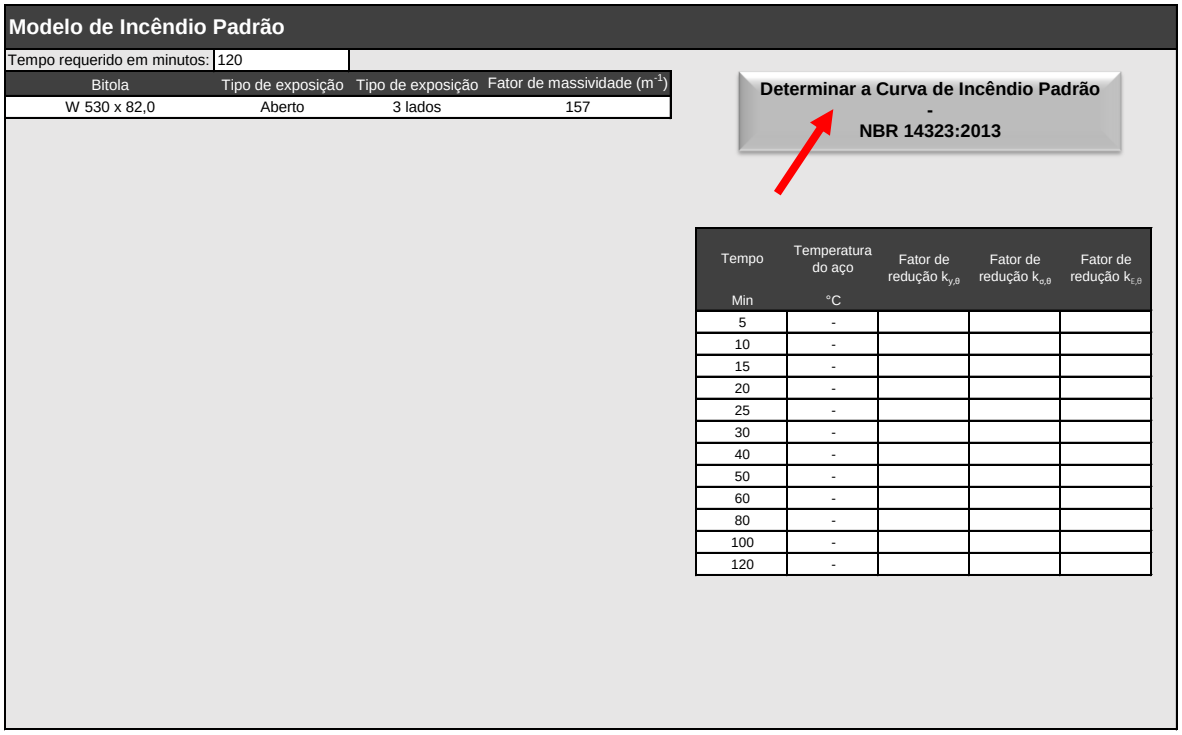


Figura AP. 14 – Acionamento do programa

- Finalmente, os resultados são apresentados conforme Figura AP. 15.

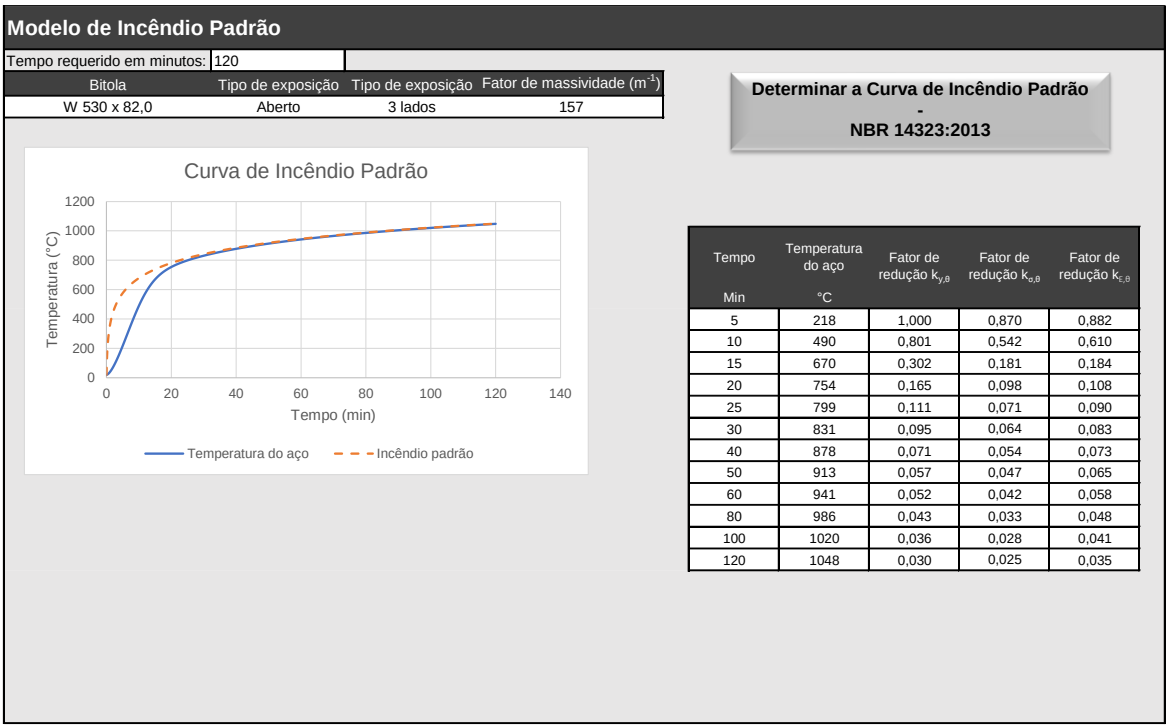


Figura AP. 15 – Resultados da execução do programa

Para o incêndio natural, o processo é similar, em que a diferença reside no preenchimento dos outros parâmetros para determinação das curvas de elevação de temperatura, como a carga de incêndio específica, o fator de abertura e o calor específico do material de vedação do compartimento.