

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RICARDO ANDERSON HOFFSTAETER

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS
PARCIALMENTE REVESTIDOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Maringá

2021

Página intencionalmente deixada em branco

RICARDO ANDERSON HOFFSTATER

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS
PARCIALMENTE REVESTIDOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas
Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Maringá

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

H711a

Hoffstaeter, Ricardo Anderson

Análise do comportamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio / Ricardo Anderson Hoffstaeter. -- Maringá, PR, 2021.
381 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Pilares mistos parcialmente revestidos. 2. Resistência ao fogo. 3. Resistência à flambagem. I. Humberto Martins, Carlos, orient. II. Piloto, Paulo Alexandre Gonçalves, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624.18

RICARDO ANDERSON HOFFSTAETER

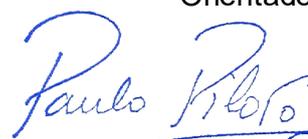
**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS PARCIALMENTE
REVESTIDOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 30/08/2021. Julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Orientador



Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
Departamento de Mecânica Aplicada
Instituto Politécnico de Bragança - Portugal
Coorientador



Prof. Dr. Luiz Antonio Farani de Souza
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus de Campo Mourão

Página intencionalmente deixada em branco

À minha família, pelo apoio incondicional
e por acreditarem em mim.

Página intencionalmente deixada em branco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me concedido esta oportunidade. Ele que me proporcionou conhecimento, paciência e dedicação, iluminando meu caminho, me amparando nos momentos difíceis e me fortalecendo para enfrentar as adversidades da vida.

À minha querida mãe, Nilda pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivo que foram fundamentais para o percurso desta jornada, que não mediu esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos, por me ensinar que a família é o alicerce de uma vida plena.

À minha querida noiva, Vanessa, pelo amor e carinho, pelo apoio incondicional, por todos os momentos compartilhados, pela força nos momentos difíceis, pela paciência e compreensão, por estar sempre presente e por ser um alicerce na minha vida.

Ao meu orientador, professor e amigo Carlos Humberto Martins, por ter aceitado este desafio, pela paciência e exigência, por toda a disponibilidade e atenção, por suas importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho e por ter depositado sua confiança em mim.

Ao meu coorientador e amigo Paulo Piloto, por ter aceitado mais este desafio, pelos conhecimentos transmitidos, pela atenção e apoio, pelas importantes contribuições no decorrer deste trabalho e pela exigência da excelência.

Aos meus professores e mestres, pelo conhecimento transmitido ao longo de minha formação acadêmica, em especial ao professor Ronaldo e ao professor Farani, por suas importantes contribuições. Me sinto privilegiado por terem compartilhado seus conhecimentos para me moldar não só como estudante, mas como pessoa.

Aos meus amigos, por terem compartilhado as dificuldades e alegrias que nos fizeram melhores como pessoas, e por terem se tornado uma família.

À fiel escudeira Amarela, que sempre esteve ao meu lado durante a elaboração do presente trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte de mais esta caminhada.

Página intencionalmente deixada em branco

RESUMO

Esse trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa numérica de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. O objetivo principal é avaliar o efeito da elevação da temperatura sobre o modelo analítico que permite a obtenção da resistência à flambagem de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, expostos ao fogo nas quatro faces, de acordo com a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999. Para tal, foi necessário determinar a resistência plástica à compressão axial e a rigidez efetiva à flexão, de acordo com as normas brasileiras e europeias vigentes, ABNT NBR 14343:2013 e CEN EN 1994-1-2:2005. Os modelos numéricos são baseados em modelagens 2D e 3D de pilares com perfis estruturais brasileiros e europeus. As modelagens 2D avaliaram 42 perfis estruturais comerciais brasileiros. Já as modelagens 3D foram realizadas em um total de 22 tipos de perfis estruturais brasileiros e europeus. O modelo termomecânico 3D usa o campo de temperatura para cada tempo de resistência ao fogo e aplica o método de Newton-Raphson com incremento de carga para determinar o valor da força de resistência à flambagem de pilares mistos parcialmente revestidos, com comprimentos de 3 e 5 metros, considerando diferentes condições de vinculação. Os resultados 2D são usados para sugerir um aprimoramento no método simplificado de cálculo na norma brasileira e os resultados 3D são usados para propor uma nova curva de flambagem utilizada nas formulações para a determinação da força axial resistente de cálculo de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Palavras-Chave: Pilares Mistos Parcialmente Revestidos; Resistência ao Fogo; Resistência à Flambagem.

Página intencionalmente deixada em branco

ABSTRACT

This work presents the results of a numerical research on composite partially encased columns subjected to fire. This work aims to assess the effect of the elevated temperatures on the balanced summation model into the calculation of the fire resistance of composite columns with partially encased steel sections, exposed to fire all around the column, according to the standard temperature-time curve ISO 834-1:1999. The plastic resistance to axial compression, and the effective flexural stiffness of partially encased columns in the fire situation should be determined according to current Brazilian and European Standards, ABNT NBR 14343 and CEN EN 1994-1-2:2005. The numerical models are based on the 2D and 3D modelling of the columns with Brazilian and European structural profiles. The 2D modelling evaluated 42 commercial Brazilian structural profiles. The 3D modelling was performed with a total 22 different structural profiles, using Brazilian and European profiles. The 3D thermomechanical model uses the temperature field for each fire rating time and applies the incremental load step solution method, based on the Newton Raphson to determine the buckling load of partially encased columns with 3 and 5 meters, considering different end conditions. The 2D results are used to propose the enhanced version of the balance summation model and the 3D results are used to propose a new buckling curve for partially encased columns under fire.

Keywords: Partially Encased Column; Fire Resistance; Buckling Resistance.

Página intencionalmente deixada em branco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Incêndio na Catedral de Notre-Dame	28
Figura 1.2: Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro.....	29
Figura 1.3: Incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida em São Paulo	29
Figura 2.1: Estratégia numérica elaborada para o pilar misto de aço e concreto.....	40
Figura 2.2: Estratégia numérica tridimensional e resultados térmicos	41
Figura 2.3: Geometria dos pilares mistos parcialmente revestidos e campos térmicos.....	41
Figura 2.4: Estratégia numérica adotada para as seções transversais estudadas.....	42
Figura 2.5: Estratégia numérica do pilar de aço e misto de aço e concreto	43
Figura 2.6: Pilar misto parcialmente revestido embutido, com alma paralela à parede	43
Figura 2.7: Modelo numérico e campo de temperaturas dos pilares mistos	44
Figura 2.8: Estratégia numérica utilizada no pilar misto, com alma perpendicular à parede ..	45
Figura 2.9: Estratégia numérica e campo de temperaturas na seção do pilar misto	46
Figura 2.10: Modelo esquemático do pilar misto isolado e ensaio experimental	47
Figura 2.11: Modelo esquemático do pilar misto com carregamento excêntrico	47
Figura 2.12: Modelo esquemático e ensaio experimental de pilares mistos.....	48
Figura 2.13: Modelo esquemático e ensaio de pilar misto embutido em parede.....	49
Figura 2.14: Exemplos de seções transversais de pilares mistos	49
Figura 2.15: Mecanismos resistentes da aderência: adesão, aderência mecânica e atrito	57
Figura 3.1: Sentido do fluxo de calor decorrente da diferença de temperaturas.....	62
Figura 3.2: Sentido do fluxo de calor decorrente da diferença de temperaturas.....	63
Figura 3.3: Resfriamento por convecção de um corpo aquecido.....	64
Figura 3.4: Representação das variáveis para o cálculo do fator de visada.....	67
Figura 3.5: Representação da curva de temperatura em um incêndio real	68
Figura 3.6: Representação de três diferentes modelos de curvas de incêndio	70
Figura 3.7: Curvas de incêndio nominal	71
Figura 3.8: Curva de temperatura em função do tempo ISO 834-1:1999.....	73
Figura 3.9: Curva padronizada de temperatura de hidrocarbonetos em função do tempo.....	74
Figura 3.10: Curva de temperatura de elementos exteriores padronizada	75
Figura 3.11: (a) Fogo localizado segundo Método de Heskestad e (b) Método de Hasemi	78
Figura 3.12: TRRF segundo a classificação das edificações brasileiras.....	81
Figura 3.13: TRRF de uma coluna mista parcialmente revestida	82
Figura 3.14: Relação tensão-deformação idealizada do aço do perfil	85
Figura 3.15: Curvas de tensão-deformação do aço do perfil em temperaturas elevadas.....	86
Figura 3.16: Fatores de redução da resistência do aço do perfil em temperaturas elevadas....	87
Figura 3.17: Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil	87
Figura 3.18: Redução do módulo de elasticidade do aço do perfil temperaturas elevadas.....	88
Figura 3.19: Curvas de tensão-deformação do aço CA-50 em temperaturas elevadas.....	90
Figura 3.20: Fatores de redução das propriedades do aço CA-50 em temperaturas elevadas .	91
Figura 3.21: Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do aço do reforço	91
Figura 3.22: Curva do módulo de elasticidade do aço CA-50 em temperaturas elevadas.....	92
Figura 3.23: Curva de tensão-deformação idealizada do concreto	93
Figura 3.24: Curvas de tensão-deformação do concreto C20 em temperaturas elevadas.....	94
Figura 3.25: Fator de redução das propriedades do concreto C20 em temperaturas elevadas	95
Figura 3.26: Curva do módulo de elasticidade do concreto C20 em temperaturas elevadas...	96
Figura 3.27: Calor específico do aço em função da temperatura.....	97
Figura 3.28: Condutibilidade térmica do aço em função da temperatura	98
Figura 3.29: Densidade do aço em função da temperatura	99
Figura 3.30: Calor específico do concreto em função da temperatura.....	100

Figura 3.31: Condutibilidade térmica do concreto em função da temperatura	102
Figura 3.32: Densidade do concreto em função da temperatura	103
Figura 4.1: Seção transversal idealizada com os parâmetros de dimensionamento	108
Figura 4.2: Modos de deformações estruturais de pilares em situação de incêndio.....	109
Figura 4.3: Seção transversal do total e reduzida para o dimensionamento em situação de incêndio	110
Figura 4.4: Fator de redução β da resistência da alma em situação de incêndio	114
Figura 4.5: Volume de controle: campo de fluxo de calor e de fluido.....	121
Figura 4.6: Geometria do elemento “PLANE55” e a seção transversal modelada	123
Figura 4.7: Campo de temperaturas em 2D da seção transversal série HP	123
Figura 4.8: Detalhes do campo de temperaturas do perfil HP 250x62,0 em TRRF 30.....	124
Figura 4.9: Quatro diferentes malhas utilizadas para o teste de convergência.....	125
Figura 4.10: Evolução da temperatura utilizado para o teste de convergência das malhas....	126
Figura 4.11: Geometria do elemento “SOLID70” e a seção transversal dos pilares.....	128
Figura 4.12: Geometria do elemento “SOLID185” e a seção transversal dos pilares.....	129
Figura 4.13: Geometria do elemento “SOLID65” e a seção transversal dos pilares.....	129
Figura 4.14: Geometria do elemento “SHELL181” e a seção transversal dos pilares	130
Figura 4.15: Malhas de elementos tridimensionais utilizadas nas simulações numéricas	131
Figura 4.16: Três diferentes malhas utilizadas para o teste de convergência.....	132
Figura 4.17: Evolução da temperatura utilizado para o teste de convergência das malhas....	133
Figura 4.18: Seção transversal mista e estratégia numérica dos autores no MATLAB.....	137
Figura 4.19: Malha bidimensional da seção transversal utilizada para a análise térmica	139
Figura 4.20: Curvas da evolução da temperatura da seção transversal	140
Figura 4.21: Campo de temperaturas da seção transversal.....	141
Figura 4.22: Campo de temperaturas obtidos nas simulações numéricas	141
Figura 4.23: Elemento estrutural após a realização do ensaio experimental.....	143
Figura 4.24: Evolução da temperatura na seção para os testes de 200°C, 400°C e 600°C	143
Figura 4.25: Malha da modelagem numérica e envoltória de temperatura em TRRF 120	145
Figura 4.26: Curvas de evoluções de temperaturas do teste de 200°C.....	146
Figura 4.27: Curvas de evoluções de temperaturas do teste de 400°C.....	148
Figura 4.28: Curvas de evoluções de temperaturas do segundo teste de 600°C	150
Figura 4.29: Pilares mistos parcialmente revestidos antes e após o ensaio experimental	152
Figura 4.30: Curvas de evoluções de temperaturas do ensaio experimental.....	153
Figura 4.31: Malha da modelagem numérica e envoltória de temperatura em TRRF 120	153
Figura 4.32: Curvas das evoluções de temperaturas dos resultados experimentais e numéricos	154
Figura 6.1: Campo de temperaturas das modelagens bidimensionais.....	169
Figura 6.2: Campo de temperaturas das modelagens tridimensionais.....	169
Figura 6.3: Campo de temperaturas das modelagens numéricas bidimensionais.....	171
Figura 6.4: Comparação da temperatura média das mesas.....	172
Figura 6.5: Comparação da temperatura média das mesas.....	172
Figura 6.6: Campo de temperaturas das modelagens numéricas bidimensionais.....	174
Figura 6.7: Temperatura média das almas dos perfis estruturais de aço	175
Figura 6.8: Temperatura média das almas nas modelagens numéricas térmicas 2D	175
Figura 6.9: Temperatura média das almas dos perfis estruturais de aço	176
Figura 6.10: Campo de temperaturas das modelagens numéricas bidimensionais.....	177
Figura 6.11: Temperatura média do concreto das seções transversais mistas.....	178
Figura 6.12: Temperatura média do concreto das modelagens numéricas térmicas bidimensionais.....	179
Figura 6.13: Campo de temperaturas da isotérmica de 500°C	180

Figura 6.14: Redução horizontal do concreto das seções transversais mistas	181
Figura 6.15: Redução horizontal do concreto para cada TRRF	181
Figura 6.16: Redução vertical do concreto das seções transversais mistas	182
Figura 6.17: Redução vertical do concreto para cada TRRF	183
Figura 6.18: Campo de temperaturas das armaduras longitudinais	184
Figura 6.19: Temperatura média das barras da armadura longitudinal.....	185
Figura 6.20: Temperatura média das barras das armaduras longitudinais.....	185
Figura 6.21: Temperatura média das barras das armaduras longitudinais.....	186
Figura 7.1: Erro relativo da temperatura média das mesas	191
Figura 7.2: Erro relativo da temperatura média das mesas	192
Figura 7.3: Erro relativo das temperaturas médias das almas.....	193
Figura 7.4: Erro relativo das temperaturas médias das almas.....	193
Figura 7.5: Erro relativo das temperaturas médias no concreto.....	194
Figura 7.6: Erro relativo das temperaturas médias no concreto.....	195
Figura 7.7: Erro relativo das espessuras horizontais de concreto a serem desprezadas.....	195
Figura 7.8: Erro relativo das espessuras horizontais de concreto a serem desprezadas.....	196
Figura 7.9: Erro relativo das espessuras verticais de concreto a serem desprezadas.....	197
Figura 7.10: Erro relativo das espessuras verticais de concreto a serem desprezadas.....	197
Figura 7.11: Erro relativo da temperatura média das barras das armaduras longitudinais	198
Figura 7.12: Erro relativo da temperatura média das barras das armaduras longitudinais	199
Figura 7.13: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m	200
Figura 7.14: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m	201
Figura 7.15: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m	202
Figura 7.16: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação da ABNT NBR 14323:2013	203
Figura 7.17: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação do aprimoramento	204
Figura 7.18: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação do ANSYS	205
Figura 7.19: Erro relativo da relação entre forças resistentes de plastificação dos pilares mistos	207
Figura 7.20: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados .	208
Figura 7.21: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados .	209
Figura 7.22: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo a ABNT NBR 14323:2013	212
Figura 7.23: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo a proposta de aprimoramento	213
Figura 7.24: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo	214
Figura 7.25: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo	215
Figura 7.26: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo	216
Figura 7.27: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados .	216
Figura 7.28: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados .	217

Página intencionalmente deixada em branco

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do aço estrutural ASTM A572 Gr.50.....	84
Tabela 3.2: Formulações de propriedades do aço do perfil em temperaturas elevadas.....	85
Tabela 3.3: Fatores de redução das propriedades do aço do perfil em temperaturas elevadas	86
Tabela 3.4: Características mecânicas do aço CA-50.....	88
Tabela 3.5: Determinação das propriedades do aço CA-50 em temperaturas elevadas.....	89
Tabela 3.6: Fatores de redução das propriedades do aço CA-50 a temperaturas elevadas.....	90
Tabela 3.7: Propriedades mecânicas do concreto C20.....	92
Tabela 3.8: Formulações das relações de tensão-deformação do concreto C20.....	93
Tabela 3.9: Fatores de redução das características mecânicas do concreto.....	94
Tabela 4.1: Materiais e propriedades mecânicas gerais dos pilares mistos brasileiros.....	105
Tabela 4.2: Características das seções transversais brasileiras em estudo.....	106
Tabela 4.3: Características das seções transversais europeias em estudo.....	107
Tabela 4.4: Materiais e propriedades mecânicas gerais dos pilares mistos europeus.....	107
Tabela 4.5: Coeficientes de redução para a rigidez à flambagem.....	111
Tabela 4.6: Parâmetros para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil.....	112
Tabela 4.7: Parâmetros para a redução da altura da alma.....	113
Tabela 4.8: Espessura da camada externa de concreto a ser desprezada.....	115
Tabela 4.9: Temperatura média na seção resistente de concreto.....	116
Tabela 4.10: Fator de redução k_{ys} , θ para a tensão de escoamento do aço do reforço.....	118
Tabela 4.11: Fatores de redução k_{Es} , θ para o módulo de elasticidade do aço do reforço....	118
Tabela 4.12: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal.....	126
Tabela 4.13: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal.....	134
Tabela 4.14: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados por Štefan et al. (2019).....	138
Tabela 4.15: Propriedades térmicas dos materiais utilizados.....	139
Tabela 4.16: Comparação dos valores de temperaturas para validação numérica.....	141
Tabela 4.17: Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.....	142
Tabela 4.18: Propriedades térmicas gerais dos materiais utilizados.....	145
Tabela 4.19: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 200°C.....	147
Tabela 4.20: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 400°C.....	149
Tabela 4.21: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 600°C.....	151
Tabela 4.22: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal.....	155
Tabela 5.1: Parâmetros para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil.....	158
Tabela 5.2: Parâmetros para a determinação da temperatura média na alma do perfil.....	160
Tabela 5.3: Coeficientes para a estimar a temperatura média do núcleo de concreto.....	162
Tabela 5.4: Coeficientes para a redução da espessura horizontal do concreto.....	162
Tabela 5.5: Coeficientes e parâmetros para a redução da espessura vertical do concreto.....	163
Tabela 5.6: Parâmetros para determinar a temperatura média na armadura longitudinal.....	165
Tabela 6.1: Temperatura mínima e máxima dos perfis estruturais em [°C].....	170
Tabela 7.1: Fatores de imperfeições atribuídos às curvas de flambagem.....	214

Página intencionalmente deixada em branco

NOTAÇÕES

Letras maiúsculas latinas

A_c	Área da seção transversal de concreto à compressão.
$(u/A)_p$	Fator de massividade.
A_s	Área da seção das armaduras longitudinais.
$A_{s,min}$	Área da seção mínima das armaduras.
$A_{s,máx}$	Área da seção máxima das armaduras.
E	Valor característico do módulo de elasticidade à temperatura ambiente.
E_a	Valor característico do módulo de elasticidade do aço estrutural à temperatura ambiente.
E_c	Valor característico do módulo de elasticidade do concreto à temperatura ambiente.
E_s	Valor característico do módulo de elasticidade do aço do reforço à temperatura ambiente.
$E_{a,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço estrutural à temperatura elevada.
$E_{c,\theta}$	Módulo de elasticidade do concreto à temperatura elevada.
$E_{s,\theta}$	Módulo de elasticidade da armadura de aço à temperatura elevada.
E_θ	Valor característico do módulo de elasticidade à temperatura elevada.
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do concreto.
$E_{c,sec,\theta}$	Valor característico para a secante do módulo de elasticidade do concreto em situação de incêndio, dado por $f_{c,\theta}/\epsilon_{c,sec,\theta}$.
G_a	Valor característico do módulo de elasticidade transversal de aço estrutural à temperatura ambiente.
$(EI)_{fi,ef}$	Rigidez efetiva do pilar misto à flexão exposto ao fogo.
$(EI)_{fi,ef,f}$	Rigidez efetiva das duas mesas do perfil de aço em situação de incêndio.
$(EI)_{fi,ef,w}$	Rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio.
$(EI)_{fi,ef,c}$	Rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio.
$(EI)_{fi,ef,s}$	Rigidez efetiva das barras da armadura em situação de incêndio.
H_t	Coefficiente empírico para redução da altura da alma.
I_z	Momento de inércia relativo ao eixo z.
L	Comprimento de referência do elemento estrutural.
L_{fi}	Comprimento de flambagem do elemento estrutural.
$N_{fi,Rd}$	Força axial resistente de cálculo de pilares mistos em situação de incêndio.
$N_{fi,e}$	Força de flambagem elástica.
$N_{fi,pl,Rd}$	Força axial de plastificação de cálculo.
$N_{fi,pl,Rd,f}$	Força axial de plastificação de cálculo das mesas do perfil de aço.
$N_{fi,pl,Rd,w}$	Força axial de plastificação de cálculo da alma do perfil de aço.
$N_{fi,pl,Rd,c}$	Força axial de plastificação de cálculo do concreto da seção mista.
$N_{fi,pl,Rd,s}$	Força axial de plastificação de cálculo das armaduras da seção mista.
T_g	Temperatura do gás.
T_m	Temperatura do material.

Letras minúsculas latinas

b_c	Largura da seção transversal.
$b_{c,fi}$	Parâmetro de redução da espessura de concreto de seções mistas.
$b_{c,fi,h}$	Distância horizontal, entre a isotérmica de 500°C e o limite lateral da seção transversal.
$b_{c,fi,v}$	Distância vertical, entre a isotérmica de 500°C e a extremidade interior das mesas do perfil de aço.
c_a	Calor específico do aço.
c_c	Calor específico do concreto.
d_c	Altura da seção transversal do pilar misto parcialmente revestido.
f_{cm}	Valor médio da tensão do concreto a compressão.
f_{ck}	Valor característico da tensão do concreto à compressão.
f_{ctm}	Valor médio da tensão do concreto à tração.
$f_{c,\theta}$	Valor da tensão do concreto à temperatura θ .
f_y	Valor da tensão de escoamento do aço.
$f_{ys,\theta}$	Tensão de escoamento do aço dos reforços à temperatura θ .
f_u	Tensão de ruptura do aço.
h	Altura de uma seção transversal.
h_i	Altura entre as mesas da seção transversal.
\dot{h}_{net}	Valor de cálculo do fluxo de calor por unidade de área.
$\dot{h}_{net,c}$	Valor de cálculo para o fluxo de calor por unidade de área por convecção.
$\dot{h}_{net,r}$	Valor de cálculo para o fluxo de calor por unidade de área por radiação.
$h_{w,fi}$	Redução da altura da alma dos perfis metálicos.
$k_{IM,t}$	Coefficiente empírico relacionado com o fator de massividade.
$k_{f,t}$	Coefficiente empírico relacionado com a espessura da mesa do perfil de aço.
$k_{w,t}$	Coefficiente empírico relacionado com a espessura da alma do perfil de aço.
$k_{s,t}$	Coefficiente empírico relacionado com a armadura longitudinal.
$k_{b0,t}$	Coefficiente empírico de uma distância de referência.
$k_{Ac,t}$	Coefficiente empírico relacionado com a área de concreto.
$k_{bc,t}$	Coefficiente empírico relacionado a largura do perfil de aço.
k_t	Coefficiente empírico em um dado TRRF.
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade do aço à temperatura θ .
$k_{c,\theta}$	Fator de redução das propriedades mecânicas do concreto à temperatura θ .
$k_{y,\theta}$	Fator de redução para a tensão de escoamento do aço à temperatura θ .
$k_{p,\theta}$	Fator de redução para a tensão do limite de proporcionalidade do aço à temperatura θ .
t	Tempo de exposição ao fogo.
t_f	Espessura da mesa do perfil de aço.
t_w	Espessura da alma do perfil de aço.
u_{sm}	Média geométrica das distâncias u_1 e u_2 .
u_1	Distância entre o eixo do reforço e a extremidade lateral dos perfis.
u_2	Distância entre o eixo do reforço e a face interna das mesas.

Letras minúsculas gregas

α	Fator de imperfeição atribuído à curva de flambagem.
α_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção.
β	Fator de redução da resistência ao escoamento em função da altura residual da seção transversal.
$\varphi_{0,fi}$	Parâmetro utilizado para determinar o valor de χ_{fi} .
$\varphi_{f,\theta}$	Coefficiente de redução associado às mesas do perfil de aço.
$\varphi_{w,\theta}$	Coefficiente de redução associado à alma do perfil de aço.
$\varphi_{c,\theta}$	Coefficiente de redução associado ao concreto da seção transversal mista.
$\varphi_{s,\theta}$	Coefficiente de redução associado às armaduras da seção transversal mista.
ε_y	Deformação na resistência ao escoamento do aço ou do concreto.
ε_u	Deformação na resistência à ruptura do aço ou do concreto.
ε_p	Deformação na resistência do limite de proporcionalidade do aço ou do concreto.
ε_{c1}	Deformação do concreto à compressão corresponde a tensão máxima
$\varepsilon_{c1,\theta}$	Deformação do concreto correspondente ao valor máximo da resistência à temperatura elevada.
$\varepsilon_{cu1,\theta}$	Deformação do concreto correspondente ao valor de ruptura à temperatura elevada θ_c .
ε_f	Emissividade do fogo.
ε_m	Emissividade da superfície do elemento.
ϕ	Diâmetro da barra da armadura longitudinal.
θ_a	Temperatura do aço.
θ_c	Temperatura do concreto.
$\theta_{f,t}$	Temperatura média nas mesas do perfil de aço.
$\theta_{w,t}$	Temperatura média na alma do perfil de aço.
$\theta_{c,t}$	Temperatura média no concreto.
$\theta_{s,t}$	Temperatura média no aço do reforço.
θ_r	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio.
θ_g	Temperatura do gás no compartimento em chamas.
$\theta_{0,t}$	Valor de referência da temperatura em um período de exposição ao fogo.
λ_a	Condutividade térmica do aço.
λ_c	Condutividade térmica do concreto.
$\lambda_{(\theta)}$	Condutividade térmica em altas temperaturas.
$\lambda_{0,fi}$	Índice de esbelteza reduzido em situação de incêndio.
ρ_a	Massa específica do aço.
ρ_c	Massa específica do concreto.
$\rho_{(\theta)}$	Massa específica.
ν	Coefficiente de Poisson.
σ	Constante de Stephan-Boltzmann.
χ_{fi}	Fator de redução associado à resistência à compressão.

Página intencionalmente deixada em branco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 Objetivos	32
1.1.1 Objetivo Geral	32
1.1.2 Objetivos Específicos	33
1.2 Justificativa	34
1.3 Metodologia	35
1.4 Organização do trabalho	38
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1 Pesquisas a respeito de pilares mistos em situação de incêndio	39
2.1.1 Estudos numéricos.....	39
2.1.2 Estudos experimentais.....	46
2.2 Pilares Mistos.....	49
2.2.1 Pilares mistos preenchidos	50
2.2.2 Pilares mistos totalmente revestidos.....	50
2.2.3 Pilares mistos parcialmente revestidos.....	50
2.3 Componentes dos pilares mistos parcialmente revestidos	51
2.3.1 Perfil metálico	52
2.3.2 Armadura longitudinal	52
2.3.3 Concreto	53
2.3.4 Conectores de cisalhamento	54
2.4 Vantagens e desvantagens do emprego de pilares mistos.....	54
2.5 Comportamento da seção sob esforços solicitantes	56
2.5.1 Efeito de aderência	56
2.6 Restrições térmicas no comportamento estrutural dos pilares	58
3. AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS MISTAS.....	59
3.1 O incêndio e modelos de interesse	59
3.1.1 Transferência de calor	60
3.1.2 Curva de incêndio natural.....	68
3.1.3 Curvas de incêndio nominais	71
3.2 Engenharia de segurança contra incêndio em edifícios	75
3.3 Tempo requerido de resistência ao fogo	79
3.3.1 Ações de segurança contra incêndio no brasil.....	80
3.4 Propriedades da seção mista sob ações térmicas.....	83
3.4.1 Propriedades mecânicas do aço e do concreto	83
3.4.2 Propriedades térmicas do aço e do concreto	96
4. PROCEDIMENTO DE DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO E NUMÉRICO.....	105
4.1 Características dos pilares mistos estudados.....	105
4.2 Método analítico do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013	109
4.2.1 Mesas do perfil de aço.....	111
4.2.2 Alma do perfil de aço	113
4.2.3 Concreto entre as mesas e a alma do perfil de aço.....	115
4.2.4 Armadura longitudinal	117
4.2.5 Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio	119
4.3 Método avançado de cálculo	119
4.3.1 Apresentação do Software.....	120
4.3.2 Análise térmica não linear do modelo	121
4.3.3 Teste de convergência da malha do modelo bidimensional	124
4.3.4 Elementos Finitos utilizados nas modelagens numéricas tridimensionais.....	127

4.3.5	Teste de convergência da malha do modelo tridimensional	131
4.3.6	Limite para o deslocamento vertical e imperfeição geométrica	134
4.4	Validação do modelo numérico	136
4.4.1	Primeira validação numérica.....	136
4.4.2	Segunda validação numérica.....	142
4.4.3	Terceira validação numérica	151
5.	PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013....	157
5.1	Temperatura das mesas do perfil de aço.....	157
5.2	Temperatura da alma do perfil de aço	159
5.3	Concreto.....	161
5.4	Temperatura da armadura longitudinal.....	164
5.4.1	Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio	168
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	169
6.1	Análise térmica não linear	169
6.1.1	Temperaturas nas mesas do perfil de aço estrutural	171
6.1.2	Temperaturas na alma do perfil de aço estrutural	173
6.1.3	Temperatura média do concreto e seção resistente.....	177
6.1.4	Temperatura da armadura longitudinal.....	183
6.2	Análise termoestrutural estática linear e não linear	187
6.2.1	Resultados da resistência à flambagem linear elástica	188
6.2.2	Resultados da resistência plástica	188
6.2.3	Resultados da resistência à flambagem.....	188
7.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	191
7.1	Erro relativo das temperaturas das análises bidimensionais.....	191
7.1.1	Erro relativo das temperaturas médias das mesas.....	191
7.1.2	Erro relativo das temperaturas médias das almas dos perfis estruturais.....	192
7.1.3	Erro relativo das temperaturas médias no concreto	194
7.1.4	Erro relativo das temperaturas médias nas barras das armaduras longitudinais.....	198
7.1.5	Erro relativo da força de flambagem elástica	199
7.1.6	Erro relativo da força axial de plastificação de cálculo	206
7.1.7	Erro relativo para o fator χ	208
7.2	Força axial resistente de cálculo	211
7.2.1	Erro relativo com a nova curva de flambagem	216
8.	CONCLUSÕES	219
8.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	222
	REFERÊNCIAS	223
	APÊNDICE A.....	229
	APÊNDICE B.....	277
	APÊNDICE C.....	285
	APÊNDICE D.....	345
	APÊNDICE E.....	355

1. INTRODUÇÃO

O concreto e o aço são os materiais mais utilizados na construção civil. O desenvolvimento urbano e social no mundo hoje é tão grande que seria impossível imaginar a vida cotidiana sem o emprego desses materiais (SIMÕES; ROCHA; MUNAIAR NETO, 2018).

A cada dia novas obras de infraestrutura como portos, aeroportos, rodovias, ferrovias, edifícios cada vez maiores e imponentes evidenciam a evolução que a sociedade percorre neste momento devido a utilização em larga escala desses materiais (HELENE; ANDRADE, 2010).

As características peculiares do aço e do concreto tornaram possíveis os avanços no processo de sistematização dos métodos construtivos e sua utilização extensiva transformou a indústria da construção civil em um gigantesco mercado, colocando em outro patamar tanto o desenvolvimento tecnológico quanto as pesquisas científicas a respeito desses materiais (QUEIROZ; PIMENTA; GALVÃO, 2012).

Para Piquer e Hernández-Figueirido (2016) os elementos mistos de aço e concreto aliam sinergicamente as vantagens de cada um dos materiais em apenas um elemento. A associação de perfis estruturais de aço com o concreto simples ou armado forma uma estrutura composta e solidária, conferindo grande capacidade resistente sem o aumento de sua seção transversal, podendo o elemento ser pré-fabricado ou moldado *in-loco*.

No último século, as pesquisas envolvendo a segurança das estruturas estiveram entre as principais preocupações tanto dos projetistas quanto dos legisladores. Em Malhotra (1954) e em Malhotra e Stevens (1964) foram avaliados os efeitos das altas temperaturas em pilares de concreto. Outras pesquisas importantes a respeito de elementos mistos que se destacam foram Schleich (1987), Kordina (1989), além do estudo de Lie e Chabot (1990).

Winter e Lange (2000) e Han et al. (2002) são exemplos de outros estudos experimentais a respeito de pilares mistos em situação de incêndio que devem ser destacados por avaliarem o desempenho desses elementos em temperaturas elevadas.

No estudo de Prickett e Driver (2006) foram realizados testes experimentais de pilares mistos com o objetivo de desenvolver modelos matemáticos de maior precisão. Já o estudo de Wang e Tan (2006) apresentou novos conceitos de dimensionamento intitulado “Método da Área Residual”.

Já o estudo experimental de Huang et al. (2007) avaliou os efeitos das restrições axiais em pilares mistos parcialmente revestidos submetidos ao incêndio.

Outros trabalhos relevantes a respeito de elementos mistos em situação de incêndio foram Correia e Rodrigues (2010), Ellobody e Young (2010), Korzen et al. (2010) e Piloto et al. (2013, 2015, 2017 e 2018).

Os estudos Arezki e Said (2014), Piquer e Hernández-Figueirido (2016), Králik et al. (2016) também colaboraram de forma significativa no desenvolvimento de formulações que descrevessem o comportamento de pilares mistos em situação de incêndio.

Garantir a estabilidade estrutural de uma edificação vai muito além de proteger as pessoas que ali habitam ou trabalham, é também proteger os bens materiais, reduzindo ao máximo os danos causados por uma situação crítica, como o incêndio (FRANSSEN; KODUR; ZAHARIA, 2009).

Ao longo da história ocorreram diversos incidentes envolvendo situações de incêndio de edificações, em muitos houve perdas irreparáveis de vidas e em todos houve perdas de bens materiais. Alguns dos incidentes recentes que tiveram maior repercussão, tanto na mídia nacional quanto internacional foram os incêndios na Catedral de Notre-Dame, o incêndio no Museu Nacional no Rio de Janeiro e um incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida em São Paulo.

Figura 1.1: Incêndio na Catedral de Notre-Dame



Fonte: Adaptado de EXAME (2019)

A Catedral de Notre-Dame de Paris foi inaugurada no ano de 1163, o incêndio durou cerca de 14 horas e causou danos consideráveis em um dos mais importantes símbolos da história da arte e da arquitetura.

Figura 1.2: Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro



Fonte: Adaptado de VEJA (2018)

O incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro, inaugurado em 1818, destruiu muito mais que uma edificação centenária, cerca de 90% do acervo histórico, composto de itens de valor inestimável, foi perdido com as chamas.

Figura 1.3: Incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida em São Paulo



Fonte: Adaptado de VEJA (2018)

As 14 horas de incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida em São Paulo, projetado na década de 1960, levaram ao colapso da estrutura deixando 7 vítimas fatais e dois desaparecidos.

O incêndio é um fenômeno devastador e muito temido, pelo que é necessário entender e racionalizar seus mecanismos de funcionamento a fim de aprimorar as medidas de prevenção e controle. As medidas de combate ao incêndio evoluíram ao longo dos anos em resposta aos desastres ocorridos (WANG, 2002).

Nesse sentido, estudar o comportamento de estruturas em situações de incêndio é de extrema relevância, uma vez que a elevação da temperatura altera de forma significativa as propriedades mecânicas do aço e concreto (PERIN; SILVA; ROVERE, 2015). É, portanto,

fundamental avaliar de forma precisa a resistência estrutural dos elementos construtivos a fim de evitar um possível colapso estrutural (SIMÕES; ROCHA; NETO, 2018).

É exigido por lei garantir a estabilidade estrutural em uma situação crítica acidental, para que proporcione tempo hábil às autoridades competentes em agir, combatendo o incêndio e minimizando os danos estruturais na edificação e em edificações vizinhas (VILA REAL 2009).

Segundo Han et al. (2016), os elementos estruturais puramente de aço, quando não receberem proteção passiva ou qualquer tipo de isolamento térmico, são altamente suscetíveis à degradação de sua capacidade resistente sob ação da elevação de temperatura, devido à sua alta condutividade térmica e consequente redução das propriedades mecânicas.

Assim, associar o elemento de aço com materiais que possuem um melhor desempenho em temperaturas elevadas é, intuitivamente, uma solução interessante para assegurar um melhor desempenho estrutural (CORREIA; RODRIGUES, 2011).

Segundo Franssen, Kodur e Zaharia (2009), elementos estruturais formados por seções transversais mistas de aço e concreto têm se mostrado como uma opção viável, uma vez que apresentam uma ótima capacidade resistente aliada a um bom desempenho em situações de incêndio.

Entretanto, para Rigobello (2011), a análise do comportamento de estruturas de aço e mistas em situações críticas de elevação de temperatura representa um problema complexo, no qual os métodos analíticos de dimensionamento podem não ser suficientes para assegurar o real desempenho do elemento isolado ou da estabilidade da edificação.

As normas que regulamentam os procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos em situação de incêndio, como a ABNT NBR 14323:2013 e o CEN EN 1994-1-2:2005, assim como os códigos relacionados às exigências de segurança de estruturas em situação de incêndio, como a ABNT NBR 14432:2000, têm por base ensaios de elementos isolados em fornos e equações empíricas que têm o intuito de descrever o comportamento estrutural em temperaturas elevadas, ou seja, uma abordagem por métodos prescritivos (RIGOBELLO 2011).

Como consequência direta da aplicação dos métodos prescritivos, os projetos podem ser pouco econômicos ou em alguns casos inseguros, uma vez que muitas variáveis envolvidas em um incêndio real são idealizadas, minoradas ou desprezadas (WANG, 2002).

Ensaaios em laboratórios de elementos isolados ou mesmo de estruturas completas em escala real, que tenham o intuito de avaliar o desempenho, são caros e complexos. Entretanto são excelentes métodos de análise para o estudo do comportamento real de estruturas em

situação de incêndio (RIGOBELLO, 2011). Além disso, são aceitos como métodos de análise na regulamentação normativa.

Nesse sentido, a modelagem computacional se apresenta como uma alternativa interessante para o estudo do comportamento de estruturas, não apenas à temperatura ambiente, mas principalmente em situação de incêndio. Uma verificação da precisão dos modelos numéricos deve ser feita com base nos resultados de ensaios experimentais relevantes. Os resultados dos cálculos podem referir-se a temperaturas, deformações e tempos de resistência ao fogo. Os parâmetros críticos devem ser verificados para garantir que o modelo esteja em conformidade com os princípios sólidos de engenharia, por meio de uma análise de sensibilidade.

As simulações numéricas possibilitam a análise de diversos cenários de condições realísticas e com diferentes configurações do elemento estrutural a um baixo custo, quando comparados aos ensaios em escala real (RIGOBELLO, 2011).

Segundo Martins (2001) é imprescindível que na análise estrutural, seja qual for o método utilizado, os modelos devem procurar representar de maneira mais precisa possível o comportamento real das estruturas.

Por esse motivo, é imperativo conhecer as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais, para que as simulações numéricas sejam capazes de representar os fenômenos observados em experimentos de escala real nos modelos numéricos construtivos, para que sejam confiáveis e válidos.

O entendimento de como esses materiais se comportam sob esforços possibilitou a normalização do dimensionamento de elementos estruturais. As propriedades mecânicas do aço e do concreto a temperatura elevada estão bem estabelecidas nas prescrições normativas, tanto brasileira com a ABNT NBR 14323:2013 e a ABNT NBR 15200:2012 específica para concreto em situação de incêndio, assim como nas normas europeias CEN EN 1992-1-2:2004, CEN EN 1993-1-2:2005 e no CEN EN 1994-1-2:2005.

Para o dimensionamento de elementos estruturais submetidos à compressão axial em situação de temperaturas elevadas, no qual é o foco deste trabalho, é importante que haja uma atenção especial por parte das prescrições normativas, visto que se ocorrer o colapso de um ou mais destes elementos há uma possibilidade real de desencadear a instabilidade global ou o colapso progressivo de uma edificação.

As normas nacionais e internacionais apresentam métodos simplificados que nem sempre resultam, como já mencionado, em projetos econômicos ou seguros, e por essa razão

métodos avançados de cálculo permitem uma melhor avaliação do desempenho estrutural com uma análise mais rigorosa da estrutura em situação de incêndio.

A ABNT NBR 14323:2013 no anexo B contempla o dimensionamento de elementos estruturais mistos em situação de incêndio. A norma recomenda que a análise térmica deve ser fundamentada em princípios conhecidos e hipóteses da teoria da transferência de calor. Assim como a norma brasileira, o Anexo G da norma CEN EN 1994-1-2:2005, por meio de um método simplificado, designado por modelo da soma ponderada das quatro componentes, é possível calcular a carga resistente à flexão de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio para diferentes tempos de resistência ao incêndio-padrão ISO 834-1:1999.

Diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de aprimorar as formulações prescritas nos códigos internacionais para determinar as cargas resistentes de compressão e rigidez efetiva à flexão de cada componente da seção transversal, especificamente para pilares mistos em situação de incêndio, onde se destacam os trabalhos de Piloto et al. (2013, 2015, 2017, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar as formulações existentes em âmbito nacional e internacional e, quando se fizer necessário, propor novas formulações ou coeficientes para o dimensionamento, seguindo os critérios estabelecidos por normas vigentes e respeitando o método da soma ponderada, tendo em consideração as não linearidades dos materiais em simulações numéricas de regime transiente para adaptar os parâmetros de dimensionamento em um amplo espectro de perfis estruturais comercializados nacionalmente.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho consiste no estudo do comportamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio, com o intuito de contribuir com o avanço do conhecimento em pesquisas sobre estruturas mistas em âmbito nacional e internacional.

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar o comportamento de pilares mistos de aço e concreto parcialmente revestidos em situação de incêndio, por meio de modelos e simulações numéricas, para determinar a força axial resistente de cálculo utilizando dois diferentes métodos: Método Simplificado de Cálculo e Método Avançado de Cálculo.

Um dos objetivos principais desse trabalho é a elaboração de modelos numéricos bidimensionais para avaliar a elevação de temperatura e a temperatura média das quatro componentes da seção transversal de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio isolados, além da elaboração de modelos numéricos tridimensionais para avaliar a força de flambagem elástica, a força axial de plastificação de cálculo e a força axial resistente de cálculo em situação de incêndio.

Respeitando os resultados obtidos provenientes dos modelos numéricos computacionais realizados pelo Método dos Elementos Finitos do programa ANSYS® *Academic Research Mechanical, Release 19.0* será apresentada uma proposta de aprimoramento do método simplificado de cálculo do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013.

1.1.2 Objetivos específicos

Um dos objetivos específicos desse trabalho é avaliar e propor novas formulações para o método simplificado de cálculo do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013 que estimem com maior precisão as temperaturas médias das quatro componentes da seção transversal dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Outro objetivo específico é avaliar o fator de redução associado à resistência à compressão do método simplificado de cálculo do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013, utilizado para calcular a força axial resistente de cálculo de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

As simulações computacionais dos modelos bidimensionais e tridimensionais foram realizadas pelo Método dos Elementos Finitos do programa ANSYS.

As simulações térmicas em regime transiente têm o objetivo de obter a distribuição da temperatura na seção transversal dos elementos estruturais mistos sujeitos à compressão axial, para os tempos recomendados de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

As temperaturas obtidas nas simulações numéricas foram utilizadas para avaliar a necessidade de aprimorar as equações dos modelos analíticos existentes que determinam a média das temperaturas das componentes da seção transversal, respeitando o modelo normativo da soma ponderada, que divide a seção transversal em quatro componentes, as mesas e a alma do perfil estrutural, o concreto e a armadura longitudinal.

Os resultados numéricos obtidos por trabalhos acadêmicos recentes de Fellouh et al. (2016), Calió (2017) e Alfredo (2018), sintetizados em Piloto et al. (2013, 2015, 2017, 2018)

para perfis estruturais europeus, foram incorporados no presente trabalho para ampliar a base de dados e abranger tanto perfis nacionais quanto internacionais nas novas formulações.

Foram elaborados também modelos numéricos tridimensionais, discretizados em Elementos Finitos, considerando não apenas a ação térmica, como também o carregamento mecânico estático, simulando as condições de serviço deste elemento estrutural.

O modelo termomecânico tridimensional usa o campo de temperaturas para cada tempo de resistência ao fogo (TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120) e o sistema de equações não lineares gerado aplica o método de Newton-Raphson com incremento de carga ou de deslocamento para determinar o valor da força axial resistente de cálculo, a força axial de plastificação e a força de flambagem elástica de pilares mistos parcialmente revestidos, com comprimentos de 3 e 5 metros, considerando diferentes condições de vinculação.

Além disso, as análises numéricas foram utilizadas para propor um novo coeficiente para a curva de flambagem nas formulações para a determinação da força axial resistente de cálculo de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Foram então comparados os resultados de ambos os métodos para a validação de um possível e provável aprimoramento nas formulações dispostas no código normativo brasileiro.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, o comportamento de estruturas mistas, em especial de pilares mistos de aço e concreto, vem constituindo uma importante linha de pesquisa. Ensaio experimentais padronizados de elementos isolados e modelos numéricos do comportamento desses elementos estruturais em situações críticas têm origem recente, porém como o fato de o incêndio ser atualmente de grande interesse nos meios técnicos é de fundamental importância manter pesquisadores interessados e engajados nessa área.

A importância de estudos direcionados para avaliar o comportamento de pilares mistos em situação de incêndio busca, dentro de um contexto geral, evitar o colapso estrutural da edificação, uma vez que os materiais em aço e concreto, quando expostos a altas temperaturas apresentam reduções significativas em suas capacidades resistentes.

Dessa forma, o presente trabalho pretende estudar o comportamento de pilares mistos de aço e concreto a temperaturas elevadas. Por meio da análise numérica há a possibilidade de avaliar de forma mais detalhada aspectos de interesse, como por exemplo as envoltórias de temperaturas, as quais influenciam diretamente nas tensões e deformações, que por sua vez

interferem na resistência mecânica dos materiais, além de avaliar com maior precisão critérios específicos de dimensionamento com uma análise transiente do evento.

Os resultados obtidos foram devidamente analisados, e para sua validação, foram comparados com os métodos de dimensionamento existentes em âmbito nacional e internacional. Uma vez que esses resultados forem considerados satisfatórios, futuros pesquisadores poderão adotar os parâmetros utilizados nas análises numéricas do presente trabalho para dar origem a outras pesquisas a respeito do tema abordado.

Métodos de dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo dos anos para descrever o comportamento resistente em decorrência da elevação de temperatura, seja o elemento estrutural isolado ou embutido em alvenaria, entretanto ainda é um desafio para os pesquisadores principalmente do campo experimental.

Espera-se que esse trabalho possa contribuir para o dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto em situação de incêndio, no que se refere às atualizações das normas vigentes como forma de aprimorar a segurança das estruturas, assim como para o desenvolvimento científico do assunto em questão.

1.3 METODOLOGIA

A evolução da temperatura interna de pilares parcialmente revestidos, submetidos à compressão axial, em situação de incêndio tem influência direta na estabilidade desse elemento estrutural durante a exposição ao fogo.

Com base nessa premissa, o presente trabalho tem o intuito de contribuir para o dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos a temperaturas elevadas apresentando resultados de uma análise numérica de diversas seções transversais e apontando uma direção para um possível aprimoramento no método simplificado de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

Para a elaboração desse trabalho foram utilizados 42 perfis estruturais brasileiros e 12 perfis estruturais europeus. Foram considerados dois comprimentos de pilares isolados, 3 metros e 5 metros, com a elevação de temperatura nas quatro faces do elemento estrutural, segundo a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999. Foram consideradas também três condições de vinculação, com coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados de 1,0L, 0,7L e 0,5L.

Aos perfis escolhidos foram observado os limites de aplicabilidade e demais critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 8800:2008, “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, os perfis foram selecionados para apresentar variações de fatores de massividade e de geometria para contemplar o maior número de elementos dentro de cada série de perfis estruturais de aço.

Para estabelecer o procedimento analítico de cálculo, foram elaboradas planilhas no *software* Excel® com as formulações do método simplificado do Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 para determinar as cargas resistentes nos tempos requeridos de resistência ao fogo TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120, posteriormente comparadas com as forças obtidas por meio dos resultados numéricos.

Para o método avançado de cálculo foi utilizada a ferramenta computacional ANSYS, que tem como base o Método dos Elementos Finitos para obter o campo de temperatura, e em uma análise “acoplada” possibilita considerar a redução das propriedades mecânicas dos materiais na simulação numérica estática dos perfis estruturais selecionados para a pesquisa.

O trabalho têm duas fases distintas, em um primeiro momento os modelos numéricos bidimensionais foram desenvolvidos com o intuito de determinar o campo de temperaturas nas 42 seções transversais selecionadas, para cada tempo requerido de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Foram coletadas as temperaturas nodais de cada componente da seção transversal e calculada a temperatura média das mesas do perfil de aço, a temperatura média da alma do perfil estrutural, a temperatura média e a redução da área de concreto pelo critério da envoltória isotérmica de 500°C e a temperatura média no aço do reforço, a armadura longitudinal.

O CEN EN 1993-1-2:2005 admite o conceito da isotérmica de 400°C para o aço estrutural, ou seja, em temperaturas abaixo de 400°C não há minoração para as tensões de escoamento do aço estrutural. Já para o concreto, o CEN EN 1992-1-2:2004 admite a hipótese de que em altas temperaturas a porção que estiver acima dos 500°C não apresenta contribuição da capacidade resistente.

A hipótese de redução da área da alma da seção transversal pelo critério da isotérmica de 400°C, que se traduz pela redução de sua altura útil, proposto por norma nacional e internacional ABNT NBR 14323:2013 e CEN EN 1994-1-2:2005, não foi aplicada nesse trabalho. Foi considerada a área integral da alma, sem reduções.

Para o concreto, a hipótese da redução de sua área resistente, considerando o critério da isotérmica de 500°C, foi mantida.

Em posse desses resultados, foram buscadas novas equações para estimar a temperatura média nas quatro componentes da seção transversal, como forma de aperfeiçoar as recomendações normativas para o dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio, de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 14323:2013. Essas equações minimizam a diferença entre os resultados numéricos e os resultados das novas propostas de cálculo simplificado.

Já a segunda fase envolve os modelos numéricos tridimensionais e possui quatro etapas distintas. A primeira etapa consistiu na solução térmica do modelo numérico considerando as não linearidades das propriedades dos materiais, para buscar o campo de temperaturas de 22 pilares mistos em situação de incêndio, 10 pilares com perfis estruturais brasileiros e 12 pilares com perfis estruturais europeus, para cada tempo requerido de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Posteriormente, os campos de temperaturas em cada um dos instantes dos TRRF 30, 60, 90 e 120, oriundos das simulações térmicas foram utilizados como condições iniciais de contorno para as análises estruturais estáticas.

A segunda etapa consistiu na solução mecânica linear para buscar a força de flambagem elástica em situação de incêndio, considerando o acoplamento termoestrutural para cada um dos 22 pilares, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, para cada uma das três condições de vinculação e para os dois comprimentos de pilares, de 3 metros e de 5 metros.

A terceira etapa consistiu na solução mecânica não linear para buscar a força axial de plastificação em situação de incêndio, considerando o acoplamento termoestrutural, para cada um dos 22 perfis selecionados, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

A quarta etapa consistiu na solução mecânica não linear para buscar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, considerando o acoplamento termoestrutural para cada um dos 22 perfis selecionados, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, para cada uma das três condições de vinculação e para os dois comprimentos de pilares, de 3 metros e de 5 metros.

Os resultados obtidos pelas simulações numéricas foram utilizados para comparar com os valores das cargas de flambagem elástica, os valores das resistências plásticas à compressão axial e ainda os valores das cargas resistentes à flexão do Método de Cálculo Simplificado da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, Anexo B, semelhantes aos da norma europeia CEN EN 1994-1-2:2005, Anexo G.

Para todas as configurações das seções transversais e em todas as classes de resistência ao fogo, o presente estudo tem o intuito de apresentar resultados mais adequados para projeto,

propondo alterações nas equações e nos parâmetros utilizados para determinar a capacidade resistente de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, presentes no método simplificado de cálculo da norma nacional e internacional.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução, os principais objetivos e justificativas da pesquisa, bem como os aspectos gerais da metodologia empregada para a elaboração desse trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do escopo do trabalho. São abordados estudos experimentais e numéricos que serviram de base para a elaboração dessa pesquisa.

No Capítulo 3 são apresentadas as ações térmicas em estruturas metálicas mistas, bem como os principais mecanismos de transferência de calor, as curvas padronizadas de elevação de temperatura dos gases nos compartimentos e alguns dos fundamentos da engenharia de segurança contra incêndio em edifícios. São apresentadas também as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais aço e concreto que são de interesse direto para o desenvolvimento do presente trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos de dimensionamento analítico e numérico para se obter a elevação de temperatura e estimar a resistência dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. São apresentadas as características dos pilares mistos estudados. É apresentado o método simplificado de cálculo presente no Anexo B da ABNT NBR 14323:2013. São apresentadas as estratégias utilizadas nos modelos numéricos no *software* ANSYS.

No Capítulo 5 é apresentada a proposta de aprimoramento do método analítico de dimensionamento do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados do método avançado de cálculo para a obtenção dos parâmetros utilizados para elaborar a proposta de aprimoramento do dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio.

No Capítulo 7 são comparados os resultados do método avançado de cálculo com os resultados da proposta de aprimoramento e com o método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do presente trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Recentemente, diversos estudos a respeito de pilares mistos têm se tornado uma importante vertente de linhas de pesquisas que tratam sobre a capacidade resistente e métodos analíticos de dimensionamento desses elementos estruturais em situações críticas, tanto em âmbito nacional, quanto internacional.

Os estudos relacionados tratam da temática ao qual aborda o objeto dessa pesquisa, que contribuíram para o embasamento teórico e justificativas de hipóteses adotadas ao longo desse trabalho.

É natural que, com o despertar do interesse sobre a relevância da segurança contra incêndio em edificações, estudos envolvendo a elevação de temperatura em elementos estruturais sejam realizados em um ritmo nunca visto, principalmente na última década.

Diversos trabalhos tratam de elementos construtivos tradicionais de concreto armado ou puramente metálicos, ressaltando assim a importância do presente estudo por abordar pilares mistos de aço e concreto parcialmente revestidos em situação de incêndio, trazendo uma pequena e modesta contribuição com o avanço do conhecimento nessa linha de pesquisa.

2.1 PESQUISAS A RESPEITO DE PILARES MISTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

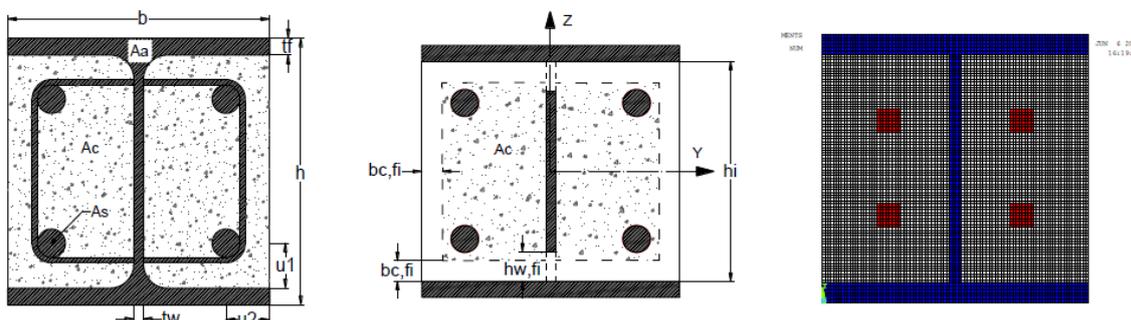
Nesse capítulo serão apresentadas as principais pesquisas envolvendo pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Primeiramente, para retratar o conhecimento atual da temática do presente trabalho, serão apresentados os estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento termoestrutural de pilares mistos parcialmente revestidos com aquecimento uniforme nas quatro faces e complementarmente, por ser pertinente, com pesquisas desses elementos sujeitos a campos térmicos não uniformes.

2.1.1 Estudos Numéricos

Os estudos numéricos compõem a maior parte das pesquisas realizadas envolvendo pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Os modelos computacionais se apresentam como uma excelente alternativa para a análise do comportamento de estruturas em temperaturas elevadas, uma vez que as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais são exaustivamente estudadas e bem definidas nas prescrições normativas.

Piloto et al. (2015) realizam uma investigação com o objetivo avaliar os coeficientes empíricos e as expressões apresentadas no Método Simplificado do Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005 para determinação da resistência à compressão por meio da determinação da resistência plástica de elementos mistos submetidos à compressão axial e da rigidez efetiva da seção transversal em relação à flexão em torno do eixo de menor inércia. Novas formulações foram propostas para determinar a temperatura média das mesas, redução da altura efetiva da alma, seção residual do concreto e temperatura média, redução das características de rigidez e resistência do reforço. Foi utilizado o método avançado de cálculo por meio do Método de Elementos Finitos e considerados os parâmetros não lineares do material em regime transiente, para validar o efeito da temperatura nas componentes da seção transversal. Os resultados apontaram que o método simplificado, proposto pela norma, se encontra inseguro para algumas classes de resistência ao fogo, comparativamente aos resultados numéricos. A estratégia numérica utilizada pelos autores está apresentada na Figura 2.1.

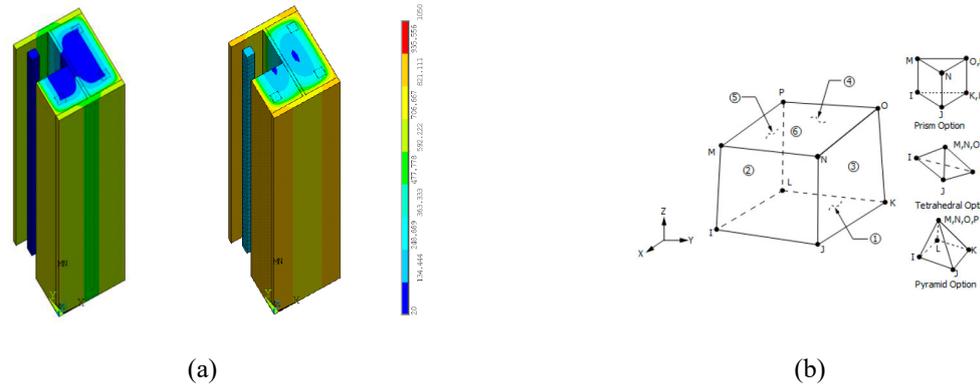
Figura 2.1: Estratégia numérica elaborada para o pilar misto de aço e concreto



Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2015)

Fellouh et al. (2016) propuseram novas formulações, para a revisão e melhoramento do Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005, com a finalidade de calcular a resistência plástica de pilares mistos parcialmente revestidos submetidos a compressão axial e a rigidez efetiva à compressão. Ambos os parâmetros são necessários para determinação da carga resistente à flexão. A análise numérica realizada por meio do Método dos Elementos Finitos foi utilizada para comparar os resultados da capacidade resistente da coluna mista parcialmente revestida simulando a exposição ao incêndio em 30 e 60 minutos. O trabalho comparou os resultados de ambos os métodos para a validação da modelagem tridimensional e demonstra que uma nova curva de dimensionamento deve ser utilizada para a análise da carga resistente à compressão dos pilares mistos parcialmente revestidos. A Figura 2.2 apresenta a estratégia numérica utilizada pelos autores para desenvolverem o trabalho.

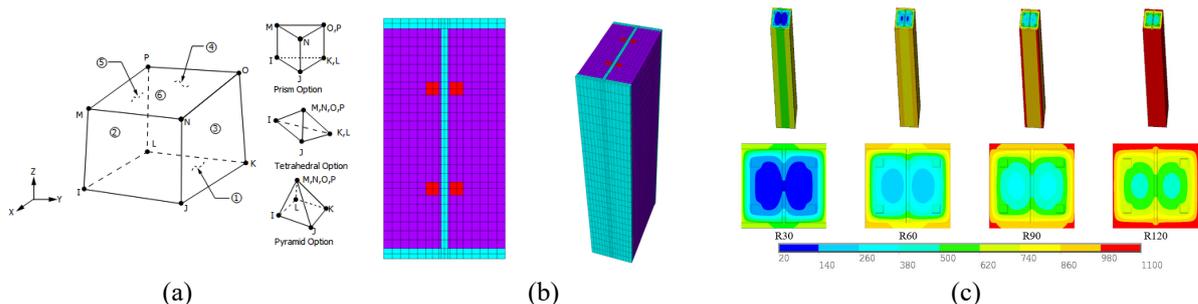
Figura 2.2: Estratégia numérica tridimensional e resultados térmicos



Fonte: Adaptado de Fellouh et al. (2016)

Hoffstaeter et al. (2017) utilizaram o método avançado de cálculo com a ferramenta computacional ANSYS baseado na modelagem tridimensional de pilares mistos com perfis estruturais europeus da série IPE e HEB, onde foi considerado o acoplamento termoestrutural nas análises das ações térmicas nos elementos estruturais totalmente envolvidos pelo fogo. Nas simulações numéricas também foram consideradas as não linearidades do material e da geometria do elemento estrutural. Os resultados obtidos pelas simulações numéricas da análise térmica do programa ANSYS apresentaram maior concordância com as temperaturas prescritas no CEN EN 1994-1-2:2005 nos tempos de menor exposição ao incêndio. Os resultados também foram comparados com os valores da carga elástica crítica, carga de resistência plástica e a carga resistente à flexão do Método de Cálculo Simplificado das prescrições do CEN EN 1994-1-2:2005, Anexo G. Concluiu-se que a norma apresenta alguns pontos inseguros, sendo necessário revisões. Concomitantemente, os resultados da análise numérica apresentaram grande conformidade com os resultados das novas formulações que estavam sendo propostas em conjunto para os perfis HEB e IPE em estudo. A estratégia numérica utilizada pelos autores esta apresentada na Figura 2.3. Os modelos foram elaborados utilizando Elementos Finitos sólidos para todos os materiais.

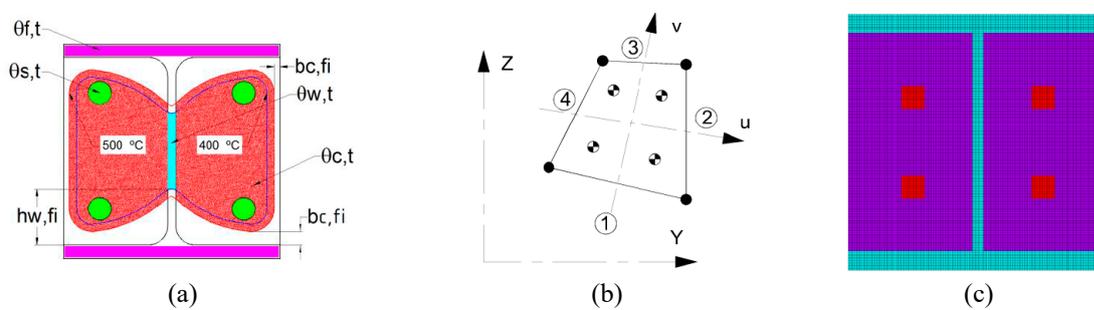
Figura 2.3: Geometria dos pilares mistos parcialmente revestidos e campos térmicos



Fonte: Adaptado de Hoffstaeter et al. (2017)

Piloto, Calió e Rigobello (2017) com o intuito de revisar um estudo anteriormente elaborado por Fellouh et. al. (2016), avaliaram os efeitos da resistência e rigidez no modelo da soma ponderada presente no Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005, propondo algumas novas formulações para as componentes da seção transversal de elementos mistos de aço e concreto. Novos parâmetros e limites para o cálculo simplificado de resistência ao fogo de pilares mistos parcialmente revestidos com perfis da série HEB e IPE foram elaborados. Concluiu-se que a norma apresenta alguns pontos inseguros e com as novas formulações propostas foram obtidos valores seguros, quando comparados com os resultados dos modelos avançados de cálculo. A estratégia numérica utilizada pelos autores está apresentada na Figura 2.4.

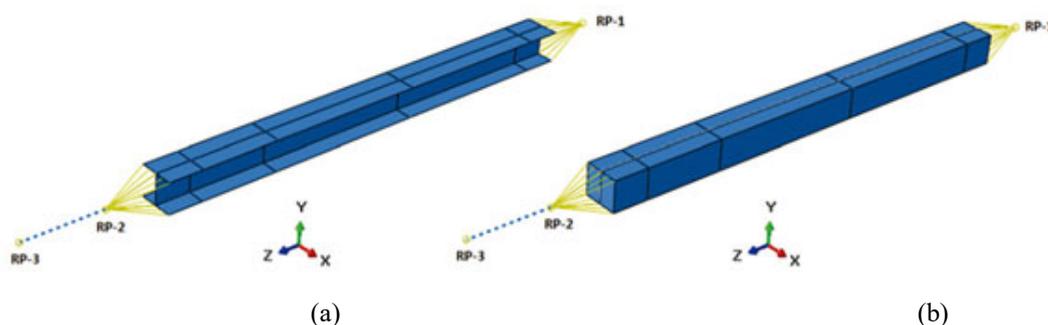
Figura 2.4: Estratégia numérica adotada para as seções transversais estudadas



Fonte: Adaptado de Calió, Piloto e Rigobello (2017)

Simões, Rocha e Munaiar Neto (2018) realizaram uma investigação numérica com o auxílio do programa ABAQUS para estudo de pilares de aço e mistos de aço e concreto isolados a temperaturas elevadas. O estudo visou comparar o desempenho desses elementos estruturais a partir da variação de parâmetros como rigidez das estruturas próximas aos pilares, imperfeição geométrica inicial e fator de carga. O estudo constatou que, em geral, a intensidade da imperfeição geométrica e da rigidez da estrutura circundante não afeta a resistência ao fogo de pilares de aço. Entretanto, a rigidez da estrutura circundante elevou o valor máximo das forças de restrição geradas. Em relação ao nível de carga, quando aumentado, diminuiu o tempo de resistência e a temperatura crítica. A Figura 2.5 apresenta a estratégia numérica utilizada pelos autores para desenvolverem o trabalho.

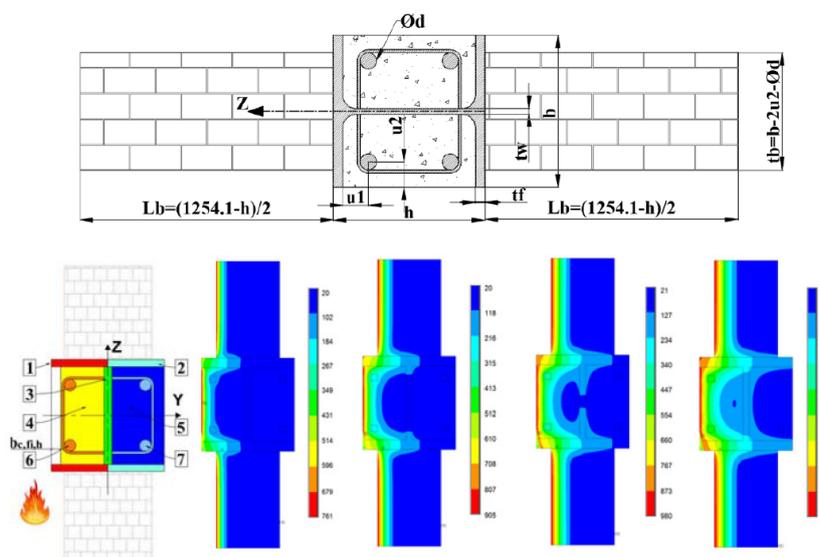
Figura 2.5: Estratégia numérica do pilar de aço e misto de aço e concreto



Fonte: Adaptado de Simões, Rocha e Munaiar Neto (2018)

Piloto et al. (2019) apresentaram um estudo de pilares mistos parcialmente revestidos embutidos em paredes, em situação de incêndio em uma face. O estudo numérico em questão trouxe uma alternativa aos procedimentos de cálculo de dimensionamento presente no Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005. O estudo numérico contou com simulações em Elementos Finitos de trinta seções transversais para avaliar a temperatura média em sete componentes: o perfil estrutural de aço, as mesas divididas em expostas e não expostas e a alma da seção transversal não dividida; a porção de concreto exposto e não exposto à elevação de temperatura; as armaduras de reforço também foram divididas em componentes expostas e não expostas à elevação de temperatura. Como resultado, foram apresentadas formulações que pretendem contemplar a ausência de método analítico nas instruções normativas europeias para o dimensionamento de pilares mistos embutidos em paredes, em situação de incêndio. A Figura 2.6 apresenta a estratégia numérica utilizada pelos autores para desenvolver o estudo.

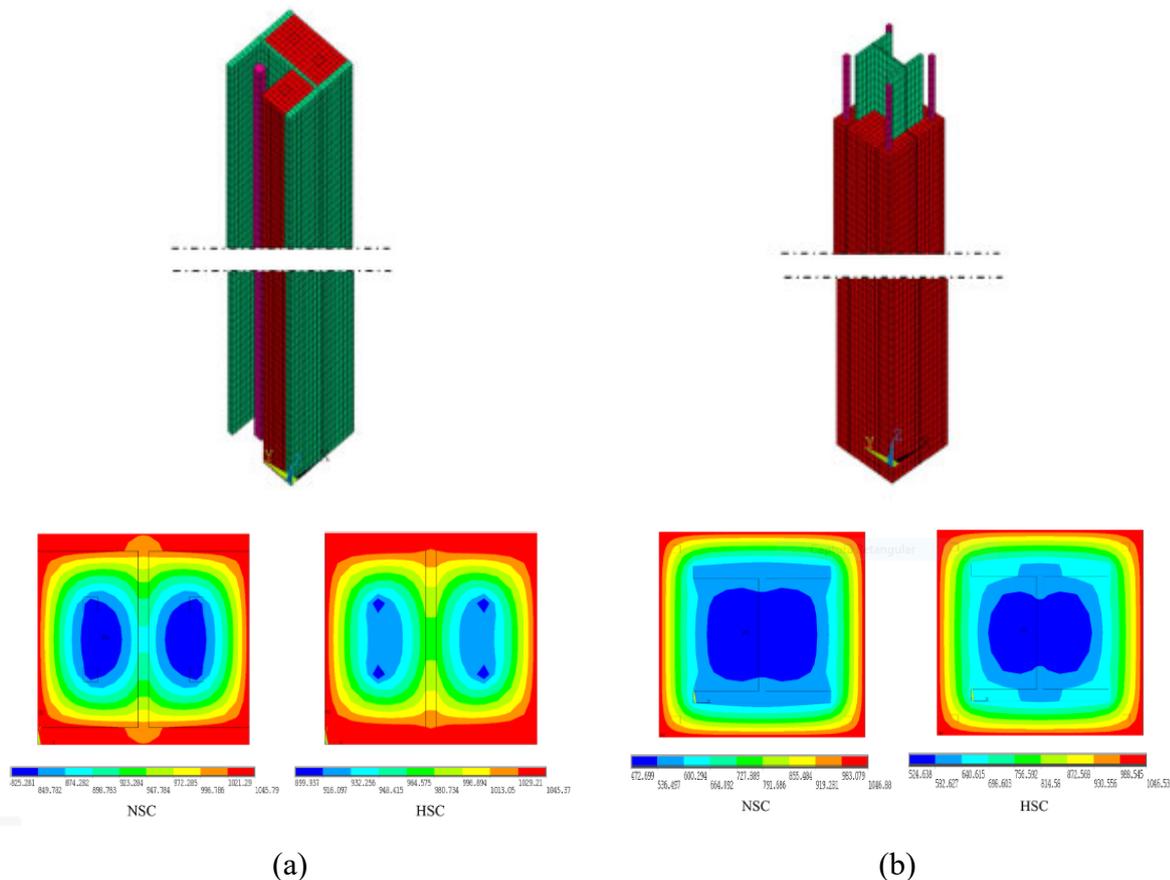
Figura 2.6: Pilar misto parcialmente revestido embutido em parede, com alma paralela à parede



Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2019)

Fellouh et al. (2019) desenvolveram um modelo numérico tridimensional no programa computacional ANSYS para investigar o comportamento estrutural de dois tipos de pilares, parcialmente revestidos (PEC), conforme a Figura 2.7 (a), de seção transversal com o perfil estrutural HEB 220 e totalmente revestidos (TEC), ilustrado na Figura 2.7 (b), de seção transversal com o perfil estrutural HEB 160, em situação de incêndio. A elevação de temperatura seguiu os parâmetros recomendados pela curva padrão de incêndio ISO 834:1999, e foram também utilizados dois tipos de concreto, o de alta resistência (HSC) e o de resistência normal (NSC). Os resultados mostraram que a utilização de concreto de alta resistência teve impacto direto na elevação do gradiente de temperaturas dos dois tipos de pilares, sendo o concreto de resistência normal apresentando melhor desempenho de proteção térmica para o perfil estrutural. A resistência mecânica dos modelos em trinta minutos de incêndio apresentou a metade da resistência mecânica dos modelos em temperatura ambiente. Com isso, os autores concluíram que é de fundamental importância considerar os efeitos da elevação de temperatura no dimensionamento de elementos estruturais mistos em situação de incêndio.

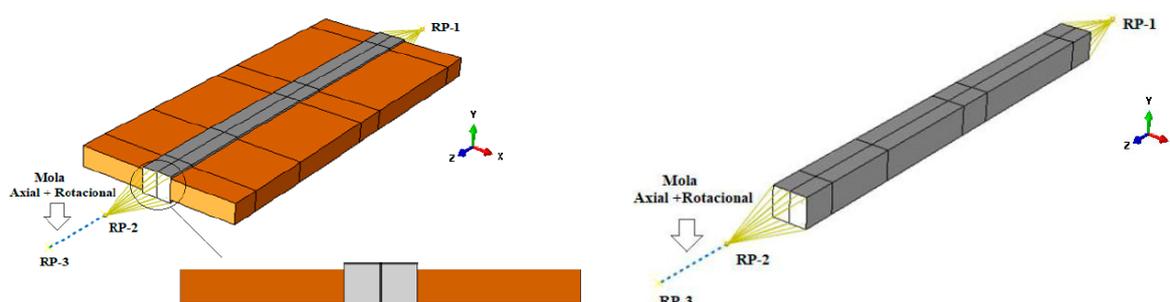
Figura 2.7: Modelo numérico e campo de temperaturas dos pilares mistos



Fonte: Adaptado de Fellouh et al. (2019)

Rossi (2019) publicou na dissertação de mestrado uma análise numérica de cinco pilares mistos de aço, um deles isolado e os demais inseridos em paredes, em situação de incêndio. A pesquisa numérica, contou com o auxílio do *software* ABAQUS. A modelagem numérica dos pilares mistos parcialmente revestidos nessas duas configurações submetido à elevação de temperatura levou em consideração as restrições térmicas nas extremidades. A modelagem numérica apresentou duas metodologias, a primeira proposta consistiu em considerar a alvenaria somente como elemento de compartimentação e uma segunda proposta foi utilizada a partir da avaliação da influência dessa mesma alvenaria no desempenho termoestrutural dos pilares, a fim de compreender a contribuição do concreto, assim como da alvenaria, na rigidez final desse sistema estrutural no decorrer do incêndio. Foi constatado que apesar de um aumento na rigidez do sistema estrutural, devido a presença do concreto nos pilares, não se pode desconsiderar a contribuição da alvenaria quando se trata de temperaturas elevadas. O estudo apresentou resultados semelhantes aos obtidos experimentalmente por outros autores. A Figura 2.8 apresenta a estratégia numérica utilizada pela autora para desenvolver seu trabalho.

Figura 2.8: Estratégia numérica utilizada no pilar misto, com alma perpendicular à parede

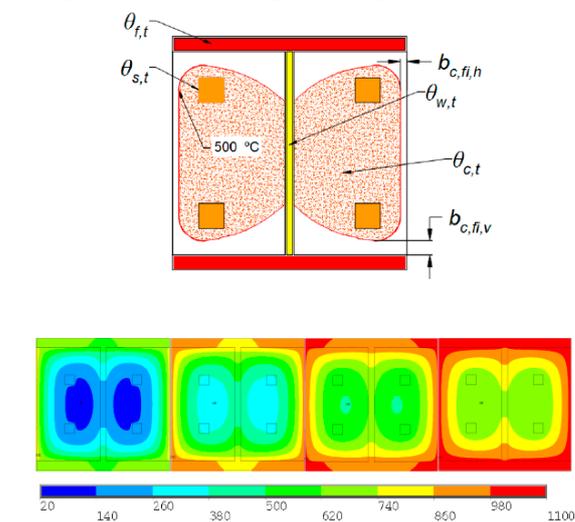


Fonte: Adaptado de Rossi (2019)

Piloto, Alfredo e Rossetto (2019) realizaram um estudo estendido sobre o efeito da resistência e rigidez na resistência à flambagem de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio seguindo os critérios estabelecidos pela norma CEN EN 1994-1-2:2005, Anexo G. Estudos anteriores sugeriram um aprimoramento para o método simplificado de cálculo presente no Eurocode. O trabalho visou propor um novo aprimoramento para o modelo simplificado de cálculo, utilizando os resultados de simulações térmicas transientes não lineares, realizadas com o programa ANSYS. Foram utilizadas trinta configurações de seções transversais da série HEB, HD e UC. Os resultados obtidos com a atual proposta para o modelo, apresentam valores mais seguros, quando comparados com a atual versão do Eurocode.

A Figura 2.9 apresenta a estratégia numérica utilizada pelos autores para desenvolverem o trabalho.

Figura 2.9: Estratégia numérica e campo de temperaturas na seção do pilar misto



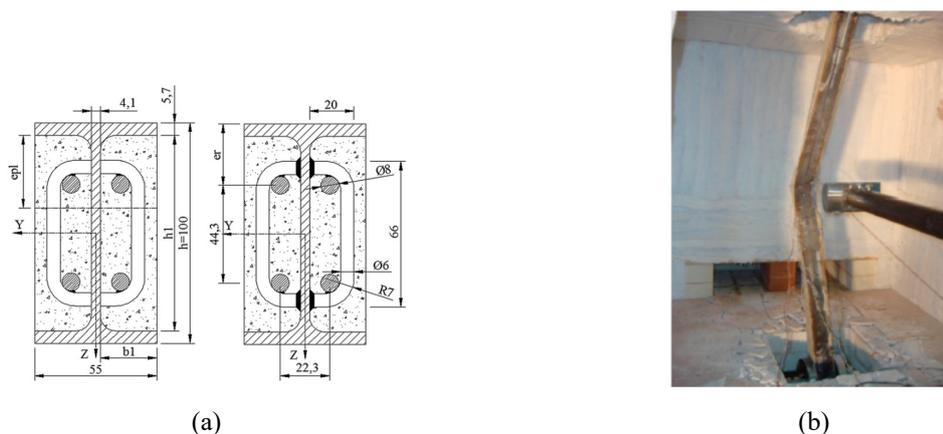
Fonte: Adaptado de Piloto, Alfredo e Rossetto (2019)

2.1.2 Estudos Experimentais

Os estudos experimentais em escala real normalmente apresentam-se em uma pequena parcela dos objetos de pesquisa, uma vez que são caros e complexos, entretanto são excelentes métodos de análise para o estudo do comportamento real de estruturas em situação de incêndio. Além de serem de extrema importância para caracterizar o comportamento térmico e mecânico dos materiais, são também referência para validação dos modelos computacionais numéricos.

Piloto et al. (2013) realizaram uma investigação experimental da resistência de vigas de aço parcialmente revestidas à temperatura ambiente e altas temperaturas de acordo com a curva ISO 834-1:1999. No total foram realizados doze testes experimentais de acordo com a norma europeia CEN EN 1363-1:2012 para diferentes níveis de carregamento e condições de corte entre os estribos e as mesas do perfil de aço. Os resultados revelaram uma dependência da resistência a altas temperaturas com o nível de carregamento, uma vez que um incremento de 37% é responsável por um decréscimo de 28% da resistência ao fogo dos espécimes analisados. Esta investigação foi importante para o presente trabalho, pois há uma importante análise do comportamento termomecânico global do elemento misto de aço e concreto. A Figura 2.10 apresenta o modelo esquemático do pilar misto isolado e uma imagem do ensaio experimental no laboratório.

Figura 2.10: Modelo esquemático do pilar misto isolado e ensaio experimental

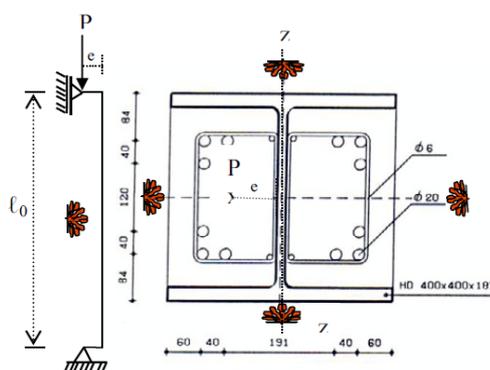


Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2013)

Mesmo que não seja do escopo deste trabalho o comportamento das vigas, os conceitos que estão envolvidos nas análises experimentais de elementos mistos em situação de incêndio são de grande interesse para o trabalho.

Arezki e Said (2014) propuseram uma avaliação experimental e teórica a respeito de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de acordo com o CEN EN 1994-1-2:2005 sujeita a carregamento com excentricidade. O método foi fundamentado no critério Campus-Massonet, adaptado para o cálculo da resistência à flexão com carregamento axial excêntrico combinado com o momento fletor. Os procedimentos foram então codificados no programa e utilizados para investigar os efeitos dos níveis de carregamento, índices de esbeltez e recobrimento do aço do reforço na resistência dos pilares em situação de incêndio. O trabalho apresentou alguns exemplos de aplicação e os resultados mostraram que o dimensionamento se torna crítico para a resistência acima de 60 minutos de exposição ao fogo. A Figura 2.11 apresenta o modelo esquemático do pilar misto com carregamento excêntrico utilizado no trabalho dos autores.

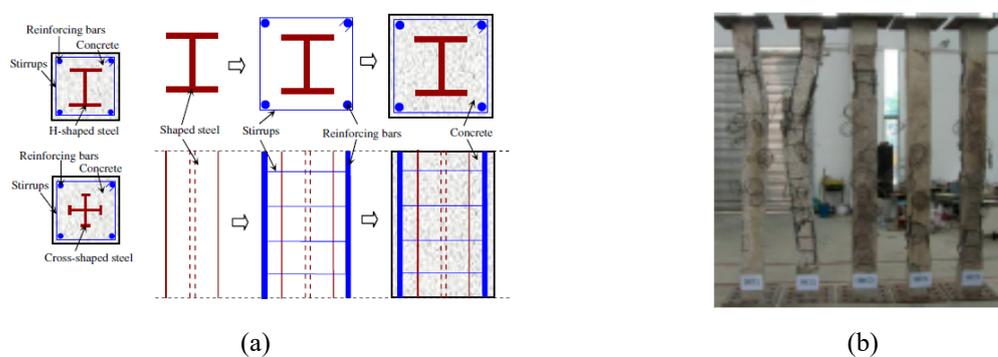
Figura 2.11: Modelo esquemático do pilar misto com carregamento excêntrico



Fonte: Adaptado de Arezki e Said (2014)

Han et al. (2016) descreveram por meio de testes experimentais e numéricos o comportamento de pilares mistos após a exposição a temperaturas elevadas. A investigação dos autores aumentou o conhecimento sobre o comportamento pós-incêndio desses elementos estruturais. Outras análises com o modelo validado também foram desenvolvidas com o objetivo de analisar parâmetros, como a influência do nível de restrição axial, a taxa de carga aplicada e a intensidade da imperfeição geométrica inicial na resistência ao fogo do aço e pilares mistos de aço e concreto. A Figura 2.12 apresenta o modelo esquemático dos pilares analisados e uma imagem do ensaio experimental no laboratório.

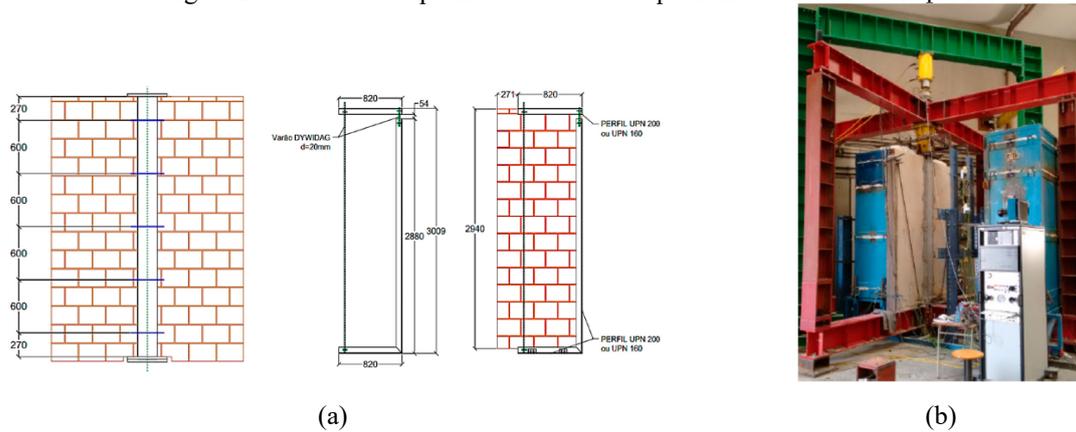
Figura 2.12: Modelo esquemático e ensaio experimental de pilares mistos



Fonte: Adaptado de Han et al. (2016)

Rocha (2016) apresenta um estudo experimental e numérico do comportamento em situação de incêndio de pilares mistos de aço e concreto inseridos em paredes. O estudo experimental foi realizado no laboratório da Universidade de Coimbra. Dois tipos de perfis metálicos parcialmente revestidos com concreto foram analisados variando as espessuras das paredes e a orientação dos perfis em relação às paredes. O estudo experimental também considerou as restrições axiais e rotacionais nas extremidades. Adicionalmente foram realizadas análises numéricas térmicas e termo estruturais em elementos finitos. Foi, por fim, apresentada uma metodologia para a obtenção das curvas de interação da força normal e do momento fletor dos pilares mistos de aço e concreto submetidos à gradientes térmicos ao longo das mesas e da alma dos perfis. O modelo esquemático do pilar e a imagem do ensaio no laboratório são apresentados na Figura 2.13.

Figura 2.13: Modelo esquemático e ensaio de pilar misto embutido em parede



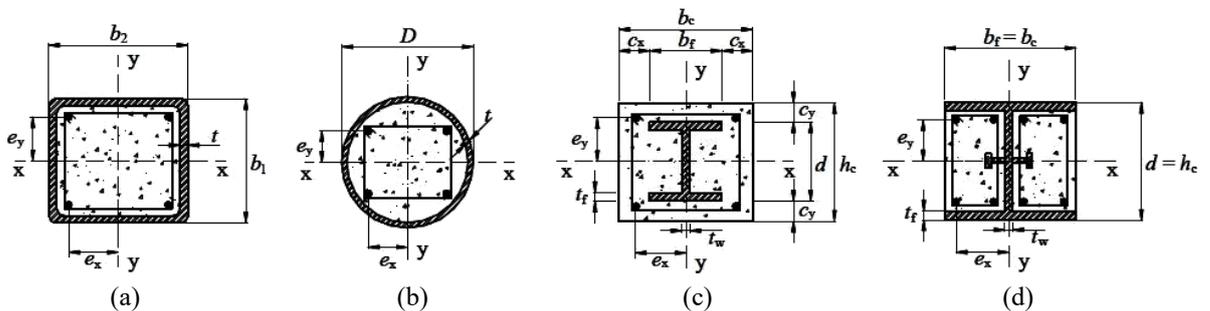
Fonte: Adaptado de Rocha (2016)

2.2 PILARES MISTOS

Um sistema misto de aço e concreto é aquele no qual um perfil de aço, laminado ou soldado, trabalha em conjunto com o concreto, formando um pilar misto, laje mista ou viga mista. A interação entre o concreto e o perfil de aço pode se dar por meios mecânicos, ou seja, conectores, mossas ou ressaltos, por atrito ou por aderência (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012).

A depender da disposição do concreto na seção mista, conforme a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, os pilares mistos podem ser classificados como preenchidos, revestidos ou parcialmente revestidos, como mostra a Figura 2.14.

Figura 2.14: Exemplos de seções transversais de pilares mistos



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800:2008

2.2.1 Pilares Mistos Preenchidos

Os pilares mistos preenchidos são formados por perfis tubulares, geralmente circulares ou retangulares, preenchidos com concreto estrutural, como mostrando na Figura 2.14 (a) e (b).

Os perfis mistos tubulares preenchidos apresentam uma solução interessante para diversas obras, tanto do ponto de vista técnico como arquitetônico. Tais perfis apresentam boa resistência aos esforços solicitantes, mesmo com seções transversais reduzidas, tornando seu emprego vantajoso estrutural, construtiva e economicamente. A capacidade resistente é incrementada pelo efeito de confinamento do concreto exercido pelo perfil de aço tubular, circular ou retangular (DE NARDIN, 1999).

Pilares mistos preenchidos tem sido tema de muitos estudos, principalmente devido aos fatores que os levam a ter uma capacidade resistente superior quando comparados aos pilares de concreto armado.

2.2.2 Pilares Mistos Totalmente Revestidos

Os pilares mistos totalmente revestidos, conforme apresentado na Figura 2.14 (c), caracterizam-se pelo envolvimento total do perfil metálico pelo concreto. Esta solução construtiva necessita de formas para sua concretagem, sendo um processo similar ao realizado em pilares de concreto armado. As vantagens construtivas dos elementos mistos têm tornado a utilização desses elementos em obras mais frequente (PEREIRA, 2014).

Vale também destacar a importância das pesquisas envolvendo pilares mistos totalmente revestidos, pois permitem avaliar a viabilidade de sua utilização em larga escala tanto no cenário econômico nacional, como internacional (DE NARDIN, 1999).

Estudos comparativos de custos reforçam ainda mais as vantagens, não apenas financeiras, como também construtivas e estruturais, da utilização de estruturas mistas. Entretanto um inconveniente do emprego dos pilares mistos totalmente revestidos é que por carecerem de formas durante a concretagem exigem uma maior atenção para posicionar e fixar os perfis e barras de armaduras (BRAGA; FERREIRA, 2011).

2.2.3 Pilares Mistos Parcialmente Revestidos

Os pilares mistos parcialmente revestidos, objeto de estudo deste trabalho e representados na Figura 2.14 (d), são constituídos de um perfil metálico, em geral com seções

“I” ou “H”, onde as faces internas da mesa e alma da seção são preenchidas por concreto. A ABNT NBR 8800:2008 adverte quanto a obrigatoriedade do emprego da armadura longitudinal e transversal deste concreto, prevenindo contra fissuras e fendilhamento, além de contribuir para a resistência em situações de incêndio.

O emprego de elementos mistos é uma importante opção de sistema estrutural e de processo construtivo, uma vez que há a possibilidade de reduzir ou dispensar formas e escoramento, diminuindo custos proveniente de materiais. Além de aumentar a precisão dimensional dos elementos. Os pilares mistos são estruturas mais eficientes, desde que respeitem as técnicas construtivas adequadas, sendo ainda uma solução simples e pouco onerosa de amenizar a ação nociva do fogo e da corrosão atuantes nesses elementos em edifícios (PEREIRA, 2014).

2.3 COMPONENTES DOS PILARES MISTOS PARCIALMENTE REVESTIDOS

Como já mencionado anteriormente, pilares mistos parcialmente revestidos são basicamente constituídos de dois materiais industrializáveis, aço e concreto. Esses materiais possuem excelente resistência mecânica e são economicamente interessantes de serem explorados.

A seção transversal é composta de um perfil estrutural de aço de alta resistência, de concreto que preenche as mesas do perfil estrutural, além das armaduras longitudinais de aço, estribos e conectores de cisalhamento.

O concreto apresenta uma boa resistência à compressão e pequena resistência à tração, além de uma ruptura frágil. Já o aço apresenta ótima resistência a tração e ductibilidade, além de outras propriedades muito importantes (PFEIL; PFEIL, 2009).

Explorar as propriedades intrínsecas desses materiais para formar uma seção transversal apta a resistir aos esforços solicitantes de maneira eficiente é altamente conveniente quando feita de maneira racional.

O estudo realizado por Braga e Ferreira (2011) mostra que o concreto exerce um enrijecimento na seção de aço reduzindo instabilidades locais e globais do elemento estrutural. As mesas do perfil estrutural de aço preenchidas de concreto armado afetam de forma significativamente a rigidez do elemento estrutural e conseqüentemente sua resistência a carregamentos horizontais.

2.3.1 Perfil metálico

Nos pilares mistos, o aço é utilizado nos perfis metálicos, nas barras da armadura, nos estribos e nos conectores de cisalhamento. As principais características mecânicas associadas ao aço são a alta resistência e a ductilidade, que permitem a deformação plástica antes da ruptura.

Para o perfil metálico é utilizado aço estrutural, as propriedades requeridas são: ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, elevada relação entre a tensão resistência à ruptura e a resistência ao escoamento e, quando possível, resistência à corrosão (PFEIL; PFEIL, 2009).

Saliências internas no perfil metálico contribuem para uma melhor aderência na interface aço-concreto, além disso, para carregamentos axiais o perfil possui maior capacidade de dissipar energia das tensões geradas, melhorando assim o comportamento global da estrutura (DE NARDIN, 1999).

Está pacificada a importância da aderência entre aço do perfil estrutural e o concreto nos pilares mistos submetidos à esforços axiais e esforços de flexo-compressão. Um estudo teórico e experimental realizado por Silva (2006) analisou e variou diversos parâmetros relacionados aos efeitos da aderência em pilares mistos. O estudo constatou que quanto maior for a aderência natural do aço e do concreto, formada pela adesão, aderência mecânica e atrito, há uma melhora significativa na capacidade resistente de pilares mistos. A adição de conectores de cisalhamento, fixados nas paredes da alma do perfil estrutural, apresenta uma contribuição significativa como forma de garantir a distribuição eficaz das tensões de cisalhamento na interface de aço-concreto.

2.3.2 Armadura longitudinal

No Brasil, a ABNT NBR 8800:2008 recomenda a utilização da armadura longitudinal no pilar misto parcialmente revestido, e deve estar de acordo com a ABNT NBR 6118:2014. Sua função não estaria limitada apenas em garantir a integridade do concreto, mas também como forma de contribuir para a resistência global da estrutura.

A armadura principal é utilizada para reforçar o concreto, conferindo maior resistência e melhoria nas propriedades. As barras de aço do reforço devem ser nervuradas como forma de aumentar a superfície de contato e tornar a ligação entre o concreto e o elemento de aço mais eficiente.

2.3.3 Concreto

As origens do concreto, em sua forma mais primitiva, remetem ao império egípcio e romano, e é hoje um dos materiais mais comercializados devido sua importância na construção civil, sendo o segundo material mais consumido pelo homem, superado apenas pela água.

As características peculiares do concreto como a resistência e a durabilidade possibilitam uma maior liberdade aos projetos arquitetônicos por ser um material moldável em seu estado fresco.

O revestimento do perfil metálico com concreto teve início para garantir a proteção contra a corrosão e a ação do fogo, entretanto aliado à função protetora, a função estrutural do concreto foi levada em consideração nos critérios de dimensionamento.

Os avanços tecnológicos devido aos estudos a respeito dos fenômenos de aderência e confinamento e como esses fenômenos atuam no comportamento estrutural da interação do perfil misto de aço e do concreto, o concreto passou a ter além da função protetora, também a função estrutural (DE NARDIN, 1999).

Nesse aspecto, a constatação da importância das armaduras longitudinais no núcleo de concreto situado entre as mesas do perfil de aço para a determinação do momento fletor, esforço cortante e deflexões de vigas mistas parcialmente revestidas, causou uma revisão das prescrições normativas do *Eurocode* que tratava do dimensionamento de elementos mistos, passando a incluir o efeito de confinamento do concreto armado na resistência e estabilidade global do elemento (KINDEMANN et al., 1993).

Para o dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos, a ABNT NBR 8800:2008, recomenda que o concreto utilizado deva possuir densidade normal. E conforme consta na ABNT NBR 6118:2014, um concreto de massa específica normal é aquele que depois de seco tem massa específica compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

É comum a utilização de concreto de classe C20 ou superior para elementos que possuam armadura passiva, além de ser devidamente avaliadas as condições de exposição da estrutura de acordo com as classes de agressividade ambiental - C.A.A., para que se garanta a durabilidade e desempenho adequados.

É essencial para efeito de cálculo que se conheçam algumas propriedades do concreto. Nesse sentido, é usual que a resistência à compressão do concreto seja a propriedade mais valorizada no cálculo estrutural, para além do módulo de elasticidade.

Dentre as condições impostas pela ABNT NBR14323:2013, vale ressaltar que os materiais que constituem os pilares mistos devam apresentar o comportamento esperado para

que garantam a integridade estrutural do elemento, por esse motivo é de fundamental importância o estudo e normatização desses materiais.

2.3.4 Conectores de cisalhamento

Tanto a ABNT NBR 6118:2014 quanto o CEN EN 1994-1-2:2005, recomendam que ao longo do pilar sejam inseridos conectores de aço, para que garantam o fluxo de cisalhamento longitudinal entre o perfil de aço e o concreto.

O comportamento de estruturas mistas é fundamentado na ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto armado. Para que isso ocorra é necessário que na interface aço-concreto desenvolvam-se forças longitudinais de cisalhamento (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012).

Quando se tratar de conectores de cisalhamento, as principais funções exercidas são de realizar a ligação entre o perfil de aço e o concreto armado, transmitir as tensões de cisalhamento entre os dois materiais, além de resistir aos esforços de cisalhamento nas duas direções e de impedir o deslocamento relativo dos materiais (PEREIRA, 2014).

Para a modelagem numérica não foram considerados os conectores de cisalhamento e seus efeitos. No entanto, foi considerado o contato perfeito entre os materiais da malha tridimensional.

2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO EMPREGO DE PILARES MISTOS

A utilização de elementos mistos na composição de sistemas estruturais apresentou um crescimento significativo na última década. Tal crescimento justifica-se por vantagens construtivas e econômicas, relacionadas à racionalização de recursos, eficiência estrutural e velocidade de execução (PEREIRA, 2017).

Economicamente existem algumas vantagens, como a redução do tempo de execução, que é obtida por meio de uma metodologia construtiva mais racional, possibilitando um retorno mais rápido do capital investido (BRAGA; FERREIRA, 2011).

Nesse sentido, os pilares mistos podem ser considerados uma solução simples e pouco onerosa para amenizar a ação nociva do fogo e da corrosão em elementos de aço puro. Além disso, uma maior industrialização da construção tem como consequência a redução dos custos de mão de obra, além de redução drástica do desperdício de materiais, fundamental para que o custo final da edificação seja competitivo (PEREIRA, 2017).

Construtivamente, a utilização de elementos mistos possibilita a execução de pilares mais esbeltos, com uma seção transversal reduzida oferece maior liberdade espacial aos arquitetos e projetistas. A consequência disso é a redução do peso global da estrutura, possibilitando a execução de fundações mais leves e otimizadas (BRAGA; FERREIRA, 2011).

Outra vantagem do sistema misto de aço e concreto é a possibilidade da redução das dimensões dos elementos, que proporciona economia de material e mão de obra, além de uma maior área livre por pavimento (PEREIRA, 2017).

Estruturalmente, a associação do perfil de aço e o concreto permite um ganho considerável em termos de resistência global, além de reduzir os problemas de instabilidades associados aos pilares metálicos (ROCHA, 2016).

Os pilares metálicos, além de exercerem função estrutural para a edificação, podem ser utilizados como estrutura provisória na fase construtiva, proporcionando uma diminuição do custo com escoramentos e, conseqüentemente, uma economia de material e mão de obra, além de possibilitar manter o canteiro de obras mais limpo (BRAGA; FERREIRA, 2011).

No elemento misto, o concreto contribui para o aumento da capacidade resistente do pilar, podendo minimizar os fenômenos de flambagem local e global. Em relação ao aço, o revestimento de concreto aumenta substancialmente a resistência ao fogo e à corrosão, proporcionando uma melhoria do desempenho global da estrutura (ROCHA, 2016).

A combinação dos dois materiais em pilares mistos propicia, além da proteção ao fogo e à corrosão, um aumento da resistência aos esforços verticais e horizontais do pilar, além de um aumento da rigidez da estrutura. A ductilidade é outro ponto que diferencia os pilares mistos dos pilares de concreto armado quando submetidos a esforços últimos, sofrendo deformações plásticas que ainda conservam certa resistência, tornando sua ruptura menos abrupta e frágil. Esta resistência adicional contribui para uma maior segurança da estrutura (DE NARDIN, 1999).

Quanto às desvantagens, os pilares mistos parcialmente revestidos e totalmente revestidos carecem de formas durante a concretagem e maior atenção para posicionar e fixar os perfis e barras de armaduras. Além de uma maior dificuldade de execução das ligações viga-pilar.

Os elementos mistos, de maneira geral, também apresentam algumas desvantagens quando comparados a elementos de aço ou de concreto armado. Pilares totalmente revestidos, por exemplo, por necessitarem do uso de formas eleva o custo e tempo de execução da obra. Já os pilares preenchidos, os perfis tubulares são um exemplo, têm elevado preço e apresentam limitações em suas dimensões comerciais. E quanto aos pilares mistos parcialmente revestidos,

esses apresentam dificuldades na execução das ligações e na obrigatoriedade da utilização de armaduras longitudinais e transversais para garantir a integridade estrutural do concreto (PEREIRA, 2014).

2.5 COMPORTAMENTO DA SEÇÃO SOB ESFORÇOS SOLICITANTES

O dimensionamento estrutural tem como intuito garantir a segurança global da estrutura evitando o seu colapso, além de buscar garantir o bom desempenho em situações de serviço, evitando a ocorrência de deslocamentos excessivos e vibrações (PFEIL; PFEIL, 2009).

Para o dimensionamento de pilares mistos, tanto a norma europeia quanto a brasileira, utilizam o Método dos Estados Limites, onde a segurança é garantida por meio da equação de conformidade. Nessa equação, os esforços solicitantes de projeto devem ser inferiores aos da resistência de projeto dos elementos.

Diversos parâmetros influenciam no comportamento resistente conjunto do aço e do concreto em um elemento misto. Dentre esses parâmetros estão o efeito de confinamento do concreto, a fluência e retração, a aderência, a esbeltez, dentre outros (MALITE; ALVA, 2005).

Entretanto, sabe-se que as barras de reforço possuem pequenas ondulações e rugosidades que promovem a ancoragem desse elemento estrutural no concreto. Nesse sentido, os efeitos de contato entre os materiais podem ser muito relevantes no desempenho estrutural do elemento construtivo, influenciando na capacidade resistente do elemento estrutural como um todo.

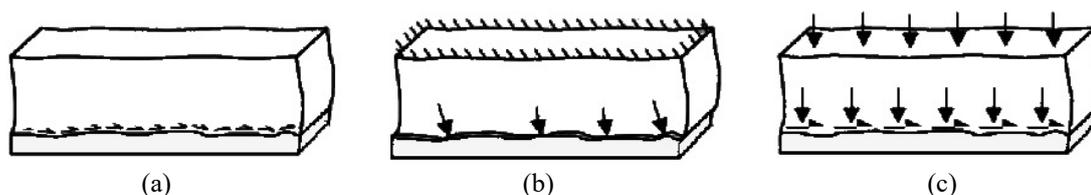
Apesar de esses efeitos serem conhecidos, modelá-los numericamente é um trabalho complexo. Sendo assim, no modelo numérico será considerado o contato perfeito entre os materiais.

2.5.1 Efeito de Aderência

A aderência é o mecanismo de transferência das tensões que existem na interface entre o aço e o concreto.

A Figura 2.15 mostra alguns tipos de mecanismos de transferência das tensões do efeito da aderência.

Figura 2.15: Mecanismos resistentes da aderência: adesão, aderência mecânica e atrito



Fonte: Adaptado de Gaia (2008)

Os mecanismos de resistência do efeito de aderência do concreto no aço são, basicamente, a adesão, a aderência mecânica e o atrito. E ainda, como forma de ampliar o valor da resistência ao escorregamento podem ser dispostos conectores de cisalhamento ao longo do perfil metálico.

Caso a resistência de aderência entre o aço e o concreto seja considerada insuficiente, outros mecanismos de transferência de esforços devem ser aplicados, sendo o mais comum os conectores de cisalhamento (RODRIGUES, 2008).

A distribuição das tensões cisalhantes na interface entre o aço e o concreto devem ser analisadas nos pontos de introdução de cargas e ao longo do comprimento do pilar. A resistência ao cisalhamento é assegurada pelas tensões de aderência da interface e pela ancoragem mecânica promovida pelos conectores de cisalhamento, de modo a não permitir um escorregamento significativo entre as partes (MALITE; ALVA, 2005).

Quanto aos conectores de cisalhamento, seu dimensionamento deve seguir as recomendações do Anexo P da norma ABNT NBR 8800:2008, onde se estabelece que nas seções parcialmente revestidas os conectores de cisalhamento devem ser utilizados para resistir à totalidade dos esforços de momento e de força cortante solicitante de cálculo quando a viga estiver apenas ligada ao concreto ou apenas ao perfil de aço, excedidas as tensões resistentes de cálculo.

Dessa forma, nas modelagens numéricas, como já mencionado anteriormente, será utilizado o contato perfeito entre as interfaces de aço e concreto da seção transversal mista e não sendo possível assim avaliar um possível deslocamento relativo entre os materiais devido às imperfeições ou às falhas construtivas.

2.6 RESTRIÇÕES TÉRMICAS NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS PILARES

O conceito fundamental de todos os métodos de dimensionamento é o de garantir a estabilidade estrutural da edificação em situação de incêndio, uma vez que os elementos estruturais gradualmente perdem resistência e rigidez em altas temperaturas.

A exposição dos elementos construtivos a temperaturas elevadas afeta as características mecânicas materiais que os formam, sendo traduzida pela redução do módulo de elasticidade, redução nas tensões de escoamento ou cedência. A dilatação térmica dos materiais provoca um aumento das tensões internas causadas por deformações dos elementos. A condutibilidade térmica dos materiais também é afetada pelo aumento da temperatura, assim como o calor específico e a massa específica (ROCHA, 2016).

3. AÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS MISTAS

Como é de interesse estudar o comportamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, é natural ter o entendimento de quais são as variáveis que interferem no desempenho térmico dos elementos estruturais, exprimindo-se em reduções na resistência e na rigidez.

Para que seja atenuada essa hipótese, a correta avaliação da resistência de estruturas em situação de incêndio, seja de forma analítica, numérica ou experimental, depende da evolução da temperatura ao longo do tempo, onde há significativas variações para os mais diversos cenários de incêndio.

Os efeitos da elevação da temperatura em um elemento estrutural, especialmente de aço e concreto são de extrema complexidade, motivando os estudos que perpassam aos comportamentos estruturais observados em temperatura ambiente. Serão apresentados nesse capítulo algumas variáveis utilizadas na formulação das hipóteses matemáticas de fenômenos físicos que os códigos computacionais e normas prescritivas utilizam, uma vez que interferem diretamente no dimensionamento de um elemento estrutural em situação de incêndio.

3.1 O INCÊNDIO E MODELOS DE INTERESSE

Para que seja determinada a elevação de temperatura em um elemento estrutural, é necessário antes estabelecer a quantidade de calor que chega a esse elemento. Dessa forma, para a correta determinação das ações térmicas nos elementos estruturais, faz-se necessário conhecer os mecanismos pelo qual o calor é gerado e propagado dentro de um mesmo ambiente (RIGOBELLO, 2011).

Nesse sentido, o tempo que um elemento estrutural pode resistir depende da elevação da temperatura em si. A evolução da temperatura depende, dentre diversos fatores, da quantidade de material de combustão presente e das condições de ventilação do ambiente (TWILD et al., 1994).

Por esse motivo, aplicou-se grande esforço nas tentativas formular modelos matemáticos que descrevam a evolução da temperatura do incêndio, com diferentes tipos de combustíveis e materiais comburentes, em relação ao tempo do sinistro. Essa relação entre temperatura e tempo é representado pelas curvas de incêndio, se padronizadas recebem o nome de “curva-padrão de incêndio”, se parametrizadas pelas características do cenário de incêndio, “curvas paramétricas de incêndio”.

Tanto as normas brasileiras, quanto as internacionais admitem diferentes possibilidades a serem consideradas em ações térmicas nas estruturas. Uma delas é a relação entre a temperatura em função do tempo de incêndio ISO 834-1 de 1999. Esta norma padroniza internacionalmente os testes envolvendo a elevação de temperatura em elementos construtivos.

Assim, a análise térmica de um elemento estrutural em situação de incêndio consiste em determinar a variação de temperatura ou a variação do gradiente de temperaturas no elemento estrutural, tomando em consideração as condições de contorno provenientes do modelo de incêndio e os materiais que compõem esse elemento estrutural.

A análise térmica estrutural pode ser dividida, basicamente, em duas etapas, a primeira que consiste na determinação do calor transferido por convecção e radiação, proveniente do incêndio no contorno do elemento de interesse e a segunda que consiste na determinação da transferência de calor por condução no interior nos elementos estruturais.

Para avaliar de forma satisfatória a evolução de temperatura em uma estrutura é imprescindível que se conheçam os mecanismos de transferência de calor.

3.1.1 Transferência de calor

No início do século 19, o matemático e físico francês Jean-Baptiste Joseph Fourier introduziu a ideia de expandir as funções em séries trigonométricas para resolver as equações de condução de calor, dando origem a “Teoria Analítica do Calor”. Posteriormente grandes matemáticos contribuíram imensamente ao tema que continuou levando o nome de lei de Fourier de transmissão de calor por condução.

A lei da condução térmica estabelece que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente negativo de temperatura, uma vez que o calor flui da região de maior temperatura para a região de menor temperatura. Existem várias grandezas envolvidas, porém é de grande interesse prático o fluxo de calor e a distribuição de temperatura.

Nesse sentido, o processo de transmissão de calor é definido como sendo a propagação de energia de uma região para outra, através de um meio sólido, líquido ou gasosos, como resultado da diferença de temperatura entre elas, seja por meio da condução, convecção ou radiação, que diferentemente das outras duas não necessita de qualquer suporte material e pelo qual o calor é transmitido por radiação eletromagnética (VILA REAL, 2003).

A distribuição de temperatura em um meio é controlada pelos efeitos combinados desses três modos de transferência de calor. Muito embora em análises mais simplificadas poderá ser considerada separadamente a condução, sempre que a convecção, a radiação ou

simultaneamente ambas possam ser desprezadas, assim o modo de transferência de calor ou sua combinação será uma escolha arbitrária em cada situação. Um exemplo típico é o de elementos soldados, neste caso o calor se propaga basicamente por condução e a consideração de convecção e radiação podem, eventualmente, ser desprezadas (RIGOBELLO, 2011).

As ações térmicas, como forma de disposições regulamentares, estão definidas no CEN EN 1991-1-2:2002 e estão definidas também nas normas brasileiras ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 15200:2012, em termos de uma densidade de fluxo de calor que incide na superfície do elemento, que é a soma de duas parcelas, uma por convecção e outra por radiação, conforme mostrado na Equação (3.1).

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.1)$$

Como é objetivo do presente trabalho estudar o efeito da temperatura no pilar misto de aço e concreto é imperativo apresentar os três modos distintos de transmissão de calor: por condução, por convecção e por radiação. Em algumas literaturas podem receber a designação φ para o fluxo de calor por unidade de área, φ_c para a parcela do fluxo de calor devido à convecção e φ_r para a parcela do fluxo de calor devido à radiação.

3.1.1.1 Transferência de calor por condução

A condução é a forma típica pela qual ocorre a transmissão de calor no interior de um corpo sólido, sem que haja transferência de massa, o calor passa através da própria substância que o constitui.

Como já mencionado, a lei física que governa esse fenômeno é denominada de lei de Fourier, estabelecida em 1822 no livro “*Théorie Analytique de la Chaleur*” pelo matemático e físico francês Jean-Baptiste Joseph Fourier.

A lei empírica do fluxo de calor da condução térmica é proporcional à magnitude do gradiente de temperatura e oposta em sinal. A constante de proporcionalidade é chamada de condutibilidade térmica (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2017).

A equação básica, unidimensional, em regime estático, que rege esse fenômeno é expressa como:

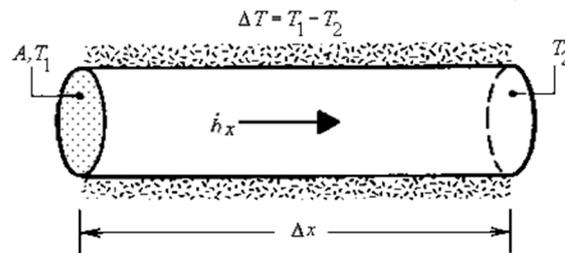
$$\dot{h} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), $\frac{dT}{dx}$, representa o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor \dot{h} e λ é a condutibilidade térmica do material, cuja unidade é $[\text{W/m.K}]$, onde:

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{\dot{h}}{\lambda} \propto \frac{1}{\lambda} \quad (3.3)$$

Por meio da Equação (3.3) é possível compreender que a variável condutibilidade térmica que surge na equação de Fourier é uma propriedade intrínseca de cada material e vem exprimir a maior ou menor facilidade que este apresenta quanto à condução do calor. Os valores podem variar em uma extensa faixa a depender da composição química, do estado físico e da temperatura dos materiais.

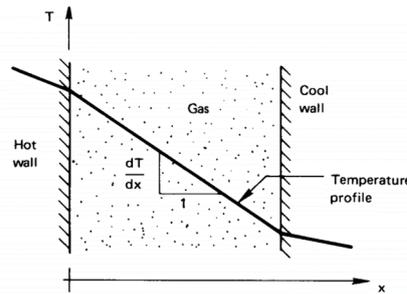
Figura 3.1: Sentido do fluxo de calor decorrente da diferença de temperaturas



Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V (2017)

O sinal negativo da fórmula é decorrente do fato do calor ser positivo ao fluir do ponto de temperatura mais alto para o ponto de temperatura mais baixo, gerando um gradiente negativo ou a razão da variação de temperatura com a distância, garantindo assim um fluxo de calor positivo e uma grandeza vetorial normal à área da seção transversal a uma superfície de temperatura constante (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2017).

Figura 3.2: Sentido do fluxo de calor decorrente da diferença de temperaturas



Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V (2017)

O fluxo de calor é um vetor quantitativo, portanto no campo tridimensional. A condução de calor passa a ser representada pela seguinte equação:

$$\vec{h} = -\lambda \cdot \nabla T \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.4)$$

Na Equação (3.4), ∇T representa o operador gradiente, $\nabla T = \left[\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right]^T$. Já a condutibilidade térmica, $\lambda = \lambda[\vec{r}, T(\vec{r}, t)]$ é mais complexa e raramente será considerada constante, uma vez que também depende da posição e da temperatura mesmo em materiais homogêneos, devendo ser determinado caso a caso (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2017).

3.1.1.2 Transferência de calor por convecção

A convecção é o mecanismo de transferência de calor entre um sólido e um fluido em movimento nas adjacências desse sólido, uma vez que haja diferença de temperaturas entre eles (RIGOBELLO, 2011).

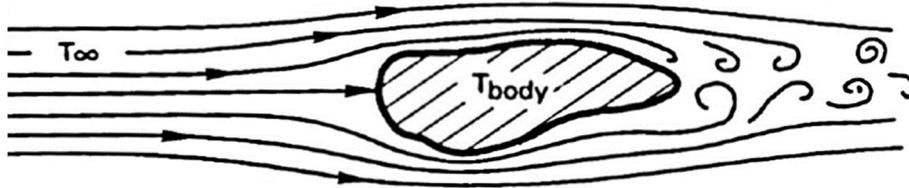
Assim, quando houver transferência de calor na interface de um sólido e um fluido em movimento, e esse movimento é devido a uma força externa, esse fenômeno é denominado convecção forçada. Já para quando o calor causar um movimento no fluido, devido à expansão ou um movimento de flutuação, enquanto simultaneamente houver um gradiente de temperatura e um gradiente de densidade, este movimento massivo do fluido é denominado de convecção natural (WANG, 2002).

De acordo com Lienhard IV e Lienhard V (2017), sugere-se que na convecção exista um fluxo de energia do corpo e apresenta consonância com as formulações da lei de resfriamento de Newton, expressa como:

$$\frac{dT_{\text{corpo}}}{dt} \propto T_{\text{corpo}} - T_{\infty} \quad (3.5)$$

A Figura 3.3 representa o resfriamento por convecção de um corpo aquecido onde o calor é conduzido pelas camadas superiores e levado pelo movimento do fluido.

Figura 3.3: Resfriamento por convecção de um corpo aquecido



Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V (2017)

Onde, na Equação (3.5) T_{∞} é a temperatura do fluido em movimento e T_{corpo} é a temperatura do corpo. Assumindo a hipótese que a energia seja proveniente do corpo. E se a energia do corpo é constantemente reposta, temperatura do corpo permanece constante. Então o que se leva a crer é que a taxa de resfriamento é proporcional a diferença de temperatura:

$$\dot{h}_{\text{net, c}} = \alpha_c \cdot (T_{\text{corpo}} - T_{\infty}) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3.6)$$

Onde $\dot{h}_{\text{net, c}}$ é o componente do fluxo de calor devido à convecção. Já o valor de α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, tomado simplificadaamente como um valor médio ao longo da superfície do corpo, uma vez que os mecanismos transferência de calor por convecção dependem de numerosos fatores e de forma geral são muito complexos.

A ABNT NBR 14323:2013 recomenda a utilização do coeficiente de transferência de calor por convecção α_c com valor igual a 25 [W/m².K] para a exposição ao incêndio-padrão. O valor aumenta para 50 [W/m².K] quando se utiliza a curva de incêndio de hidrocarbonetos e para 35 [W/m².K] quando se utiliza a curva de incêndio natural.

Para efeitos de cálculo computacional as temperaturas e todas as unidades de medidas devem estar de acordo com o Sistema Internacional de Unidades.

3.1.1.3 Transferência de calor por radiação

A transferência de calor por radiação é a única forma que não depende de um meio material para se propagar e pode aquecer até mesmo os objetos mais distantes em um ambiente, inclusive para situações em que se tenha a ocorrência do vácuo.

A radiação térmica é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, que se propagam radialmente da fonte e na velocidade da luz.

Em um incêndio o calor é irradiado, a radiação é a transformação da energia por ondas eletromagnéticas, dessa forma uma superfície pode absorver, transmitir ou refletir a radiação incidente (WANG, 2002).

Nesse sentido a equação a seguir representa a transferência de calor por radiação:

$$\omega + \psi + \tau = 1 \quad (3.7)$$

Na Equação (3.7), o termo ω representa a absorptância, ψ a refletividade e τ a transmitância, nos quais são funções da temperatura, do comprimento de onda e das propriedades da superfície do corpo. Quando um corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente (à mesma temperatura, sem transferência de calor), a absorptância é igual à emissividade do material.

3.1.1.3.1 Radiação do corpo negro

O caso extremo, onde toda a radiação térmica é absorvida pelo corpo, $\omega = 1$, considerado um corpo ideal, é denominado corpo negro.

A radiação do corpo negro é de fundamental importância para o estudo em questão devido ao fato de ser um perfeito emissor de radiação. Isso significa que nenhum outro corpo emite mais radiação térmica por unidade de área que um corpo negro, para o mesmo nível de temperatura. A quantidade total de radiação, E_b , emitida pela superfície de um corpo negro será função de sua temperatura, somente, sendo dada pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme a Equação (3.8):

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.8)$$

Na Equação (3.8) σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor atribuído é de $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m².K⁴], em que T é a temperatura em escala absoluta, ou seja, em Kelvin.

3.1.1.3.2 Radiação do corpo cinzento

É evidente que as propriedades idealizadas representadas pelo corpo negro não se concretizam de fato na realidade, uma vez que nenhum material emite e absorve radiação de forma absoluta. Em geral é necessário definir um termo adicional para quantificar a energia emitida pela superfície de um corpo qualquer. O termo é denominado emissividade e é representado pelo parâmetro ε . Este termo é definido como a taxa de energia total emitida por uma superfície real dividido pela taxa emitida de uma superfície de corpo negro. Dessa forma, a emissividade pode variar com valores entre 0 e 1. Portanto, a energia radiante total emitida por uma superfície real é dada pela Equação (3.9):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.9)$$

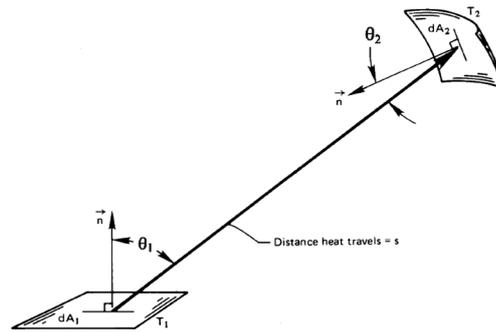
De maneira geral, a emissividade de uma superfície depende do comprimento de onda da energia radiante, da temperatura e do ângulo de radiação. Entretanto, se a emissividade for admitida independente desses fatores, a superfície radiante é denominada de superfície de corpo cinzento. A radiação de corpo cinzento é amplamente utilizada nos cálculos de engenharia de segurança contra incêndio (WANG, 2002).

3.1.1.3.3 Fator de forma ou de vista

Outra variável muito importante para o cálculo de problemas envolvendo elevação de temperatura é o fator de forma, que gera um efeito de sombra na superfície receptora. O CEN EN 1993-1-2:2005 e o CEN EN 1994-1-2:2005 recomendam sua utilização devido ao efeito causado pela obstrução da radiação térmica em razão do formato geométrico do perfil de aço. Na norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 esse evento é conhecido como “efeito de sombreamento” e possui um fator de correção, a depender da geometria da seção transversal em estudo.

Em uma superfície qualquer, a radiação térmica recebida costuma ser menor do que a emitida, já que depende de outras variáveis e não apenas da temperatura.

Figura 3.4: Representação das variáveis para o cálculo do fator de visada



Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V (2017)

O cálculo do fator de visada, com as variáveis compatibilizadas é dado pela Equação (3.10):

$$\Phi_{1-2} = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot s^2} dA_1 dA_2 \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10) A_1 e A_2 representam as áreas da superfície, s é a distância percorrida pela radiação, θ_1 e θ_2 são os ângulos formados pela incidência da radiação no centro de uma ínfima parte das áreas, representadas pelos infinitésimos dA_1 e dA_2 (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2017).

Levando em consideração todas as variáveis que influenciam a transferência de calor, de acordo como estão definidas no CEN EN1991-1-2:2002, o fluxo de calor que incide na superfície do elemento é apresentado conforme a Equação (3.11):

$$\dot{h}_{\text{net}} = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.11)$$

Portanto, o fluxo de calor por unidade de área é a soma da transferência de calor por convecção e por radiação. Onde T_g é a temperatura do gás do compartimento em [°C] e T_m é a temperatura superficial do elemento, também em [°C].

De acordo com a ABNT NBR 14323:2013, Φ é conhecido como k_{sh} e é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que para as estruturas metálicas mistas de aço e concreto pode ser tomado como igual a 1,0. Já ε_m é a parcela referente a emissividade da superfície do material, no caso do concreto e do aço ambos têm valores normativos de 0,7, segundo CEN EN 1992-1-2:2004. Já o valor de ε_f que é relativa à emissividade da chama, a

norma europeia CEN EN 1993-1-2:2005 admite valor de 1,0. A formulação traz também a constante de Stephan-Boltzmann σ já apresentada anteriormente. A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 trata a emissividade resultante do produto das emissividades do material e da chama, tomando também com valor de 0,7.

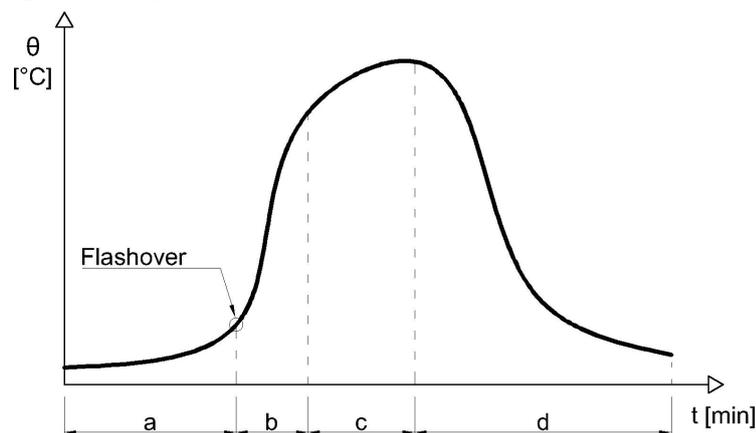
3.1.2 Curva de incêndio natural

O incêndio natural é o modelo de incêndio para o qual a temperatura dos gases respeita as curvas de temperatura em função do tempo construídas a partir de ensaios de incêndio que simulem a real situação de um compartimento em chamas. Os resultados desses ensaios dependem de parâmetros como, carga de incêndio, grau de ventilação e características térmicas do material componente de vedação (RIGOBELLO, 2011). Essas curvas são geralmente caracterizadas por uma fase de aquecimento e uma fase de arrefecimento.

Basicamente, quanto à caracterização do incêndio, esse depende simultaneamente de três fatores: uma fonte de calor, o combustível e o comburente que geralmente é o oxigênio (VILA REAL, 2003).

A Figura 3.5 representa a curva de elevação de temperatura em função do tempo de um incêndio real.

Figura 3.5: Representação da curva de temperatura em um incêndio real



Fonte: Próprio autor

Em um incêndio percebe-se quatro fases distintas, distribuídas ao longo do tempo, definidas em regimes de ignição, propagação e extinção. A fase inicial ou de ignição é caracterizada por temperaturas baixas, sendo que nesta fase há a produção de gases tóxicos. Na

fase inicial do incêndio a elevação de temperatura não tem influência significativa no comportamento estrutural da edificação.

Na segunda fase, a temperatura está em ascensão e é conhecida como fase de propagação, onde nela há a inflamação súbita dos gases e a transferência de calor acontece predominantemente através da radiação e convecção. Essa fase é caracterizada por possuir temperaturas, na zona mais quente do compartimento de incêndio, entre 450°C e 600°C e por possuir um fluxo de calor de 20 [kW/m²] ao nível do solo. Nesse instante ocorre o fenômeno “*flashover*”, também designado por incêndio generalizado.

A terceira fase é o desenvolvimento pleno do incêndio, onde as temperaturas podem evoluir e o material está em combustão plena.

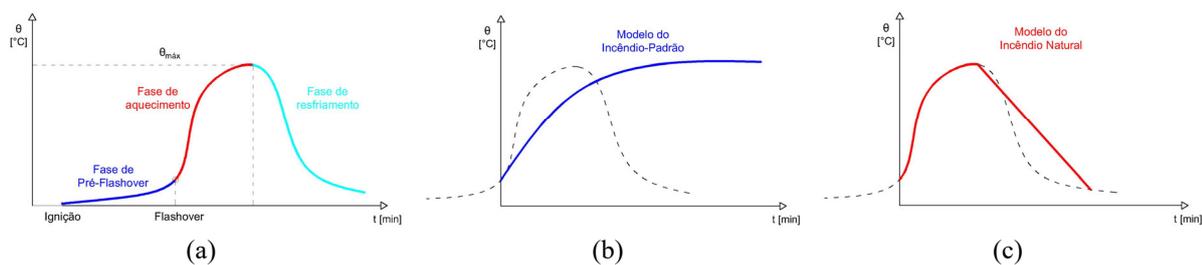
A quarta fase, é onde ocorre o resfriamento e a extinção do incêndio. Isso se deve ao fato da diminuição progressiva da temperatura dos gases por falta de carga de combustível, de comburente ou devido a uma intervenção externa.

A representação dos incêndios reais nos edifícios por modelos adequados à verificação da segurança das estruturas em relação ao fogo é particularmente complexa devido à grande variedade de situações que podem se apresentar e da multiplicidade de parâmetros influentes em uma situação real. Dessa forma, os modelos poderão ser simplificados, porém não deixando de representar de forma adequada a influência de todas as variáveis que condicionam o comportamento das estruturas em uma situação real de incêndio (VILA REAL, 2003).

A principal característica de um incêndio, para que seja realizada a avaliação do comportamento de elementos estruturais em temperaturas elevadas, é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, uma vez que a partir dessa curva é possível determinar a resistência do elemento sob efeito da ação térmica.

Tendo em vista que a curva temperatura-tempo do incêndio natural se altera para cada situação, diversos estudos convergiram para curvas padronizadas como modelos em análise experimental de estruturas. A Figura 3.6 apresenta três diferentes modelos de incêndio, o incêndio natural, o modelo de incêndio com curva-padrão e o incêndio natural com curva paramétrica.

Figura 3.6: Representação de três diferentes modelos de curvas de incêndio



Fonte: Adaptado de Rigobello (2011)

A ocorrência do fenômeno de “*flashover*” define a transição das fases de ignição e aquecimento no desenvolvimento dos modelos de incêndio. Diante disto, os modelos de incêndio podem ser classificados e divididos em basicamente dois tipos, os modelos de incêndio pré-flashover e os modelos de incêndio pós-flashover. Exceto os modelos computacionais com base em fluidodinâmica, que abrangem ambas as fases (RIGOBELLO, 2011).

Os modelos simplificados, nos quais são quase a absoluta maioria dos modelos estabelecidos nas resoluções normativas, são modelos empregados para a fase pós-flashover, dentre eles, podem se destacar o modelo de incêndio-padrão, o modelo de incêndio natural e as curvas de incêndio paramétricas.

No caso do incêndio em um compartimento onde a ocorrência do fenômeno de “*flashover*” não for possível de ser identificado, esse incêndio pode ser classificado como um modelo de incêndio localizado. Segundo Wang (2002), tal situação de incêndio pode ser verificada em estacionamentos, estádios e aeroportos. Por possuírem grandes áreas abertas o incêndio nestas estruturas, caso não seja um incêndio de grande severidade, os elementos estruturais estarão sujeitos de elevações de temperaturas localizadas e não uniformes em sua extensão.

Já para os modelos avançados, como o modelo de zonas, é possível considerar o comportamento do incêndio em fase de pré-flashover. Esses modelos computacionais consideram o compartimento em chamas dividido em diferentes zonas. Tais modelos têm por base algumas hipóteses da física do comportamento do incêndio e do movimento de fumaça, sugeridos por observações experimentais de incêndios reais em compartimento (RIGOBELLO, 2011).

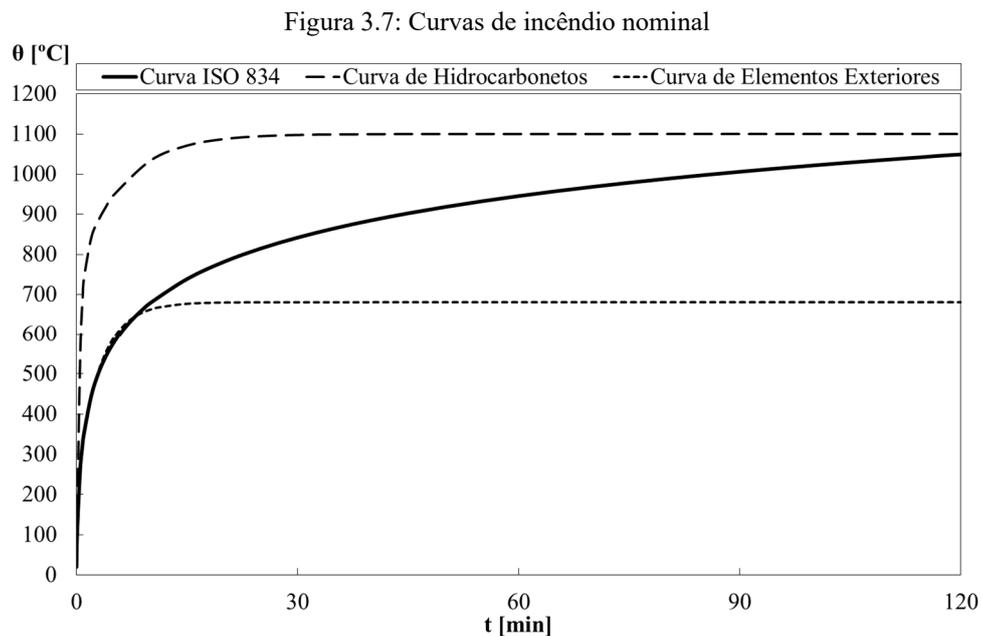
As curvas do modelo de incêndio-padrão, também conhecidas como curvas de incêndio nominal e o modelo de incêndio natural, contendo as curvas de incêndio paramétricas serão brevemente apresentadas nos próximos capítulos.

3.1.3 Curvas de incêndio nominais

O Brasil possui referências normativas indispensáveis para a aplicação dos métodos avançados de cálculo para o dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio. As normas brasileiras permitem também a utilização de normas estrangeiras em casos de reconhecida aplicabilidade, de forma complementar, ou na ausência de norma brasileira específica.

A norma europeia CEN EN 1991-1-2:2002 propõe três diferentes curvas nominais de incêndio: a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999, a curva de hidrocarbonetos e a curva de incêndio de elementos exteriores. Por razões de objetividade, será apresentado com mais detalhes o modelo de incêndio-padrão que é o modelo de interesse utilizado neste estudo.

A Figura 3.7 apresenta, de forma ilustrativa, as três curvas nominais de incêndio sobrepostas presentes no *Eurocode*.



Fonte: Próprio autor

A curva da temperatura em função do tempo nominal é uma modelagem analítica matemática de uma função contínua que é considerada, na verdade, uma convenção arbitrária da magnitude das temperaturas existentes em um incêndio real e independem do tipo ou das dimensões do edifício (VILA REAL, 2003).

O incêndio-padrão é o modelo de incêndio idealizado da elevação de temperatura em função do tempo, utilizado para fins de análise experimental de forma a garantir que o colapso

do elemento ocorra para o valor da máxima temperatura de ensaio. Embora o incêndio-padrão seja uma simplificação do modelo de um incêndio real, diversos estudos sobre o comportamento de elementos mistos de aço e concreto em temperaturas elevadas foram realizados por meio desse modelo e, portanto, sendo muito utilizado para fins de pesquisas de estruturas em situação de incêndio (WANG, 2002).

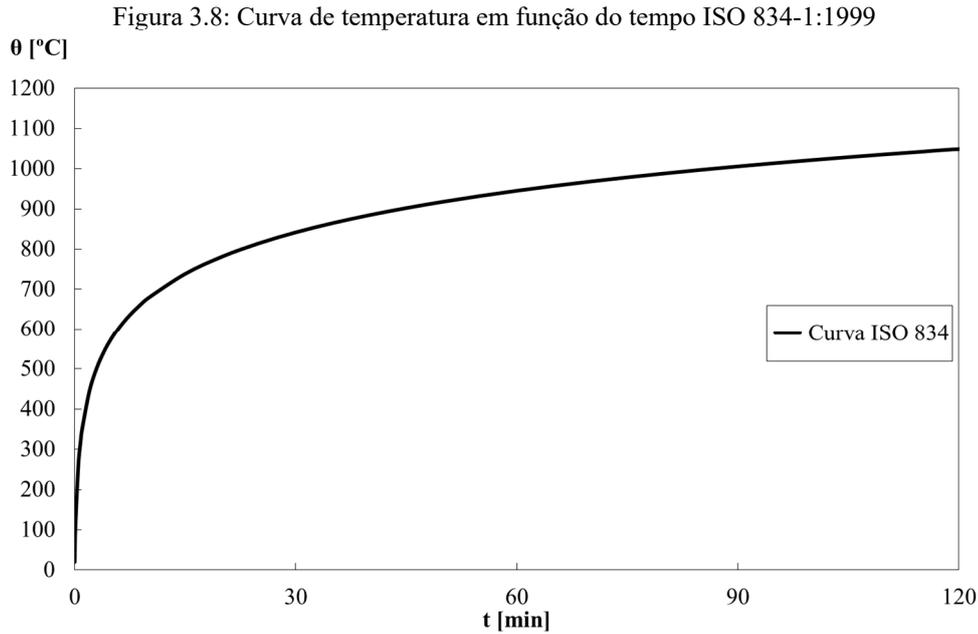
3.1.3.1 Curva de incêndio-padrão ISO 834

Em 1975, a “*International Organization for Standardization*” (ISO), federação mundial de padronização de órgãos nacionais, desenvolveu a norma internacional que padroniza a metodologia de ensaios de resistência em situação de incêndio, a instrução normativa ISO 834 de 1975, intitulada “*Fire Resistance Tests, Elements of Building Construction*”. A redação mais atual é a ISO 834-1 de 1999 de mesmo título, na qual cancela e substitui a ISO 834 de 1975.

O CEN EN 1991-1-2:2002, de acordo com a ISO 834-1:1999, fornece a equação da elevação de temperatura em função do tempo com o combustível à base de celulose, como recomendação para determinar a resistência ao fogo de vários elementos construtivos quando sujeitos a exposição de condições de incêndio-padrão.

$$\theta_g = 20 + 345 \log (8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.12)$$

Onde θ_g é a temperatura do gás no compartimento em chamas, t é o tempo em minutos. Assumindo um coeficiente de transferência de calor por convecção de $\alpha_c = 25$ [W/m².K]. A equação prevê temperaturas que atingem 745°C nos primeiros quinze minutos de incêndio, e incrementa cerca de 100°C a cada passo do dobro de tempo. Figura 3.8 apresenta a curva padronizada pela ISO 834-1:1999.



Fonte: Próprio autor

3.1.3.2 Curva de incêndio de hidrocarbonetos

O CEN EN 1991-1-2:2002 também prescreve uma curva de evolução da temperatura em função do tempo com o combustível à base de hidrocarbonetos.

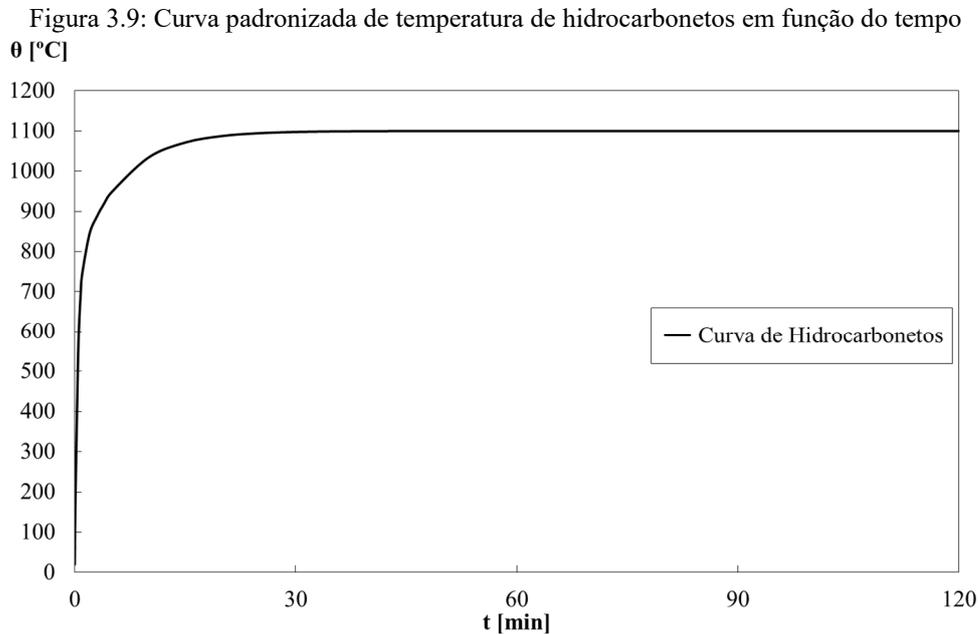
A curva de hidrocarbonetos foi desenvolvida na década de 1970 pela companhia petrolífera Mobil. Devido a carga de incêndio ser combustíveis à base de hidrocarbonetos a elevação de temperatura é muito mais severa em comparação com as outras duas curvas. Os estudos envolvendo essa curva de incêndio deram início ao aperfeiçoamento dos procedimentos e avaliações dos materiais de proteção e revestimento em plataformas de petróleo, em complexos de armazenamento de petróleo e em estruturas Offshore (DENOËL, 2005).

A equação da elevação de temperatura em função do tempo com o combustível a base de hidrocarbonetos, prescrita pela CEN EN 1991-1-2:2002, como recomendação para determinar a resistência ao fogo de vários elementos construtivos quando sujeitos a exposição dessa condição de incêndio é a apresentada conforme a seguinte fórmula:

$$\theta_g = 20 + 1080 (1 - 0,325 e^{-0,157t} - 0,675 e^{-2,5t}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.13)$$

Onde θ_g é a temperatura do gás no compartimento em chamas, t é o tempo em minutos. Assumindo um coeficiente de transferência de calor por convecção de $\alpha_c = 50$ [W/m².K]. A equação prevê um aumento significativo de temperatura nos cinco primeiros minutos com

temperaturas de 900°C e mantém-se constante em 1100°C. A Figura 3.9 apresenta a curva padronizada de hidrocarbonetos.



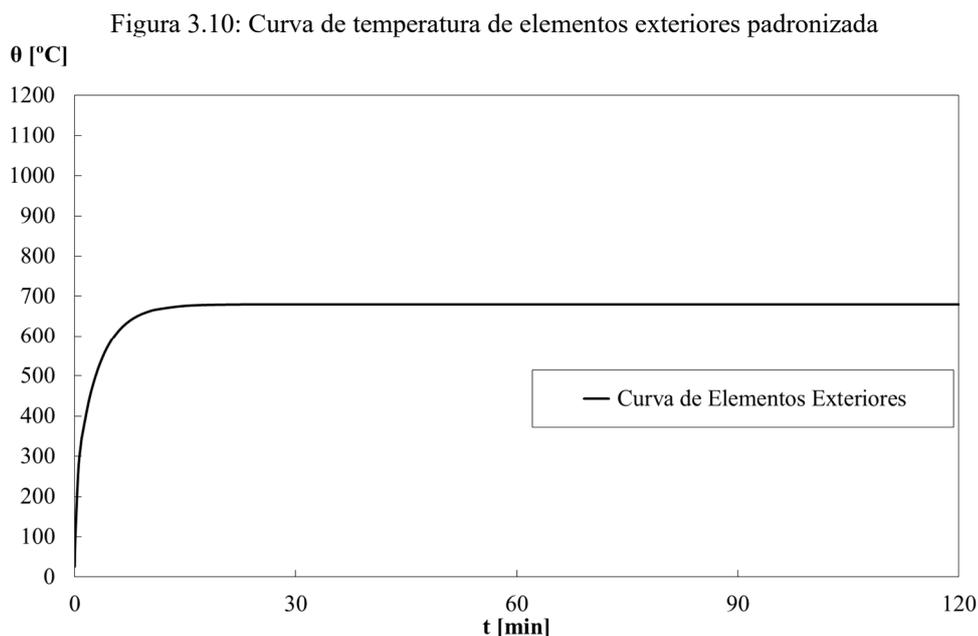
Fonte: Próprio autor

3.1.3.3 Curva de incêndio de elementos exteriores

Se a estrutura para a qual a resistência ao fogo deve ser conhecida for considerada uma estrutura externa ou um compartimento localizado abaixo ou adjacente a uma parede externa, a curva de incêndio para elemento externo pode ser usada de acordo com a seguinte formulação prescrita no CEN EN 1991-1-2:2002.

$$\theta_g = 20 + 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.14)$$

Onde θ_g é a temperatura do gás no compartimento em chamas, t é o tempo em minutos. Assumindo um coeficiente de transferência de calor por convecção de $\alpha_c = 25 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$. A equação prevê uma estabilização da temperatura em cerca de 680°C, ainda nos primeiros vinte minutos de incêndio. Isso se deve ao fato do desenvolvimento da temperatura, na fase de propagação, depender majoritariamente das condições de ventilação do ambiente. A Figura 3.10 apresenta a curva padronizada de elementos exteriores.



Fonte: Próprio autor

3.1.3.4 Curvas de incêndio paramétricas

As curvas paramétricas de temperatura em função do tempo de um incêndio estão definidas no Anexo A do CEN EN 1991-1-2:2002. Essas curvas se distinguem das curvas nominais por possuírem uma fase de arrefecimento e por dependerem de certos parâmetros físicos como a densidade de carga de incêndio, as condições de ventilação e das propriedades dos materiais de isolamento do compartimento.

As expressões analíticas das curvas paramétricas são avaliadas para compartimentos de no máximo 500m² de área em planta, sem aberturas no teto, com altura máxima de 4m do compartimento e o pressuposto de que toda a carga de incêndio do compartimento seja consumida.

3.2 ENGENHARIA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS

Segundo Rigobello (2011), existem basicamente dois caminhos para os métodos utilizados como forma de regulamentar o dimensionamento de uma estrutura, a abordagem prescritiva e a abordagem baseada no desempenho.

Em Vila Real (2003) são esclarecidas as diferenças entre essas duas abordagens quanto ao comportamento de uma estrutura metálica em situação de incêndio.

Em sua obra, o autor descreve uma abordagem prescritiva como sendo, por exemplo, uma estrutura estar não segura quando a temperatura do aço atingir temperaturas iguais ou superiores à temperatura crítica, exposto ao incêndio-padrão. Porém, para temperaturas inferiores à temperatura crítica, a estrutura é considerada segura, não tendo em conta nessa abordagem algumas condições particulares, como o tipo de incêndio que as estruturas estão sendo expostas, as condições de carregamento ou mesmo a interação entre os vários elementos estruturais.

Já para uma abordagem baseada no desempenho, a temperatura do aço é um dos fatores a ser levado em consideração, bem como a temperatura real do elemento, a evolução do incêndio, os carregamentos pré-existentes e a interação entre os diferentes tipos de elementos existentes na estrutura (VILA REAL, 2003).

Nesse sentido, no caso de análise de uma edificação em situação de incêndio, por meio da abordagem baseada no desempenho, apesar de ser um processo mais trabalhoso, é possível se obter uma melhor representação da estrutura quando submetida a situação real de incêndio.

A análise do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio representa um problema complexo, no qual os métodos analíticos podem não ser suficientes para descrever o real desempenho da edificação ou do elemento isolado.

Conforme Vila Real (2003) e Fletcher et al. (2011), os ensaios em laboratórios de elementos isolados ou mesmo de estruturas completas em escala real, como no caso do edifício metálico de oito pavimentos realizado no “*Cardington Laboratory of the Building Research Establishment*”, no Reino Unido, entre os anos de 1994 e 1997, são caros e complexos, entretanto são excelentes métodos de análise para o estudo do comportamento real de estruturas em situação de incêndio. Dessa forma, pesquisas envolvendo a modelagem computacional também se apresentam como alternativa viável ao estudo do comportamento de estruturas em situação de incêndio ou em temperaturas elevadas. É imprescindível que essa modelagem numérica, normalmente fundamentada no Método dos Elementos Finitos, seja capaz de representar os fenômenos observados em experimentos com modelos construtivos confiáveis e válidos.

Os pilares mistos parcialmente revestidos de aço e concreto, por sua vez, possuem uma resistência superior quando comparados aos pilares exclusivamente de aço. Contudo, só é possível calcular a resistência do elemento estrutural tendo em consideração o desempenho térmico e mecânico dos materiais que o compõe em altas temperaturas.

Para o dimensionamento de elementos estruturais submetidos à compressão, no qual é o foco do presente trabalho, é importante que haja uma atenção especial por parte das

prescrições normativas, uma vez que se ocorrer o colapso de um ou mais pilares, existe a possibilidade de desencadear a instabilidade global da edificação ou ao colapso progressivo. As normas nacionais e internacionais apresentam métodos simplificados que nem sempre remetem, como já mencionado, a projetos econômicos e por essa razão métodos avançados de cálculo permitem uma melhor avaliação do desempenho estrutural com uma análise mais rigorosa da estrutura em situação de incêndio.

A verificação de segurança estrutural em situação de incêndio é realizada como forma de garantir que a temperatura atingida pelos materiais aço e concreto seja inferior à temperatura crítica do material ou que, durante certo tempo, a capacidade resistente seja suficiente para que as medidas de combate ao fogo sejam tomadas.

A engenharia de segurança contra incêndios pode ser definida como sendo a aplicação da ciência e da engenharia para os efeitos do fogo como forma de proteger a vida, reduzir os danos à propriedade, quantificando os riscos envolvidos para otimizar as soluções aplicáveis com medidas preventivas de possíveis desastres (PURKISS, 2007).

O conceito de engenharia de segurança contra incêndio pode ser aplicável a qualquer situação em que o fogo representa um risco em potencial, que por meio de medidas ativas e passivas possam garantir o desempenho esperado. Na engenharia civil, é um ramo dedicado ao projeto adequado em caso de incêndio, de modo que os elementos estruturais que fazem parte do compartimento que contém o fogo possam cumprir sua função, seja estrutural, isolante ou de contenção (PURKISS, 2007).

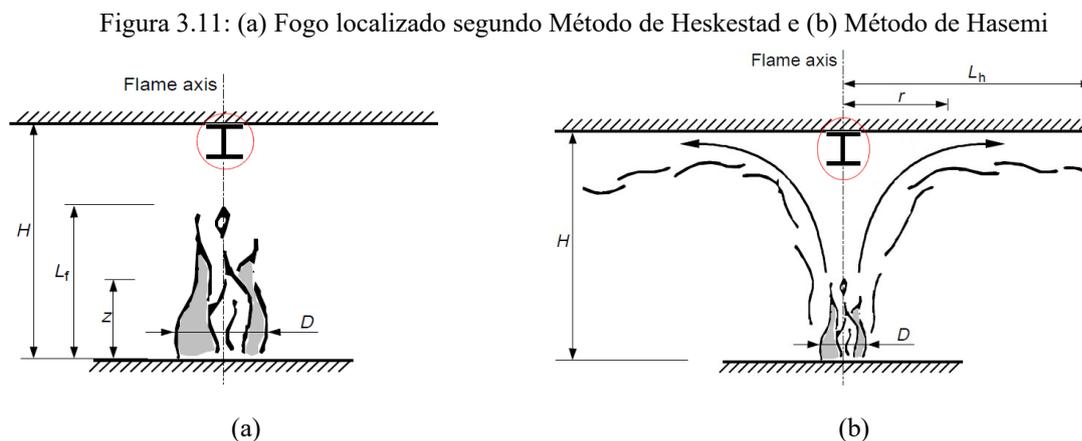
A preocupação em um projeto de edifícios não é apenas o de fornecer rotas de fuga para seus ocupantes, mas o de identificar e proteger áreas que garantam a segurança estrutural para o caso de uma emergência.

Aspectos como o de controle de ignição do fogo, definindo em projeto os materiais de revestimento com pouca flamabilidade, além de serem estabelecidas rotas de fuga bem dimensionadas que facilitem a evacuação dos ocupantes do edifício em caso de emergência são de extrema importância.

Equipamentos de detecção e controle de incêndio também trazem uma segurança adicional em caso de sinistro. O controle de alastramento do fogo pode ser realizado por meio da implementação de câmara corta-fogo, ventilação e instalação de dispositivos de dispersão de água, conhecidos como *sprinklers*, além de outras medidas de combate ao fogo, assim como garantir a distância mínima entre edifícios ou residências, são medidas fundamentais para evitar o alastramento fora de controle do incêndio para outras áreas.

Os requisitos legais da segurança contra incêndio em edifícios devem ser observados rigorosamente, como forma de minimizar os riscos em um eventual incidente, pois há um impacto direto e significativo nas vidas das pessoas, além da instalação e exploração dos estabelecimentos comerciais ou residenciais.

O CEN EN 1991-1-2:2002 admite para quando o fenômeno de “flashover” seja improvável de acontecer, ações térmicas do fogo localizado devam ser tomadas em consideração. Existem nessa norma dois diferentes métodos para o cálculo das ações térmicas envolvendo o fogo localizado, o Método de Heskestad e o Método de Hasemi. O Método de Heskestad é utilizado quando a chama do incêndio não alcança o teto, $L_r < H$. Já o Método de Hasemi, é utilizado quando o comprimento da chama é superior ao valor da altura do compartimento de incêndio, ou $L_r \geq H$, conforme Figura 3.11.



Fonte: Adaptado de CEN EN 1991-1-2:2002

Existem basicamente três níveis de procedimentos normativos adotados pelos *Eurocodes*. Para elementos isolados, o dimensionamento dos requisitos mínimos deriva de testes padrões de resistência ao fogo em escala real, dessa forma é permitido que sejam utilizados métodos tabulares no dimensionamento.

Já para um sistema estrutural simples ou para um elemento estrutural isolado, a norma recomenda que possam ser adotados métodos simplificados de cálculo.

No entanto, para o dimensionamento de partes da estrutura, sistemas estruturais ou elementos isolados, utilizar uma abordagem que busque descrever o comportamento estrutural de forma mais precisa e fundamentada no desempenho em situações de incêndio recomendam-se os métodos avançados de cálculo.

Há ainda um método que estuda o desempenho da estrutura em escala real, o Método de Teste, entretanto por ser oneroso é pouco utilizado.

3.3 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

No Brasil, o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo ou, abreviadamente TRRF, é um tempo no qual a estrutura deverá resistir a um incêndio cuja severidade corresponde a elevação de temperatura segundo a curva-padrão de incêndio. Internacionalmente o TRRF é estabelecido com a sigla “R” precedendo o tempo de exposição do elemento estrutural ao incêndio, por exemplo, R30 significa o mesmo que TRRF 30, para uma exposição de trinta minutos.

Para que seja estabelecida a resistência de elementos estruturais em situação de incêndio é usual que tenha como base, para fins de normalização, a utilização da curva da temperatura em função do tempo da ISO 834-1:1999, ou a curva americana estabelecida na norma ASTM E119 “*Standard Test Method for Fire Tests of Building Construction and Materials*”, ou mesmo a curva da norma inglesa BS 476 “*Fire tests on building materials and structures*”. Essas normas são utilizadas não apenas para avaliar e descrever a resposta de materiais, produtos ou elementos ao calor e às chamas sob condições controladas, como também no que se refere à capacidade resistente da construção, definindo a classe de resistência ao fogo a que os elementos devam pertencer, em função do tipo de ocupação, sua altura e risco de iminência de incêndio, independente dos materiais de que a estrutura seja constituída.

O conceito de resistência ao fogo de elementos estruturais em regulamentos é de forma geral, de caráter prescritivo, associado como o tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado, por exemplo a curva de incêndio-padrão ISO 834-1 de 1999, a que o elemento é submetido, até ao momento em que ele deixa de satisfazer as funções para que foi projetado (VILA REAL, 2003).

Para se verificar a segurança estrutural dos elementos de aço de uma edificação em situação de incêndio, é necessário conhecer a exigência de resistência ao fogo para cada tipo de elemento, conforme a legislação regional vigente.

Independente da nomenclatura utilizada tanto no Brasil quanto na Europa, a ideia de que o dimensionamento com base em um tempo estimado para um elemento estrutural resistir a ação do fogo é garantir que a estrutura tenha capacidade para desempenhar a sua função portante e que possibilite a evacuação com segurança dos ocupantes da edificação, viabilize o acesso das operações de combate ao incêndio e minimize os danos às edificações adjacentes.

3.3.1 Ações de segurança contra incêndio no Brasil

Diversos incidentes com perdas de vida ocorreram no Brasil antes que os Decretos e regulamento de proteção contra incêndio em edifícios fossem sancionados pelo governo.

Como exposto anteriormente, a maior parte da legislação brasileira a respeito do tema surgiu a partir da década de 1970. Em 1993 a Assembleia Legislativa de São Paulo aprovou o Decreto nº 38069 que estabelecia especificações para proteção contra incêndio fixando os critérios básicos de segurança contra incêndio. Este documento tem como objetivo proporcionar um nível adequado de segurança aos ocupantes de uma edificação, bem como minimizar os riscos de propagação do fogo e facilitar acesso as ações de socorro em caso de necessidade.

Em 1994, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo publicou a Instrução Técnica IT-CB-0233/94, que determinava o tempo de resistência ao fogo para vários tipos de estruturas de aço. Posteriormente, em 2004 foi publicada a Instrução Técnica nº 08/04 “Segurança Estrutural nas Edificações, Resistência ao Fogo dos Elementos de Construção”.

Em 2015, a Instrução Técnica nº 08/15 “Resistencia ao Fogo dos Elementos de Construção” atualizou e substituiu a versão anterior de 2004 como forma de se adequar às normas técnicas que tratam de estruturas em situação de incêndio. Neste documento são estabelecidas as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações quanto aos Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo - TRRF.

Para edificações de pequeno porte ou de fácil desocupação, como de uso residencial exclusivamente unifamiliares a verificação da segurança estrutural em situação de incêndio pode ser dispensada, exceto quando solicitada pelo proprietário. Já para edificações de difícil desocupação, como edifícios de andares múltiplos, a segurança estrutural da edificação com relação à situação de incêndio é obrigatória e deve atender com maior rigor o conjunto de exigências para o edifício como um todo.

A regulamentação de segurança contra incêndio entende que há 12 ocupações principais, subdivididas em categorias de acordo com características de seu uso. Um exemplo é uma edificação do grupo A, que pode ser classificada como A-1 se for uma habitação unifamiliar, A-2 se for multifamiliar ou A-3 se for uma habitação coletiva. Há ainda a categorização em 8 classes, de P1 a P8 quanto à altura da edificação, e duas classes de profundidade do subsolo, S1 e S2.

Capítulo 3 – Ações Térmicas em Estruturas Metálicas Mistas

Nesses termos, a Figura 3.12 apresenta de forma demonstrativa o quadro da norma que estabelece o tempo requerido de resistência ao fogo, segundo a Instrução Técnica nº 08/15, em função das dimensões da edificação.

Figura 3.12: TRRF segundo a classificação das edificações brasileiras

Grupo	Ocupação/Use	Divisão	Profundidade do subsolo (h _s)				Altura da Edificação (h)					
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s ≤ 10m	Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m	Classe P ₃ 12m < h ≤ 23m	Classe P ₄ 23m < h ≤ 30m	Classe P ₅ 30m < h ≤ 80m	Classe P ₆ 80m < h ≤ 120m	Classe P ₇ 120m < h ≤ 150m	Classe P ₈ 150m < h ≤ 250m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	150	180	
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60	60	90	120	150	180	
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60	60	60	90	120	150	180	
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	150	180	
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60	60	90	120	120	150	180
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	120	150	180
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60	60	60	90	120	150	180	-
		F-3, F-4 e F-7	90	60	ver item A.2.3.3		30	60	60	90	120	-
		F-9	90	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	60	60	90	120	120	150	180
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60	30	30	30	30	60	120	120	150
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		H-2, H-3 e H-5	90	60	30	60	60	90	120	150	180	180
		I-1	90	60	30	30	30	60	120	-	-	-
I	Industrial	I-2	120	90	30	30	60	90	120	-	-	-
		I-3	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
		J-1	60	30	ver item A.2.3.4		30	30	60	-	-	-
		J-2	90	60	60	60	60	60	60	-	-	-
J	Depósitos	J-3	90	60	60	60	60	120	120	-	-	-
		J-4	120	90	60	60	90	120	120	-	-	-
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120							
M	Especial	M-1	150	150	150							
		M-5	120	90	60	60	90	120	-	-	-	-
		M-3	120	90	90	90	120	120	120	150	-	-

Fonte: Adaptado de Instrução Técnica nº 08/15

No Brasil, o método tabular de dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio presente na ABNT NBR 14323:2013, que estabelece as dimensões mínimas, cobrimento para o concreto e outros fatores que influenciam na resistência estrutural são divididas em quatro categorias do TRRF, os tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos. A Figura 3.13 extraída da norma brasileira acima citada ilustra os TRRF para uma coluna mista parcialmente revestida, que especifica as distâncias mínimas e porcentagens mínimas de reforço de aço.

Figura 3.13: TRRF de uma coluna mista parcialmente revestida

		TRRF min			
		30	60	90	120
1	Requisitos para o nível de carga $\eta_{ff} \leq 0,30$				
1.1	Dimensões mínimas de d_c e b_c (mm)	160	200	300	400
1.2	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	–	50	50	70
1.3	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em porcentagem ^a	–	4	3	4
2	Requisitos para o nível de carga $\eta_{ff} \leq 0,50$				
2.1	Dimensões mínimas de d_c e b_c (mm)	160	300	400	–
2.2	Distância mínima da face ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	–	50	70	–
2.3	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em porcentagem ^a	–	4	4	–
3	Requisitos para o nível de carga $\eta_{ff} \leq 70$				
3.1	Dimensões mínimas de d_c e b_c (mm)	160	400	–	–
3.2	Distância mínima da face do concreto ao eixo das barras da armadura u_s (mm)	40	70	–	–
3.3	Taxa mínima de armadura $A_s/(A_c + A_s)$ em porcentagem ^a	1	4	–	–
^a A_s é a área da armadura longitudinal e A_c é a área de concreto da seção transversal do pilar misto.					

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

A norma brasileira ABNT NBR 14432:2001 estabelece algumas condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram o edifício para que, em situação de incêndio, não ocorra o colapso estrutural da edificação.

Essa mesma norma ainda disponibiliza tabelas que caracterizam o método tabular para a verificação do TRRF dos elementos construtivos de uma edificação. A norma também disponibiliza fórmulas para o cálculo que caracterizam o método do tempo equivalente para o cálculo de carga de incêndio específica, necessário em casos especiais não dispostos nas tabelas do método tabular.

Ainda, por meio da ABNT NBR 14323:2013 Anexo F e pela ABNT NBR 15200:2012 Anexo A, há o cálculo TRRF utilizando do método de tempo equivalente em construções que apresentam boas características e medidas contra o incêndio.

Respeitando valores máximos, o cálculo do TRRF pelo método do tempo equivalente levam em consideração fatores como medidas de proteção ativa, a brigada de incêndio,

sprinklers, ou a existência de detecção automática do incêndio, além do risco de incêndio e a ventilação existente na ocupação. Isso permite ao projetista uma abordagem mais realista, ora desonerando os custos dos elementos estruturais por não necessitar resistir a tempos muito elevados, ora protegendo a vida dos ocupantes alertando a existência de incêndio e garantindo a rápida desocupação da edificação.

Além do método tabular, a norma ABNT NBR 14323:2013 descreve o procedimento específico de dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto em situação de incêndio, pertencentes a estruturas de pequena e média deslocabilidade, com instabilidade e flexão em relação ao eixo de menor inércia do perfil de aço, foco desse trabalho.

3.4 PROPRIEDADES DA SEÇÃO MISTA SOB AÇÕES TÉRMICAS

O conceito fundamental de todos os métodos de dimensionamento é o de garantir a estabilidade estrutural em situação de incêndio sabendo que os materiais gradualmente perdem resistência e rigidez a altas temperaturas.

A exposição dos materiais a temperaturas elevadas afeta suas características mecânicas, sendo traduzida pela redução do módulo de elasticidade, redução nas tensões de escoamento ou cedência. A dilatação térmica com restrição dos materiais provoca um aumento das tensões internas causadas por deformações dos elementos.

As propriedades térmicas também dependem da temperatura, a condutibilidade térmica é reduzida devido aumento da temperatura. O calor específico e a massa específica possuem variações particulares que são afetadas pelas transformações químicas e físicas de cada material.

3.4.1 Propriedades mecânicas do aço e do concreto

As propriedades mecânicas influenciam no comportamento e na resistência do aço e do concreto quando submetidos a condições de temperaturas elevadas. Essas propriedades são definidas de acordo com o CEN EN 1992-1-1:2004, onde trata das propriedades do concreto e do dimensionamento de elementos desse material à temperatura ambiente. Já o CEN EN 1993-1-1:2005, trata das propriedades e do dimensionamento de estruturas metálicas em aço em temperatura ambiente. Caso esses materiais sejam submetidos a temperaturas elevadas, as propriedades e o dimensionamento são definidos de acordo com o CEN EN 1992-1-2:2004 para o concreto, e de acordo com o CEN EN 1993-1-2:2005 para o aço. As propriedades de interesse

também estão compiladas em normas brasileiras, conforme a ABNT NBR 14323:2013, para estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, a ABNT NBR 15200:2012 para estruturas de concreto em situação de incêndio. Já a ABNT NBR 8800:2008 é dedicada para estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, além da ABNT NBR 6118:2014 para os procedimentos de projetos de estruturas de concreto, para recomendações de dimensionamento em temperatura ambiente.

3.4.1.1 Aço do perfil metálico

As propriedades mecânicas em temperatura ambiente do aço e seu comportamento estrutural são amplamente estudados e difundidos por meio de normas e recomendações técnicas. As propriedades mecânicas e térmicas dos aços estruturais permitidos pela ABNT NBR 8800:2008, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 serão apresentadas nesse capítulo.

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, em seu item 5.1.1.1 recomenda que o diagrama de tensão *versus* deformação pode ser extraído do CEN EN 1993-1-2:2005.

Para a elaboração desse trabalho será utilizado de forma arbitrária o aço ASTM A572 Grau 50, também conhecido pela designação AR-350, para o perfil estrutural, que à temperatura ambiente apresenta as propriedades resistentes nominais $f_y = 345$ MPa e $f_u = 450$ MPa, sendo ainda o módulo de elasticidade $E_a = 200$ GPa, o módulo de elasticidade transversal com valor de $G_a = 77$ GPa e o coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ apresentados conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do aço estrutural ASTM A572 Gr.50

f_y [MPa]	f_u [MPa]	E_a [GPa]	G_a [GPa]	ν
345	450	200	77	0,3

Fonte: Próprio autor

Quando o aço for submetido à elevação de temperatura, o CEN EN 1993-1-2:2005 define os valores de tensão-deformação do aço do perfil estrutural. A Tabela 3.2 apresenta as formulações prescritas na norma.

Capítulo 3 – Ações Térmicas em Estruturas Metálicas Mistas

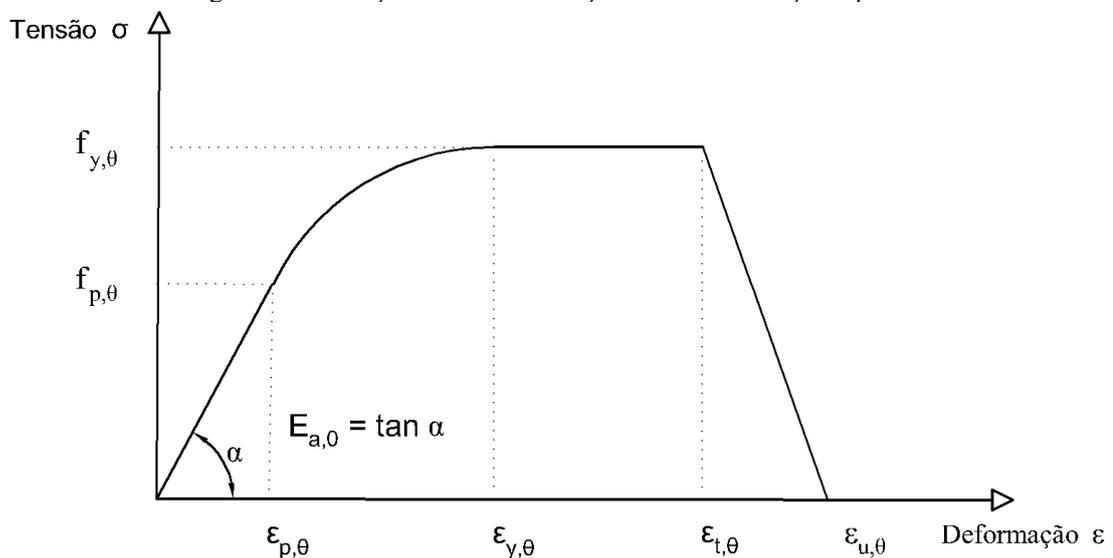
Tabela 3.2: Formulações de propriedades do aço do perfil em temperaturas elevadas

Deformação	Tensão $\sigma(\theta)$	Módulo de Elasticidade
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$	
	$b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$	
	$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

Fonte: Adaptado de CEN EN 1993-1-2:2005

A Figura 3.14 apresenta a curva da relação tensão-deformação idealizada do aço do perfil estrutural para a correta identificação dos parâmetros das formulações acima citados.

Figura 3.14: Relação tensão-deformação idealizada do aço do perfil



Fonte: Adaptado de CEN EN 1993-1-2:2005

Tanto o CEN EN 1993-1-2:2005 quanto a ABNT NBR 14323:2013 definem da mesma forma os fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço. Esses fatores de redução são referentes à tensão de escoamento efetiva $k_{y,\theta}$, ao limite de proporcionalidade $k_{p,\theta}$ e à

inclinação da reta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta}$. Esses fatores são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Fatores de redução das propriedades do aço do perfil em temperaturas elevadas

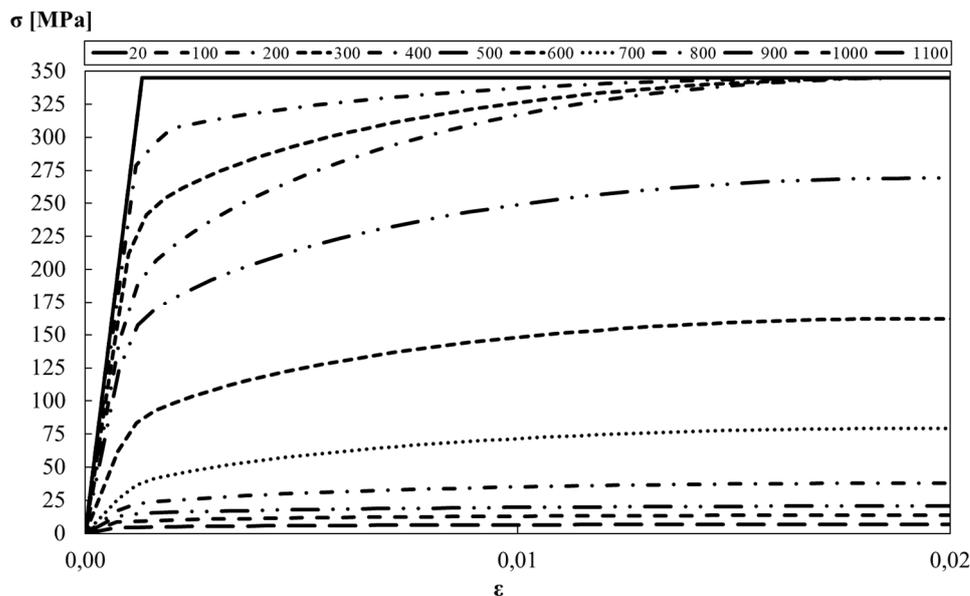
Temperatura do aço θ_a [°C]	Fatores de redução a temperatura θ_a referidos aos valores de f_y ou E_a a 20 °C		
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,0	1,0	1,0
100	1,0	1,0	1,0
200	1,0	0,807	0,90
300	1,0	0,613	0,80
400	1,0	0,420	0,70
500	0,78	0,360	0,60
600	0,47	0,180	0,31
700	0,23	0,075	0,13
800	0,11	0,050	0,09
900	0,06	0,0375	0,0675
1000	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,02	0,0125	0,0225
1200	0	0	0

Nota: Para os valores intermediários da temperatura do aço, poderá efetuar-se uma interpolação linear.

Fonte: Adaptado de CEN EN 1993-1-2:2005

A Figura 3.15 apresenta as curvas de tensão-deformação do aço quando submetido a temperaturas elevadas.

Figura 3.15: Curvas de tensão-deformação do aço do perfil em temperaturas elevadas

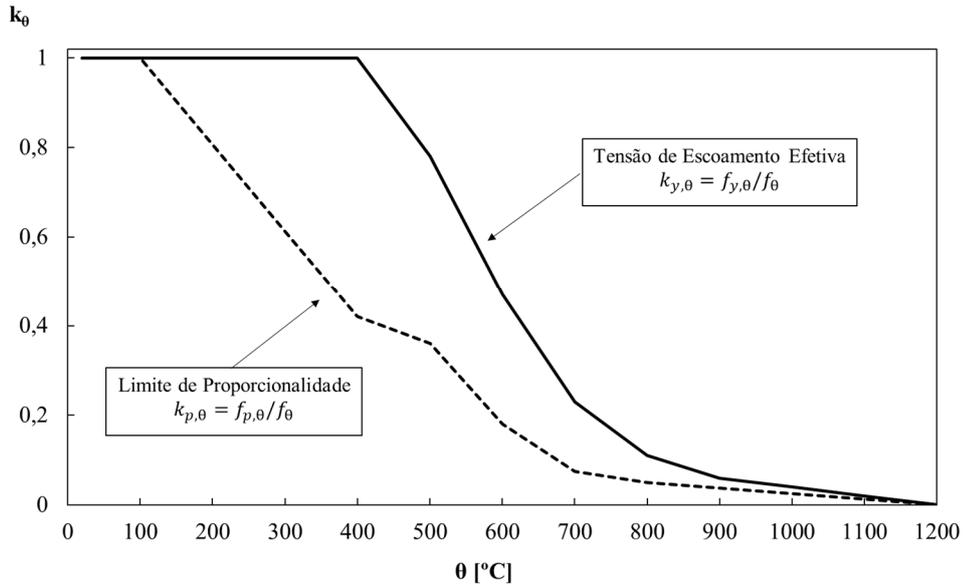


Fonte: Próprio autor

A Figura 3.16 apresenta os fatores de redução da tensão de escoamento efetiva e o limite de proporcionalidade do aço que forma o perfil estrutural. Os aços dos perfis estruturais

selecionados para o presente estudo são laminados a quente e possuem coeficientes de ponderação diferentes dos aços dos perfis estruturais conformados a frio, fato este que deve ser observado, a depender do tipo de aço disponibilizado pelo fornecedor do perfil estrutural.

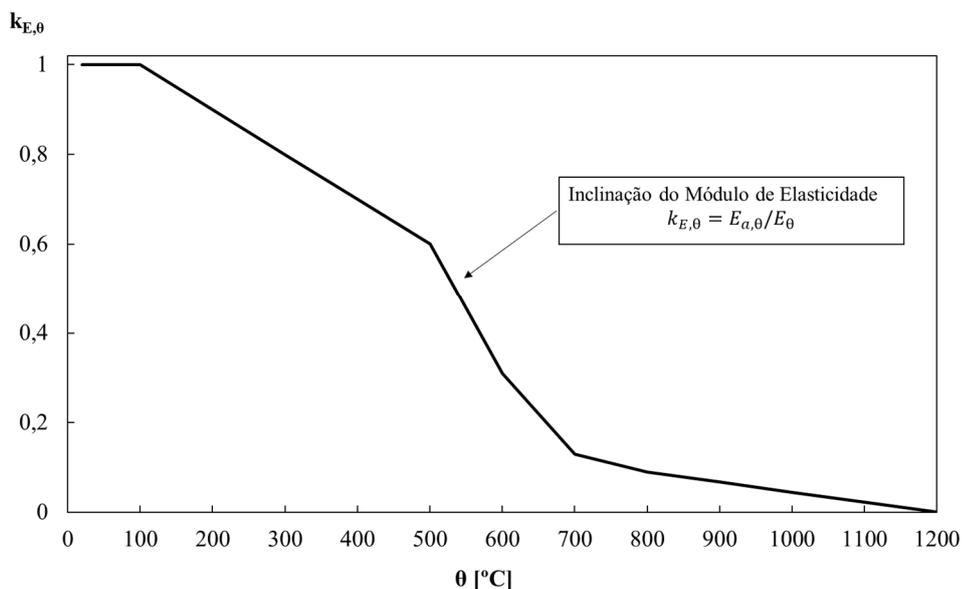
Figura 3.16: Fatores de redução da resistência do aço do perfil em temperaturas elevadas



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 3.17 e Figura 3.18 apresentam as curvas de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil quando sujeito a temperaturas elevadas.

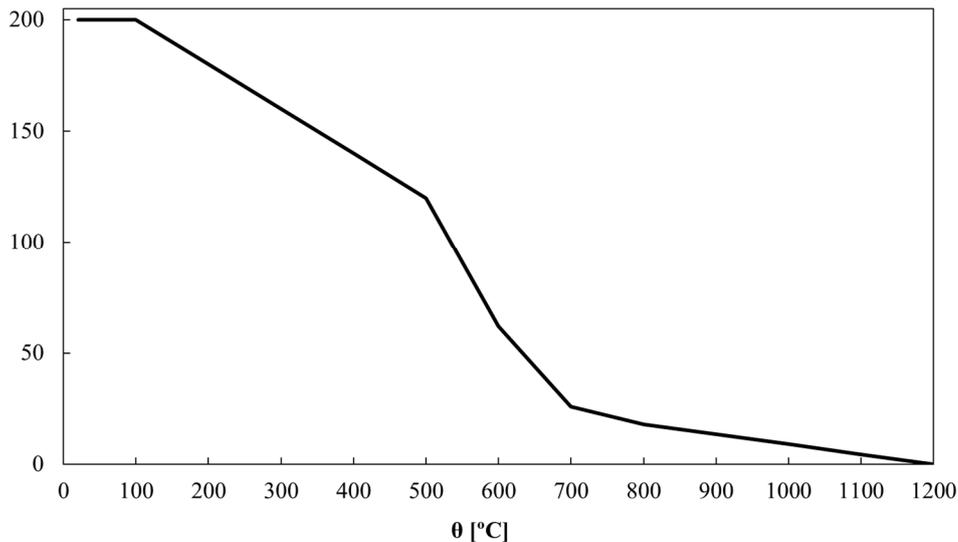
Figura 3.17: Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil



Fonte: Próprio autor

A Figura 3.18 apresenta o módulo de elasticidade do aço do perfil estrutural sendo minorado conforme o coeficiente de ponderação em temperaturas elevadas. Nota-se que diferentemente da tensão de escoamento, que é minorada apenas a partir dos 400°C, o módulo de elasticidade já passa a ser minorado a partir dos 100°C.

Figura 3.18: Redução do módulo de elasticidade do aço do perfil temperaturas elevadas
 $E_{a,\theta}$ [GPa]



Fonte: Próprio autor

3.4.1.2 Aço do reforço

As características mecânicas e térmicas do aço das armaduras de reforço são remetidas do item 5.3 da ABNT NBR 14323:2013 para a ABNT NBR 15200:2012. Entretanto, a norma brasileira ABNT NBR 15200:2012 é específica para concreto em situação de incêndio. Portanto, as formulações e parâmetros utilizados para descrever as características mecânicas e térmicas do aço do reforço serão extraídas principalmente da norma europeia CEN EN 1994-1-2:2005, específica para estruturas mistas em situação de incêndio, tendo em vista algumas recomendações da norma brasileira ABNT NBR 15200:2012.

O aço CA-50 foi escolhido de forma arbitrária, estando suas propriedades resistentes descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Características mecânicas do aço CA-50

$f_{ys,k}$ [MPa]	$f_{us,k}$ [MPa]	E_s [GPa]	G_s [GPa]	ν
500	540	200	77	0,3

Fonte: Próprio autor

Quando submetido a altas temperaturas o CEN EN 1994-1-2:2005 remete às mesmas formulações utilizadas para definir a tensão e deformação do aço do perfil estrutural do CEN EN 1993-1-2:2005, conforme a Tabela 3.3. A Tabela 3.5 apresenta as formulações com as devidas alterações na nomenclatura.

Tabela 3.5: Determinação das propriedades do aço CA-50 em temperaturas elevadas

Deformação	Tensão $\sigma(\theta)$	Módulo de Elasticidade
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta}) \right]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0	-
Parâmetros	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,020$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,5$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

Fonte: Adaptado de CEN EN 1993-1-2:2005

O CEN EN 1994-1-2:2005 define os fatores de redução para as características do aço caracterizando os aços formados a frio e os aços laminados a quente distintamente. O aço brasileiro CA-50 utilizado como reforço estrutural é um aço laminado a quente. O aço europeu comumente utilizado para reforço estrutural é o S500 NR classe B formado a frio.

Nesse sentido, serão utilizados os valores de redução recomendados pela tabela 3.4 do CEN EN 1994-1-2:2005, em favor da segurança, e como forma de se adequar internacionalmente aos critérios de ponderação de coeficientes de redução da tensão de escoamento do aço da armadura longitudinal que compõe o perfil estrutural misto.

Para aço do reforço estrutural, quando sujeito a temperaturas elevadas, o valor da tensão de escoamento $f_{ys,\theta}$, a tensão do limite de proporcionalidade $f_{sp,\theta}$, e o módulo de elasticidade $E_{s,\theta}$ variam de acordo com a temperatura a que estiverem submetidos, quando comparados com seus valores à temperatura ambiente. Na Tabela 3.6 estão representados os fatores de redução para a tensão de escoamento efetiva $k_{ys,\theta}$ e para o módulo de elasticidade $k_{Es,\theta}$.

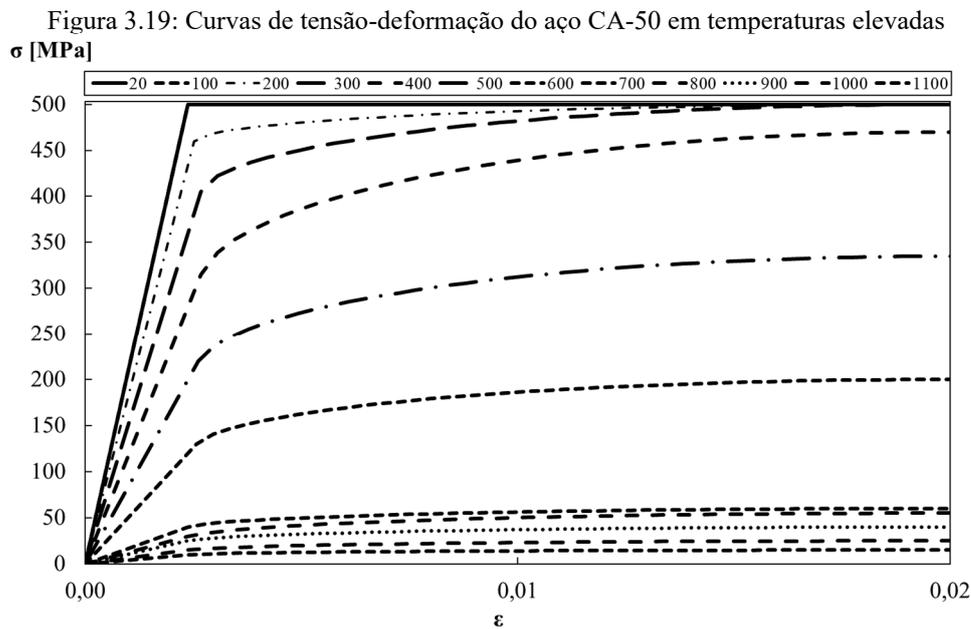
Tabela 3.6: Fatores de redução das propriedades do aço CA-50 a temperaturas elevadas

Temperatura do aço θ_s [°C]	Fatores de redução a temperatura θ_s , referidos aos valores de f_{ys} ou E_s a 20 °C		
	$k_{ys,\theta} = f_{ys,\theta}/f_{ys}$	$k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta}/f_{ys}$	$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$
20	1,0	1,0	1,0
100	1,0	0,96	1,0
200	1,0	0,92	0,87
300	1,0	0,81	0,72
400	0,94	0,63	0,56
500	0,67	0,44	0,40
600	0,40	0,26	0,24
700	0,12	0,08	0,08
800	0,11	0,06	0,06
900	0,08	0,05	0,05
1000	0,05	0,03	0,03
1100	0,03	0,02	0,02
1200	0	0	0

Nota: Para os valores intermediários da temperatura do aço, poderá efetuar-se uma interpolação linear.

Fonte: Adaptado de CEN EN 1994-1-2:2005

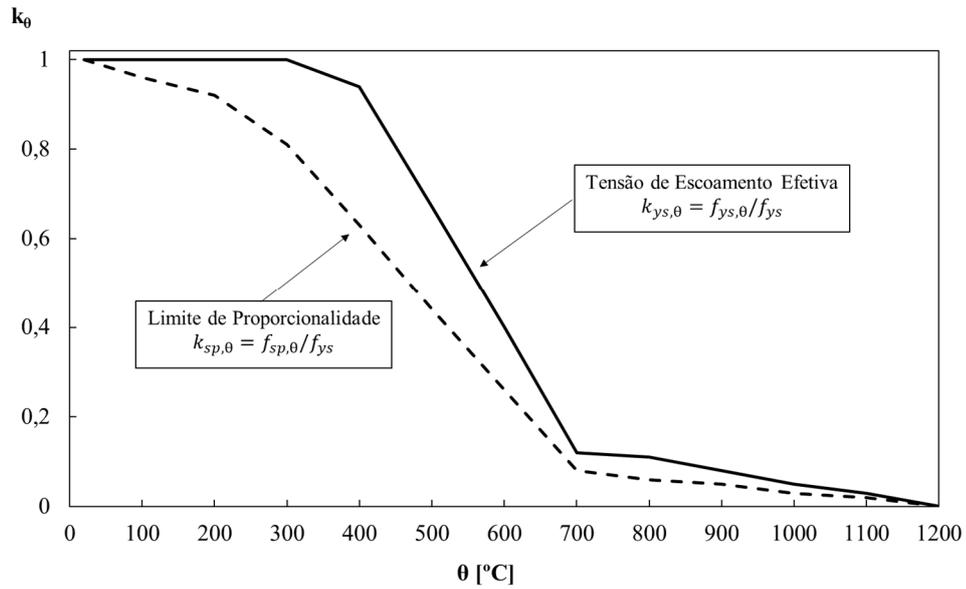
A Figura 3.19 e a Figura 3.20 apresentam as curvas de tensão-deformação do aço do reforço quando submetido a temperaturas elevadas e os fatores de redução, respectivamente.



Fonte: Próprio autor

A Figura 3.20 apresenta a curva do coeficiente de redução da tensão de escoamento efetiva do aço da armadura longitudinal, além do fator de redução do limite de proporcionalidade, que se refere ao limite em que a relação tensão-deformação ainda apresenta comportamento elástico.

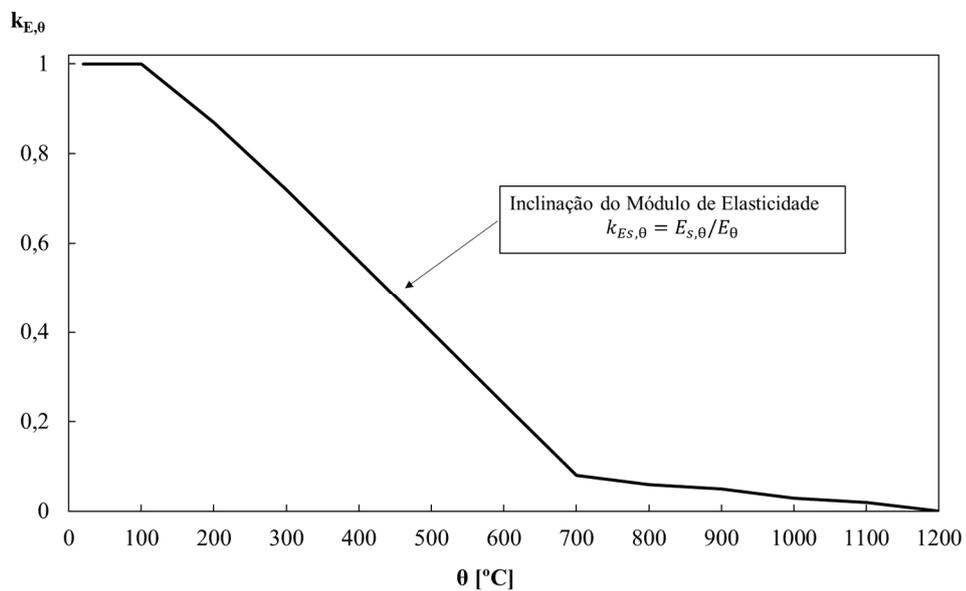
Figura 3.20: Fatores de redução das propriedades do aço CA-50 em temperaturas elevadas



Fonte: Próprio autor

A Figura 3.21 e a Figura 3.22 apresentam a curva da redução do módulo de elasticidade do aço do reforço devido a altas temperaturas.

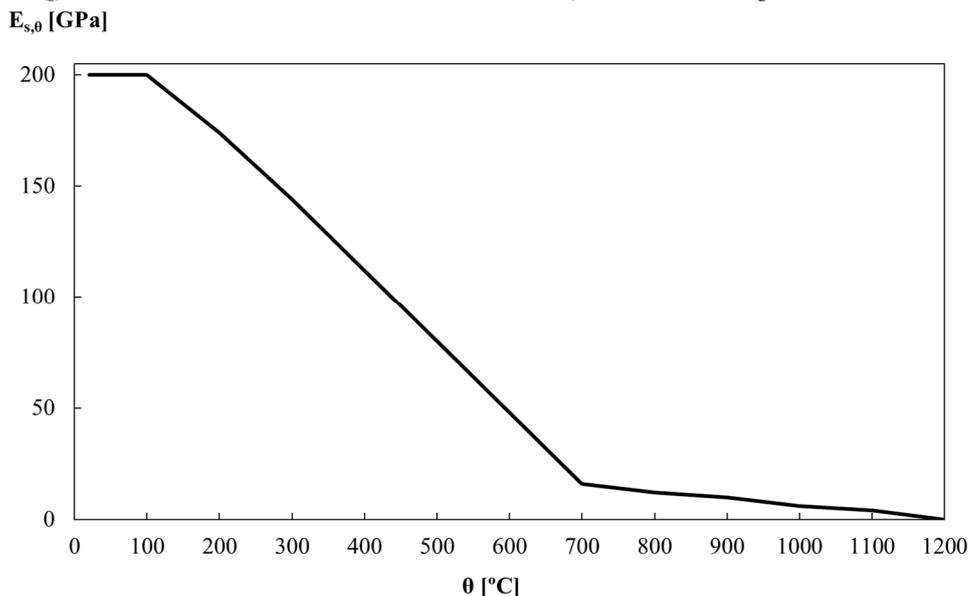
Figura 3.21: Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do aço do reforço



Fonte: Próprio autor

Nota-se, mais uma vez, que o módulo de elasticidade do aço da armadura longitudinal sofre redução em uma temperatura muito inferior da tensão de escoamento efetiva.

Figura 3.22: Curva do módulo de elasticidade do aço CA-50 em temperaturas elevadas



Fonte: Próprio autor

3.4.1.3 Concreto

Para determinar a resistência à compressão do concreto em altas temperaturas foram utilizadas as recomendações normativas da ABNT NBR 15200:2012 e do CEN EN 1994-1-2:2005.

As características resistentes do concreto para as condições de temperatura ambiente são apresentadas no CEN EN 1992-1-1:2004. As propriedades do concreto C20, classe utilizada nesse trabalho, estão representadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Propriedades mecânicas do concreto C20

f_{ck} [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	ϵ_{cl} [‰]	ϵ_{cu1} [‰]
20	28	2,2	30	2,0	3,5

Fonte: Próprio autor

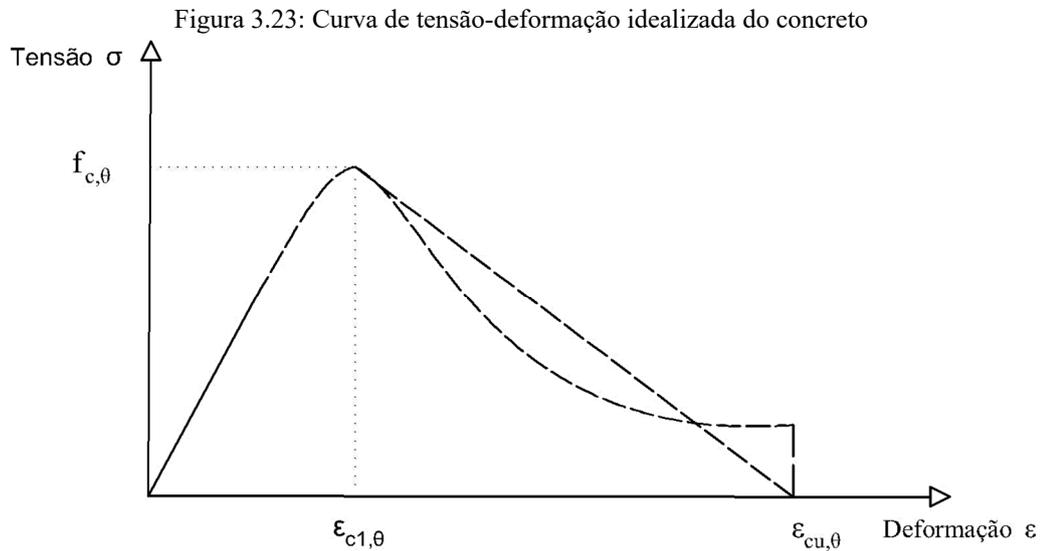
Quando o concreto é submetido a temperaturas elevadas, o CEN EN 1994-1-2:2004 e a norma brasileira ABNT NBR 15200:2012, definem os valores de tensão-deformação do aço do reforço. A Tabela 3.8 apresenta as formulações prescritas nas normas.

Tabela 3.8: Formulações das relações de tensão-deformação do concreto C20

Deformação	Tensão $\sigma_c(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$f_{c,\theta} \left[3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right\} \right]$
$\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu,\theta}$	Em modelagens numéricas o ramo descendente deve ser adotado. Modelos lineares e não lineares são permitidos.

Fonte: Adaptado de CEN EN 1994-1-2:2005

A Figura 3.23 apresenta a curva da relação tensão-deformação de compressão idealizada para o concreto, para a correta identificação dos parâmetros das formulações acima citados.



Fonte: Adaptado de CEN EN 1992-1-2:2004

O CEN EN 1994-1-2:2005 e a ABNT NBR 15200:2012 definem da mesma forma os fatores de redução para características mecânicas do concreto em situação de incêndio, como podem ser observados conforme Tabela 3.9.

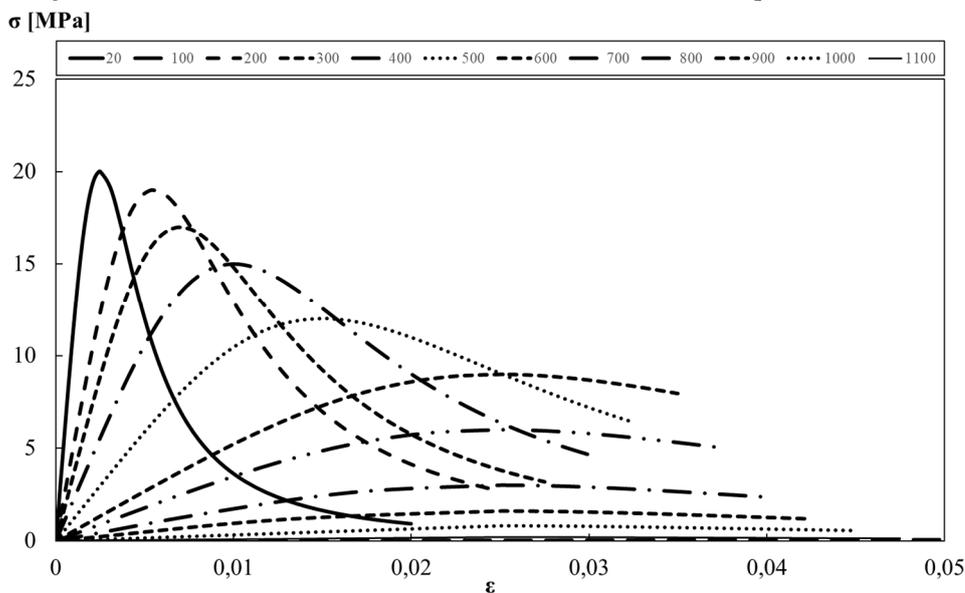
Tabela 3.9: Fatores de redução das características mecânicas do concreto

Temperatura do concreto θ_c [°C]	Agregados siliciosos		
	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	1,0	0,0025	0,0200
100	1,0	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475
1200	0	-	-

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15200:2012

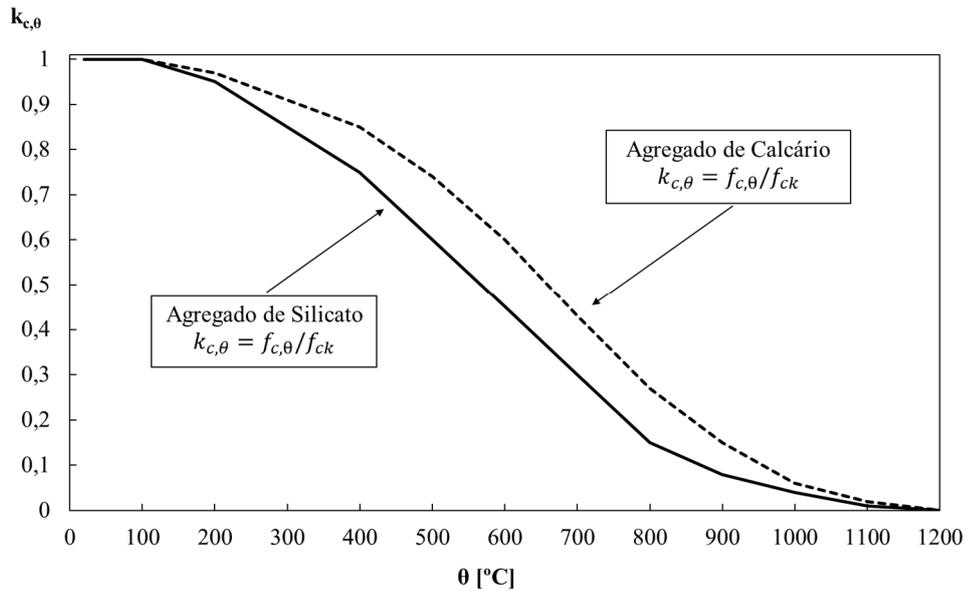
A Figura 3.24 apresenta graficamente as curvas de tensão-deformação idealizadas do concreto C20 sob compressão quando submetido a temperaturas elevadas. A Figura 3.25 apresenta fatores de redução tensão resistente à compressão do concreto C20 quando sujeito a temperaturas elevadas. A curva inferior, baseada em agregados de silicato é a curva que será utilizada nas formulações, tanto analíticas quanto numéricas, para a determinação da resistência estrutural da seção transversal.

Figura 3.24: Curvas de tensão-deformação do concreto C20 em temperaturas elevadas



Fonte: Próprio autor

Figura 3.25: Fator de redução das propriedades do concreto C20 em temperaturas elevadas

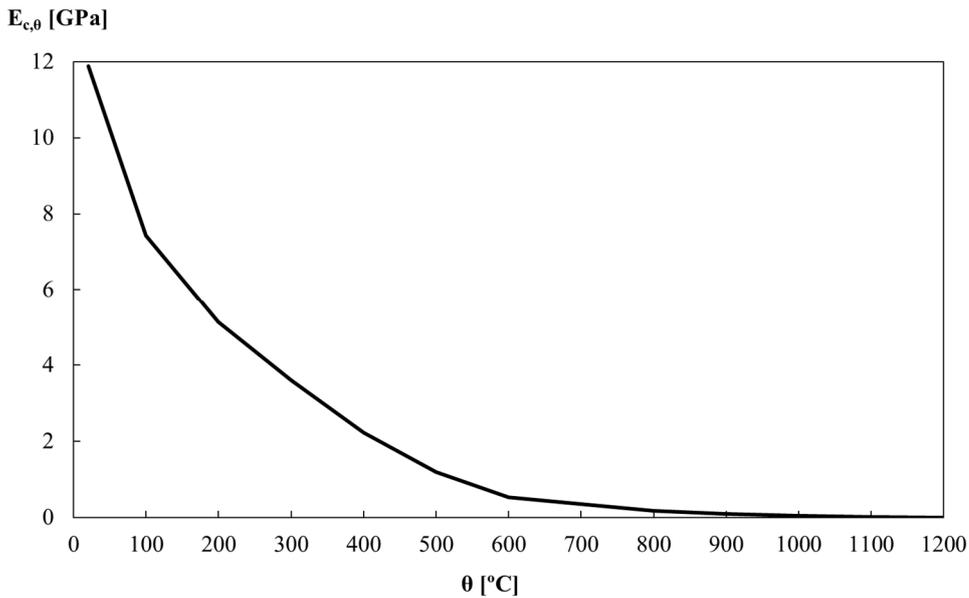


Fonte: Próprio autor

Conforme nas normas, tanto europeias quanto brasileiras, de maneira geral não definem diretamente um coeficiente de redução do módulo de elasticidade secante do concreto assim como há para o aço do perfil e do reforço. O módulo de elasticidade do concreto C20 afetado pelas temperaturas elevadas e apresentado na Figura 3.26, foi obtido, tanto utilizando as formulações prescritas pela Tabela 3.8, quanto da proporcionalidade de um ponto aproximado da deformação no limite do regime elástico, $\varepsilon_{p,\theta} = 0,27 \cdot \varepsilon_{c1,\theta}$, que é a deformação da equação $\sigma_{p,\theta} = 0,4 \cdot f_{c,\theta}$. Ou seja, foi efetuada uma aproximação da tensão de compressão limite em regime elástico do concreto, também permitida pelo CEN EN 1992-1-1:2004 no item 3.1.5 para análises não lineares.

A Figura 3.26 apresenta a curva do módulo de elasticidade do concreto C20 em temperaturas elevadas.

Figura 3.26: Curva do módulo de elasticidade do concreto C20 em temperaturas elevadas



Fonte: Próprio autor

3.4.2 Propriedades térmicas do aço e do concreto

O desempenho estrutural dos elementos que compõem o elemento misto em situação de incêndio está intrinsecamente ligado às propriedades térmicas e mecânicas dos materiais aço e concreto. As propriedades térmicas e mecânicas são brevemente apresentadas na ABNT NBR 14323:2013. Essa norma remete para a utilização da norma europeia CEN EN 1993-1-2:2005 que define as propriedades do aço em condições de temperaturas elevadas. Já para definir as propriedades mecânicas e térmicas do concreto a temperaturas elevadas, a norma ABNT NBR 14323:2013 remete para a utilização da ABNT NBR 15200:2012, bem como do CEN EN 1994-1-2:2005 e do CEN EN 1992-1-2:2004.

3.4.2.1 Calor específico do aço

O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de uma substância ao receber uma quantidade de calor.

A determinação prescritiva das expressões para a obtenção do valor do calor específico do aço em situação de incêndio estão presentes no Anexo E da ABNT NBR 14323:2013 e são aqui apresentadas conforme as seguintes formulações:

$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 600[^\circ\text{C}]$:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1}\theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}\theta_a^3 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.15)$$

$600[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 735[^\circ\text{C}]$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.16)$$

$735[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 900[^\circ\text{C}]$:

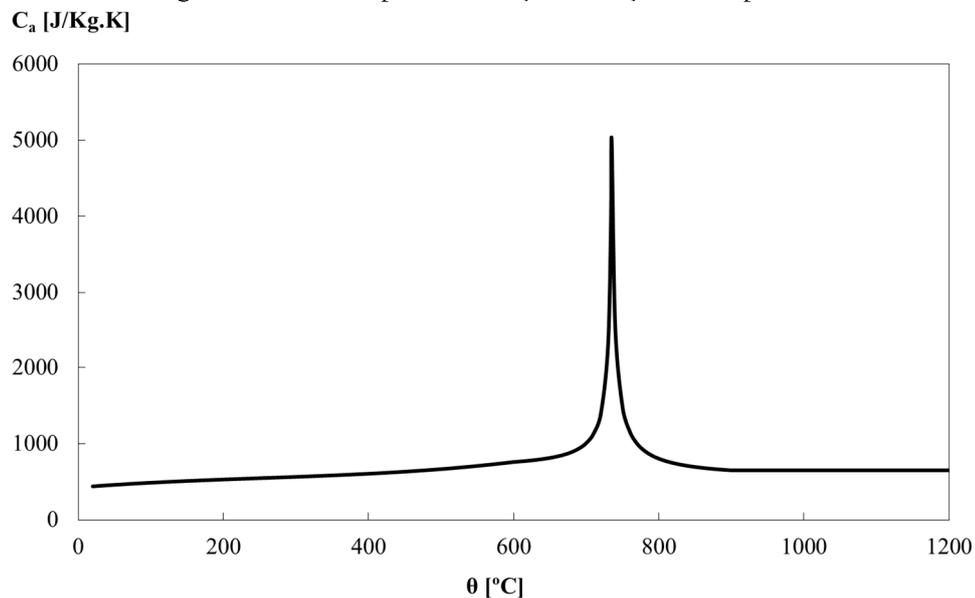
$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.17)$$

$900[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 1200[^\circ\text{C}]$:

$$c_a = 650 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.18)$$

Onde θ_a representa a temperatura do aço em $[^\circ\text{C}]$. A variação do calor específico do aço em função da temperatura pode ser observada conforme a Figura 3.27. O pico da curva representa uma transformação metalúrgica, endotérmica, da fase ferrítica para a fase austenítica.

Figura 3.27: Calor específico do aço em função da temperatura



Fonte: Próprio autor

3.4.2.2 Condutibilidade térmica do aço

A condutibilidade térmica do aço pode ser determinada conforme as seguintes expressões:

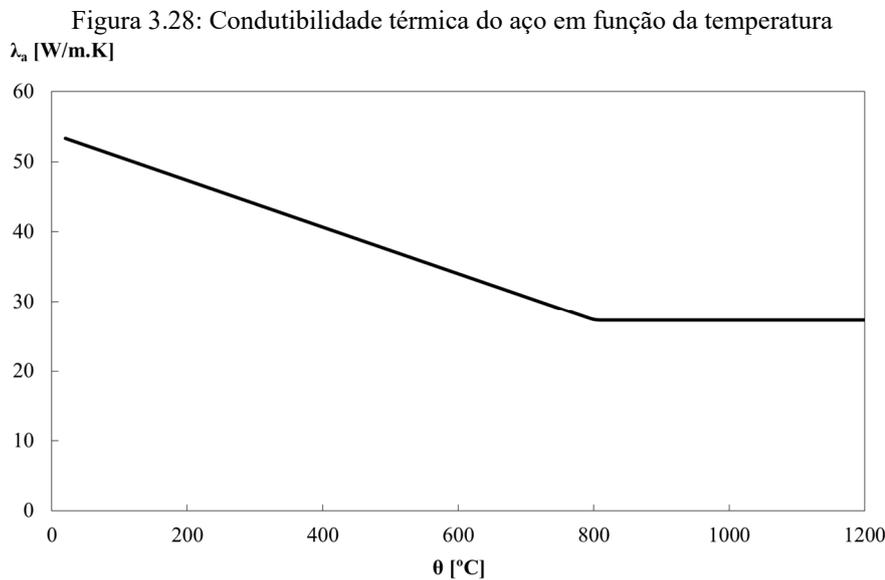
$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 800[^\circ\text{C}]$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \quad [\text{W/m.K}] \quad (3.19)$$

$800[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 1200[^\circ\text{C}]$:

$$\lambda_a = 27,3 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.20)$$

Onde novamente θ_a representa a temperatura do aço em $[^\circ\text{C}]$. Já a variação da condutibilidade térmica do aço em função da temperatura pode ser observada conforme o gráfico representado na Figura 3.28.



Fonte: Próprio autor

3.4.2.3 Densidade do aço

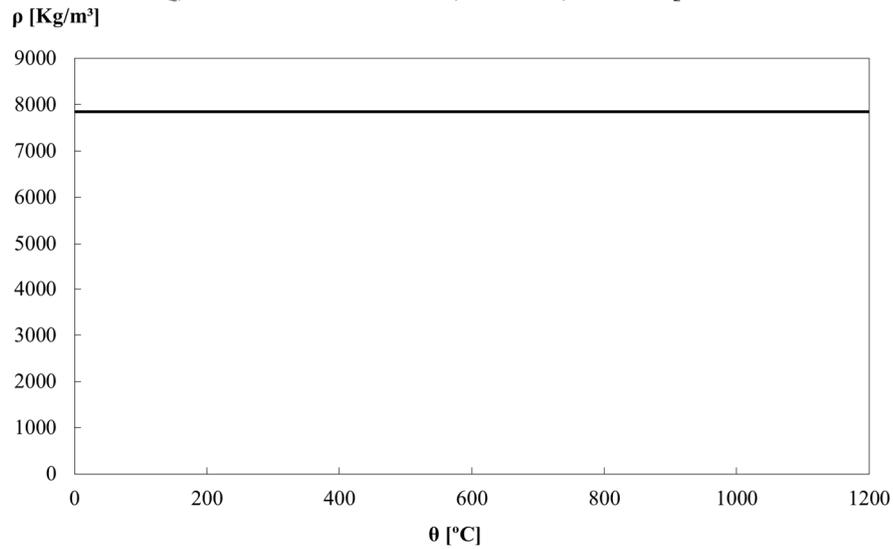
A densidade do aço permanece constante, não sendo afetada pela variação de temperatura.

$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 1200[^\circ\text{C}]$:

$$\rho_a = 7850 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.21)$$

A Figura 3.29 representa a densidade do aço em função da temperatura.

Figura 3.29: Densidade do aço em função da temperatura



Fonte: Próprio autor

3.4.2.4 Calor específico do concreto

As informações a respeito do calor específico do concreto podem ser verificadas na norma brasileira ABNT NBR 15200:2012 em seu Anexo C, apresentando uma equação para a obtenção dos valores em função da temperatura, que de maneira geral são iguais aos valores presentes no CEN EN 1992-1-2:2004. O calor específico do concreto c_c para um teor de umidade ($u = 0\%$), que pode utilizar um agregado silicioso ou calcáreo pode ser determinado através das seguintes equações:

$$20 [^{\circ}\text{C}] < \theta_c \leq 100 [^{\circ}\text{C}]:$$

$$c_c = 900 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.22)$$

$$100 [^{\circ}\text{C}] < \theta_c \leq 200 [^{\circ}\text{C}]:$$

$$c_c = 900 - (\theta_c - 100) \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.23)$$

$$200 [^{\circ}\text{C}] < \theta_c \leq 400 [^{\circ}\text{C}]:$$

$$c_c = 1000 - (\theta_c - 200)/2 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.24)$$

$$400 [^{\circ}\text{C}] < \theta_c \leq 1200 [^{\circ}\text{C}]:$$

$$c_c = 1100 \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.25)$$

Onde θ_c é a temperatura do concreto em $[^{\circ}\text{C}]$. Ainda de acordo com o CEN EN 1992-1-2:2004, quando o teor de umidade não for considerado explicitamente no método de cálculo, a função dada para o calor específico do concreto utilizando agregado silicioso ou calcário,

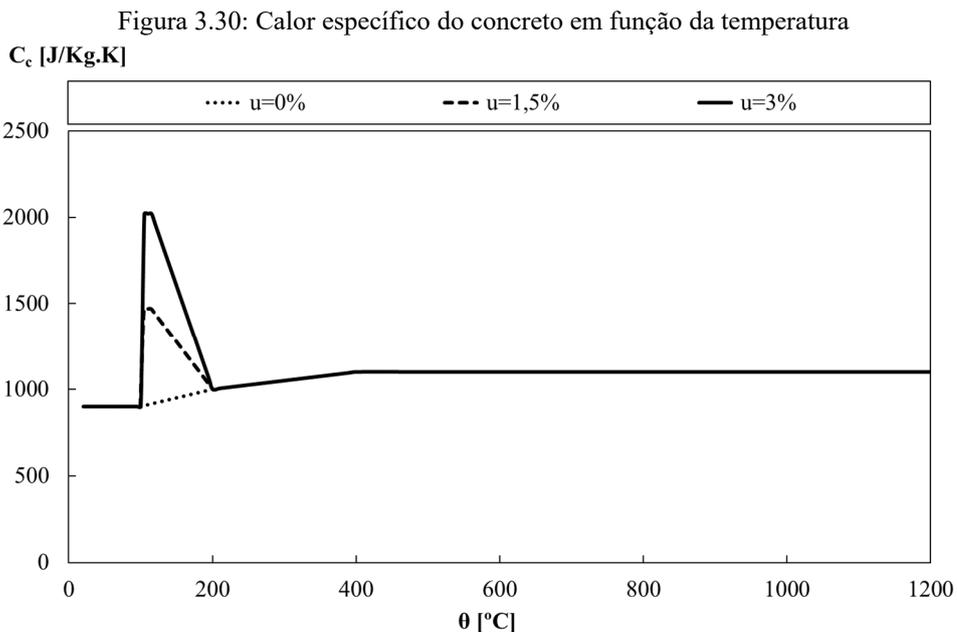
pode ser modelada por um valor constante $c_{c,peak}$, situado entre 100°C e 115°C, decrescendo linearmente entre 115°C e 200°C.

$$c_{c,top} = 900 \quad (u = 0\%) \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.26)$$

$$c_{c,top} = 1470 \quad (u = 1,5\%) \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.27)$$

$$c_{c,top} = 2020 \quad (u = 3\%) \quad [\text{J/kg.K}] \quad (3.28)$$

Conforme pode ser observado na Figura 3.30, a variação do calor específico do concreto em função da temperatura é influenciada pela quantidade de umidade, sendo as três possibilidades apresentadas na norma através do $c_{c,peak}$ no Eurocode ou $c_{c,top}$ na norma brasileira.



Fonte: Próprio autor

No presente trabalho, será considerado um teor de umidade de 3% para o concreto, esse modelo permite que seja levada em consideração a vaporização das moléculas de água presentes no material, para tornar as simulações numéricas mais realistas. Para casos em que não é apresentada a quantidade de água no interior do concreto, a norma CEN EN 1992-1-2:2004 recomenda, em favor da segurança, não utilizar valores maiores que 4% no teor de umidade.

3.4.2.5 Condutibilidade térmica do concreto

A condutividade térmica do concreto de densidade normal pode ser verificada pelas equações presentes na norma nacional ABNT NBR 15200:2012 em seu anexo C. Essas equações são iguais as recomendações propostas no CEN EN 1992-1-2:2004 em que a condutibilidade térmica do concreto λ_c deve ser tomada entre os seus limites inferior e superior em função da elevação da temperatura.

O limite inferior é determinado pela seguinte expressão:

$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_c < 1200[^\circ\text{C}]$:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0057 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad [\text{W/m.K}] \quad (3.29)$$

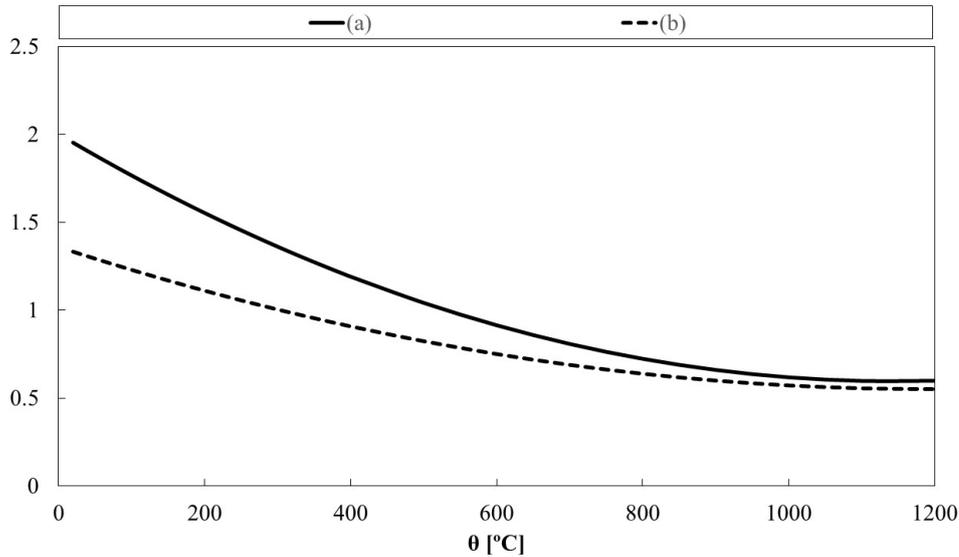
Já o limite superior é determinado pela seguinte expressão:

$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_c < 1200[^\circ\text{C}]$:

$$\lambda_c = 2,00 - 0,2451 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad [\text{W/m.K}] \quad (3.30)$$

Onde θ_c é a temperatura do concreto em $[^\circ\text{C}]$. No presente trabalho foi utilizado o limite superior (a) para a condutibilidade térmica do concreto, que corresponde ao concreto de densidade normal, como pode ser observado graficamente por meio da Figura 3.31, de acordo com a recomendação do CEN EN 1994-1-2:2005.

Figura 3.31: Condutibilidade térmica do concreto em função da temperatura
 λ_c [W/m.K]



Fonte: Próprio autor

3.4.2.6 Densidade do concreto

A densidade do concreto ρ_c varia em função da elevação da temperatura, sendo influenciada pela quantidade de água presente no concreto. Para a temperatura ambiente, o concreto possui sua densidade igual a 2300 [kg/m³], o CEN EN 1992-1-2:2004 e a norma brasileira ABNT NBR 15200:2012 definem a variação da densidade através das seguintes equações:

20 [°C] < $\theta_c \leq 115$ [°C]:

$$\rho_c = 2300 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.31)$$

115 [°C] < $\theta_c \leq 200$ [°C]:

$$\rho_c = 2300 \cdot \left[1 - 0,02 \cdot \left(\frac{\theta_c - 115}{85} \right) \right] \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.32)$$

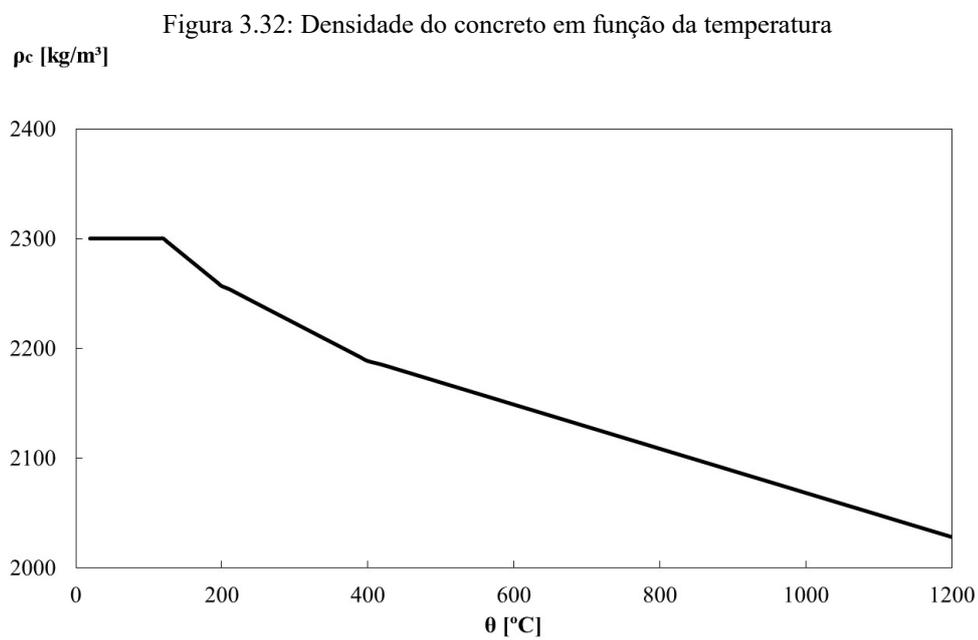
200 [°C] < $\theta_c \leq 400$ [°C]:

$$\rho_c = 2300 \cdot \left[0,98 - 0,03 \cdot \left(\frac{\theta_c - 200}{200} \right) \right] \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.33)$$

400 [°C] < $\theta_c \leq 1200$ [°C]:

$$\rho_c = 2300 \cdot \left[0,95 - 0,07 \cdot \left(\frac{\theta_c - 400}{400} \right) \right] \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.34)$$

A densidade do concreto em função da temperatura pode ser observada por meio do gráfico representado na Figura 3.32.



Fonte: Próprio autor

Página intencionalmente deixada em branco

4. PROCEDIMENTO DE DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO E NUMÉRICO

O presente capítulo será dedicado em apresentar o método analítico de cálculo para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio, com a força axial aplicada no centro geométrico da seção transversal e a elevação de temperatura dos gases aplicada nas quatro faces dos pilares isolados, seguindo as prescrições normativas da ABNT NBR 14323:2013 Anexo B, por meio do método simplificado.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS PILARES MISTOS ESTUDADOS

Para estudar os efeitos do fogo em pilares mistos de aço e concreto parcialmente revestidos foram escolhidos perfis estruturais que atendessem as exigências mínimas da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013. Nesse sentido, a seleção dos perfis estruturais teve o intuito de contemplar um rol de elementos estruturais comercializados nacionalmente e que estejam à pronta entrega pelos fabricantes.

Vale lembrar que algumas empresas que comercializam perfis estruturais de aço fornecem, em alguns casos, perfis sob medida para atender a necessidade de cada projetista.

Para a primeira parte desse estudo, foram selecionados quarenta e dois perfis estruturais comercializados nacionalmente, sendo eles da série HP e da série W. Já para a segunda parte do estudo, apenas vinte e dois perfis estruturais foram selecionados, dez perfis estruturais brasileiros e doze perfis estruturais europeus da série HEB.

Quanto aos materiais e às propriedades mecânicas dos perfis estruturais brasileiros a Tabela 4.1 apresenta resumidamente suas características.

Tabela 4.1: Materiais e propriedades mecânicas gerais dos pilares mistos brasileiros

Material	Denominação	Parâmetros	Valores
Aço do perfil estrutural	ASTM A572 Gr.50	E_a [GPa]	200
		f_y [MPa]	345
		f_u [MPa]	450
Concreto	C20	f_{ck} [MPa]	20
		f_{cm} [MPa]	28
		f_{ctm} [MPa]	2,2
		E_{cm} [GPa]	30
Aço da armadura longitudinal	CA-50	E_s [GPa]	200
		$f_{y,k}$ [MPa]	500
		$f_{u,k}$ [MPa]	540

Fonte: Próprio autor

A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 apresentam as principais dimensões e características das seções transversais estudadas, o número de barras de reforço, seus respectivos diâmetros, cobrimentos de concreto e fatores de massividade.

Tabela 4.2: Características das seções transversais brasileiras em estudo

Perfis	$(u/A)_p$	t_w	t_f	b_c	d_c	n°	ϕ	u_1	u_2	A_s	$\frac{t_w}{t_f}$
	[m ⁻¹]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	b.r.	[mm]	[mm]	[mm]	$A_s + A_c$	
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	10,5	10,7	256,0	246,0	4	20	50	50	2,28%	0,98
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	14,4	14,4	260,0	254,0	4	20	50	50	2,27%	1,00
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	11,0	11,0	306,0	299,0	4	25	50	50	2,40%	1,00
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	13,1	13,1	308,0	303,0	4	25	50	50	2,41%	1,00
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	15,4	15,5	310,0	308,0	4	32	50	50	3,94%	0,99
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	17,4	17,4	312,0	312,0	4	32	50	50	3,94%	1,00
HP 310 x 132 (H)	12,76	18,3	18,3	313,0	314,0	4	32	50	50	3,94%	1,00
W 250 x 73,0 (H)	15,78	8,6	14,2	254,0	253,0	4	25	50	50	3,56%	0,61
W 250 x 80,0 (H)	15,66	9,4	15,6	255,0	256,0	4	25	50	50	3,56%	0,60
W 250 x 89,0 (H)	15,50	10,7	17,3	256,0	260,0	4	25	50	50	3,55%	0,62
W 250 x 101,0 (H)	15,36	11,9	19,6	257,0	264,0	4	25	50	50	3,56%	0,61
W 250 x 115,0 (H)	15,16	13,5	22,1	259,0	269,0	4	25	50	50	3,56%	0,61
W 310 x 97,0 (H)	13,05	9,9	15,4	305,0	308,0	4	32	50	50	3,93%	0,64
W 310 x 107,0 (H)	12,97	10,9	17,0	306,0	311,0	4	32	50	50	3,94%	0,64
W 310 x 117,0 (H)	12,88	11,9	18,7	307,0	314,0	4	32	50	50	3,94%	0,64
W 310 x 129,0 (H)	12,78	13,1	20,6	308,0	318,0	4	32	50	50	3,94%	0,64
W 360 x 91,0 (H)	13,54	9,5	16,4	254,0	353,0	4	32	50	50	4,11%	0,58
W 360 x 101,0 (H)	13,45	10,5	18,3	255,0	357,0	4	32	50	50	4,11%	0,57
W 360 x 110,0 (H)	13,37	11,4	19,9	256,0	360,0	4	32	50	50	4,11%	0,57
W 360 x 122,0 (H)	13,29	13,0	21,7	257,0	363,0	4	32	50	50	4,13%	0,60
W 410 x 46,1	19,25	7,0	11,2	140,0	403,0	4	20	50	50	2,48%	0,63
W 410 x 53,0	16,26	7,5	10,9	177,0	403,0	4	25	50	50	3,04%	0,69
W 410 x 60,0	16,15	7,7	12,8	178,0	407,0	4	25	50	50	3,02%	0,60
W 410 x 75,0	15,95	9,7	16,0	180,0	413,0	4	25	50	50	3,03%	0,61
W 410 x 85,0	15,85	10,9	18,2	181,0	417,0	4	25	50	50	3,03%	0,60
W 460 x 52,0	17,60	7,6	10,8	152,0	450,0	4	25	50	50	3,17%	0,70
W 460 x 68,0	17,34	9,1	15,4	154,0	459,0	4	25	50	50	3,16%	0,59
W 460 x 82,0	14,82	9,9	16,0	191,0	460,0	4	32	50	50	4,15%	0,62
W 460 x 97,0	14,65	11,4	19,0	193,0	466,0	4	32	50	50	4,14%	0,60
W 460 x 106,0	14,57	12,6	20,6	194,0	469,0	4	32	50	50	4,15%	0,61
W 530 x 66,0	15,93	8,9	11,4	165,0	525,0	4	32	50	50	4,10%	0,78
W 530 x 74,0	15,83	9,7	13,6	166,0	529,0	4	32	50	50	4,10%	0,71
W 530 x 85,0	15,79	10,3	16,5	166,0	535,0	4	32	50	50	4,12%	0,62
W 530 x 92,0	13,32	10,2	15,6	209,0	533,0	4	32	50	50	3,22%	0,65
W 530 x 101,0	13,25	10,9	17,4	210,0	537,0	4	32	50	50	3,22%	0,63
W 530 x 109,0	13,19	11,6	18,8	211,0	539,0	4	32	50	50	3,22%	0,62
W 610 x 125,0	12,00	11,9	19,6	229,0	612,0	4	40	50	50	4,04%	0,61
W 610 x 140,0	11,94	13,1	22,2	230,0	617,0	4	40	50	50	4,05%	0,59
W 610 x 155,0	9,45	12,7	19,0	324,0	611,0	4	40	50	50	2,82%	0,67
W 610 x 174,0	9,40	14,0	21,6	325,0	616,0	4	40	50	50	2,82%	0,65
W 610 x 195,0	9,33	15,4	24,4	327,0	622,0	4	40	50	50	2,81%	0,63
W 610 x 217,0	9,28	16,5	27,5	328,0	628,0	4	40	50	50	2,82%	0,60

Fonte: Próprio autor

Capítulo 4 – Procedimento de Dimensionamento Analítico e Numérico

Tabela 4.3: Características das seções transversais europeias em estudo

Perfis	$(u/A)_p$	t_w	t_f	b_c	d_c	n°	ϕ	u_1	u_2	A_s	$\frac{tw}{t_f}$
	[m ⁻¹]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	b.r.	[mm]	[mm]	[mm]	$\frac{A_s}{A_s + A_c}$	
HEB200	20,00	9,0	15,0	200	200	4	20	50	50	3,87%	0,60
HEB220	18,18	9,5	16,0	220	220	4	25	50	50	4,96%	0,59
HEB240	16,67	10,0	17,0	240	240	4	25	50	50	4,14%	0,59
HEB260	15,38	10,0	17,5	260	260	4	32	50	50	5,72%	0,57
HEB280	14,29	10,5	18,0	280	280	4	32	50	50	4,89%	0,58
HEB300	13,33	11,0	19,0	300	300	4	32	50	50	4,25%	0,58
HEB320	12,92	11,5	20,5	300	320	4	32	50	50	4,00%	0,56
HEB340	12,55	12,0	21,5	300	340	4	40	50	50	5,88%	0,56
HEB360	12,22	12,5	22,5	300	360	4	40	50	50	5,55%	0,56
HEB400	11,67	13,5	24,0	300	400	4	40	70	50	4,98%	0,56
HEB450	11,11	14,0	26,0	300	450	4	40	70	50	4,42%	0,54
HEB500	10,67	14,5	28,0	300	500	4	40	70	50	3,97%	0,52

Fonte: Próprio autor

As propriedades mecânicas utilizadas para os materiais que compõe as seções transversais dos pilares mistos europeus estão presentes na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Materiais e propriedades mecânicas gerais dos pilares mistos europeus

Material	Denominação	Parâmetros	Valores
Aço do perfil estrutural	S275	E_a [GPa]	210
		f_y [MPa]	275
		f_u [MPa]	430
Concreto	C20/25	f_{ck} [MPa]	20
		f_{cm} [MPa]	28
		f_{ctm} [MPa]	2,2
		E_{cm} [GPa]	30
Aço da armadura longitudinal	S500 NR Classe B	E_s [GPa]	210
		$f_{y,k}$ [MPa]	500
		$f_{u,k}$ [MPa]	540

Fonte: Próprio autor

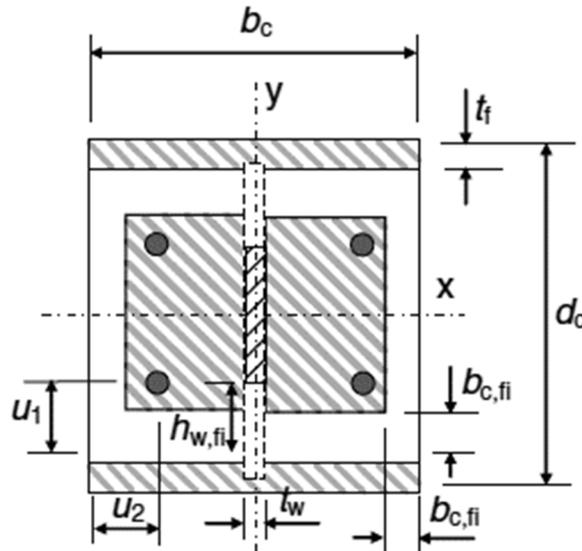
Para as análises numéricas, os materiais que compõe as seções transversais dos perfis estruturais brasileiros e europeus têm suas propriedades mecânicas alteradas pelas altas temperaturas de uma situação de incêndio da mesma forma, conforme as considerações apresentadas na seção 3.4.1.1 desse trabalho.

O fator de massividade $(u/A)_p$ da seção mista, expresso em metros a menos um [m⁻¹], é determinado conforme a Equação (4.1).

$$(u/A)_p = 2(d_c + b_c)/(d_c \cdot b_c) \quad [^\circ\text{C}] \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 apresenta a seção transversal reduzida idealizada com os devidos parâmetros para o dimensionamento dos pilares mistos em situação de incêndio.

Figura 4.1: Seção transversal idealizada com os parâmetros de dimensionamento



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

Os perfis estruturais foram selecionados tendo em vista as considerações mínimas do método tabular apresentado na Figura 3.13, assim como atender as condições exigidas pelo item B.3.2.1.1 da ABNT NBR 14323:2013, onde a seção transversal deve apresentar dimensões mínimas de largura da mesa e altura da alma, distância mínima de cobrimento do reforço e taxa mínima de armadura longitudinal.

Para cada seção transversal foi definido o valor fator de seção ou fator de massividade $(u/A)_p$, sendo a razão entre o perímetro exposto ao fogo pela área da seção transversal, de forma simplificada é um parâmetro geométrico atribuído ao perfil estrutural utilizado para sua classificação.

Outros requisitos referentes ao dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio do item B.2.3.1 da ABNT NBR 14323:2013 dizem respeito à aplicabilidade do método simplificado de cálculo, reservado apenas para classes de aços estruturais com resistência ao escoamento entre 250MPa e 350MPa. A seção transversal mista deve apresentar um percentual de armadura longitudinal entre 1% e 6%. Além de exigir que os perfis estruturais apresentem relação mínima entre a espessura da alma e a espessura da mesa não inferior a 0,5.

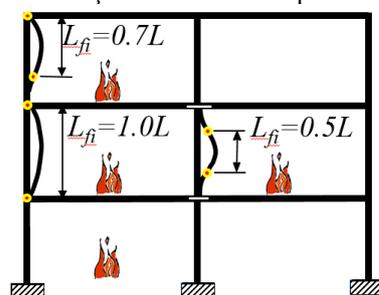
Ainda, foi realizada uma simplificação do modelo numérico utilizado para a simulação do comportamento da seção transversal em situação de incêndio, a área da seção transversal da

armadura longitudinal foi considerada quadrada, sendo as dimensões de seus lados equivalentes a raiz quadrada da área da seção circular original.

Os perfis foram testados sob influência da curva padrão de incêndio ISO 834-1:1999 para quatro diferentes classes de resistência ao fogo, em 30, 60, 90 e 120 minutos.

Para determinar a resistência à flambagem foram utilizados dois comprimentos de pilares, de 3 metros e de 5 metros, com três possíveis condições de vinculação, engastado-engastado, engastado-rotulado e rotulado-rotulado. O comprimento de flambagem referente as condições de vinculação podem ser apreciadas por meio da Figura 4.2.

Figura 4.2: Modos de deformações estruturais de pilares em situação de incêndio



Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2015)

A Figura 4.2 apresenta três modos idealizados de deformações de pilares expostos ao fogo. O modo de deformação varia em situações específicas de exposição ao fogo, a depender da localização dos pilares nos pavimentos de uma edificação e do compartimento de incêndio.

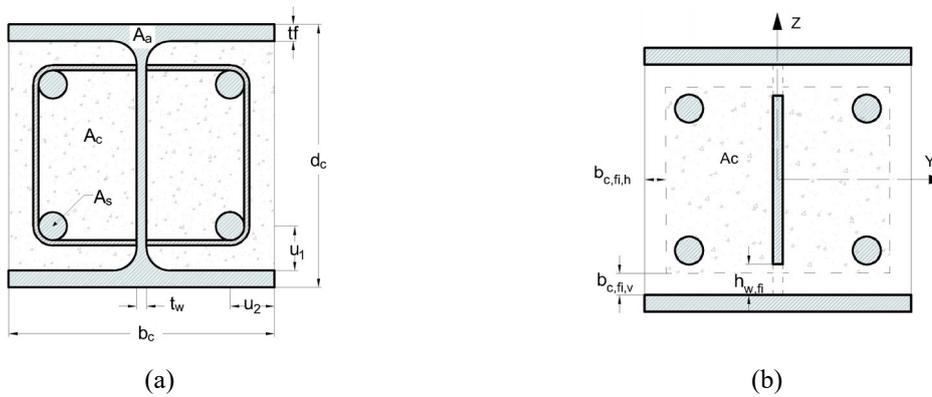
Quanto aos materiais da seção mista de aço e concreto, foram utilizados o aço estrutural ASTM A572 Gr.50, cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 3.1 da seção 3.4.1.1, o aço CA-50 para as armaduras longitudinais, cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 3.4 da seção 3.4.1.2 e o concreto C20 para o preenchimento dos perfis, cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 3.7 da seção 3.4.1.3. A escolha deliberada dessas características dos materiais é justificada pela ampla utilização dessas mesmas especificações em projetos de edificações comerciais e residenciais, além de atender aos requisitos dos aspectos normativos exigidos pela ABNT NBR 14323:2013 e ABNT NBR 8800:2008.

4.2 MÉTODO ANALÍTICO DO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta o procedimento geral do método analítico para que seja determinada a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente

revestidos em situação de incêndio. É também apresentado o procedimento para obtenção da força axial de plastificação de cálculo em situação de incêndio, além da força de flambagem elástica em situação de incêndio. O método simplificado de cálculo, originalmente desenvolvido por Jungbluth (1982) é utilizado para determinar a capacidade resistente dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. O método consiste na separação da seção transversal em quatro componentes, sendo elas as mesas e a alma do perfil metálico, a armadura longitudinal e o concreto contido entre as mesas, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3: Seção transversal do total e reduzida para o dimensionamento em situação de incêndio



Fonte: Próprio autor

Para obter a força axial resistente de cálculo de pilares mistos em situação de incêndio, $N_{fi,Rd}$, decorre da obtenção da força axial de plastificação de cálculo em situação de incêndio $N_{fi,pl,Rd}$. É necessário também obter a força de flambagem elástica em situação de incêndio, $N_{fi,e}$ que depende do valor da rigidez efetiva da seção transversal em situação de incêndio $(EI)_{fi,ef}$. As formulações de obtenção das resistências das quatro componentes estão apresentadas de forma mais criteriosa e detalhada nas seções posteriores, utilizadas para a determinação de resistência total da seção transversal do pilar misto parcialmente revestido.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} N_{fi,pl,Rd} \quad [N] \quad (4.2)$$

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad [N] \quad (4.3)$$

$$\chi_{fi} = 1/\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2} \quad (4.4)$$

$$\varphi_{0,fi} = 0,5[1 + \alpha(\lambda_{0,fi} - 0,2) + \lambda_{0,fi}] \quad (4.5)$$

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{N_{fi,pl,Rd}/N_{fi,e}} \quad (4.6)$$

$$N_{fi,e} = \pi^2 (EI)_{fi,ef} / L_{e,fi}^2 \quad [N] \quad (4.7)$$

$$(EI)_{fi,ef} = \varphi_{f,\theta} (EI)_{fi,ef,f} + \varphi_{w,\theta} (EI)_{fi,ef,w} + \varphi_{c,\theta} (EI)_{fi,ef,c} + \varphi_{s,\theta} (EI)_{fi,ef,s} \quad [N \cdot mm^2] \quad (4.8)$$

Onde $L_{e,fi}$ é o comprimento de flambagem do pilar, sendo dependente das condições de vinculação. Para os tópicos seguintes, os coeficientes de segurança parciais dos materiais $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,fi,s}$ e $\gamma_{M,fi,c}$, foram tomados com valor igual a 1,0 e α deve ser tomado com valor de 0,49. A Tabela 4.5 apresenta os coeficientes de ponderação utilizados na Equação (4.8).

Tabela 4.5: Coeficientes de redução para a rigidez à flambagem

Resistência ao incêndio-padrão	$\Psi_{f,0}$	$\Psi_{w,0}$	$\Psi_{c,0}$	$\Psi_{s,0}$
TRRF 30	1	1	0,8	1
TRRF 60	0,9	1	0,8	0,9
TRRF 90	0,8	1	0,8	0,8
TRRF 120	1	1	0,8	1

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

As seções transversais em estudo, bem como todas as suas características mecânicas e térmicas, foram apresentadas nos capítulos anteriores. As classes de resistência dos materiais e suas propriedades térmicas foram utilizadas como parâmetros para o cálculo da capacidade resistente dos pilares mistos em situação de incêndio.

4.2.1 Mesas do perfil de aço

Quando o pilar misto isolado é envolto pelo fogo nos quatro lados, atribuindo a elevação de temperatura dos gases segundo a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999, ambas as mesas apresentam o mesmo comportamento de elevação de temperatura. A temperatura média das mesas, para um determinado período de exposição ao incêndio-padrão, poderá ser calculada pela Equação (4.9).

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_t \cdot (u/A)_p \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.9)$$

Através da temperatura média é possível então calcular os coeficientes de redução para as propriedades mecânicas do aço reduzidas pela elevação de temperatura, que afeta a rigidez efetiva da seção e a resistência plástica de cálculo à compressão axial. Os principais parâmetros e coeficientes são definidos pela Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil

Resistência ao incêndio-padrão	$\theta_{0,t}$ [°C]	k_t [m.°C]
TRRF 30	550	9,65
TRRF 60	680	9,55
TRRF 90	805	6,15
TRRF 120	900	4,65

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

A temperatura média nas mesas do perfil foi determinada para as seções em estudo, apresentado conforme a Tabela A.1. A temperatura média também permite o cálculo dos fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, apresentados pela Tabela A.2 e pela Tabela A.3, utilizados para minorar as propriedades mecânicas das mesas do perfil estrutural de aço.

A parcela de contribuição da rigidez efetiva e a força axial de plastificação de cálculo das duas mesas à compressão axial dependem da tensão de escoamento do aço do perfil e do módulo de elasticidade do perfil estrutural em situação de incêndio.

Sendo conhecidos os coeficientes de redução analíticos $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, obtidos por interpolação linear dos valores da temperatura presentes na Tabela 3.3, é possível determinar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade efetivos devido às temperaturas elevadas observadas nas mesas da seção transversal, através das Equações (4.10) e (4.11).

$$f_{y,\theta,f} = f_y \cdot k_{y,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.10)$$

$$E_{\theta,f} = E_a \cdot k_{E,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.11)$$

Por fim, a força axial de plastificação e a rigidez efetiva das mesas da seção transversal podem ser determinadas através das Equações (4.12) e (4.13). Os resultados dessas duas expressões, para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas A.4 e A.5 do Apêndice A desse trabalho, respectivamente.

$$N_{fi,pl,Rd,f} = \frac{2 \cdot (b_c \cdot t_f \cdot f_{y,\theta,f})}{\gamma_{M,fi,a}} \quad [\text{N}] \quad (4.12)$$

$$(EI)_{fi,ef,f} = \frac{E_{\theta,f} \cdot t_f \cdot b_c^3}{6} \quad [\text{N.mm}^2] \quad (4.13)$$

4.2.2 Alma do perfil de aço

Uma parte da alma do perfil de aço, a partir da face interna das duas mesas, deve ser desprezada. A altura da alma da seção transversal mista é afetada pelo fogo devido a condução do fluxo de calor através de ambos os materiais, aço e concreto. O método simplificado de cálculo determina que parte da área da alma do perfil de aço deve ser negligenciada e utilizados coeficientes tabelados para determinar a resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio.

Portanto, a redução da altura da alma $h_{w,fi}$, quando medida a partir da face interna das duas mesas pode ser calculada pela Equação (4.14). Os valores H_t para cada classe de resistência ao fogo estão apresentados na Tabela 4.7. O valor de $h_{w,fi}$ também depende da altura total da alma do perfil d_c e da espessura da mesa t_f .

$$h_{w,fi} = 0,5 \cdot (d_c - 2t_f) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - 0,16 \cdot (H_t/d_c)} \right] \quad [\text{mm}] \quad (4.14)$$

Tabela 4.7: Parâmetros para a redução da altura da alma

Resistência ao incêndio-padrão	H_t [mm]
TRRF 30	350
TRRF 60	770
TRRF 90	1100
TRRF 120	1250

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

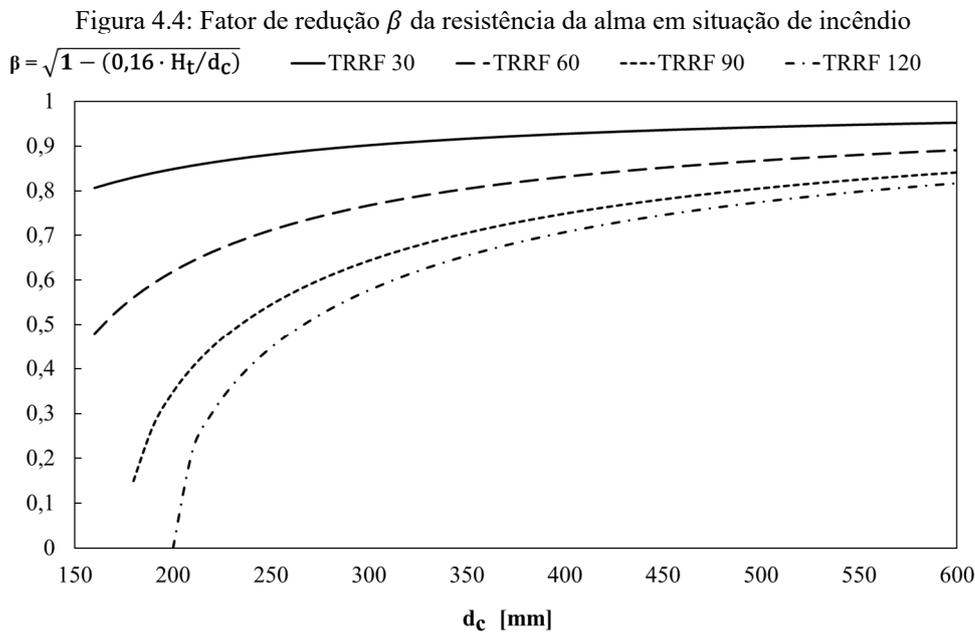
A altura da alma a ser desprezada do perfil de aço $h_{w,fi}$, interfere diretamente na resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio. A resistência ao escoamento da alma da seção transversal em situação de incêndio deve ser calculada através da Equação (4.15).

$$f_{y,\theta,w} = f_y \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,16 \cdot H_t}{d_c} \right)} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.15)$$

O fator que multiplica a tensão de escoamento f_y pode ser considerado um coeficiente de redução, representado pelo fator β . A formulação para sua determinação está apresentada na Equação (4.16).

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{0,16 \cdot H_t}{d_c} \right)} \quad [\text{mm/mm}] \quad (4.16)$$

A Figura 4.4 apresenta esse fator de redução da resistência ao escoamento em função da altura residual da seção transversal para os diferentes níveis dos tempos requeridos de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

Por sua vez, a resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio interfere diretamente no cálculo da rigidez efetiva da parcela de contribuição da alma.

O módulo de elasticidade, apesar de sofrer reduções a partir dos 100°C conforme Tabela 3.3, aqui deve ser considerado em temperatura ambiente. A força axial de plastificação de cálculo é afetada em virtude da redução da geometria da alma e devido ao coeficiente de redução para a tensão de escoamento.

Na Tabela A.6 são apresentados os resultados da redução da altura da alma, $h_{w,fi}$, para as seções estudadas. A resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio é apresentada na Tabela A.7 do Apêndice A do presente trabalho.

A força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio devem ser determinadas pelas Equações (4.17) e (4.18). Os resultados

dessas duas expressões, para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas A.8 e A.9, respectivamente, do Apêndice A do presente trabalho.

$$N_{fi,pl,Rd,w} = f_{y,\theta,w} \cdot \left[\frac{t_w \cdot (h - 2t_f - 2h_{w,fi})}{\gamma_{M,fi,a}} \right] \quad [N] \quad (4.17)$$

$$(EI)_{fi,ef,w} = \left[\frac{E \cdot (d_c - 2t_f - 2h_{w,fi}) \cdot t_w^3}{12} \right] \quad [N \cdot mm^2] \quad (4.18)$$

4.2.3 Concreto entre as mesas e a alma do perfil de aço

A ABNT NBR 14323:2013 recomenda que uma camada externa do concreto deve ser desprezada no cálculo da resistência do concreto, situado entre as mesas e a alma do perfil de aço. A camada de concreto a ser desprezada, definida através do parâmetro $b_{c,fi}$, devendo esse ser calculado sem a distinção das duas direções principais. O valor ou expressão para a camada externa de concreto a ser desprezada estão presentes na Tabela 4.8, onde camada externa depende do fator de seção, para os casos de maiores classificações de resistência ao fogo.

Tabela 4.8: Espessura da camada externa de concreto a ser desprezada

Resistência ao incêndio-padrão	$b_{c,fi}$ [mm]
TRRF 30	4,0
TRRF 60	15,0
TRRF 90	$0,5 \cdot (u/A)_p + 22,5$
TRRF 120	$2,0 \cdot (u/A)_p + 24,0$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

A temperatura média no concreto $\theta_{c,t}$ também deve ser calculada, dependendo do fator de massividade e levando em consideração a classe de resistência ao fogo, conforme a Tabela 4.9. A interpolação linear pode ser utilizada para estimar os valores intermediários dos definidos na tabela.

Tabela 4.9: Temperatura média na seção resistente de concreto

TRRF 30		TRRF 60		TRRF 90		TRRF 120	
$(u/A)_p$ [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]						
4	136	4	214	4	256	4	265
23	300	9	300	6	300	5	300
46	400	21	400	13	400	9	400
-	-	50	600	33	600	23	600
-	-	-	-	54	800	38	800
-	-	-	-	-	-	41	900
-	-	-	-	-	-	43	1000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

A ABNT NBR 14323:2013 recomenda que a resistência característica à compressão do concreto $f_{ck,\theta}$ deve ser obtido conforme recomendações da ABNT NBR 15200:2012 e o módulo de elasticidade do concreto, $E_{c1,\theta}$ conforme a Equação (4.19).

$$E_{c1,\theta} = \frac{f_{ck,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.19)$$

O cálculo da temperatura média do concreto permite a determinação do fator de redução para a resistência à compressão do concreto $k_{c,\theta}$, conforme a Tabela 3.9, assim como o cálculo do módulo de elasticidade do concreto. Ambos os parâmetros são necessários para o cálculo da rigidez efetiva e da força axial de plastificação da parcela de contribuição de concreto para a resistência total da seção transversal.

O parâmetro de redução da espessura da camada externa de concreto $b_{c,fi}$, apresentado na Tabela A.10 no Anexo A, é um importante parâmetro utilizado para estimar tanto a força axial de plastificação de cálculo do concreto, quanto a rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio.

A temperatura média da área residual de concreto está apresentada na Tabela A.11, para as seções transversais de interesse. Foi ainda necessário estimar a resistência característica à compressão da seção em temperaturas elevadas $f_{ck,\theta}$, apresentado na Tabela A.12 e o módulo de elasticidade do concreto $E_{c1,\theta}$, apresentado na Tabela A.13.

Depois de obtidos os resultados de $f_{ck,\theta}$ e de $E_{c1,\theta}$, é possível determinar a força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio, por meio das Equações (4.20) e (4.21). Os valores dos resultados dessas duas expressões, para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas A.14 e A.15 no Apêndice A desse trabalho, respectivamente.

$$N_{fi,pl,Rd,c} = \frac{0,86 \cdot \left\{ \left[(d_c - 2t_f - 2b_{c,fi}) \cdot (b_c - t_w - 2b_{c,fi}) \right] - A_s \right\} \cdot f_{ck,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}} \quad [\text{N}] \quad (4.20)$$

$$(EI)_{fi,ef,c} = E_{c1,\theta} \cdot \left\{ \left[\frac{(d_c - 2t_f - 2b_{c,fi}) \cdot \left((b_c - 2b_{c,fi})^3 - t_w^3 \right)}{12} \right] - I_s \right\} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^2] \quad (4.21)$$

Onde A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal e I_s é a inércia das barras, a depender de onde se encontra posicionado o valor de $b_{c,fi}$.

Os resultados para a resistência plástica à compressão axial e para a rigidez de flexão da área de concreto residual dos perfis, sendo observadas as formulações das Equações (4.20) e (4.21) podem ser apreciadas através das Tabelas A.14 e A.15.

4.2.4 Armadura longitudinal

O fator de redução $k_{ys,\theta}$ para a tensão de escoamento e o fator de redução para o módulo de elasticidade $k_{Es,\theta}$ para as barras de aço da armadura longitudinal são determinados em função da classe de resistência ao fogo e da média geométrica u_{sm} das distâncias do eixo da armadura à face interna da mesa e do eixo da armadura à superfície externa do concreto.

O valor médio da geometria u_{sm} é obtido considerando as distâncias de cobrimento u_1 e u_2 através do conjunto de Equações (4.22) até (4.24), em milímetros, estabelecida respectivamente nas direções y e z da seção transversal. A interpolação linear pode ser estabelecida para determinar os fatores apropriados quando não apresentados diretamente pela Tabela A.17 e pela Tabela A.18.

O valor da média geométrica u_{sm} pode ser calculado de acordo com as Equações (4.22), (4.23) e (4.24).

$$u_{sm} = \sqrt{u_2 + (u_2 + 10)}, \text{ se } (u_1 - u_2) > 10 \text{ [mm]} \quad [\text{mm}] \quad (4.22)$$

$$u_{sm} = \sqrt{u_1 + (u_1 + 10)}, \text{ se } (u_2 - u_1) > 10 \text{ [mm]} \quad [\text{mm}] \quad (4.23)$$

$$u_{sm} = \sqrt{u_1 \cdot u_2}, \text{ se } |u_2 - u_1| \leq 10 \text{ [mm]} \quad [\text{mm}] \quad (4.24)$$

Tabela 4.10: Fator de redução $k_{ys,\theta}$ para a tensão de escoamento do aço do reforço

Resistência ao incêndio-padrão	u_{sm} [mm]	40	45	50	55	60
TRRF 30		1	1	1	1	1
TRRF 60		0,789	0,883	0,976	1	1
TRRF 90		0,314	0,434	0,572	0,696	0,822
TRRF 120		0,170	0,223	0,288	0,367	0,436

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

Tabela 4.11: Fatores de redução $k_{Es,\theta}$ para o módulo de elasticidade do aço do reforço

Resistência ao incêndio-padrão	u_{sm} [mm]	40	45	50	55	60
TRRF 30		0,830	0,865	0,888	0,914	0,935
TRRF 60		0,604	0,647	0,689	0,729	0,763
TRRF 90		0,193	0,283	0,406	0,522	0,619
TRRF 120		0,110	0,128	0,173	0,233	0,285

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323:2013

Levando em consideração o cálculo de u_{sm} e os coeficientes da Tabela 4.10 e da Tabela 4.11, é possível obter os coeficientes dos fatores de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$, para as seções em estudo. Para valores intermediários da média geométrica das distâncias é possível e necessário realizar a interpolação linear para que sejam obtidos os coeficientes dos fatores de redução.

Os valores dos coeficientes de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$ estão apresentados na Tabela A.16 e na Tabela A.17, respectivamente.

Por meio dos coeficientes de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$, é possível estimar a temperatura média da armadura longitudinal, para isso é necessário relacionar os valores da Tabela A.16 e da Tabela A.17, com os valores da Tabela 3.6, interpolando os coeficientes para determinar a temperatura correspondente.

Os valores das temperaturas médias das armaduras não são requeridos para o cálculo da contribuição da resistência da armadura longitudinal. A Tabela A.18 no Apêndice A desse trabalho apresenta a temperatura média da armadura longitudinal.

Após o cálculo dos coeficientes $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$ é possível estimar os valores da força axial de plastificação de cálculo da rigidez efetiva das barras da armadura em situação de incêndio, por meio das Equações (4.25) e (4.26). Os resultados dessas duas expressões, para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas A.19 e A.20 do Apêndice A desse trabalho, respectivamente. O momento de segunda ordem dos reforços deve aplicar o teorema dos eixos paralelos.

$$N_{fi,pl,Rd,s} = \frac{A_s \cdot k_{ys,\theta} \cdot f_{sy}}{\gamma_{M,fi,s}} \quad [N] \quad (4.25)$$

$$(EI)_{fi,ef,s} = k_{Es,\theta} \cdot E_s \cdot I_s \quad [N \cdot mm^2] \quad (4.26)$$

As Tabelas A.19 e A.20 apresentam os valores da força axial de plastificação de cálculo e os valores da rigidez efetiva das barras da armadura longitudinal em situação de incêndio, respectivamente.

4.2.5 Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio

Os valores dos resultados do método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 para a obtenção da força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio estão apresentados no Apêndice A.

4.3 MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Os métodos avançados de cálculo são um meio eficaz de avaliar o desempenho estrutural e térmico de elementos construtivos em situações adversas. Os onerosos ensaios experimentais podem ser utilizados para validar e calibrar os modelos numéricos e assim permitir que os modelos computacionais sejam aplicados à solução de problemas complexos, com inúmeras variáveis. Simulações numéricas de modelos de elementos estruturais parametrizados podem ser avaliadas com alto grau de confiabilidade, tanto em temperatura ambiente, quanto em temperaturas elevadas, dependendo apenas do poder de processamento de um computador.

Para o método avançado de cálculo foi utilizada a ferramenta computacional ANSYS, que se baseia no Método dos Elementos Finitos para uma modelagem numérica das malhas bidimensionais e tridimensionais dos perfis estruturais dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Os resultados numéricos da elevação de temperatura do elemento estrutural são obtidos por meio de um processo incremental e interativo, para solução de equações diferenciais não lineares, que determinam o comportamento térmico das regiões que representam o perfil estrutural, levando em consideração as propriedades térmicas particulares dos materiais que o compõe.

Em um primeiro momento os modelos numéricos bidimensionais foram desenvolvidos com o intuito de determinar o campo de temperaturas nas 42 seções transversais selecionadas, para cada tempo requerido de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos. Em posse desses resultados, buscou-se uma nova formulação para determinar a temperatura média em cada uma das quatro componentes da seção transversal, como forma de aperfeiçoar as recomendações normativas da ABNT NBR 14323:2013, para o dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio.

Como já mencionado, a elaboração dos modelos tridimensionais pertencem a uma segunda fase desse trabalho e possuem quatro etapas distintas.

Na segunda fase, a primeira etapa consistiu na solução térmica baseada na análise não linear e incremental para buscar o campo de temperaturas dos 22 pilares mistos em situação de incêndio, 10 seções transversais brasileiras e 12 seções transversais europeias, para cada tempo requerido de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos. Posteriormente as temperaturas nodais foram, posteriormente, utilizadas como parâmetros iniciais das condições de contorno nas análises mecânicas.

A segunda etapa consistiu na solução mecânica linear para buscar a força de flambagem elástica crítica em situação de incêndio considerando o acoplamento termoestrutural para cada um dos 22 perfis selecionados, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, para cada uma das três condições de vinculação e para os dois comprimentos de pilares, de 3 metros e de 5 metros.

A terceira etapa consistiu na solução mecânica não linear e incremental para buscar a força axial de plastificação em situação de incêndio, considerando o acoplamento termoestrutural para cada um dos 22 perfis selecionados, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

E quarta etapa consistiu na solução mecânica não linear e incremental para buscar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, considerando o acoplamento termoestrutural para cada um dos 22 perfis selecionados, nos quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, para cada uma das três condições de vinculação e para os dois comprimentos de pilares, de 3 metros e de 5 metros.

4.3.1 Apresentação do Software

A empresa ANSYS Inc., fundada em 1970, conta com diversos profissionais da área de engenharia de análise de elementos finitos, fluidodinâmica computacional e eletrônica, além de

ser uma empresa reconhecida pelo prestígio e inovação de seus produtos. É também uma das multinacionais com maior competitividade internacional no âmbito de *softwares* de simulações numéricas de engenharia, auxiliando na resolução de projetos de alta complexidade nas áreas de engenharia de produtos, indústria automotiva, engenharia civil e mecânica.

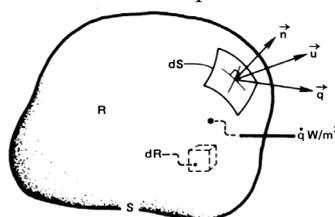
As simulações numéricas no presente estudo têm como um dos objetivos prever o comportamento térmico e estrutural dos elementos modelados em situação real de serviço.

O *software* utilizado do ANSYS foi utilizado na versão *Mechanical APDL v.19.0*, com interface gráfica, utiliza o Método de Elementos Finitos para resolver problemas envolvendo modelos lineares e não lineares estruturais, além de análises de modelagens térmicas em regime transiente ou estático.

4.3.2 Análise térmica não linear do modelo

Para o método avançado de cálculo, primeiramente buscou-se determinar a distribuição de temperaturas na seção transversal do elemento estrutural em diferentes tempos de exposição ao fogo. Os modelos de cálculo levam em consideração as propriedades térmicas dos materiais para cada incremento de tempo. A análise térmica não proporciona uma resposta da capacidade resistente da estrutura, entretanto é fundamental conhecer o campo de temperaturas do elemento para uma posterior análise estática estrutural e avaliação de seu comportamento em situação de incêndio.

Figura 4.5: Volume de controle: campo de fluxo de calor e de fluido



Fonte: Adaptado de Lienhard IV e Lienhard V (2017)

Para determinar o campo de temperaturas de um corpo exposto ao fogo, devem ser conhecidos os mecanismos de transferência de calor envolvidos. O Método dos Elementos Finitos requer a solução da Equação (4.27) no domínio da seção transversal, (Ω) e Equação (4.28) no limite ($\partial\Omega$).

$$\nabla(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) + \dot{q} = \rho_{(T)} \cdot c_{(T)} \cdot \partial T / \partial t \quad (\Omega) \quad (4.27)$$

$$\nabla T \equiv \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) \cdot \vec{n} = \alpha_c (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [T_g^4 - T_m^4] \quad (\partial\Omega) \quad (4.28)$$

Nessas equações, $T = T(x, y, z, t)$ onde t é o tempo e x, y e z são pontos de coordenadas de um ponto de interesse; T_m representa a temperatura do material em [K]; $\rho_{(T)}$ é a massa específica em função da temperatura; $c_{(T)}$ representa o calor específico em função da temperatura; $\lambda_{(T)}$ é a condutividade térmica em função da temperatura; α_c especifica o coeficiente de convecção; T_g representa a temperatura do gás do compartimento de incêndio em [K], utilizando o incêndio-padrão ISO 834-1:1999 em torno da seção transversal, com os quatro lados expostos; Φ representa o fator de vista; o vetor unitário e normal à superfície \vec{n} ; ε_m representa a emissividade de cada material; ε_f especifica a emissividade do fogo; e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann.

A análise térmica transiente não linear foi definida com um passo de tempo de integração de 60s, onde, não havendo a convergência, o passo pode diminuir para 1s e aumentar até 60s. O critério de convergência usa um valor de tolerância do fluxo de calor, menor que 0,1% com um valor de referência mínimo de 1×10^{-6} [W/m²].

As condições de contorno foram aplicadas de acordo com o as formulações da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, na superfície externa da seção transversal, sendo elas as condições de radiação do fogo, $\varepsilon_f = 1,0$ e a temperatura do gás, T_g recebendo o valor conforme evolução da temperatura segundo a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999 em [°C].

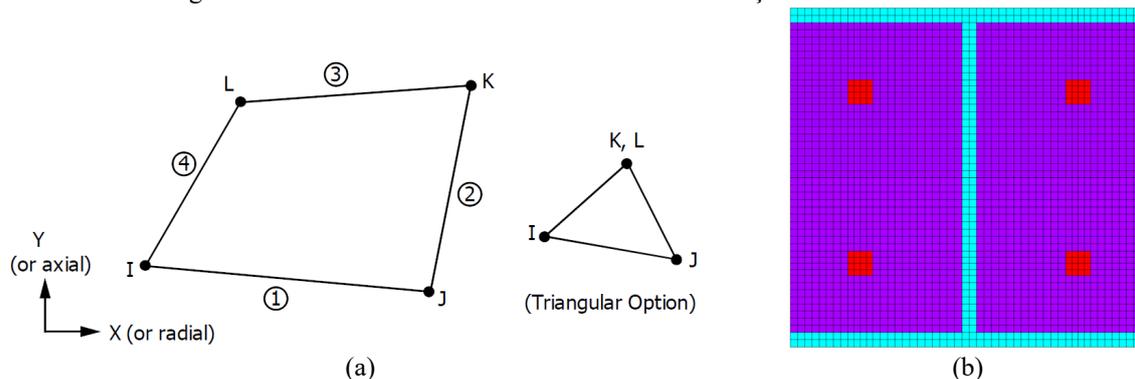
A condição de convecção $\alpha = 25$ [W/m².K] foi definida nos nós da face externa que representa a seção transversal. A condição inicial de 20°C foi definida para todos os nós da malha de elementos finitos. As propriedades dos materiais foram definidas de acordo com as normas brasileiras e europeias pertinentes de cada material e previamente definidas nos capítulos anteriores desse trabalho.

4.3.2.1 Elemento Finito utilizado no modelo bidimensional e simulação numérica

O modelo bidimensional utiliza o elemento “PLANE55”, com quatro nós e um grau de liberdade por nó, permitindo realizar uma análise térmica transiente não linear. Esse elemento possui funções de interpolação lineares e esquemas de integração de Gauss completos.

Apenas esse elemento será aplicado para resolver a análise térmica e está definido na base de dados do *software* ANSYS. A seção transversal é modelada de forma a representar a seção transversal de um pilar misto parcialmente revestido com um nível de refinamento da malha elevado, conforme a Figura 4.6.

Figura 4.6: Geometria do elemento “PLANE55” e a seção transversal modelada



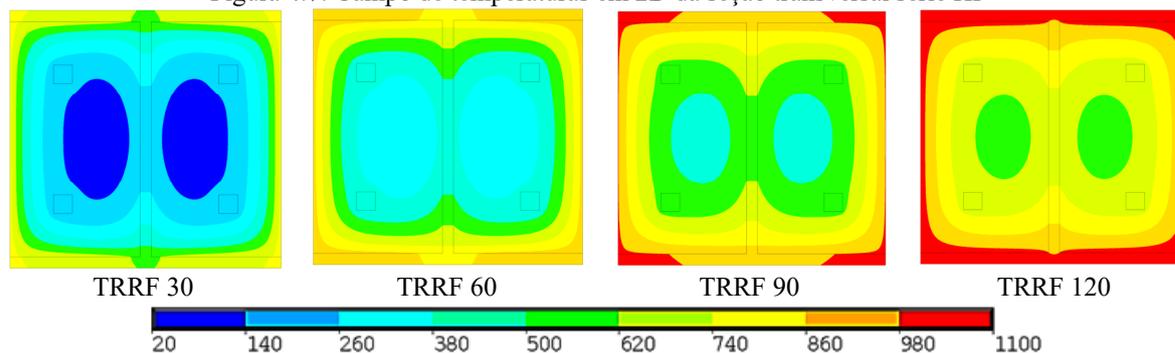
Fonte: Adaptado de ANSYS (2019)

O modelo foi criado geometricamente utilizando a interface gráfica do ANSYS, com *Keypoints*, *Lines*, *Areas* e *Mesh*.

O campo de temperaturas foi determinado pelo tempo total de 7200 segundos, que representa uma duração máxima de incêndio de 2 horas ou TRRF 120.

A Figura 4.7 apresenta o campo de temperaturas obtido por meio da análise térmica da seção transversal HP 250x62,0.

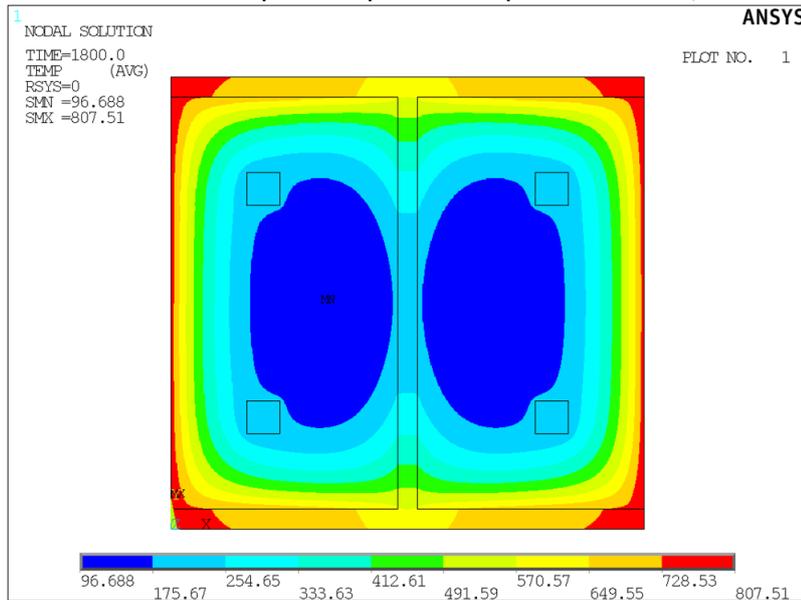
Figura 4.7: Campo de temperaturas em 2D da seção transversal série HP



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.8 apresenta de forma mais detalhada o campo de temperaturas da análise térmica realizada na seção transversal HP 250x62,0 após um tempo de 30 minutos de exposição a elevação de temperatura segundo a curva ISO 834-1:1999.

Figura 4.8: Detalhes do campo de temperaturas do perfil HP 250x62,0 em TRRF 30



Fonte: Próprio autor

Os resultados das análises térmicas serviram de base para estabelecer critérios mais precisos nas formulações da proposta de aprimoramento das recomendações normativas de dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, apresentada nos próximos capítulos.

4.3.3 Teste de convergência da malha do modelo bidimensional

Para conhecer a malha que melhor representa a coluna mista parcialmente revestida, foi realizado o teste de convergência da solução com diferentes divisões dos elementos.

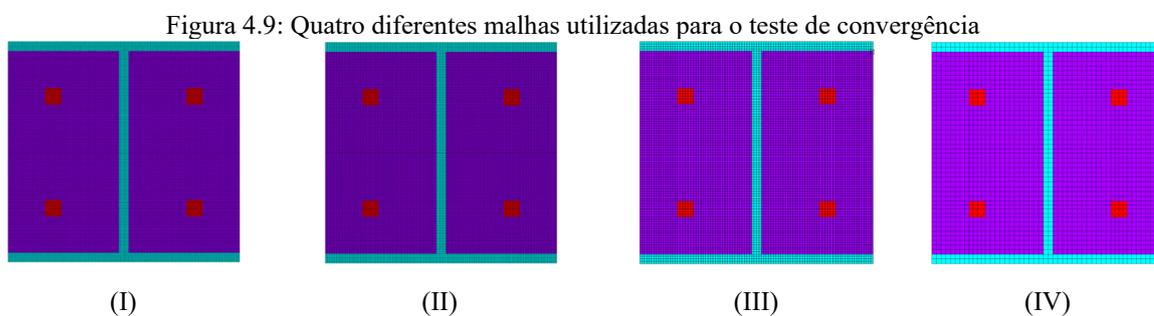
A malha de elementos finitos foi modelada de forma retangular, tendo os elementos de todas as seções transversais em estudo com aproximadamente 1,15mm em cada uma de suas dimensões. O grande número de elementos da malha justifica-se pela necessidade de medir precisamente a área residual do concreto, levando em consideração a isotérmica de 500°C, obtendo boa resolução das respectivas distâncias horizontais e verticais da área residual até a face da mesa da seção transversal. As barras da armadura longitudinal foram modeladas com uma geometria quadrada, com aproximadamente a mesma área de seção transversal, sendo seus lados equivalentes aos da seção circular original. Como já mencionado, o modelo considera o contato perfeito entre as quatro componentes.

No intuito de observar a proporcionalidade das divisões dos segmentos da malha, conforme as seções transversais foram se tornando mais robustas, almejou-se alcançar um

equilíbrio no tempo necessário para realizar cada simulação numérica e na capacidade computacional de armazenamento dos dados de cada simulação.

A quantidade de divisões aplicada na malha da seção transversal foi estabelecida na simulação computacional do modelo bidimensional, onde o perfil HP 250x62,0 foi testado com diferentes níveis de refinamento da malha. A evolução da temperatura em pontos específicos da seção transversal foi avaliada comparando o erro relativo das temperaturas em cada nível de refinamento, ao longo dos 120 minutos de exposição da seção transversal ao incêndio-padrão.

A Figura 4.9 apresenta quatro níveis de refinamento da malha bidimensional para a análise de convergência do modelo numérico.



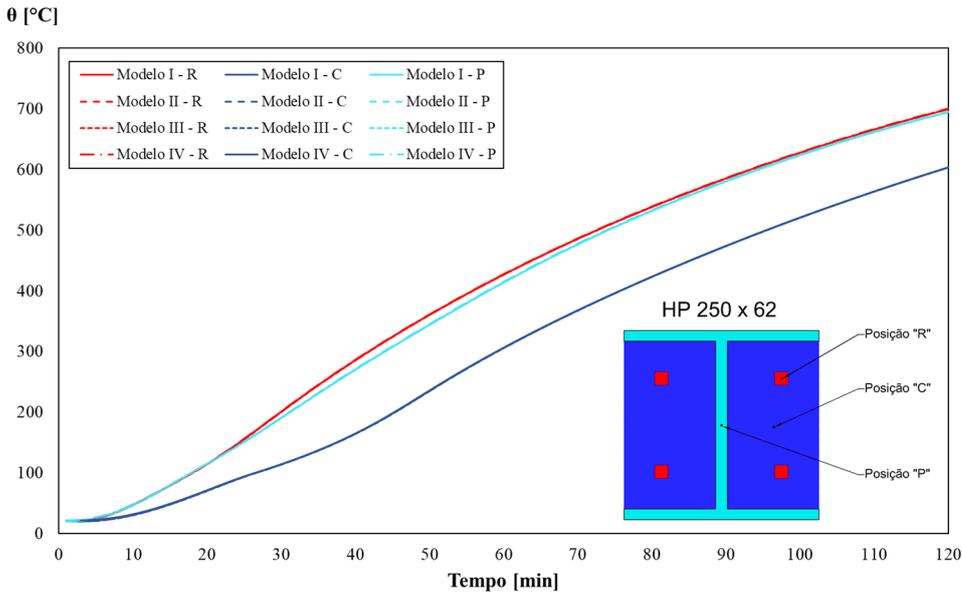
Fonte: Próprio autor

A primeira malha (I), apresentou divisões dos elementos com dimensão máxima de 0,5mm, contendo exatamente 253835 nós, e gerou 11,2GB em dados da simulação. A segunda malha (II), apresentou divisões dos elementos com dimensão máxima de 1,0mm, contendo exatamente 64492 nós, e gerou 2,91GB em dados da simulação. A terceira malha (III), apresentou divisões dos elementos com dimensão máxima de 2,5mm, contendo exatamente 9022 nós, e gerou 448MB em dados da simulação. A última malha (IV), apresentou divisões dos elementos com dimensão máxima de 5mm, apresentou exatamente 2500 nós, e gerou 135MB em dados da simulação.

O tempo de execução das simulações (II), (III) e (IV) foram significativamente pequenos quando comparados com a simulação numérica (I), com cerca de 20 minutos de tempo de execução.

A Figura 4.10 apresenta um gráfico contendo a evolução da temperatura em determinados pontos da seção transversal.

Figura 4.10: Evolução da temperatura utilizado para o teste de convergência das malhas



Fonte: Próprio autor

Os resultados coletados apresentam grande similaridade, apesar da grande diferença da quantidade de dados gerados e armazenados em cada simulação numérica. A Tabela 4.12 apresenta uma comparação dos resultados dos valores nominais das temperaturas, coletadas para algumas simulações numéricas, em posições específicas da seção transversal.

Tabela 4.12: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal

Tempo [min]	Modelo	Posição	θ [°C]	E.R.	Tempo [min]	Modelo	Posição	θ [°C]	E.R.
30	Modelo I	R	201,32	Ref.	60	Modelo I	R	427,25	Ref.
	Modelo II	R	200,81	0,25%		Modelo II	R	426,92	0,08%
	Modelo III	R	200,70	0,31%		Modelo III	R	426,95	0,07%
	Modelo IV	R	200,96	0,18%		Modelo IV	R	427,12	0,03%
	Modelo I	C	114,23	Ref.		Modelo I	C	305,84	Ref.
	Modelo II	C	113,99	0,21%		Modelo II	C	305,53	0,10%
	Modelo III	C	113,92	0,27%		Modelo III	C	305,50	0,11%
	Modelo IV	C	113,85	0,33%		Modelo IV	C	305,75	0,03%
	Modelo I	P	191,13	Ref.		Modelo I	P	413,79	Ref.
	Modelo II	P	190,83	0,16%		Modelo II	P	413,60	0,05%
	Modelo III	P	190,72	0,21%		Modelo III	P	413,84	-0,01%
	Modelo IV	P	190,90	0,12%		Modelo IV	P	414,77	-0,24%
90	Modelo I	R	585,51	Ref.	120	Modelo I	R	699,72	Ref.
	Modelo II	R	585,30	0,04%		Modelo II	R	699,64	0,01%
	Modelo III	R	585,39	0,02%		Modelo III	R	699,75	0,00%
	Modelo IV	R	585,58	-0,01%		Modelo IV	R	699,97	-0,04%
	Modelo I	C	473,53	Ref.		Modelo I	C	602,83	Ref.
	Modelo II	C	473,36	0,04%		Modelo II	C	602,74	0,01%
	Modelo III	C	473,39	0,03%		Modelo III	C	602,80	0,00%
	Modelo IV	C	473,59	-0,01%		Modelo IV	C	603,00	-0,03%
	Modelo I	P	580,19	Ref.		Modelo I	P	693,99	Ref.
	Modelo II	P	580,12	0,01%		Modelo II	P	694,05	-0,01%
	Modelo III	P	580,46	-0,05%		Modelo III	P	694,31	-0,05%
	Modelo IV	P	581,41	-0,21%		Modelo IV	P	695,13	-0,16%

Fonte: Próprio autor

A busca por um modelo bem refinado, que apresente resultados satisfatórios, leva em consideração não apenas o tempo de execução e quantidade de dados gerados em cada simulação numérica, mas também os objetivos almejados do trabalho proposto.

Nesse sentido, levando em consideração o custo-benefício de cada simulação numérica, nota-se que há pouca influência do refinamento aplicado na malha, com diferenças pouco significativas na evolução de temperatura nos pontos analisados da seção transversal.

Portanto, as malhas que foram utilizadas para as simulações numéricas desse trabalho foram refinadas de forma a ser obtido um balanço entre a convergência e a resolução, ao ponto de buscar precisão suficiente para medir as distâncias verticais e horizontais da isotérmica de 500°C do concreto, para estimar de forma satisfatória a área residual resistente do núcleo de concreto.

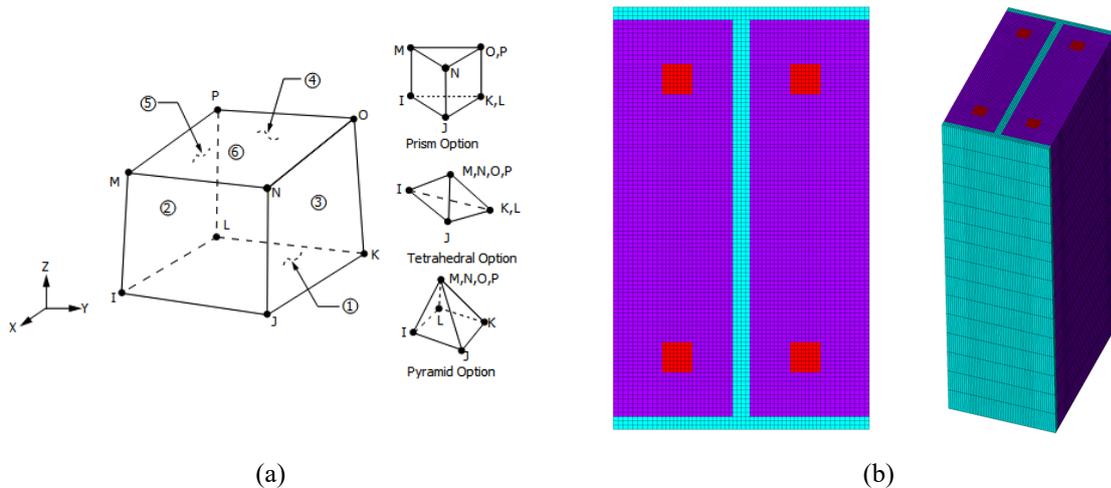
4.3.4 Elementos Finitos utilizados nas modelagens numéricas tridimensionais

Diferentes tipos de elementos foram aplicados para resolver a análise térmica e mecânica tridimensional. Esses elementos estão definidos na base de dados do software ANSYS. A coluna foi modelada em 3D, onde foram selecionados os Elementos Finitos mais adequados para a finalidade de cada simulação.

4.3.4.1 Modelo térmico tridimensional

Para realizar uma análise térmica transiente não linear, utilizou-se o elemento “SOLID70” do ANSYS que possui uma capacidade de condução térmica 3D. O elemento possui oito nós com um único grau de liberdade, a temperatura nodal. O elemento também pode compensar o fluxo de calor com transporte de massa a partir de um campo de velocidade constante.

Figura 4.11: Geometria do elemento “SOLID70” e a seção transversal dos pilares modelados



Fonte: Adaptado de ANSYS (2019)

As funções de interpolação são lineares e esse elemento usa um esquema de integração completo (2x2x2) para definir a matriz de condutividade. O elemento foi aplicado ao volume do perfil de aço, do concreto e das barras de reforço.

4.3.4.2 Modelo mecânico tridimensional

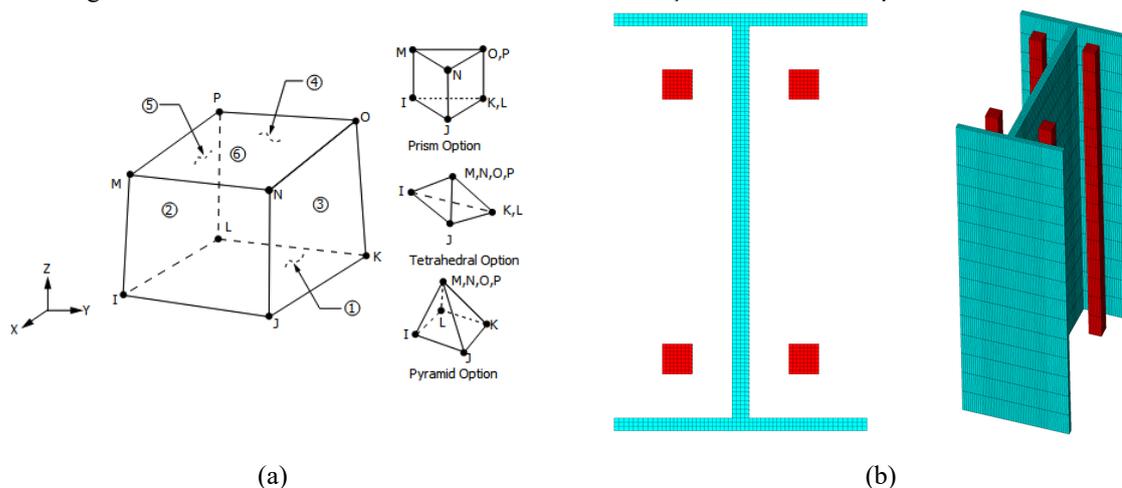
Para a análise estrutural, o modelo tridimensional utiliza o elemento “SOLID185” para a modelagem da malha do perfil de aço e das barras de reforço, o elemento “SOLID65” foi utilizado para modelar o preenchimento de concreto na coluna, além do elemento “SHELL181” que foi utilizado para modelar as placas rígidas no topo e na base da coluna, nas simulações numéricas.

O “SOLID 185” possui oito nós com três graus de liberdade cada, e usa funções de interpolação lineares permitindo que seja efetuada uma análise da estrutura no domínio tridimensional. O elemento possui plasticidade, hiper elasticidade, grandes capacidades de deformação e de deslocamento, entre outras propriedades que permitem a modelagem de estruturas prismáticas, tetraédricas e piramidais quando usadas em regiões irregulares.

Foi utilizada a opção de integração completa com o método B-bar. O método B-bar ajuda a prevenir o travamento volumétrico em casos quase incompressíveis, ele substitui a deformação volumétrica no ponto de integração de Gauss pela deformação volumétrica média dos elementos.

A Figura 4.12 representa a geometria do elemento “SOLID185” e a malha do modelo tridimensional usado para aplicar as condições de contorno.

Figura 4.12: Geometria do elemento “SOLID185” e a seção transversal dos pilares modelados

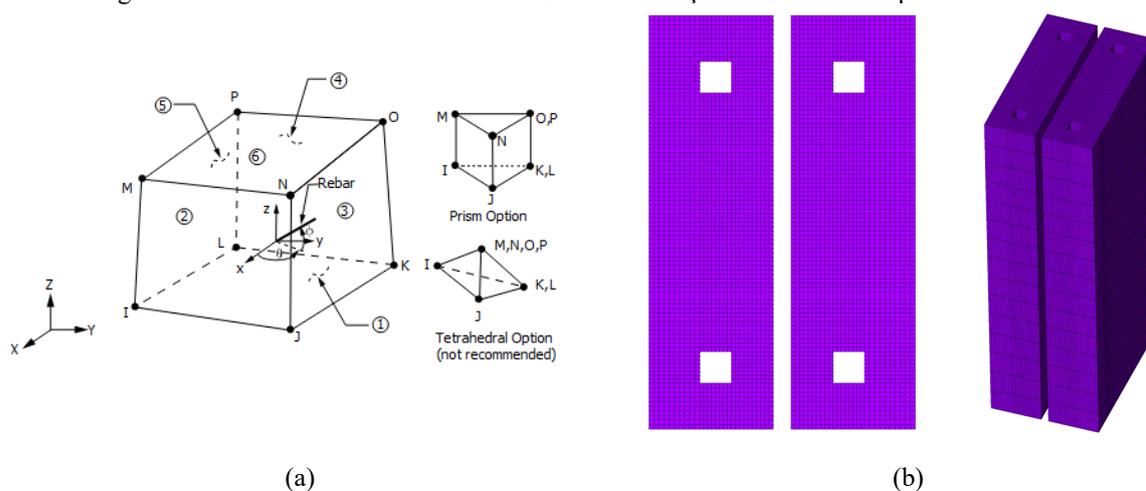


Fonte: Adaptado de ANSYS (2019)

O elemento “SOLID65” foi utilizado para modelar a malha de concreto e apresenta oito nós com três graus de liberdade em cada nó e usa funções de interpolação linear com um esquema de integração total $2 \times 2 \times 2$ de *Gauss*. O elemento permite a introdução do critério de dano, provocado pela fissuração distribuída do elemento quando submetido à tração, o *cracking*, e por esmagamento quando submetido à compressão, o *crushing*. O presente modelo não inclui estes efeitos nas simulações.

A Figura 4.13 apresenta a geometria do elemento “SOLID65” e a malha do modelo tridimensional usado para aplicar as condições de contorno.

Figura 4.13: Geometria do elemento “SOLID65” e a seção transversal dos pilares modelados

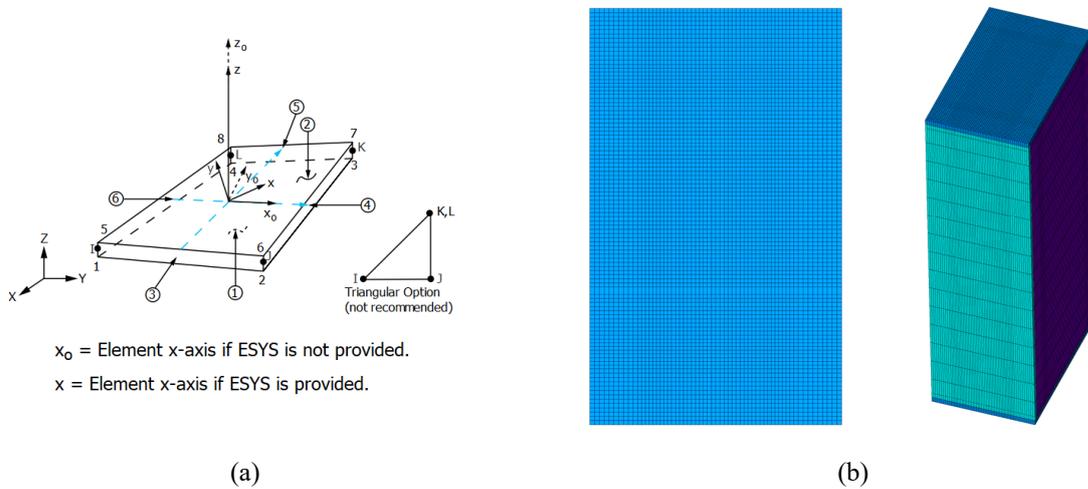


Fonte: Adaptado de ANSYS (2019)

Não menos importante, o elemento de casca “SHELL181” que apresenta grande versatilidade para análises estruturais de pequena e moderada espessura de casca ou placa. O

elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó. O elemento é recomendado para análises linear e não linear e grandes rotações. As formulações do elemento têm como base deformações logarítmicas e tensões verdadeiras. A precisão dos modelos de casca é governada pela teoria de deformações de cisalhamento de primeira ordem com base nos campos de deslocamentos, teoria de Reissner-Mindlin. O elemento “SHELL181” ainda permite modelagens multicamadas com até 9 pontos de integração entre camadas. A Figura 4.14 apresenta a geometria do elemento “SHELL181” e as placas modeladas na seção transversal dos pilares mistos.

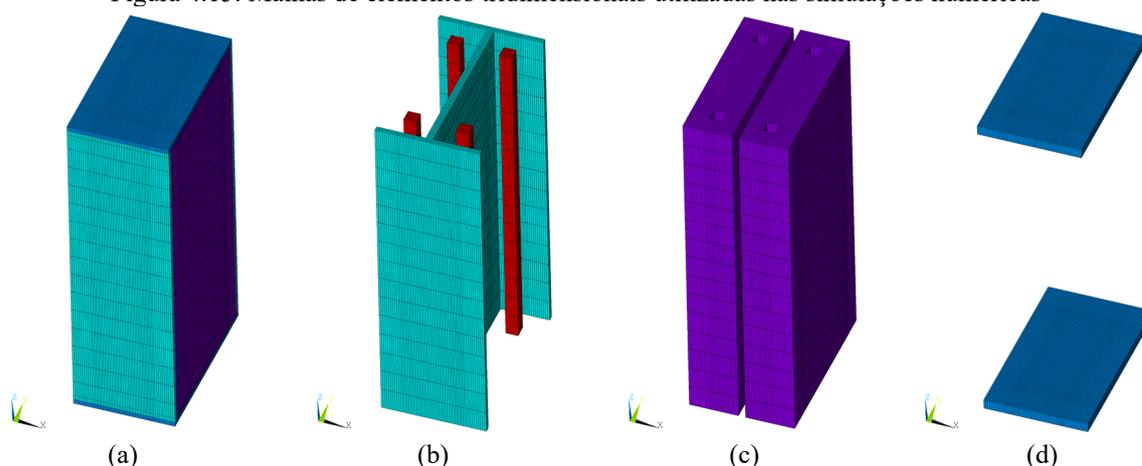
Figura 4.14: Geometria do elemento “SHELL181” e a seção transversal dos pilares modelados



Fonte: Adaptado de ANSYS (2019)

Resumidamente, a malha tridimensional utilizada nas simulações mecânicas é composta de três tipos de Elementos Finitos e quatro tipos de materiais, conforme Figura 4.16 (a). O perfil metálico e a armadura longitudinal, Figura 4.16 (b), utilizam o Elemento Finito “SOLID185”. O núcleo de concreto, Figura 4.16 (c), utiliza o Elemento Finito “SOLID65”. As placas de topo e base, Figura 4.16 (d), constituídas por material altamente rígido, com a função de distribuir o carregamento aplicado e receber as restrições das condições de contorno.

Figura 4.15: Malhas de elementos tridimensionais utilizadas nas simulações numéricas



Fonte: Próprio autor

4.3.5 Teste de convergência da malha do modelo tridimensional

Para simular o comportamento térmico e mecânico dos pilares mistos em situação de incêndio foram desenvolvidos modelos tridimensionais em Elementos Finitos. Para conhecer a malha que melhor represente o pilar misto foi realizado o teste de convergência com diferentes divisões na malha do modelo tridimensional, nas direções x , y e z .

A malha que obteve o melhor custo-benefício computacional considera 50 divisões na altura de pilares de 3m e 80 divisões na altura dos pilares de 5m, na direção z . Já para as direções x e y , como há grande variação nas dimensões dos perfis estruturais, as divisões foram realizadas para se obter dimensões inferiores a 40mm. Na sua maioria, os elementos sólidos possuem dimensões de 20mm x 20mm x 60mm.

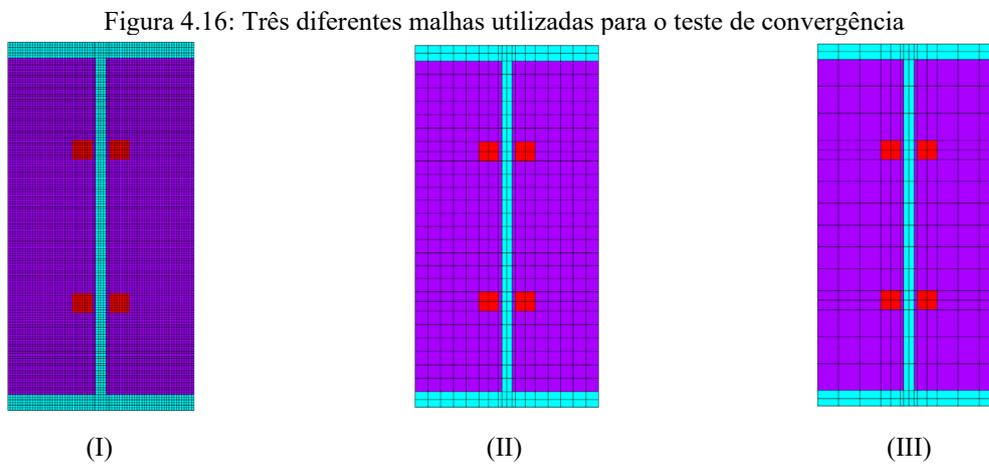
Para que seja obtida uma boa performance na simulação numérica é importante manter um aspecto regular na divisão dos elementos na malha, respeitou-se a proporcionalidade em suas dimensões com valores entre 1:1:3 a 1:1:20, sendo que a proporção máxima foi de 1:1:50, assim a carga ou os deslocamentos impostos não geraram grandes distorções nos elementos da malha e a simulação não foi interrompida prematuramente por problemas de convergência numérica.

Por esse motivo, conforme as seções foram se tornando mais robustas, as divisões dos elementos da seção transversal aumentaram proporcionalmente, ao passo que foi observada a proporcionalidade nas divisões dos segmentos da malha do elemento estrutural.

Foi alcançado um equilíbrio no tempo necessário para realizar cada simulação numérica e na capacidade computacional de armazenamento dos dados de cada simulação, sem perda significativa de precisão dos resultados.

Foi empregado o método empírico para estimar a quantidade ideal de divisões aplicada na malha do modelo para a análise tridimensional. O perfil de teste W 410x60,0, com uma malha bem refinada e advinda das simulações numéricas bidimensionais, foi o modelo de referência para avaliar a evolução de temperatura em pontos específicos da seção transversal. Também foram avaliadas as diferenças mínimas e máximas nas temperaturas, nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos da exposição ao incêndio-padrão na simulação.

A Figura 4.16 (I) apresenta a seção transversal do modelo bidimensional, e a Figura 4.16 (II) e (III) apresenta as seções transversais dos modelos tridimensionais de teste de convergência da malha.



Fonte: Próprio autor

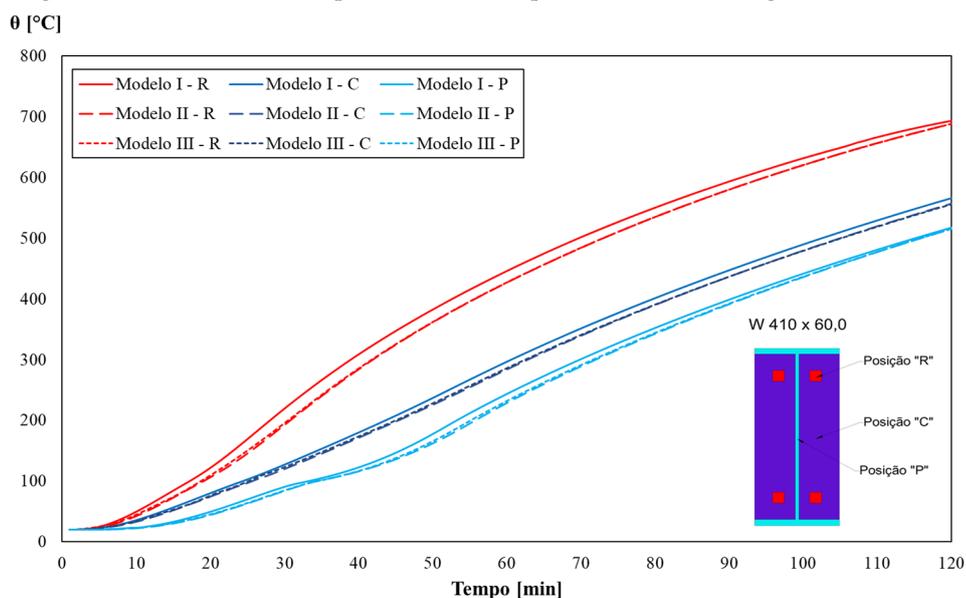
A primeira malha, Figura 4.16 (I), apresenta divisões dos elementos com dimensão máxima de 0,8mm, contendo exatamente 88293 nós, e gerou 1,58GB em dados da simulação térmica bidimensional. A segunda malha, Figura 4.16 (II), apresenta divisões dos elementos com dimensão máxima 8mm x 8mm x 30mm, contendo exatamente 74307 nós, e gerou 5,10GB em dados na simulação térmica tridimensional. A terceira malha, Figura 4.16 (III), apresenta divisões dos elementos com dimensão máxima de 20mm x 20mm x 30mm, contendo exatamente 17595 nós, e gerou 1,18GB em dados na simulação térmica tridimensional.

O tempo de execução das simulações tridimensionais (II), (III) foram relativamente maiores quando comparados com a simulação numérica bidimensional (I). As simulações tridimensionais tomaram cerca de 50 minutos para a malha (II) e 25 minutos para a malha (III), enquanto a simulação numérica bidimensional tomou pouco mais de 20 minutos.

Nota-se que há certa influência no refinamento aplicado na malha, apresentando diferenças pouco significativas nas temperaturas do ponto de vista do custo-benefício, para o grande volume de simulações que o trabalho requer.

A Figura 4.17 apresenta um gráfico contendo a evolução da temperatura em determinados pontos da seção transversal.

Figura 4.17: Evolução da temperatura utilizado para o teste de convergência das malhas



Fonte: Próprio autor

Os resultados coletados apresentam certa similaridade, apesar da grande diferença da quantidade de armazenamento requerido para os dados gerados ao escolher a melhor malha para todas as simulações numéricas térmicas e mecânicas.

A Tabela 4.13 apresenta a comparação dos resultados dos valores das temperaturas coletados em cada simulação numérica em posições específicas da seção transversal.

Tabela 4.13: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal

Tempo [min]	Modelo	Posição	θ [°C]	E.R.	Tempo [min]	Modelo	Posição	θ [°C]	E.R.
30	Modelo I	R	210,87	Ref.	60	Modelo I	R	464,82	Ref.
	Modelo II	R	192,72	8,61%		Modelo II	R	426,98	8,14%
	Modelo III	R	195,73	7,18%		Modelo III	R	427,17	8,10%
	Modelo I	C	130,94	Ref.		Modelo I	C	307,55	Ref.
	Modelo II	C	120,02	8,34%		Modelo II	C	283,79	7,73%
	Modelo III	C	123,18	5,93%		Modelo III	C	286,25	6,93%
	Modelo I	P	91,372	Ref.		Modelo I	P	246,45	Ref.
	Modelo II	P	83,946	8,13%		Modelo II	P	228,64	7,23%
	Modelo III	P	84,733	7,27%		Modelo III	P	232,06	5,84%
90	Modelo I	R	618,39	Ref.	120	Modelo I	R	721,08	Ref.
	Modelo II	R	580,05	6,20%		Modelo II	R	688,21	4,56%
	Modelo III	R	579,85	6,23%		Modelo III	R	688,13	4,57%
	Modelo I	C	467,04	Ref.		Modelo I	C	588,83	Ref.
	Modelo II	C	436,47	6,55%		Modelo II	C	556,65	5,47%
	Modelo III	C	437,00	6,43%		Modelo III	C	556,16	5,55%
	Modelo I	P	419,80	Ref.		Modelo I	P	544,65	Ref.
	Modelo II	P	391,14	6,83%		Modelo II	P	515,10	5,43%
	Modelo III	P	392,31	6,55%		Modelo III	P	515,37	5,38%

Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que a busca por um modelo bem refinado, que apresente resultados satisfatórios, leva em consideração não apenas tempo de execução e quantidade de dados gerados em cada simulação numérica, mas também os objetivos almejados do trabalho proposto.

Nesse sentido, levando em consideração o custo-benefício em relação ao tempo de modelagem e execução das simulações, o grande volume de dados computacionais gerados e a precisão dos resultados, as malhas utilizadas para as simulações numéricas desse trabalho foram refinadas respeitando a proporcionalidade em suas dimensões com valores entre 1:1:3 a 1:1:20, sendo que a proporção máxima foi de 1:1:50, para que fosse obtida precisão aceitável no campo de temperaturas e nos esforços resistentes dos modelos tridimensionais de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, como forma de cumprir satisfatoriamente os objetivos desse trabalho mesmo com as limitações computacionais existentes.

4.3.6 Limite para o deslocamento vertical e imperfeição geométrica

Para garantir a integridade da edificação em uma situação de incêndio, a norma britânica BS EN 1363-1:2012 delimita os princípios gerais para determinar a resistência de elementos estruturais quando sujeitos a condições de incêndio padronizados.

A norma em questão estabelece os aspectos e procedimentos, impondo critérios para os testes de carga, a fim de que se possa avaliar de forma correta a capacidade de carga, a integridade e isolamento térmico do elemento estrutural.

Para determinar a capacidade de carga, a norma estabelece um critério de desempenho, no qual o elemento deve manter sua capacidade de suporte no intervalo de duração do teste.

Para elementos submetidos a carregamentos verticais, a norma EN 1363-1:2020 estabelece limites de esmagamento e taxa de contração vertical do elemento submetido à carga axial, também deve ser avaliada a deflexão máxima, assim como a evolução da taxa de deflexão.

O encurtamento máximo recomendado pela norma serviu de parâmetro para o critério de coleta de dados nas simulações numéricas que utilizaram o método de Newton-Raphson com incremento de deslocamento, para a obtenção das cargas resistentes pertinentes.

A resistência ao fogo do elemento submetido à compressão deve ser determinada pelo limite do deslocamento vertical do elemento ou pela sua taxa, de acordo com as seguintes recomendações:

$$C = \frac{L}{100} \quad [\text{mm}] \quad (4.29)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3L}{1000} \quad [\text{mm/min}] \quad (4.30)$$

Onde L é o comprimento vertical inicial do elemento estrutural, no caso específico o comprimento inicial do pilar misto parcialmente revestido em situação de incêndio. O valor de C é o limite vertical de contração do elemento estrutural e $\frac{dC}{dt}$ é o limite da taxa vertical de contração do elemento estrutural submetido ao esforço axial de compressão.

Quanto ao critério de imperfeição geométrica máxima para a análise não linear dos pilares mistos parcialmente revestidos, aplica-se o limite estabelecido pelo item 6.7.3.6 do CEN EN 1994-1-1:2004, que para o caso de flexão em torno do eixo de menor inércia, deve ser definido pela Equação (4.31).

$$\frac{L}{150} \quad [\text{m}] \quad (4.31)$$

A imposição das não linearidades geométricas do elemento estrutural parte do princípio de considerar o equilíbrio do elemento na sua posição de deformada e de impor imperfeições geométricas nas simulações numéricas tridimensionais do elemento estrutural. Para isso, após

realizar a análise elástica linear e extrair o primeiro modo de instabilidade, é inserida uma amplitude da imperfeição geométrica para então seguir para a análise não linear e buscar o equilíbrio do elemento estrutural a partir da geometria deformada.

Os valores limites de imperfeições geométricas foram utilizadas para atualizar a geometria deformada do elemento estrutural (posição inicial dos nós) e assim impor os critérios de imperfeições geométricas nas simulações numéricas.

Para a obtenção da força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio nas simulações numéricas não lineares, foram consideradas as não linearidades dos materiais, as temperaturas nodais em cada instante de interesse, assim como as imperfeições geométricas do elemento estrutural.

4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para a validação do modelo numérico, para a análise de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, as mesmas seções transversais presentes em análises numéricas e experimentais dadas da literatura foram modeladas numericamente no programa ANSYS e os resultados foram então comparados.

Esse processo tem o intuito de garantir que os valores de temperatura obtidos numericamente pela modelagem computacional estejam de acordo com os resultados obtidos experimentalmente por outros autores.

Quanto às condições de contorno do modelo numérico térmico, foram considerados os fenômenos de troca de calor entre o meio e o elemento estrutural, assim como os coeficientes normativos que os definem e as regiões onde atuam. Foram então modeladas as trocas de calor por radiação e convecção nas faces expostas ao fogo e na parte interna do elemento estrutural foi considerado apenas a transferência de calor por condução.

A validação dos modelos numéricos foi realizada por meio da comparação da variação das temperaturas ao longo do tempo nos pontos instrumentados das análises experimentais.

4.4.1 Primeira validação numérica

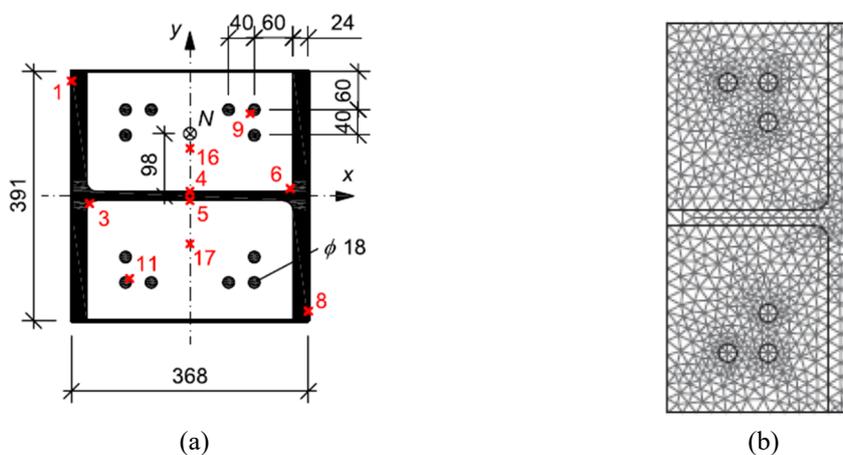
Para a primeira seção transversal foi analisada a evolução da temperatura do aço do reforço, após uma exposição das temperaturas do incêndio-padrão ISO 834:1999 e seguindo os critérios estabelecidos por Štefan et al. (2019).

Os autores realizaram um estudo experimental e numérico a fim de avaliar a maneira com que as altas temperaturas afetam a resistência de pilares. Um dos objetos da pesquisa foi o pilar misto parcialmente revestido. Os resultados obtidos pelos autores foram comparados com os de Haß (1986), um autor alemão que também realizou um estudo teórico e experimental de elevação de temperaturas em pilares mistos.

O trabalho realizado pelos autores investigou o comportamento estrutural de diversos exemplares de pilares submetidos à compressão axial e excêntrica. Os autores utilizaram três tipos de seções transversais, uma seção quadrada em concreto armado, uma de seção mista parcialmente revestida e uma seção circular preenchida com concreto.

Será apresentado apenas o modelo de seção mista parcialmente revestida com concreto, conforme o modelo esquemático da proposta de Štefan et al. (2019), assim como a elaboração em Elementos Finitos dos autores, que utilizaram a ferramenta computacional MATLAB para a modelagem numérica. A seção mista foi modelada parcialmente pelos autores, utilizando a simetria para verificar os pontos de interesse. A seção mista em questão, designada como HD 400x400x187 com dimensões em milímetros, está exposta na Figura 4.18.

Figura 4.18: Seção transversal mista e estratégia numérica dos autores no MATLAB



Fonte: Adaptado de Štefan et al. (2019)

Os dados dos materiais utilizados foram extraídos de Haß (1986, p. A38), e brevemente descritas em Štefan et al. (2019), sendo apresentadas de forma resumida na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados por Štefan et al. (2019)

Material	Parâmetros	Valores
Aço do perfil estrutural	E_a [GPa]	210
	f_y [MPa]	289
	f_u [MPa]	476
Concreto	f_c [MPa]	25,5
Aço da armadura longitudinal	E_s [GPa]	200
	$f_{y,k}$ [MPa]	420
	$f_{u,k}$ [MPa]	476

Fonte: Próprio autor

As modelagens numéricas de Štefan et al. (2019) utilizaram as propriedades térmicas descritas no CEN EN 1992-1-2:2004, além do CEN EN 1994-1-2:2005 para o caso do concreto de densidade normal e do CEN EN 1993-1-2:2005 para os parâmetros térmicos do aço do perfil estrutural e do aço do reforço. Os autores utilizaram coeficiente de convecção α_c de valor 25 [W/m².K], a emissividade ε com valor de 0,7. Temperatura inicial θ_i com valor de 20°C e fator de configuração Φ igual a 1,0.

Já a modelagem numérica desse trabalho, realizada na ferramenta computacional ANSYS, utilizou o Elemento Finito “PLANE55”. A malha bidimensional apresentou 58904 nós, modelando o comportamento do aço e do concreto em três componentes da seção transversal mista, o perfil estrutural de aço, o núcleo de concreto e as armaduras longitudinais. Foram também seguidos os critérios estabelecidos no trabalho de Štefan et al. (2019) quanto aos outros parâmetros de modelagem.

Foi realizada uma simplificação da seção transversal circular do aço do reforço para uma seção quadrada, preservando a área da seção da barra e como forma de evitar *gaps*, ou vazios, na fronteira do Elemento Finito de concreto e de aço. Além disso, diferentemente dos elementos triangulares das malhas dos modelos numéricos do trabalho realizado por Štefan et al. (2019), foram utilizados elementos quadriláteros nas malhas bidimensionais, justamente por ser de interesse do presente trabalho.

As propriedades térmicas gerais dos materiais utilizados nas simulações numéricas bidimensionais estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Propriedades térmicas dos materiais utilizados

Propriedade	Valor
Calor específico do aço	c_a Determinado conforme Seção 3.4.2.1 do presente trabalho
Condutibilidade térmica do aço	λ_a Determinado conforme Seção 3.4.2.2 do presente trabalho
Densidade do aço	ρ_a Determinado conforme Seção 3.4.2.3 do presente trabalho
Calor específico do concreto	c_c Determinado conforme Seção 3.4.2.4 do presente trabalho
Condutibilidade térmica do concreto	λ_c Determinado conforme Seção 3.4.2.5 do presente trabalho
Densidade do concreto	ρ_c Determinado conforme Seção 3.4.2.6 do presente trabalho
Coefficiente de convecção	α_c 25 [W/m ² .K]
Emissividade dos materiais	ε 0,7
Fator de configuração	Φ 1,0
Temperatura inicial	θ_i 20 [°C]

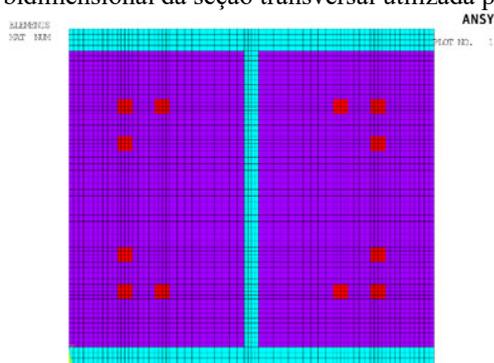
Fonte: Próprio autor

A recomendação da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 para estudos relativos à elevação de temperatura é realizar a análise térmica fundamentada em princípios reconhecidos e hipóteses da transferência de calor. Nesse sentido, foi utilizado o parâmetro de emissividade resultante ε_{res} com valor de 0,7, conforme recomenda o item 8.5.1.1.3 da ABNT NBR 14323:2013. Temperatura inicial θ_i com valor de 20°, conforme item 3.13 da ABNT NBR 14323:2013, e o fator de correção para o efeito de sombreamento k_{sh} igual a 1,0 para perfis mistos de aço e concreto, conforme item 8.5.1.1.1 da ABNT NBR 14323:2013.

Tanto o modelo experimental quanto o modelo numérico utilizaram o teor de umidade do concreto de 3%.

A Figura 4.19 apresenta a malha utilizando um elemento quadrilateral da modelagem numérica no programa ANSYS.

Figura 4.19: Malha bidimensional da seção transversal utilizada para a análise térmica

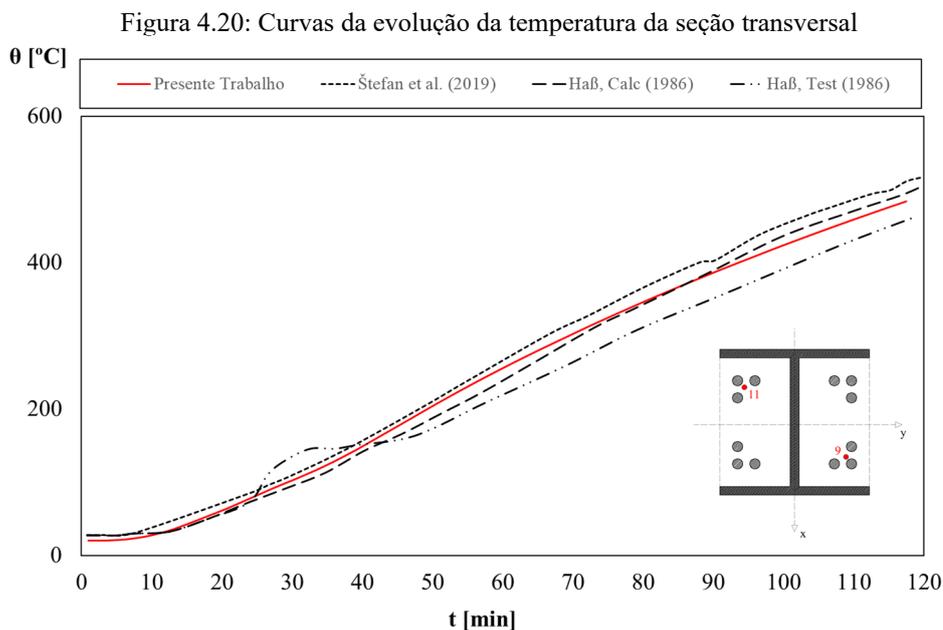


Fonte: Próprio autor

Os materiais e as condições de contorno do modelo numérico foram estabelecidos conforme os critérios da Tabela 4.15, a elevação de temperatura nas quatro faces do elemento estrutural seguiu os critérios da ISO 834-1:1999. A análise térmica transiente não linear foi definida com um passo de tempo de integração de 60s, onde, não havendo a convergência, o

passo pode diminuir para 1s e aumentar até 60s. O critério de convergência usa um valor de tolerância do fluxo de calor, menor que 0,1% com um valor de referência mínimo de 1×10^{-6} $[\text{W}/\text{m}^2]$.

A Figura 4.20 apresenta os resultados térmicos do termopar localizado na posição 9 que é simétrico ao termopar 11, de forma que possuem a mesma evolução de temperatura. A curva em vermelho apresenta os resultados numéricos do presente trabalho, comparado com os resultados experimentais de Štefan et al. (2019) e os de Haß (1986).

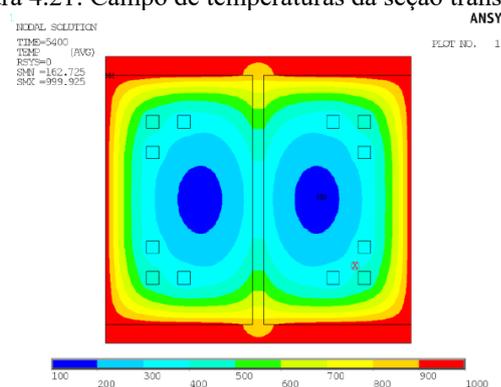


Fonte: Próprio autor

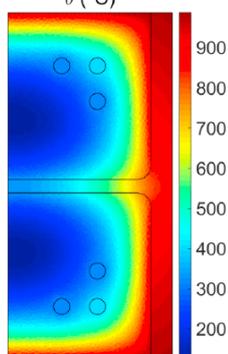
A evolução da temperatura próximo ao aço do reforço comparado com o modelo apresentado por Štefan et al. (2019) apresenta, portanto, uma boa concordância quanto a evolução da temperatura.

A envoltória de temperaturas obtidos numericamente por meio do programa ANSYS, representado pela Figura 4.21, juntamente com os resultados numéricos obtidos por Štefan et al. (2019) pela modelagem numérica por meio do programa ABAQUS, apresentado na Figura 4.22 também possuem grande similaridade, tanto no campo de distribuição de temperaturas quanto em valores absolutos.

Figura 4.21: Campo de temperaturas da seção transversal



Fonte: Próprio autor

Figura 4.22: Campo de temperaturas obtidos nas simulações numéricas
 θ (°C)

Fonte: Adaptado de Štefan et al. (2019)

A Tabela 4.16 apresenta uma comparação mais abrangente dos valores da temperatura, em diferentes tempos de exposição dos autores selecionados. O erro relativo percentual é apresentado como sendo a magnitude da diferença entre o valor do ensaio experimental e o valor obtido pela simulação numérica, dividida pela magnitude do valor da simulação numérica, em forma percentual.

Tabela 4.16: Comparação dos valores de temperaturas para validação numérica

Tempo [min]	Autores	θ [°C]	E.R.
30	Štefan et al.	109,6	Ref.
	Haß, Calc.	95,3	-13,0%
	Haß, Test.	134,6	22,8%
	Presente Trabalho	104,1	-5,0%
60	Štefan et al.	266,1	Ref.
	Haß, Calc.	239,3	-10,1%
	Haß, Test.	219,8	-17,4%
	Presente Trabalho	258,0	-3,0%
90	Štefan et al.	403,0	Ref.
	Haß, Calc.	389,5	-3,3%
	Haß, Test.	357,9	-11,2%
	Presente Trabalho	388,1	-3,7%

Fonte: Próprio autor

Nota-se que para a posição do termopar número 9 da Figura 4.18 (a), próximo a barra de reforço, o modelo numérico do ANSYS atingiu uma temperatura de 388,1°C em exposição de 90 minutos de incêndio, para Štefan et al. (2019) foi de 403,0°C, apresentando uma diferença relativa de 3,7% dos valores encontrados. Já Haß (1986) o modelo experimental atingiu 389,5°C e seu modelo matemático previu 357,9°C neste mesmo ponto, apresentando uma diferença relativa dos valores de -3,3% e -11,2%, respectivamente.

Portanto, o modelo numérico do ANSYS possui resultados de análise térmica dentro dos parâmetros experimentais e numéricos aceitáveis da literatura, nesse primeiro caso.

4.4.2 Segunda validação numérica

Para o segundo caso da validação numérica, o presente trabalho utiliza uma pesquisa de Piloto et al. (2017), que se trata de um estudo experimental sobre a flambagem lateral com torção em vigas parcialmente revestidas em temperaturas elevadas.

O estudo dos autores foi referente a vigas parcialmente revestidas, compostas de perfis IPE100 com aço de classe S275, concreto de classe C20 e o aço do reforço de classe B500 de 8 milímetros de diâmetro, assim como estribos de mesma especificação e diâmetro de 6 milímetros. Os autores caracterizaram os materiais em ensaios laboratoriais, três corpos de prova coletados do perfil estrutural e dois das armaduras longitudinais, a Tabela 4.17 apresenta alguns dos parâmetros mais relevantes para o presente trabalho da caracterização dos materiais realizados por Piloto et al. (2017).

Tabela 4.17: Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados

Material	Denominação	Parâmetros	Valores
Aço do perfil estrutural	S275	E_a [GPa]	197,9 ± 2,1
		f_y [MPa]	302,4 ± 5,7
		f_u [MPa]	431,2 ± 5,0
Concreto	C20	f_{ck} [MPa]	20,4 ± 0,3
		$f_{ck,cube}$ [MPa]	21,4 ± 1,0
Aço da armadura longitudinal	B500	E_s [GPa]	203,3 ± 2,1
		$f_{y,k}$ [MPa]	531,5 ± 7,9
		$f_{u,k}$ [MPa]	626,6 ± 11,5

Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2017)

As vigas foram então sujeitas a uma elevação de temperatura pelas mesas com taxa de 800°C/hora, e para um isolamento térmico eficiente foi utilizada uma manta cerâmica envolvendo toda a seção transversal. O aquecimento da viga ocorreu com intervalos de 15, 30

e 45 minutos até que fossem atingidas as temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C para a realização dos testes de carga.

O estudo em questão é altamente relevante, não apenas pelas contribuições científicas para a engenharia de segurança contra incêndio, é pertinente também para validações de modelos numéricos que utilizam a elevação de temperatura na seção transversal, por meio dos dados coletados no decorrer dos ensaios.

A Figura 4.23 apresenta o elemento estrutural após a realização do ensaio experimental em 600°C.

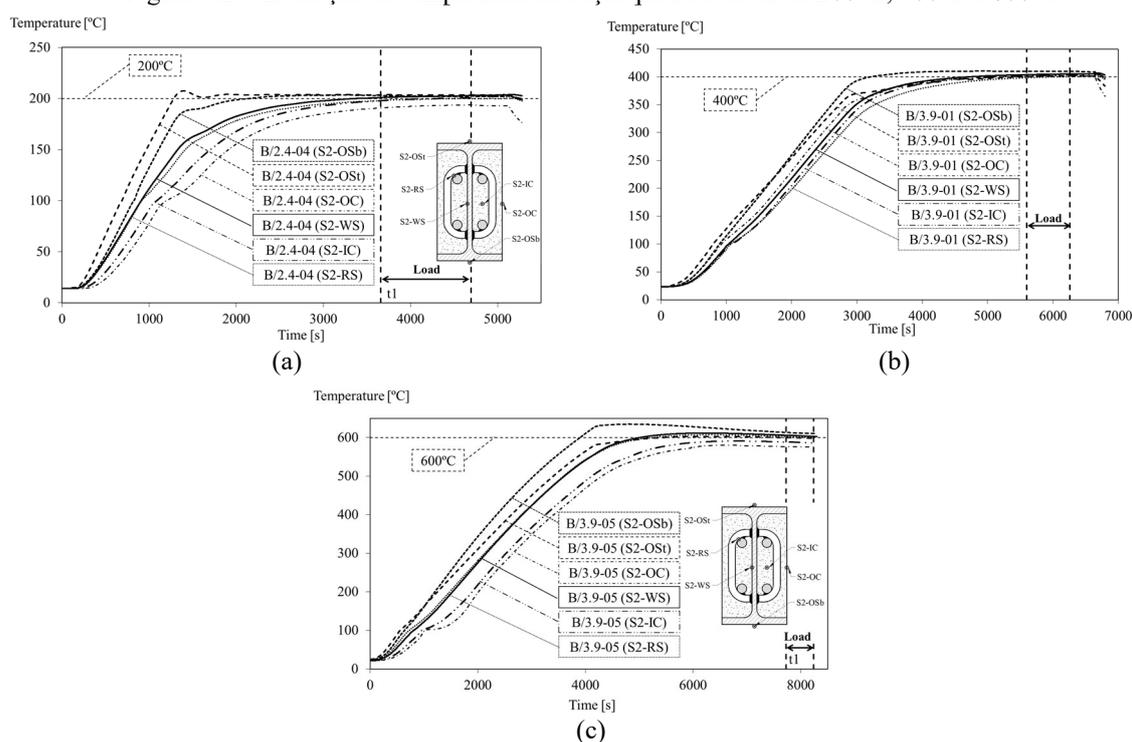
Figura 4.23: Elemento estrutural após a realização do ensaio experimental



Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2017)

Os resultados obtidos e publicado pelos autores quanto à elevação de temperatura na seção transversal está apresentada na Figura 4.24.

Figura 4.24: Evolução da temperatura na seção para os testes de 200°C, 400°C e 600°C



Fonte: Adaptado de Piloto et al. (2017)

A partir das informações disponíveis no texto publicado pelos autores, foi então realizada a modelagem numérica, que consiste em utilizar todos os dados pertinentes da pesquisa para subsidiar o programa ANSYS com os corretos parâmetros e coeficientes. Dessa forma, foi possível realizar as simulações numéricas da malha bidimensional, estabelecendo as condições de contorno do modelo em conformidade com o modelo apresentado pelos autores e comparando os resultados experimentais com os resultados numéricos.

A malha bidimensional se valeu do elemento “PLANE55” do ANSYS. As propriedades térmicas dos materiais estão de acordo com as normas europeias descritas no CEN EN 1992-1-2:2004, além do CEN EN 1994-1-2:2005 para o caso do concreto de densidade normal e do CEN EN 1993-1-2:2005 para os parâmetros térmicos do aço do perfil estrutural, aço do reforço e estribos.

No experimento em escala real, a curva de elevação de temperatura descrita foi de 800°C por hora, estabilizando em 200°C, 400°C e 600°C para cada caso de análise. No experimento de Piloto et al. (2017), o aquecimento das mesas foi realizado utilizando um aquecedor eletro-cerâmico. O aquecimento se deu por cerca de 15, 30 e 45 minutos para que fossem obtidas as respectivas temperaturas uniformes em toda a seção transversal.

Para a primeira seção da modelagem numérica, a curva de aquecimento utilizada elevou a temperatura por 20 minutos a uma taxa constante de 800°C por hora e gradativamente recuou, até estabilizar em 200°C.

Da mesma forma ocorreu para a modelagem numérica do ensaio de temperatura de 400°C, que utilizou uma curva de elevação de temperatura constante por um tempo de 30 minutos, estabilizando nessa temperatura até o final da simulação numérica.

Para o modelo do ensaio da temperatura de 600°C, utilizando uma curva de aquecimento com taxa constante por 45 minutos e gradativamente recuando até estabilizar em 600°C, como forma de obter a temperatura constante em toda a seção transversal.

Outra possibilidade de estabelecer numericamente a transferência de calor entre o aquecedor eletro-cerâmico e a superfície do elemento estrutural é a utilização da condição de Dirichlet, utilizando uma temperatura superficial fixa nas mesas inferiores e superiores para criar a condição de contorno adequada.

Para a modelagem numérica foi admitido um coeficiente de convecção α_c de valor 35 [W/m².K], uma vez que o ar superaquecido da interface difere do incêndio-padrão que possui α_c de valor 25 [W/m².K], além disso, quanto maior o coeficiente de convecção mais as curvas de elevação de temperaturas numéricas e experimentais desse caso se aproximam.

As propriedades térmicas gerais dos materiais utilizados nas simulações numéricas bidimensionais estão apresentados na Tabela 4.18, como forma de se adequarem aos parâmetros utilizados pelos autores no experimento, tendo em vista os parâmetros recomendados pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

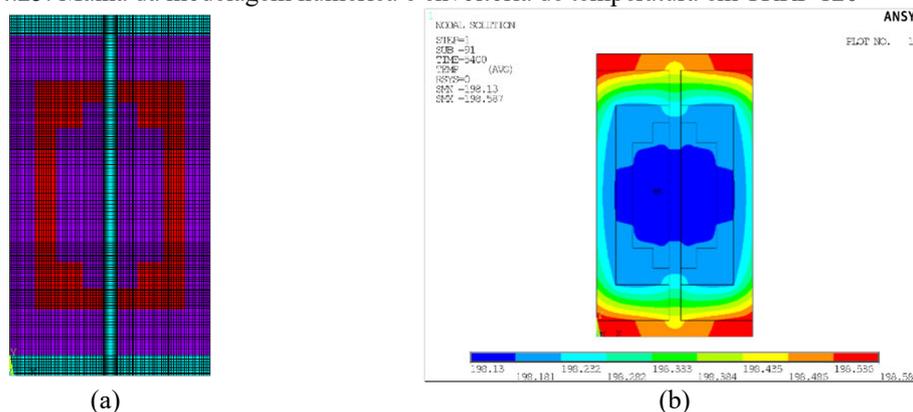
Tabela 4.18: Propriedades térmicas gerais dos materiais utilizados

Propriedade		Valor
Calor específico do aço	c_a	Determinado conforme Seção 3.4.2.1 do presente trabalho
Condutibilidade térmica do aço	λ_a	Determinado conforme Seção 3.4.2.2 do presente trabalho
Densidade do aço	ρ_a	Determinado conforme Seção 3.4.2.3 do presente trabalho
Calor específico do concreto	c_c	Determinado conforme Seção 3.4.2.4 do presente trabalho
Condutibilidade térmica do concreto	λ_c	Determinado conforme Seção 3.4.2.5 do presente trabalho
Densidade do concreto	ρ_c	Determinado conforme Seção 3.4.2.6 do presente trabalho
Coeficiente de convecção	α_c	35 [W/m ² .K]
Emissividade dos materiais	ε	0,7
Fator de configuração	Φ	1,0
Temperatura inicial	θ_i	15 [°C]

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.25 apresenta a malha bidimensional modelada no programa ANSYS, refinada para obter resultados mais precisos possíveis do local estabelecido e em que foram posicionados os medidores de temperatura no interior da seção transversal do experimento em escala real.

Figura 4.25: Malha da modelagem numérica e envoltória de temperatura em TRRF 120



Fonte: Próprio autor

A malha bidimensional da Figura 4.25 contém 23936 nós e o modelo numérico contou com os mesmos materiais modelados na primeira validação numérica da Seção 4.4.1 do presente trabalho.

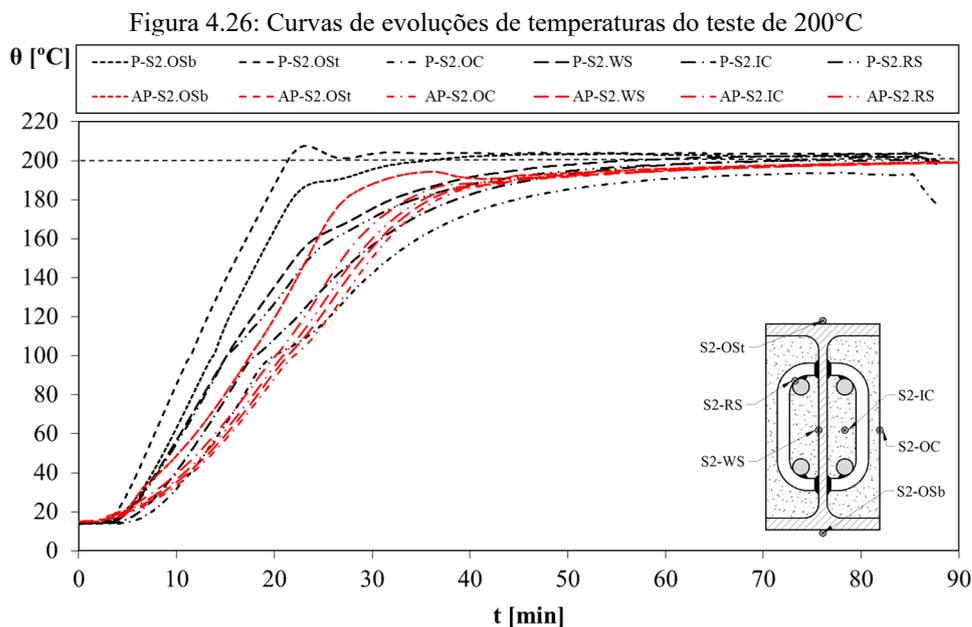
Apesar de haver uma boa concordância entre os resultados, para calibrar os parâmetros que o programa computacional utiliza e assim obter resultados satisfatórios nas curvas de

elevação de temperatura comparadas com o caso experimental em 200°C algumas informações referentes à transferência de calor entre o aquecedor eletro-cerâmico e o perfil estrutural, como o coeficiente de convecção e de radiação foram alteradas, para se adequar ao caso específico apresentado pelo texto publicado pelos autores, respeitando as hipóteses da teoria de transferência de calor, permitidas pelo item 10.2.1 da ABNT NBR 14323:2013.

Para esse caso específico, foi estabelecida uma nova curva de elevação de temperatura, considerando a hipótese que o aquecedor eletro-cerâmico esteja tão próximo às mesas do perfil estrutural que a elevação de temperatura estivesse sob pouca influência do efeito da convecção e radiação, onde o mecanismo de transferência de calor predominante fosse o da condução de calor entre a superfície aquecida, as moléculas de ar que separam as duas superfícies, e as mesas do perfil estrutural.

Dessa forma, a modelagem numérica apresentada a seguir foi realizada com uma taxa de aquecimento de 700°C por hora aplicada diretamente nos nós das mesas do perfil estrutural. Foi admitido um coeficiente de convecção α_c de valor 4 [W/m².K], e emissividade ϵ com valor de 0,8 na fronteira exposta dos materiais da seção transversal com o meio externo. Temperatura inicial θ_i com valor de 20°C. A curva de aquecimento foi modelada para elevar a temperatura a uma taxa constante de 700°C/hora, durante vinte minutos e estabilizar em 200°C até o final da simulação.

A Figura 4.25 apresenta a comparação dos resultados obtidos numericamente relacionado com os resultados experimentais em 200°C. Em vermelho os resultados numéricos sobrepostos aos resultados experimentais.



A Tabela 4.19 apresenta a comparação dos valores das temperaturas obtidas por meio do ensaio experimental relacionada com os valores de temperaturas obtidas por meio das simulações numéricas em tempos específicos do ensaio e da simulação numérica.

Tabela 4.19: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 200°C

Tempo [min]	(Experimental)		(Numérico)		
	Posição do termopar	θ [°C]	Posição nodal	θ [°C]	E.R.
20	P-S2-OSb	187,4	AP-S2-OSb	152,1	-23%
	P-S2-OSt	164,4	AP-S2-OSt	152,1	-8%
	P-S2-OC	100,1	AP-S2-OC	107,5	-6%
	P-S2-WS	135,3	AP-S2-WS	126,3	-7%
	P-S2-IC	108,4	AP-S2-IC	109,4	1%
	P-S2-RS	126,7	AP-S2-RS	131,7	4%
40	P-S2-OSb	203,9	AP-S2-OSb	200,0	2%
	P-S2-OSt	202,0	AP-S2-OSt	200,0	1%
	P-S2-OC	172,9	AP-S2-OC	181,8	-5%
	P-S2-WS	191,4	AP-S2-WS	190,5	0%
	P-S2-IC	182,5	AP-S2-IC	189,5	-4%
	P-S2-RS	187,7	AP-S2-RS	190,9	-2%
60	P-S2-OSb	203,5	AP-S2-OSb	200,0	2%
	P-S2-OSt	202,9	AP-S2-OSt	200,0	1%
	P-S2-OC	190,5	AP-S2-OC	187,6	2%
	P-S2-WS	200,7	AP-S2-WS	195,9	2%
	P-S2-IC	197,6	AP-S2-IC	195,4	1%
	P-S2-RS	197,8	AP-S2-RS	195,8	1%

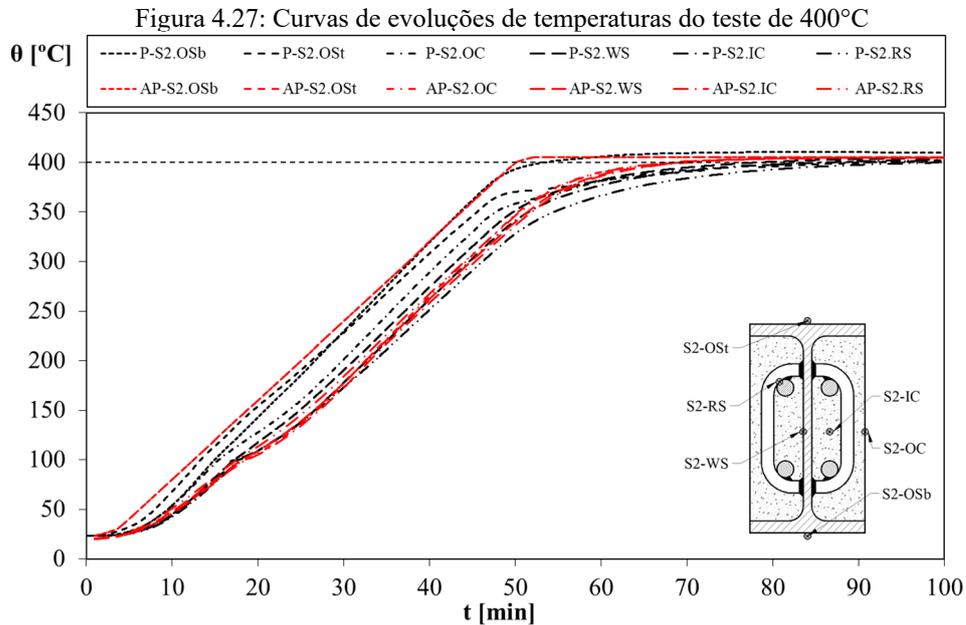
Fonte: Próprio autor

Percebe-se que o erro relativo é maior no início da simulação numérica com diferenças relativas de ordem de 23%. Entretanto os resultados apresentaram, em aspectos gerais, boa concordância.

A modelagem numérica da viga ensaiada em 400°C, apresentada a seguir, foi admitido um coeficiente de convecção α_c de valor 4 [W/m².K] na região exposta, assim como o parâmetro da emissividade na fronteira dos materiais da seção transversal, ϵ com valor de 0,8. Esses valores se apresentaram de forma satisfatória para que fosse obtido um menor erro relativo entre os valores das simulações numéricas e os valores dos experimentos. Ainda, o item 3.1 do CEN EN 1992-1-2:2002 permite a utilização desse valor do coeficiente de convecção para a superfície onde esteja o lado não exposto ao fogo de um elemento de separação, o mesmo item da norma europeia admite a utilização do valor a menos que seja fornecido no material um valor específico.

Temperatura inicial θ_i com valor de 20°C. A curva de aquecimento foi modelada para elevar a temperatura a uma taxa constante de 480°C/hora, por cerca de cinquenta minutos, estabilizando em 400°C até o final da simulação.

A Figura 4.27 apresenta a comparação dos resultados obtidos numericamente relacionado com os resultados experimentais em 400°C.



Fonte: Próprio autor

As curvas numéricas em vermelho, apresentadas na Figura 4.27, possuem uma grande concordância com o aspecto da evolução da temperatura observada nos termopares do experimento em escala real. Nesse caso, diversas curvas de aquecimento foram testadas, entretanto, a simulação numérica que admitiu a elevação de temperatura com taxa constante de 480°C por hora e representou perfeitamente a elevação de temperatura no termopar S2-OSt.

Vale salientar que a curva de elevação de temperatura observada no termopar da base da seção transversal, o S2-OSb, possui uma elevação de temperatura diferente do termopar oposto, na posição superior da mesa da seção transversal S2-OSt, duas hipóteses plausíveis são de que ou houve uma certa diferença na potência dos aquecedores eletro-cerâmicos, ocasionando duas curvas de aquecimento constantes atuando simultaneamente para elevar a temperatura da seção transversal, ou algum problema no isolamento térmico da base. Entretanto, os valores das temperaturas observadas na Tabela 4.20 apontam uma paridade nos resultados numéricos e experimentais.

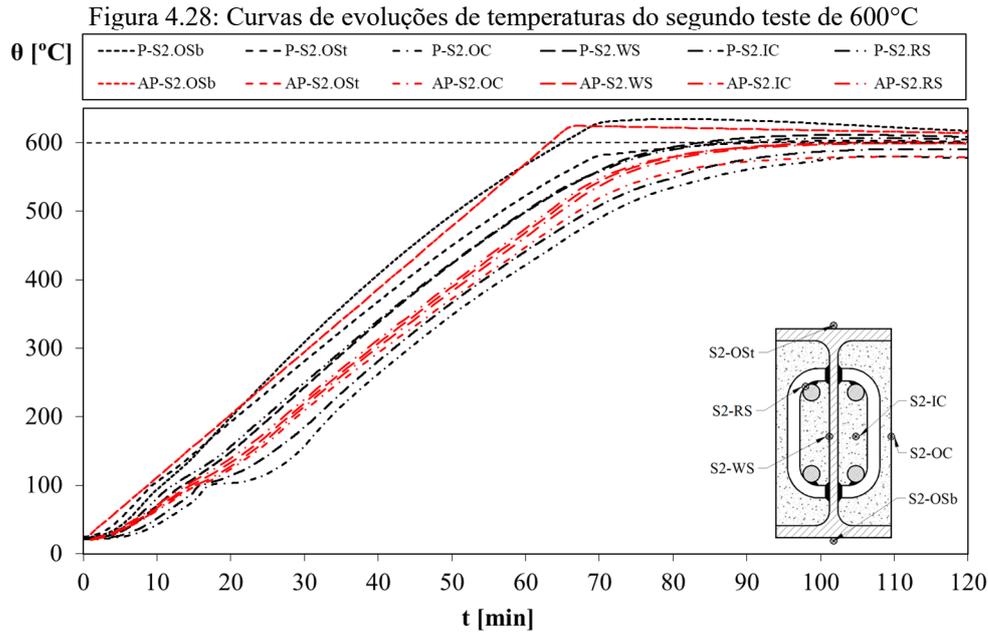
Tabela 4.20: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 400°C

Tempo [min]	(Experimental)		(Numérico)		E.R.
	Posição do termopar	θ [°C]	Posição nodal	θ [°C]	
30	P-S2-OSt	228,3	AP-S2-OSt	241,6	-5,8%
	P-S2-OSb	229,7	AP-S2-OSb	241,6	-5,2%
	P-S2-OC	201,3	AP-S2-OC	178,7	11,2%
	P-S2-WS	190,4	AP-S2-WS	179,5	5,7%
	P-S2-IC	177,9	AP-S2-IC	174,9	1,7%
	P-S2-RS	172,9	AP-S2-RS	185,9	-7,5%
60	P-S2-OSt	381,6	AP-S2-OSt	387,8	-1,6%
	P-S2-OSb	405,9	AP-S2-OSb	405,0	0,2%
	P-S2-OC	381,3	AP-S2-OC	390,6	-2,4%
	P-S2-WS	382,2	AP-S2-WS	387,8	-1,4%
	P-S2-IC	376,9	AP-S2-IC	386,5	-2,5%
	P-S2-RS	366,3	AP-S2-RS	390,0	-6,4%
90	P-S2-OSt	399,6	AP-S2-OSt	404,7	-1,3%
	P-S2-OSb	410,3	AP-S2-OSb	405,0	1,3%
	P-S2-OC	400,7	AP-S2-OC	404,7	-1,0%
	P-S2-WS	403,4	AP-S2-WS	404,7	-0,3%
	P-S2-IC	401,0	AP-S2-IC	404,6	-0,9%
	P-S2-RS	397,5	AP-S2-RS	404,7	-1,8%

Fonte: Próprio autor

Já o modelo numérico apresentado a seguir, para fins de validação, utilizando os dados da viga ensaiada em 600°C do estudo experimental. Admitiu-se um coeficiente de convecção α_c de valor 4 [W/m².K] na região externa, assim como o parâmetro da emissividade na fronteira exposta dos materiais da seção transversal, ε com valor de 0,8 e a temperatura inicial θ_i com valor de 20°C. A curva de aquecimento foi modelada para elevar a temperatura em uma taxa constante de 550°C/hora, por cerca de sessenta e cinco minutos e estabilizando em 600°C até o final da simulação.

Dessa forma a comparação dos valores numéricos é apresentado conforme a Figura 4.28.



As curvas da evolução de temperatura da seção transversal do modelo numérico bidimensional apresentaram um comportamento bem semelhante com as curvas do experimento em escala real. Vale ressaltar que existem diversas variáveis que influenciam diretamente nos mecanismos de transferência de calor dos materiais de acordo com o modo que ocorre o aquecimento e que fogem do escopo desse trabalho.

A Tabela 4.21 apresenta os valores da temperatura em momentos predeterminados da simulação numérica, comparados com os mesmos instantes do experimento em escala real da seção transversal do teste em 600°C.

Tabela 4.21: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal em 600°C

Tempo [min]	(Experimental)		(Numérico)		E.R.
	Posição do termopar	θ [°C]	Posição nodal	θ [°C]	
30	P-S2-OSb	308,9	AP-S2-OSb	301,5	2%
	P-S2-OSt	281,3	AP-S2-OSt	301,5	-7%
	P-S2-OC	157,5	AP-S2-OC	215,7	-37%
	P-S2-WS	243,3	AP-S2-WS	226,8	7%
	P-S2-IC	184,8	AP-S2-IC	221,8	-20%
	P-S2-RS	249,8	AP-S2-RS	232,4	7%
60	P-S2-OSb	568,0	AP-S2-OSb	576,5	-2%
	P-S2-OSt	522,9	AP-S2-OSt	576,5	-10%
	P-S2-OC	421,9	AP-S2-OC	453,3	-7%
	P-S2-WS	499,2	AP-S2-WS	475,2	5%
	P-S2-IC	441,7	AP-S2-IC	468,2	-6%
	P-S2-RS	500,8	AP-S2-RS	481,0	4%
90	P-S2-OSb	632,7	AP-S2-OSb	620,1	2%
	P-S2-OSt	599,8	AP-S2-OSt	620,1	-3%
	P-S2-OC	560,7	AP-S2-OC	573,1	-2%
	P-S2-WS	607,1	AP-S2-WS	594,7	2%
	P-S2-IC	575,8	AP-S2-IC	592,3	-3%
	P-S2-RS	602,4	AP-S2-RS	594,3	1%

Fonte: Próprio autor

Os valores, em geral, apresentam grande similaridade, exceto para os trinta minutos iniciais da simulação numérica nos termopares posicionados na região externa da componente de concreto, posição S2-OC da seção transversal e em seu interior, a posição S2-IC, que apresentaram diferenças mais significativas.

Para a segunda validação numérica do presente trabalho, o aquecimento da seção transversal dos modelos numéricos apenas apresentou o comportamento esperado de elevação de temperatura, utilizando um aquecimento com taxa constante aplicado diretamente nos nós da mesa do perfil estrutural. Diante disso, fica evidente a necessidade de estar calibrando os parâmetros da ferramenta computacional de acordo com os dados colhidos experimentalmente para executar análises numéricas que reflitam os fenômenos reais.

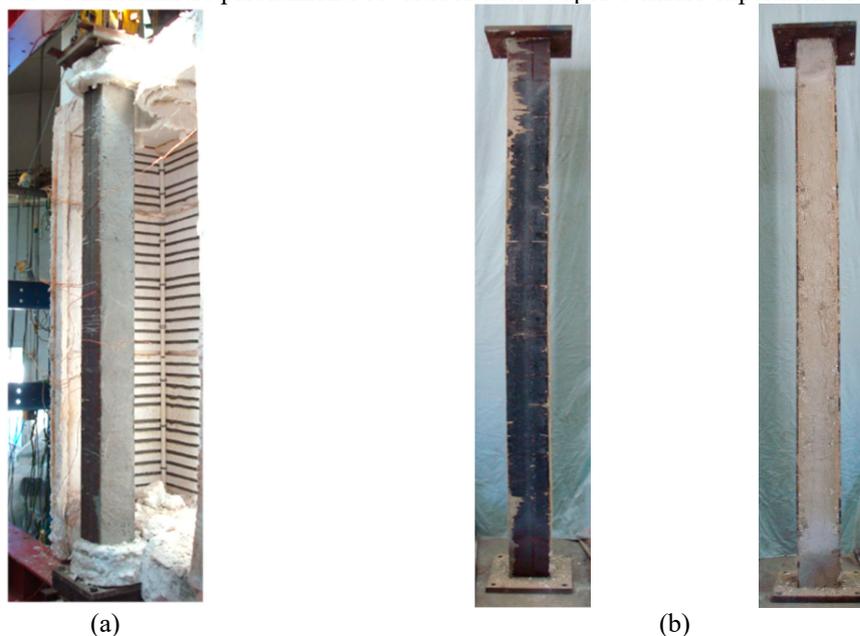
4.4.3 Terceira validação numérica

Para a terceira validação numérica foi utilizado o trabalho experimental e numérico de Rocha (2016) com a finalidade de avaliar o comportamento em situação de incêndio de pilares de aço, mistos de aço e concreto e pilares de concreto inseridos em paredes. Posteriormente, outros autores se utilizaram desse estudo, como Simões, Rocha e Munaiar Neto (2018), assim como por Rossi, Simões e Munaiar Neto (2018), que avaliaram a resistência estrutural de elementos construtivos semelhantes quando submetidos ao efeito da elevação de temperatura.

A elevação de temperatura do estudo experimental procurou representar a curva de incêndio-padrão ISO834:1999 como a elevação de temperatura programada no forno.

A Figura 4.29 apresenta o elemento estrutural posicionado para a realização do ensaio experimental.

Figura 4.29: Pilares mistos parcialmente revestidos antes e após o ensaio experimental



Fonte: Adaptado de Rocha (2016)

Dentre os resultados obtidos pelo estudo em questão, os que possuem maior relevância para a validação do modelo numérico se referem aos de pilares mistos parcialmente revestidos.

A seção transversal da pesquisa foi composta pelo perfil estrutural HEA 220, com aço estrutural de classe S255. O concreto utilizado foi de classe C30/37 reforçado com quatro barras de aço S500 de diâmetro igual a 20 milímetros na direção longitudinal do perfil e estribos de 8 milímetros de espessura espaçados em 150 milímetros entre si.

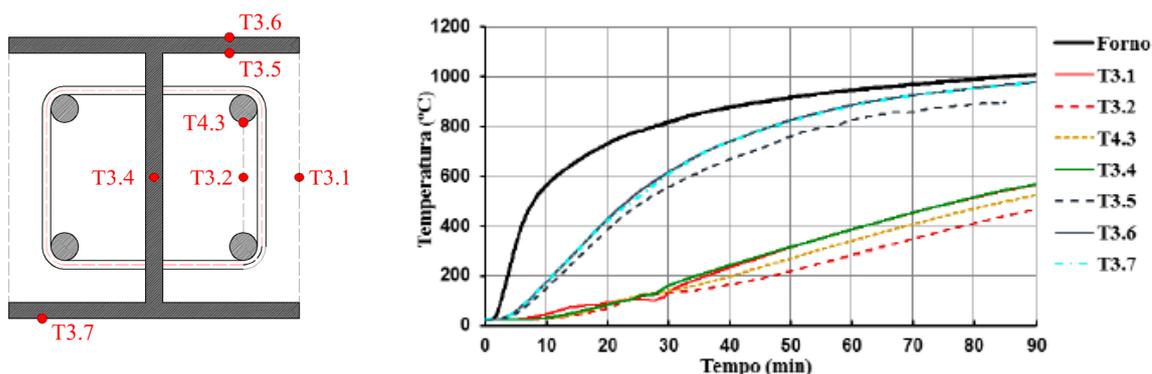
O pilar misto foi então submetido ao carregamento inicial de 30% da capacidade resistente e então o forno foi acionado para a elevação de temperatura do sistema.

Durante o ensaio, foi esperado que a força axial, mensurada pela célula de carga da prensa hidráulica, cresça até um certo valor de pico, resultado do efeito de restrição à deformação térmica imposta no pilar ensaiado. Após um certo tempo, essa força inicia uma redução gradual, consequência direta da deterioração das propriedades mecânicas do aço e do concreto devido à elevação de temperatura do forno. Os ensaios foram finalizados no instante que a força axial retornou ao valor inicial aplicado antes do aquecimento.

Dentre os tipos de seções transversais estudadas, a seção mista de aço e concreto apresentou maior tempo de resistência ao fogo, apontou Rocha (2016).

A Figura 4.30 apresenta as curvas de evoluções de temperaturas nos termopares para a seção transversal mista estudada por Rocha (2016), durante a realização do ensaio experimental.

Figura 4.30: Curvas de evoluções de temperaturas do ensaio experimental

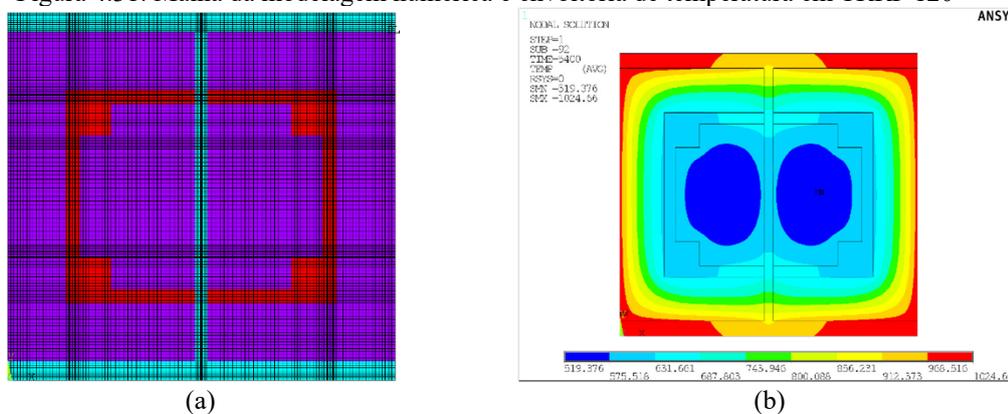


Fonte: Adaptado de Rocha (2016)

Para a validação numérica, a malha bidimensional foi modelada no programa ANSYS e utilizou os mesmos critérios normativos das propriedades térmicas citadas anteriormente.

A Figura 4.31 apresenta a malha da seção transversal utilizando o Elemento Finito “PLANE55”, onde foi refinada de forma que a distância entre os nós fosse a menor possível para que houvesse uma boa resolução dos resultados numéricos nos mesmos pontos em que o autor do estudo experimental posicionou os medidores de temperatura no interior da seção transversal.

Figura 4.31: Malha da modelagem numérica e envoltória de temperatura em TRRF 120



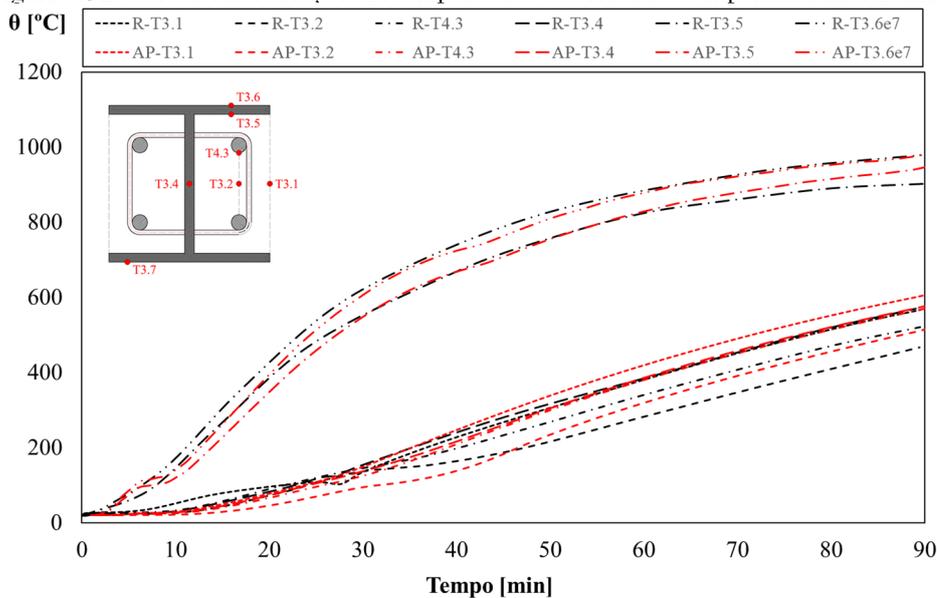
Fonte: Próprio autor

Para a modelagem numérica foi admitido um coeficiente de convecção α_c de valor 25 [W/m².K], a emissividade ε com valor de 0,8 para o aço e 0,7 para o concreto. Temperatura inicial θ_i com valor de 20°C e fator de configuração Φ , também conhecido como fator de sombreamento, igual a 1,0.

Em relação aos parâmetros de emissividade, a recomendação normativa é de que seja utilizado os valores de 0,7, 0,8 e 1,0, para o aço, o concreto e o fogo, respectivamente. Entretanto, dependendo do tipo de incêndio e material os valores de emissividade podem apresentar valores diferentes.

A Figura 4.32 apresenta a comparação dos resultados obtidos numericamente relacionado com os resultados experimentais de Rocha (2016). Em preto os resultados experimentais e em vermelho os resultados numéricos.

Figura 4.32: Curvas das evoluções de temperaturas dos resultados experimentais e numéricos



Fonte: Próprio autor

Os termopares que auferiram as temperaturas apresentadas na Figura 4.32 do estudo de Rocha (2016) estavam localizados a uma altura de 1,5 metros da base do pilar.

Fica evidente que o processo de validação do modelo numérico é de extrema importância, pois mostra que as curvas das temperaturas obtidas para determinar o comportamento termoestrutural da seção transversal devem ser similares e respeitem o comportamento descrito em estudos experimentais de diversos autores.

A Tabela 4.22 apresenta a comparação dos valores da temperatura em diversas posições da seção transversal nos mesmos períodos do ensaio experimental e da simulação numérica.

Tabela 4.22: Comparação dos valores de temperaturas da seção transversal

Tempo [min]	(Experimental)		(Numérico)		E.R.
	Posição do termopar	θ [°C]	Posição nodal	θ [°C]	
30	AP-T3.1	159,8	R-T3.1	140,2	12,3%
	AP-T3.2	101,7	R-T3.2	135,6	-33,3%
	AP-T4.3	132,9	R-T4.3	145,8	-9,7%
	AP-T3.4	145,2	R-T3.4	155,1	-6,8%
	AP-T3.5	566,2	R-T3.5	545,2	3,7%
	AP-T3.6e7	625,4	R-T3.6e7	614,8	1,7%
60	AP-T3.1	428,2	R-T3.1	380,1	11,2%
	AP-T3.2	327,5	R-T3.2	282,3	13,8%
	AP-T4.3	388,7	R-T4.3	340,4	12,4%
	AP-T3.4	395,0	R-T3.4	384,6	2,6%
	AP-T3.5	835,5	R-T3.5	825,5	1,2%
	AP-T3.6e7	884,6	R-T3.6e7	883,0	0,2%
90	AP-T3.1	610,3	R-T3.1	567,8	7,0%
	AP-T3.2	518,2	R-T3.2	466,7	9,9%
	AP-T4.3	574,0	R-T4.3	521,8	9,1%
	AP-T3.4	581,5	R-T3.4	570,1	2,0%
	AP-T3.5	951,8	R-T3.5	903,5	5,1%
	AP-T3.6e7	990,3	R-T3.6e7	979,3	1,1%

Fonte: Próprio autor

Como fica evidente, a diferença relativa em grande parte dos resultados foi inferior a 15% entre os valores obtidos numericamente e os valores disponíveis e coletados no artigo do autor, apresentando assim grande similaridade.

Os parâmetros utilizados no modelo numérico representaram de forma satisfatória a evolução de temperatura esperada em um ensaio em escala real utilizando a curva de aquecimento ISO 834:1999.

Dessa forma, o processo de validação do modelo numérico garante que as temperaturas utilizadas posteriormente como resultados das simulações com a ferramenta computacional e utilizadas para determinar o comportamento termoestrutural do pilar misto parcialmente revestido similares às medidas experimentalmente.

Página intencionalmente deixada em branco

5. PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

Estudos numéricos vêm sendo realizados ao longo dos últimos anos por Piloto et al. (2015, 2017, 2018) com o objetivo de revisar e aprimorar as recomendações normativas do Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005, onde é apresentado o método simplificado de cálculo para a obtenção da resistência à flambagem em pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Os estudos relacionados mostraram que as recomendações normativas apresentam resultados inseguros ou antieconômicos.

Buscando aperfeiçoar o método simplificado de cálculo presente no Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, que apresenta grande similaridade nas recomendações normativas do Anexo G do CEN EN 1994-1-2:2005, é apresentado nesse capítulo uma proposta de aprimoramento do método simplificado de cálculo da resistência dos pilares mistos em situação de incêndio.

A proposta de aprimoramento tem o intuito de alterar a forma de como é calculada a temperatura média nas quatro componentes da seção transversal do pilar misto, fornecendo novas fórmulas, coeficientes, tabelas e limites de aplicação, para que o procedimento de cálculo da resistência à flambagem do elemento misto descreva com maior rigor seu comportamento estrutural em situação de incêndio.

As tabelas contendo as temperaturas médias obtidas por meio das simulações numéricas bidimensionais estão apresentadas no Apêndice B. Já os valores das cargas resistentes e os parâmetros intermediários das formulações estão apresentados no Apêndice C.

Almeja-se que o presente trabalho tenha impacto sobre ambas as normas em uma possível revisão dos procedimentos de cálculo da resistência de pilares mistos em situação de incêndio.

5.1 TEMPERATURA DAS MESAS DO PERFIL DE AÇO

Os resultados numéricos dos modelos bidimensionais da análise térmica foram utilizados para elaborar a formulação da temperatura média das mesas para os quatro tempos requeridos de resistência ao incêndio.

As temperaturas médias das mesas dos 42 perfis estruturais analisados foram compiladas com as temperaturas médias das mesas dos resultados numéricos dos trabalhos publicados por Piloto et al. (2015, 2017, 2018). A base de dados para a elaboração da formulação da temperatura média das mesas foi formada por 83 tipos diferentes de seções

transversais, 42 brasileiras e 41 europeias. Entretanto, com alguns parâmetros diferentes para a mesma seção transversal, foram utilizados um total de 123 resultados numéricos de análises térmicas dos 83 perfis estruturais.

Foi imposto um limite de aplicabilidade para as formulações, o que resultou na utilização de 110 resultados numéricos das simulações térmicas.

As condições gerais do limite de aplicabilidade dessa etapa de dimensionamento são para perfis estruturais de pilares mistos parcialmente revestidos expostos ao incêndio-padrão ISO 834-1:1999 com as condições do fator de massividade ser maior que 9,0 [m⁻¹] e a espessura das mesas serem menores que 30 milímetros.

A temperatura média nas mesas do perfil de aço deve ser determinada por:

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p + k_{f,t} \cdot (t_f) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.1)$$

Onde t é o TRRF expresso em minutos, $\theta_{f,t}$ é a temperatura média das mesas do perfil de aço, expressa em graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$], $\theta_{0,t}$ é uma temperatura de referência, expressa em graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$], c conforme Tabela 5.1. O fator de massividade da seção mista $(u/A)_p$, determinado conforme Equação (4.1). Os parâmetros $k_{IM,t}$ e $k_{f,t}$ são coeficientes empíricos que estão diretamente relacionados com o fator de massividade e com a espessura da mesa em cada tempo requerido de resistência ao fogo, respectivamente. Os parâmetros e coeficientes são definidos conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil

Resistência ao incêndio-padrão	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m. $^{\circ}\text{C}$]	$k_{f,t}$ [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$]
TRRF 30	730	1,80	-5,50
TRRF 60	905	1,50	-3,30
TRRF 90	965	1,30	-1,00
TRRF 120	1015	1,15	-0,64

Fonte: Próprio autor

A partir da obtenção da temperatura média das mesas por meio da Equação (5.1) é possível o cálculo dos fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, através de interpolação linear dos valores dos intervalos de temperaturas presentes na Tabela 3.3, utilizados para minorar as propriedades mecânicas das mesas do aço do perfil estrutural.

A parcela de contribuição da rigidez efetiva e a força axial de plastificação de cálculo das duas mesas dependem do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento do aço do perfil estrutural em situação de incêndio.

Sendo conhecidos os coeficientes de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ é possível determinar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade devido às altas temperaturas nas mesas da seção transversal, através das Equações (5.2) e (5.3).

$$f_{y,\theta,f} = f_y \cdot k_{y,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.2)$$

$$E_{a,\theta,f} = E_a \cdot k_{E,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.3)$$

Por fim, a força axial de plastificação e a rigidez efetiva das mesas da seção transversal podem ser determinados através das Equações (5.4) e (5.5).

$$N_{fi,pl,Rd,f} = \frac{2 \cdot (b_c \cdot t_f \cdot f_{y,\theta,f})}{\gamma_{M,fi,a}} \quad [\text{N}] \quad (5.4)$$

$$(EI)_{fi,ef,f} = \frac{E_{a,\theta,f} \cdot t_f \cdot b_c^3}{6} \quad [\text{N}\cdot\text{mm}^2] \quad (5.5)$$

5.2 TEMPERATURA DA ALMA DO PERFIL DE AÇO

Diferentemente do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013 onde há uma redução de parte da alma do perfil de aço, a presente proposta de aperfeiçoamento considera a área integral da alma para o cálculo da resistência dessa componente.

A alma da seção transversal do perfil de aço tem suas propriedades mecânicas alteradas pelas altas temperaturas de uma situação de incêndio, conforme as considerações apresentadas na seção 3.4.1.1 desse trabalho.

Para que seja determinada a temperatura média da alma do perfil de aço um limite de aplicabilidade nas formulações deve ser observado. As equações se enquadram para perfis estruturais com um fator de massividade maior que 9,0 $[\text{m}^{-1}]$ e com espessura da mesa menor que 30 milímetros. Também foram estabelecidos parâmetros considerando uma diferenciação a respeito da relação entre a largura e o comprimento do perfil estrutural.

A temperatura média na alma do perfil de aço deve ser determinada por meio da Equação (5.6).

$$\theta_{w,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p + k_{w,t} \cdot \left(\frac{1}{A_w}\right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.6)$$

Onde t é o TRRF expresso em minutos, $\theta_{w,t}$ é a temperatura média da alma do perfil de aço, expressa em graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$], $\theta_{0,t}$ é uma temperatura fictícia, expressa em graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$], c conforme Tabela 5.2. O parâmetro $(u/A)_p$ é o fator de massividade da seção mista, determinado conforme Equação (4.1). Os parâmetros $k_{IM,t}$ e $k_{w,t}$ são coeficientes empíricos que estão diretamente relacionados com o fator de massividade e com o inverso da área da alma do perfil de aço, para cada tempo requerido de resistência ao fogo, respectivamente.

Os parâmetros e coeficientes para a determinação da temperatura média na alma estão definidos conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros para a determinação da temperatura média na alma do perfil

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 1,7$			Todos os demais		
	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m. $^{\circ}\text{C}$]	$k_{w,t}$ [mm 2 . $^{\circ}\text{C}$]	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m. $^{\circ}\text{C}$]	$k_{w,t}$ [mm 2 . $^{\circ}\text{C}$]
TRRF 30	-47,65	23,06	-0,05	35,51	6,92	0,24
TRRF 60	-25,59	38,25	-0,15	17,72	22,72	0,08
TRRF 90	86,59	42,09	-0,19	27,76	35,83	-0,19
TRRF 120	204,78	41,28	-0,19	84,58	40,88	-0,29

Fonte: Próprio autor

Os coeficientes da Equação (5.6) são diferenciados de acordo com o critério da razão entre a altura e largura da seção transversal do pilar misto parcialmente revestido. O primeiro critério de aplicabilidade da Tabela 5.2 consiste em atender a relação $d_c/b_c \leq 1,7$. Para os demais casos é recomendado utilizar o segundo conjunto de coeficientes estabelecidos na mesma tabela.

A partir da obtenção da temperatura média da alma, por meio da Equação (5.6), é então possível o cálculo dos fatores de redução $k_{y,0}$ e $k_{E,0}$, através de interpolação linear dos valores dos intervalos de temperaturas presentes na Tabela 3.3, utilizados para minorar as propriedades mecânicas da alma do perfil estrutural de aço.

Por sua vez, a resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio interfere diretamente no cálculo da rigidez efetiva da parcela de contribuição de resistência da alma para o perfil estrutural. Diferentemente do que é previsto no item B.3.2.3.3 do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013, para o cálculo da rigidez efetiva da alma do perfil de aço o módulo de elasticidade sofre reduções em decorrência das altas temperaturas, conforme

Tabela 3.3. A força axial de plastificação de cálculo também é afetada devido ao coeficiente de redução da tensão de escoamento em altas temperaturas.

Sendo conhecidos os coeficientes de redução analíticos $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ é possível determinar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade efetivos devido às altas temperaturas na alma da seção transversal, através das Equações (5.7) e (5.8).

$$f_{y,\theta,w} = f_y \cdot k_{y,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.7)$$

$$E_{a,\theta,w} = E_a \cdot k_{E,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.8)$$

A força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio deverão ser determinadas pelas Equações (5.9) e (5.10).

$$N_{fi,pl,Rd,w} = f_{y,\theta,w} \cdot \left[\frac{(d_c - 2t_f) \cdot t_w}{\gamma_{M,fi,a}} \right] \quad [\text{N}] \quad (5.9)$$

$$(EI)_{fi,ef,w} = E_{a,\theta,w} \cdot \left[\frac{(d_c - 2t_f) \cdot t_w^3}{12} \right] \quad [\text{N.mm}^2] \quad (5.10)$$

5.3 CONCRETO

O campo de temperaturas desenvolvido no núcleo de concreto entre as mesas e a alma do perfil de aço da seção transversal mista tem como base o critério da isotérmica de 500°C, segundo recomendação da norma CEN EN 1992-1-2:2004. A hipótese considera que a porção de concreto onde há temperaturas superiores a 500°C deve ser negligenciada, já para o núcleo de concreto de temperatura inferior a 500°C é assumido de que possui capacidade resistente para os critérios de dimensionamento.

Levando em consideração os dados obtidos numericamente do campo de temperaturas do concreto presente entre as mesas e a alma da seção transversal mista, foi elaborada a Equação (5.11), que estima a temperatura média no interior do núcleo de concreto, considerando que a seção resistente de concreto apresenta temperatura máxima de 500°C. Os coeficientes dos parâmetros da Equação (5.11) estão apresentados na Tabela 5.3.

$$\theta_{c,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p + k_{Ac,t} \cdot \left(\frac{1}{A_c} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.11)$$

Tabela 5.3: Coeficientes para a estimar a temperatura média do núcleo de concreto

Resistência ao incêndio-padrão	$\theta_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m]	$k_{Ac,t}$ [mm.m²]
TRRF 30	27	13,00	0,45
TRRF 60	55	16,80	2,75
TRRF 90	105	16,00	6,75
TRRF 120	125	15,80	11,00

Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro $\left(\frac{1}{A_c}\right)$ da Equação (5.11), a unidade de entrada do valor de (A_c) é [m²].

A formulação proposta levou em consideração os resultados numéricos dos 42 perfis estruturais brasileiros e dos 41 perfis estruturais europeus. O Apêndice B apresenta com maiores detalhes os resultados numéricos que levaram a elaboração da equação que estima a temperatura média do concreto na seção transversal do pilar misto parcialmente revestido em situação de incêndio.

Se a temperatura estimada pela Equação (5.11) for superior a 500°C, então significa que toda a parcela de contribuição do concreto no cálculo da força axial de plastificação e rigidez efetiva devem ser desprezadas.

Diferente do item B.3.2.4.1 do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013 onde a espessura da camada externa de concreto a ser desprezada não possui distinção em ambas as direções, os resultados numéricos revelaram que há uma variação da distância horizontal diferente da distância vertical da camada de concreto pelo critério da isotérmica de 500°C, para cada um dos tempos requeridos de resistência ao fogo.

A presente proposta de aperfeiçoamento admite uma diferenciação horizontal e vertical da espessura da camada de concreto a ser desprezada para cada um dos tempos requeridos de resistência ao fogo. Essa diferença é justificada pelo fato de a seção transversal não possuir dois planos de simetria iguais.

A camada externa horizontal a ser negligenciada deve ser calculada por meio da Equação (5.12), os coeficientes dos parâmetros presentes na equação estão apresentados na Tabela 5.4.

$$b_{c,fi,h} = b_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p^2 + k_{Ac,t} \cdot \left(\frac{1}{A_c}\right) \quad [\text{mm}] \quad (5.12)$$

Tabela 5.4: Coeficientes para a redução da espessura horizontal do concreto

Resistência ao incêndio-padrão	$b_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m²]	$k_{Ac,t}$ [mm.m²]
TRRF 30	10,7	0,0025	0,025
TRRF 60	17,5	0,0055	0,450
TRRF 90	18,0	0,0355	1,150
TRRF 120	14,0	0,1311	1,950

Fonte: Próprio autor

Já a camada externa vertical a ser negligenciada deve ser calculada por meio da Equação (5.13). Os coeficientes presentes na equação são determinados conforme os limites de aplicabilidade e os valores apresentados na Tabela 5.5.

$$b_{c,fi,v} = b_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p^2 + k_{bc,t} \cdot \left(\frac{1}{b_c}\right) + k_{ft,t} \cdot \left(\frac{1}{t_f}\right) \quad [\text{mm}] \quad (5.13)$$

Tabela 5.5: Coeficientes e parâmetros para a redução da espessura vertical do concreto

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 2,0$				Todos os demais			
	$b_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m ²]	$k_{bc,t}$ [mm.m]	$k_{ft,t}$ [mm.m]	$b_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m ²]	$k_{bc,t}$ [mm.m]	$k_{ft,t}$ [mm.m]
TRRF 30	-1,35	0,005	0,40	0,08	0,31	0,015	0,45	0,03
TRRF 60	8,15	0,035	2,15	0,05	18,55	0,235	-6,85	0,02
TRRF 90	-25,25	0,195	13,15	-0,11	-20,95	0,255	12,65	-0,09
TRRF 120	-54,55	0,435	22,85	-0,21	93,55	1,950	-53,65	-0,91

Fonte: Próprio autor

Para o parâmetro $\left(\frac{1}{A_c}\right)$ da Equação (5.12), a unidade do valor de (A_c) é [m²]. Para o parâmetro $\left(\frac{1}{b_c}\right)$ da Equação (5.13), a unidade do valor de b_c é [m], assim como o parâmetro $\left(\frac{1}{t_f}\right)$ a unidade do valor de t_f também é [m]. Há também uma diferenciação no limite de aplicabilidade entre o primeiro e o segundo conjunto de coeficientes para estimar o valor da espessura vertical de concreto, a relação entre a altura da seção transversal e sua largura.

A partir da obtenção da temperatura média do núcleo de concreto da seção transversal mista e dos valores das distâncias horizontal e vertical da camada de concreto a ser negligenciada para os critérios de dimensionamento, a etapa seguinte é obtenção do fator de redução $k_{c,\theta}$, através da interpolação linear dos valores dos intervalos de temperaturas presentes na Tabela 3.9, utilizados para minorar as propriedades mecânicas do concreto devido altas temperaturas.

Por sua vez, a resistência característica à compressão do concreto em situação de incêndio $f_{ck,\theta}$ interfere diretamente no resultado da força axial de plastificação de cálculo e da rigidez efetiva, parcelas de contribuição da resistência do concreto em situação de incêndio.

Sendo conhecido o coeficiente de redução analítico $k_{c,\theta}$ é possível determinar a resistência característica à compressão e o módulo de elasticidade do concreto devido às altas temperaturas, por meio das Equações (5.14) e (5.15).

$$f_{ck,\theta} = f_{ck} \cdot k_{c,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.14)$$

$$E_{c1,\theta} = f_{ck,\theta} / \varepsilon_{c1,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.15)$$

A força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio devem ser determinadas pelas Equações (5.16) e (5.17).

$$N_{fi,pl,Rd,c} = \frac{0,86 \cdot \{ [(d_c - 2t_f - 2b_{c,fi,v}) \cdot (b_c - t_w - 2b_{c,fi,h})] - A_{s,\theta} \} \cdot f_{ck,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}} \quad [\text{N}] \quad (5.16)$$

$$(EI)_{fi,ef,c} = E_{c1,\theta} \cdot \left\{ \left[\frac{(d_c - 2t_f - 2b_{c,fi,v}) \cdot ((b_c - 2b_{c,fi,h})^3 - t_w^3)}{12} \right] - I_{s,\theta} \right\} \quad [\text{N}\cdot\text{mm}^2] \quad (5.17)$$

Considerações a respeito da área e da inércia da armadura longitudinal de aço em situação de incêndio estão presentes na Seção 5.4 desse trabalho.

5.4 TEMPERATURA DA ARMADURA LONGITUDINAL

Para que seja determinada a temperatura média da seção transversal da armadura longitudinal do pilar misto, foi imposto um limite de aplicabilidade em todos os resultados numéricos compilados para elaborar a Equação (5.18).

As condições gerais do limite de aplicabilidade dessa etapa de dimensionamento são para perfis estruturais de pilares mistos parcialmente revestidos expostos ao incêndio-padrão ISO 834-1:1999, o fator de massividade deve ser maior que 9,0 [m⁻¹] e a espessura das mesas menores que 30 milímetros.

A temperatura média nas armaduras longitudinais deve ser determinada por:

$$\theta_{s,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t} \cdot (u/A)_p + k_{s,t} \cdot (u_s) \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.18)$$

Onde t é o TRRF expresso em minutos, $\theta_{s,t}$ é a temperatura média das armaduras longitudinais, expressa em graus Celsius [°C], $\theta_{0,t}$ é uma temperatura fictícia de referência, expressa em graus Celsius [°C], c conforme Tabela 5.6. O parâmetro $(u/A)_p$ é o fator de massividade da seção mista, determinado conforme Equação (4.1). Os parâmetros $k_{IM,t}$ e $k_{s,t}$ são coeficientes empíricos que estão diretamente relacionados com o fator de massividade e com o parâmetro u_s em cada tempo requerido de resistência ao fogo, respectivamente.

A expressão para determinar o valor de u_s está apresentada conforme a Equação (5.19).

$$u_s = \sqrt{(u_1 + t_f)^2 + u_2^2 + \phi^2} \quad [\text{mm}] \quad (5.19)$$

As simulações numéricas mostraram uma forte relação entre o aumento da temperatura média da seção transversal da armadura longitudinal com alguns parâmetros geométricos da seção transversal, como a distância horizontal e vertical u_1 e u_2 , a espessura da mesa t_f e o diâmetro da barra utilizada ϕ em [mm].

Os parâmetros e coeficientes necessários para estimar a temperatura média da armadura longitudinal são definidos conforme a Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Parâmetros para determinar a temperatura média na armadura longitudinal

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 1,7$ $(u/A)_p \leq 20,0$			Todos os demais		
	$\theta_{0,t}$ [°C]	$k_{IM,t}$ [m.°C]	$k_{s,t}$ [°C/mm]	$\theta_{0,t}$ [°C]	$k_{IM,t}$ [m.°C]	$k_{s,t}$ [°C/mm]
TRRF 30	290	1,05	-1,20	220	8,85	-1,35
TRRF 60	435	8,65	-1,65	505	11,50	-2,45
TRRF 90	535	12,90	-1,75	690	10,85	-2,75
TRRF 120	675	12,50	-1,95	725	12,65	-2,35

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros da Equação (5.18) são diferenciados de acordo com o critério da razão entre a altura e largura da seção transversal do pilar misto parcialmente revestido e o fator de massividade.

Para utilizar o primeiro conjunto de parâmetros da Tabela 5.6 a seção transversal deve satisfazer o primeiro critério de aplicabilidade que consiste em atender simultaneamente a relação $d_c/b_c \leq 1,7$ e o fator de massividade $(u/A)_p \leq 20,0$. Para os demais casos é recomendado utilizar o segundo conjunto de parâmetros estabelecidos na mesma tabela.

A partir da obtenção da temperatura média das mesas por meio da Equação (5.18) é possível o cálculo dos fatores de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{ES,\theta}$, através de interpolação linear dos valores dos intervalos de temperaturas presentes na Tabela 3.6, utilizados para minorar as propriedades mecânicas da armadura longitudinal do núcleo de concreto da seção transversal dos pilares mistos parcialmente revestidos.

A parcela de contribuição da rigidez efetiva e a força axial de plastificação de cálculo à compressão axial das quatro barras das armaduras longitudinais dependem da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade em situação de incêndio.

Sendo conhecidos os coeficientes de redução analíticos $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$ é possível determinar a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade efetivos devido às altas temperaturas nas armaduras longitudinais dos pilares mistos parcialmente revestidos, através das Equações (5.20) e (5.21).

$$f_{ys,\theta} = f_y \cdot k_{ys,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.20)$$

$$E_{s,\theta} = E_a \cdot k_{Es,\theta} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.21)$$

Após o cálculo dos coeficientes $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$ é possível estimar os valores da força axial de plastificação de cálculo e da rigidez efetiva das barras da armadura em situação de incêndio por meio das Equações (5.22) e (5.23).

$$N_{fi,pl,Rd,s} = \frac{A_{s,\theta} \cdot f_{ys,\theta}}{\gamma_{M,fi,s}} \quad [\text{N}] \quad (5.22)$$

$$(EI)_{fi,ef,s} = E_{E,\theta} \cdot I_{s,\theta} \quad [\text{N.mm}^2] \quad (5.23)$$

Entretanto, existem algumas condições peculiares a respeito da área e da inércia das armaduras longitudinais que devem ser levadas em consideração e não estão bem estabelecidas na seção B.3.2.5 do Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013. Mesmo que não haja a diferenciação entre as direções da espessura da camada de concreto a ser desprezada, essas distâncias afetam diretamente o cálculo da inercia e da área de aço das armaduras longitudinais.

Tendo em vista a posição da armadura na seção mista parcialmente revestida, a depender da espessura da camada de concreto a ser desprezada, a área e a inercia das armaduras longitudinais podem ser total ou parcialmente afetadas.

Para $b_{c,fi,h} < \left(u_2 - \frac{\phi}{2}\right)$ e $b_{c,fi,v} < \left(u_1 - \frac{\phi}{2}\right)$:

$$A_{s,\theta} = 4 \cdot \phi^2 \quad [\text{mm}^2] \quad (5.24)$$

$$I_{s,\theta} = \left[\frac{\phi^4}{12} + \phi^2 \cdot \left(\frac{b_c}{2} - u_2 \right)^2 \right] \cdot 4 \quad [\text{mm}^4] \quad (5.25)$$

Para $b_{c,fi,h} < \left(u_2 - \frac{\phi}{2}\right)$ e $\left(u_1 - \frac{\phi}{2}\right) \leq b_{c,fi,v} \leq \left(u_1 + \frac{\phi}{2}\right)$:

$$A_{s,\theta} = \left[\left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) \cdot \phi \right] \cdot 4 \quad [\text{mm}^2] \quad (5.26)$$

$$I_{s,\theta} = \left[\frac{\left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) \cdot \phi^3}{12} + \phi \cdot \left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) \cdot (b_c - u_2)^2 \right] \cdot 4 \quad [\text{mm}^4] \quad (5.27)$$

Para $\left(u_2 - \frac{\phi}{2}\right) \leq b_{c,fi,h} \leq \left(u_2 + \frac{\phi}{2}\right)$ e $b_{c,fi,v} < \left(u_1 - \frac{\phi}{2}\right)$:

$$A_{s,\theta} = \left[\phi \cdot \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right) \right] \cdot 4 \quad [\text{mm}^2] \quad (5.28)$$

$$I_{s,\theta} = \left\{ \frac{\phi \cdot \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right)^3}{12} + \left[\phi \cdot \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right) \cdot \left[b_c - b_{c,fi,h} - \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right) \right]^2 \right] \right\} \cdot 4 \quad [\text{mm}^4] \quad (5.29)$$

Para $\left(u_2 - \frac{\phi}{2}\right) \leq b_{c,fi,h} \leq \left(u_2 + \frac{\phi}{2}\right)$ e $\left(u_1 - \frac{\phi}{2}\right) \leq b_{c,fi,v} \leq \left(u_1 + \frac{\phi}{2}\right)$:

$$A_{s,\theta} = \left[\left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) \cdot \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right) \right] \cdot 4 \quad [\text{mm}^2] \quad (5.30)$$

$$I_{s,\theta} = \left\{ \frac{\left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) + \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right)^3}{12} + \left(u_1 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,v} \right) \cdot \left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right) \cdot \left[b_c - b_{c,fi,h} - \frac{\left(u_2 + \frac{\phi}{2} - b_{c,fi,h} \right)}{2} \right]^2 \right\} \cdot 4 \quad [\text{mm}^4] \quad (5.31)$$

O conjunto de Equações de (5.24) até (5.31) apresentam uma forma simplificada de cálculo da área e da inércia das quatro barras da armadura longitudinal dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Essas equações são válidas apenas se a seção transversal das barras forem consideradas quadradas, com suas arestas ϕ , com valores equivalentes à raiz quadrada da área da seção circular original da barra da armadura longitudinal.

5.4.1 Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio

Os valores dos resultados das Equações (4.2) até (4.8) do método simplificado da ABNT NBR 14323:2013, considerando as temperaturas obtidas por meio da proposta de aperfeiçoamento para a obtenção da força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio estão apresentados no Apêndice B.

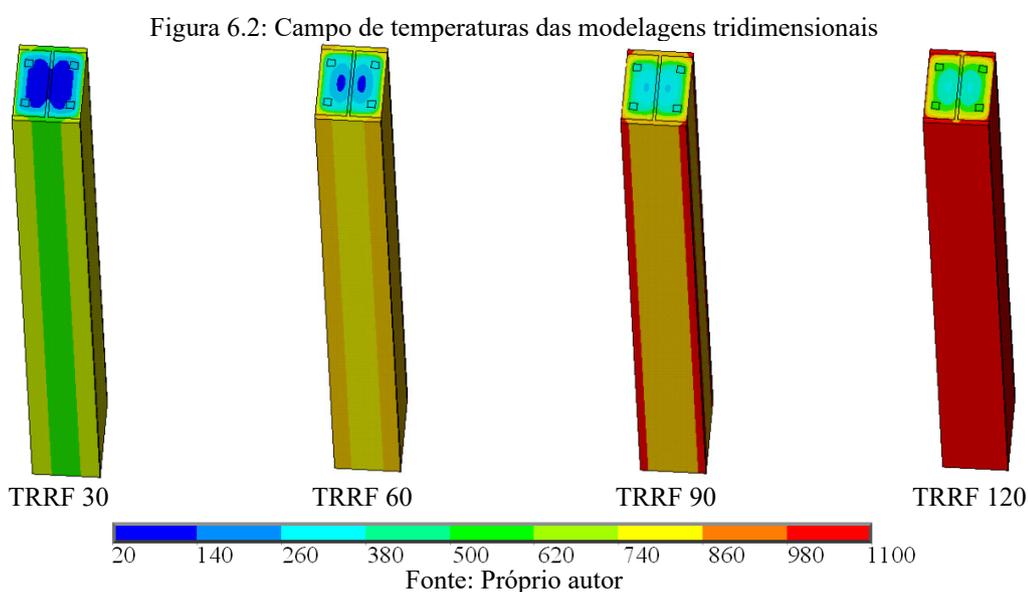
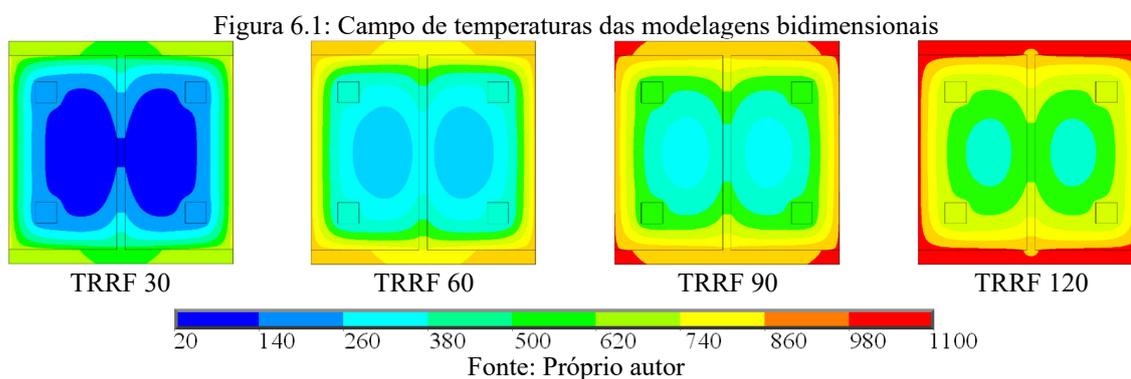
O termo “proposta de aprimoramento” ou “aprimoramento” será utilizado para se referir aos resultados analíticos das forças resistentes, considerando as novas formulações de obtenção das temperaturas médias nas quatro componentes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE TÉRMICA NÃO LINEAR

Os resultados da análise térmica foram obtidos exclusivamente por meio de simulações numéricas realizadas com a utilização do programa ANSYS. As análises numéricas das simulações dos pilares mistos parcialmente revestidos foram realizadas seguindo os parâmetros normativos da ABNT NBR 14323:2013 e do CEN EN 1994:2005, respeitando a curva de elevação de temperatura dos gases, conforme o modelo de incêndio-padrão ISO 834-1:1999.

A Figura 6.1 mostram os resultados 2D do campo de temperaturas obtido por meio da modelagem numérica do pilar misto parcialmente revestido de seção transversal W250x101,0. Já Figura 6.2 apresenta os resultados 3D do campo de temperaturas da modelagem numérica para o mesmo pilar misto parcialmente revestido, exposto a elevação de temperatura segundo a curva de incêndio-padrão ISO834-1:1999, após 30, 60, 90 e 120 minutos.



O campo de temperaturas foi registrado para a classe de resistência ao fogo correspondente, e aplicado ao modelo mecânico para a análise termoestrutural posterior. O Apêndice B apresenta os resultados das temperaturas médias em todas as seções estudadas.

A Tabela 6.1 apresenta os valores mínimos e máximos do campo de temperaturas desenvolvidos nas seções transversais em estudo.

Tabela 6.1: Temperatura mínima e máxima dos perfis estruturais em [°C]

Perfil	(u/A) _p	TRRF 30		TRRF 60		TRRF 90		TRRF 120	
		T. Mín.	T. Máx.	T. Mín.	T. Máx.	T. Mín.	T. Máx.	T. Mín.	T. Máx.
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	96,4	807,4	275,1	936,7	447,0	1001,6	578,7	1045,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	97,1	803,4	280,3	935,3	453,9	1001,1	586,6	1045,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	61,6	807,3	144,4	936,5	306,3	1001,3	428,2	1046,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	62,3	805,0	147,8	935,8	312,0	1001,0	435,1	1045,4
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	63,3	802,0	152,4	934,5	319,6	1000,4	443,7	1045,1
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	63,6	800,1	153,9	933,7	322,0	1000,2	446,7	1044,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	63,5	799,1	154,0	933,3	322,3	1000,1	447,2	1044,5
W 250 x 73,0 (H)	15,78	94,1	803,8	266,3	935,4	437,7	1001,0	596,4	1045,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	94,2	802,6	267,5	934,9	439,5	1000,8	571,6	1045,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	94,0	800,7	269,0	934,2	441,9	1000,6	574,7	1045,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	95,0	798,3	272,1	933,3	445,3	1000,3	578,4	1045,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	95,0	795,7	273,0	932,1	446,5	1000,0	580,1	1044,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	59,3	802,5	139,6	934,6	299,9	1000,5	422,2	1045,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	59,7	800,8	141,3	934,1	303,1	1000,2	426,0	1044,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	60,0	799,0	142,7	933,4	305,8	1000,0	429,4	1044,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	60,6	797,1	144,5	932,5	308,5	999,8	432,4	1044,4
W 360 x 91,0 (H)	13,54	68,8	801,1	162,2	934,0	323,9	1000,2	445,9	1044,8
W 360 x 101,0 (H)	13,45	69,8	799,1	166,0	933,3	328,6	1000,0	451,2	1044,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	70,5	797,4	169,1	932,6	332,6	999,8	455,7	1044,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	72,4	795,4	176,4	931,6	340,7	999,5	464,5	1044,3
W 410 x 46,1	19,25	124,0	806,4	358,7	936,3	528,9	1001,5	652,9	1045,6
W 410 x 53,0	16,26	94,9	806,4	254,0	936,1	416,1	1001,3	541,4	1045,5
W 410 x 60,0	16,15	94,2	804,5	252,2	935,4	414,4	1001,0	539,8	1045,3
W 410 x 75,0	15,95	97,3	801,2	262,6	934,1	425,7	1000,5	551,6	1044,9
W 410 x 85,0	15,85	99,0	798,8	268,2	933,1	431,8	1000,2	557,8	1044,7
W 460 x 52,0	17,60	105,3	806,2	301,2	936,0	465,2	1001,3	589,6	1045,7
W 460 x 68,0	17,34	105,4	801,7	302,3	934,4	466,9	1000,7	591,3	1045,7
W 460 x 82,0	14,82	80,9	800,6	210,5	933,7	368,0	1000,2	490,0	1044,9
W 460 x 97,0	14,65	80,9	800,6	210,5	933,7	368,0	1000,2	490,0	1044,9
W 460 x 106,0	14,57	83,6	795,8	220,3	931,6	377,8	999,5	500,5	1044,2
W 530 x 66,0	15,93	90,6	804,9	242,2	935,3	398,1	1000,9	519,4	1045,2
W 530 x 74,0	15,83	90,3	802,7	242,5	934,5	398,7	1000,5	520,0	1044,9
W 530 x 85,0	15,79	90,7	800,0	244,4	933,4	400,9	1000,1	522,3	1044,7
W 530 x 92,0	13,32	59,6	801,2	144,6	933,9	287,2	1000,2	402,3	1044,7
W 530 x 101,0	13,25	59,8	799,4	145,7	933,2	288,7	999,9	404,0	1044,5
W 530 x 109,0	13,19	60,1	797,8	147,2	932,5	290,9	999,8	406,4	1044,4
W 610 x 125,0	12,00	45,5	796,2	114,9	931,7	223,2	999,3	333,2	1044,6
W 610 x 140,0	11,94	46,0	793,5	116,4	930,4	227,0	998,9	337,3	1044,1
W 610 x 155,0	9,45	28,0	797,8	73,6	932,4	113,9	999,5	172,4	1044,1
W 610 x 174,0	9,40	28,3	795,0	75,5	931,4	116,1	999,1	178,8	1044,0
W 610 x 195,0	9,33	28,6	792,3	76,9	930,2	117,9	998,7	183,9	1043,6
W 610 x 217,0	9,28	28,9	789,4	78,1	928,7	119,3	998,3	188,1	1043,4

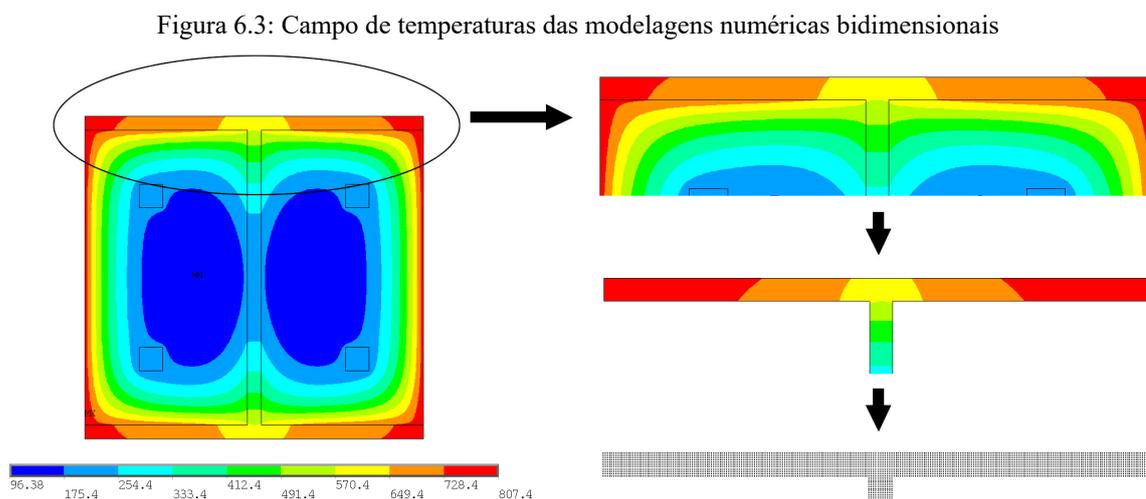
Fonte: Próprio autor

Nota-se que temperatura mínima no interior da seção transversal é menor quando mais robustas forem as seções transversais. O fator de massividade, que é um parâmetro geométrico da seção transversal, segue esse mesmo princípio, seu valor decresce quanto mais robusta for a seção transversal.

6.1.1 Temperaturas nas mesas do perfil de aço estrutural

A temperatura média nas mesas do perfil estrutural foi obtida pela média aritmética da temperatura de cada nó da malha bidimensional correspondente a essa componente.

A Figura 6.3 apresenta resumidamente o processo para obter a temperatura média das mesas do perfil de aço da simulação numérica.

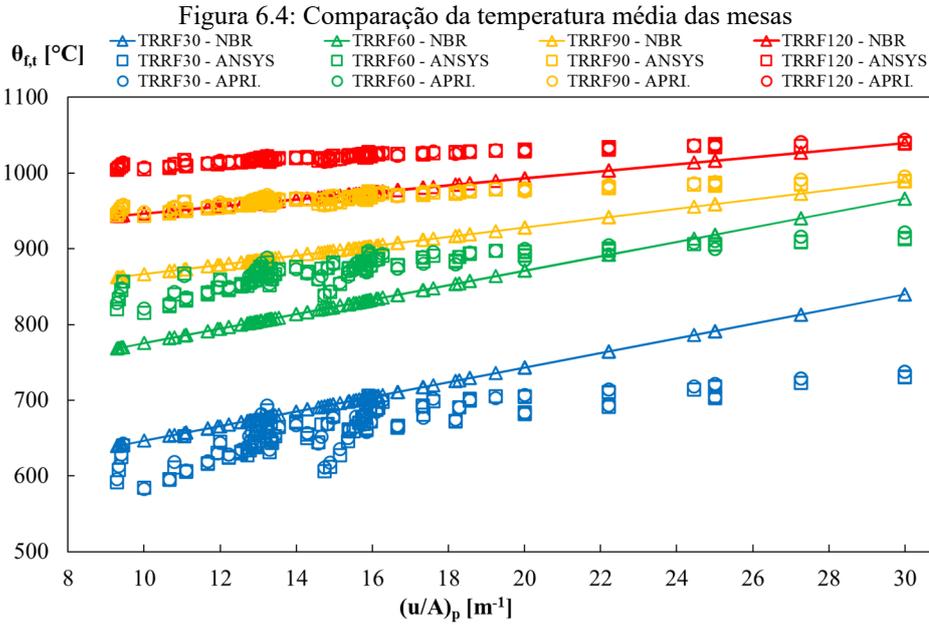


Fonte: Próprio autor

A temperatura média nas mesas dos perfis estruturais foi fundamental para a elaboração das formulações da Seção 5.1.

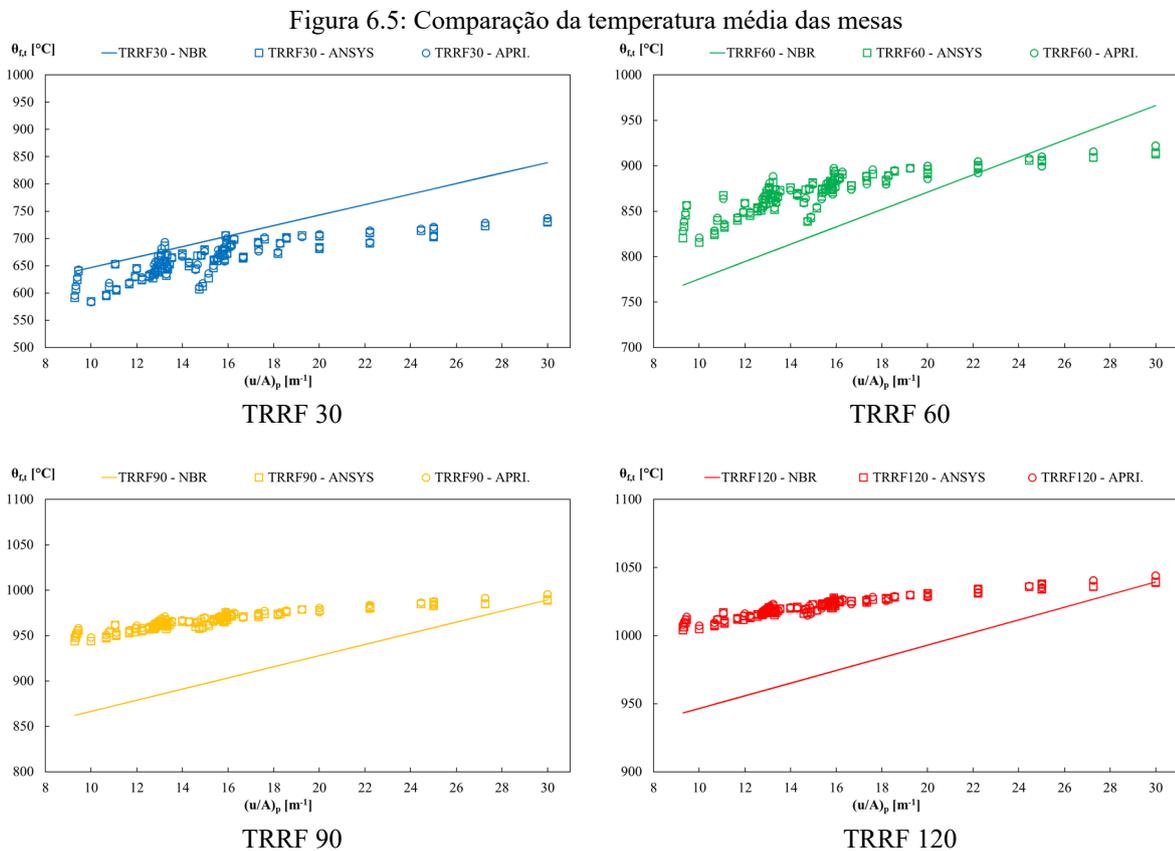
Além dos resultados numéricos dos 42 perfis estruturais de aço proposto pelo presente trabalho, foram incluídos os resultados numéricos de outros 41 perfis estruturais provenientes dos trabalhos de Piloto et al. (2015, 2017, 2018), totalizando 83 seções transversais.

Na Figura 6.4 é possível analisar graficamente o comportamento das temperaturas médias calculadas pela norma ABNT NBR 14323:2013, pelos resultados numéricos do ANSYS e pela formulação da proposta de aprimoramento.



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 6.5 apresenta separadamente as temperaturas médias das mesas para cada tempo requerido de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

Nota-se diferenças relativas máximas da ordem de 15%, em módulo, entre as temperaturas médias prescritas na norma e as temperaturas médias obtidas dos modelos numéricos, principalmente em tempos superiores a 30 minutos de exposição ao incêndio e para seções transversais com menor fator de massividade.

Já a diferença relativa entre a temperatura obtida por meio da análise numérica e a temperatura estimada pela Equação (5.1) é pequena, da ordem de 1%. Nota-se também que os valores da temperatura média da proposta de aperfeiçoamento seguem o mesmo padrão de dispersão dos valores dos resultados numéricos em todas as seções transversais analisadas.

Denota-se que, para tempos requeridos de resistência ao fogo superiores a 30 minutos, a temperatura obtida por meio da norma ABNT NBR 14323:2013 é inferior a temperatura obtida pelo modelo numérico, para a mesma seção transversal.

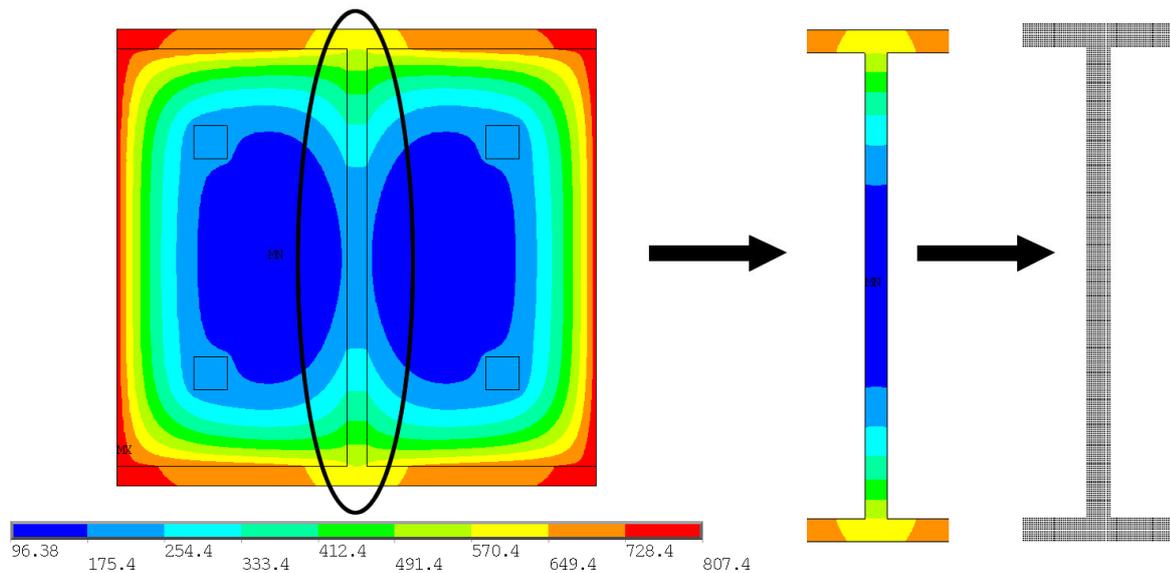
Quanto maior a temperatura desenvolvida em elementos estruturais, maior será a depreciação das propriedades mecânicas dos materiais que compõe a seção transversal, isso significa que o elemento estrutural resistirá cada vez menos aos esforços solicitantes. Então, quando as recomendações normativas admitirem valores inferiores de temperaturas aos que realmente estão sendo auferidos na seção transversal, significa que a norma está contra a segurança, ao passo que está admitindo uma resistência estrutural superior em decorrência dessa menor temperatura.

6.1.2 Temperaturas na alma do perfil de aço estrutural

De forma semelhante às mesas do perfil estrutural, a temperatura média na alma do perfil estrutural foi obtida pela média aritmética da temperatura nodal da malha bidimensional correspondente a essa componente.

A Figura 6.6 apresenta resumidamente o processo para obter a temperatura média das mesas do perfil de aço da simulação numérica.

Figura 6.6: Campo de temperaturas das modelagens numéricas bidimensionais

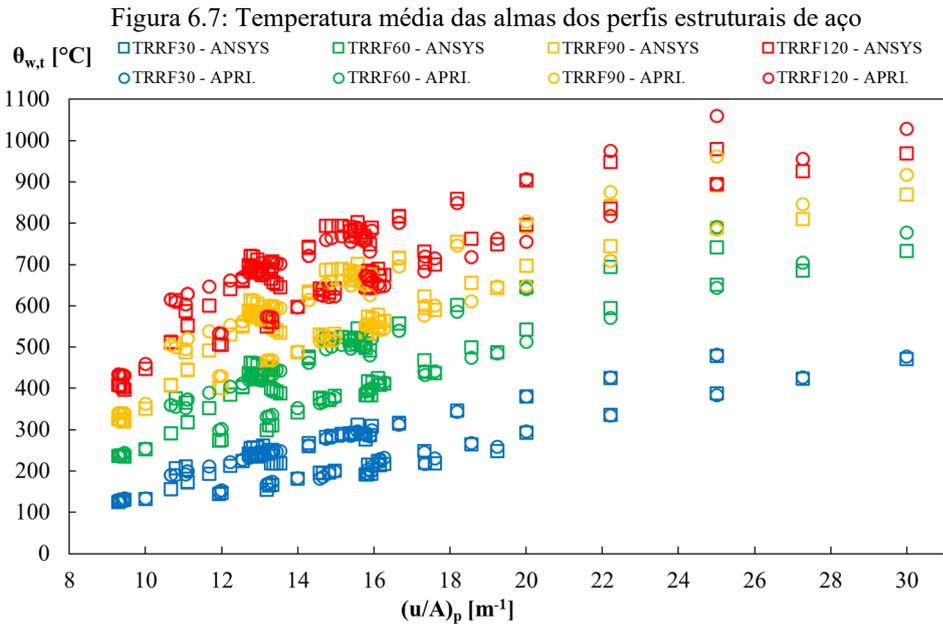


Fonte: Próprio autor

A temperatura média na alma dos perfis estruturais foram fundamentais para a elaboração das formulações da Seção 5.2. Além dos resultados numéricos dos 42 perfis estruturais de aço proposto pelo presente trabalho, foram incluídos os resultados numéricos de outros 41 perfis estruturais provenientes dos trabalhos de Piloto et al. (2015, 2017, 2018), totalizando 83 seções transversais analisadas.

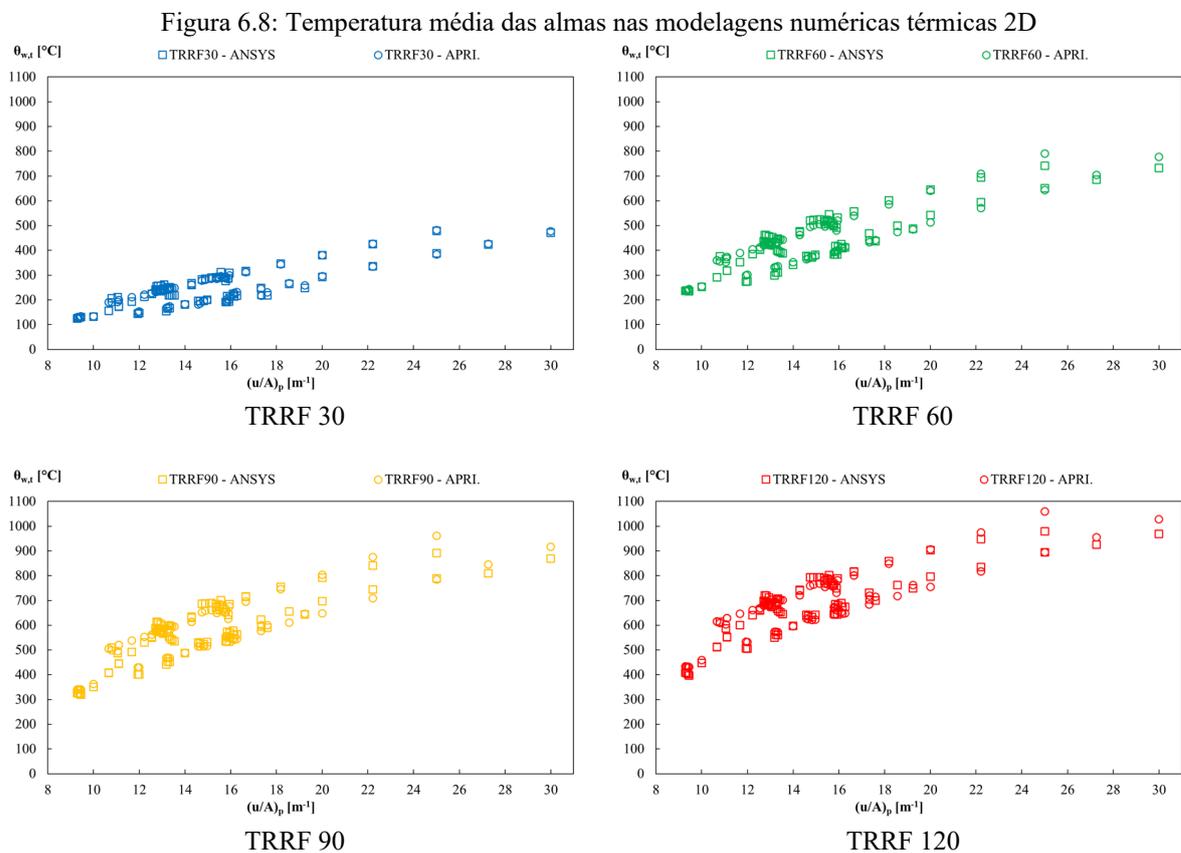
Com os valores das temperaturas médias das almas provenientes dos campos de temperaturas das simulações numéricas, foi possível a elaboração da Equação (5.6). É importante lembrar que a temperatura média da alma não é diretamente calculada pelas formulações da ABNT NBR 14323:2013, a resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio no item B.3.2.3.2 é obtida a partir do cálculo de um coeficiente que depende principalmente da altura da seção transversal.

Por meio da Figura 6.7 é possível analisar graficamente a variação das temperaturas médias das almas de todos os perfis estruturais metálicos selecionados. As temperaturas foram calculadas conforme formulação da proposta de aprimoramento da Seção 5.2, é possível também visualizar as temperaturas médias das almas provenientes dos resultados numéricos do ANSYS para cada tempo requerido de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 6.8 apresenta separadamente as temperaturas médias das almas dos perfis estruturais de aço submetidos ao incêndio, para cada tempo requerido de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

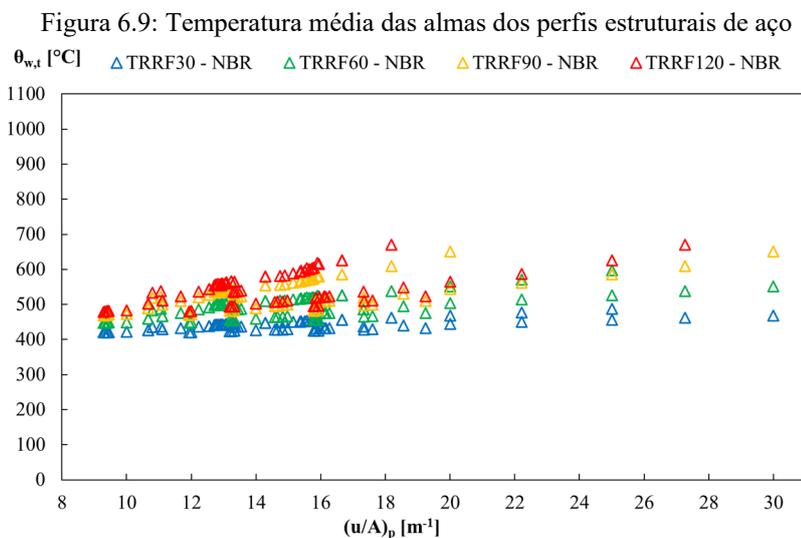
Graficamente percebe-se que a dispersão dos valores dos resultados numéricos das temperaturas médias foi acompanhada pelos resultados da formulação da proposta de aprimoramento. As diferenças mais significativas entre as temperaturas médias obtidas pelo modelo numérico e pela formulação do aprimoramento foram para tempos requeridos de resistência ao fogo de 90 e 120 minutos e para perfis estruturais com fator de massividade maiores que 22,0. O erro relativo entre os valores dos resultados será discutido na Seção 7.

Como o cálculo da temperatura média da alma, segundo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013, despreza uma parte da altura da alma, a temperatura média da alma auferida pelas simulações numéricas possui significativa diferença quando comparada com a temperatura calculada conforme recomendações normativas.

Isso se deve ao fato de que a redução da altura da alma segue o critério da isotérmica de 400°C, onde até essa temperatura o aço do perfil estrutural não sofre redução em sua resistência ao escoamento, a Tabela 3.3 demonstra esse fato.

Mesmo assim a temperatura média da alma foi calculada para auxiliar no entendimento do comportamento da elevação de temperatura, segundo as recomendações da norma ABNT NBR 14323:2013. Primeiramente foi calculado a parte da alma do perfil de aço a ser desprezado $h_{w,fi}$, em seguida foi calculada a resistência ao escoamento da alma do perfil de aço $f_{y,\theta,w}$, com esse valor foi então calculado o valor de $k_{y,\theta}$ pela Tabela 3.3 e assim, por correspondência, foi estimado o valor da temperatura média da alma do perfil de aço.

A Figura 6.9 apresenta os valores das temperaturas médias nas almas dos perfis de aço em situação de incêndio.



Fonte: Próprio autor

Vale sempre lembrar que quando a norma recomenda utilizar um valor de temperatura média inferior à que realmente está sendo desenvolvida na seção transversal do pilar, a norma está contra a segurança.

6.1.3 Temperatura média do concreto e seção resistente

De forma semelhante aos procedimentos anteriores, a temperatura média no núcleo de concreto da seção transversal mista foi obtida pela média aritmética da temperatura de cada nó da malha bidimensional correspondente a essa componente.

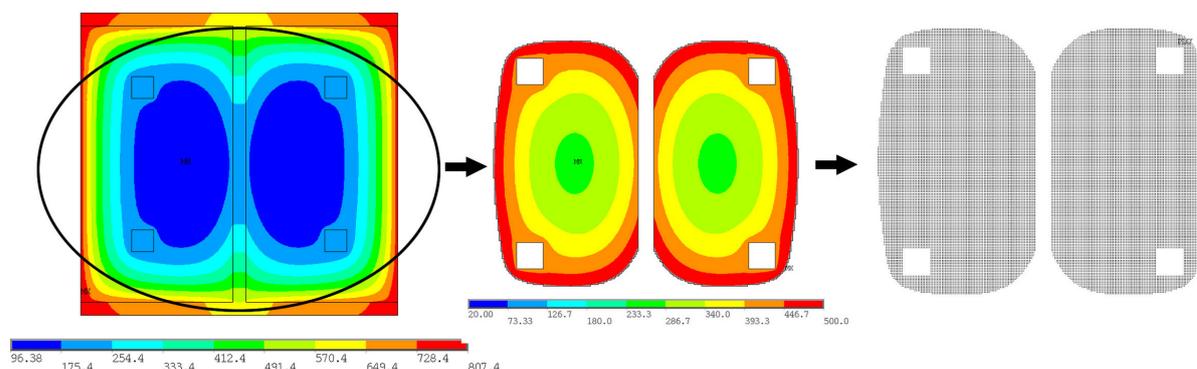
A norma europeia CEN EN 1992-1-2:2004 no item B.1 e B.2 recomenda dois métodos alternativos abordar a perda da capacidade resistente do concreto em situação de incêndio, o “Método da Isotérmica de 500°C” e o “Método das Zonas”, porém, no presente trabalho foi empregado apenas o primeiro método.

Portanto, foi observado o critério da isotérmica de 500°C, onde toda a porção de concreto acima dessa temperatura é desprezada. Nesse sentido, foi desconsiderado a parte do concreto de temperatura superior a 500°C e os nós pertencentes ao campo de temperaturas com limite de 500°C foram utilizados para determinar a temperatura média do núcleo de concreto da seção transversal mista. Considera-se que a região externa a isotérmica de 500°C já tenha perdido significativamente a resistência estrutural devido a ação do fogo.

Vale lembrar que na Tabela B.9 do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013 permite que seja assumida temperatura média do concreto superior a 500°C, a depender do fator de massividade da seção transversal.

A Figura 6.10 apresenta, resumidamente, o processo para obter a temperatura média do concreto da seção transversal mista da simulação numérica.

Figura 6.10: Campo de temperaturas das modelagens numéricas bidimensionais

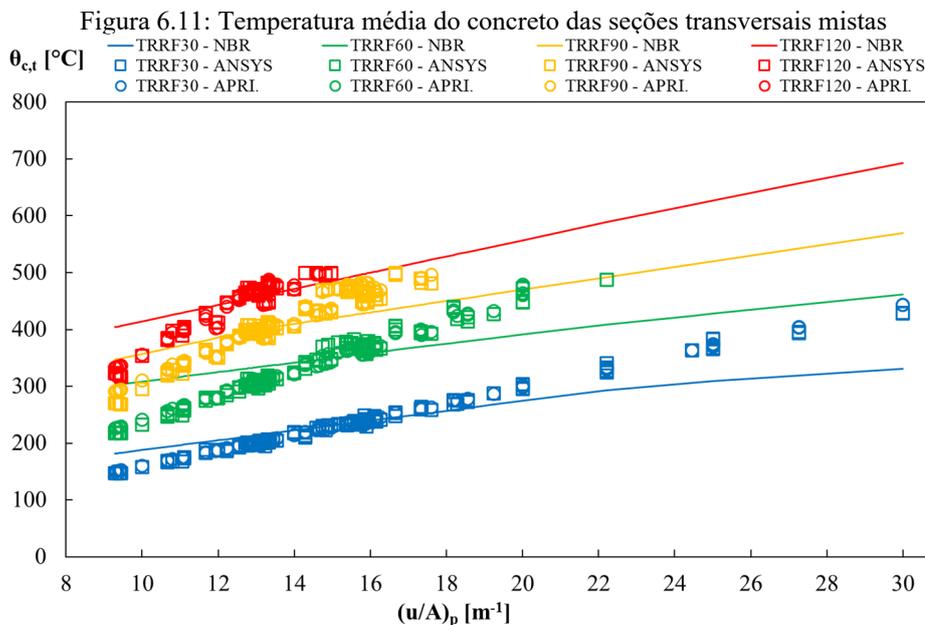


Fonte: Próprio autor

Novamente, foram utilizados os resultados numéricos das 83 seções transversais. A temperatura média do núcleo de concreto da seção transversal mista foi fundamental para a elaboração das formulações da Seção 5.3.

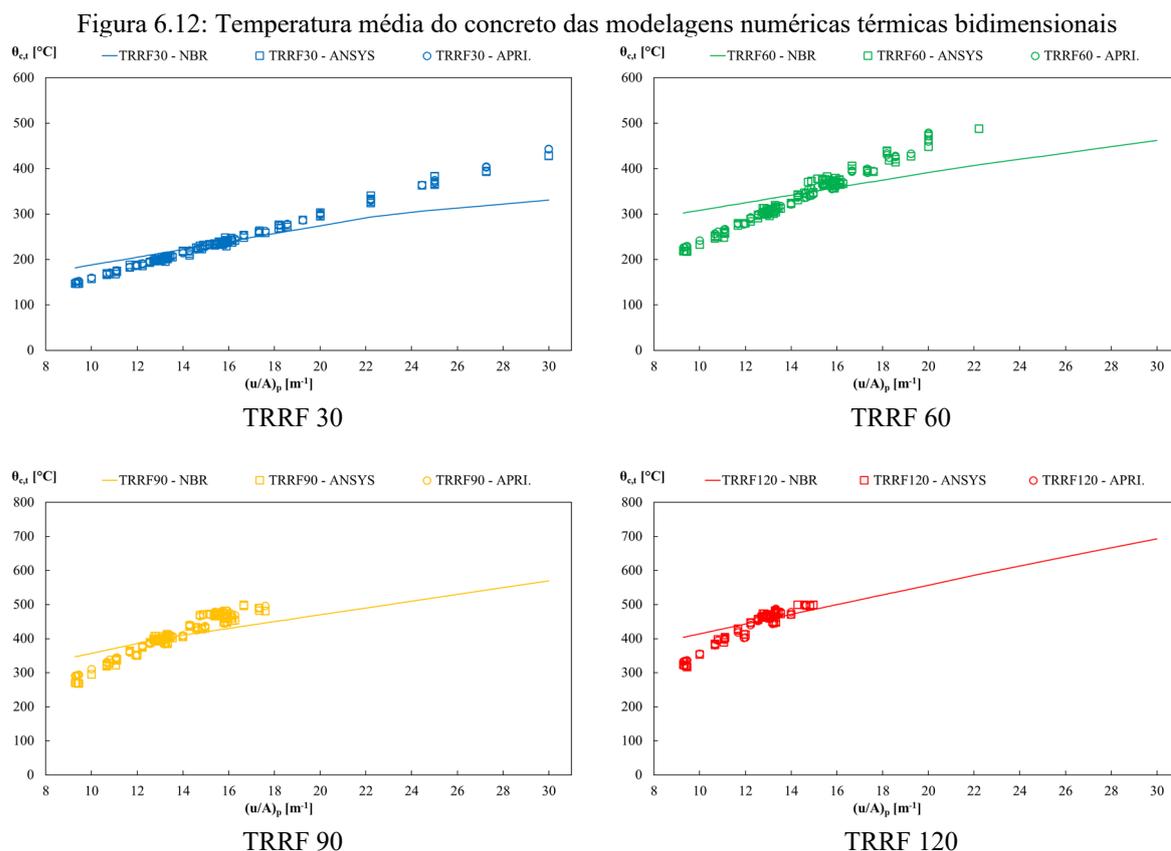
Em posse da média das temperaturas provenientes dos campos de temperaturas das simulações numéricas, foi possível a elaboração da Equação (5.11).

Por meio da Figura 6.11 é possível analisar graficamente a variação das temperaturas médias no núcleo de concreto de todos os perfis estruturais de aço selecionados. As temperaturas foram calculadas conforme recomendações da ABNT NBR 14323:2013, pela formulação da proposta de aprimoramento da Seção 5.3. É possível também visualizar as temperaturas médias do concreto provenientes dos resultados numéricos do ANSYS para cada tempo requerido de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 6.12 apresenta separadamente as temperaturas médias das almas dos perfis estruturais de aço submetidos ao incêndio, para cada tempo requerido de resistência ao fogo.



Fonte: Próprio autor

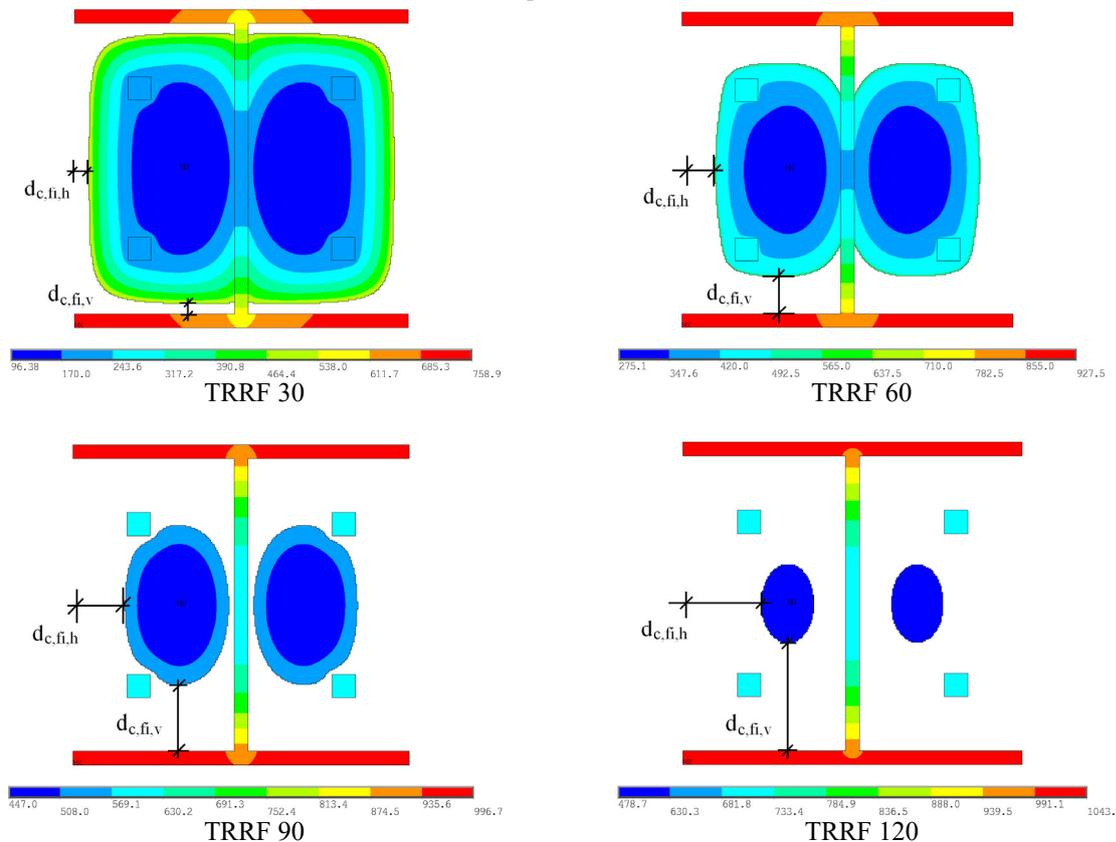
Graficamente percebe-se que a dispersão dos valores dos resultados numéricos das temperaturas médias foi acompanhada pelos resultados da formulação da proposta de aprimoramento. Entretanto, quando comparadas com as temperaturas obtidas por meio da ABNT NBR 14323:2013, a norma se mostrou contra a segurança nos tempos requeridos de resistência ao fogo de 30, 60 e 90 para os perfis estruturais com fator de massividade maior que 16,0. O erro relativo entre os valores dos resultados será discutido em capítulo próprio.

6.1.3.1 Redução da espessura do concreto

Já para os valores da camada externa de concreto a ser desprezada, cujas espessuras são designadas por $b_{c,fi,h}$ para a espessura horizontal e $b_{c,fi,v}$ para a espessura vertical, foram coletadas após serem aplicados filtros nos resultados numéricos do ANSYS, para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

A Figura 6.13 apresenta de forma genérica o procedimento gráfico para a coleta das respectivas distâncias.

Figura 6.13: Campo de temperaturas da isotérmica de 500°C



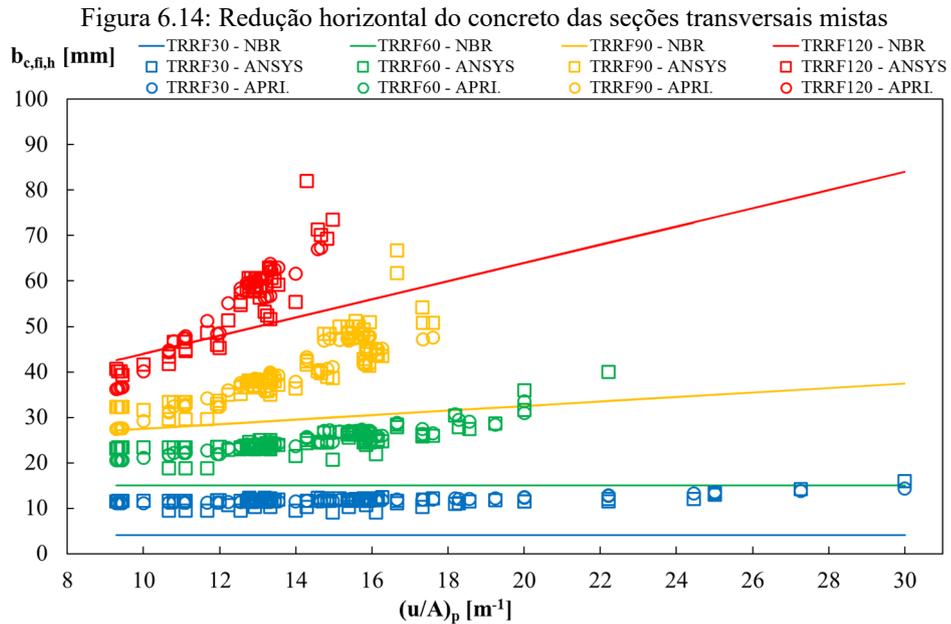
Fonte: Próprio autor

As distâncias horizontais e verticais do concreto da seção transversal mista em diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo foram fundamentais para a elaboração das Equações (5.12) e (5.13) da Seção 5.3.

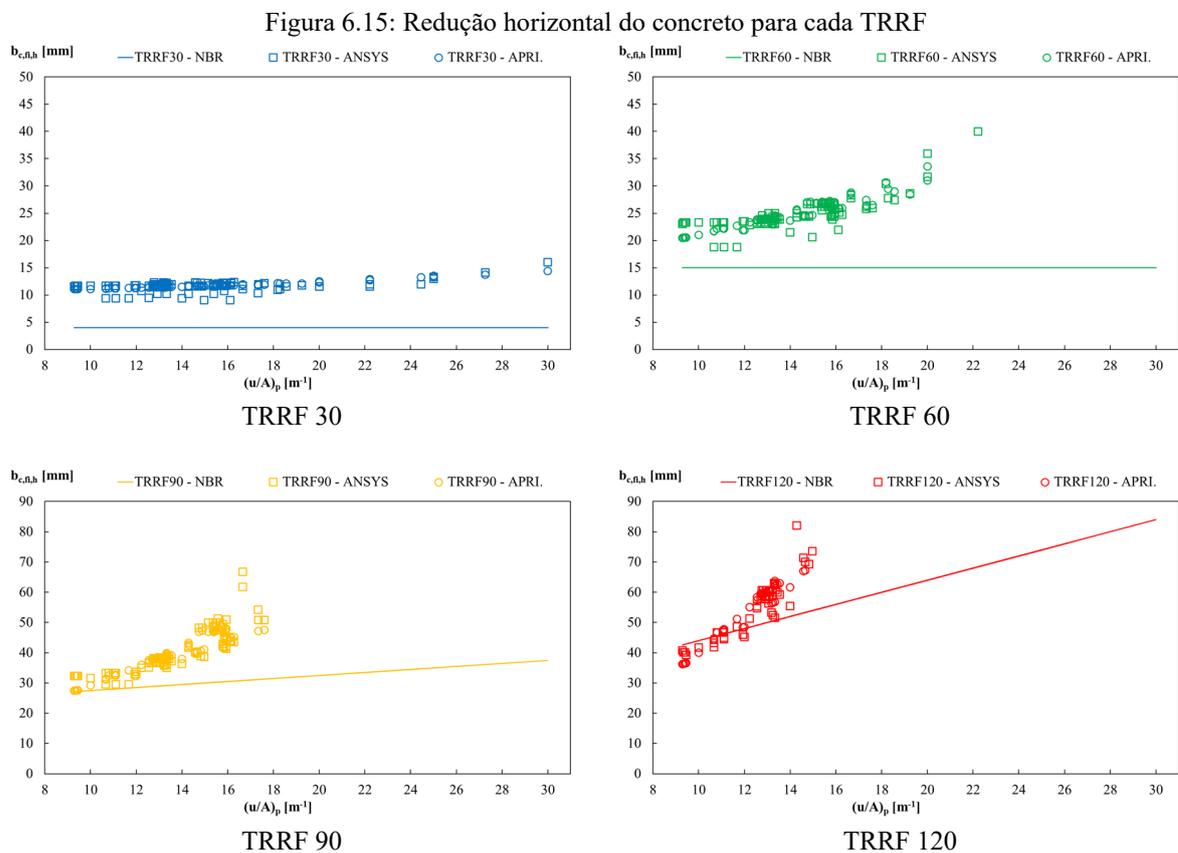
Vale lembrar que para o caso do TRRF 90 e TRRF 120 da Figura 6.13, a seção transversal da armadura longitudinal não se apresenta em nenhum intervalo do conjunto de Equações de (5.24) até (5.31), por esse motivo sua contribuição na resistência estrutural não deve ser considerada nessa hipótese.

6.1.3.1.1 Redução da espessura horizontal de concreto

Na Figura 6.14 estão apresentados os valores dos resultados da recomendação normativa ABNT NBR 14323:2013, os resultados provenientes dos modelos numéricos do ANSYS, e os resultados das formulações da proposta de aperfeiçoamento da redução horizontal de concreto $b_{c,fi,h}$, para todos os perfis estruturais em estudo. Tanto para elaborar as formulações, quanto para elaborar os gráficos, foram utilizadas as mesmas 83 seções transversais das seções anteriores.



Já a Figura 6.15 apresenta separadamente os resultados da redução horizontal do concreto para cada tempo requerido de resistência ao fogo.

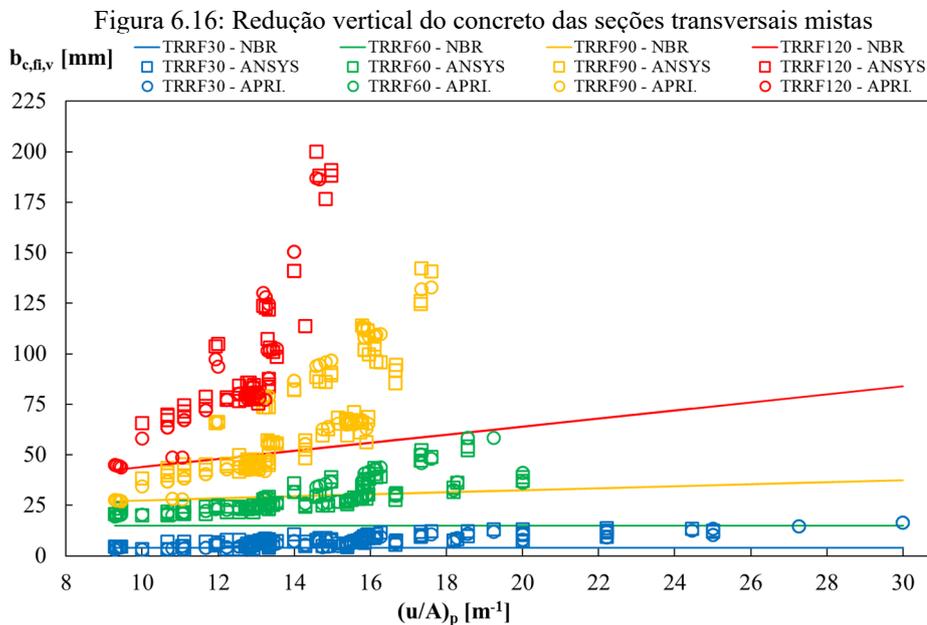


Graficamente fica evidente que a dispersão dos valores dos resultados numéricos das distâncias horizontais foi acompanhada pela dispersão dos resultados da formulação da proposta de aprimoramento. Entretanto, quando comparadas com as distâncias obtidas por meio da ABNT NBR 14323:2013, a norma se mostrou contra a segurança em praticamente todos os tempos requeridos de resistência ao fogo e para todos os perfis estruturais, exceto para uma pequena porção de perfis com fator de massividade menor que 12,0 em TRRF 90. O erro relativo entre os valores dos resultados será discutido em capítulo próprio.

6.1.3.1.2 Redução da espessura vertical de concreto

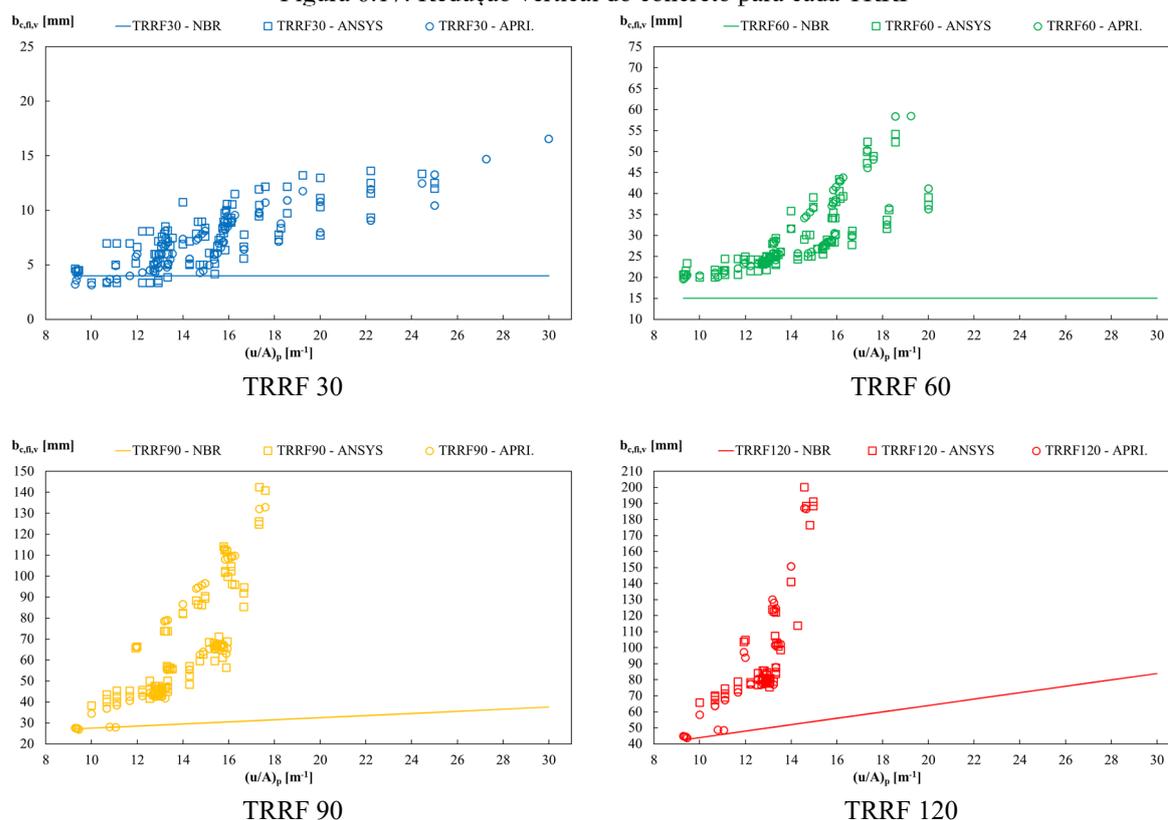
Novamente, as mesmas 83 seções transversais foram utilizadas, tanto para elaborar as formulações, quanto para elaborar os gráficos apresentados nessa seção.

Na Figura 6.16 estão apresentados os valores dos resultados da recomendação normativa ABNT NBR 14323:2013, os resultados provenientes dos modelos numéricos do ANSYS, e os resultados das formulações da proposta de aperfeiçoamento da redução vertical de concreto $b_{c,fi,v}$, para todos os perfis estruturais em estudo.



Já a Figura 6.17 apresenta separadamente os resultados da redução horizontal do concreto para cada tempo requerido de resistência ao fogo.

Figura 6.17: Redução vertical do concreto para cada TRRF



Fonte: Próprio autor

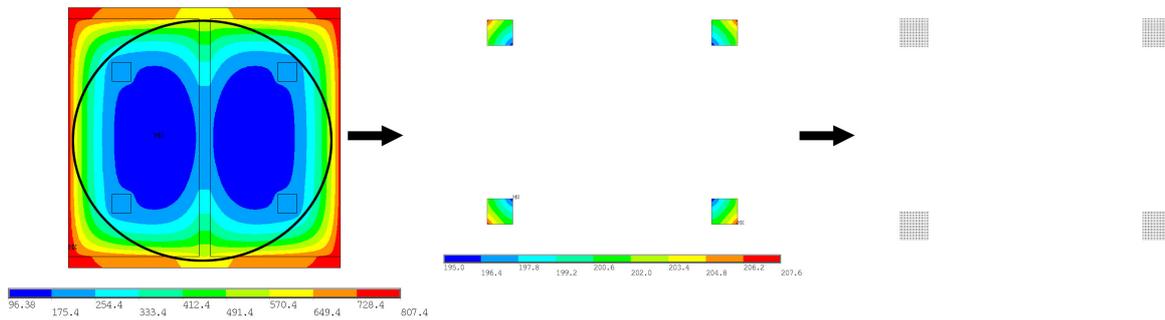
Graficamente a dispersão dos valores dos resultados numéricos das distâncias verticais foi acompanhada pela dispersão dos resultados das distâncias verticais da formulação da proposta de aprimoramento. Entretanto, quando comparadas com as distâncias verticais obtidas por meio da ABNT NBR 14323:2013, a norma se mostrou contra a segurança em praticamente todos os tempos requeridos de resistência ao fogo e para todos os perfis estruturais. O erro relativo entre os valores dos resultados será discutido em capítulo próprio.

6.1.4 Temperatura da armadura longitudinal

De forma semelhante aos procedimentos anteriores a temperatura média na armadura longitudinal foi obtida pela média aritmética da temperatura individual de cada nó da malha bidimensional correspondente a essa componente.

A Figura 6.18 apresenta resumidamente o processo para obter a temperatura média da armadura longitudinal da seção transversal mista da simulação numérica.

Figura 6.18: Campo de temperaturas das armaduras longitudinais



Fonte: Próprio autor

A temperatura média das armaduras longitudinais das seções transversais mistas foram fundamentais para compor a base de dados dos resultados numéricos, possibilitando a elaboração das formulações da Seção 5.2.

Em posse da média da temperatura proveniente do campo de temperaturas das simulações numéricas, foi possível a elaboração da Equação (5.18).

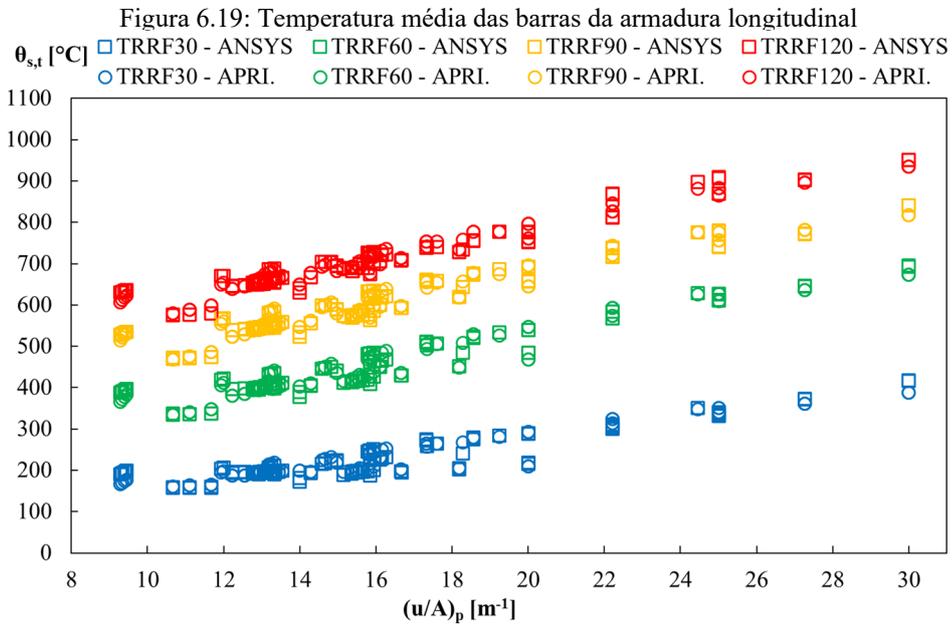
É importante lembrar que a temperatura da armadura longitudinal não é diretamente calculada pelas formulações da ABNT NBR 14323:2013, a resistência ao escoamento das barras da armadura em situação de incêndio no item B.3.2.5.1 é obtida a partir do cálculo de um coeficiente que depende principalmente da média geométrica das distâncias do posicionamento das barras da armadura na seção transversal.

Por meio da Figura 6.19 é possível analisar graficamente a variação das temperaturas médias das armaduras longitudinais de todas as seções transversais estudadas. As temperaturas foram calculadas conforme a proposta de aprimoramento da Seção 5.4, é possível também visualizar as temperaturas médias das armaduras longitudinais provenientes dos resultados numéricos do ANSYS para cada tempo requerido de resistência ao fogo.

Graficamente percebe-se que a dispersão dos valores dos resultados numéricos das temperaturas médias foi acompanhada pelos resultados da formulação da proposta de aprimoramento. As diferenças mais significativas entre as temperaturas médias obtidas pelo modelo numérico e pela formulação do aprimoramento foram entre perfis de mesmo fator de massividade, mas que apresentavam características de largura e altura diferentes entre si. Isso causou um erro relativo um pouco maior entre alguns perfis estruturais.

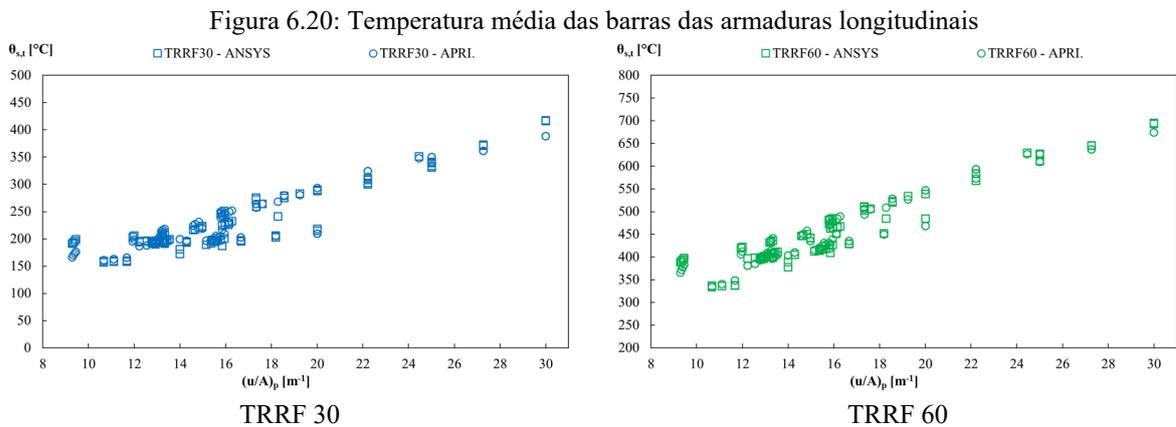
Como a Equação (5.18), usada para estimar a temperatura nas barras da armadura, possui duas variáveis dependentes, uma do fator de seção e outra de parâmetros geométricos, o resultado da equação pode compensar o erro relativo dos valores do ANSYS fornecendo dois valores diferentes de temperatura média para duas seções geometricamente diferentes que

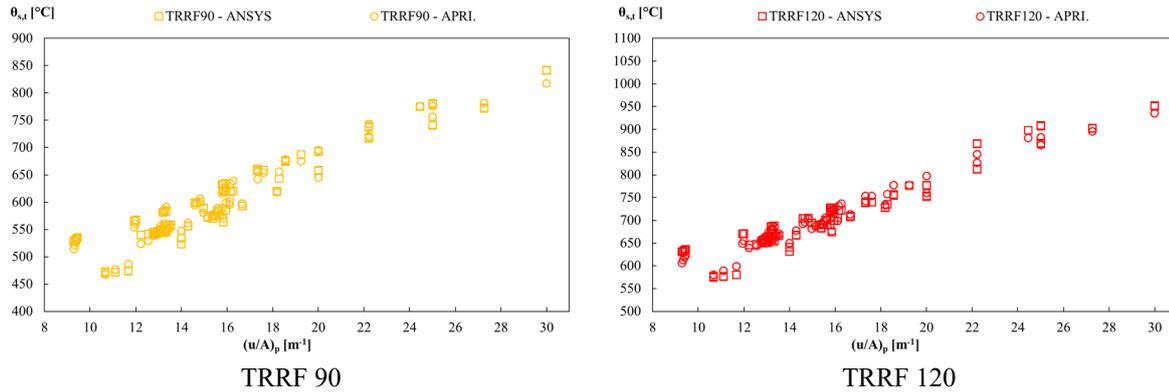
possuem o mesmo fator de massividade, compensando assim o erro relativo entre as temperaturas de seções transversais que possuem o mesmo fator de massividade, mas dimensões diferentes.



Fonte: Próprio autor

Já a Figura 6.20 apresenta separadamente as temperaturas médias das armaduras longitudinais das seções transversais mistas submetidas ao incêndio, para cada tempo requerido de resistência ao fogo.





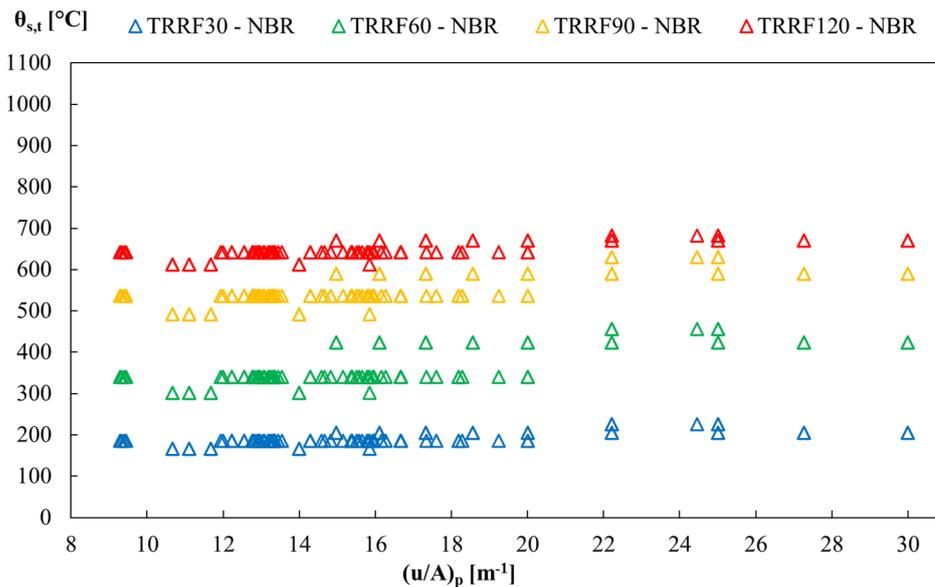
Fonte: Próprio autor

Apesar da temperatura média das barras da armadura, segundo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 não ser calculada, para a realização do presente trabalho a temperatura média foi calculada, uma vez que auxilia no entendimento do comportamento gráfico das curvas de elevação de temperatura da armadura longitudinal utilizadas pela norma.

Primeiramente foi calculado o fator de redução $k_{ys,\theta}$, para a resistência ao escoamento das barras da armadura, conforme Tabela B.10 do Anexo B da ANBT NBR 14323:2013 e assim, por interpolação linear e correspondência, foi estimado o valor da temperatura média das barras da armadura longitudinal da seção transversal mista em situação de incêndio.

A Figura 6.21 apresenta os valores das temperaturas médias das barras da armadura longitudinal das seções transversais mistas, calculadas indiretamente pelas formulações da ABNT NBR 14323:2013.

Figura 6.21: Temperatura média das barras das armaduras longitudinais



Fonte: Próprio autor

6.2 ANÁLISE TERMOESTRUTURAL ESTÁTICA LINEAR E NÃO LINEAR

O método avançado de cálculo utilizado para determinar a resistência à flambagem dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, como já mencionado, requer quatro etapas distintas. A primeira é a análise térmica não linear, a segunda é a análise estática para buscar a força de flambagem elástica, a terceira etapa é a análise não linear que busca a força axial de plastificação e por fim, a quarta etapa requer a análise não linear que busca a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Portanto, foi necessário realizar a modelagem numérica tridimensional para a análise térmica, que serviu de parâmetro de entrada para a análise estrutural.

Nessa etapa foram utilizados apenas 22 perfis estruturais, devido ao alto custo computacional e tempo hábil para realizar todas as análises.

Portanto, buscou-se determinar a distribuição de temperaturas na seção transversal do elemento estrutural em diferentes tempos de exposição ao fogo. Os modelos tridimensionais levaram em consideração as propriedades térmicas dos materiais para cada incremento de tempo.

Vale lembrar que a análise térmica não proporciona uma resposta da capacidade resistente da estrutura, entretanto é fundamental conhecer o campo de temperaturas do elemento para a posterior análise estática estrutural e a avaliação de seu comportamento em situação de incêndio.

Com os resultados obtidos na análise numérica térmica foi então possível realizar a análise estrutural linear e não linear da estrutura em modelagem numérica, considerando o acoplamento termoestrutural.

É importante salientar que o comportamento da estrutura idealizada nem sempre se aproxima do comportamento real da estrutura. Entretanto, a ferramenta computacional e as modelagens numéricas fornecem importantíssimos resultados para o aperfeiçoamento das prescrições normativas de dimensionamento estrutural.

Os capítulos a seguir apresentam os resultados obtidos por meio das simulações numéricas no programa ANSYS da análise mecânica estrutural das seções em estudo.

Em caráter complementar, no Apêndice E encontram-se informações adicionais e pertinentes a respeito das simulações numéricas no programa ANSYS, as quais não serão contempladas no corpo principal do trabalho por estender demasiadamente os objetivos estabelecidos.

6.2.1 Resultados da resistência à flambagem linear elástica

A análise linear elástica é normalmente realizada para um elemento isolado e estaticamente determinado, onde as não linearidades do material não são consideradas e as imperfeições geométricas sejam muito pequenas.

A análise da estabilidade elástica foi desenvolvida nesse trabalho com a finalidade de determinar a resistência à flambagem elástica. Foram utilizados os modelos analíticos para comparar os resultados das cargas críticas de compressão. Os resultados analíticos da ABNT NBR 14323:2013 podem ser consultados na Seção A.1.5.2 do Apêndice A, e na Seção C.1.5.2 do Apêndice C para os resultados analíticos da proposta de aprimoramento.

A Seção D.1.1 do Apêndice D é dedicado a apresentar as tabelas contendo os resultados da resistência à flambagem elástica linear, obtidos das simulações numéricas tridimensionais para os pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de 3 e 5 metros, para os três comprimentos de flambagem e para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

6.2.2 Resultados da resistência plástica

Quanto a análise numérica da força axial de plastificação dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, foi aplicado o comportamento além do regime elástico das propriedades mecânicas dos materiais. Foi adotada a curva idealizada de tensão-deformação com o comportamento-elástico perfeitamente plástico dos materiais.

Os resultados analíticos da força axial de plastificação dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, segundo as recomendações da ABNT NBR 14323:2013 estão apresentados na Seção A.1.5.1 do Apêndice A. Já os resultados da força axial de plastificação de cálculo, segundo a proposta de aprimoramento, estão apresentados na Seção C.1.5.1 do Apêndice C.

Os resultados da força axial de plastificação, obtidos por meio das simulações numéricas tridimensionais no ANSYS, estão apresentados na Seção D.1.2 do Apêndice D.

6.2.3 Resultados da resistência à flambagem

Para o presente estudo, foi considerada a metodologia apresentada pelo método simplificado da ABNT NBR 14323:2013. A proposta de aperfeiçoamento considerou o campo

de temperaturas obtidos pelas simulações numéricas bidimensionais para formular novas equações de temperaturas médias nas componentes das seções transversais em estudo.

As novas temperaturas médias da proposta de aperfeiçoamento foram aplicadas ao método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013, para obter os valores da resistência à flambagem não linear, como forma de verificar se os valores da modelagem numérica eram congruentes.

Já para buscar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio nos modelos tridimensionais, consistiu na solução mecânica não linear da malha, aplicando o campo de temperaturas proveniente das simulações numéricas térmicas e considerando as imperfeições físicas e geométricas. Para o comportamento além do regime elástico das propriedades mecânicas dos materiais, foi adotada a curva idealizada de tensão-deformação com o comportamento-elástico perfeitamente plástico dos materiais. E para as imperfeições geométricas a posição dos nós da malha tridimensional foram atualizados para uma nova posição de acordo com os limites estabelecidos pela Seção 4.3.6.

As tabelas contendo os resultados analíticos completos da força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio estão apresentados na Seção A.1.5.4 do Apêndice A, para a ABNT NBR 14323:2013 e na Seção C.1.5.4 do Apêndice C, para a proposta de aprimoramento.

Na Seção D.1.3 do Apêndice D são apresentadas as tabelas contendo os resultados obtidos das simulações numéricas tridimensionais para a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de 3 e 5 metros, para diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo e para diferentes comprimentos de flambagem.

Página intencionalmente deixada em branco

7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

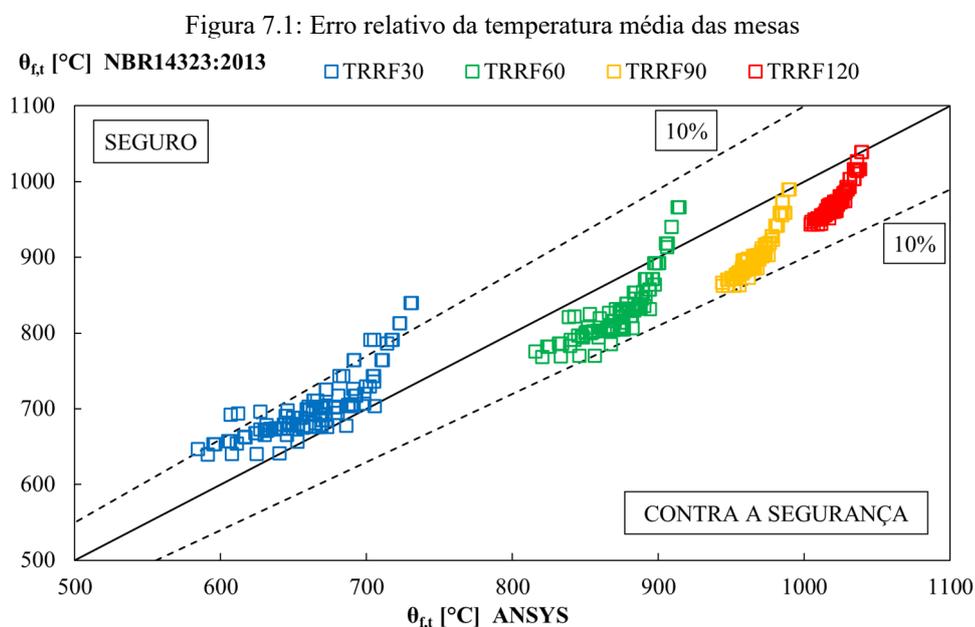
O presente capítulo é dedicado para a apresentação gráfica da comparação dos resultados obtidos por meios analíticos e numéricos.

7.1 ERRO RELATIVO DAS TEMPERATURAS DAS ANÁLISES BIDIMENSIONAIS

Em caráter complementar da Seção 6.1 são apresentados nessa seção e suas subseções os erros relativos das temperaturas médias das mesas, das almas dos perfis de aço, dos núcleos de concreto, o erro relativo das reduções horizontais e verticais dos núcleos de concreto resistentes, além dos erros relativos das temperaturas médias das barras das armaduras longitudinais.

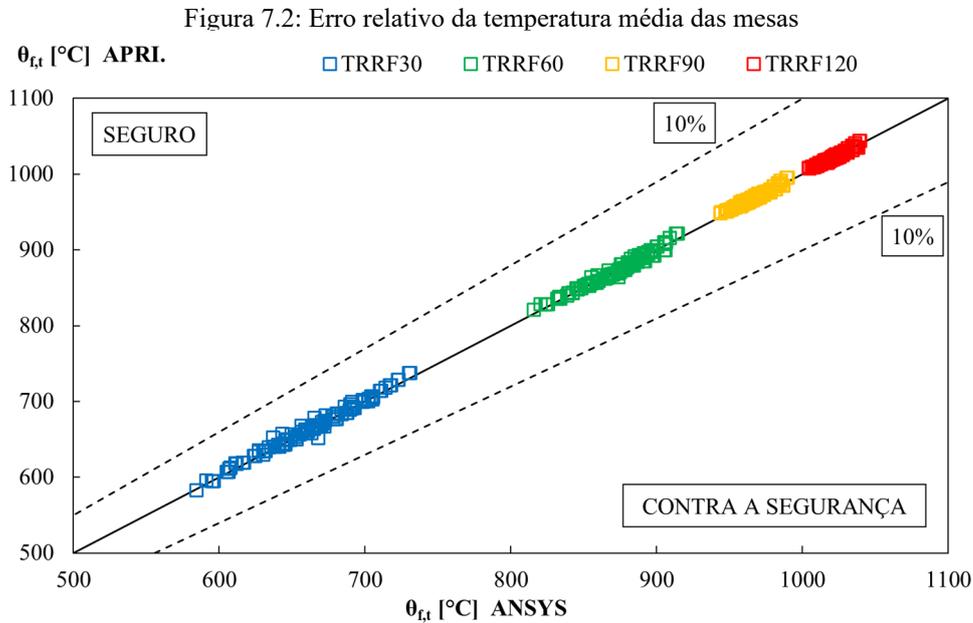
7.1.1 Erro relativo das temperaturas médias das mesas

A Figura 7.1 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das mesas referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a temperatura média das mesas referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

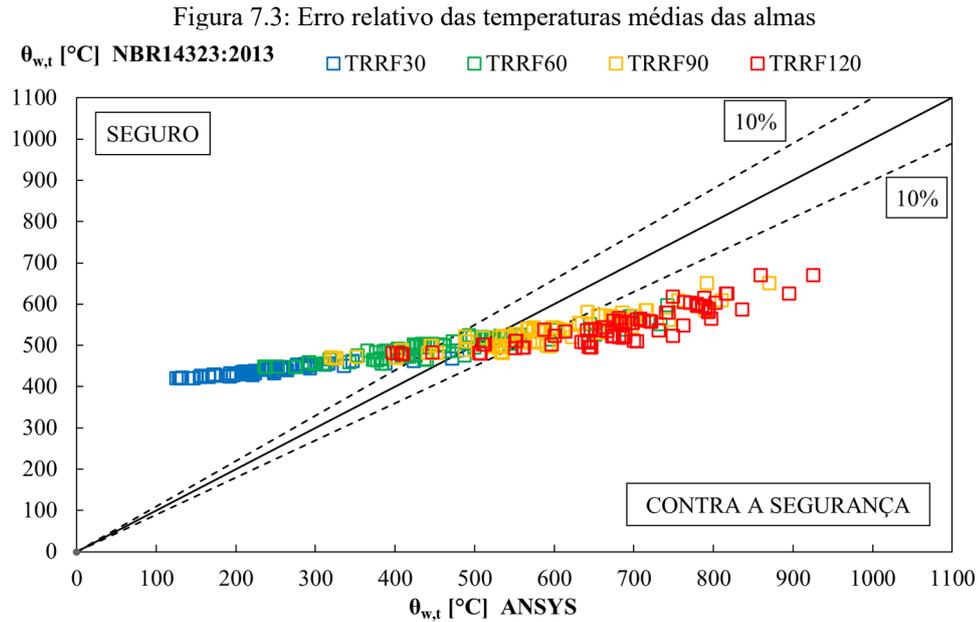
A Figura 7.2 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das mesas referente aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e a temperatura média das mesas referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

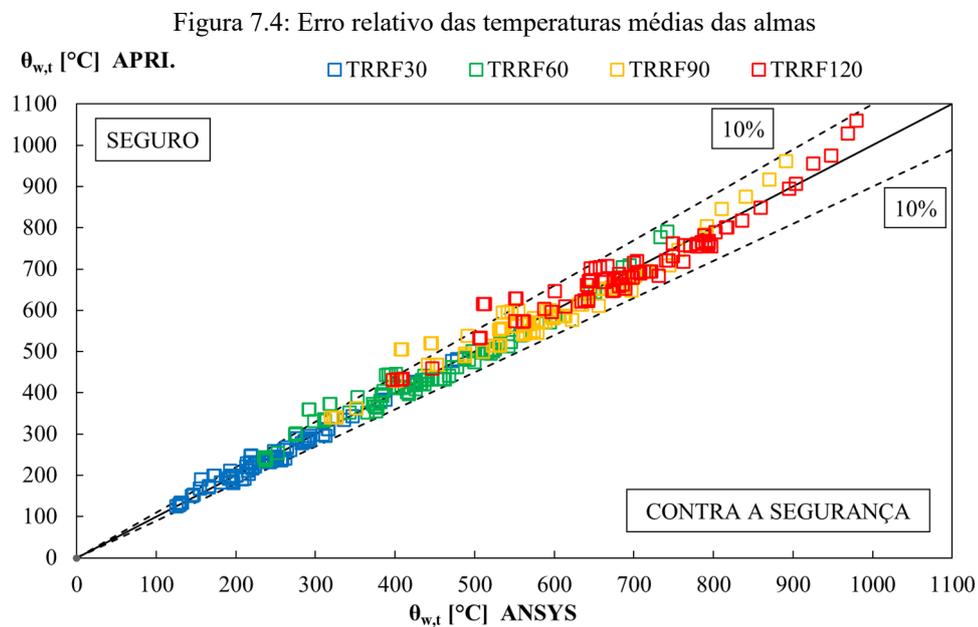
7.1.2 Erro relativo das temperaturas médias das almas dos perfis estruturais

A Figura 7.3 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das almas referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a temperatura média das almas referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

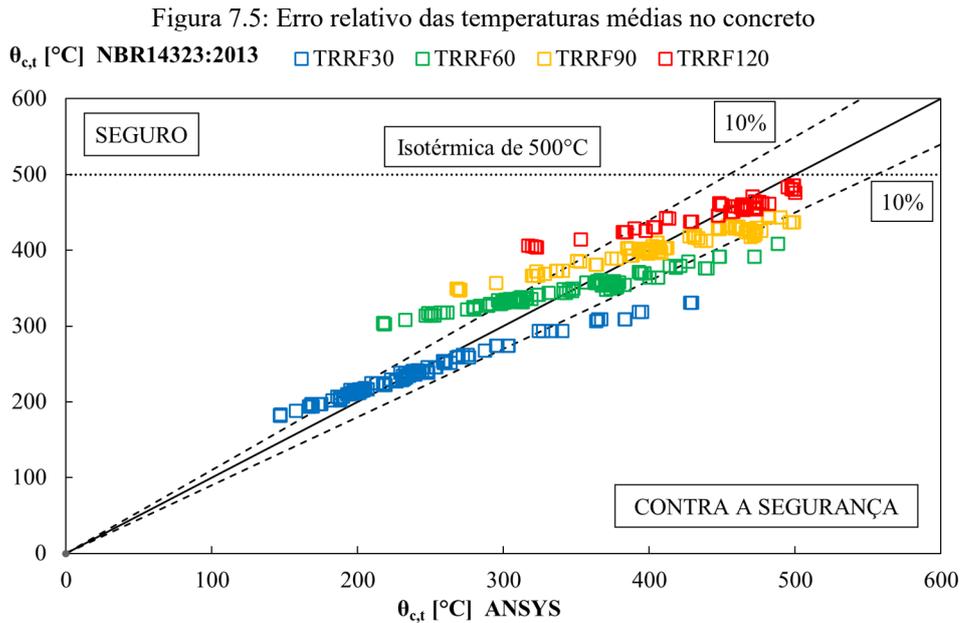
A Figura 7.4 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das almas referente aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e a temperatura média das almas referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

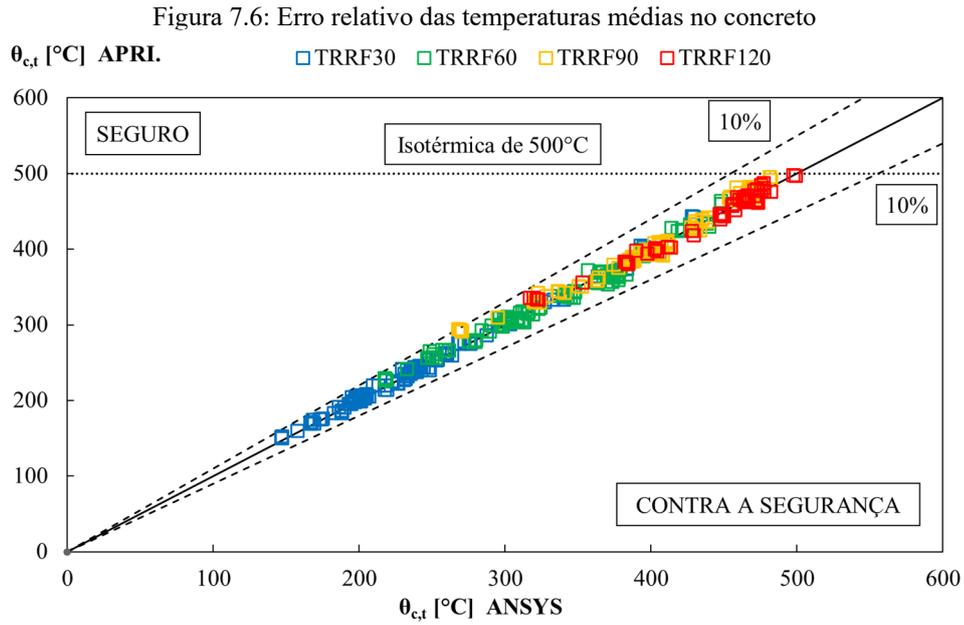
7.1.3 Erro relativo das temperaturas médias no concreto

A Figura 7.5 apresenta o erro relativo entre a temperatura média no concreto referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a temperatura média no concreto referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

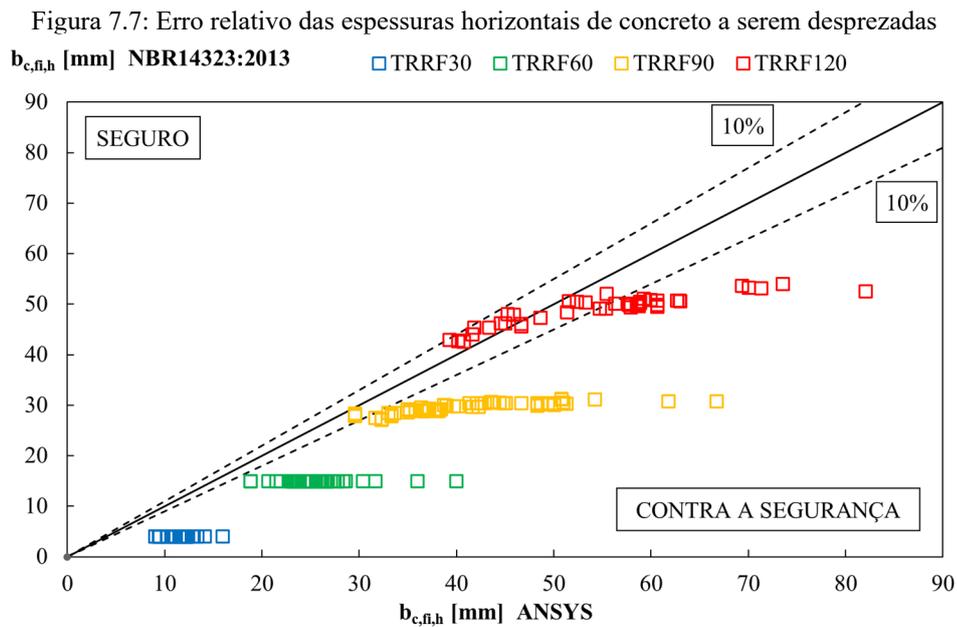
A Figura 7.6 apresenta o erro relativo entre a temperatura média no concreto referente aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e a temperatura média no concreto referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

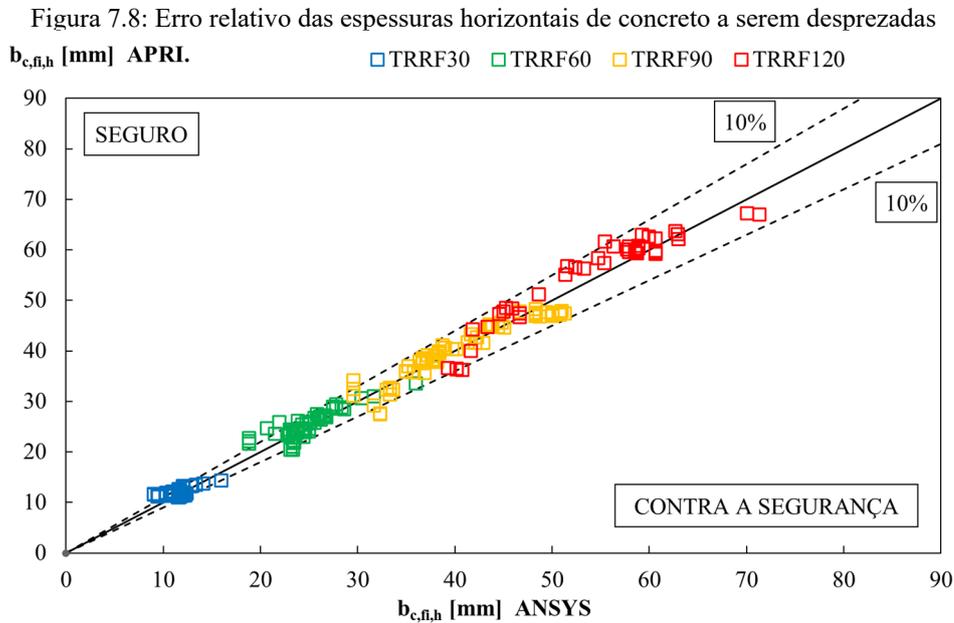
7.1.3.1 Erro relativo das espessuras horizontais de concreto a serem desprezadas

A Figura 7.7 apresenta o erro relativo entre a espessura horizontal de concreto a ser desprezada referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a espessura horizontal de concreto a ser desprezada referente às simulações numéricas bidimensionais.



Fonte: Próprio autor

A Figura 7.8 apresenta o erro relativo entre a espessura horizontal de concreto a ser desprezada referente aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e a espessura horizontal de concreto a ser desprezada referente às simulações numéricas bidimensionais.



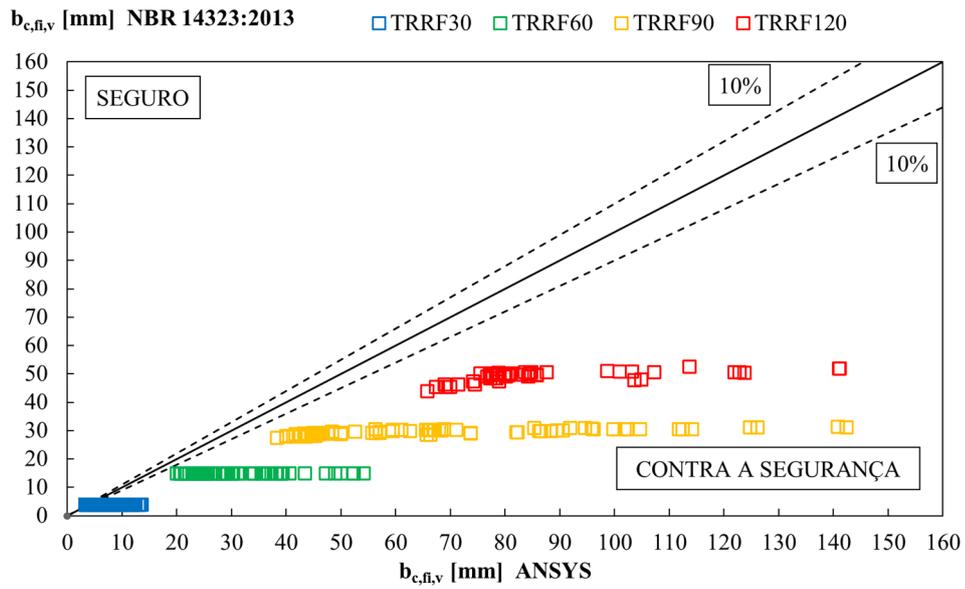
Fonte: Próprio autor

7.1.3.2 Erro relativo das espessuras verticais de concreto a serem desprezadas

A Figura 7.9 apresenta o erro relativo entre a espessura vertical de concreto a ser desprezada referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a espessura vertical de concreto a ser desprezada referente às simulações numéricas bidimensionais.

Capítulo 7 – Comparação dos Resultados

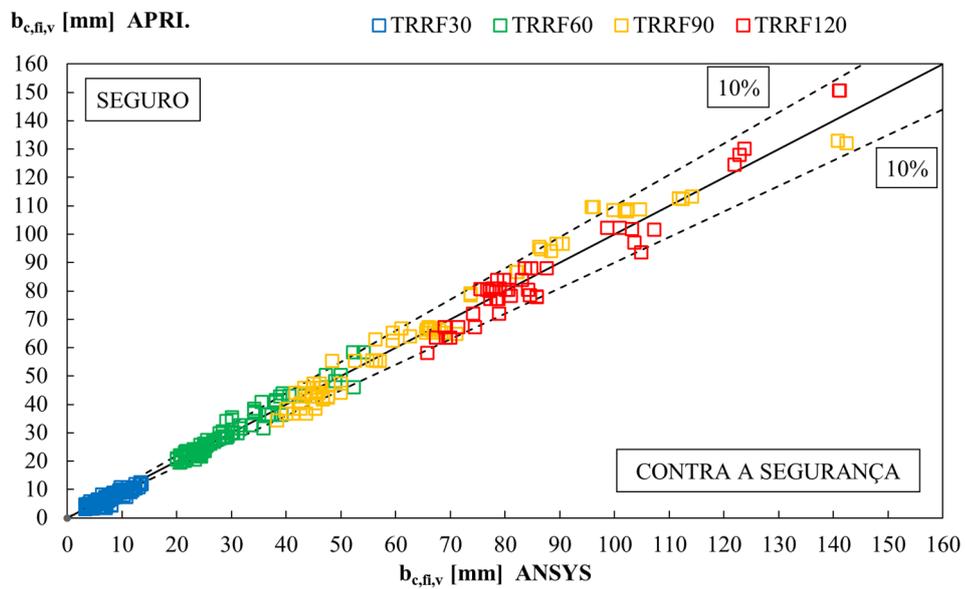
Figura 7.9: Erro relativo das espessuras verticais de concreto a serem desprezadas



Fonte: Próprio autor

A Figura 7.10 apresenta o erro relativo entre a espessura vertical de concreto a ser desprezada referente aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e espessura vertical de concreto a ser desprezada referente às simulações numéricas bidimensionais.

Figura 7.10: Erro relativo das espessuras verticais de concreto a serem desprezadas

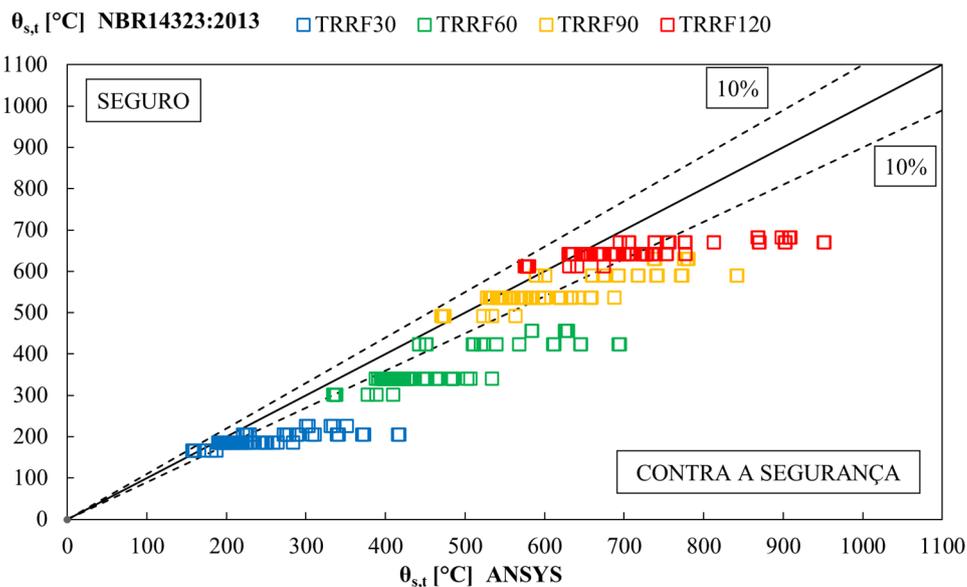


Fonte: Próprio autor

7.1.4 Erro relativo das temperaturas médias nas barras das armaduras longitudinais

A Figura 7.11 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das barras da armadura referente aos valores encontrados pela ABNT NBR 14323:2013 e a temperatura média das barras da armadura referente às simulações numéricas bidimensionais.

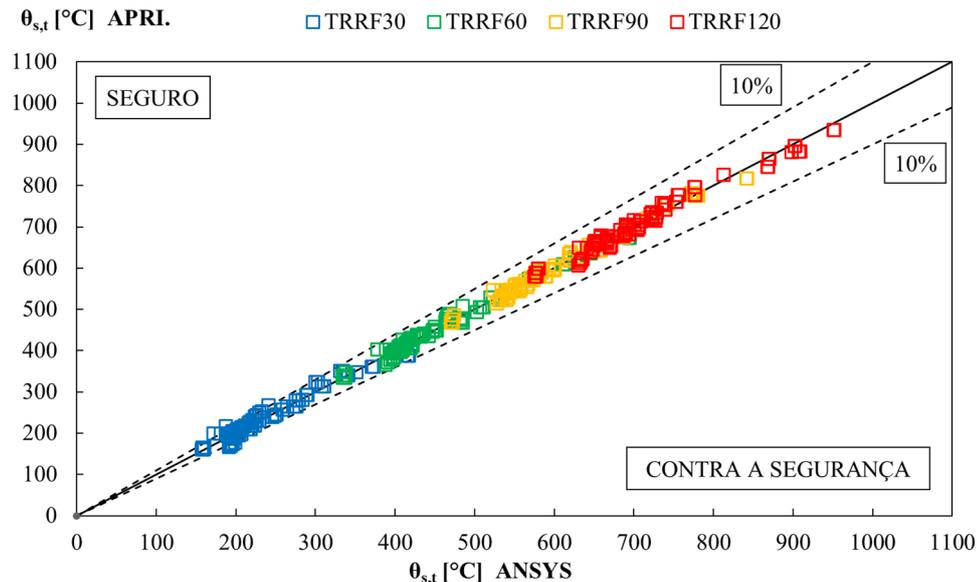
Figura 7.11: Erro relativo da temperatura média das barras das armaduras longitudinais



Fonte: Próprio autor

A Figura 7.12 apresenta o erro relativo entre a temperatura média das barras da armadura referentes aos valores encontrados pela proposta de aprimoramento e a temperatura média das barras da armadura referente às simulações numéricas bidimensionais.

Figura 7.12: Erro relativo da temperatura média das barras das armaduras longitudinais $\theta_{s,t}$ [°C] APRI.



Fonte: Próprio autor

7.1.5 Erro relativo da força de flambagem elástica

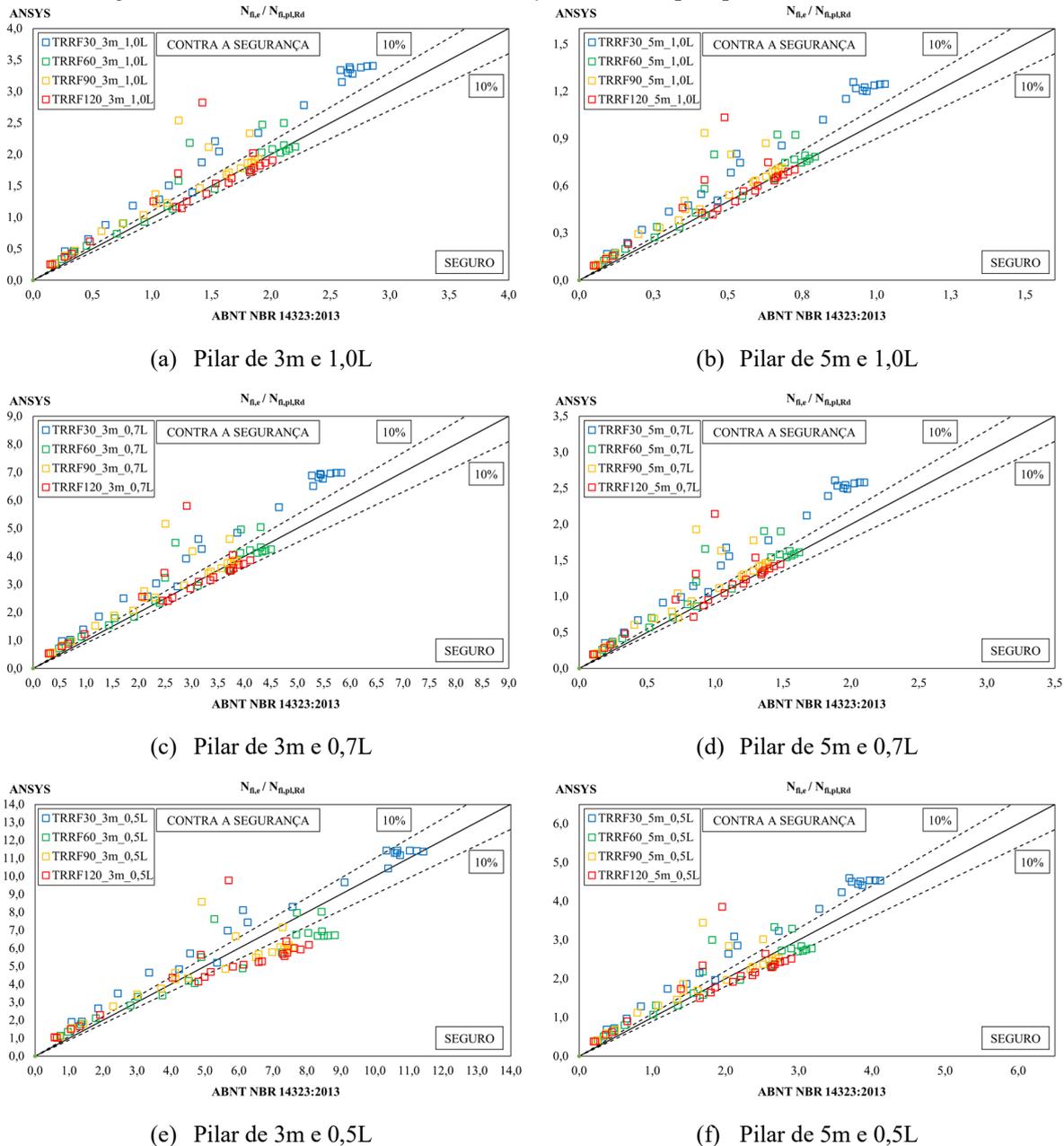
O comportamento elástico das estruturas é um importante parâmetro para a determinação da força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Mas vale lembrar que a análise numérica do elemento estrutural isolado é uma situação idealizada, e que para se aproximar do desempenho real do elemento estrutural e determinar as forças resistentes de projeto, deve-se levar em consideração as não linearidades dos materiais e geométricas dos elementos.

Na Figura 7.13 são apresentadas as comparações dos resultados das diferenças relativas das forças de flambagem elástica para os pilares de 3m e 5m, os três comprimentos de flambagem e para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120. Os valores do eixo das ordenadas são compostos da relação entre a força de flambagem elástica, e a força axial de plastificação, ambas obtidas do método numérico. Já os valores do eixo das abscissas são compostos da relação dos valores determinados a partir do método analítico da ABNT NBR 14323:2013.

Fica evidente que em todas as condições apresentadas os valores das forças de flambagem elástica obtidos por meio do ANSYS se apresentam maiores que os valores obtidos por meio da norma ABNT NBR 14323:2013 e maiores também que os valores obtidos pela proposta de aprimoramento. Uma hipótese plausível é de que o método avançado utiliza a temperatura nodal para reduzir as propriedades mecânicas, já os métodos simplificados utilizam

simplificações e temperaturas médias das componentes para realizar o cálculo da resistência das componentes da seção transversal.

Figura 7.13: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m



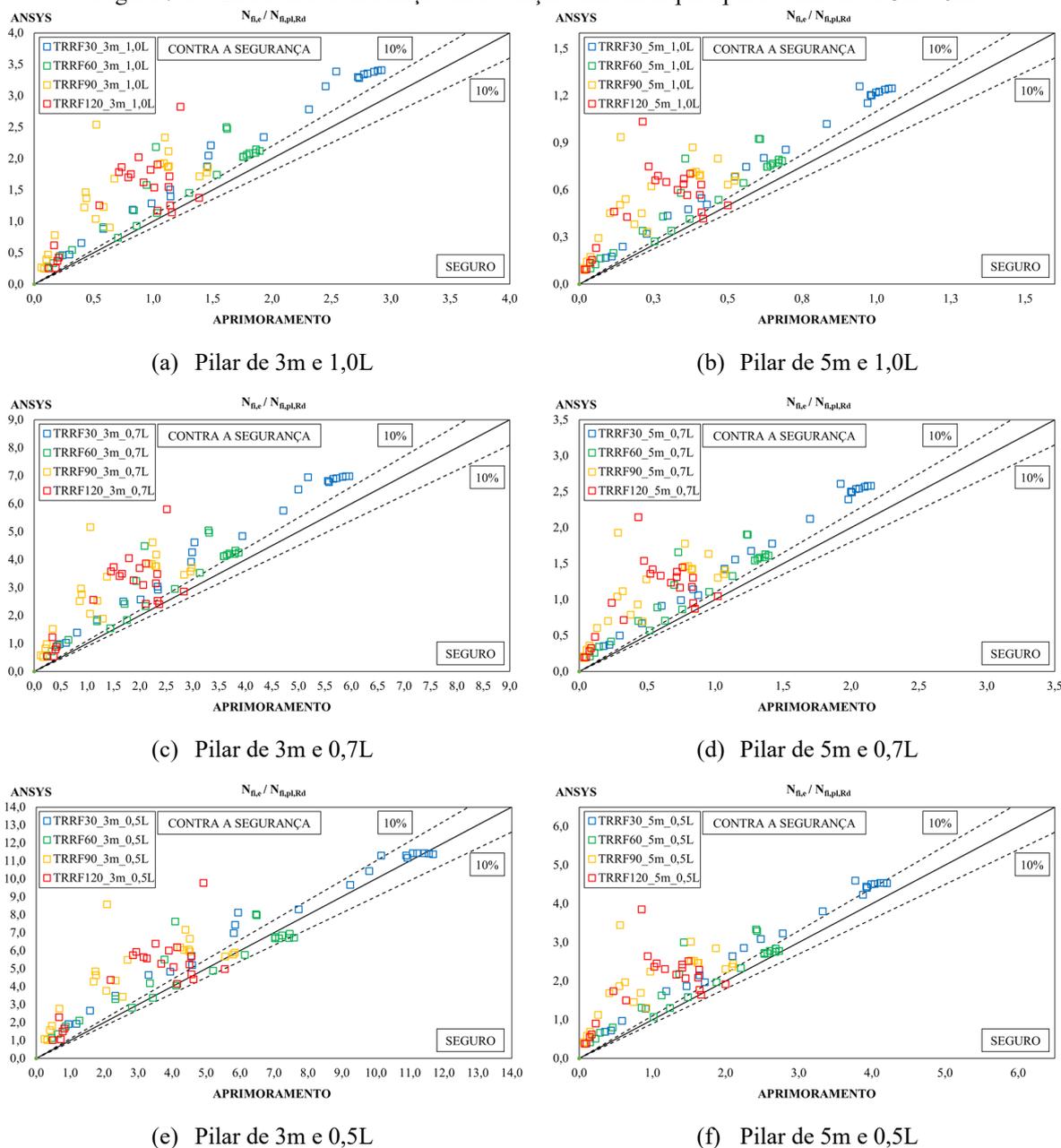
Fonte: Próprio autor

Na Figura 7.14 são apresentadas as comparações dos resultados das diferenças relativas das forças de flambagem elástica para os pilares de 3m e 5m, os três comprimentos de flambagem e para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120. Os valores do eixo das ordenadas são compostos da relação entre a força de flambagem elástica, e a força axial de plastificação, ambas obtidas do método numérico. Já

Capítulo 7 – Comparação dos Resultados

os valores do eixo das abscissas são compostos da relação dos valores determinados a partir do método analítico da proposta de aprimoramento.

Figura 7.14: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m

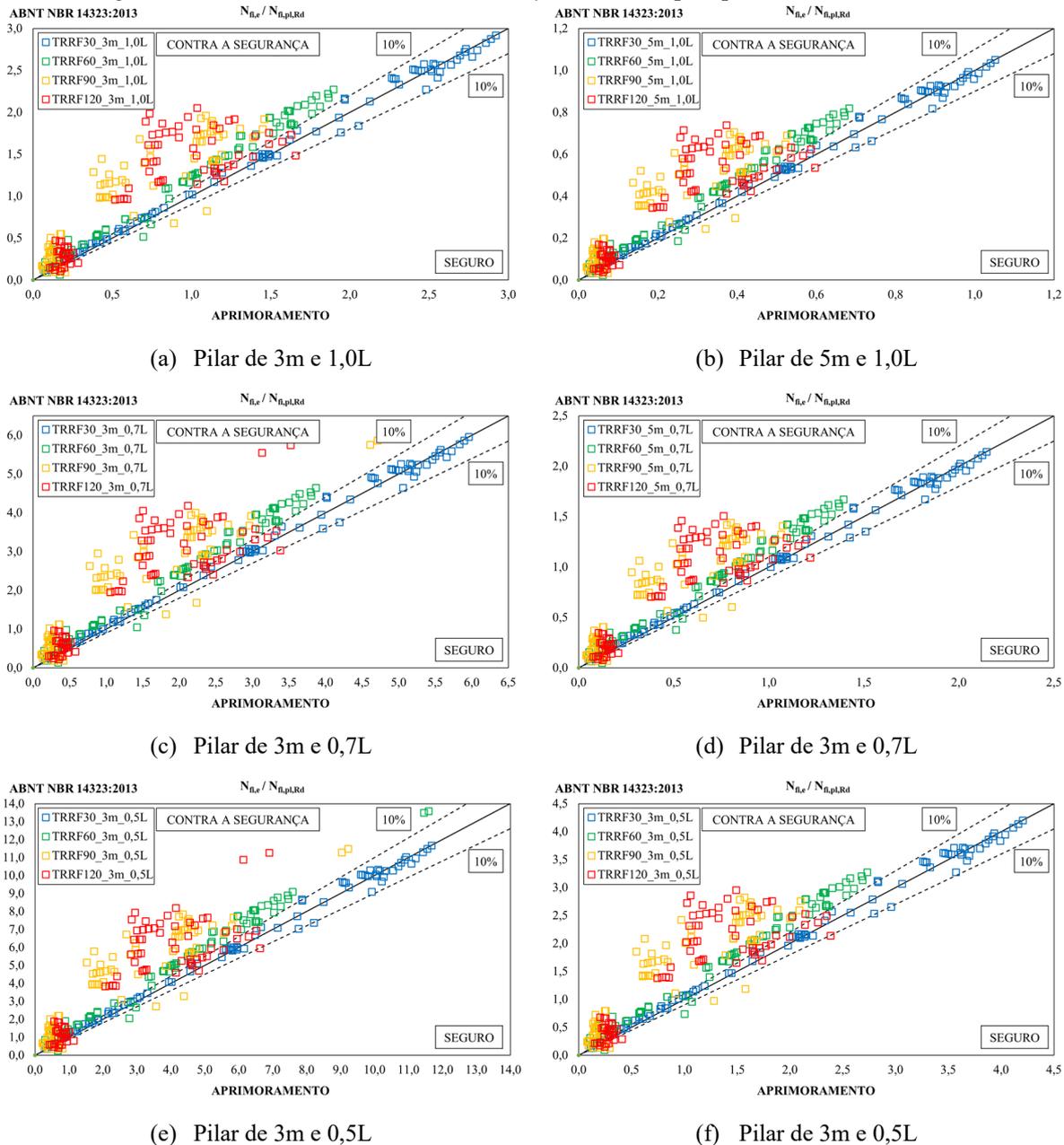


Fonte: Próprio autor

Na Figura 7.15 são apresentadas as comparações dos resultados das diferenças relativas das forças de flambagem elástica para os pilares de 3m e 5m, os três comprimentos de flambagem e para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120. Os valores do eixo das ordenadas são compostos da relação entre a força de flambagem elástica, e a força axial de plastificação, ambas obtidas do método simplificado

da ABNT NBR 14323:2013. Já os valores do eixo das abscissas são compostos da relação dos valores determinados a partir do método analítico da proposta de aprimoramento.

Figura 7.15: Erro relativo da relação entre forças resistentes para pilares mistos de 3m e 5m



Fonte: Próprio autor

A relação entre a força de flambagem elástica e a força axial de plastificação é um importante parâmetro para o dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Quando a norma permite utilizar um valor de força resistente superior ao valor que a seção pode suportar, a norma encontra-se contra a segurança. Partindo dessa premissa, de acordo com a comparação entre os resultados das forças de flambagem elástica

Capítulo 7 – Comparação dos Resultados

dos métodos analíticos, percebe-se que a norma ABNT NBR 14323:2013 recomenda a utilização de valores de resistência que podem ser considerados contra a segurança estrutural para praticamente todas as configurações de pilares estudados.

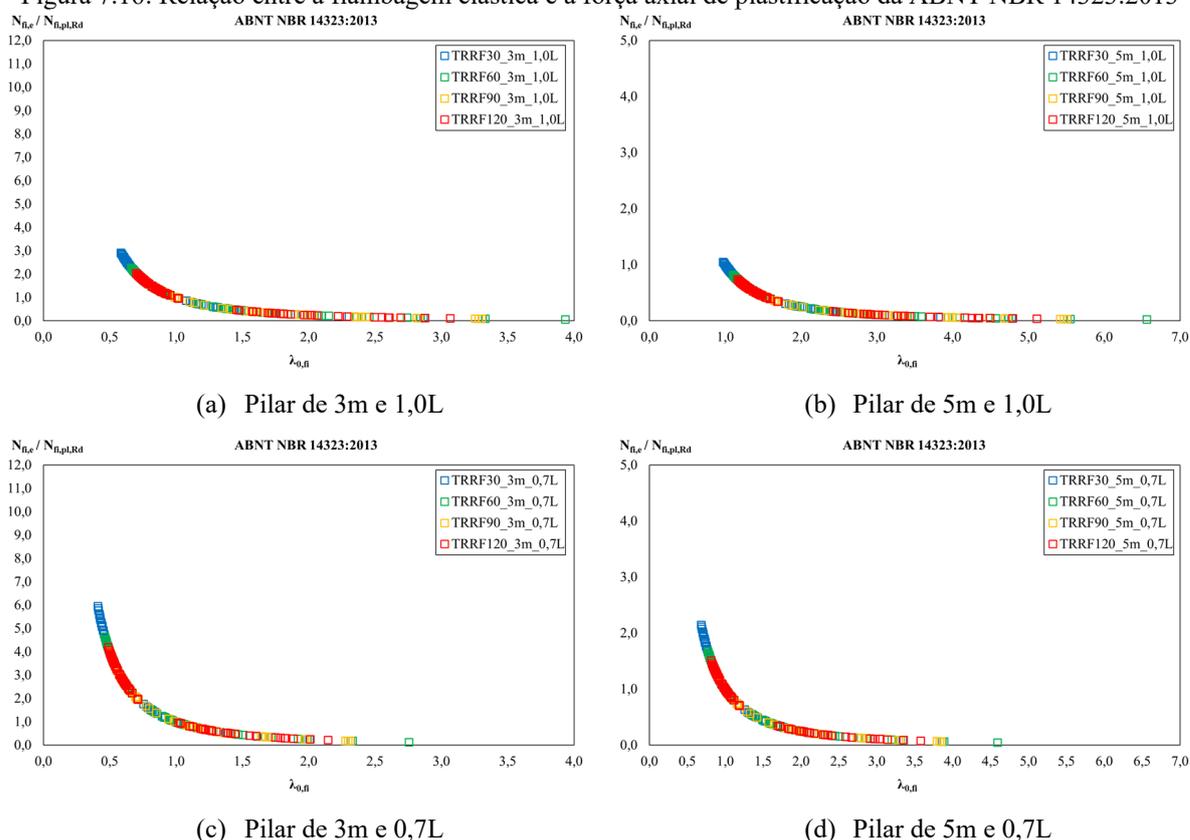
Percebe-se que a comparação entre os valores do ANSYS e os valores do aprimoramento seguem o mesmo conceito. Para que o aprimoramento seja considerado em favor da segurança, o aprimoramento precisa recomendar valores inferiores de resistências quando comparados com os valores que são auferidos em estudos numéricos ou experimentais.

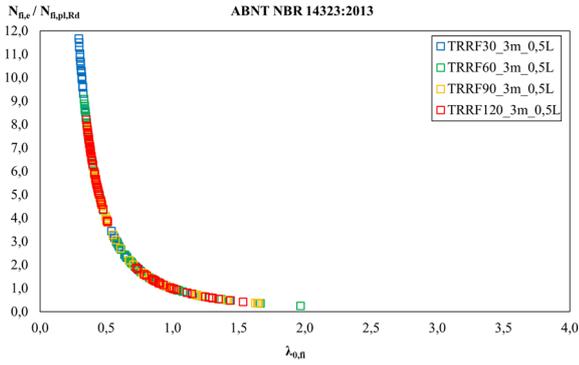
7.1.5.1 Curva de flambagem elástica

É importante apresentar a curva de flambagem elástica que nada mais é que a relação entre a força de flambagem elástica e a força axial de plastificação no eixo das ordenadas, e no eixo das abscissas estão presentes os valores do índice de esbelteza reduzido, obtido conforme Equação (4.6).

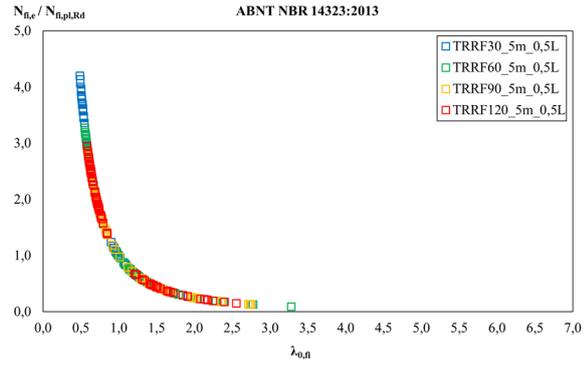
A Figura 7.16 apresenta a relação entre a carga crítica e plástica, obtidas por meio do método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013, para os pilares de 3m e 5m, com os três comprimentos de flambagem e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Figura 7.16: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação da ABNT NBR 14323:2013





(e) Pilar de 3m e 0,5L

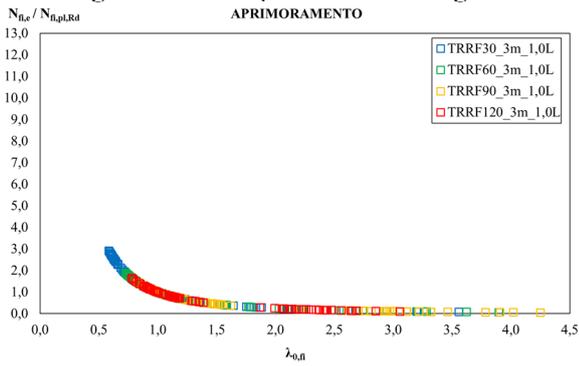


(f) Pilar de 5m e 0,5L

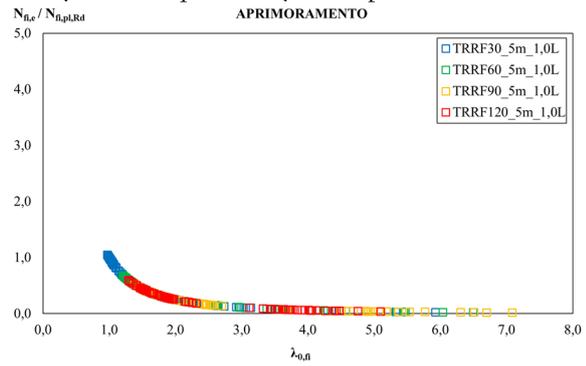
Fonte: Próprio autor

A Figura 7.17 apresenta a relação entre a carga crítica e plástica, obtidas por meio das formulações da proposta de aprimoramento, para os pilares de 3m e 5m, com os três comprimentos de flambagem e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

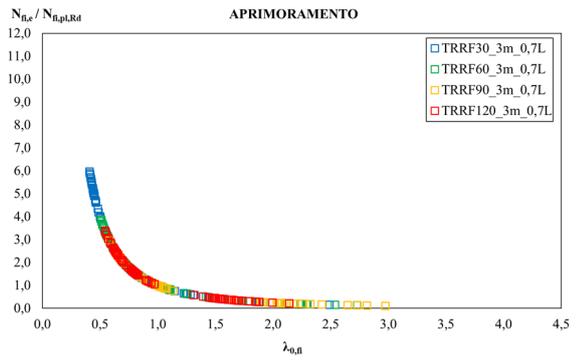
Figura 7.17: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação do aprimoramento



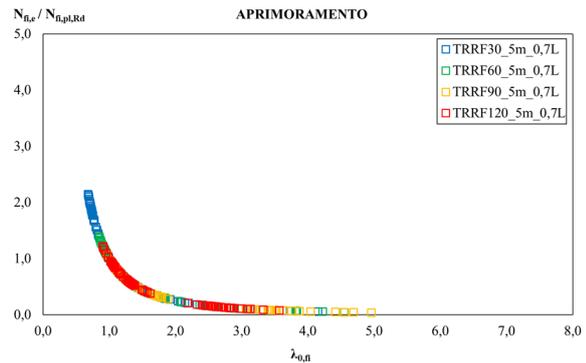
(a) Pilar de 3m e 1,0L



(b) Pilar de 5m e 1,0L

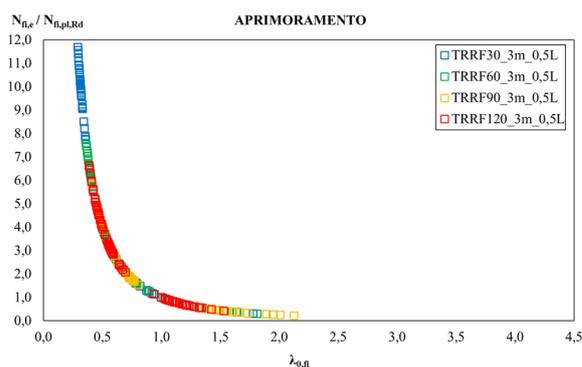


(c) Pilar de 3m e 0,7L

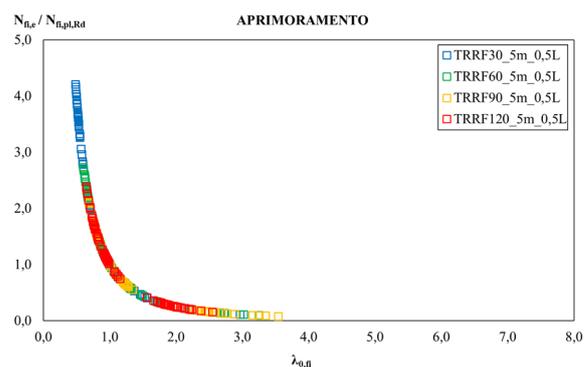


(d) Pilar de 5m e 0,7L

Capítulo 7 – Comparação dos Resultados



(e) Pilar de 3m e 0,5L

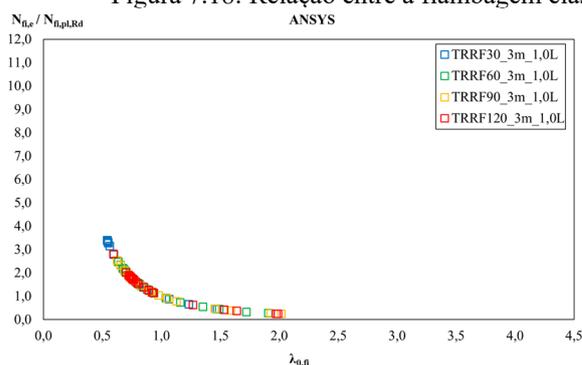


(f) Pilar de 5m e 0,5L

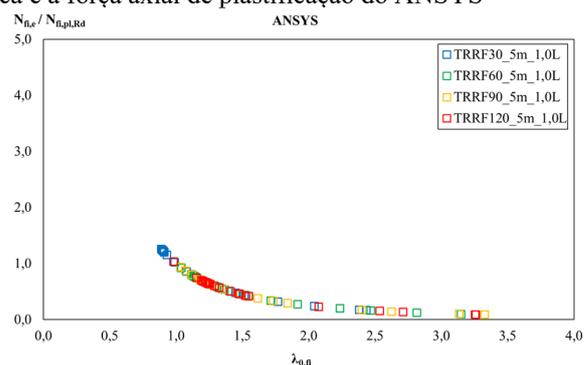
Fonte: Próprio autor

A Figura 7.18 apresenta a relação entre a carga crítica e plástica, obtidas exclusivamente das simulações tridimensionais do ANSYS, para os pilares de 3m e 5m, com os três comprimentos de flambagem e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

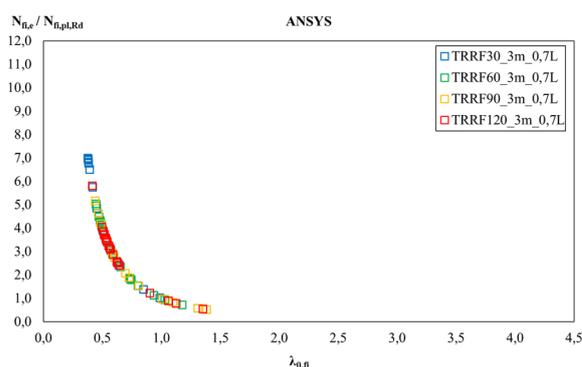
Figura 7.18: Relação entre a flambagem elástica e a força axial de plastificação do ANSYS



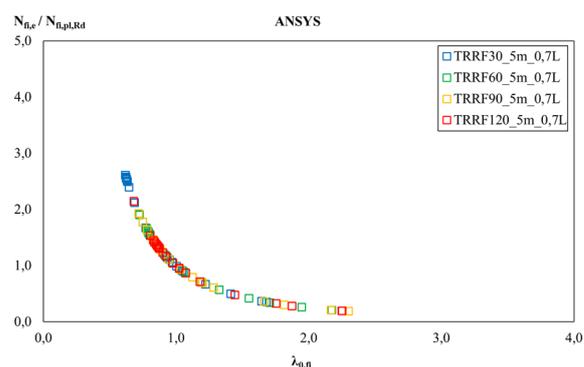
(a) Pilar de 3m e 1,0L



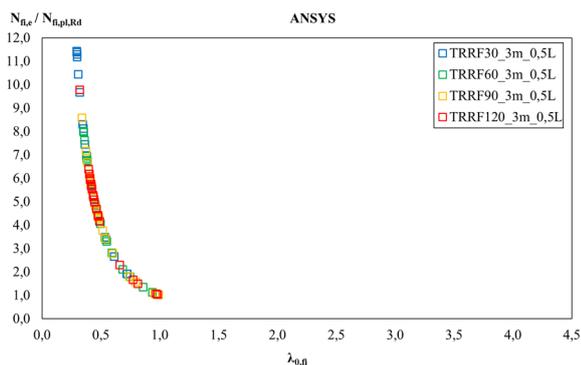
(b) Pilar de 5m e 1,0L



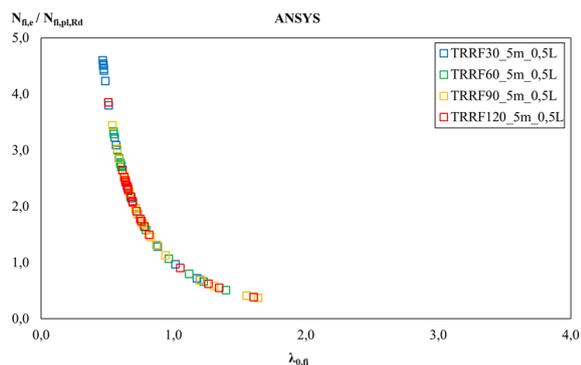
(c) Pilar de 3m e 0,7L



(d) Pilar de 5m e 0,7L



(e) Pilar de 3m e 0,5L



(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

Tanto os resultados analíticos, quanto numéricos apontam para uma menor relação entre a força de flambagem elástica e a força axial de plastificação conforme o tempo de exposição ao incêndio aumenta. Observa-se ainda que para pilares de mesma altura de 3 metros a condição de vinculação tem um papel muito relevante na diferença entre as cargas críticas em um mesmo tempo de exposição ao incêndio, pois força axial de plastificação não depende do comprimento do pilar.

As curvas também demonstram a situação limite onde a força de flambagem elástica é igual a força axial de plastificação. Para perfis de pilares muito esbeltos, a flambagem do pilar representa um modo de falha, enquanto para perfis compactos, ou seja, pouco esbeltos, é necessária uma carga muito elevada para que o elemento atinja a força axial máxima que o pilar pode suportar na iminência de sofrer a flambagem, dessa forma a plastificação da seção ocorre muito antes da carga crítica se estabelecer. Então para garantir a segurança estrutural, são aplicados coeficientes de redução e limites de esbeltez para os elementos nos critérios de dimensionamento.

7.1.6 Erro relativo da força axial de plastificação de cálculo

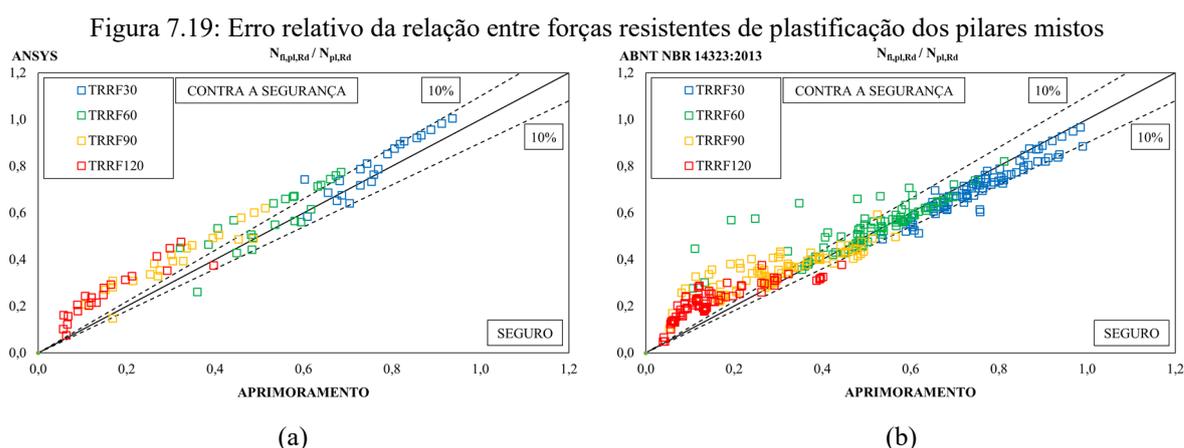
A força axial de plastificação é também outro importante parâmetro para o dimensionamento dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio. Seu valor é minorado pelo fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão, que por sua vez depende do índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio, para pilares mistos. O índice de esbeltez reduzido, também conhecido como índice de esbeltez adimensional, é dependente da força axial de plastificação.

A terceira etapa da segunda fase das simulações numéricas tridimensionais consistiu na solução mecânica não linear para auferir a força axial de plastificação do pilar misto em situação

Capítulo 7 – Comparação dos Resultados

de incêndio. Após converter a malha do modelo térmico para o modelo mecânico e definir a curva de tensão-deformação idealizada com comportamento elástico-perfeitamente plástico como parâmetros para a realização das simulações numéricas pelo ANSYS, foram determinadas as forças axiais de plastificação para os tempos requeridos de resistência ao fogo de 30, 60, 90 e 120 minutos.

O erro relativo entre o valor auferido pelos modelos numéricos tridimensionais do ANSYS e o valor obtido por meio das formulações da proposta de aprimoramento é apresentado na Figura 7.19 (a), o divisor do valor da força axial de plastificação em situação de incêndio é o valor da carga de plastificação em temperatura ambiente. Já a Figura 7.19 (b) apresenta o erro relativo entre as forças axiais de plastificação obtidas por meio do método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 e das formulações da proposta de aprimoramento, com o divisor sendo a carga de plastificação em temperatura ambiente.



Fonte: Próprio autor

Para o mesmo TRRF são encontrados dois valores de forças axiais de plastificação, o primeiro do eixo das ordenadas, é o valor da força axial de plastificação do ANSYS, o segundo é o valor da força axial de plastificação da proposta de aprimoramento, no eixo das abscissas. Para que a proposta de aprimoramento seja considerada segura, necessariamente deve ser recomendado utilizar um valor de resistência menor do que àquele que está sendo realmente desenvolvido no elemento estrutural. O mesmo princípio é aplicado aos valores de resistência de um elemento estrutural quando são minorados por fatores de redução em favor da segurança.

Por esse motivo, pode ser verificado que os valores recomendados pela proposta de aprimoramento estão em favor da segurança, tanto comparados com os valores obtidos do ANSYS, quanto com os valores do método simplificado da ABNT NBR 14323:2013.

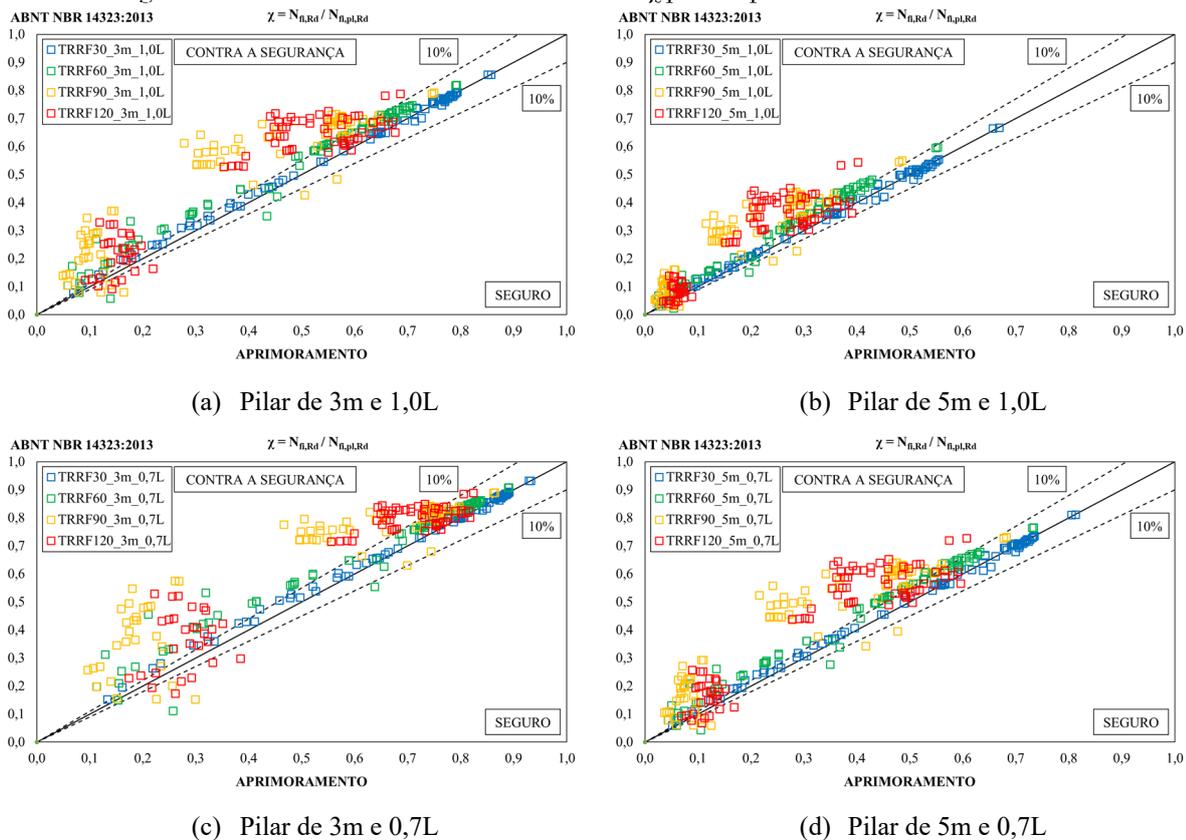
7.1.7 Erro relativo para o fator χ

O fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão que está relacionado com o coeficiente de redução que depende dos efeitos das tensões térmicas, foram apresentados na Equação (4.4) e na Equação (4.5), respectivamente.

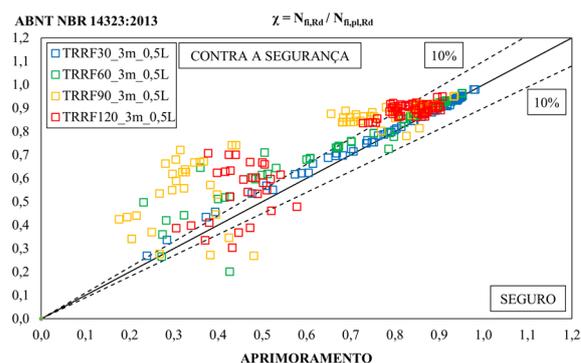
Esse fator de redução χ possui a função de reduzir a força axial de plastificação da seção transversal, determinando assim a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

A Figura 7.20 apresenta o erro relativo associado ao quociente da relação entre a força axial resistente de cálculo e a força axial de plastificação, obtidas pelas recomendações da ABNT NBR 14323:2013, no eixo das ordenadas. Já o eixo das abscissas representa o quociente da relação entre a força axial de cálculo e a força axial de plastificação, obtidas pelas formulações da proposta de aprimoramento.

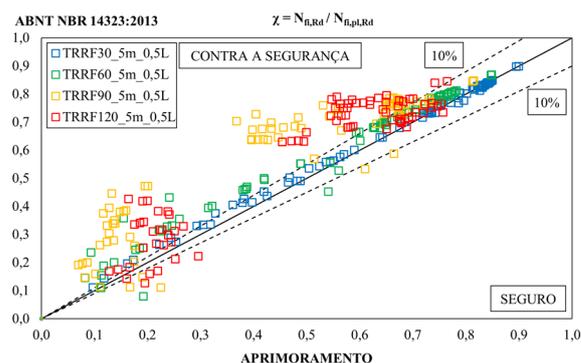
Figura 7.20: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados



Capítulo 7 – Comparação dos Resultados



(e) Pilar de 3m e 0,5L



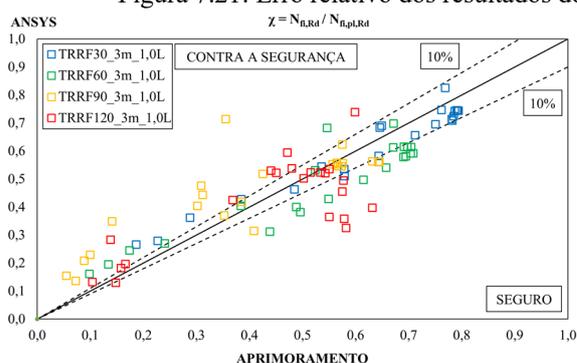
(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

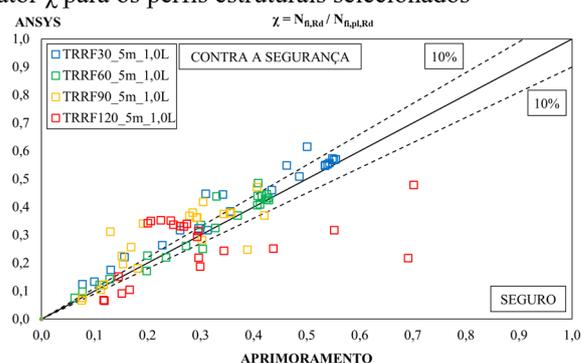
É possível notar que os esforços para aprimorar os procedimentos normativos da ABNT NBR 14323:2013 reformulando a maneira como são estabelecidas as temperaturas médias das quatro componentes trouxe uma maior segurança do procedimento normativo na grande maioria dos 83 tipos diferentes de perfis estruturais de aço.

Quando a força axial resistente de cálculo, obtida por meio da norma ABNT NBR 14323:2013, é comparada com as da proposta de aprimoramento, a norma se apresenta contra a segurança em praticamente todos os tempos requeridos de resistência ao fogo.

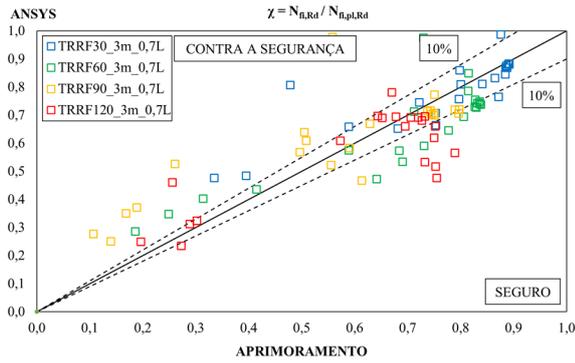
Já a Figura 7.21 compara os resultados obtidos pelo método avançado de cálculo e com os resultados obtidos pela proposta de aprimoramento.

Figura 7.21: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados

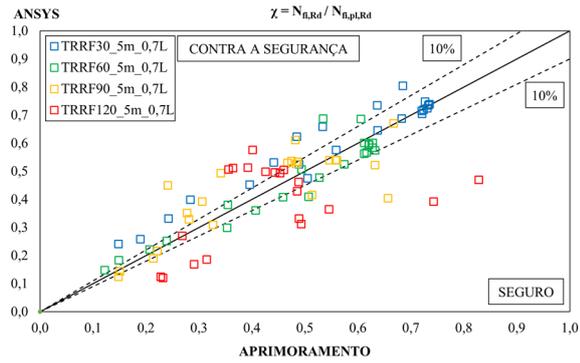
(a) Pilar de 3m e 1,0L



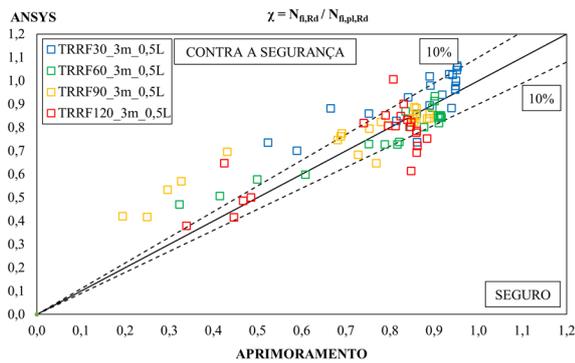
(b) Pilar de 5m e 1,0L



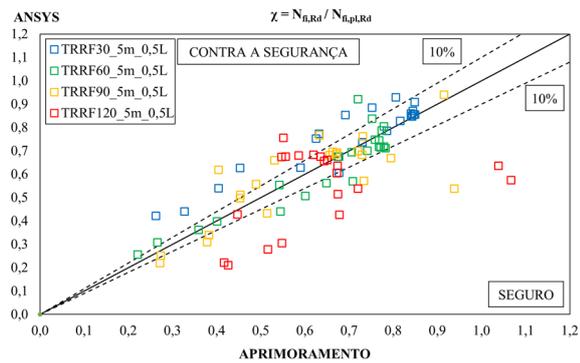
(c) Pilar de 3m e 0,7L



(d) Pilar de 5m e 0,7L



(e) Pilar de 3m e 0,5L



(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

O método avançado de cálculo, por sua vez, não utiliza a temperatura média para determinar a carga resistente, mas sim utiliza o campo de temperaturas para reduzir individualmente a resistência em cada nó da malha do modelo numérico da seção transversal para a determinação da força resistente do elemento estrutural.

A proposta de aprimoramento que altera apenas a forma de como as temperaturas médias das componentes da seção transversal são obtidas melhoram significativamente os resultados das resistências do elemento estrutural, quando comparados com os resultados do método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013.

Quando os resultados das forças resistentes obtidas pelas formulações da proposta de aprimoramento são comparadas com os resultados numéricos das modelagens tridimensionais, para algumas seções transversais em tempos requeridos de resistência ao fogo de 120 minutos a proposta de aprimoramento ainda se encontra contra a segurança, evidenciando uma necessidade de aprimoramento não apenas da forma como são obtidas as temperaturas médias das quatro componentes.

Por esse motivo foi realizada a análise numérica tridimensional que avalia diretamente o fator de redução χ e traz a segunda parte da proposta de aprimoramento que será apresentada na Seção 7.2.

7.2 FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

Para o dimensionamento de elementos estruturais comprimidos, a condição de segurança é de que as forças solicitantes sejam inferiores às forças resistentes.

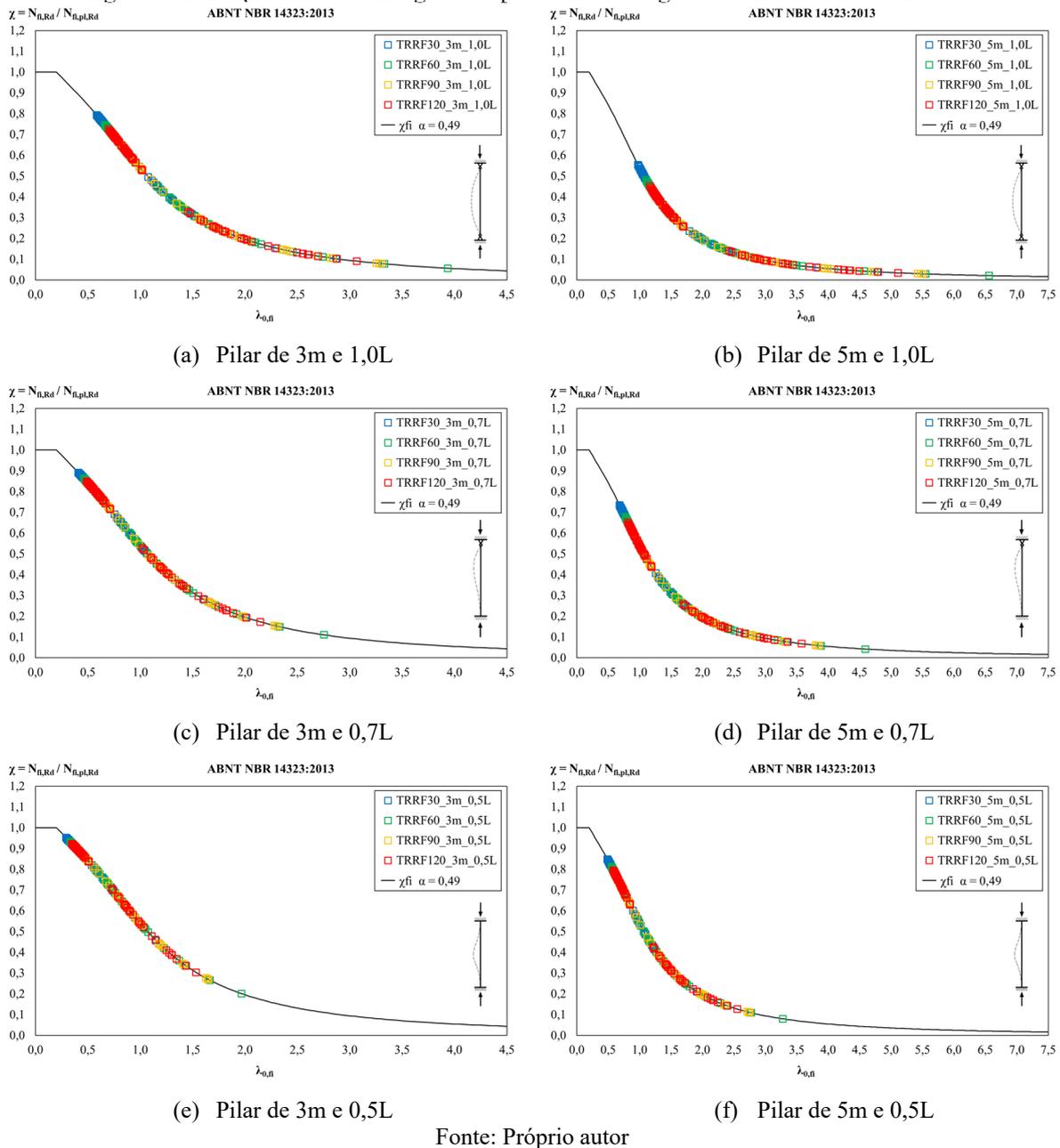
Para obter a força axial resistente de cálculo nas simulações numéricas tridimensionais, como já mencionado, primeiramente foi realizada a análise térmica, considerando as não linearidades dos materiais, os campos de temperaturas nos tempos requeridos de resistência ao fogo foram utilizados como parâmetros iniciais das condições de contorno nas análises estáticas lineares para obter a força de flambagem elástica. Foi então atribuído o comportamento elástico-perfeitamente plástico do aço e do concreto para que fosse considerado as não linearidades dos materiais. O programa ANSYS informa a deflexão máxima da iminência da instabilidade de equilíbrio. Com esse valor, foi atualizada a posição dos nós da malha tridimensional do pilar para considerar o efeito de segunda ordem da imperfeição geométrica do elemento estrutural e assim introduzir não linearidades geométricas ao modelo computacional.

A análise do equilíbrio passou a ser efetuada considerando a condição deformada do pilar e as não linearidades dos materiais, para cada campo de temperaturas formado pela análise térmica de 22 perfis estruturais, nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos, três condições de vinculações associadas a dois tamanhos de pilares, 3 metros e 5 metros. Totalizando 1254 simulações numéricas tridimensionais para estimar as 528 forças axiais de flambagem de cálculo, 176 forças axiais de plastificação e 528 forças de flambagem elástica, além das 22 simulações térmicas tridimensionais. Todas as simulações numéricas geraram cerca de 2 TB de dados e em uma estimativa conservadora não menos de 800 horas de simulações numéricas ininterruptas.

A força axial de flambagem também foi calculada para os 42 perfis estruturais brasileiros e 41 perfis estruturais europeus, pelo método simplificado da norma ABNT NBR 14323:2013 e pelas formulações da proposta de aprimoramento.

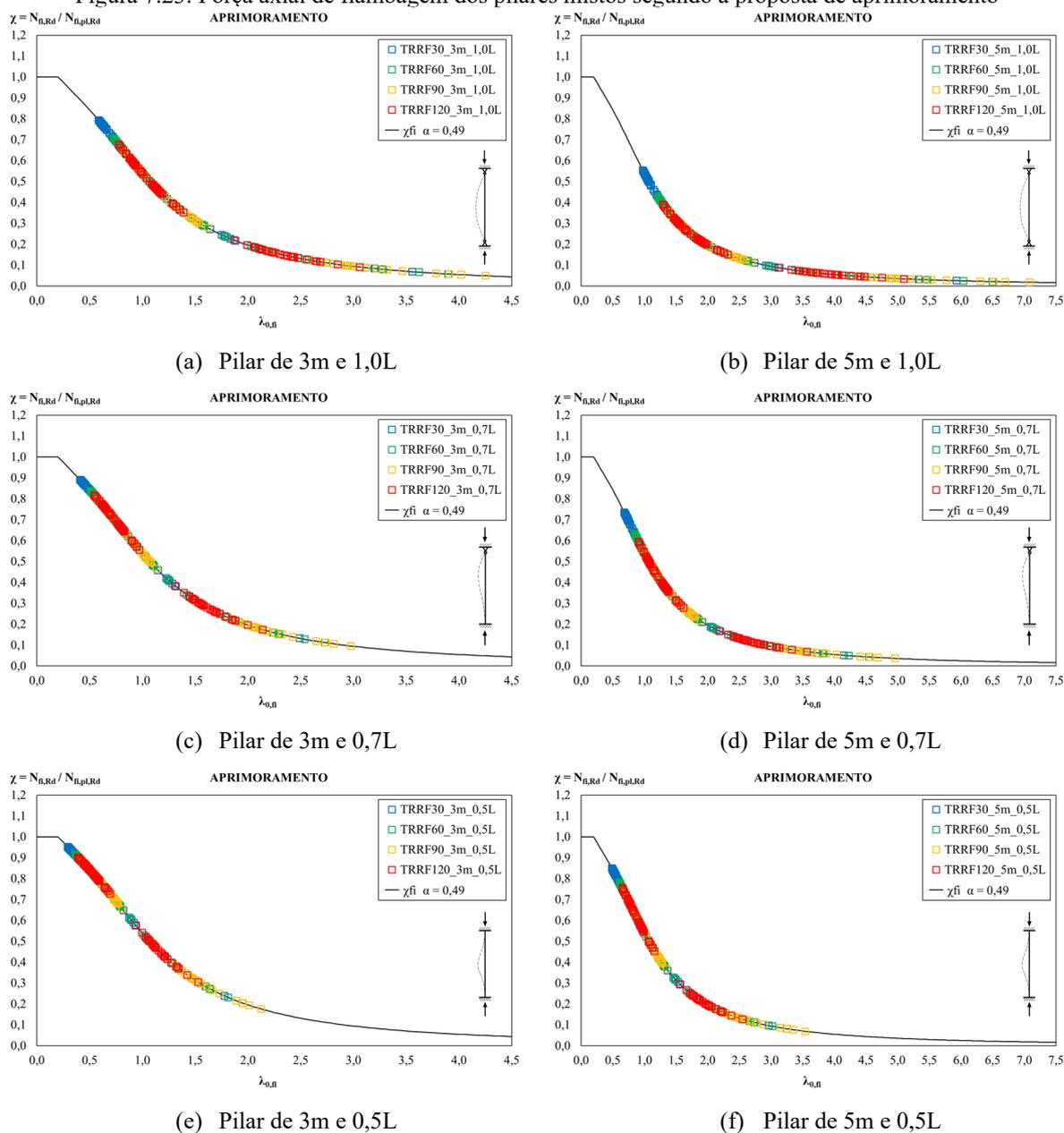
A Figura 7.22 apresenta os resultados do método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 estimando a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, utilizando a curva prescrita pela norma.

Figura 7.22: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo a ABNT NBR 14323:2013



A Figura 7.23 apresenta os resultados do método simplificado da proposta de aprimoramento que estima a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio.

Figura 7.23: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo a proposta de aprimoramento



Fonte: Próprio autor

A grande semelhança entre as curvas da norma e da proposta de aprimoramento se deve ao fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão χ .

O fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão χ é calculado conforme Equação (4.4), dependente da Equação (4.5), que possui um fator de imperfeição, o coeficiente α , que na norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 assume valor 0,49.

O código europeu de dimensionamento de estruturas metálicas CEN EN 1993-1-1:2005 admite um total de cinco fatores de imperfeições, conforme Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Fatores de imperfeições atribuídos às curvas de flambagem

Curva de flambagem	a ₀	a	b	c	d
Fator de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

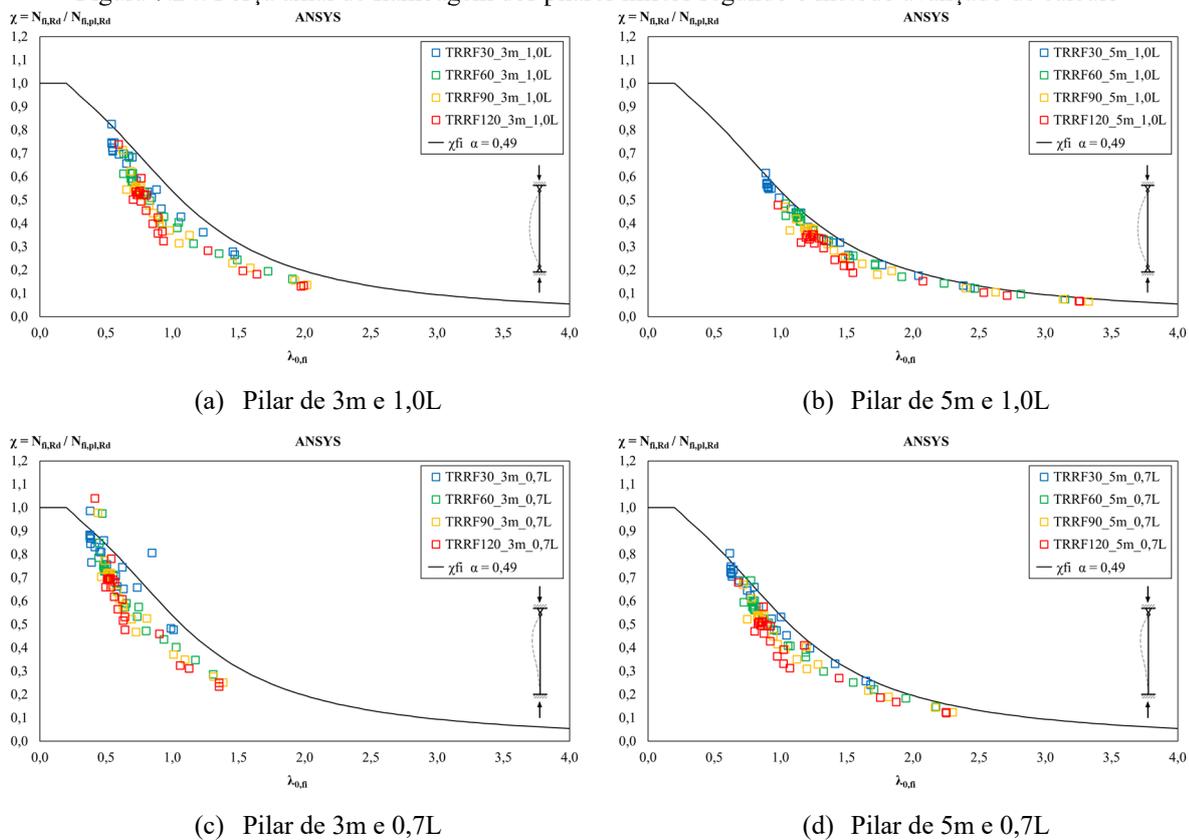
Fonte: Adaptado de CEN EN 1993-1-1:2005

Cada curva de flambagem é atribuída para o cálculo do coeficiente de redução χ e assim determinar a força axial de flambagem, a depender da classificação da seção transversal. Se a seção transversal for formada por aço laminado ou soldado, cantoneiras, seções vazadas, seções tipo U ou T, é atribuído um dos fatores de imperfeições para ser empregado no cálculo do fator de redução χ .

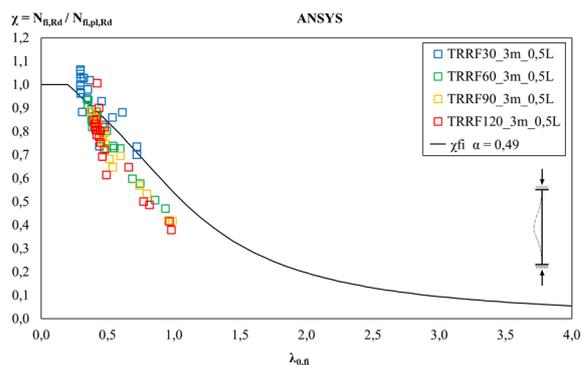
Para o dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio, tanto a norma europeia CEN EN 1994-1-2:2005 quanto a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 recomendam a utilização do fator de imperfeição $\alpha = 0,49$, correspondente à curva “c” da norma europeia CEN EN 1993-1-1:2005.

A Figura 7.24 apresenta os resultados do método avançado de cálculo, que estima a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio.

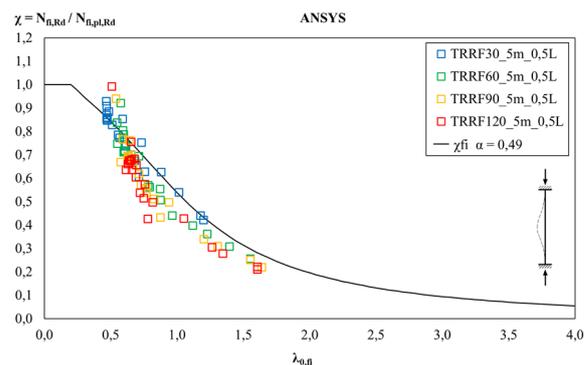
Figura 7.24: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo



Capítulo 7 – Comparação dos Resultados



(e) Pilar de 3m e 0,5L



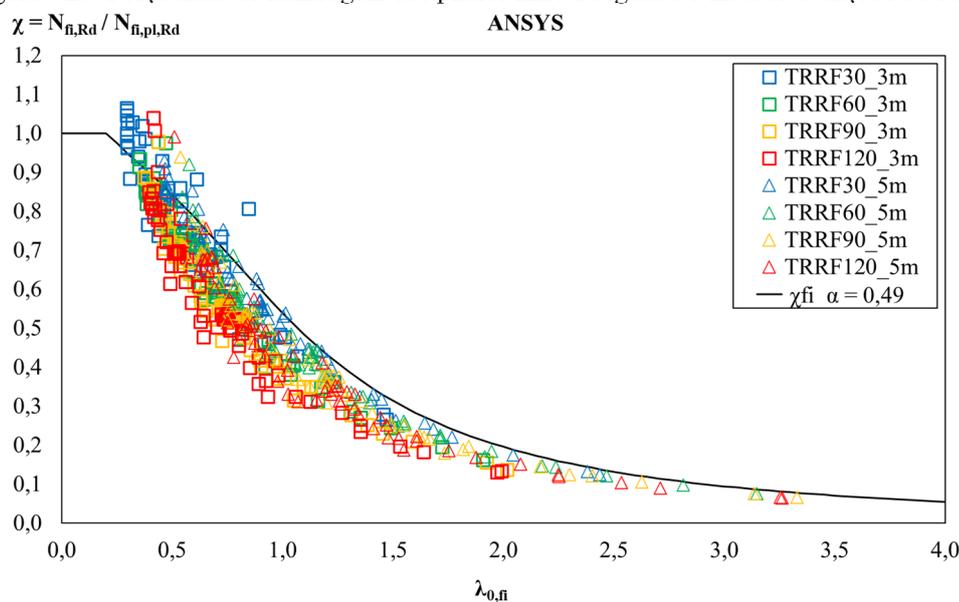
(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

Os resultados numéricos revelam que para praticamente todos os perfis estruturais estudados, em todos os tempos requeridos de resistência ao fogo, nos três comprimentos de flambagem dos dois tipos de pilares, a norma ABNT NBR 14323:2013 se apresenta contra a segurança quanto ao dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

A Figura 7.25 apresenta todos os resultados numéricos da força axial resistente de cálculo compilados em um único gráfico.

Figura 7.25: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo



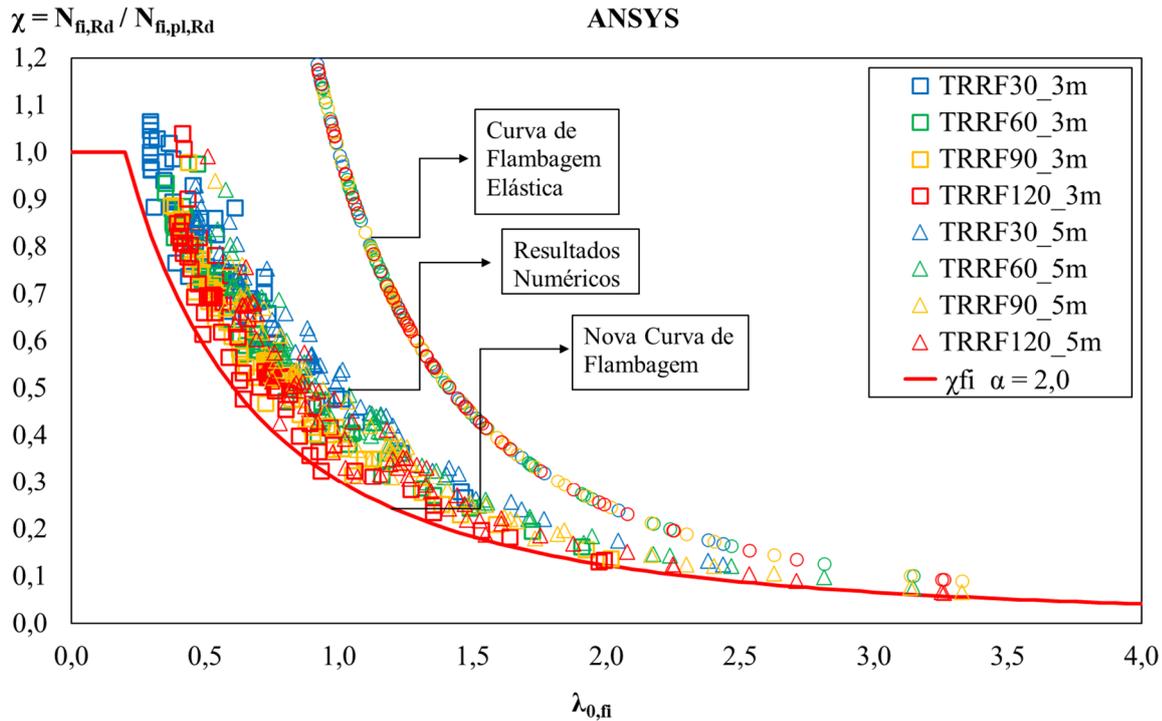
Fonte: Próprio autor

Fica evidente, portanto, a necessidade de que seja admitido um novo fator de imperfeição, para ajustar a curva de flambagem e assim tornar em favor da segurança o dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Nesse sentido, recomenda-se utilizar um fator de imperfeição igual a 2,0.

A Figura 7.25 apresenta todos os resultados numéricos da força axial resistente de cálculo compilados em um único gráfico, com a nova curva de flambagem, e os resultados da curva de flambagem elástica.

Figura 7.26: Força axial de flambagem dos pilares mistos segundo o método avançado de cálculo

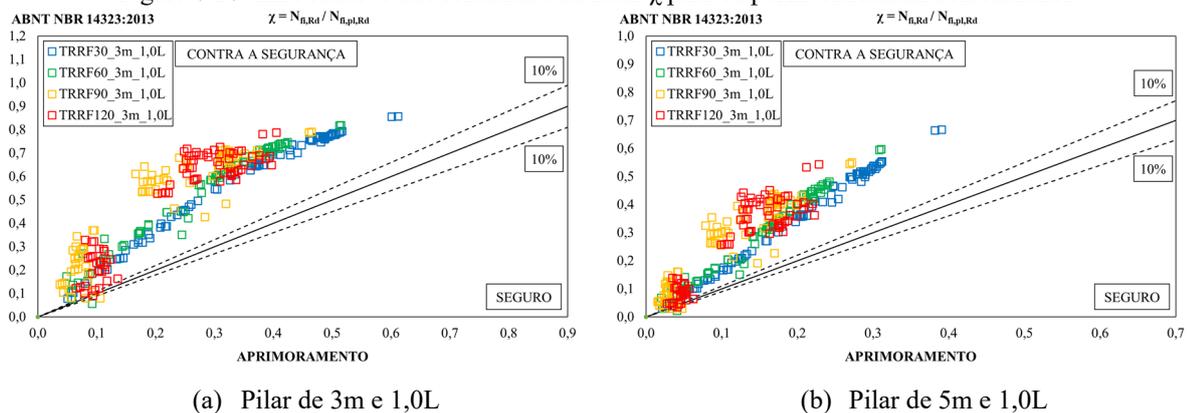


Fonte: Próprio autor

7.2.1 Erro relativo com a nova curva de flambagem

A Figura 7.27 compara os resultados obtidos pelo método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 de cálculo e com os resultados obtidos pela proposta de aprimoramento.

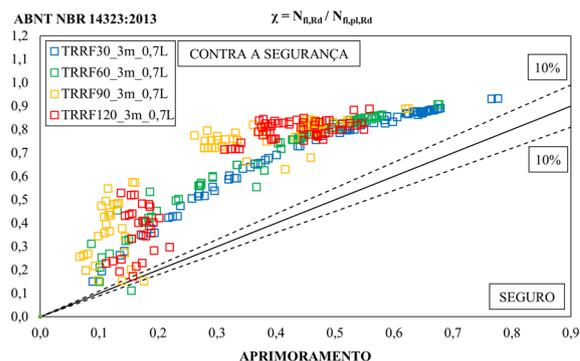
Figura 7.27: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados



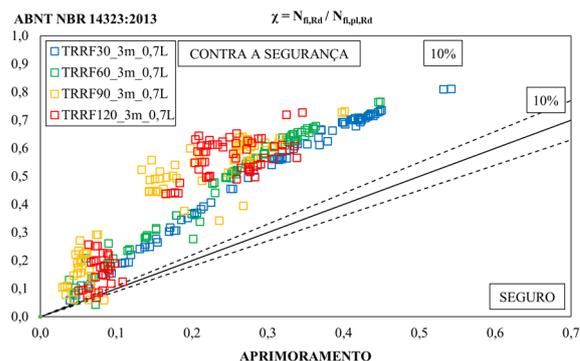
(a) Pilar de 3m e 1,0L

(b) Pilar de 5m e 1,0L

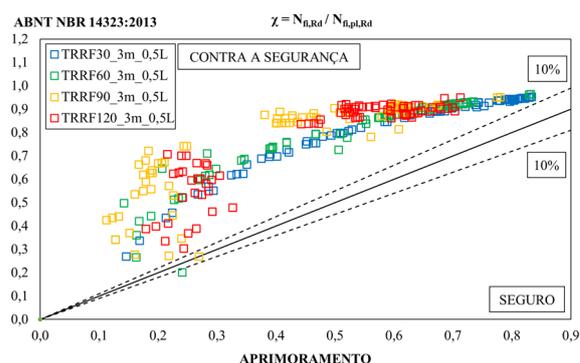
Capítulo 7 – Comparação dos Resultados



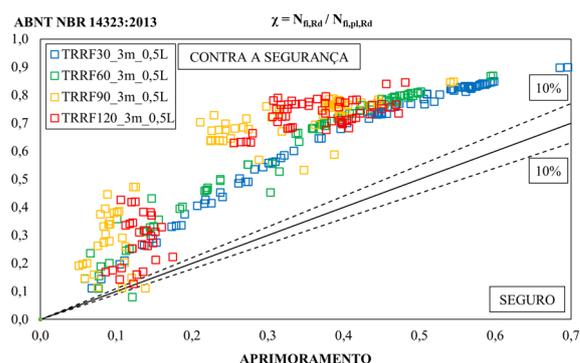
(c) Pilar de 3m e 0,7L



(d) Pilar de 5m e 0,7L



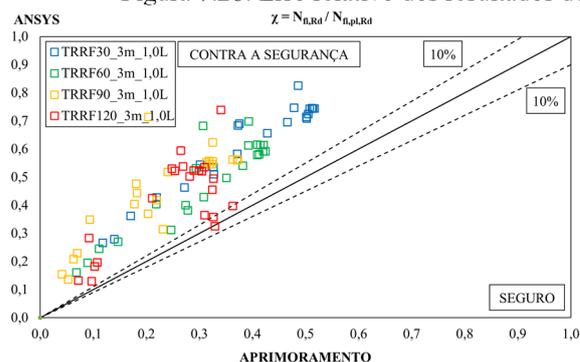
(e) Pilar de 3m e 0,5L



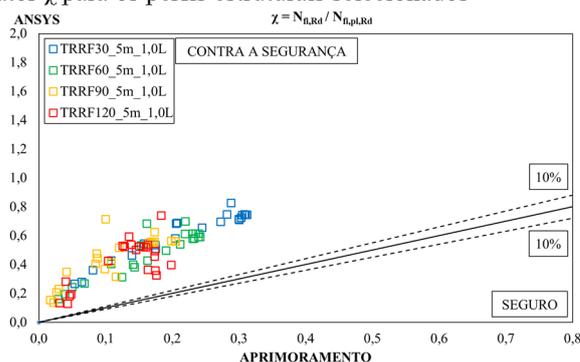
(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

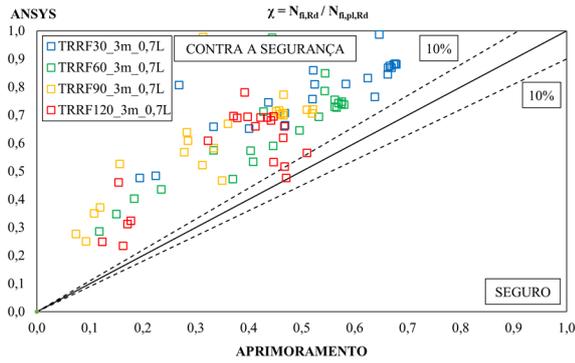
E por fim a Figura 7.28 compara os resultados obtidos pelo método avançado de cálculo e com os resultados obtidos pela proposta de aprimoramento.

Figura 7.28: Erro relativo dos resultados do fator χ para os perfis estruturais selecionados

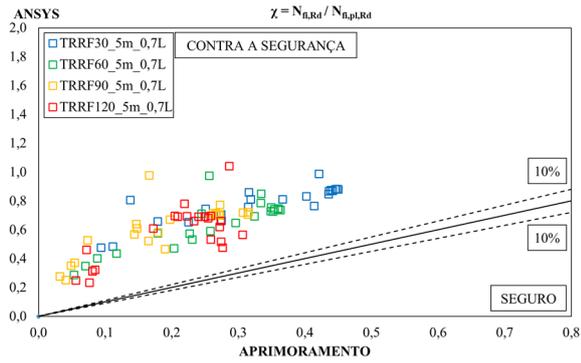
(a) Pilar de 3m e 1,0L



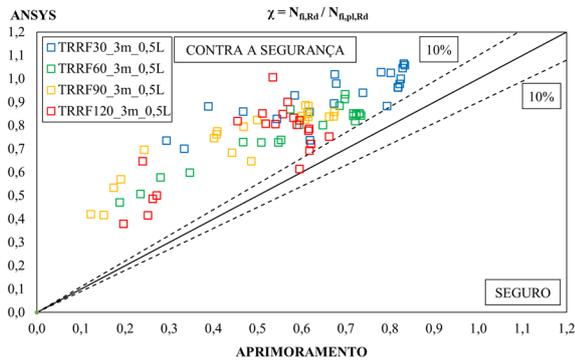
(b) Pilar de 5m e 1,0L



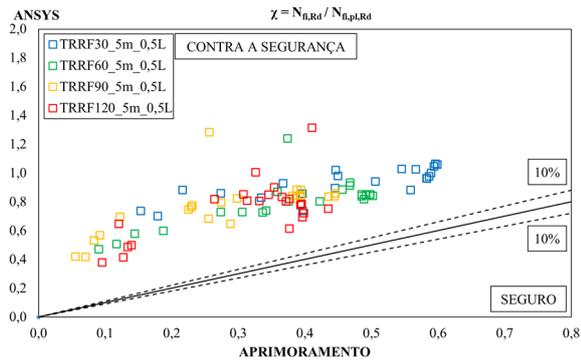
(c) Pilar de 3m e 0,7L



(d) Pilar de 5m e 0,7L



(e) Pilar de 3m e 0,5L



(f) Pilar de 5m e 0,5L

Fonte: Próprio autor

Como pode ser verificado na Figura 7.27 e na Figura 7.28 pelo simples fato de adotar um novo valor do fator de imperfeição da curva de dimensionamento de elementos submetidos à compressão tornou a proposta de aprimoramento em favor da segurança, frente aos valores da norma ABNT NBR 14323:2013 e frente dos valores obtidos por meio do método avançado de cálculo.

Portanto a proposta de aprimoramento do método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013 compreende utilizar novas formulações para obtenção das temperaturas médias das quatro componentes, apresentadas no Capítulo 5, assim como utilizar um fator de imperfeição igual a 2,0 na Equação (4.5).

Dessa forma está apresentada a proposta de aprimoramento do dimensionamento de pilares mistos em situação de incêndio.

8. CONCLUSÕES

Ao longo do presente trabalho foi realizada uma ampla pesquisa para apresentar e descrever aspectos de relacionados ao comportamento estrutural de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio, tanto do ponto de vista analítico, quanto do numérico.

A resistência do pilar misto parcialmente revestido em situação de incêndio depende diretamente da evolução da temperatura dos materiais quando expostos ao fogo. Nesse sentido, dois diferentes métodos de solução foram aplicados para buscar as cargas resistentes dos pilares mistos parcialmente revestidos quando expostos à elevação de temperatura do incêndio-padrão.

O método analítico, definido pelo método simplificado de cálculo da soma ponderada das quatro componentes, foi analisado pelas formulações da ABNT NBR 14323:2013. Além da proposta de aprimoramento, que segue em grande parte as recomendações de dimensionamento do método simplificado normativo e traz alterações no método de estimar a temperatura média das quatro componentes.

E o método avançado de cálculo, que para o desenvolvimento dos modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais, na ferramenta computacional ANSYS, houve um cuidado para que todos os parâmetros, coeficientes e formulações das recomendações normativas fossem seguidas criteriosamente.

O método avançado de cálculo foi conduzido em duas fases distintas. A primeira fase consistiu em efetuar simulações térmicas bidimensionais para auxiliar na elaboração de novas formulações para estimar a temperatura média das quatro componentes da seção transversal mista com maior precisão.

Quanto aos resultados numéricos bidimensionais, a respeito das temperaturas obtidas pelo método avançado de cálculo, houve cuidado para que fossem estabelecidos critérios de aplicabilidade frente aos resultados obtidos, pois um desafio foi identificar e organizar a dispersão dos valores obtidos excluindo da base de dados seções transversais que, comercialmente, são pouco utilizadas e fugiam do escopo desse trabalho, como é o caso de seções transversais com espessura de mesa maior que 30 milímetros e seções transversais muito robustas, com fator de massividade inferior a 9,0 [m⁻¹].

A respeito da temperatura das mesas, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +2,5% e -2,4%, para todos os perfis estruturais estudados. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +11,2% e -13,0%, para todos os perfis estudados.

Quanto a temperatura da alma, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +8,8% e -12,3% para os perfis nacionais, e entre +9,5% e -19,6% para todos os perfis estudados.

Para as temperaturas do núcleo de concreto, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +5,0% e -8,9%, para todos os perfis estudados. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +29,9% e -28,4%, para todos os perfis estruturais estudados.

Com relação à distância horizontal da porção de concreto a ser desprezada, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +17,4% e -23,1%, para todos os perfis estudados. Apesar de ser um erro relativo consideravelmente alto, o erro absoluto entre as distâncias obtidas de forma analítica e numérica ficaram entre +4,4mm e -6,2mm, ou seja, um erro de no máximo 0,6 centímetros na espessura horizontal de concreto a ser desprezado. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +299,8% e -8,5%, para todos os perfis estruturais estudados, e um erro absoluto que ficou entre +84mm e -35,9mm.

Já para a distância vertical da porção de concreto a ser desprezada, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +23,9% e -15,3%, para todos os perfis nacionais, e entre +23,9% e -29,9% entre todos os perfis estudados. Novamente, apesar de ser um erro relativo consideravelmente alto, o erro absoluto máximo entre as distâncias obtidas de forma analítica e numérica ficaram entre +13,1mm e -13,8mm, ou seja, um erro de no máximo 1,38 centímetros na espessura vertical de concreto a ser desprezado. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +356,8% e -16,7%, para todos os perfis estruturais estudados, e um erro absoluto que ficou entre +84mm e -146,5mm.

E quanto a temperatura da armadura longitudinal, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +14,8% e -8,1% para os perfis nacionais, e entre +14,8% e -13,6% para todos os perfis estudados.

As formulações da proposta de aprimoramento estimaram satisfatoriamente as temperaturas médias dos resultados das análises térmicas do ANSYS e apresentaram relativa concordância com as temperaturas prescritas na ABNT NBR 14323:2013.

A segunda fase apresentou quatro etapas, a primeira consistiu em realizar as simulações térmicas tridimensionais do pilar misto parcialmente revestido exposto ao incêndio-padrão, em

regime transiente e considerando as não linearidades das propriedades térmicas dos materiais, no qual gerou o campo de temperaturas da seção transversal da coluna. Na segunda etapa foi determinada a força de flambagem elástica do elemento estrutural, considerando o comportamento elástico linear dos materiais e as simulações realizadas em regime estático e levando em consideração o campo de temperaturas provenientes da simulação térmica. Na terceira etapa foi determinada a força axial de plastificação, e na quarta etapa foi determinada a força axial resistente de cálculo, considerando as não linearidades materiais e geométricas, assim como o campo de temperaturas proveniente das simulações térmicas.

Os resultados das forças resistentes dos modelos numéricos tridimensionais muitas vezes apresentaram diferenças significativas, maiores que 10%, entre os valores de resistências comparados aos modelos analíticos. A hipótese mais relevante é de que na modelagem computacional todo o material da seção transversal contribui para a resistência do elemento estrutural, enquanto que no método analítico, partes da seção transversal são desprezadas, para efeitos de simplificação de cálculo.

Os resultados da força axial de flambagem elástica, da análise numérica do ANSYS, também apresentaram grande similaridade no comportamento das cargas entre o método analítico e o método avançado. É possível atribuir a diferença nos valores das cargas pelo método avançado considerar o campo de temperaturas e não a temperatura média, além de considerar a integralidade da seção transversal da coluna, sem coeficientes de reduções que afetam a rigidez efetiva da seção transversal.

A análise não linear da terceira e quarta etapas do método avançado de cálculo apresentaram algumas diferenças com o método analítico, no qual a adequação do fator de imperfeição na equação que estabelece a força axial resistente de cálculo foi imperativa.

Além disso, foram realizadas simplificações do comportamento real de um elemento estrutural isolado em situação de incêndio. Foram atribuídas simplificações nas modelagens das malhas utilizando parâmetros idealizados do comportamento das curvas de tensão-deformação de regime elástico-perfeitamente plástico dos materiais, além das imperfeições geométricas utilizadas serem também parâmetros aproximados de um elemento estrutural real.

Para finalizar é importante salientar que foi empenhado grande esforço para que os resultados fossem os melhores e mais fiéis possíveis. Entretanto, é evidente que o modelo pode ser melhorado para eliminar certas simplificações e seja então possível obter os valores de cargas resistentes mais próximas possíveis da realidade, mas que de maneira geral foram satisfatórios para a elaboração da proposta de aprimoramento do método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013.

8.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Aspectos mencionados ao longo deste trabalho sugerem que trabalhos futuros avaliem de forma adequada algumas simplificações realizadas nesse trabalho.

- Modelar e avaliar a presença de armaduras transversais, estribos;
- Utilizar características não idealizadas das propriedades dos materiais;
- Modelar e avaliar o contato não perfeito entre os materiais;
- Realizar estudos experimentais para corroborar os resultados numéricos.
- Realizar uma análise de confiabilidade para a proposição do fator χ .

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **ABNT NBR 8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **ABNT NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro. 2013.

_____. **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **ABNT NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro. 2012.

ANSYS - ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, Release 19.0. Canonsburg, PA. January 2019.

ANSYS - Mechanical Application User 's 2019 Guide. ANSYS Inc.

AREZKI, S.; SAID, I. Practical fire design of partially encased composite steel-concrete columns according to Eurocode 4. **MATEC Web of Conferences**, vol. 11, EDP Sciences, 2014, p. 8. Doi: 10.1051/mateconf/20141101029.

BRAGA, A.C.G.; FERREIRA, W.G. Pilares mistos aço-concreto e comparativo de custo com pilares de aço e pilares de concreto armado. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 4, p. 407-414, 2011.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. BSI. EN 1363-1:2012. Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. London: BSI, 2012.

CALIÓ, L.J.; **Pilares mistos parcialmente revestidos: resistência e rigidez em situação de incêndio**. 2017. p. 94. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.

CORREIA, A.J.M.C.; RODRIGUES, J.P.C. Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation. **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 67. Elsevier, 2010, p. 593–601. Doi: 10.1016/j.jcsr.2010.12.002.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999, Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DENOËL, J. F. Fire safety and concrete structures. **Brussels: Febelcem**, 2007.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B. Investigation of concrete encased steel composite columns at elevated temperatures. **Thin-Walled Structures**, 8 ed., vol. 48, Elsevier, 2010, p. 597-608. Doi: 10.1016/j.tws.2010.03.004.

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

_____. EN 1992-1-1. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** European Standards, Brussels, 1994.

_____. EN 1992-1-2. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.** European Standards. Brussels, 2004.

_____. EN 1993-1-1. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** European Standards, Brussels, 2005.

_____. EN 1993-1-2. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.** European Standards. Brussels, 2005.

_____. EN 1994-1-1. **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** European Standards, Brussels, 2004.

_____. EN 1994-1-2. **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General Rules - Structural fire design.** European Standard. Brussels, 2005.

EXAME. O que se sabe sobre o incêndio na Catedral de Notre-Dame. [S.l.] 2019. Disponível em: <<https://exame.com/mundo/o-que-se-sabe-sobre-o-incendio-na-catedral-de-notre-dame/>>. Acesso em: 10 fevereiro 2020.

FELLOUH, A.; BENLAKEHAL, N.; PILOTO, P.A.G.; RAMOS, A.; MESQUITA, L.M.R. Load carrying capacity of partially encased columns for different fire ratings. **Fire Research** 2016, 1:23, p. 13-19. doi:10.4081/fire.2016.23

FELLOUH, A.; BOUGARA, A.; PILOTO, P.A.G.; BENLAKEHAL, N. Thermal behavior of partially encased column under combined compression and bending; Proceedings with full papers (pen-drive), **5th IBERIAN-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON FIRE SAFETY – CILASCI 5**, Porto, Portugal, p. 15-17, 2019. ISBN: 978-989-97210-3-6, p. 371-383. Proceedings with Extended Abstracts (soft book) ISBN: 978-989-97210-4-3, p. 77-78.

FELLOUH, A.; BOUGARA, A.; PILOTO, P.A.G.; BENLAKEHAL, N. Non-linear buckling analysis of composite columns made from high and normal strength concrete under fire. **Asian Journal Civil Engineering**, ISSN: 1563-0854 (Print) 2522-011X (Online), p. 1-11, v. 20, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00180-8>.

FLETCHER, I.A.; WELCH, S.; TORERO, J.L.; CARVEL, R.O.; USMANI, A. Behavior of concrete structures in fire. **Thermal Science**11, p. 37-52, 2011. doi:10.2298/TSCI0702037F

FRANSSEN, J-M.; KODUR, V.; ZAHARIA, R. **Designing Steel Structures for Fire Safety**. 1 ed. CRC Press. p.162, 2009.

GAIA, F. **Análise da distribuição das tensões de cisalhamento na interface aço-concreto de pilares mistos parcialmente revestidos**. 2008. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

- GERDAU. Catálogo Barras e Perfis Gerdau. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>>. Acesso em: 10 de maio de 2020.
- HAß, Rüdiger. **Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton**. 1986.
- HAN, L-H.; YANG, Y-F.; YANG, H.; HUO, J-S. Residual Strength of Concrete-filled RHS Columns After Exposure to the ISO-834 Standard Fire. **Thin-Walled Structures**, 12 ed., vol. 40. Elsevier, p. 991-1012, 2002. Doi: 10.1016/S0263-8231(02)00044-7.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. Cap. 29 - Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. **Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON**. São Paulo, 2010.
- HOFFSTAETER, R.A. **Estabilidade de Pilares Mistos Parcialmente Revestidos sob Ação do Fogo**. 2017, p. 104. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.
- HUANG, Z.-F.; TAN, K.-H.; PHNG, G.-H. Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel. **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 63. Elsevier, 2007, p. 437–447. Doi: 10.1016/j.jcsr.2006.07.001.
- Instrução Técnica Nº 08/2015. **Resistência ao fogo dos elementos de construção**. São Paulo, 2015.
- ISO. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 834: Fire-resistance tests – Elements of building construct – Part 1: General requirements**. ISO 834-1:1999. Genebra: ISO, 1999.
- JUNGBLUTH, O. **Optimierte Verbundbauteile**, Köln: Stahlbau Verlags GmbH, 1982.
- KINDMANN, R.; BERGMANN, R.; CAJOT, L.G.; SCHLEICH, J.B. Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 27, Malta. Elsevier Ltd., 1993, pp. 107-122. Doi: 10.1016/0143-974X(93)90009-H.
- KRÁLIK J.; KLABNÍK M.; GRMANOVÁ, A. Nonlinear analysis of steel concrete columns fire resistance. **22^a International Conference of Engineering Mechanics**, 2016, pp. 343-346.
- KODINA, K. Behavior of Composite Columns and Girders in Fire. **Braunschweig: Fire Safety Science 2**, p. 681-695, 1989. Doi: 10.3801/IAFSS.FSS.2-681.
- KORZEN, M.; RODRIGUES, J.P.C.; CORREIA, A.J.P.M. Composite Columns Made of Partially Encased Steel Sections Subjected to Fire. **Structures in Fire - Proceedings of the sixth International Conference**, DEStech Publications Inc, 2010, pp. 341-348.
- LI, S.; LIEW, J.R.; XIONG, M.X.; LAI, B.L. Experimental investigation on fire resistance of high-strength concrete encased steel composite columns. **Fire Safety Journal**, v.121, p.103273, 2021.

LIE T.T.; CHABOT, M. A method to predict the fire resistance of circular steel columns filled hollow steel columns. **Journal of Fire Protection Engineering**. 4 ed., vol. 2, 1990, p. 111-116. Doi: 10.1177/104239159000200402.

LIENHARD IV, J.H.; LIENHARD V, J.H. **A heat transfer textbook**. Massachusetts. Phlogiston Press, 2017, p. 757.

LOPES, R.F.R.; RODRIGUES, J.P.C. Behavior of restrained concrete filled square double-skin and double-tube hollow columns in case of fire, **Engineering Structures**, Volume 216, 2020. ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110736>.

MALHOTRA, H.L. Effect of Temperature on the Crushing Strength of Concrete. **Fire Research Station**, Boreham Wood. England. Vol. 130, 1954, p. 28.

MALHOTRA, H.L.; STEVENS, R.F. **Fire resistance of encased steel stanchions**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - ICE, vol. 29, 1964, p. 77-98. Doi: 10.1680/iicep.1964.10371.

MALITE, M. ALVA, G.M.S. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005.

MARTINS, C.H. **Análise não-linear de estruturas tridimensionais de edifícios de andares múltiplos com núcleos resistentes, considerando a rigidez transversal à flexão das lajes**. 2001, p. 223. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. doi:10.11606/T.18.2001.tde-17052006-154916.

PEREIRA, M.F. **Comportamento Estrutural de Pilares Mistos Parcialmente Revestidos Submetidos a flexo-compressão**. 2017. p. 239. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

PEREIRA, M.F. **Análise experimental e numérica de pilares mistos parcialmente revestidos**. 2014, p. 186. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço–Dimensionamento Prático de Acordo com a ABNT NBR 8800: 2008**. Editora LTC, 8ª. Edição, Rio de Janeiro, 2009.

PILOTO, P.A.G.; GAVILÁN, A.B.; ZIPPONI, M.; MARINI, A.; MESQUITA, L.M.R.; PLIZZARI, G. Experimental Investigation of the Fire Resistance of Partially Encased Beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 80, p. 121-137. Elsevier, 2013.

PILOTO, P.A.G.; ALMEIDA, D.; MESQUITA, L.M.R.; RAMOS-GAVILÁN, A.B. Partially encased section: Strength and Stiffness under fire conditions. In: **IFireSS–International Fire Safety Symposium**. 2015.

PILOTO, P.A.G.; CALIÓ, L.J.; RIGOBELLO, R. Balanced Summation model for the calculation of the buckling resistance of partially encased columns under fire: new improvements. **Proceedings of Research and advanced technology in fire safety**, University of Santander - GIDAI, Santander, Spain. p. 271–287, 2017. ISBN 978-84-8102-832-4.

- PILOTO, P.A.G.; HOFFSTAETER, R.A.; RIGOBELLO, R.; SOUFYANE, A.; BENLAKEHALN, N. Buckling resistance of partially encased columns under fire. **XI Portuguese Congress on Steel and Composite Construction – CMM 2017**, ISBN 978-989-99226-6-2, p. 707-715, Portuguese Association for Steel and Composite Construction, Coimbra, iParque, Portugal, 23th -24th November 2017.
- PILOTO, P.A.G.; ALFREDO, B.F.; ROSSETTO, D.R. Partially encased columns: strength and stiffness effect on the buckling resistance under fire. **Proceedings of the 6th Conference on Urban Fire Safety and 1st Civil Protection Conference**, ISBN 978-989-20-9058-0, p. 37-38, ISBN 978-989-96461-9-3, p. 151-159, University of Coimbra – Portugal, 2018.
- PILOTO, P.A.G.; GONÇALES, N.; RIGOBELLO, R.; VAZ, M.; GUEDES, R.; BAPTISTA, J.S. Partially encased columns embedded on wall under fire from one side; **5th Iberian-Latin-American Congress on Fire Safety – CILASCI 5**, Porto, Portugal, 2019. ISBN: 978-989-97210-3-6, p. 435-445.
- PIQUER, A.M.; HERNÁNDEZ-FIGUEIRIDO, D. Protected steel columns vs partially encased columns: Fire resistance and economic considerations. **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 124, Elsevier, 2016, p. 47-56. Doi: 10.1016/j.jcsr.2016.05.011.
- Portaria nº 1532/2008, **Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios**. 2008.
- PRICKETT B.S.; DRIVER, R.G., **Behaviour of partially encased composite columns made with high performance concrete**. Dept. of Civil and Environmental Engineering, 262 ed., University of Alberta. Edmonton, 2006, p. 221.
- PURKISS, J.A. **Fire Safety Engineering Design of Structures**, 2 ed., Elsevier Ltda., 2007. ISBN-13: 978-0-7506-6443-1.
- QUEIROZ, G.; PIMENTA, R.J.; MARTINS, A.G. **Estruturas Mistas**, 2 ed., vol. 1, Rio de Janeiro. Instituto **Aço Brasil / CBCA**, 2012, p. 68. ISBN 978-85-89819-30-5.
- RIGOBELLO, R. **Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aperticadas em situação de incêndio**. 2011. p. 272. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.
- ROCHA, F.M. **Pilares de Aço e Mistos de Aço e Concreto Inseridos em Paredes em Situação de Incêndio**. 2016. p. 262. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil. Universidade de Coimbra, Portugal, 2016.
- RODRIGUES, L.F.P. **“Desenvolvimento de um toolkit em Excel para o dimensionamento de pilares mistos segundo o Eurocódigo 4”**. 2008. p. 140. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.
- ROSSI, M.L. **Análise numérica de pilares mistos de aço e concreto isolados e inseridos em paredes em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2019.

SCHLEICH, J.-B.; DOTREPPE J.-C.; FRANSSSEN J.-M. **Computer assisted analysis of the fire resistance of steel and composite concrete-steel structures**. p.108. N°7210-SA/502. C.C.E, Brussels, 1986.

SHAN LI, J.Y.; LIEW, R.; XIONG, M.-X.; LAI, B.-L.; Experimental investigation on fire resistance of high-strength concrete encased steel composite columns, **Fire Safety Journal**, Volume 121, 2021, ISSN 0379-7112, DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103273.

SILVA, R.D. **Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/D.18.2006.tde-25042006-145734.

SIMÕES, Y.S.; ROCHA, F.M.; MUNAIAR NETO, J. Comparação numérica entre o comportamento termoestrutural de pilares de aço e mistos de aço e concreto parcialmente revestidos em situação de incêndio. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v.11, n. 4, p. 876-901, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000400012>.

ŠTEFAN, R.; SURA, J.; PROCHÁZKA, J.; KOHOUTKOVÁ, A.; WALD, F. Numerical investigation of slender reinforced concrete and steel-concrete composite columns at normal and high temperatures using sectional analysis and moment-curvature approach. **Engineering Structures**, v. 190, p. 285-305, 2019. Doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.071

TWILT, L.; HASS, R.; KLINGSCH, W.; EDWARDS, M.; DUTTA, D. **Design guide for structural hollow section columns exposed to fire**. Köln. Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire, 1994, p. 96.

VEJA. Incêndio no Museu Nacional começou no ar-condicionado, aponta laudo. [S.l.] 2018. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/brasil/laudo-erros-na-instalacao-eletrica-causaram-incendio-no-museu-nacional/>>. Acesso em: 10 fevereiro 2020.

VEJA. Prédio que desabou em SP era ícone da arquitetura modernista. [S.l.] 2018. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/brasil/predio-que-desabou-em-sp-era-icone-da-arquitetura-modernista/>>. Acesso em: 10 fevereiro 2020.

VILA REAL, P. **Incêndio em estruturas metálicas - Cálculo estrutural**. Edições Oriom, 2003, p. 356.

WANG, Y. **Steel and Composite Structures: Behavior and design for fire safety**. London: Spon Press, 2002. Doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103273.

WANG, Z.-H.; TAN, K.H. Residual area method for heat transfer analysis of concrete-encased I-sections in fire. **Engineering Structures**. vol. 28, Elsevier, 2006, p. 411-422. Doi: 10.1016/j.engstruct.2005.08.013.

WINTER, S.; LANGE, J. Behaviour of partially encased composite columns using high-strength steel – ultimate load and fire condition. **Composite Construction in Steel and Concret IV Conference**. Alberta. ASCE, 2000, p. 539-550. Doi:10.1061/40616(281)47.

APÊNDICE A - MÉTODOANALÍTICO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

Nesse apêndice são apresentados todos os resultados obtidos pelas formulações do Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

A.1 MÉTODO ANALÍTICO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

O presente anexo apresenta as tabelas contendo os resultados do método analítico de dimensionamento segundo o Anexo B da ABNT NBR 14323:2013.

A.1.1 MESAS DO PERFIL DE AÇO

A temperatura média nas mesas da seção transversal foi determinada para as seções em estudo conforme a Equação (4.8), seus valores estão apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1: Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	θ_{ft} [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	703,8	832,3	903,0	974,1
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	700,2	828,7	900,7	972,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	677,6	806,3	886,3	961,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	676,4	805,0	885,5	960,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	674,9	803,6	884,6	960,2
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	673,7	802,4	883,8	959,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	673,1	801,9	883,5	959,3
W 250 x 73,0 (H)	15,78	702,3	830,7	902,0	973,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	701,1	829,5	901,3	972,8
W 250 x 89,0 (H)	15,50	699,6	828,1	900,4	972,1
W 250 x 101,0 (H)	15,36	698,2	826,7	899,5	971,4
W 250 x 115,0 (H)	15,16	696,3	824,7	898,2	970,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	675,9	804,6	885,3	960,7
W 310 x 107,0 (H)	12,97	675,1	803,8	884,7	960,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	674,3	803,0	884,2	959,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	673,4	802,1	883,6	959,4
W 360 x 91,0 (H)	13,54	680,7	809,3	888,3	963,0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	679,7	808,4	887,7	962,5
W 360 x 110,0 (H)	13,37	679,0	807,7	887,2	962,2
W 360 x 122,0 (H)	13,29	678,3	806,9	886,7	961,8
W 410 x 46,1	19,25	735,7	863,8	923,4	989,5
W 410 x 53,0	16,26	706,9	835,3	905,0	975,6
W 410 x 60,0	16,15	705,8	834,2	904,3	975,1
W 410 x 75,0	15,95	704,0	832,4	903,1	974,2
W 410 x 85,0	15,85	702,9	831,3	902,5	973,7
W 460 x 52,0	17,60	719,9	848,1	913,3	981,9
W 460 x 68,0	17,34	717,4	845,6	911,7	980,7
W 460 x 82,0	14,82	693,0	821,5	896,1	968,9
W 460 x 97,0	14,65	691,4	820,0	895,1	968,1
W 460 x 106,0	14,57	690,6	819,2	894,6	967,8
W 530 x 66,0	15,93	703,7	832,1	903,0	974,1
W 530 x 74,0	15,83	702,7	831,2	902,3	973,6
W 530 x 85,0	15,79	702,3	830,8	902,1	973,4
W 530 x 92,0	13,32	678,6	807,2	886,9	961,9
W 530 x 101,0	13,25	677,8	806,5	886,5	961,6
W 530 x 109,0	13,19	677,3	806,0	886,1	961,3

Apêndice A

Tabela A.1 (Continuação): Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{t,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	665,8	794,6	878,8	955,8
W 610 x 140,0	11,94	665,2	794,0	878,4	955,5
W 610 x 155,0	9,45	641,2	770,2	863,1	943,9
W 610 x 174,0	9,40	640,7	769,8	862,8	943,7
W 610 x 195,0	9,33	640,1	769,1	862,4	943,4
W 610 x 217,0	9,28	639,6	768,6	862,1	943,2

Fonte: Próprio autor

A temperatura média nas mesas do perfil de aço permite determinar os fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, apresentados conforme Tabela A.2 e Tabela A.3.

Tabela A.2: Coeficientes de redução para tensão de escoamento

Perfil	(u/A) _p	$k_{y,\theta}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,225	0,094	0,059	0,045
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,230	0,096	0,060	0,046
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,284	0,107	0,067	0,048
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,287	0,107	0,067	0,048
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,290	0,108	0,068	0,048
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,293	0,109	0,068	0,048
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,294	0,109	0,068	0,048
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,227	0,095	0,060	0,045
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,229	0,095	0,060	0,045
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,231	0,096	0,060	0,046
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,234	0,097	0,060	0,046
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,239	0,098	0,061	0,046
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,288	0,108	0,067	0,048
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,290	0,108	0,068	0,048
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,292	0,108	0,068	0,048
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,294	0,109	0,068	0,048
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,276	0,105	0,066	0,047
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,279	0,106	0,066	0,047
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,280	0,106	0,066	0,048
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,282	0,107	0,067	0,048
W 410 x 46,1	19,25	0,187	0,078	0,055	0,042
W 410 x 53,0	16,26	0,222	0,092	0,059	0,045
W 410 x 60,0	16,15	0,223	0,093	0,059	0,045
W 410 x 75,0	15,95	0,225	0,094	0,059	0,045
W 410 x 85,0	15,85	0,227	0,094	0,060	0,045
W 460 x 52,0	17,60	0,206	0,086	0,057	0,044
W 460 x 68,0	17,34	0,209	0,087	0,058	0,044
W 460 x 82,0	14,82	0,247	0,099	0,062	0,046
W 460 x 97,0	14,65	0,251	0,100	0,062	0,046
W 460 x 106,0	14,57	0,252	0,100	0,063	0,046
W 530 x 66,0	15,93	0,226	0,094	0,059	0,045
W 530 x 74,0	15,83	0,227	0,094	0,060	0,045
W 530 x 85,0	15,79	0,227	0,095	0,060	0,045
W 530 x 92,0	13,32	0,281	0,106	0,067	0,048
W 530 x 101,0	13,25	0,283	0,107	0,067	0,048
W 530 x 109,0	13,19	0,285	0,107	0,067	0,048
W 610 x 125,0	12,00	0,312	0,116	0,071	0,049
W 610 x 140,0	11,94	0,314	0,117	0,071	0,049

Tabela A.2 (Continuação): Coeficientes de redução para tensão de escoamento

Perfil	(u/A) _p	k _{y,0}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 155,0	9,45	0,371	0,146	0,078	0,051
W 610 x 174,0	9,40	0,372	0,146	0,079	0,051
W 610 x 195,0	9,33	0,374	0,147	0,079	0,051
W 610 x 217,0	9,28	0,375	0,148	0,079	0,051

Fonte: Próprio autor

A Tabela A.3 apresenta os coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das mesas do perfil estrutural em situação de incêndio.

Tabela A.3: Coeficientes de redução para o módulo de elasticidade

Perfil	(u/A) _p	k _{E,0}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,128	0,083	0,067	0,051
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,130	0,084	0,067	0,051
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,170	0,089	0,071	0,054
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,173	0,089	0,071	0,054
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,175	0,089	0,071	0,054
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,177	0,089	0,071	0,054
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,178	0,090	0,071	0,054
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,129	0,083	0,067	0,051
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,130	0,083	0,067	0,051
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,131	0,084	0,067	0,051
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,133	0,084	0,068	0,051
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,137	0,084	0,068	0,052
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,173	0,089	0,071	0,054
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,175	0,089	0,071	0,054
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,176	0,089	0,071	0,054
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,178	0,090	0,071	0,054
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,165	0,088	0,070	0,053
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,166	0,088	0,070	0,053
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,168	0,088	0,070	0,054
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,169	0,088	0,070	0,054
W 410 x 46,1	19,25	0,116	0,076	0,062	0,047
W 410 x 53,0	16,26	0,127	0,082	0,066	0,050
W 410 x 60,0	16,15	0,128	0,082	0,067	0,051
W 410 x 75,0	15,95	0,128	0,083	0,067	0,051
W 410 x 85,0	15,85	0,129	0,083	0,067	0,051
W 460 x 52,0	17,60	0,122	0,079	0,065	0,049
W 460 x 68,0	17,34	0,123	0,080	0,065	0,049
W 460 x 82,0	14,82	0,143	0,085	0,068	0,052
W 460 x 97,0	14,65	0,145	0,086	0,069	0,052
W 460 x 106,0	14,57	0,147	0,086	0,069	0,052
W 530 x 66,0	15,93	0,129	0,083	0,067	0,051
W 530 x 74,0	15,83	0,129	0,083	0,067	0,051
W 530 x 85,0	15,79	0,129	0,083	0,067	0,051
W 530 x 92,0	13,32	0,169	0,088	0,070	0,054
W 530 x 101,0	13,25	0,170	0,089	0,071	0,054
W 530 x 109,0	13,19	0,171	0,089	0,071	0,054
W 610 x 125,0	12,00	0,192	0,092	0,072	0,055
W 610 x 140,0	11,94	0,193	0,092	0,072	0,055
W 610 x 155,0	9,45	0,236	0,102	0,076	0,058
W 610 x 174,0	9,40	0,237	0,102	0,076	0,058
W 610 x 195,0	9,33	0,238	0,102	0,076	0,058
W 610 x 217,0	9,28	0,239	0,103	0,076	0,058

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A força axial de plastificação de cálculo das mesas, para as seções transversais estudadas, pode ser verificada conforme a Tabela A.4.

Tabela A.4: Força axial de plastificação de cálculo das mesas

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,f} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	426,0	177,4	112,3	85,4
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	593,5	247,2	154,6	117,6
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	658,9	248,2	155,2	110,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	798,3	299,2	187,2	133,1
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	962,1	358,7	224,4	159,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1097,8	407,5	255,0	180,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	1163,9	431,1	269,8	190,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	565,6	235,6	148,3	112,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	627,8	261,4	164,0	124,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	705,6	293,3	183,1	139,3
W 250 x 101,0 (H)	15,36	814,4	336,0	209,5	158,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	943,8	385,6	240,5	181,3
W 310 x 97,0 (H)	13,05	932,6	349,0	218,3	155,1
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1039,8	388,0	242,7	172,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1155,1	429,7	268,9	190,2
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1286,9	477,0	298,5	210,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	794,5	302,8	189,3	136,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	897,1	340,7	213,0	152,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	985,6	373,2	233,4	167,2
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1085,8	409,9	256,4	183,3
W 410 x 46,1	19,25	202,4	84,5	59,9	45,5
W 410 x 53,0	16,26	295,1	122,9	78,5	59,7
W 410 x 60,0	16,15	350,6	146,0	93,0	70,7
W 410 x 75,0	15,95	447,6	186,4	118,0	89,7
W 410 x 85,0	15,85	514,8	214,4	135,3	102,9
W 460 x 52,0	17,60	233,5	97,4	65,0	49,4
W 460 x 68,0	17,34	342,3	142,7	94,4	71,8
W 460 x 82,0	14,82	520,4	209,3	130,6	97,5
W 460 x 97,0	14,65	634,1	253,1	158,0	117,3
W 460 x 106,0	14,57	696,2	276,9	172,9	128,1
W 530 x 66,0	15,93	292,7	121,9	77,1	58,6
W 530 x 74,0	15,83	353,1	147,1	92,7	70,5
W 530 x 85,0	15,79	429,4	178,8	112,6	85,6
W 530 x 92,0	13,32	633,2	239,3	149,7	107,1
W 530 x 101,0	13,25	713,9	269,1	168,3	120,2
W 530 x 109,0	13,19	778,8	292,9	183,2	130,7
W 610 x 125,0	12,00	966,4	360,7	218,6	151,3
W 610 x 140,0	11,94	1104,6	412,9	249,4	172,3
W 610 x 155,0	9,45	1576,8	619,1	333,2	217,5
W 610 x 174,0	9,40	1803,3	708,5	380,7	248,3
W 610 x 195,0	9,33	2058,3	809,6	433,9	282,5
W 610 x 217,0	9,28	2334,1	918,8	491,4	319,7

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva das duas mesas do perfil de aço em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela A.5.

Tabela A.5: Rigidez efetiva das mesas do perfil de aço

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,f} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	7,69E+11	4,95E+11	4,00E+11	3,04E+11
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,10E+12	7,05E+11	5,68E+11	4,32E+11
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,79E+12	9,31E+11	7,41E+11	5,64E+11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2,20E+12	1,13E+12	9,03E+11	6,86E+11
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2,70E+12	1,37E+12	1,09E+12	8,30E+11
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3,12E+12	1,58E+12	1,25E+12	9,53E+11
HP 310 x 132 (H)	12,76	3,34E+12	1,68E+12	1,33E+12	1,01E+12
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,00E+12	6,45E+11	5,20E+11	3,96E+11
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,12E+12	7,19E+11	5,80E+11	4,41E+11
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,26E+12	8,10E+11	6,52E+11	4,96E+11
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1,48E+12	9,32E+11	7,50E+11	5,70E+11
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,75E+12	1,08E+12	8,69E+11	6,61E+11
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2,52E+12	1,30E+12	1,03E+12	7,84E+11
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2,84E+12	1,45E+12	1,15E+12	8,76E+11
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3,18E+12	1,61E+12	1,28E+12	9,74E+11
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3,57E+12	1,80E+12	1,43E+12	1,09E+12
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,48E+12	7,87E+11	6,28E+11	4,78E+11
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,68E+12	8,91E+11	7,11E+11	5,40E+11
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,87E+12	9,82E+11	7,83E+11	5,96E+11
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2,08E+12	1,09E+12	8,65E+11	6,58E+11
W 410 x 46,1	19,25	1,19E+11	7,75E+10	6,38E+10	4,85E+10
W 410 x 53,0	16,26	2,56E+11	1,65E+11	1,34E+11	1,02E+11
W 410 x 60,0	16,15	3,07E+11	1,98E+11	1,60E+11	1,22E+11
W 410 x 75,0	15,95	3,99E+11	2,57E+11	2,08E+11	1,58E+11
W 410 x 85,0	15,85	4,63E+11	2,98E+11	2,41E+11	1,83E+11
W 460 x 52,0	17,60	1,54E+11	1,00E+11	8,16E+10	6,21E+10
W 460 x 68,0	17,34	2,31E+11	1,49E+11	1,22E+11	9,25E+10
W 460 x 82,0	14,82	5,30E+11	3,16E+11	2,54E+11	1,93E+11
W 460 x 97,0	14,65	6,62E+11	3,89E+11	3,12E+11	2,38E+11
W 460 x 106,0	14,57	7,36E+11	4,30E+11	3,44E+11	2,62E+11
W 530 x 66,0	15,93	2,19E+11	1,41E+11	1,14E+11	8,68E+10
W 530 x 74,0	15,83	2,67E+11	1,72E+11	1,39E+11	1,06E+11
W 530 x 85,0	15,79	3,25E+11	2,09E+11	1,69E+11	1,28E+11
W 530 x 92,0	13,32	8,00E+11	4,20E+11	3,34E+11	2,54E+11
W 530 x 101,0	13,25	9,12E+11	4,76E+11	3,79E+11	2,88E+11
W 530 x 109,0	13,19	1,01E+12	5,22E+11	4,16E+11	3,16E+11
W 610 x 125,0	12,00	1,50E+12	7,23E+11	5,67E+11	4,31E+11
W 610 x 140,0	11,94	1,73E+12	8,32E+11	6,51E+11	4,95E+11
W 610 x 155,0	9,45	5,08E+12	2,20E+12	1,63E+12	1,24E+12
W 610 x 174,0	9,40	5,85E+12	2,52E+12	1,88E+12	1,43E+12
W 610 x 195,0	9,33	6,77E+12	2,91E+12	2,16E+12	1,64E+12
W 610 x 217,0	9,28	7,72E+12	3,32E+12	2,46E+12	1,87E+12

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A.1.2 ALMA DO PERFIL DE AÇO

Na Tabela A.6 são apresentados os resultados da redução da altura da alma $h_{w,fi}$ para as seções estudadas, conforme Equação (4.13). Os coeficientes de redução para a tensão de escoamento são apresentados na Tabela A.7.

Tabela A.6: Redução da altura da alma

Perfil	$(u/A)_p$	$h_{w,fi}$ [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	13,6	33,0	52,4	63,7
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	13,2	31,8	50,2	60,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	13,6	32,3	49,7	58,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	13,4	31,8	48,8	57,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	13,2	31,2	47,8	56,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	13,1	30,8	47,1	55,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	13,0	30,6	46,8	55,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	13,2	31,9	50,3	60,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	13,1	31,4	49,6	59,8
W 250 x 89,0 (H)	15,50	12,9	31,0	48,6	58,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	12,6	30,3	47,5	57,1
W 250 x 115,0 (H)	15,16	12,4	29,6	46,3	55,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	13,2	31,2	47,9	56,5
W 310 x 107,0 (H)	12,97	13,1	30,9	47,2	55,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	12,9	30,5	46,6	55,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	12,8	30,1	45,9	54,1
W 360 x 91,0 (H)	13,54	13,2	30,9	46,7	54,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	13,1	30,6	46,1	54,0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	13,0	30,3	45,6	53,4
W 360 x 122,0 (H)	13,29	12,8	29,9	45,1	52,7
W 410 x 46,1	19,25	13,7	31,7	47,5	55,2
W 410 x 53,0	16,26	13,7	31,8	47,6	55,3
W 410 x 60,0	16,15	13,6	31,5	47,0	54,7
W 410 x 75,0	15,95	13,4	30,9	46,2	53,7
W 410 x 85,0	15,85	13,2	30,6	45,6	53,0
W 460 x 52,0	17,60	13,8	31,7	47,1	54,5
W 460 x 68,0	17,34	13,5	31,0	46,0	53,3
W 460 x 82,0	14,82	13,4	30,9	45,9	53,1
W 460 x 97,0	14,65	13,3	30,5	45,2	52,3
W 460 x 106,0	14,57	13,2	30,2	44,8	51,9
W 530 x 66,0	15,93	13,8	31,4	46,4	53,5
W 530 x 74,0	15,83	13,7	31,2	45,9	53,0
W 530 x 85,0	15,79	13,5	30,8	45,4	52,4
W 530 x 92,0	13,32	13,5	30,9	45,6	52,6
W 530 x 101,0	13,25	13,5	30,7	45,2	52,2
W 530 x 109,0	13,19	13,4	30,5	45,0	51,9
W 610 x 125,0	12,00	13,4	30,4	44,7	51,4
W 610 x 140,0	11,94	13,3	30,2	44,3	50,9
W 610 x 155,0	9,45	13,4	30,5	44,8	51,5
W 610 x 174,0	9,40	13,3	30,2	44,3	51,0
W 610 x 195,0	9,33	13,2	29,9	43,9	50,5
W 610 x 217,0	9,28	13,1	29,6	43,4	50,0

Fonte: Próprio autor

Aplicando as formulações para se determinar o fator de redução da resistência ao escoamento da alma para os perfis estudados pode ser observado na Tabela A.7.

Tabela A.7: Resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	f _{y,0,w} [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	303,2	243,8	184,0	149,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	304,6	247,6	191,2	159,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	311,0	264,5	221,3	198,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	311,5	265,8	223,4	201,1
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	312,1	267,2	225,9	204,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	312,5	268,4	227,8	206,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	312,7	268,9	228,7	207,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	304,4	247,1	190,3	157,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	304,9	248,5	192,9	161,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	305,6	250,3	196,1	165,7
W 250 x 101,0 (H)	15,36	306,2	252,0	199,2	169,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	307,0	254,0	202,9	174,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	312,1	267,2	225,9	204,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	312,4	268,1	227,3	206,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	312,7	268,9	228,7	207,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	313,2	270,0	230,5	210,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	316,5	278,4	244,3	227,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	316,8	279,2	245,7	228,8
W 360 x 110,0 (H)	13,37	317,0	279,8	246,6	230,0
W 360 x 122,0 (H)	13,29	317,3	280,4	247,6	231,2
W 410 x 46,1	19,25	320,1	287,5	258,9	244,9
W 410 x 53,0	16,26	320,1	287,5	258,9	244,9
W 410 x 60,0	16,15	320,4	288,1	259,9	246,0
W 410 x 75,0	15,95	320,8	289,0	261,3	247,8
W 410 x 85,0	15,85	321,0	289,6	262,3	248,9
W 460 x 52,0	17,60	322,8	294,0	269,2	257,1
W 460 x 68,0	17,34	323,3	295,1	270,9	259,2
W 460 x 82,0	14,82	323,3	295,2	271,1	259,4
W 460 x 97,0	14,65	323,6	295,9	272,2	260,7
W 460 x 106,0	14,57	323,7	296,2	272,7	261,3
W 530 x 66,0	15,93	326,1	301,8	281,3	271,4
W 530 x 74,0	15,83	326,2	302,2	281,8	272,1
W 530 x 85,0	15,79	326,4	302,7	282,6	273,0
W 530 x 92,0	13,32	326,4	302,5	282,4	272,7
W 530 x 101,0	13,25	326,5	302,8	282,9	273,3
W 530 x 109,0	13,19	326,6	303,0	283,1	273,6
W 610 x 125,0	12,00	328,8	308,3	291,2	283,1
W 610 x 140,0	11,94	329,0	308,6	291,7	283,6
W 610 x 155,0	9,45	328,8	308,3	291,1	283,0
W 610 x 174,0	9,40	328,9	308,6	291,6	283,5
W 610 x 195,0	9,33	329,1	308,9	292,1	284,2
W 610 x 217,0	9,28	329,3	309,3	292,7	284,8

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Os resultados da força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio determinadas pelas Equações (4.17) e (4.18), para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas A.8 e A.9, respectivamente.

A força axial de plastificação de cálculo da alma, para as seções transversais estudadas, pode ser verificada conforme a Tabela A.8.

Tabela A.8: Força axial de plastificação de cálculo da alma do perfil de aço

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,w} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	628,4	406,1	231,5	152,1
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	872,1	576,1	343,6	237,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	854,3	618,1	432,4	348,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1019,8	742,3	524,3	425,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1204,1	883,0	630,7	516,1
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1365,4	1007,0	725,3	597,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	1439,0	1064,2	769,7	635,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	518,9	341,9	202,8	139,6
W 250 x 80,0 (H)	15,66	569,6	378,2	227,8	159,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	652,9	437,8	268,8	192,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	727,1	492,2	307,6	223,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	829,0	567,5	362,0	268,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	774,6	568,1	405,8	332,0
W 310 x 107,0 (H)	12,97	854,1	629,0	452,2	371,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	933,1	690,0	499,1	412,3
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1030,7	766,3	558,6	464,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	883,0	683,2	526,2	454,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	978,6	760,1	588,5	510,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1063,4	828,4	643,7	559,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1212,3	946,9	738,4	643,7
W 410 x 46,1	19,25	791,4	638,2	517,7	463,0
W 410 x 53,0	16,26	849,3	684,8	555,6	496,8
W 410 x 60,0	16,15	873,8	706,5	575,1	515,3
W 410 x 75,0	15,95	1102,1	894,7	731,7	657,6
W 410 x 85,0	15,85	1239,0	1008,4	827,2	744,8
W 460 x 52,0	17,60	983,5	815,7	683,9	624,0
W 460 x 68,0	17,34	1180,3	983,5	828,9	758,6
W 460 x 82,0	14,82	1283,9	1070,3	902,5	826,3
W 460 x 97,0	14,65	1481,0	1238,3	1047,6	960,9
W 460 x 106,0	14,57	1637,6	1371,1	1161,8	1066,6
W 530 x 66,0	15,93	1377,5	1180,1	1025,1	954,6
W 530 x 74,0	15,83	1501,5	1288,2	1120,6	1044,4
W 530 x 85,0	15,79	1597,1	1373,1	1197,0	1117,0
W 530 x 92,0	13,32	1580,3	1357,7	1182,7	1103,2
W 530 x 101,0	13,25	1691,6	1455,3	1269,6	1185,2
W 530 x 109,0	13,19	1798,1	1548,0	1351,4	1262,0
W 610 x 125,0	12,00	2136,4	1878,2	1675,3	1583,1
W 610 x 140,0	11,94	2353,0	2071,1	1849,7	1749,0
W 610 x 155,0	9,45	2280,5	2004,4	1787,4	1688,8
W 610 x 174,0	9,40	2515,1	2213,3	1976,2	1868,4
W 610 x 195,0	9,33	2771,2	2442,2	2183,7	2066,2
W 610 x 217,0	9,28	2970,9	2621,9	2347,7	2223,0

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela A.9.

Tabela A.9: Rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,w} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	3,81E+09	3,06E+09	2,31E+09	1,87E+09
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	9,90E+09	8,04E+09	6,21E+09	5,17E+09
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	5,54E+09	4,71E+09	3,94E+09	3,54E+09
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	9,36E+09	7,99E+09	6,71E+09	6,05E+09
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,53E+10	1,31E+10	1,10E+10	9,98E+09
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2,20E+10	1,89E+10	1,61E+10	1,46E+10
HP 310 x 132 (H)	12,76	2,57E+10	2,21E+10	1,88E+10	1,71E+10
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2,10E+09	1,71E+09	1,31E+09	1,09E+09
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2,75E+09	2,24E+09	1,74E+09	1,46E+09
W 250 x 89,0 (H)	15,50	4,08E+09	3,34E+09	2,62E+09	2,21E+09
W 250 x 101,0 (H)	15,36	5,60E+09	4,61E+09	3,65E+09	3,11E+09
W 250 x 115,0 (H)	15,16	8,20E+09	6,79E+09	5,42E+09	4,67E+09
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4,05E+09	3,47E+09	2,93E+09	2,65E+09
W 310 x 107,0 (H)	12,97	5,41E+09	4,65E+09	3,94E+09	3,57E+09
W 310 x 117,0 (H)	12,88	7,04E+09	6,06E+09	5,15E+09	4,68E+09
W 310 x 129,0 (H)	12,78	9,41E+09	8,12E+09	6,93E+09	6,32E+09
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4,20E+09	3,69E+09	3,24E+09	3,01E+09
W 360 x 101,0 (H)	13,45	5,68E+09	5,00E+09	4,40E+09	4,10E+09
W 360 x 110,0 (H)	13,37	7,27E+09	6,41E+09	5,65E+09	5,27E+09
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,08E+10	9,51E+09	8,40E+09	7,84E+09
W 410 x 46,1	19,25	2,02E+09	1,81E+09	1,63E+09	1,54E+09
W 410 x 53,0	16,26	2,49E+09	2,23E+09	2,01E+09	1,90E+09
W 410 x 60,0	16,15	2,69E+09	2,42E+09	2,19E+09	2,07E+09
W 410 x 75,0	15,95	5,39E+09	4,85E+09	4,39E+09	4,16E+09
W 410 x 85,0	15,85	7,64E+09	6,90E+09	6,25E+09	5,93E+09
W 460 x 52,0	17,60	2,93E+09	2,67E+09	2,45E+09	2,34E+09
W 460 x 68,0	17,34	5,04E+09	4,60E+09	4,22E+09	4,04E+09
W 460 x 82,0	14,82	6,49E+09	5,92E+09	5,44E+09	5,20E+09
W 460 x 97,0	14,65	9,91E+09	9,06E+09	8,34E+09	7,98E+09
W 460 x 106,0	14,57	1,34E+10	1,22E+10	1,13E+10	1,08E+10
W 530 x 66,0	15,93	5,58E+09	5,16E+09	4,81E+09	4,64E+09
W 530 x 74,0	15,83	7,22E+09	6,69E+09	6,24E+09	6,02E+09
W 530 x 85,0	15,79	8,65E+09	8,02E+09	7,49E+09	7,23E+09
W 530 x 92,0	13,32	8,40E+09	7,78E+09	7,26E+09	7,02E+09
W 530 x 101,0	13,25	1,03E+10	9,52E+09	8,89E+09	8,59E+09
W 530 x 109,0	13,19	1,23E+10	1,15E+10	1,07E+10	1,03E+10
W 610 x 125,0	12,00	1,53E+10	1,44E+10	1,36E+10	1,32E+10
W 610 x 140,0	11,94	2,05E+10	1,92E+10	1,81E+10	1,76E+10
W 610 x 155,0	9,45	1,86E+10	1,75E+10	1,65E+10	1,60E+10
W 610 x 174,0	9,40	2,50E+10	2,34E+10	2,21E+10	2,15E+10
W 610 x 195,0	9,33	3,33E+10	3,12E+10	2,95E+10	2,87E+10
W 610 x 217,0	9,28	4,09E+10	3,85E+10	3,64E+10	3,54E+10

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A.1.3 CONCRETO ENTRE AS MESAS E A ALMA DO PERFIL DE AÇO

O parâmetro de redução da espessura da camada externa de concreto $b_{c,fi}$, é apresentado na Tabela A.10.

Tabela A.10: Espessura da camada externa de concreto a ser desprezada

Perfil	(u/A) _p	b _{c,fi} [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	4,0	15,0	30,5	55,9
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	4,0	15,0	30,3	55,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	4,0	15,0	29,1	50,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	4,0	15,0	29,0	50,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4,0	15,0	29,0	49,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4,0	15,0	28,9	49,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	4,0	15,0	28,9	49,5
W 250 x 73,0 (H)	15,78	4,0	15,0	30,4	55,6
W 250 x 80,0 (H)	15,66	4,0	15,0	30,3	55,3
W 250 x 89,0 (H)	15,50	4,0	15,0	30,3	55,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	4,0	15,0	30,2	54,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	4,0	15,0	30,1	54,3
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4,0	15,0	29,0	50,1
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4,0	15,0	29,0	49,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4,0	15,0	28,9	49,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4,0	15,0	28,9	49,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4,0	15,0	29,3	51,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4,0	15,0	29,2	50,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4,0	15,0	29,2	50,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4,0	15,0	29,1	50,6
W 410 x 46,1	19,25	4,0	15,0	32,1	62,5
W 410 x 53,0	16,26	4,0	15,0	30,6	56,5
W 410 x 60,0	16,15	4,0	15,0	30,6	56,3
W 410 x 75,0	15,95	4,0	15,0	30,5	55,9
W 410 x 85,0	15,85	4,0	15,0	30,4	55,7
W 460 x 52,0	17,60	4,0	15,0	31,3	59,2
W 460 x 68,0	17,34	4,0	15,0	31,2	58,7
W 460 x 82,0	14,82	4,0	15,0	29,9	53,6
W 460 x 97,0	14,65	4,0	15,0	29,8	53,3
W 460 x 106,0	14,57	4,0	15,0	29,8	53,1
W 530 x 66,0	15,93	4,0	15,0	30,5	55,9
W 530 x 74,0	15,83	4,0	15,0	30,4	55,7
W 530 x 85,0	15,79	4,0	15,0	30,4	55,6
W 530 x 92,0	13,32	4,0	15,0	29,2	50,6
W 530 x 101,0	13,25	4,0	15,0	29,1	50,5
W 530 x 109,0	13,19	4,0	15,0	29,1	50,4
W 610 x 125,0	12,00	4,0	15,0	28,5	48,0
W 610 x 140,0	11,94	4,0	15,0	28,5	47,9
W 610 x 155,0	9,45	4,0	15,0	27,2	42,9
W 610 x 174,0	9,40	4,0	15,0	27,2	42,8
W 610 x 195,0	9,33	4,0	15,0	27,2	42,7
W 610 x 217,0	9,28	4,0	15,0	27,1	42,6

Fonte: Próprio autor

A temperatura média da área residual de concreto está apresentada na Tabela A.11, para as seções transversais de interesse.

Tabela A.11: Temperatura média na área residual de concreto

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{c,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	239,1	357,9	429,4	499,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	235,8	354,7	425,7	493,8
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	215,6	335,2	402,2	460,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	214,5	334,1	400,9	458,5
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	213,2	332,9	399,2	456,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	212,1	331,8	397,4	454,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	211,6	331,3	396,6	453,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	237,7	356,5	427,8	496,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	236,6	355,5	426,6	495,1
W 250 x 89,0 (H)	15,50	235,3	354,2	425,0	492,9
W 250 x 101,0 (H)	15,36	234,0	353,0	423,6	490,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	232,3	351,3	421,6	488,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	214,1	333,8	400,5	457,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	213,4	333,1	399,5	456,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	212,7	332,4	398,3	455,5
W 310 x 129,0 (H)	12,78	211,8	331,5	396,9	454,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	218,3	337,8	405,4	464,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	217,5	337,0	404,5	463,5
W 360 x 110,0 (H)	13,37	216,9	336,4	403,7	462,4
W 360 x 122,0 (H)	13,29	216,2	335,8	402,9	461,3
W 410 x 46,1	19,25	267,6	385,4	462,5	546,4
W 410 x 53,0	16,26	241,8	360,5	432,6	503,7
W 410 x 60,0	16,15	240,9	359,6	431,5	502,1
W 410 x 75,0	15,95	239,2	357,9	429,5	499,3
W 410 x 85,0	15,85	238,2	357,0	428,5	497,8
W 460 x 52,0	17,60	253,4	371,7	446,0	522,9
W 460 x 68,0	17,34	251,2	369,5	443,4	519,2
W 460 x 82,0	14,82	229,4	348,5	418,2	483,1
W 460 x 97,0	14,65	228,0	347,1	416,5	480,8
W 460 x 106,0	14,57	227,3	346,4	415,7	479,6
W 530 x 66,0	15,93	239,0	357,8	429,3	499,0
W 530 x 74,0	15,83	238,1	356,9	428,3	497,6
W 530 x 85,0	15,79	237,7	356,6	427,9	497,0
W 530 x 92,0	13,32	216,5	336,0	403,2	461,7
W 530 x 101,0	13,25	215,8	335,4	402,5	460,7
W 530 x 109,0	13,19	215,3	334,9	401,9	459,8
W 610 x 125,0	12,00	205,1	325,0	385,7	442,9
W 610 x 140,0	11,94	204,5	324,5	384,8	442,0
W 610 x 155,0	9,45	183,0	303,7	349,2	406,4
W 610 x 174,0	9,40	182,6	303,3	348,6	405,7
W 610 x 195,0	9,33	182,0	302,8	347,6	404,7
W 610 x 217,0	9,28	181,6	302,4	346,9	404,0

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Os valores da resistência característica à compressão da seção em elevadas temperaturas $f_{ck,\theta}$ estão apresentados na Tabela A.12 e o módulo de elasticidade do concreto $E_{c1,\theta}$, apresentado na Tabela A.13.

Tabela A.12: Resistência característica à compressão do concreto em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$f_{ck,\theta}$ [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	18,22	15,84	14,12	12,02
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	18,28	15,91	14,23	12,19
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	18,69	16,30	14,93	13,19
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	18,71	16,32	14,97	13,25
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	18,74	16,34	15,02	13,31
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	18,76	16,36	15,05	13,36
HP 310 x 132 (H)	12,76	18,77	16,37	15,07	13,39
W 250 x 73,0 (H)	15,78	18,25	15,87	14,17	12,09
W 250 x 80,0 (H)	15,66	18,27	15,89	14,20	12,15
W 250 x 89,0 (H)	15,50	18,29	15,92	14,25	12,21
W 250 x 101,0 (H)	15,36	18,32	15,94	14,29	12,28
W 250 x 115,0 (H)	15,16	18,35	15,97	14,35	12,36
W 310 x 97,0 (H)	13,05	18,72	16,32	14,98	13,26
W 310 x 107,0 (H)	12,97	18,73	16,34	15,01	13,30
W 310 x 117,0 (H)	12,88	18,75	16,35	15,03	13,34
W 310 x 129,0 (H)	12,78	18,76	16,37	15,06	13,38
W 360 x 91,0 (H)	13,54	18,63	16,24	14,84	13,05
W 360 x 101,0 (H)	13,45	18,65	16,26	14,87	13,09
W 360 x 110,0 (H)	13,37	18,66	16,27	14,89	13,13
W 360 x 122,0 (H)	13,29	18,68	16,28	14,91	13,16
W 410 x 46,1	19,25	17,65	15,29	13,13	10,61
W 410 x 53,0	16,26	18,16	15,79	14,02	11,89
W 410 x 60,0	16,15	18,18	15,81	14,06	11,94
W 410 x 75,0	15,95	18,22	15,84	14,11	12,02
W 410 x 85,0	15,85	18,24	15,86	14,15	12,07
W 460 x 52,0	17,60	17,93	15,57	13,62	11,31
W 460 x 68,0	17,34	17,98	15,61	13,70	11,42
W 460 x 82,0	14,82	18,41	16,03	14,45	12,51
W 460 x 97,0	14,65	18,44	16,06	14,50	12,58
W 460 x 106,0	14,57	18,45	16,07	14,53	12,61
W 530 x 66,0	15,93	18,22	15,84	14,12	12,03
W 530 x 74,0	15,83	18,24	15,86	14,15	12,07
W 530 x 85,0	15,79	18,25	15,87	14,16	12,09
W 530 x 92,0	13,32	18,67	16,28	14,90	13,15
W 530 x 101,0	13,25	18,68	16,29	14,93	13,18
W 530 x 109,0	13,19	18,69	16,30	14,94	13,20
W 610 x 125,0	12,00	18,90	16,50	15,29	13,71
W 610 x 140,0	11,94	18,91	16,51	15,30	13,74
W 610 x 155,0	9,45	19,17	16,93	16,02	14,81
W 610 x 174,0	9,40	19,17	16,93	16,03	14,83
W 610 x 195,0	9,33	19,18	16,94	16,05	14,86
W 610 x 217,0	9,28	19,18	16,95	16,06	14,88

Fonte: Próprio autor

O módulo de elasticidade do concreto $E_{c1,\theta}$, apresentado na Tabela A.13.

Tabela A.13: Módulo de elasticidade do concreto em situação de incêndio

Perfil	$(u/A)_p$	$E_{c1,\theta}$ [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	3582	2307	1745	1268
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3629	2332	1776	1300
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3947	2496	1979	1515
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3966	2506	1991	1528
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3988	2517	2005	1543
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4006	2526	2017	1555
HP 310 x 132 (H)	12,76	4015	2531	2023	1562
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3602	2318	1759	1282
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3618	2326	1769	1292
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3637	2336	1781	1305
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3656	2346	1793	1318
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3682	2360	1810	1335
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3972	2509	1995	1532
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3985	2515	2003	1541
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3997	2521	2011	1549
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4012	2529	2021	1559
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3902	2473	1950	1484
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3916	2480	1959	1493
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3927	2486	1966	1501
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3938	2491	1973	1508
W 410 x 46,1	19,25	3200	2100	1500	974
W 410 x 53,0	16,26	3542	2286	1720	1237
W 410 x 60,0	16,15	3556	2293	1729	1248
W 410 x 75,0	15,95	3580	2306	1744	1267
W 410 x 85,0	15,85	3594	2313	1753	1276
W 460 x 52,0	17,60	3383	2200	1617	1111
W 460 x 68,0	17,34	3413	2216	1637	1134
W 460 x 82,0	14,82	3727	2383	1838	1365
W 460 x 97,0	14,65	3749	2394	1852	1380
W 460 x 106,0	14,57	3759	2400	1859	1387
W 530 x 66,0	15,93	3583	2308	1746	1269
W 530 x 74,0	15,83	3596	2314	1754	1277
W 530 x 85,0	15,79	3601	2317	1758	1281
W 530 x 92,0	13,32	3933	2489	1970	1505
W 530 x 101,0	13,25	3944	2495	1977	1512
W 530 x 109,0	13,19	3952	2499	1982	1518
W 610 x 125,0	12,00	4130	2588	2098	1641
W 610 x 140,0	11,94	4140	2593	2104	1648
W 610 x 155,0	9,45	4427	2795	2377	1942
W 610 x 174,0	9,40	4432	2799	2382	1947
W 610 x 195,0	9,33	4440	2805	2390	1956
W 610 x 217,0	9,28	4445	2809	2396	1963

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Os valores dos resultados para a resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva da área residual de concreto dos perfis, observadas as Equações (4.19) e (4.20), podem ser apreciados através das Tabelas A.14 e A.15.

Tabela A.14: Força axial de plastificação de cálculo do concreto

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,c} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	786,1	554,1	351,3	155,7
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	791,5	558,3	357,3	162,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1209,1	889,7	639,9	382,6
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1209,2	889,8	641,5	385,5
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1190,2	873,2	627,8	385,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1192,5	875,1	630,6	389,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	1194,6	876,7	632,6	391,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	776,0	545,2	344,5	157,2
W 250 x 80,0 (H)	15,66	778,3	547,0	346,7	159,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	780,6	548,9	349,2	162,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	778,8	547,4	349,2	163,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	781,6	549,6	352,3	167,1
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1192,2	874,7	627,9	384,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1192,2	874,7	628,8	386,2
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1191,2	874,0	629,1	387,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1192,4	875,0	630,9	390,3
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1131,5	824,5	579,7	340,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1133,2	825,9	581,9	343,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1133,8	826,4	583,1	345,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1129,3	822,8	581,0	344,7
W 410 x 46,1	19,25	687,6	458,2	231,2	18,7
W 410 x 53,0	16,26	910,7	638,5	393,8	153,9
W 410 x 60,0	16,15	916,8	643,5	398,7	158,3
W 410 x 75,0	15,95	917,5	644,0	400,8	161,6
W 410 x 85,0	15,85	896,6	625,9	385,8	161,0
W 460 x 52,0	17,60	853,9	583,7	327,4	78,2
W 460 x 68,0	17,34	858,8	587,7	332,6	83,8
W 460 x 82,0	14,82	1100,1	784,6	515,0	249,9
W 460 x 97,0	14,65	1105,1	788,7	520,0	255,5
W 460 x 106,0	14,57	1104,1	787,8	520,2	256,6
W 530 x 66,0	15,93	1096,3	767,4	470,8	176,4
W 530 x 74,0	15,83	1098,0	768,8	473,1	179,4
W 530 x 85,0	15,79	1094,2	765,7	470,8	178,0
W 530 x 92,0	13,32	1461,0	1069,8	757,1	433,3
W 530 x 101,0	13,25	1465,6	1073,6	761,2	437,6
W 530 x 109,0	13,19	1466,3	1074,3	762,8	440,1
W 610 x 125,0	12,00	1837,5	1369,6	1019,3	662,5
W 610 x 140,0	11,94	1836,1	1368,4	1019,3	664,0
W 610 x 155,0	9,45	2742,0	2150,0	1765,1	1367,8
W 610 x 174,0	9,40	2738,8	2147,8	1764,1	1368,6
W 610 x 195,0	9,33	2747,2	2155,6	1772,7	1378,4
W 610 x 217,0	9,28	2745,9	2155,1	1773,4	1380,7

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela A.15.

Tabela A.15: Rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,c} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	9,58E+11	4,14E+11	1,63E+11	3,55E+10
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,02E+12	4,42E+11	1,79E+11	4,14E+10
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2,26E+12	1,03E+12	5,07E+11	1,85E+11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2,31E+12	1,05E+12	5,24E+11	1,94E+11
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2,32E+12	1,05E+12	5,14E+11	1,99E+11
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2,38E+12	1,07E+12	5,32E+11	2,09E+11
HP 310 x 132 (H)	12,76	2,41E+12	1,09E+12	5,41E+11	2,14E+11
W 250 x 73,0 (H)	15,78	9,26E+11	3,95E+11	1,52E+11	3,46E+10
W 250 x 80,0 (H)	15,66	9,42E+11	4,02E+11	1,56E+11	3,62E+10
W 250 x 89,0 (H)	15,50	9,61E+11	4,11E+11	1,61E+11	3,81E+10
W 250 x 101,0 (H)	15,36	9,75E+11	4,17E+11	1,65E+11	3,96E+10
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,01E+12	4,30E+11	1,72E+11	4,26E+10
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2,20E+12	9,89E+11	4,81E+11	1,83E+11
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2,23E+12	1,00E+12	4,89E+11	1,88E+11
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2,25E+12	1,01E+12	4,97E+11	1,92E+11
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2,29E+12	1,03E+12	5,07E+11	1,98E+11
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,44E+12	6,24E+11	2,80E+11	8,94E+10
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,46E+12	6,35E+11	2,86E+11	9,26E+10
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,48E+12	6,44E+11	2,92E+11	9,55E+10
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,50E+12	6,53E+11	2,97E+11	9,82E+10
W 410 x 46,1	19,25	2,27E+11	8,05E+10	1,64E+10	6,30E+07
W 410 x 53,0	16,26	5,21E+11	2,06E+11	6,59E+10	7,12E+09
W 410 x 60,0	16,15	5,33E+11	2,11E+11	6,83E+10	7,70E+09
W 410 x 75,0	15,95	5,55E+11	2,20E+11	7,28E+10	8,85E+09
W 410 x 85,0	15,85	5,58E+11	2,20E+11	7,13E+10	9,27E+09
W 460 x 52,0	17,60	3,49E+11	1,29E+11	3,29E+10	1,07E+09
W 460 x 68,0	17,34	3,67E+11	1,37E+11	3,59E+10	1,41E+09
W 460 x 82,0	14,82	7,74E+11	3,13E+11	1,15E+11	2,06E+10
W 460 x 97,0	14,65	8,04E+11	3,27E+11	1,21E+11	2,28E+10
W 460 x 106,0	14,57	8,18E+11	3,33E+11	1,25E+11	2,40E+10
W 530 x 66,0	15,93	5,58E+11	2,15E+11	6,60E+10	6,03E+09
W 530 x 74,0	15,83	5,70E+11	2,20E+11	6,84E+10	6,56E+09
W 530 x 85,0	15,79	5,71E+11	2,21E+11	6,87E+10	6,64E+09
W 530 x 92,0	13,32	1,28E+12	5,37E+11	2,30E+11	6,03E+10
W 530 x 101,0	13,25	1,30E+12	5,47E+11	2,36E+11	6,28E+10
W 530 x 109,0	13,19	1,32E+12	5,57E+11	2,41E+11	6,51E+10
W 610 x 125,0	12,00	2,01E+12	8,67E+11	4,14E+11	1,45E+11
W 610 x 140,0	11,94	2,04E+12	8,81E+11	4,23E+11	1,50E+11
W 610 x 155,0	9,45	6,29E+12	3,04E+12	1,86E+12	1,01E+12
W 610 x 174,0	9,40	6,36E+12	3,07E+12	1,89E+12	1,03E+12
W 610 x 195,0	9,33	6,50E+12	3,14E+12	1,94E+12	1,06E+12
W 610 x 217,0	9,28	6,56E+12	3,18E+12	1,97E+12	1,08E+12

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A.1.4 ARMADURA LONGITUDINAL

Os valores dos coeficientes de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{Es,\theta}$ estão apresentados na Tabela A.16 e na Tabela A.17, respectivamente.

Tabela A.16: Coeficientes de redução da resistência ao escoamento da armadura longitudinal

Perfil	(u/A) _p	$k_{ys,0}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,00	0,98	0,57	0,29
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,00	0,98	0,57	0,29
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,00	0,98	0,57	0,29
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,00	0,98	0,57	0,29
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,00	0,98	0,57	0,29
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1,00	0,98	0,57	0,29
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,00	0,98	0,57	0,29
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,00	0,98	0,57	0,29
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,00	0,98	0,57	0,29
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,00	0,98	0,57	0,29
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,00	0,98	0,57	0,29
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,00	0,98	0,57	0,29
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,00	0,98	0,57	0,29
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,00	0,98	0,57	0,29
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,00	0,98	0,57	0,29
W 410 x 46,1	19,25	1,00	0,98	0,57	0,29
W 410 x 53,0	16,26	1,00	0,98	0,57	0,29
W 410 x 60,0	16,15	1,00	0,98	0,57	0,29
W 410 x 75,0	15,95	1,00	0,98	0,57	0,29
W 410 x 85,0	15,85	1,00	0,98	0,57	0,29
W 460 x 52,0	17,60	1,00	0,98	0,57	0,29
W 460 x 68,0	17,34	1,00	0,98	0,57	0,29
W 460 x 82,0	14,82	1,00	0,98	0,57	0,29
W 460 x 97,0	14,65	1,00	0,98	0,57	0,29
W 460 x 106,0	14,57	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 66,0	15,93	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 74,0	15,83	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 85,0	15,79	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 92,0	13,32	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 101,0	13,25	1,00	0,98	0,57	0,29
W 530 x 109,0	13,19	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 125,0	12,00	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 140,0	11,94	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 155,0	9,45	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 174,0	9,40	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 195,0	9,33	1,00	0,98	0,57	0,29
W 610 x 217,0	9,28	1,00	0,98	0,57	0,29

Fonte: Próprio autor

A Tabela A.17 apresenta os coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das armaduras longitudinais em situação de incêndio.

Tabela A.17: Coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das armaduras longitudinais

Perfil	$(u/A)_p$	$k_{Es,0}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,89	0,69	0,41	0,17
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,89	0,69	0,41	0,17
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,89	0,69	0,41	0,17
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,89	0,69	0,41	0,17
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,89	0,69	0,41	0,17
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,89	0,69	0,41	0,17
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,89	0,69	0,41	0,17
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,89	0,69	0,41	0,17
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,89	0,69	0,41	0,17
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,89	0,69	0,41	0,17
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,89	0,69	0,41	0,17
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,89	0,69	0,41	0,17
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,89	0,69	0,41	0,17
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,89	0,69	0,41	0,17
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,89	0,69	0,41	0,17
W 410 x 46,1	19,25	0,89	0,69	0,41	0,17
W 410 x 53,0	16,26	0,89	0,69	0,41	0,17
W 410 x 60,0	16,15	0,89	0,69	0,41	0,17
W 410 x 75,0	15,95	0,89	0,69	0,41	0,17
W 410 x 85,0	15,85	0,89	0,69	0,41	0,17
W 460 x 52,0	17,60	0,89	0,69	0,41	0,17
W 460 x 68,0	17,34	0,89	0,69	0,41	0,17
W 460 x 82,0	14,82	0,89	0,69	0,41	0,17
W 460 x 97,0	14,65	0,89	0,69	0,41	0,17
W 460 x 106,0	14,57	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 66,0	15,93	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 74,0	15,83	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 85,0	15,79	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 92,0	13,32	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 101,0	13,25	0,89	0,69	0,41	0,17
W 530 x 109,0	13,19	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 125,0	12,00	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 140,0	11,94	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 155,0	9,45	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 174,0	9,40	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 195,0	9,33	0,89	0,69	0,41	0,17
W 610 x 217,0	9,28	0,89	0,69	0,41	0,17

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A Tabela A.18 apresenta a temperatura média da armadura longitudinal, considerando o resultado a favor da segurança para esse parâmetro.

Tabela A.18: Temperatura média do aço da armadura longitudinal em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{s,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	186,2	319,4	496,3	641,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	186,2	319,4	496,3	641,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	186,2	319,4	496,3	641,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	186,2	319,4	496,3	641,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	186,2	319,4	496,3	641,9
W 250 x 101,0 (H)	15,36	186,2	319,4	496,3	641,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	186,2	319,4	496,3	641,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	186,2	319,4	496,3	641,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	186,2	319,4	496,3	641,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	186,2	319,4	496,3	641,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	186,2	319,4	496,3	641,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	186,2	319,4	496,3	641,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	186,2	319,4	496,3	641,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	186,2	319,4	496,3	641,9
W 360 x 122,0 (H)	13,29	186,2	319,4	496,3	641,9
W 410 x 46,1	19,25	186,2	319,4	496,3	641,9
W 410 x 53,0	16,26	186,2	319,4	496,3	641,9
W 410 x 60,0	16,15	186,2	319,4	496,3	641,9
W 410 x 75,0	15,95	186,2	319,4	496,3	641,9
W 410 x 85,0	15,85	186,2	319,4	496,3	641,9
W 460 x 52,0	17,60	186,2	319,4	496,3	641,9
W 460 x 68,0	17,34	186,2	319,4	496,3	641,9
W 460 x 82,0	14,82	186,2	319,4	496,3	641,9
W 460 x 97,0	14,65	186,2	319,4	496,3	641,9
W 460 x 106,0	14,57	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 66,0	15,93	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 74,0	15,83	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 85,0	15,79	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 92,0	13,32	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 101,0	13,25	186,2	319,4	496,3	641,9
W 530 x 109,0	13,19	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 125,0	12,00	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 140,0	11,94	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 155,0	9,45	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 174,0	9,40	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 195,0	9,33	186,2	319,4	496,3	641,9
W 610 x 217,0	9,28	186,2	319,4	496,3	641,9

Fonte: Próprio autor

As Tabelas A.19 e A.20 apresentam os valores da força axial de plastificação de cálculo e os valores da rigidez efetiva das barras da armadura longitudinal em situação de incêndio, respectivamente.

Tabela A.19: Força axial de plastificação de cálculo das barras da armadura

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,s} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	633,7	618,5	362,5	182,5
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	633,7	618,5	362,5	182,5
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	985,7	962,0	563,8	283,9
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	985,7	962,0	563,8	283,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1613,1	1574,4	922,7	464,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1613,1	1574,4	922,7	464,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	985,7	962,0	563,8	283,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	985,7	962,0	563,8	283,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	985,7	962,0	563,8	283,9
W 250 x 101,0 (H)	15,36	985,7	962,0	563,8	283,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	985,7	962,0	563,8	283,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 410 x 46,1	19,25	633,7	618,5	362,5	182,5
W 410 x 53,0	16,26	985,7	962,0	563,8	283,9
W 410 x 60,0	16,15	985,7	962,0	563,8	283,9
W 410 x 75,0	15,95	985,7	962,0	563,8	283,9
W 410 x 85,0	15,85	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 460 x 52,0	17,60	985,7	962,0	563,8	283,9
W 460 x 68,0	17,34	985,7	962,0	563,8	283,9
W 460 x 82,0	14,82	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 460 x 97,0	14,65	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 460 x 106,0	14,57	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 66,0	15,93	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 74,0	15,83	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 85,0	15,79	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 92,0	13,32	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 101,0	13,25	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 530 x 109,0	13,19	1613,1	1574,4	922,7	464,6
W 610 x 125,0	12,00	2520,5	2460,0	1441,7	725,9
W 610 x 140,0	11,94	2520,5	2460,0	1441,7	725,9
W 610 x 155,0	9,45	2520,5	2460,0	1441,7	725,9
W 610 x 174,0	9,40	2520,5	2460,0	1441,7	725,9
W 610 x 195,0	9,33	2520,5	2460,0	1441,7	725,9
W 610 x 217,0	9,28	2520,5	2460,0	1441,7	725,9

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

A rigidez efetiva das barras da armadura longitudinal em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela A.20.

Tabela A.20: Rigidez efetiva das barras da armadura em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,s} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,38E+12	1,07E+12	6,29E+11	2,68E+11
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,45E+12	1,12E+12	6,61E+11	2,82E+11
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3,73E+12	2,89E+12	1,70E+12	7,26E+11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3,80E+12	2,95E+12	1,74E+12	7,41E+11
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	6,36E+12	4,93E+12	2,91E+12	1,24E+12
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	6,48E+12	5,03E+12	2,96E+12	1,26E+12
HP 310 x 132 (H)	12,76	6,54E+12	5,07E+12	2,99E+12	1,27E+12
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2,09E+12	1,62E+12	9,56E+11	4,07E+11
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2,12E+12	1,64E+12	9,68E+11	4,12E+11
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2,14E+12	1,66E+12	9,80E+11	4,18E+11
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2,17E+12	1,69E+12	9,93E+11	4,23E+11
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2,23E+12	1,73E+12	1,02E+12	4,34E+11
W 310 x 97,0 (H)	13,05	6,06E+12	4,70E+12	2,77E+12	1,18E+12
W 310 x 107,0 (H)	12,97	6,12E+12	4,75E+12	2,80E+12	1,19E+12
W 310 x 117,0 (H)	12,88	6,18E+12	4,79E+12	2,82E+12	1,20E+12
W 310 x 129,0 (H)	12,78	6,24E+12	4,84E+12	2,85E+12	1,21E+12
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3,44E+12	2,67E+12	1,57E+12	6,69E+11
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3,48E+12	2,70E+12	1,59E+12	6,78E+11
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3,52E+12	2,73E+12	1,61E+12	6,87E+11
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3,57E+12	2,77E+12	1,63E+12	6,95E+11
W 410 x 46,1	19,25	9,60E+10	7,45E+10	4,39E+10	1,87E+10
W 410 x 53,0	16,26	5,33E+11	4,14E+11	2,44E+11	1,04E+11
W 410 x 60,0	16,15	5,47E+11	4,24E+11	2,50E+11	1,07E+11
W 410 x 75,0	15,95	5,75E+11	4,46E+11	2,63E+11	1,12E+11
W 410 x 85,0	15,85	9,78E+11	7,59E+11	4,47E+11	1,91E+11
W 460 x 52,0	17,60	2,51E+11	1,95E+11	1,15E+11	4,89E+10
W 460 x 68,0	17,34	2,70E+11	2,09E+11	1,23E+11	5,25E+10
W 460 x 82,0	14,82	1,22E+12	9,50E+11	5,60E+11	2,39E+11
W 460 x 97,0	14,65	1,28E+12	9,91E+11	5,84E+11	2,49E+11
W 460 x 106,0	14,57	1,30E+12	1,01E+12	5,96E+11	2,54E+11
W 530 x 66,0	15,93	6,44E+11	4,99E+11	2,94E+11	1,25E+11
W 530 x 74,0	15,83	6,62E+11	5,14E+11	3,03E+11	1,29E+11
W 530 x 85,0	15,79	6,62E+11	5,14E+11	3,03E+11	1,29E+11
W 530 x 92,0	13,32	1,74E+12	1,35E+12	7,96E+11	3,39E+11
W 530 x 101,0	13,25	1,77E+12	1,37E+12	8,10E+11	3,45E+11
W 530 x 109,0	13,19	1,80E+12	1,40E+12	8,25E+11	3,51E+11
W 610 x 125,0	12,00	3,82E+12	2,96E+12	1,75E+12	7,44E+11
W 610 x 140,0	11,94	3,88E+12	3,01E+12	1,77E+12	7,55E+11
W 610 x 155,0	9,45	1,13E+13	8,79E+12	5,18E+12	2,21E+12
W 610 x 174,0	9,40	1,14E+13	8,86E+12	5,22E+12	2,23E+12
W 610 x 195,0	9,33	1,16E+13	9,02E+12	5,32E+12	2,27E+12
W 610 x 217,0	9,28	1,17E+13	9,10E+12	5,36E+12	2,29E+12

Fonte: Próprio autor

A.1.5 FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DE CÁLCULO

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos pelo método simplificado de cálculo, segundo a ABNT NBR 14323:2013 e considerando a soma ponderada da resistência das quatro componentes.

A.1.5.1 Força axial de plastificação de cálculo total em situação de incêndio

A solução da Equação (4.2) leva a obtenção da força axial de plastificação de cálculo em situação de incêndio. Os valores podem ser observados na Tabela A.21.

Tabela A.21: Força axial de plastificação de cálculo total dos perfis em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2474,2	1756,2	1057,5	575,7
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2890,8	2000,1	1217,9	700,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3708,0	2717,9	1791,4	1125,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	4012,9	2893,4	1916,8	1227,8
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4969,6	3689,3	2405,6	1525,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	5268,8	3863,9	2533,7	1631,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	5410,6	3946,4	2594,8	1682,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2846,2	2084,7	1259,4	693,5
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2961,3	2148,7	1302,3	727,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3124,8	2241,9	1365,0	777,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3306,0	2337,6	1430,1	830,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3540,1	2464,7	1518,6	900,8
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4512,5	3366,2	2174,7	1336,1
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4699,2	3466,1	2246,4	1394,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4892,5	3568,1	2319,7	1454,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	5123,1	3692,7	2410,8	1529,8
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4422,1	3384,9	2218,0	1396,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4622,0	3501,1	2306,0	1471,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4796,0	3602,3	2382,8	1536,8
W 360 x 122,0 (H)	13,29	5040,5	3754,0	2498,5	1636,3
W 410 x 46,1	19,25	2315,2	1799,4	1171,3	709,7
W 410 x 53,0	16,26	3040,8	2408,3	1591,7	994,4
W 410 x 60,0	16,15	3126,8	2458,0	1630,5	1028,2
W 410 x 75,0	15,95	3453,0	2687,2	1814,3	1192,8
W 410 x 85,0	15,85	4263,6	3423,1	2270,9	1473,3
W 460 x 52,0	17,60	3056,6	2458,9	1640,1	1035,6
W 460 x 68,0	17,34	3367,1	2675,9	1819,6	1198,0
W 460 x 82,0	14,82	4517,5	3638,6	2470,8	1638,1
W 460 x 97,0	14,65	4833,4	3854,5	2648,3	1798,3
W 460 x 106,0	14,57	5051,0	4010,2	2777,5	1915,9
W 530 x 66,0	15,93	4379,7	3643,9	2495,7	1654,2
W 530 x 74,0	15,83	4565,8	3778,5	2609,1	1758,9
W 530 x 85,0	15,79	4733,9	3892,0	2703,1	1845,2
W 530 x 92,0	13,32	5287,7	4241,2	3012,3	2108,2
W 530 x 101,0	13,25	5484,3	4372,3	3121,8	2207,6
W 530 x 109,0	13,19	5656,4	4489,6	3220,2	2297,4

Apêndice A

Tabela A.21 (Continuação): Força axial de plastificação de cálculo total dos perfis em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	7460,9	6068,5	4355,0	3122,8
W 610 x 140,0	11,94	7814,2	6312,4	4560,1	3311,2
W 610 x 155,0	9,45	9119,9	7233,5	5327,4	4000,1
W 610 x 174,0	9,40	9577,7	7529,6	5562,7	4211,2
W 610 x 195,0	9,33	10097,3	7867,4	5832,0	4453,0
W 610 x 217,0	9,28	10571,4	8155,8	6054,2	4649,3

Fonte: Próprio autor

A.1.5.2 Força axial de flambagem elástica em situação de incêndio

A solução das Equações (4.6) e (4.7), onde a soma ponderada da contribuição de cada componente para a rigidez efetiva do pilar misto à flexão é apresentado pela Tabela A.22.

Tabela A.22: Rigidez efetiva do pilar misto à flexão em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2,91E+12	1,74E+12	9,56E+11	6,02E+11
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3,37E+12	2,01E+12	1,13E+12	7,52E+11
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	7,33E+12	4,27E+12	2,37E+12	1,44E+12
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	7,86E+12	4,53E+12	2,54E+12	1,59E+12
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,09E+13	6,52E+12	3,62E+12	2,24E+12
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,15E+13	6,82E+12	3,81E+12	2,40E+12
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,18E+13	6,97E+12	3,91E+12	2,47E+12
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3,83E+12	2,36E+12	1,30E+12	8,32E+11
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3,99E+12	2,45E+12	1,36E+12	8,84E+11
W 250 x 89,0 (H)	15,50	4,18E+12	2,56E+12	1,44E+12	9,47E+11
W 250 x 101,0 (H)	15,36	4,43E+12	2,69E+12	1,53E+12	1,03E+12
W 250 x 115,0 (H)	15,16	4,79E+12	2,88E+12	1,65E+12	1,13E+12
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,03E+13	6,19E+12	3,43E+12	2,11E+12
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,07E+13	6,38E+12	3,55E+12	2,22E+12
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,12E+13	6,58E+12	3,69E+12	2,34E+12
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,16E+13	6,80E+12	3,84E+12	2,47E+12
W 360 x 91,0 (H)	13,54	6,06E+12	3,61E+12	1,99E+12	1,22E+12
W 360 x 101,0 (H)	13,45	6,34E+12	3,75E+12	2,07E+12	1,30E+12
W 360 x 110,0 (H)	13,37	6,58E+12	3,87E+12	2,16E+12	1,36E+12
W 360 x 122,0 (H)	13,29	6,86E+12	4,00E+12	2,24E+12	1,44E+12
W 410 x 46,1	19,25	3,98E+11	2,03E+11	1,01E+11	6,88E+10
W 410 x 53,0	16,26	1,21E+12	6,88E+11	3,57E+11	2,13E+11
W 410 x 60,0	16,15	1,28E+12	7,31E+11	3,85E+11	2,37E+11
W 410 x 75,0	15,95	1,42E+12	8,14E+11	4,39E+11	2,81E+11
W 410 x 85,0	15,85	1,90E+12	1,13E+12	6,14E+11	3,87E+11
W 460 x 52,0	17,60	6,88E+11	3,72E+11	1,86E+11	1,14E+11
W 460 x 68,0	17,34	7,99E+11	4,37E+11	2,29E+11	1,50E+11
W 460 x 82,0	14,82	2,38E+12	1,40E+12	7,48E+11	4,53E+11
W 460 x 97,0	14,65	2,59E+12	1,51E+12	8,23E+11	5,13E+11
W 460 x 106,0	14,57	2,71E+12	1,58E+12	8,64E+11	5,46E+11
W 530 x 66,0	15,93	1,32E+12	7,54E+11	3,84E+11	2,22E+11
W 530 x 74,0	15,83	1,39E+12	8,00E+11	4,14E+11	2,46E+11
W 530 x 85,0	15,79	1,45E+12	8,35E+11	4,40E+11	2,70E+11
W 530 x 92,0	13,32	3,57E+12	2,03E+12	1,10E+12	6,49E+11
W 530 x 101,0	13,25	3,73E+12	2,11E+12	1,15E+12	6,92E+11
W 530 x 109,0	13,19	3,88E+12	2,19E+12	1,20E+12	7,30E+11

Tabela A.22 (Continuação): Rigidez efetiva do pilar misto à flexão em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	6,94E+12	4,03E+12	2,19E+12	1,30E+12
W 610 x 140,0	11,94	7,26E+12	4,18E+12	2,30E+12	1,39E+12
W 610 x 155,0	9,45	2,15E+13	1,23E+13	6,95E+12	4,27E+12
W 610 x 174,0	9,40	2,24E+13	1,27E+13	7,21E+12	4,50E+12
W 610 x 195,0	9,33	2,36E+13	1,33E+13	7,56E+12	4,79E+12
W 610 x 217,0	9,28	2,47E+13	1,38E+13	7,87E+12	5,06E+12

Fonte: Próprio autor

Após o cálculo da rigidez efetiva, é possível então calcular a força de flambagem elástica do pilar misto em situação de incêndio, conforme Equação (4.6).

As Tabelas A.23 até a Tabela A.25 apresentam a força de flambagem elástica para a coluna de 3 metros, com respeito as três condições de vinculação dos pilares e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela A.23: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	12784,5	7633,5	4192,2	2642,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	14780,7	8801,3	4968,6	3299,2
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	32153,5	18723,1	10381,8	6325,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	34491,1	19851,7	11133,9	6966,4
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	47909,5	28618,8	15883,2	9817,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	50552,6	29913,2	16725,2	10510,8
HP 310 x 132 (H)	12,76	51879,0	30558,9	17144,7	10855,0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	16818,1	10341,1	5719,2	3647,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	17504,9	10744,6	5987,3	3876,1
W 250 x 89,0 (H)	15,50	18343,2	11221,4	6307,1	4152,1
W 250 x 101,0 (H)	15,36	19454,1	11812,9	6710,8	4510,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	21010,4	12628,1	7252,0	4972,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	45381,8	27159,4	15039,2	9271,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	47117,2	27987,5	15589,0	9742,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	48967,5	28861,8	16171,7	10246,2
W 310 x 129,0 (H)	12,78	51076,2	29837,9	16825,6	10813,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	26603,9	15840,1	8713,4	5358,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	27795,7	16428,2	9101,5	5687,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	28877,5	16964,3	9452,9	5982,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	30073,6	17553,8	9843,9	6315,6
W 410 x 46,1	19,25	1745,6	890,4	442,3	301,8
W 410 x 53,0	16,26	5303,3	3017,7	1565,1	935,3
W 410 x 60,0	16,15	5627,4	3206,7	1688,4	1037,6
W 410 x 75,0	15,95	6242,3	3569,5	1925,7	1233,5
W 410 x 85,0	15,85	8315,6	4976,6	2692,5	1698,1
W 460 x 52,0	17,60	3015,8	1630,3	815,3	500,8
W 460 x 68,0	17,34	3503,2	1916,2	1003,9	659,0
W 460 x 82,0	14,82	10439,5	6126,3	3282,5	1989,2
W 460 x 97,0	14,65	11371,7	6635,7	3608,1	2248,7
W 460 x 106,0	14,57	11881,3	6913,7	3788,8	2395,3
W 530 x 66,0	15,93	5768,5	3306,7	1685,9	972,3
W 530 x 74,0	15,83	6110,9	3510,6	1817,6	1078,9
W 530 x 85,0	15,79	6372,7	3663,5	1928,5	1183,8
W 530 x 92,0	13,32	15658,4	8905,2	4803,8	2844,9
W 530 x 101,0	13,25	16378,5	9267,4	5038,8	3036,1
W 530 x 109,0	13,19	17006,9	9588,0	5245,2	3201,8

Apêndice A

Tabela A.23: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	30459,4	17655,9	9627,3	5720,8
W 610 x 140,0	11,94	31862,9	18335,1	10068,4	6088,1
W 610 x 155,0	9,45	94137,5	54083,9	30498,1	18738,4
W 610 x 174,0	9,40	98204,8	55832,7	31624,4	19719,1
W 610 x 195,0	9,33	103624,6	58270,4	33167,6	21000,0
W 610 x 217,0	9,28	108539,4	60342,0	34505,4	22180,8

Fonte: Próprio autor

Tabela A.24: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	6522,7	3894,6	2138,9	1348,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	7541,2	4490,5	2535,0	1683,3
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	16404,9	9552,6	5296,8	3227,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	17597,5	10128,4	5680,6	3554,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	24443,6	14601,4	8103,7	5009,2
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	25792,1	15261,9	8533,2	5362,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	26468,9	15591,3	8747,3	5538,3
W 250 x 73,0 (H)	15,78	8580,7	5276,1	2917,9	1860,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	8931,1	5481,9	3054,8	1977,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	9358,8	5725,2	3217,9	2118,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	9925,5	6027,0	3423,9	2301,4
W 250 x 115,0 (H)	15,16	10719,6	6442,9	3700,0	2537,1
W 310 x 97,0 (H)	13,05	23154,0	13856,8	7673,1	4730,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	24039,4	14279,3	7953,6	4970,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	24983,4	14725,4	8250,9	5227,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	26059,3	15223,4	8584,5	5517,3
W 360 x 91,0 (H)	13,54	13573,4	8081,7	4445,6	2734,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	14181,5	8381,7	4643,6	2901,8
W 360 x 110,0 (H)	13,37	14733,4	8655,2	4822,9	3052,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	15343,7	8956,0	5022,4	3222,2
W 410 x 46,1	19,25	890,6	454,3	225,7	154,0
W 410 x 53,0	16,26	2705,7	1539,6	798,5	477,2
W 410 x 60,0	16,15	2871,1	1636,1	861,4	529,4
W 410 x 75,0	15,95	3184,9	1821,2	982,5	629,4
W 410 x 85,0	15,85	4242,7	2539,1	1373,7	866,4
W 460 x 52,0	17,60	1538,7	831,8	416,0	255,5
W 460 x 68,0	17,34	1787,4	977,7	512,2	336,2
W 460 x 82,0	14,82	5326,3	3125,6	1674,7	1014,9
W 460 x 97,0	14,65	5801,9	3385,6	1840,9	1147,3
W 460 x 106,0	14,57	6061,9	3527,4	1933,1	1222,1
W 530 x 66,0	15,93	2943,1	1687,1	860,1	496,1
W 530 x 74,0	15,83	3117,8	1791,1	927,4	550,5
W 530 x 85,0	15,79	3251,4	1869,1	983,9	604,0
W 530 x 92,0	13,32	7989,0	4543,5	2450,9	1451,5
W 530 x 101,0	13,25	8356,4	4728,3	2570,8	1549,0
W 530 x 109,0	13,19	8677,0	4891,8	2676,1	1633,6
W 610 x 125,0	12,00	15540,5	9008,1	4911,9	2918,8
W 610 x 140,0	11,94	16256,6	9354,7	5136,9	3106,2
W 610 x 155,0	9,45	48029,3	27593,8	15560,2	9560,4
W 610 x 174,0	9,40	50104,5	28486,1	16134,9	10060,8
W 610 x 195,0	9,33	52869,7	29729,8	16922,2	10714,3
W 610 x 217,0	9,28	55377,3	30786,7	17604,8	11316,7

Fonte: Próprio autor

Tabela A.25: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	3196,1	1908,4	1048,0	660,5
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3695,2	2200,3	1242,2	824,8
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	8038,4	4680,8	2595,4	1581,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	8622,8	4962,9	2783,5	1741,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	11977,4	7154,7	3970,8	2454,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	12638,1	7478,3	4181,3	2627,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	12969,7	7639,7	4286,2	2713,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	4204,5	2585,3	1429,8	911,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	4376,2	2686,2	1496,8	969,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	4585,8	2805,4	1576,8	1038,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	4863,5	2953,2	1677,7	1127,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	5252,6	3157,0	1813,0	1243,2
W 310 x 97,0 (H)	13,05	11345,5	6789,8	3759,8	2317,8
W 310 x 107,0 (H)	12,97	11779,3	6996,9	3897,3	2435,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	12241,9	7215,4	4042,9	2561,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	12769,1	7459,5	4206,4	2703,5
W 360 x 91,0 (H)	13,54	6651,0	3960,0	2178,3	1339,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	6948,9	4107,0	2275,4	1421,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	7219,4	4241,1	2363,2	1495,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	7518,4	4388,5	2461,0	1578,9
W 410 x 46,1	19,25	436,4	222,6	110,6	75,5
W 410 x 53,0	16,26	1325,8	754,4	391,3	233,8
W 410 x 60,0	16,15	1406,9	801,7	422,1	259,4
W 410 x 75,0	15,95	1560,6	892,4	481,4	308,4
W 410 x 85,0	15,85	2078,9	1244,2	673,1	424,5
W 460 x 52,0	17,60	753,9	407,6	203,8	125,2
W 460 x 68,0	17,34	875,8	479,1	251,0	164,7
W 460 x 82,0	14,82	2609,9	1531,6	820,6	497,3
W 460 x 97,0	14,65	2842,9	1658,9	902,0	562,2
W 460 x 106,0	14,57	2970,3	1728,4	947,2	598,8
W 530 x 66,0	15,93	1442,1	826,7	421,5	243,1
W 530 x 74,0	15,83	1527,7	877,7	454,4	269,7
W 530 x 85,0	15,79	1593,2	915,9	482,1	296,0
W 530 x 92,0	13,32	3914,6	2226,3	1200,9	711,2
W 530 x 101,0	13,25	4094,6	2316,9	1259,7	759,0
W 530 x 109,0	13,19	4251,7	2397,0	1311,3	800,4
W 610 x 125,0	12,00	7614,8	4414,0	2406,8	1430,2
W 610 x 140,0	11,94	7965,7	4583,8	2517,1	1522,0
W 610 x 155,0	9,45	23534,4	13521,0	7624,5	4684,6
W 610 x 174,0	9,40	24551,2	13958,2	7906,1	4929,8
W 610 x 195,0	9,33	25906,1	14567,6	8291,9	5250,0
W 610 x 217,0	9,28	27134,9	15085,5	8626,3	5545,2

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas A.26 até a Tabela A.28 apresentam a força de flambagem elástica para a coluna de 5 metros, com respeito as três condições de vinculação dos pilares e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Apêndice A

Tabela A.26: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	4602,4	2748,1	1509,2	951,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	5321,1	3168,5	1788,7	1187,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	11575,3	6740,3	3737,4	2277,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	12416,8	7146,6	4008,2	2507,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	17247,4	10302,8	5717,9	3534,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	18198,9	10768,8	6021,1	3783,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	18676,4	11001,2	6172,1	3907,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	6054,5	3722,8	2058,9	1313,1
W 250 x 80,0 (H)	15,66	6301,8	3868,1	2155,4	1395,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	6603,6	4039,7	2270,6	1494,7
W 250 x 101,0 (H)	15,36	7003,5	4252,7	2415,9	1623,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	7563,7	4546,1	2610,7	1790,2
W 310 x 97,0 (H)	13,05	16337,5	9777,4	5414,1	3337,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	16962,2	10075,5	5612,1	3507,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	17628,3	10390,2	5821,8	3688,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	18387,4	10741,6	6057,2	3893,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	9577,4	5702,4	3136,8	1929,2
W 360 x 101,0 (H)	13,45	10006,4	5914,1	3276,5	2047,5
W 360 x 110,0 (H)	13,37	10395,9	6107,1	3403,1	2153,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	10826,5	6319,4	3543,8	2273,6
W 410 x 46,1	19,25	628,4	320,5	159,2	108,7
W 410 x 53,0	16,26	1909,2	1086,4	563,4	336,7
W 410 x 60,0	16,15	2025,9	1154,4	607,8	373,5
W 410 x 75,0	15,95	2247,2	1285,0	693,3	444,1
W 410 x 85,0	15,85	2993,6	1791,6	969,3	611,3
W 460 x 52,0	17,60	1085,7	586,9	293,5	180,3
W 460 x 68,0	17,34	1261,2	689,8	361,4	237,2
W 460 x 82,0	14,82	3758,2	2205,5	1181,7	716,1
W 460 x 97,0	14,65	4093,8	2388,9	1298,9	809,5
W 460 x 106,0	14,57	4277,3	2488,9	1364,0	862,3
W 530 x 66,0	15,93	2076,7	1190,4	606,9	350,0
W 530 x 74,0	15,83	2199,9	1263,8	654,3	388,4
W 530 x 85,0	15,79	2294,2	1318,9	694,2	426,2
W 530 x 92,0	13,32	5637,0	3205,9	1729,4	1024,2
W 530 x 101,0	13,25	5896,3	3336,3	1814,0	1093,0
W 530 x 109,0	13,19	6122,5	3451,7	1888,3	1152,6
W 610 x 125,0	12,00	10965,4	6356,1	3465,8	2059,5
W 610 x 140,0	11,94	11470,6	6600,6	3624,6	2191,7
W 610 x 155,0	9,45	33889,5	19470,2	10979,3	6745,8
W 610 x 174,0	9,40	35353,7	20099,8	11384,8	7098,9
W 610 x 195,0	9,33	37304,8	20977,3	11940,3	7560,0
W 610 x 217,0	9,28	39074,2	21723,1	12421,9	7985,1

Fonte: Próprio autor

Tabela A.27: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2348,2	1402,1	770,0	485,3
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2714,8	1616,6	912,6	606,0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	5905,8	3438,9	1906,9	1161,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	6335,1	3646,2	2045,0	1279,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	8799,7	5256,5	2917,3	1803,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	9285,2	5494,3	3072,0	1930,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	9528,8	5612,9	3149,0	1993,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3089,0	1899,4	1050,5	669,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3215,2	1973,5	1099,7	711,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3369,2	2061,1	1158,5	762,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3573,2	2169,7	1232,6	828,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3859,1	2319,5	1332,0	913,4
W 310 x 97,0 (H)	13,05	8335,4	4988,5	2762,3	1702,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	8654,2	5140,6	2863,3	1789,5
W 310 x 117,0 (H)	12,88	8994,0	5301,1	2970,3	1882,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	9381,3	5480,4	3090,4	1986,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4886,4	2909,4	1600,4	984,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	5105,3	3017,4	1671,7	1044,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	5304,0	3115,9	1736,3	1098,8
W 360 x 122,0 (H)	13,29	5523,7	3224,2	1808,1	1160,0
W 410 x 46,1	19,25	320,6	163,5	81,2	55,4
W 410 x 53,0	16,26	974,1	554,3	287,5	171,8
W 410 x 60,0	16,15	1033,6	589,0	310,1	190,6
W 410 x 75,0	15,95	1146,6	655,6	353,7	226,6
W 410 x 85,0	15,85	1527,4	914,1	494,5	311,9
W 460 x 52,0	17,60	553,9	299,4	149,7	92,0
W 460 x 68,0	17,34	643,5	352,0	184,4	121,0
W 460 x 82,0	14,82	1917,5	1125,2	602,9	365,4
W 460 x 97,0	14,65	2088,7	1218,8	662,7	413,0
W 460 x 106,0	14,57	2182,3	1269,9	695,9	439,9
W 530 x 66,0	15,93	1059,5	607,3	309,6	178,6
W 530 x 74,0	15,83	1122,4	644,8	333,9	198,2
W 530 x 85,0	15,79	1170,5	672,9	354,2	217,4
W 530 x 92,0	13,32	2876,0	1635,7	882,3	522,5
W 530 x 101,0	13,25	3008,3	1702,2	925,5	557,7
W 530 x 109,0	13,19	3123,7	1761,1	963,4	588,1
W 610 x 125,0	12,00	5594,6	3242,9	1768,3	1050,8
W 610 x 140,0	11,94	5852,4	3367,7	1849,3	1118,2
W 610 x 155,0	9,45	17290,6	9933,8	5601,7	3441,8
W 610 x 174,0	9,40	18037,6	10255,0	5808,6	3621,9
W 610 x 195,0	9,33	19033,1	10702,7	6092,0	3857,1
W 610 x 217,0	9,28	19935,8	11083,2	6337,7	4074,0

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Tabela A.28: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1150,6	687,0	377,3	237,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1330,3	792,1	447,2	296,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2893,8	1685,1	934,4	569,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3104,2	1786,6	1002,1	627,0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4311,9	2575,7	1429,5	883,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4549,7	2692,2	1505,3	946,0
HP 310 x 132 (H)	12,76	4669,1	2750,3	1543,0	976,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1513,6	930,7	514,7	328,3
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1575,4	967,0	538,9	348,8
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1650,9	1009,9	567,6	373,7
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1750,9	1063,2	604,0	406,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1890,9	1136,5	652,7	447,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4084,4	2444,3	1353,5	834,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4240,6	2518,9	1403,0	876,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4407,1	2597,6	1455,5	922,2
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4596,9	2685,4	1514,3	973,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2394,3	1425,6	784,2	482,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2501,6	1478,5	819,1	511,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2599,0	1526,8	850,8	538,4
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2706,6	1579,8	886,0	568,4
W 410 x 46,1	19,25	157,1	80,1	39,8	27,2
W 410 x 53,0	16,26	477,3	271,6	140,9	84,2
W 410 x 60,0	16,15	506,5	288,6	152,0	93,4
W 410 x 75,0	15,95	561,8	321,3	173,3	111,0
W 410 x 85,0	15,85	748,4	447,9	242,3	152,8
W 460 x 52,0	17,60	271,4	146,7	73,4	45,1
W 460 x 68,0	17,34	315,3	172,5	90,4	59,3
W 460 x 82,0	14,82	939,6	551,4	295,4	179,0
W 460 x 97,0	14,65	1023,4	597,2	324,7	202,4
W 460 x 106,0	14,57	1069,3	622,2	341,0	215,6
W 530 x 66,0	15,93	519,2	297,6	151,7	87,5
W 530 x 74,0	15,83	550,0	316,0	163,6	97,1
W 530 x 85,0	15,79	573,5	329,7	173,6	106,5
W 530 x 92,0	13,32	1409,3	801,5	432,3	256,0
W 530 x 101,0	13,25	1474,1	834,1	453,5	273,2
W 530 x 109,0	13,19	1530,6	862,9	472,1	288,2
W 610 x 125,0	12,00	2741,3	1589,0	866,5	514,9
W 610 x 140,0	11,94	2867,7	1650,2	906,2	547,9
W 610 x 155,0	9,45	8472,4	4867,6	2744,8	1686,5
W 610 x 174,0	9,40	8838,4	5024,9	2846,2	1774,7
W 610 x 195,0	9,33	9326,2	5244,3	2985,1	1890,0
W 610 x 217,0	9,28	9768,6	5430,8	3105,5	1996,3

Fonte: Próprio autor

A.1.5.3 Fatores de redução associados ao dimensionamento à compressão

A.1.5.3.1. Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio

A esbeltez adimensional além de ser um parâmetro utilizado determinar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, é também de fundamental importância para a comparação dos resultados com a modelagem numérica.

As Tabelas A.29 até a Tabela A.31 apresentam os índices de esbeltez reduzido para o pilar misto de 3 metros, com respeito as três condições de vinculações e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela A.29: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,440	0,480	0,502	0,467
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,442	0,477	0,495	0,461
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,340	0,381	0,415	0,422
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,341	0,382	0,415	0,420
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,322	0,359	0,389	0,394
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,323	0,359	0,389	0,394
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,323	0,359	0,389	0,394
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,411	0,449	0,469	0,436
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,411	0,447	0,466	0,433
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,413	0,447	0,465	0,433
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,412	0,445	0,462	0,429
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,410	0,442	0,458	0,426
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,315	0,352	0,380	0,380
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,316	0,352	0,380	0,378
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,316	0,352	0,379	0,377
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,317	0,352	0,379	0,376
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,408	0,462	0,505	0,510
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,408	0,462	0,503	0,509
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,408	0,461	0,502	0,507
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,409	0,462	0,504	0,509
W 410 x 46,1	19,25	1,152	1,422	1,627	1,533
W 410 x 53,0	16,26	0,757	0,893	1,008	1,031
W 410 x 60,0	16,15	0,745	0,876	0,983	0,995
W 410 x 75,0	15,95	0,744	0,868	0,971	0,983
W 410 x 85,0	15,85	0,716	0,829	0,918	0,931
W 460 x 52,0	17,60	1,007	1,228	1,418	1,438
W 460 x 68,0	17,34	0,980	1,182	1,346	1,348
W 460 x 82,0	14,82	0,658	0,771	0,868	0,907
W 460 x 97,0	14,65	0,652	0,762	0,857	0,894
W 460 x 106,0	14,57	0,652	0,762	0,856	0,894
W 530 x 66,0	15,93	0,871	1,050	1,217	1,304
W 530 x 74,0	15,83	0,864	1,037	1,198	1,277
W 530 x 85,0	15,79	0,862	1,031	1,184	1,248
W 530 x 92,0	13,32	0,581	0,690	0,792	0,861
W 530 x 101,0	13,25	0,579	0,687	0,787	0,853
W 530 x 109,0	13,19	0,577	0,684	0,784	0,847

Apêndice A

Tabela A.29 (Cont.): Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	0,495	0,586	0,673	0,739
W 610 x 140,0	11,94	0,495	0,587	0,673	0,737
W 610 x 155,0	9,45	0,311	0,366	0,418	0,462
W 610 x 174,0	9,40	0,312	0,367	0,419	0,462
W 610 x 195,0	9,33	0,312	0,367	0,419	0,460
W 610 x 217,0	9,28	0,312	0,368	0,419	0,458

Fonte: Próprio autor

Tabela A.30: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,616	0,672	0,703	0,653
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,619	0,667	0,693	0,645
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,475	0,533	0,582	0,591
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,478	0,534	0,581	0,588
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,451	0,503	0,545	0,552
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,452	0,503	0,545	0,552
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,452	0,503	0,545	0,551
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,576	0,629	0,657	0,610
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,576	0,626	0,653	0,607
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,578	0,626	0,651	0,606
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,577	0,623	0,646	0,601
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,575	0,619	0,641	0,596
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,441	0,493	0,532	0,531
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,442	0,493	0,531	0,530
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,443	0,492	0,530	0,528
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,443	0,493	0,530	0,527
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,571	0,647	0,706	0,715
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,571	0,646	0,705	0,712
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,571	0,645	0,703	0,710
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,573	0,647	0,705	0,713
W 410 x 46,1	19,25	1,612	1,990	2,278	2,147
W 410 x 53,0	16,26	1,060	1,251	1,412	1,444
W 410 x 60,0	16,15	1,044	1,226	1,376	1,394
W 410 x 75,0	15,95	1,041	1,215	1,359	1,377
W 410 x 85,0	15,85	1,002	1,161	1,286	1,304
W 460 x 52,0	17,60	1,409	1,719	1,986	2,013
W 460 x 68,0	17,34	1,373	1,654	1,885	1,888
W 460 x 82,0	14,82	0,921	1,079	1,215	1,270
W 460 x 97,0	14,65	0,913	1,067	1,199	1,252
W 460 x 106,0	14,57	0,913	1,066	1,199	1,252
W 530 x 66,0	15,93	1,220	1,470	1,703	1,826
W 530 x 74,0	15,83	1,210	1,452	1,677	1,788
W 530 x 85,0	15,79	1,207	1,443	1,658	1,748
W 530 x 92,0	13,32	0,814	0,966	1,109	1,205
W 530 x 101,0	13,25	0,810	0,962	1,102	1,194
W 530 x 109,0	13,19	0,807	0,958	1,097	1,186
W 610 x 125,0	12,00	0,693	0,821	0,942	1,034
W 610 x 140,0	11,94	0,693	0,821	0,942	1,032
W 610 x 155,0	9,45	0,436	0,512	0,585	0,647
W 610 x 174,0	9,40	0,437	0,514	0,587	0,647
W 610 x 195,0	9,33	0,437	0,514	0,587	0,645
W 610 x 217,0	9,28	0,437	0,515	0,586	0,641

Fonte: Próprio autor

Tabela A.31: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fl}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,880	0,959	1,005	0,934
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,884	0,953	0,990	0,921
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,679	0,762	0,831	0,844
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,682	0,764	0,830	0,840
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,644	0,718	0,778	0,788
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,646	0,719	0,778	0,788
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,646	0,719	0,778	0,787
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,823	0,898	0,939	0,872
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,823	0,894	0,933	0,867
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,825	0,894	0,930	0,865
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,824	0,890	0,923	0,858
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,821	0,884	0,915	0,851
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,631	0,704	0,761	0,759
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,632	0,704	0,759	0,757
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,632	0,703	0,757	0,754
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,633	0,704	0,757	0,752
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,815	0,925	1,009	1,021
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,816	0,923	1,007	1,017
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,815	0,922	1,004	1,014
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,819	0,925	1,008	1,018
W 410 x 46,1	19,25	2,303	2,843	3,254	3,067
W 410 x 53,0	16,26	1,514	1,787	2,017	2,062
W 410 x 60,0	16,15	1,491	1,751	1,965	1,991
W 410 x 75,0	15,95	1,487	1,735	1,941	1,967
W 410 x 85,0	15,85	1,432	1,659	1,837	1,863
W 460 x 52,0	17,60	2,013	2,456	2,837	2,876
W 460 x 68,0	17,34	1,961	2,363	2,693	2,697
W 460 x 82,0	14,82	1,316	1,541	1,735	1,815
W 460 x 97,0	14,65	1,304	1,524	1,713	1,789
W 460 x 106,0	14,57	1,304	1,523	1,712	1,789
W 530 x 66,0	15,93	1,743	2,100	2,433	2,609
W 530 x 74,0	15,83	1,729	2,075	2,396	2,554
W 530 x 85,0	15,79	1,724	2,061	2,368	2,497
W 530 x 92,0	13,32	1,162	1,380	1,584	1,722
W 530 x 101,0	13,25	1,157	1,374	1,574	1,705
W 530 x 109,0	13,19	1,153	1,369	1,567	1,694
W 610 x 125,0	12,00	0,990	1,173	1,345	1,478
W 610 x 140,0	11,94	0,990	1,174	1,346	1,475
W 610 x 155,0	9,45	0,623	0,731	0,836	0,924
W 610 x 174,0	9,40	0,625	0,734	0,839	0,924
W 610 x 195,0	9,33	0,624	0,735	0,839	0,921
W 610 x 217,0	9,28	0,624	0,735	0,838	0,916

Fonte: Próprio autor

As Tabelas A.32 até a Tabela A.34 apresentam os índices de esbeltez reduzido para o pilar misto de 5 metros, com respeito as três condições de vinculações e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Apêndice A

Tabela A.32: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fl}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,733	0,799	0,837	0,778
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,737	0,795	0,825	0,768
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,566	0,635	0,692	0,703
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,568	0,636	0,692	0,700
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,537	0,598	0,649	0,657
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,538	0,599	0,649	0,657
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,538	0,599	0,648	0,656
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,686	0,748	0,782	0,727
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,686	0,745	0,777	0,722
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,688	0,745	0,775	0,721
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,687	0,741	0,769	0,715
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,684	0,736	0,763	0,709
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,526	0,587	0,634	0,633
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,526	0,587	0,633	0,631
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,527	0,586	0,631	0,628
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,528	0,586	0,631	0,627
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,679	0,770	0,841	0,851
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,680	0,769	0,839	0,848
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,679	0,768	0,837	0,845
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,682	0,771	0,840	0,848
W 410 x 46,1	19,25	1,919	2,369	2,712	2,556
W 410 x 53,0	16,26	1,262	1,489	1,681	1,718
W 410 x 60,0	16,15	1,242	1,459	1,638	1,659
W 410 x 75,0	15,95	1,240	1,446	1,618	1,639
W 410 x 85,0	15,85	1,193	1,382	1,531	1,552
W 460 x 52,0	17,60	1,678	2,047	2,364	2,397
W 460 x 68,0	17,34	1,634	1,970	2,244	2,247
W 460 x 82,0	14,82	1,096	1,284	1,446	1,512
W 460 x 97,0	14,65	1,087	1,270	1,428	1,490
W 460 x 106,0	14,57	1,087	1,269	1,427	1,491
W 530 x 66,0	15,93	1,452	1,750	2,028	2,174
W 530 x 74,0	15,83	1,441	1,729	1,997	2,128
W 530 x 85,0	15,79	1,436	1,718	1,973	2,081
W 530 x 92,0	13,32	0,969	1,150	1,320	1,435
W 530 x 101,0	13,25	0,964	1,145	1,312	1,421
W 530 x 109,0	13,19	0,961	1,140	1,306	1,412
W 610 x 125,0	12,00	0,825	0,977	1,121	1,231
W 610 x 140,0	11,94	0,825	0,978	1,122	1,229
W 610 x 155,0	9,45	0,519	0,610	0,697	0,770
W 610 x 174,0	9,40	0,520	0,612	0,699	0,770
W 610 x 195,0	9,33	0,520	0,612	0,699	0,767
W 610 x 217,0	9,28	0,520	0,613	0,698	0,763

Fonte: Próprio autor

Tabela A.33: Índice de esbelteza reduzido da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,026	1,119	1,172	1,089
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,032	1,112	1,155	1,075
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,792	0,889	0,969	0,984
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,796	0,891	0,968	0,980
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,751	0,838	0,908	0,920
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,753	0,839	0,908	0,919
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,754	0,839	0,908	0,919
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,960	1,048	1,095	1,017
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,960	1,043	1,088	1,011
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,963	1,043	1,085	1,010
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,962	1,038	1,077	1,001
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,958	1,031	1,068	0,993
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,736	0,821	0,887	0,886
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,737	0,821	0,886	0,883
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,738	0,820	0,884	0,879
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,739	0,821	0,883	0,878
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,951	1,079	1,177	1,191
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,951	1,077	1,175	1,187
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,951	1,075	1,171	1,183
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,955	1,079	1,176	1,188
W 410 x 46,1	19,25	2,687	3,317	3,797	3,578
W 410 x 53,0	16,26	1,767	2,084	2,353	2,406
W 410 x 60,0	16,15	1,739	2,043	2,293	2,323
W 410 x 75,0	15,95	1,735	2,025	2,265	2,295
W 410 x 85,0	15,85	1,671	1,935	2,143	2,173
W 460 x 52,0	17,60	2,349	2,866	3,309	3,356
W 460 x 68,0	17,34	2,288	2,757	3,141	3,146
W 460 x 82,0	14,82	1,535	1,798	2,024	2,117
W 460 x 97,0	14,65	1,521	1,778	1,999	2,087
W 460 x 106,0	14,57	1,521	1,777	1,998	2,087
W 530 x 66,0	15,93	2,033	2,449	2,839	3,044
W 530 x 74,0	15,83	2,017	2,421	2,796	2,979
W 530 x 85,0	15,79	2,011	2,405	2,763	2,913
W 530 x 92,0	13,32	1,356	1,610	1,848	2,009
W 530 x 101,0	13,25	1,350	1,603	1,837	1,990
W 530 x 109,0	13,19	1,346	1,597	1,828	1,977
W 610 x 125,0	12,00	1,155	1,368	1,569	1,724
W 610 x 140,0	11,94	1,156	1,369	1,570	1,721
W 610 x 155,0	9,45	0,726	0,853	0,975	1,078
W 610 x 174,0	9,40	0,729	0,857	0,979	1,078
W 610 x 195,0	9,33	0,728	0,857	0,978	1,074
W 610 x 217,0	9,28	0,728	0,858	0,977	1,068

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Tabela A.34: Índice de esbelteza reduzido da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,466	1,599	1,674	1,556
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,474	1,589	1,650	1,536
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,132	1,270	1,385	1,406
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1,137	1,273	1,383	1,399
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,074	1,197	1,297	1,314
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,076	1,198	1,297	1,313
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,076	1,198	1,297	1,312
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,371	1,497	1,564	1,453
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,371	1,491	1,555	1,444
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,376	1,490	1,551	1,442
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1,374	1,483	1,539	1,430
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,368	1,473	1,525	1,419
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,051	1,174	1,268	1,265
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,053	1,173	1,265	1,261
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,054	1,172	1,262	1,256
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,056	1,173	1,262	1,254
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,359	1,541	1,682	1,702
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,359	1,539	1,678	1,695
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,358	1,536	1,674	1,689
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,365	1,541	1,679	1,697
W 410 x 46,1	19,25	3,839	4,739	5,424	5,111
W 410 x 53,0	16,26	2,524	2,978	3,362	3,437
W 410 x 60,0	16,15	2,485	2,918	3,276	3,318
W 410 x 75,0	15,95	2,479	2,892	3,235	3,278
W 410 x 85,0	15,85	2,387	2,765	3,061	3,105
W 460 x 52,0	17,60	3,356	4,094	4,728	4,794
W 460 x 68,0	17,34	3,268	3,939	4,488	4,495
W 460 x 82,0	14,82	2,193	2,569	2,892	3,025
W 460 x 97,0	14,65	2,173	2,540	2,856	2,981
W 460 x 106,0	14,57	2,173	2,539	2,854	2,981
W 530 x 66,0	15,93	2,904	3,499	4,056	4,348
W 530 x 74,0	15,83	2,881	3,458	3,994	4,256
W 530 x 85,0	15,79	2,873	3,436	3,946	4,162
W 530 x 92,0	13,32	1,937	2,300	2,640	2,869
W 530 x 101,0	13,25	1,929	2,290	2,624	2,842
W 530 x 109,0	13,19	1,922	2,281	2,612	2,824
W 610 x 125,0	12,00	1,650	1,954	2,242	2,463
W 610 x 140,0	11,94	1,651	1,956	2,243	2,458
W 610 x 155,0	9,45	1,038	1,219	1,393	1,540
W 610 x 174,0	9,40	1,041	1,224	1,398	1,540
W 610 x 195,0	9,33	1,041	1,225	1,398	1,535
W 610 x 217,0	9,28	1,040	1,225	1,396	1,526

Fonte: Próprio autor

A.1.5.3.2. Fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão

O fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão é calculado utilizando o índice de esbeltez adimensional e o fator de imperfeição para curvas de flambagem “c” de valor igual a 0,49 do dimensionamento para perfis metálicos do CEN EN 1993-1-1:2005, segundo as recomendações do CEN EN 1994-1-2:2005 e o mesmo valor de $\alpha = 0,49$ é recomendado pelo Anexo B da ABNT NBR 14323:2013. As formulações estão apresentadas nas Equações (4.3), (4.4) e (4.5) desse trabalho.

As Tabelas A.35 até a Tabela A.37 apresentam os fatores de redução associado à curva de dimensionamento à compressão para a coluna de 3m, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela A.35: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{fi}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,876	0,854	0,842	0,861
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,875	0,856	0,846	0,865
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,929	0,907	0,889	0,886
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,928	0,907	0,889	0,887
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,938	0,919	0,903	0,900
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,937	0,919	0,903	0,900
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,937	0,919	0,903	0,901
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,891	0,871	0,860	0,878
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,891	0,872	0,862	0,880
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,891	0,872	0,862	0,880
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,891	0,873	0,864	0,882
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,892	0,875	0,866	0,884
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,941	0,922	0,908	0,908
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,941	0,922	0,908	0,909
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,941	0,923	0,909	0,910
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,941	0,923	0,909	0,910
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,893	0,864	0,840	0,837
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,893	0,864	0,841	0,838
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,893	0,865	0,842	0,839
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,892	0,864	0,841	0,838
W 410 x 46,1	19,25	0,457	0,341	0,277	0,304
W 410 x 53,0	16,26	0,689	0,604	0,535	0,522
W 410 x 60,0	16,15	0,696	0,615	0,550	0,543
W 410 x 75,0	15,95	0,697	0,620	0,557	0,550
W 410 x 85,0	15,85	0,715	0,644	0,589	0,581
W 460 x 52,0	17,60	0,536	0,421	0,343	0,335
W 460 x 68,0	17,34	0,551	0,443	0,370	0,369
W 460 x 82,0	14,82	0,751	0,681	0,620	0,595
W 460 x 97,0	14,65	0,754	0,686	0,627	0,603
W 460 x 106,0	14,57	0,754	0,686	0,627	0,603
W 530 x 66,0	15,93	0,618	0,512	0,426	0,387
W 530 x 74,0	15,83	0,622	0,519	0,435	0,399
W 530 x 85,0	15,79	0,623	0,522	0,442	0,411
W 530 x 92,0	13,32	0,797	0,731	0,667	0,624
W 530 x 101,0	13,25	0,798	0,733	0,670	0,629
W 530 x 109,0	13,19	0,799	0,734	0,672	0,633

Apêndice A

Tabela A.35 (Cont.): Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	0,846	0,793	0,742	0,701
W 610 x 140,0	11,94	0,846	0,793	0,741	0,701
W 610 x 155,0	9,45	0,943	0,915	0,888	0,864
W 610 x 174,0	9,40	0,943	0,915	0,887	0,864
W 610 x 195,0	9,33	0,943	0,914	0,887	0,865
W 610 x 217,0	9,28	0,943	0,914	0,887	0,866

Fonte: Próprio autor

Tabela A.36: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,776	0,742	0,723	0,753
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,774	0,745	0,729	0,758
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,857	0,824	0,796	0,791
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,855	0,824	0,797	0,793
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,870	0,842	0,818	0,814
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,869	0,841	0,818	0,814
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,869	0,841	0,818	0,814
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,800	0,768	0,751	0,779
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,800	0,770	0,754	0,781
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,798	0,770	0,755	0,782
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,799	0,772	0,758	0,785
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,800	0,774	0,761	0,788
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,875	0,847	0,825	0,825
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,875	0,847	0,825	0,826
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,875	0,847	0,826	0,827
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,874	0,847	0,826	0,828
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,803	0,757	0,721	0,716
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,802	0,758	0,722	0,717
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,803	0,758	0,723	0,719
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,801	0,757	0,721	0,717
W 410 x 46,1	19,25	0,281	0,198	0,156	0,174
W 410 x 53,0	16,26	0,506	0,410	0,345	0,334
W 410 x 60,0	16,15	0,515	0,422	0,358	0,352
W 410 x 75,0	15,95	0,516	0,427	0,365	0,358
W 410 x 85,0	15,85	0,539	0,453	0,395	0,387
W 460 x 52,0	17,60	0,346	0,253	0,199	0,194
W 460 x 68,0	17,34	0,360	0,269	0,217	0,216
W 460 x 82,0	14,82	0,587	0,496	0,427	0,402
W 460 x 97,0	14,65	0,592	0,502	0,434	0,410
W 460 x 106,0	14,57	0,592	0,502	0,434	0,410
W 530 x 66,0	15,93	0,424	0,325	0,257	0,229
W 530 x 74,0	15,83	0,429	0,330	0,263	0,237
W 530 x 85,0	15,79	0,431	0,334	0,269	0,246
W 530 x 92,0	13,32	0,654	0,560	0,480	0,431
W 530 x 101,0	13,25	0,656	0,563	0,483	0,437
W 530 x 109,0	13,19	0,658	0,565	0,486	0,441
W 610 x 125,0	12,00	0,729	0,649	0,575	0,520
W 610 x 140,0	11,94	0,729	0,649	0,574	0,521
W 610 x 155,0	9,45	0,878	0,836	0,794	0,757
W 610 x 174,0	9,40	0,877	0,835	0,793	0,757
W 610 x 195,0	9,33	0,878	0,835	0,793	0,759
W 610 x 217,0	9,28	0,878	0,835	0,793	0,761

Fonte: Próprio autor

Tabela A.37: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,612	0,564	0,537	0,579
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,609	0,567	0,546	0,587
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,738	0,686	0,643	0,635
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,736	0,685	0,643	0,637
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,759	0,713	0,676	0,669
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,758	0,713	0,676	0,670
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,758	0,713	0,676	0,670
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,648	0,601	0,576	0,617
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,648	0,603	0,580	0,621
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,646	0,604	0,581	0,621
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,647	0,606	0,586	0,626
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,649	0,610	0,591	0,630
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,767	0,722	0,687	0,688
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,766	0,722	0,688	0,689
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,766	0,723	0,689	0,691
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,765	0,722	0,689	0,692
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,652	0,585	0,535	0,528
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,652	0,586	0,536	0,530
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,653	0,587	0,538	0,532
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,650	0,585	0,536	0,530
W 410 x 46,1	19,25	0,153	0,105	0,082	0,091
W 410 x 53,0	16,26	0,310	0,237	0,193	0,186
W 410 x 60,0	16,15	0,318	0,245	0,202	0,198
W 410 x 75,0	15,95	0,319	0,249	0,206	0,202
W 410 x 85,0	15,85	0,338	0,268	0,227	0,221
W 460 x 52,0	17,60	0,194	0,137	0,105	0,103
W 460 x 68,0	17,34	0,203	0,146	0,116	0,116
W 460 x 82,0	14,82	0,382	0,302	0,249	0,231
W 460 x 97,0	14,65	0,387	0,307	0,254	0,237
W 460 x 106,0	14,57	0,387	0,307	0,255	0,237
W 530 x 66,0	15,93	0,247	0,180	0,139	0,123
W 530 x 74,0	15,83	0,251	0,184	0,143	0,128
W 530 x 85,0	15,79	0,252	0,186	0,146	0,133
W 530 x 92,0	13,32	0,452	0,357	0,289	0,252
W 530 x 101,0	13,25	0,455	0,359	0,292	0,256
W 530 x 109,0	13,19	0,457	0,361	0,294	0,259
W 610 x 125,0	12,00	0,546	0,447	0,370	0,322
W 610 x 140,0	11,94	0,546	0,447	0,370	0,323
W 610 x 155,0	9,45	0,772	0,705	0,640	0,585
W 610 x 174,0	9,40	0,771	0,703	0,638	0,585
W 610 x 195,0	9,33	0,771	0,703	0,638	0,587
W 610 x 217,0	9,28	0,771	0,703	0,638	0,590

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas A.38 até a Tabela A.40 apresentam os fatores de redução para determinar a força axial resistente de cálculo para os pilares mistos de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Apêndice A

Tabela A.38: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{R}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,704	0,663	0,639	0,676
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,702	0,666	0,646	0,682
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,805	0,764	0,729	0,723
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,804	0,764	0,730	0,725
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,822	0,786	0,756	0,751
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,821	0,786	0,756	0,751
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,821	0,786	0,756	0,752
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,734	0,695	0,673	0,708
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,734	0,696	0,676	0,711
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,732	0,697	0,678	0,711
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,733	0,699	0,681	0,715
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,734	0,702	0,686	0,719
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,829	0,793	0,765	0,766
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,828	0,793	0,766	0,767
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,828	0,794	0,767	0,769
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,827	0,793	0,767	0,769
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,737	0,681	0,637	0,630
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,737	0,681	0,638	0,632
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,738	0,682	0,639	0,634
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,736	0,681	0,637	0,632
W 410 x 46,1	19,25	0,210	0,146	0,114	0,127
W 410 x 53,0	16,26	0,405	0,318	0,263	0,253
W 410 x 60,0	16,15	0,414	0,328	0,274	0,268
W 410 x 75,0	15,95	0,415	0,333	0,279	0,273
W 410 x 85,0	15,85	0,437	0,356	0,305	0,298
W 460 x 52,0	17,60	0,263	0,189	0,146	0,143
W 460 x 68,0	17,34	0,275	0,201	0,161	0,160
W 460 x 82,0	14,82	0,486	0,395	0,333	0,311
W 460 x 97,0	14,65	0,491	0,402	0,339	0,318
W 460 x 106,0	14,57	0,491	0,402	0,339	0,318
W 530 x 66,0	15,93	0,331	0,246	0,192	0,170
W 530 x 74,0	15,83	0,335	0,251	0,197	0,176
W 530 x 85,0	15,79	0,336	0,253	0,201	0,183
W 530 x 92,0	13,32	0,558	0,458	0,381	0,337
W 530 x 101,0	13,25	0,561	0,461	0,384	0,341
W 530 x 109,0	13,19	0,563	0,463	0,386	0,345
W 610 x 125,0	12,00	0,647	0,553	0,473	0,419
W 610 x 140,0	11,94	0,646	0,553	0,473	0,420
W 610 x 155,0	9,45	0,832	0,780	0,727	0,681
W 610 x 174,0	9,40	0,831	0,778	0,725	0,681
W 610 x 195,0	9,33	0,832	0,778	0,725	0,683
W 610 x 217,0	9,28	0,832	0,778	0,726	0,685

Fonte: Próprio autor

Tabela A.39: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,525	0,474	0,447	0,490
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,522	0,478	0,456	0,498
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,667	0,607	0,558	0,549
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,665	0,605	0,559	0,552
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,693	0,638	0,595	0,588
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,691	0,638	0,595	0,588
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,691	0,638	0,595	0,588
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,564	0,513	0,487	0,530
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,564	0,515	0,491	0,534
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,562	0,515	0,492	0,534
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,562	0,518	0,497	0,539
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,565	0,522	0,502	0,544
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,702	0,649	0,608	0,609
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,702	0,649	0,609	0,610
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,701	0,649	0,610	0,613
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,700	0,649	0,610	0,614
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,569	0,496	0,445	0,438
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,569	0,497	0,446	0,440
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,569	0,498	0,448	0,442
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,566	0,496	0,446	0,440
W 410 x 46,1	19,25	0,116	0,079	0,061	0,069
W 410 x 53,0	16,26	0,242	0,183	0,148	0,142
W 410 x 60,0	16,15	0,248	0,189	0,155	0,151
W 410 x 75,0	15,95	0,249	0,192	0,158	0,154
W 410 x 85,0	15,85	0,265	0,208	0,174	0,170
W 460 x 52,0	17,60	0,148	0,103	0,079	0,077
W 460 x 68,0	17,34	0,155	0,111	0,087	0,087
W 460 x 82,0	14,82	0,303	0,235	0,192	0,178
W 460 x 97,0	14,65	0,308	0,239	0,196	0,182
W 460 x 106,0	14,57	0,308	0,240	0,197	0,182
W 530 x 66,0	15,93	0,191	0,137	0,105	0,093
W 530 x 74,0	15,83	0,193	0,140	0,108	0,096
W 530 x 85,0	15,79	0,194	0,142	0,111	0,100
W 530 x 92,0	13,32	0,366	0,281	0,224	0,195
W 530 x 101,0	13,25	0,368	0,283	0,227	0,198
W 530 x 109,0	13,19	0,370	0,285	0,228	0,200
W 610 x 125,0	12,00	0,456	0,361	0,293	0,252
W 610 x 140,0	11,94	0,456	0,361	0,293	0,253
W 610 x 155,0	9,45	0,708	0,629	0,554	0,496
W 610 x 174,0	9,40	0,707	0,627	0,552	0,496
W 610 x 195,0	9,33	0,707	0,626	0,553	0,498
W 610 x 217,0	9,28	0,707	0,626	0,553	0,501

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Tabela A.40: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,326	0,285	0,264	0,297
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,323	0,287	0,270	0,303
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,468	0,402	0,355	0,347
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,465	0,401	0,356	0,349
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,498	0,435	0,390	0,383
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,497	0,435	0,390	0,383
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,497	0,435	0,390	0,384
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,360	0,316	0,295	0,330
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,360	0,318	0,297	0,333
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,358	0,318	0,299	0,334
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,359	0,320	0,302	0,338
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,361	0,324	0,306	0,342
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,511	0,447	0,403	0,404
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,510	0,447	0,404	0,406
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,509	0,447	0,405	0,408
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,508	0,447	0,405	0,409
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,365	0,302	0,262	0,257
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,365	0,302	0,263	0,259
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,365	0,303	0,264	0,260
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,363	0,301	0,263	0,259
W 410 x 46,1	19,25	0,060	0,040	0,031	0,035
W 410 x 53,0	16,26	0,130	0,096	0,077	0,074
W 410 x 60,0	16,15	0,134	0,100	0,081	0,079
W 410 x 75,0	15,95	0,134	0,102	0,083	0,081
W 410 x 85,0	15,85	0,144	0,110	0,092	0,089
W 460 x 52,0	17,60	0,077	0,053	0,041	0,039
W 460 x 68,0	17,34	0,081	0,057	0,045	0,045
W 460 x 82,0	14,82	0,167	0,126	0,102	0,094
W 460 x 97,0	14,65	0,170	0,129	0,104	0,096
W 460 x 106,0	14,57	0,170	0,129	0,104	0,096
W 530 x 66,0	15,93	0,101	0,072	0,054	0,048
W 530 x 74,0	15,83	0,102	0,073	0,056	0,049
W 530 x 85,0	15,79	0,103	0,074	0,057	0,052
W 530 x 92,0	13,32	0,207	0,154	0,120	0,103
W 530 x 101,0	13,25	0,209	0,155	0,121	0,105
W 530 x 109,0	13,19	0,210	0,156	0,122	0,106
W 610 x 125,0	12,00	0,271	0,204	0,161	0,136
W 610 x 140,0	11,94	0,270	0,204	0,161	0,137
W 610 x 155,0	9,45	0,518	0,425	0,352	0,302
W 610 x 174,0	9,40	0,517	0,422	0,350	0,302
W 610 x 195,0	9,33	0,517	0,422	0,350	0,303
W 610 x 217,0	9,28	0,517	0,422	0,351	0,306

Fonte: Próprio autor

A.1.5.4 Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio

Por fim, calculado os devidos fatores de redução, é possível determinar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, conforme a Equação (4.1) do capítulo 4 desse trabalho. As Tabelas A.41 até a Tabela A.43 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 3 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela A.41: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2167,4	1500,3	890,2	495,9
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2528,7	1711,9	1030,0	605,6
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3444,2	2466,0	1592,8	996,7
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3724,3	2624,0	1704,8	1088,8
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4660,8	3389,7	2172,4	1373,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4939,3	3549,3	2287,9	1469,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	5072,0	3625,2	2343,4	1515,4
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2536,7	1815,9	1083,1	609,0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2639,5	1873,8	1122,1	640,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2782,8	1955,4	1177,0	684,1
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2945,1	2041,5	1235,9	732,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3157,0	2156,6	1315,7	796,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4247,6	3105,0	1974,0	1213,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4422,2	3197,4	2039,9	1267,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4603,5	3292,1	2107,5	1323,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4818,8	3406,7	2190,5	1391,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3950,0	2924,0	1864,1	1169,0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4128,4	3025,6	1939,6	1233,2
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4284,4	3114,7	2005,9	1289,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4497,8	3242,6	2100,9	1371,1
W 410 x 46,1	19,25	1059,2	614,2	324,0	215,7
W 410 x 53,0	16,26	2095,1	1454,4	851,6	519,2
W 410 x 60,0	16,15	2177,5	1511,5	896,8	557,9
W 410 x 75,0	15,95	2408,3	1665,6	1010,8	655,6
W 410 x 85,0	15,85	3047,3	2203,6	1336,6	855,4
W 460 x 52,0	17,60	1638,4	1034,2	561,7	347,4
W 460 x 68,0	17,34	1856,6	1184,3	673,0	442,1
W 460 x 82,0	14,82	3390,9	2476,3	1531,6	975,1
W 460 x 97,0	14,65	3645,3	2643,9	1659,5	1085,0
W 460 x 106,0	14,57	3809,2	2752,1	1741,4	1155,9
W 530 x 66,0	15,93	2704,6	1864,3	1062,9	640,1
W 530 x 74,0	15,83	2839,3	1959,2	1134,1	701,4
W 530 x 85,0	15,79	2951,2	2032,9	1193,5	758,9
W 530 x 92,0	13,32	4211,8	3099,5	2010,0	1315,7
W 530 x 101,0	13,25	4376,2	3204,0	2092,4	1388,9
W 530 x 109,0	13,19	4520,0	3297,1	2165,6	1453,4
W 610 x 125,0	12,00	6310,6	4815,3	3229,6	2187,6
W 610 x 140,0	11,94	6608,2	5007,1	3380,6	2322,4
W 610 x 155,0	9,45	8603,7	6620,9	4729,6	3456,0
W 610 x 174,0	9,40	9030,5	6885,9	4934,2	3638,2
W 610 x 195,0	9,33	9521,1	7194,1	5173,3	3851,1
W 610 x 217,0	9,28	9968,6	7456,9	5371,9	4027,6

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Tabela A.42: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1919,8	1303,5	764,3	433,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2237,4	1489,6	887,8	531,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3176,4	2239,9	1426,4	890,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3432,9	2382,7	1527,0	973,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4323,8	3104,6	1966,8	1241,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4581,1	3250,4	2071,4	1327,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	4703,9	3319,9	2121,8	1369,5
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2275,7	1601,7	946,0	540,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2367,9	1654,1	981,4	568,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2495,0	1726,3	1030,0	608,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2641,0	1804,2	1083,5	651,6
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2833,1	1908,6	1155,7	709,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3949,1	2851,1	1793,5	1102,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4110,8	2936,1	1853,8	1152,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4278,9	3023,3	1915,9	1203,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4478,2	3128,4	1991,6	1266,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3549,0	2562,6	1598,6	999,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3709,2	2652,5	1664,4	1055,2
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3849,8	2731,7	1722,5	1104,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4038,3	2841,5	1802,4	1173,0
W 410 x 46,1	19,25	650,0	356,0	183,1	123,2
W 410 x 53,0	16,26	1538,3	988,1	548,9	331,7
W 410 x 60,0	16,15	1610,6	1036,5	584,3	361,5
W 410 x 75,0	15,95	1783,1	1146,9	662,0	427,0
W 410 x 85,0	15,85	2296,0	1549,8	896,8	570,3
W 460 x 52,0	17,60	1056,8	622,1	325,8	200,9
W 460 x 68,0	17,34	1210,8	720,8	395,0	259,4
W 460 x 82,0	14,82	2651,8	1803,2	1054,7	657,7
W 460 x 97,0	14,65	2861,5	1935,2	1149,5	736,8
W 460 x 106,0	14,57	2990,1	2015,1	1206,5	784,9
W 530 x 66,0	15,93	1858,7	1182,7	641,1	378,7
W 530 x 74,0	15,83	1958,5	1248,6	687,3	417,3
W 530 x 85,0	15,79	2038,5	1298,9	725,9	454,3
W 530 x 92,0	13,32	3456,3	2374,3	1444,9	909,3
W 530 x 101,0	13,25	3596,6	2459,5	1508,5	964,1
W 530 x 109,0	13,19	3719,1	2535,1	1564,6	1012,1
W 610 x 125,0	12,00	5439,6	3939,1	2501,9	1624,7
W 610 x 140,0	11,94	5695,2	4094,8	2618,2	1726,2
W 610 x 155,0	9,45	8009,4	6049,0	4230,9	3029,2
W 610 x 174,0	9,40	8404,0	6287,6	4411,0	3188,7
W 610 x 195,0	9,33	8861,0	6568,5	4625,0	3378,0
W 610 x 217,0	9,28	9277,6	6807,9	4803,4	3537,4

Fonte: Próprio autor

Tabela A.43: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1514,9	990,3	568,2	333,5
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1761,6	1134,9	664,6	410,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2734,8	1864,5	1151,6	714,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2952,2	1982,1	1233,3	782,5
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3771,5	2632,2	1625,6	1021,2
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3993,7	2755,0	1712,0	1092,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	4100,5	2814,0	1753,9	1127,4
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1843,9	1253,0	725,9	427,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1918,8	1296,3	755,1	451,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2019,1	1353,1	793,4	483,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2138,3	1417,0	837,5	519,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2297,5	1503,4	896,8	567,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3461,4	2430,9	1493,9	918,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3601,9	2503,6	1545,0	961,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3748,4	2578,7	1597,9	1005,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3921,3	2667,9	1661,3	1058,8
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2885,3	1979,6	1186,0	737,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3015,3	2050,2	1236,2	779,8
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3130,3	2113,1	1280,9	817,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3278,1	2194,7	1338,1	866,5
W 410 x 46,1	19,25	355,0	188,8	95,8	64,8
W 410 x 53,0	16,26	942,3	571,8	307,8	185,0
W 410 x 60,0	16,15	992,8	603,4	329,6	203,3
W 410 x 75,0	15,95	1100,2	669,6	374,6	240,8
W 410 x 85,0	15,85	1439,3	918,2	514,8	326,2
W 460 x 52,0	17,60	592,8	336,2	172,8	106,4
W 460 x 68,0	17,34	683,4	391,9	210,8	138,4
W 460 x 82,0	14,82	1726,9	1097,1	615,7	378,9
W 460 x 97,0	14,65	1871,4	1182,5	673,8	426,2
W 460 x 106,0	14,57	1955,4	1231,7	707,4	454,0
W 530 x 66,0	15,93	1083,7	657,3	347,0	202,9
W 530 x 74,0	15,83	1144,8	695,7	372,9	224,3
W 530 x 85,0	15,79	1192,6	724,7	394,6	245,0
W 530 x 92,0	13,32	2391,1	1512,6	870,2	532,2
W 530 x 101,0	13,25	2493,4	1570,2	910,5	566,0
W 530 x 109,0	13,19	2582,7	1621,2	945,9	595,4
W 610 x 125,0	12,00	4072,6	2713,1	1612,6	1005,2
W 610 x 140,0	11,94	4262,7	2819,2	1687,1	1068,8
W 610 x 155,0	9,45	7040,2	5100,7	3407,6	2340,5
W 610 x 174,0	9,40	7381,7	5295,2	3548,0	2463,6
W 610 x 195,0	9,33	7783,8	5530,7	3720,3	2613,9
W 610 x 217,0	9,28	8150,2	5731,4	3865,5	2744,2

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Já as Tabelas A.44 até a Tabela A.46 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela A.44: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1741,9	1163,5	675,7	389,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2028,3	1331,3	787,2	477,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2986,3	2077,7	1306,7	813,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3226,0	2209,6	1399,1	890,0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4086,0	2901,0	1819,2	1145,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4328,2	3036,9	1915,9	1225,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	4444,1	3101,9	1962,6	1264,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2087,8	1448,0	848,1	491,0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2172,5	1496,5	880,9	517,3
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2287,9	1561,9	925,0	553,2
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2422,2	1633,8	974,5	593,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2600,2	1730,5	1041,1	647,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3739,0	2670,1	1664,0	1023,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3891,6	2749,8	1720,4	1069,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4050,4	2831,8	1778,6	1118,1
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4238,3	2930,0	1848,9	1176,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3260,6	2304,1	1411,8	880,2
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3407,6	2385,5	1470,7	930,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3537,1	2457,6	1522,8	974,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3707,8	2554,7	1592,2	1033,9
W 410 x 46,1	19,25	487,3	262,4	133,9	90,4
W 410 x 53,0	16,26	1232,2	766,2	417,9	251,8
W 410 x 60,0	16,15	1294,7	806,5	446,4	275,7
W 410 x 75,0	15,95	1434,1	893,9	506,7	326,2
W 410 x 85,0	15,85	1862,9	1218,2	692,2	439,2
W 460 x 52,0	17,60	804,7	463,5	240,1	147,9
W 460 x 68,0	17,34	925,3	539,0	292,2	191,9
W 460 x 82,0	14,82	2196,3	1438,9	822,0	508,7
W 460 x 97,0	14,65	2375,3	1548,0	898,0	571,2
W 460 x 106,0	14,57	2481,9	1612,2	942,7	608,5
W 530 x 66,0	15,93	1447,6	895,8	478,1	280,8
W 530 x 74,0	15,83	1527,5	947,1	513,3	309,9
W 530 x 85,0	15,79	1590,7	986,0	542,7	338,1
W 530 x 92,0	13,32	2952,7	1943,4	1146,4	709,7
W 530 x 101,0	13,25	3075,8	2015,5	1198,3	753,8
W 530 x 109,0	13,19	3183,3	2079,4	1244,1	792,3
W 610 x 125,0	12,00	4823,8	3357,9	2060,8	1308,7
W 610 x 140,0	11,94	5049,8	3489,8	2156,3	1391,0
W 610 x 155,0	9,45	7591,8	5640,1	3872,0	2723,9
W 610 x 174,0	9,40	7963,5	5859,6	4034,7	2867,3
W 610 x 195,0	9,33	8396,9	6120,9	4230,4	3039,5
W 610 x 217,0	9,28	8791,8	6343,6	4394,4	3186,4

Fonte: Próprio autor

Tabela A.45: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1298,3	832,7	473,1	282,1
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1508,0	955,5	555,0	348,6
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2473,0	1648,7	999,5	618,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2667,5	1751,9	1070,8	677,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3441,9	2355,5	1431,1	896,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3643,3	2465,0	1507,1	959,4
HP 310 x 132 (H)	12,76	3740,5	2517,8	1544,1	990,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1603,9	1069,0	613,3	367,5
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1669,1	1106,9	638,9	388,3
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1755,1	1155,6	671,6	415,5
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1859,1	1211,4	710,1	447,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1999,4	1287,2	761,8	490,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3169,7	2183,6	1321,5	813,1
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3297,6	2249,1	1367,2	851,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3431,3	2316,9	1414,7	891,2
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3588,4	2396,8	1471,0	938,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2514,7	1678,0	986,5	611,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2627,9	1738,4	1028,8	647,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2728,5	1792,5	1066,6	679,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2854,5	1860,1	1113,4	719,5
W 410 x 46,1	19,25	269,2	142,1	71,9	48,7
W 410 x 53,0	16,26	735,5	439,9	234,9	141,1
W 410 x 60,0	16,15	776,2	464,9	252,0	155,3
W 410 x 75,0	15,95	860,3	516,2	286,6	184,1
W 410 x 85,0	15,85	1130,3	710,5	395,3	250,2
W 460 x 52,0	17,60	452,5	254,3	130,1	80,1
W 460 x 68,0	17,34	522,5	296,9	159,0	104,4
W 460 x 82,0	14,82	1371,0	854,7	474,7	291,2
W 460 x 97,0	14,65	1487,5	922,3	520,0	327,9
W 460 x 106,0	14,57	1554,2	960,7	545,9	349,3
W 530 x 66,0	15,93	835,3	500,7	262,6	153,2
W 530 x 74,0	15,83	882,9	530,3	282,3	169,4
W 530 x 85,0	15,79	919,9	552,6	298,9	185,2
W 530 x 92,0	13,32	1935,5	1193,2	676,1	410,5
W 530 x 101,0	13,25	2019,8	1239,4	707,9	437,0
W 530 x 109,0	13,19	2093,4	1280,3	735,8	459,9
W 610 x 125,0	12,00	3401,4	2192,8	1276,4	786,6
W 610 x 140,0	11,94	3559,7	2278,2	1335,2	836,5
W 610 x 155,0	9,45	6460,3	4548,0	2953,8	1984,2
W 610 x 174,0	9,40	6770,1	4717,5	3073,1	2088,4
W 610 x 195,0	9,33	7139,4	4926,8	3222,5	2217,6
W 610 x 217,0	9,28	7475,7	5105,0	3349,0	2331,1

Fonte: Próprio autor

Apêndice A

Tabela A.46: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	805,8	499,7	279,4	171,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	933,9	574,7	329,4	212,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1733,6	1091,8	635,9	390,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1865,8	1159,1	681,5	429,0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2477,3	1605,9	938,1	584,2
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2619,1	1679,7	987,9	625,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	2688,5	1715,8	1012,4	645,5
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1024,8	658,0	371,0	228,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1066,6	682,4	387,4	242,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1119,7	712,5	407,7	259,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1186,8	748,4	432,3	280,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1278,8	797,5	465,4	308,4
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2305,3	1503,4	876,0	539,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2396,5	1548,8	907,0	565,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2492,6	1596,2	939,6	593,4
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2604,2	1650,8	977,2	625,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1613,3	1021,0	581,8	359,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1685,8	1058,3	607,1	380,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1750,8	1092,0	630,0	400,1
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1827,8	1131,7	656,9	423,0
W 410 x 46,1	19,25	139,2	72,6	36,5	24,8
W 410 x 53,0	16,26	395,9	232,2	122,6	73,5
W 410 x 60,0	16,15	418,8	245,9	131,8	81,2
W 410 x 75,0	15,95	464,3	273,3	150,1	96,3
W 410 x 85,0	15,85	613,6	378,0	208,1	131,5
W 460 x 52,0	17,60	236,3	131,0	66,5	40,9
W 460 x 68,0	17,34	273,4	153,3	81,5	53,5
W 460 x 82,0	14,82	755,4	459,0	251,3	153,4
W 460 x 97,0	14,65	821,0	496,1	275,6	173,0
W 460 x 106,0	14,57	857,8	516,8	289,4	184,3
W 530 x 66,0	15,93	442,0	260,5	135,3	78,6
W 530 x 74,0	15,83	467,5	276,2	145,6	87,1
W 530 x 85,0	15,79	487,3	287,9	154,3	95,3
W 530 x 92,0	13,32	1095,7	651,7	361,8	217,5
W 530 x 101,0	13,25	1144,7	677,5	379,1	231,8
W 530 x 109,0	13,19	1187,4	700,3	394,2	244,1
W 610 x 125,0	12,00	2018,9	1238,7	700,3	425,0
W 610 x 140,0	11,94	2112,4	1286,7	732,5	452,1
W 610 x 155,0	9,45	4728,5	3072,7	1874,0	1207,6
W 610 x 174,0	9,40	4947,2	3180,7	1946,7	1270,9
W 610 x 195,0	9,33	5218,2	3320,8	2041,5	1351,4
W 610 x 217,0	9,28	5464,6	3440,1	2122,7	1423,7

Fonte: Próprio autor

Página intencionalmente deixada em branco

APÊNDICE B – TEMPERATURAS DAS QUATRO COMPONENTES DA SEÇÃO TRANSVERSAL MISTA AUFERIDAS DO MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

O presente apêndice apresenta as tabelas contendo as temperaturas médias auferidas pelo método avançado de cálculo do ANSYS. Além dos resultados numéricos das distâncias horizontais e verticais a serem consideradas para reduzir o núcleo de concreto, para o cálculo da parcela de contribuição dessa componente no dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

B.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DAS ANÁLISES TÉRMICAS BIDIMENSIONAIS

Nesse capítulo são apresentados todos os resultados obtidos pelas simulações numéricas bidimensionais.

B.1.1 MESAS DO PERFIL DE AÇO

A temperatura média nas mesas da seção transversal, calculados a partir da temperatura nodal extraída dessa componente nas simulações numéricas bidimensionais. Seus valores estão apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1: Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{f,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	691,1	887,7	972,9	1026,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	665,2	875,3	967,6	1023,0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	686,3	882,2	967,7	1021,9
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	672,9	876,3	965,4	1020,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	656,4	867,2	961,8	1017,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	643,5	859,4	958,9	1016,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	636,8	855,1	957,3	1015,0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	677,8	883,1	971,1	1025,1
W 250 x 80,0 (H)	15,66	670,2	879,8	970,1	1024,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	658,8	873,5	967,8	1023,1
W 250 x 101,0 (H)	15,36	645,8	866,2	965,6	1021,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	627,1	853,2	961,0	1018,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	665,5	874,7	965,3	1020,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	656,4	869,3	963,5	1019,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	646,0	863,2	961,7	1017,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	633,8	855,1	959,1	1016,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	664,8	873,3	964,8	1019,8
W 360 x 101,0 (H)	13,45	652,8	866,1	962,2	1018,0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	643,4	860,1	960,3	1016,9
W 360 x 122,0 (H)	13,29	631,6	851,7	957,5	1015,0
W 410 x 46,1	19,25	705,4	897,6	978,6	1029,6
W 410 x 53,0	16,26	698,3	890,4	973,3	1026,0
W 410 x 60,0	16,15	689,5	886,7	971,5	1024,7
W 410 x 75,0	15,95	672,0	877,6	967,5	1022,0
W 410 x 85,0	15,85	660,3	871,0	964,9	1020,2
W 460 x 52,0	17,60	698,5	891,1	974,0	1026,4
W 460 x 68,0	17,34	680,5	883,5	970,7	1024,3
W 460 x 82,0	14,82	669,1	874,5	965,1	1020,0
W 460 x 97,0	14,65	668,0	873,6	964,4	1019,5
W 460 x 106,0	14,57	644,6	859,7	959,7	1016,3
W 530 x 66,0	15,93	690,1	884,7	969,6	1022,9
W 530 x 74,0	15,83	680,5	880,3	967,6	1021,6
W 530 x 85,0	15,79	668,8	874,9	965,5	1020,2
W 530 x 92,0	13,32	669,4	874,1	964,2	1019,0
W 530 x 101,0	13,25	659,1	868,1	961,7	1017,2
W 530 x 109,0	13,19	652,9	864,7	960,9	1016,6

Tabela B.1 (Continuação): Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{f,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	645,3	859,1	957,9	1014,3
W 610 x 140,0	11,94	630,3	848,5	954,1	1011,7
W 610 x 155,0	9,45	640,5	856,3	955,7	1011,5
W 610 x 174,0	9,40	624,6	845,7	952,4	1009,4
W 610 x 195,0	9,33	607,5	832,9	947,9	1006,3
W 610 x 217,0	9,28	591,4	820,6	944,1	1004,1

Fonte: Próprio autor

B.1.2 TEMPERATURA MÉDIA DA ALMA DO PERFIL DE AÇO

Na Tabela B.2 são apresentadas as temperaturas médias das almas dos perfis estruturais de aço para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela B.2: Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{w,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	309,4	532,6	685,0	788,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	312,7	545,9	701,2	802,5
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	251,2	433,6	574,3	681,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	261,6	453,3	597,0	703,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	257,9	456,9	604,9	712,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	257,3	461,2	611,6	719,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	256,5	462,3	613,7	721,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	277,0	497,3	654,7	763,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	291,8	515,3	672,5	779,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	293,0	520,4	679,4	785,3
W 250 x 101,0 (H)	15,36	292,1	523,1	684,7	790,4
W 250 x 115,0 (H)	15,16	290,6	525,0	689,1	794,4
W 310 x 97,0 (H)	13,05	242,4	423,1	566,5	674,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	242,4	427,6	573,6	682,2
W 310 x 117,0 (H)	12,88	241,9	431,0	579,6	688,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	240,2	433,0	584,1	694,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	218,9	388,3	535,6	645,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	218,8	391,9	541,5	652,1
W 360 x 110,0 (H)	13,37	218,5	394,7	546,3	657,4
W 360 x 122,0 (H)	13,29	219,2	400,6	554,8	666,5
W 410 x 46,1	19,25	247,7	487,2	643,4	748,9
W 410 x 53,0	16,26	217,5	412,0	563,9	675,3
W 410 x 60,0	16,15	213,7	408,2	561,0	672,7
W 410 x 75,0	15,95	215,5	414,7	569,5	681,3
W 410 x 85,0	15,85	215,8	417,7	573,9	685,8
W 460 x 52,0	17,60	218,7	436,5	590,5	699,8
W 460 x 68,0	17,34	220,4	439,7	594,7	704,0
W 460 x 82,0	14,82	195,9	372,2	522,8	633,6
W 460 x 97,0	14,65	195,5	374,3	526,5	637,7
W 460 x 106,0	14,57	196,7	377,7	530,9	642,2
W 530 x 66,0	15,93	192,8	383,2	533,1	643,5
W 530 x 74,0	15,83	192,0	383,0	533,6	644,1
W 530 x 85,0	15,79	191,5	384,2	535,7	646,3
W 530 x 92,0	13,32	166,4	311,2	452,1	560,3
W 530 x 101,0	13,25	165,6	311,5	453,1	561,6
W 530 x 109,0	13,19	154,7	298,5	441,2	550,7

Tabela B.2 (Continuação): Temperatura média nas almas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{w,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	146,6	275,4	400,9	505,9
W 610 x 140,0	11,94	144,4	274,2	401,5	507,1
W 610 x 155,0	9,45	130,8	235,6	319,3	397,0
W 610 x 174,0	9,40	129,5	236,9	322,9	402,7
W 610 x 195,0	9,33	128,2	238,0	325,8	407,3
W 610 x 217,0	9,28	125,6	237,2	326,1	409,4

Fonte: Próprio autor

B.1.3 CONCRETO ENTRE AS MESAS E A ALMA DO PERFIL DE AÇO

Na Tabela B.3 são apresentadas as temperaturas médias dos núcleos de concreto, para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo. Já a Tabela B.4 e Tabela B.5 apresentam as distâncias horizontal e vertical de concreto a serem desprezadas.

Tabela B.3: Temperatura média na área residual de concreto

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{c,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	239,7	379,2	473,3	>500
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	239,3	383,0	476,6	>500
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	195,1	301,2	396,3	463,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	204,0	308,8	401,2	467,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	201,2	311,5	406,3	471,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	201,1	312,9	407,9	473,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	200,8	313,1	408,1	473,3
W 250 x 73,0 (H)	15,78	235,1	372,1	468,4	>500
W 250 x 80,0 (H)	15,66	235,1	374,5	469,5	>500
W 250 x 89,0 (H)	15,50	235,2	376,4	471,1	>500
W 250 x 101,0 (H)	15,36	235,0	377,9	472,5	>500
W 250 x 115,0 (H)	15,16	233,2	377,5	472,8	>500
W 310 x 97,0 (H)	13,05	197,3	301,1	392,9	460,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	197,5	302,6	395,3	462,6
W 310 x 117,0 (H)	12,88	197,3	303,7	397,4	464,2
W 310 x 129,0 (H)	12,78	195,9	303,8	398,8	465,8
W 360 x 91,0 (H)	13,54	204,9	311,9	402,1	472,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	205,1	313,7	405,0	475,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	205,0	315,3	407,4	477,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	206,9	319,3	412,5	482,0
W 410 x 46,1	19,25	287,2	426,9	>500	>500
W 410 x 53,0	16,26	241,3	366,4	454,1	>500
W 410 x 60,0	16,15	237,8	364,5	453,4	>500
W 410 x 75,0	15,95	239,1	369,6	459,4	>500
W 410 x 85,0	15,85	242,4	373,1	462,8	>500
W 460 x 52,0	17,60	258,6	392,9	481,5	>500
W 460 x 68,0	17,34	263,6	395,0	482,4	>500
W 460 x 82,0	14,82	222,8	341,3	427,6	494,8
W 460 x 97,0	14,65	226,2	344,8	431,1	497,6
W 460 x 106,0	14,57	226,6	347,1	433,5	499,0
W 530 x 66,0	15,93	236,9	362,3	447,1	>500
W 530 x 74,0	15,83	236,9	362,7	447,3	>500
W 530 x 85,0	15,79	237,3	363,7	448,4	>500
W 530 x 92,0	13,32	202,7	304,4	384,8	447,8
W 530 x 101,0	13,25	202,5	304,9	385,6	448,7
W 530 x 109,0	13,19	200,2	304,4	387,4	450,2

Apêndice B

Tabela B.3 (Continuação): Temperatura média na área residual de concreto

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{w,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	188,2	279,4	350,6	411,5
W 610 x 140,0	11,94	187,6	279,8	352,4	413,5
W 610 x 155,0	9,45	146,9	217,4	267,8	316,8
W 610 x 174,0	9,40	146,6	218,0	269,3	319,7
W 610 x 195,0	9,33	146,7	218,6	270,4	321,9
W 610 x 217,0	9,28	146,9	217,9	269,9	322,9

Fonte: Próprio autor

Tabela B.4: Espessura da camada externa horizontal de concreto a ser desprezada

Perfil	(u/A) _p	$b_{c,f,h}$ [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	11,7	26,4	51,0	
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	12,1	26,6	51,3	
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	12,2	24,3	37,7	58,9
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	11,9	23,9	37,8	58,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	11,9	23,9	38,2	60,7
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	11,9	23,9	38,2	60,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	11,9	23,8	38,2	60,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	12,2	26,1	49,4	
W 250 x 80,0 (H)	15,66	12,0	26,2	50,0	
W 250 x 89,0 (H)	15,50	12,0	26,2	50,0	
W 250 x 101,0 (H)	15,36	12,0	26,2	50,0	
W 250 x 115,0 (H)	15,16	12,2	26,7	50,0	
W 310 x 97,0 (H)	13,05	11,9	23,9	37,9	57,8
W 310 x 107,0 (H)	12,97	11,9	23,9	37,9	58,5
W 310 x 117,0 (H)	12,88	11,9	23,9	37,9	58,5
W 310 x 129,0 (H)	12,78	12,3	24,6	38,0	58,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	11,9	23,9	37,2	59,2
W 360 x 101,0 (H)	13,45	11,9	23,9	37,9	59,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	11,9	23,9	37,9	60,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	11,9	23,9	38,2	63,0
W 410 x 46,1	19,25	11,7	28,6		
W 410 x 53,0	16,26	12,4	24,8	43,5	
W 410 x 60,0	16,15	12,2	25,1	43,7	
W 410 x 75,0	15,95	12,2	25,1	44,5	
W 410 x 85,0	15,85	12,2	25,5	45,1	
W 460 x 52,0	17,60	12,2	25,9	50,8	
W 460 x 68,0	17,34	12,0	26,2	50,8	
W 460 x 82,0	14,82	12,2	24,4	39,0	69,3
W 460 x 97,0	14,65	12,2	24,4	39,7	70,1
W 460 x 106,0	14,57	12,3	24,6	40,2	71,3
W 530 x 66,0	15,93	12,2	24,4	41,3	
W 530 x 74,0	15,83	12,2	24,4	42,1	
W 530 x 85,0	15,79	12,2	24,4	42,9	
W 530 x 92,0	13,32	12,2	24,4	35,0	51,6
W 530 x 101,0	13,25	12,2	23,6	35,8	52,4
W 530 x 109,0	13,19	12,3	23,5	36,9	53,3
W 610 x 125,0	12,00	11,7	23,5	33,7	45,2
W 610 x 140,0	11,94	11,7	23,5	33,0	45,9
W 610 x 155,0	9,45	11,7	23,3	32,3	39,3
W 610 x 174,0	9,40	11,7	23,3	32,3	40,2
W 610 x 195,0	9,33	11,7	23,3	32,3	40,2
W 610 x 217,0	9,28	11,5	23,1	32,3	40,7

Fonte: Próprio autor

Tabela B.5: Espessura da camada externa vertical de concreto a ser desprezada

Perfil	(u/A) _p	b _{c,fi,v} [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	8,8	30,3	68,8	
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	7,3	29,0	71,1	
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	8,5	25,5	46,7	78,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	7,6	25,1	46,7	81,0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	6,0	24,9	47,6	84,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	6,0	23,9	47,6	85,8
HP 310 x 132 (H)	12,76	6,0	23,9	47,6	85,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	7,9	28,6	66,0	
W 250 x 80,0 (H)	15,66	7,5	28,4	66,4	
W 250 x 89,0 (H)	15,50	6,7	27,7	67,2	
W 250 x 101,0 (H)	15,36	6,0	26,9	67,9	
W 250 x 115,0 (H)	15,16	6,1	26,7	68,4	
W 310 x 97,0 (H)	13,05	6,7	24,6	45,7	77,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	6,0	23,9	45,7	78,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	5,2	23,5	45,7	79,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4,5	23,1	45,6	80,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	7,5	26,1	55,7	98,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	6,7	25,4	56,4	101,0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	6,0	25,4	56,4	103,2
W 360 x 122,0 (H)	13,29	5,6	25,1	57,1	107,2
W 410 x 46,1	19,25	13,2			
W 410 x 53,0	16,26	11,5	39,4	95,9	
W 410 x 60,0	16,15	10,5	38,8	96,2	
W 410 x 75,0	15,95	8,9	38,0	99,8	
W 410 x 85,0	15,85	8,5	38,0	101,8	
W 460 x 52,0	17,60	12,2	48,9	140,8	
W 460 x 68,0	17,34	10,5	52,3	142,4	
W 460 x 82,0	14,82	9,0	30,1	86,2	176,6
W 460 x 97,0	14,65	9,0	30,1	86,5	188,3
W 460 x 106,0	14,57	7,8	29,1	88,4	200,1
W 530 x 66,0	15,93	10,6	34,2	111,7	
W 530 x 74,0	15,83	9,8	34,2	112,5	
W 530 x 85,0	15,79	9,0	34,2	114,1	
W 530 x 92,0	13,32	8,1	29,3	73,7	122,0
W 530 x 101,0	13,25	7,3	28,5	73,7	122,8
W 530 x 109,0	13,19	7,8	28,0	73,7	123,8
W 610 x 125,0	12,00	6,6	25,0	66,3	104,9
W 610 x 140,0	11,94	5,1	24,2	65,7	103,7
W 610 x 155,0	9,45	4,5	23,3		
W 610 x 174,0	9,40	4,4	21,5		
W 610 x 195,0	9,33	4,1	20,8		
W 610 x 217,0	9,28	3,6	20,6		

Fonte: Próprio autor

Lembrando que os espaços em branco na tabela representam valores que excederam aos limites geométricos da seção transversal.

Apêndice B

B.1.4 ARMADURA LONGITUDINAL

Na Tabela B.6 são apresentadas as temperaturas médias das armaduras longitudinais da seção transversal mista, para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela B.6: Temperatura média do aço da armadura longitudinal em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{s,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	201,0	427,1	585,4	699,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	195,7	423,5	584,7	700,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	199,3	407,2	550,9	658,2
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	196,1	404,5	549,8	658,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	196,8	402,0	546,9	654,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	194,7	399,7	545,5	654,2
HP 310 x 132 (H)	12,76	193,6	398,6	544,7	653,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	198,2	419,8	576,4	690,0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	196,3	418,3	575,9	690,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	194,3	417,0	575,6	690,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	191,8	414,8	574,6	690,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	189,4	412,4	573,1	689,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	197,3	401,6	544,5	650,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	195,2	399,6	543,4	650,6
W 310 x 117,0 (H)	12,88	193,1	397,6	542,2	650,1
W 310 x 129,0 (H)	12,78	191,7	395,7	541,1	649,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	199,1	411,8	558,6	666,0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	196,9	409,9	557,7	665,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	195,0	408,2	556,8	665,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	193,3	406,9	556,6	666,5
W 410 x 46,1	19,25	283,4	533,8	687,2	776,7
W 410 x 53,0	16,26	232,6	467,9	620,6	722,5
W 410 x 60,0	16,15	229,2	465,1	618,6	721,4
W 410 x 75,0	15,95	226,1	464,0	619,4	722,7
W 410 x 85,0	15,85	224,0	463,0	619,5	723,3
W 460 x 52,0	17,60	264,3	506,4	658,8	740,0
W 460 x 68,0	17,34	258,7	502,7	657,3	739,6
W 460 x 82,0	14,82	220,9	450,3	600,8	705,0
W 460 x 97,0	14,65	217,3	447,5	599,1	704,4
W 460 x 106,0	14,57	216,0	446,7	598,9	704,7
W 530 x 66,0	15,93	251,4	485,0	634,2	727,8
W 530 x 74,0	15,83	248,5	483,1	633,2	727,5
W 530 x 85,0	15,79	245,9	481,4	632,7	727,6
W 530 x 92,0	13,32	211,2	435,6	583,6	688,1
W 530 x 101,0	13,25	208,9	433,6	582,3	687,4
W 530 x 109,0	13,19	207,1	432,2	581,3	686,9
W 610 x 125,0	12,00	206,4	422,3	567,5	671,1
W 610 x 140,0	11,94	203,6	419,7	565,7	670,1
W 610 x 155,0	9,45	199,1	397,6	535,5	635,9
W 610 x 174,0	9,40	195,9	394,3	533,0	634,3
W 610 x 195,0	9,33	193,5	391,2	530,5	632,5
W 610 x 217,0	9,28	191,1	388,1	527,8	630,5

Fonte: Próprio autor

Página intencionalmente deixada em branco

APÊNDICE C – APRIMORAMENTO DO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

Nesse apêndice são apresentados todos os resultados obtidos pelas formulações do aprimoramento do Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

C.1 PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO ANEXO B DA ABNT NBR 14323:2013

O presente anexo apresenta as tabelas contendo os resultados do aprimoramento do método analítico de dimensionamento do Anexo B da ABNT NBR 14323:2013.

C.1.1 MESAS DO PERFIL DE AÇO

A temperatura média nas mesas da seção transversal foi determinada para as seções em estudo conforme a Equação (5.1), seus valores estão apresentados na Tabela C.1.

Tabela C.1: Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	θ_{ft} [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	699,8	893,6	975,0	1026,5
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	678,8	880,8	970,8	1023,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	693,3	888,5	971,2	1023,2
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	681,5	881,4	968,9	1021,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	668,1	873,3	966,3	1020,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	657,4	866,8	964,3	1018,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	652,3	863,7	963,3	1018,0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	680,3	881,8	971,3	1024,1
W 250 x 80,0 (H)	15,66	672,4	877,0	969,8	1023,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	662,8	871,2	967,9	1021,8
W 250 x 101,0 (H)	15,36	649,8	863,4	965,4	1020,1
W 250 x 115,0 (H)	15,16	635,7	854,8	962,6	1018,3
W 310 x 97,0 (H)	13,05	668,8	873,8	966,6	1020,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	659,8	868,4	964,9	1019,0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	650,3	862,6	963,0	1017,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	639,7	856,2	961,0	1016,5
W 360 x 91,0 (H)	13,54	664,2	871,2	966,2	1020,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	653,6	864,8	964,2	1018,8
W 360 x 110,0 (H)	13,37	644,6	859,4	962,5	1017,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	634,6	853,3	960,6	1016,4
W 410 x 46,1	19,25	703,0	896,9	978,8	1030,0
W 410 x 53,0	16,26	699,3	893,4	975,2	1026,7
W 410 x 60,0	16,15	688,7	887,0	973,2	1025,4
W 410 x 75,0	15,95	670,7	876,1	969,7	1023,1
W 410 x 85,0	15,85	658,4	868,7	967,4	1021,6
W 460 x 52,0	17,60	702,3	895,8	977,1	1028,3
W 460 x 68,0	17,34	676,5	880,2	972,1	1025,1
W 460 x 82,0	14,82	668,7	874,4	968,3	1021,8
W 460 x 97,0	14,65	651,9	864,3	965,1	1019,7
W 460 x 106,0	14,57	642,9	858,9	963,3	1018,6
W 530 x 66,0	15,93	696,0	891,3	974,3	1026,0
W 530 x 74,0	15,83	683,7	883,9	972,0	1024,5
W 530 x 85,0	15,79	667,7	874,2	969,0	1022,6
W 530 x 92,0	13,32	668,2	873,5	966,7	1020,3
W 530 x 101,0	13,25	658,1	867,5	964,8	1019,1
W 530 x 109,0	13,19	650,3	862,7	963,3	1018,1

Apêndice C

Tabela C.1 (Continuação): Temperatura média nas mesas dos perfis estruturais

Perfil	(u/A) _p	θ _{f,t} [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	643,8	858,3	961,0	1016,3
W 610 x 140,0	11,94	629,4	849,6	958,3	1014,5
W 610 x 155,0	9,45	642,5	856,5	958,3	1013,7
W 610 x 174,0	9,40	628,1	847,8	955,6	1012,0
W 610 x 195,0	9,33	612,6	838,5	952,7	1010,1
W 610 x 217,0	9,28	595,5	828,2	949,6	1008,1

Fonte: Próprio autor

A temperatura média nas mesas do perfil de aço permite determinar os fatores de redução $k_{y,0}$ e $k_{E,0}$, apresentados conforme Tabela C.2 e Tabela C.3.

Tabela C.2: Coeficientes de redução para tensão de escoamento

Perfil	(u/A) _p	k _{y,0}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,230	0,063	0,045	0,035
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,281	0,070	0,046	0,035
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,246	0,066	0,046	0,035
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,274	0,069	0,046	0,036
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,307	0,073	0,047	0,036
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,332	0,077	0,047	0,036
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,344	0,078	0,047	0,036
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,277	0,069	0,046	0,035
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,296	0,071	0,046	0,035
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,319	0,074	0,046	0,036
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,350	0,078	0,047	0,036
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,384	0,083	0,047	0,036
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,305	0,073	0,047	0,036
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,326	0,076	0,047	0,036
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,349	0,079	0,047	0,036
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,375	0,082	0,048	0,037
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,316	0,074	0,047	0,036
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,341	0,078	0,047	0,036
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,363	0,080	0,048	0,036
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,387	0,083	0,048	0,037
W 410 x 46,1	19,25	0,226	0,062	0,044	0,034
W 410 x 53,0	16,26	0,232	0,063	0,045	0,035
W 410 x 60,0	16,15	0,257	0,067	0,045	0,035
W 410 x 75,0	15,95	0,300	0,072	0,046	0,035
W 410 x 85,0	15,85	0,330	0,076	0,047	0,036
W 460 x 52,0	17,60	0,227	0,062	0,045	0,034
W 460 x 68,0	17,34	0,286	0,070	0,046	0,035
W 460 x 82,0	14,82	0,305	0,073	0,046	0,036
W 460 x 97,0	14,65	0,345	0,078	0,047	0,036
W 460 x 106,0	14,57	0,367	0,081	0,047	0,036
W 530 x 66,0	15,93	0,240	0,064	0,045	0,035
W 530 x 74,0	15,83	0,269	0,068	0,046	0,035
W 530 x 85,0	15,79	0,308	0,073	0,046	0,035
W 530 x 92,0	13,32	0,306	0,073	0,047	0,036
W 530 x 101,0	13,25	0,330	0,076	0,047	0,036
W 530 x 109,0	13,19	0,349	0,079	0,047	0,036
W 610 x 125,0	12,00	0,365	0,081	0,048	0,037
W 610 x 140,0	11,94	0,399	0,085	0,048	0,037

Tabela C.2 (Continuação): Coeficientes de redução para tensão de escoamento

Perfil	(u/A) _p	k _{y,0}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 155,0	9,45	0,368	0,082	0,048	0,037
W 610 x 174,0	9,40	0,403	0,086	0,049	0,038
W 610 x 195,0	9,33	0,440	0,091	0,049	0,038
W 610 x 217,0	9,28	0,484	0,096	0,050	0,038

Fonte: Próprio autor

A Tabela C.3 apresenta os coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das mesas do perfil estrutural em situação de incêndio.

Tabela C.3: Coeficientes de redução para o módulo de elasticidade

Perfil	(u/A) _p	k _{E,0}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,130	0,069	0,051	0,039
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,168	0,072	0,052	0,040
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,142	0,070	0,051	0,040
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,163	0,072	0,052	0,040
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,188	0,074	0,053	0,041
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,207	0,075	0,053	0,041
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,216	0,076	0,053	0,041
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,165	0,072	0,051	0,040
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,180	0,073	0,052	0,040
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,197	0,074	0,052	0,040
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,220	0,076	0,053	0,040
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,246	0,078	0,053	0,041
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,186	0,073	0,053	0,040
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,202	0,075	0,053	0,041
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,219	0,076	0,053	0,041
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,239	0,077	0,054	0,041
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,194	0,074	0,053	0,040
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,214	0,075	0,053	0,041
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,230	0,077	0,053	0,041
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,248	0,078	0,054	0,041
W 410 x 46,1	19,25	0,129	0,068	0,050	0,038
W 410 x 53,0	16,26	0,131	0,069	0,051	0,039
W 410 x 60,0	16,15	0,150	0,070	0,051	0,039
W 410 x 75,0	15,95	0,183	0,073	0,052	0,040
W 410 x 85,0	15,85	0,205	0,075	0,052	0,040
W 460 x 52,0	17,60	0,129	0,068	0,050	0,039
W 460 x 68,0	17,34	0,172	0,072	0,051	0,039
W 460 x 82,0	14,82	0,186	0,073	0,052	0,040
W 460 x 97,0	14,65	0,217	0,076	0,053	0,041
W 460 x 106,0	14,57	0,233	0,077	0,053	0,041
W 530 x 66,0	15,93	0,137	0,069	0,051	0,039
W 530 x 74,0	15,83	0,159	0,071	0,051	0,039
W 530 x 85,0	15,79	0,188	0,073	0,052	0,040
W 530 x 92,0	13,32	0,187	0,073	0,052	0,040
W 530 x 101,0	13,25	0,205	0,075	0,053	0,041
W 530 x 109,0	13,19	0,219	0,076	0,053	0,041
W 610 x 125,0	12,00	0,231	0,077	0,054	0,041
W 610 x 140,0	11,94	0,257	0,079	0,054	0,042
W 610 x 155,0	9,45	0,233	0,077	0,054	0,042
W 610 x 174,0	9,40	0,259	0,079	0,055	0,042
W 610 x 195,0	9,33	0,287	0,081	0,056	0,043
W 610 x 217,0	9,28	0,323	0,084	0,056	0,043

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

A força axial de plastificação de cálculo das mesas, para as seções transversais estudadas, pode ser verificada conforme a Tabela C.4.

Tabela C.4: Força axial de plastificação de cálculo das mesas

Perfil	(u/A) _p	N _{n,pl,Rd,f} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	435,4	119,4	85,0	65,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	725,5	179,8	118,4	91,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	571,5	152,7	106,3	82,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	763,8	192,9	128,7	99,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1016,8	243,2	154,9	119,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1244,7	286,9	176,6	135,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	1361,3	308,8	187,1	143,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	690,0	172,0	113,8	87,6
W 250 x 80,0 (H)	15,66	813,3	196,2	126,4	97,2
W 250 x 89,0 (H)	15,50	976,0	227,4	141,9	108,9
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1217,8	272,2	163,1	125,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1517,6	326,2	187,5	143,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	988,2	237,0	151,3	116,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1171,5	272,2	168,8	129,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1383,2	311,7	187,7	144,3
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1640,4	358,6	209,2	160,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	908,2	213,9	134,4	103,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1099,5	249,9	151,9	116,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1275,7	282,3	167,0	128,2
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1489,3	320,7	184,3	141,3
W 410 x 46,1	19,25	244,9	66,6	47,9	36,8
W 410 x 53,0	16,26	308,3	84,3	59,8	46,1
W 410 x 60,0	16,15	404,3	104,6	71,3	54,9
W 410 x 75,0	15,95	596,7	142,9	91,5	70,3
W 410 x 85,0	15,85	749,6	171,9	105,7	81,1
W 460 x 52,0	17,60	257,4	70,4	50,5	38,9
W 460 x 68,0	17,34	468,6	114,4	74,6	57,2
W 460 x 82,0	14,82	643,5	153,5	97,7	75,2
W 460 x 97,0	14,65	874,2	197,0	118,9	91,2
W 460 x 106,0	14,57	1011,9	222,1	130,5	100,1
W 530 x 66,0	15,93	311,1	83,5	58,6	45,2
W 530 x 74,0	15,83	419,2	106,0	71,0	54,7
W 530 x 85,0	15,79	581,3	137,7	87,3	67,1
W 530 x 92,0	13,32	689,2	164,8	105,0	80,8
W 530 x 101,0	13,25	833,1	192,3	118,6	91,2
W 530 x 109,0	13,19	955,7	215,2	129,5	99,6
W 610 x 125,0	12,00	1130,0	250,4	148,0	113,8
W 610 x 140,0	11,94	1407,4	300,1	170,3	130,7
W 610 x 155,0	9,45	1563,1	347,3	205,3	158,3
W 610 x 174,0	9,40	1949,7	417,0	236,7	182,1
W 610 x 195,0	9,33	2421,1	499,7	272,3	209,1
W 610 x 217,0	9,28	3012,8	596,9	311,7	238,9

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva das duas mesas do perfil de aço em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela C.5.

Tabela C.5: Rigidez efetiva das mesas do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,f} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	7,80E+11	4,13E+11	3,03E+11	2,34E+11
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,42E+12	6,06E+11	4,35E+11	3,35E+11
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,49E+12	7,36E+11	5,41E+11	4,18E+11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2,08E+12	9,15E+11	6,63E+11	5,12E+11
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2,89E+12	1,13E+12	8,09E+11	6,23E+11
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3,64E+12	1,32E+12	9,34E+11	7,19E+11
HP 310 x 132 (H)	12,76	4,04E+12	1,42E+12	9,96E+11	7,66E+11
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,28E+12	5,55E+11	3,99E+11	3,07E+11
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,55E+12	6,27E+11	4,47E+11	3,43E+11
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,91E+12	7,16E+11	5,05E+11	3,88E+11
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2,44E+12	8,40E+11	5,85E+11	4,49E+11
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3,14E+12	9,94E+11	6,84E+11	5,23E+11
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2,71E+12	1,07E+12	7,65E+11	5,89E+11
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3,28E+12	1,21E+12	8,59E+11	6,61E+11
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3,96E+12	1,37E+12	9,62E+11	7,39E+11
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4,79E+12	1,55E+12	1,08E+12	8,28E+11
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,74E+12	6,63E+11	4,71E+11	3,63E+11
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2,16E+12	7,63E+11	5,37E+11	4,12E+11
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2,56E+12	8,53E+11	5,95E+11	4,57E+11
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3,04E+12	9,58E+11	6,61E+11	5,07E+11
W 410 x 46,1	19,25	1,32E+11	6,99E+10	5,10E+10	3,92E+10
W 410 x 53,0	16,26	2,64E+11	1,39E+11	1,02E+11	7,85E+10
W 410 x 60,0	16,15	3,62E+11	1,69E+11	1,23E+11	9,45E+10
W 410 x 75,0	15,95	5,68E+11	2,27E+11	1,61E+11	1,24E+11
W 410 x 85,0	15,85	7,37E+11	2,68E+11	1,88E+11	1,44E+11
W 460 x 52,0	17,60	1,63E+11	8,65E+10	6,34E+10	4,88E+10
W 460 x 68,0	17,34	3,23E+11	1,35E+11	9,61E+10	7,38E+10
W 460 x 82,0	14,82	6,93E+11	2,72E+11	1,94E+11	1,49E+11
W 460 x 97,0	14,65	9,86E+11	3,44E+11	2,41E+11	1,85E+11
W 460 x 106,0	14,57	1,17E+12	3,85E+11	2,67E+11	2,05E+11
W 530 x 66,0	15,93	2,34E+11	1,19E+11	8,67E+10	6,68E+10
W 530 x 74,0	15,83	3,30E+11	1,48E+11	1,06E+11	8,19E+10
W 530 x 85,0	15,79	4,73E+11	1,84E+11	1,31E+11	1,00E+11
W 530 x 92,0	13,32	8,89E+11	3,49E+11	2,49E+11	1,92E+11
W 530 x 101,0	13,25	1,10E+12	4,02E+11	2,84E+11	2,19E+11
W 530 x 109,0	13,19	1,29E+12	4,47E+11	3,13E+11	2,41E+11
W 610 x 125,0	12,00	1,81E+12	6,03E+11	4,22E+11	3,24E+11
W 610 x 140,0	11,94	2,31E+12	7,10E+11	4,90E+11	3,76E+11
W 610 x 155,0	9,45	5,03E+12	1,67E+12	1,17E+12	9,03E+11
W 610 x 174,0	9,40	6,41E+12	1,96E+12	1,36E+12	1,05E+12
W 610 x 195,0	9,33	8,17E+12	2,31E+12	1,58E+12	1,22E+12
W 610 x 217,0	9,28	1,05E+13	2,71E+12	1,82E+12	1,40E+12

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

C.1.2 ALMA DO PERFIL DE AÇO

Na Tabela C.6 são apresentados os resultados da temperatura média da alma nas seções estudadas, conforme Equação (5.6). Os coeficientes de redução para a tensão de escoamento são apresentados na Tabela C.7.

Tabela C.6: Temperatura média da alma das seções transversais em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{w,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	298,8	520,6	677,0	782,3
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	295,9	523,6	683,2	788,8
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	240,9	431,0	580,9	688,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	240,5	433,9	585,3	692,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	239,1	434,4	586,9	694,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	237,6	433,7	586,8	694,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	236,7	432,9	586,2	694,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	290,3	500,3	652,4	757,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	289,7	502,3	655,6	761,1
W 250 x 89,0 (H)	15,50	289,2	505,3	660,4	766,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	287,8	505,8	662,0	767,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	285,4	504,7	661,9	767,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	235,1	418,9	566,7	674,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	234,8	420,7	569,4	677,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	234,3	421,7	571,2	678,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	233,3	422,0	572,2	680,1
W 360 x 91,0 (H)	13,54	248,1	443,0	594,0	701,2
W 360 x 101,0 (H)	13,45	247,5	444,1	596,0	703,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	246,9	444,6	597,2	704,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	246,8	446,7	600,3	707,7
W 410 x 46,1	19,25	258,8	485,1	646,1	762,6
W 410 x 53,0	16,26	232,0	415,2	544,0	647,9
W 410 x 60,0	16,15	229,0	411,9	541,7	646,0
W 410 x 75,0	15,95	210,9	401,8	548,0	658,3
W 410 x 85,0	15,85	203,0	397,0	549,7	662,5
W 460 x 52,0	17,60	231,0	442,2	600,1	715,1
W 460 x 68,0	17,34	217,1	432,3	600,4	719,2
W 460 x 82,0	14,82	194,7	373,3	513,9	621,9
W 460 x 97,0	14,65	186,1	367,1	513,9	624,2
W 460 x 106,0	14,57	180,9	363,7	514,7	626,6
W 530 x 66,0	15,93	199,4	397,6	556,0	670,9
W 530 x 74,0	15,83	194,4	393,8	555,9	672,1
W 530 x 85,0	15,79	191,2	391,9	556,6	673,8
W 530 x 92,0	13,32	174,6	336,0	468,0	572,5
W 530 x 101,0	13,25	171,0	333,3	467,7	573,2
W 530 x 109,0	13,19	168,0	331,1	467,7	573,9
W 610 x 125,0	12,00	153,8	302,1	429,9	532,7
W 610 x 140,0	11,94	150,1	299,6	430,1	533,9
W 610 x 155,0	9,45	133,9	243,3	340,1	430,9
W 610 x 174,0	9,40	130,5	241,3	340,9	432,7
W 610 x 195,0	9,33	127,3	238,8	340,6	433,2
W 610 x 217,0	9,28	125,1	237,1	340,2	433,4

Fonte: Próprio autor

Aplicando as formulações para se determinar o fator de redução da resistência ao escoamento da alma para os perfis estudados pode ser observado na Tabela C.7.

Tabela C.7: Resistência ao escoamento da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	f _{y,0,w} [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	345,0	247,1	98,4	45,3
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	345,0	243,9	93,3	42,6
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	345,0	321,4	182,6	89,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	345,0	319,3	177,8	85,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	345,0	318,9	176,1	83,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	345,0	319,4	176,3	83,8
HP 310 x 132 (H)	12,76	345,0	320,0	176,9	84,3
W 250 x 73,0 (H)	15,78	345,0	268,8	118,8	55,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	345,0	266,7	116,1	54,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	345,0	263,5	112,1	52,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	345,0	262,9	110,8	51,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	345,0	264,0	110,9	51,3
W 310 x 97,0 (H)	13,05	345,0	330,6	197,8	100,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	345,0	329,3	194,8	98,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	345,0	328,6	193,0	96,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	345,0	328,3	191,9	95,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	345,0	312,4	168,5	78,8
W 360 x 101,0 (H)	13,45	345,0	311,5	166,4	78,0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	345,0	311,1	165,1	77,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	345,0	309,5	161,9	76,1
W 410 x 46,1	19,25	345,0	280,4	124,0	53,4
W 410 x 53,0	16,26	345,0	333,5	222,1	122,5
W 410 x 60,0	16,15	345,0	336,0	224,5	124,0
W 410 x 75,0	15,95	345,0	343,6	217,8	113,9
W 410 x 85,0	15,85	345,0	345,0	215,9	110,4
W 460 x 52,0	17,60	345,0	313,0	162,1	73,1
W 460 x 68,0	17,34	345,0	320,5	161,8	71,4
W 460 x 82,0	14,82	345,0	345,0	254,3	144,0
W 460 x 97,0	14,65	345,0	345,0	254,2	142,1
W 460 x 106,0	14,57	345,0	345,0	253,4	140,2
W 530 x 66,0	15,93	345,0	345,0	209,2	103,4
W 530 x 74,0	15,83	345,0	345,0	209,3	102,5
W 530 x 85,0	15,79	345,0	345,0	208,5	101,0
W 530 x 92,0	13,32	345,0	345,0	293,4	191,5
W 530 x 101,0	13,25	345,0	345,0	293,6	190,8
W 530 x 109,0	13,19	345,0	345,0	293,6	190,1
W 610 x 125,0	12,00	345,0	345,0	322,3	234,2
W 610 x 140,0	11,94	345,0	345,0	322,1	232,8
W 610 x 155,0	9,45	345,0	345,0	345,0	321,6
W 610 x 174,0	9,40	345,0	345,0	345,0	320,2
W 610 x 195,0	9,33	345,0	345,0	345,0	319,8
W 610 x 217,0	9,28	345,0	345,0	345,0	319,7

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Os resultados da força axial de plastificação de cálculo e a rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio determinadas pelas Equações (5.9) e (5.10), para os perfis em estudo, podem ser verificados nas Tabelas C.8 e C.9, respectivamente.

A força axial de plastificação de cálculo da alma, para as seções transversais estudadas, pode ser verificada conforme a Tabela C.8.

Tabela C.8: Força axial de plastificação de cálculo da alma do perfil de aço

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,w} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	813,6	582,6	232,0	106,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1118,8	790,9	302,5	138,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1051,2	979,4	556,4	271,2
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1251,0	1157,7	644,9	309,0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1471,7	1360,3	751,4	357,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1664,0	1540,7	850,1	404,2
HP 310 x 132 (H)	12,76	1751,4	1624,6	898,1	427,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	666,4	519,2	229,4	107,1
W 250 x 80,0 (H)	15,66	729,0	563,5	245,3	114,2
W 250 x 89,0 (H)	15,50	832,1	635,4	270,4	125,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	922,9	703,3	296,5	137,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1047,0	801,3	336,5	155,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	946,8	907,3	542,8	276,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1041,7	994,2	588,3	296,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1135,6	1081,5	635,3	318,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1251,0	1190,5	695,7	347,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1049,5	950,2	512,7	239,8
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1160,6	1048,0	559,8	262,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1259,3	1135,7	602,8	282,8
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1433,4	1286,1	672,6	316,4
W 410 x 46,1	19,25	919,1	747,1	330,3	142,3
W 410 x 53,0	16,26	986,4	953,4	634,9	350,1
W 410 x 60,0	16,15	1013,2	986,7	659,3	364,2
W 410 x 75,0	15,95	1275,0	1269,9	804,9	420,9
W 410 x 85,0	15,85	1431,2	1431,2	895,8	458,2
W 460 x 52,0	17,60	1123,3	1018,9	527,7	238,0
W 460 x 68,0	17,34	1344,3	1248,8	630,4	278,2
W 460 x 82,0	14,82	1461,8	1461,8	1077,3	610,1
W 460 x 97,0	14,65	1683,3	1683,3	1240,5	693,3
W 460 x 106,0	14,57	1859,6	1859,6	1365,9	755,5
W 530 x 66,0	15,93	1542,0	1542,0	934,8	462,2
W 530 x 74,0	15,83	1679,3	1679,3	1019,0	498,7
W 530 x 85,0	15,79	1783,9	1783,9	1078,2	522,3
W 530 x 92,0	13,32	1765,8	1765,8	1501,8	980,4
W 530 x 101,0	13,25	1888,5	1888,5	1607,1	1044,6
W 530 x 109,0	13,19	2006,6	2006,6	1707,9	1105,5
W 610 x 125,0	12,00	2351,6	2351,6	2196,9	1596,2
W 610 x 140,0	11,94	2587,9	2587,9	2416,3	1746,5
W 610 x 155,0	9,45	2510,6	2510,6	2510,6	2340,0
W 610 x 174,0	9,40	2766,6	2766,6	2766,6	2567,5
W 610 x 195,0	9,33	3045,4	3045,4	3045,4	2822,9
W 610 x 217,0	9,28	3261,8	3261,8	3261,8	3022,4

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela C.9.

Tabela C.9: Rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,w} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	3,47E+09	2,34E+09	7,42E+08	4,21E+08
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	8,97E+09	5,96E+09	1,80E+09	1,06E+09
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	4,92E+09	4,11E+09	2,25E+09	9,28E+08
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	8,30E+09	6,91E+09	3,66E+09	1,48E+09
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,35E+10	1,12E+10	5,87E+09	2,36E+09
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,95E+10	1,62E+10	8,48E+09	3,40E+09
HP 310 x 132 (H)	12,76	2,27E+10	1,89E+10	9,92E+09	3,99E+09
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,90E+09	1,43E+09	5,14E+08	2,54E+08
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2,49E+09	1,85E+09	6,53E+08	3,28E+08
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3,68E+09	2,69E+09	9,26E+08	4,77E+08
W 250 x 101,0 (H)	15,36	5,05E+09	3,68E+09	1,25E+09	6,50E+08
W 250 x 115,0 (H)	15,16	7,37E+09	5,40E+09	1,83E+09	9,48E+08
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3,59E+09	3,05E+09	1,82E+09	7,90E+08
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4,78E+09	4,06E+09	2,38E+09	1,02E+09
W 310 x 117,0 (H)	12,88	6,21E+09	5,27E+09	3,06E+09	1,30E+09
W 310 x 129,0 (H)	12,78	8,30E+09	7,03E+09	4,05E+09	1,72E+09
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3,66E+09	3,01E+09	1,50E+09	5,93E+08
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4,95E+09	4,05E+09	1,99E+09	7,95E+08
W 360 x 110,0 (H)	13,37	6,33E+09	5,18E+09	2,52E+09	1,01E+09
W 360 x 122,0 (H)	13,29	9,36E+09	7,65E+09	3,62E+09	1,49E+09
W 410 x 46,1	19,25	1,74E+09	1,34E+09	4,94E+08	2,28E+08
W 410 x 53,0	16,26	2,14E+09	1,84E+09	1,27E+09	6,00E+08
W 410 x 60,0	16,15	2,32E+09	2,00E+09	1,39E+09	6,59E+08
W 410 x 75,0	15,95	4,64E+09	4,05E+09	2,67E+09	1,19E+09
W 410 x 85,0	15,85	6,57E+09	5,75E+09	3,74E+09	1,62E+09
W 460 x 52,0	17,60	2,51E+09	2,06E+09	9,71E+08	3,89E+08
W 460 x 68,0	17,34	4,30E+09	3,59E+09	1,66E+09	6,58E+08
W 460 x 82,0	14,82	6,23E+09	4,85E+09	3,87E+09	1,87E+09
W 460 x 97,0	14,65	9,51E+09	7,40E+09	5,92E+09	2,82E+09
W 460 x 106,0	14,57	1,28E+10	9,98E+09	7,95E+09	3,74E+09
W 530 x 66,0	15,93	5,31E+09	4,13E+09	2,58E+09	1,08E+09
W 530 x 74,0	15,83	6,87E+09	5,34E+09	3,34E+09	1,38E+09
W 530 x 85,0	15,79	8,23E+09	6,40E+09	3,98E+09	1,62E+09
W 530 x 92,0	13,32	7,99E+09	6,21E+09	5,61E+09	3,46E+09
W 530 x 101,0	13,25	9,76E+09	7,59E+09	6,85E+09	4,20E+09
W 530 x 109,0	13,19	1,17E+10	9,13E+09	8,25E+09	5,03E+09
W 610 x 125,0	12,00	1,45E+10	1,13E+10	1,08E+10	8,13E+09
W 610 x 140,0	11,94	1,93E+10	1,72E+10	1,44E+10	1,08E+10
W 610 x 155,0	9,45	1,76E+10	1,56E+10	1,37E+10	1,31E+10
W 610 x 174,0	9,40	2,36E+10	2,10E+10	1,83E+10	1,75E+10
W 610 x 195,0	9,33	3,14E+10	2,79E+10	2,44E+10	2,33E+10
W 610 x 217,0	9,28	3,86E+10	3,43E+10	3,00E+10	2,86E+10

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

C.1.3 CONCRETO ENTRE AS MESAS E A ALMA DO PERFIL DE AÇO

O parâmetro de redução da espessura da camada externa horizontal de concreto $b_{c,fi,h}$, calculados conforme Equação (5.12) está apresentado na Tabela C.10.

Tabela C.10: Espessura da camada externa horizontal de concreto a ser desprezada

Perfil	$(u/A)_p$	$b_{c,fi,h}$ [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	11,8	27,1	47,9	
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	11,8	27,0	47,4	
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	11,4	24,0	38,3	60,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	11,4	24,0	38,2	60,4
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	11,4	23,9	38,0	59,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	11,4	23,9	37,9	59,4
HP 310 x 132 (H)	12,76	11,4	23,9	37,8	59,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	11,8	27,0	47,7	
W 250 x 80,0 (H)	15,66	11,8	27,0	47,5	
W 250 x 89,0 (H)	15,50	11,8	27,0	47,3	
W 250 x 101,0 (H)	15,36	11,7	27,0	47,2	
W 250 x 115,0 (H)	15,16	11,7	26,9	47,0	
W 310 x 97,0 (H)	13,05	11,4	23,9	38,1	
W 310 x 107,0 (H)	12,97	11,4	23,9	38,0	59,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	11,4	23,9	38,0	59,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	11,4	23,9	37,9	59,3
W 360 x 91,0 (H)	13,54	11,5	24,3	39,2	62,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	11,5	24,2	39,1	62,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	11,5	24,2	39,0	62,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	11,5	24,2	39,0	62,2
W 410 x 46,1	19,25	12,1	28,4		
W 410 x 53,0	16,26	11,7	25,9	45,2	
W 410 x 60,0	16,15	11,7	25,9	45,0	
W 410 x 75,0	15,95	11,7	25,8	44,8	
W 410 x 85,0	15,85	11,7	25,8	44,7	
W 460 x 52,0	17,60	11,9	26,5	47,6	
W 460 x 68,0	17,34	11,9	26,4	47,2	
W 460 x 82,0	14,82	11,6	24,5	40,6	
W 460 x 97,0	14,65	11,6	24,5	40,4	67,2
W 460 x 106,0	14,57	11,6	24,5	40,4	67,0
W 530 x 66,0	15,93	11,7	24,6	41,7	
W 530 x 74,0	15,83	11,6	24,6	41,6	
W 530 x 85,0	15,79	11,6	24,6	41,6	
W 530 x 92,0	13,32	11,4	23,0	35,8	56,8
W 530 x 101,0	13,25	11,4	23,0	35,7	56,5
W 530 x 109,0	13,19	11,4	23,0	35,7	56,3
W 610 x 125,0	12,00	11,3	21,9	32,4	48,6
W 610 x 140,0	11,94	11,3	21,9	32,3	48,4
W 610 x 155,0	9,45	11,1	20,5	27,6	36,6
W 610 x 174,0	9,40	11,1	20,5	27,6	36,5
W 610 x 195,0	9,33	11,1	20,5	27,5	36,3
W 610 x 217,0	9,28	11,1	20,5	27,5	36,2

Fonte: Próprio autor

Lembrando que os espaços em branco na tabela representam valores que excederam os limites da seção transversal.

O parâmetro de redução da espessura da camada externa vertical de concreto $b_{c,fi,v}$, calculados conforme Equação (5.13) está apresentado na Tabela C.11.

Tabela C.11: Espessura da camada externa vertical de concreto a ser desprezada

Perfil	(u/A) _p	$b_{c,fi,v}$ [mm]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	9,0	30,1	65,4	
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	7,0	28,4	64,9	
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	8,1	25,8	41,8	77,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	6,9	24,9	42,5	78,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	5,9	24,2	42,7	78,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	5,4	23,7	42,6	78,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	5,1	23,4	42,5	77,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	7,1	28,9	67,3	
W 250 x 80,0 (H)	15,66	6,6	28,4	67,1	
W 250 x 89,0 (H)	15,50	6,0	27,9	66,6	
W 250 x 101,0 (H)	15,36	5,5	27,3	66,3	
W 250 x 115,0 (H)	15,16	5,0	26,8	65,3	
W 310 x 97,0 (H)	13,05	6,0	24,4	43,9	80,8
W 310 x 107,0 (H)	12,97	5,5	24,0	44,0	80,9
W 310 x 117,0 (H)	12,88	5,1	23,6	44,1	80,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4,6	23,3	44,0	80,5
W 360 x 91,0 (H)	13,54	6,0	26,1	55,6	102,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	5,5	25,6	55,6	102,2
W 360 x 110,0 (H)	13,37	5,1	25,3	55,4	101,9
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4,8	25,0	55,3	101,5
W 410 x 46,1	19,25	11,8	58,5		
W 410 x 53,0	16,26	9,6	43,8	109,7	
W 410 x 60,0	16,15	9,1	42,9	109,6	
W 410 x 75,0	15,95	8,5	41,6	108,6	
W 410 x 85,0	15,85	8,2	40,8	108,0	
W 460 x 52,0	17,60	10,7	48,1	133,0	
W 460 x 68,0	17,34	9,7	46,1	132,1	
W 460 x 82,0	14,82	7,8	35,5	95,7	
W 460 x 97,0	14,65	7,4	34,6	94,6	186,4
W 460 x 106,0	14,57	7,3	34,1	94,0	187,0
W 530 x 66,0	15,93	9,5	38,4	112,5	
W 530 x 74,0	15,83	9,0	37,6	112,5	
W 530 x 85,0	15,79	8,6	37,1	113,3	
W 530 x 92,0	13,32	7,0	28,8	79,1	124,6
W 530 x 101,0	13,25	6,8	28,3	78,9	128,0
W 530 x 109,0	13,19	6,6	28,0	78,6	130,1
W 610 x 125,0	12,00	6,0	23,5	66,4	93,7
W 610 x 140,0	11,94	5,8	23,2	66,3	97,2
W 610 x 155,0	9,45	4,5	20,5	26,9	43,7
W 610 x 174,0	9,40	4,0	20,2	27,4	44,5
W 610 x 195,0	9,33	3,6	19,8	27,4	44,6
W 610 x 217,0	9,28	3,2	19,5	27,6	45,0

Fonte: Próprio autor

Lembrando que os espaços em branco na tabela representam valores que excederam os limites da seção transversal.

Apêndice C

A temperatura média da área residual de concreto, calculada conforme Equação (5.11) está apresentada na Tabela C.12, para as seções transversais de interesse.

Tabela C.12: Temperatura média na área residual de concreto

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{c,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	242,4	372,7	482,5	>500
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	237,5	366,2	476,1	>500
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	204,4	310,8	399,2	468,6
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	202,7	308,7	397,2	466,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	200,8	306,2	394,8	464,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	199,2	304,1	392,8	462,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	198,4	303,0	391,7	461,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	240,3	370,0	479,9	>500
W 250 x 80,0 (H)	15,66	238,7	367,8	477,7	>500
W 250 x 89,0 (H)	15,50	236,7	365,2	475,2	>500
W 250 x 101,0 (H)	15,36	234,8	362,9	473,2	>500
W 250 x 115,0 (H)	15,16	232,2	359,5	469,8	>500
W 310 x 97,0 (H)	13,05	202,2	307,9	396,3	465,7
W 310 x 107,0 (H)	12,97	201,1	306,5	395,0	464,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	200,0	305,1	393,8	463,3
W 310 x 129,0 (H)	12,78	198,7	303,4	392,2	461,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	208,8	317,6	407,9	479,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	207,5	316,0	406,3	477,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	206,5	314,7	405,1	476,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	205,6	313,6	404,2	476,1
W 410 x 46,1	19,25	286,1	432,7	>500	>500
W 410 x 53,0	16,26	245,4	370,8	469,7	>500
W 410 x 60,0	16,15	243,9	368,7	467,3	>500
W 410 x 75,0	15,95	241,3	365,4	464,3	>500
W 410 x 85,0	15,85	239,9	363,7	462,8	>500
W 460 x 52,0	17,60	263,1	395,2	495,8	>500
W 460 x 68,0	17,34	259,7	390,7	491,3	>500
W 460 x 82,0	14,82	225,5	339,4	429,2	>500
W 460 x 97,0	14,65	223,3	336,6	426,3	498,1
W 460 x 106,0	14,57	222,3	335,3	425,2	497,0
W 530 x 66,0	15,93	239,8	357,7	446,0	>500
W 530 x 74,0	15,83	238,5	356,0	444,3	>500
W 530 x 85,0	15,79	238,0	355,4	443,9	>500
W 530 x 92,0	13,32	204,7	306,4	385,8	445,8
W 530 x 101,0	13,25	203,7	305,1	384,5	444,3
W 530 x 109,0	13,19	203,0	304,1	383,5	443,4
W 610 x 125,0	12,00	186,6	278,7	351,3	403,1
W 610 x 140,0	11,94	185,8	277,7	350,3	402,2
W 610 x 155,0	9,45	152,3	229,1	294,0	335,9
W 610 x 174,0	9,40	151,7	228,4	293,3	335,3
W 610 x 195,0	9,33	150,8	227,2	292,1	334,0
W 610 x 217,0	9,28	150,2	226,3	291,3	333,3

Fonte: Próprio autor

Os valores da resistência característica à compressão da seção em elevadas temperaturas $f_{ck,\theta}$ estão apresentados na Tabela C.13 e o módulo de elasticidade do concreto $E_{c1,\theta}$, apresentado na Tabela C.14.

Tabela C.13: Resistência característica à compressão do concreto em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$f_{ck,\theta}$ [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	18,15	15,55	12,53	0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	18,25	15,68	12,72	0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	18,91	16,78	15,02	12,94
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	18,95	16,83	15,06	13,00
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	18,98	16,88	15,10	13,07
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	19,01	16,92	15,14	13,13
HP 310 x 132 (H)	12,76	19,02	16,94	15,17	13,17
W 250 x 73,0 (H)	15,78	18,19	15,60	12,60	0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	18,23	15,64	12,67	0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	18,27	15,70	12,75	0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	18,30	15,74	12,80	0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	18,36	15,81	12,91	0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	18,96	16,84	15,07	13,03
W 310 x 107,0 (H)	12,97	18,98	16,87	15,10	13,07
W 310 x 117,0 (H)	12,88	19,00	16,90	15,12	13,10
W 310 x 129,0 (H)	12,78	19,01	16,93	15,16	13,15
W 360 x 91,0 (H)	13,54	18,82	16,65	14,76	12,62
W 360 x 101,0 (H)	13,45	18,85	16,68	14,81	12,66
W 360 x 110,0 (H)	13,37	18,87	16,71	14,85	12,70
W 360 x 122,0 (H)	13,29	18,89	16,73	14,87	12,72
W 410 x 46,1	19,25	17,28	14,02	0	0
W 410 x 53,0	16,26	18,09	15,58	12,91	0
W 410 x 60,0	16,15	18,12	15,63	12,98	0
W 410 x 75,0	15,95	18,17	15,69	13,07	0
W 410 x 85,0	15,85	18,20	15,73	13,12	0
W 460 x 52,0	17,60	17,74	15,10	12,13	0
W 460 x 68,0	17,34	17,81	15,19	12,26	0
W 460 x 82,0	14,82	18,49	16,21	14,12	0
W 460 x 97,0	14,65	18,53	16,27	14,21	12,06
W 460 x 106,0	14,57	18,55	16,29	14,25	12,09
W 530 x 66,0	15,93	18,20	15,85	13,62	0
W 530 x 74,0	15,83	18,23	15,88	13,67	0
W 530 x 85,0	15,79	18,24	15,89	13,68	0
W 530 x 92,0	13,32	18,91	16,87	15,28	13,63
W 530 x 101,0	13,25	18,93	16,90	15,31	13,67
W 530 x 109,0	13,19	18,94	16,92	15,33	13,70
W 610 x 125,0	12,00	19,13	17,43	15,97	14,91
W 610 x 140,0	11,94	19,14	17,45	15,99	14,93
W 610 x 155,0	9,45	19,48	18,42	17,12	16,28
W 610 x 174,0	9,40	19,48	18,43	17,13	16,29
W 610 x 195,0	9,33	19,49	18,46	17,16	16,32
W 610 x 217,0	9,28	19,50	18,47	17,17	16,33

Fonte: Próprio autor

O módulo de elasticidade do concreto $E_{c1,\theta}$, apresentado na Tabela C.14.

Tabela C.14: Módulo de elasticidade do concreto em situação de incêndio

Perfil	$(u/A)_p$	$E_{c1,\theta}$ [N/mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	3534	2192	1369	0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3605	2241	1410	0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	4141	2723	2005	1459
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	4172	2745	2019	1472
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4207	2770	2035	1488
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4232	2791	2049	1502
HP 310 x 132 (H)	12,76	4241	2802	2056	1509
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3564	2213	1385	0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3588	2229	1399	0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3617	2249	1416	0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3644	2267	1428	0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3684	2294	1451	0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4182	2753	2025	1478
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4202	2767	2033	1487
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4222	2780	2042	1494
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4237	2798	2053	1505
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4065	2658	1928	1388
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4086	2673	1942	1398
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4104	2686	1953	1406
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4121	2697	1961	1410
W 410 x 46,1	19,25	2983	1719	0	0
W 410 x 53,0	16,26	3492	2207	1452	0
W 410 x 60,0	16,15	3513	2223	1467	0
W 410 x 75,0	15,95	3549	2248	1488	0
W 410 x 85,0	15,85	3569	2261	1498	0
W 460 x 52,0	17,60	3257	2032	1288	0
W 460 x 68,0	17,34	3300	2063	1315	0
W 460 x 82,0	14,82	3788	2459	1747	0
W 460 x 97,0	14,65	3822	2484	1770	1274
W 460 x 106,0	14,57	3839	2496	1780	1281
W 530 x 66,0	15,93	3571	2308	1618	0
W 530 x 74,0	15,83	3590	2322	1630	0
W 530 x 85,0	15,79	3598	2326	1633	0
W 530 x 92,0	13,32	4137	2768	2097	1619
W 530 x 101,0	13,25	4154	2781	2107	1630
W 530 x 109,0	13,19	4168	2791	2113	1637
W 610 x 125,0	12,00	4382	3067	2360	1971
W 610 x 140,0	11,94	4392	3080	2368	1980
W 610 x 155,0	9,45	4841	3731	2897	2490
W 610 x 174,0	9,40	4850	3742	2904	2496
W 610 x 195,0	9,33	4863	3761	2917	2507
W 610 x 217,0	9,28	4872	3774	2926	2513

Fonte: Próprio autor

Os valores dos resultados para a resistência plástica à compressão axial e rigidez efetiva da área residual de concreto dos perfis, observadas as Equações (5.16) e (5.17), podem ser apreciados através das Tabelas C.15 e C.16.

Tabela C.15: Força axial de plastificação de cálculo do concreto

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,c} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	687,42	410,12	147,20	0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	708,14	424,42	153,22	0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1114,36	781,26	519,35	233,61
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1125,83	788,58	517,59	231,15
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1116,14	777,95	510,76	232,55
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1123,89	784,30	513,80	236,83
HP 310 x 132 (H)	12,76	1127,91	787,96	516,22	239,91
W 250 x 73,0 (H)	15,78	690,84	408,37	142,17	0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	697,32	413,03	144,69	0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	703,89	417,97	148,14	0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	706,80	419,78	148,99	0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	714,02	425,59	154,40	0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1116,79	777,20	506,12	222,96
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1121,81	780,65	506,27	223,58
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1125,37	783,03	506,06	224,23
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1130,01	787,25	508,10	227,47
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1046,46	711,08	427,29	146,29
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1052,47	715,55	429,60	148,34
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1056,15	718,34	431,24	150,17
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1054,69	716,87	429,59	150,21
W 410 x 46,1	19,25	552,23	243,48	0	0
W 410 x 53,0	16,26	785,82	444,95	144,47	0
W 410 x 60,0	16,15	794,46	451,88	147,87	0
W 410 x 75,0	15,95	798,80	456,02	151,05	0
W 410 x 85,0	15,85	779,83	445,06	152,16	0
W 460 x 52,0	17,60	713,26	381,23	85,01	0
W 460 x 68,0	17,34	722,89	388,61	88,93	0
W 460 x 82,0	14,82	978,90	616,26	289,70	0
W 460 x 97,0	14,65	986,72	624,86	296,65	26,92
W 460 x 106,0	14,57	987,01	626,16	298,28	26,55
W 530 x 66,0	15,93	948,82	581,04	238,29	0
W 530 x 74,0	15,83	953,11	584,19	240,27	0
W 530 x 85,0	15,79	951,31	582,03	237,23	0
W 530 x 92,0	13,32	1338,18	942,33	577,31	252,18
W 530 x 101,0	13,25	1344,58	948,79	581,83	249,07
W 530 x 109,0	13,19	1346,79	951,46	584,04	246,58
W 610 x 125,0	12,00	1708,20	1293,50	919,98	592,73
W 610 x 140,0	11,94	1707,93	1294,82	920,17	583,68
W 610 x 155,0	9,45	2642,67	2201,08	1879,58	1574,25
W 610 x 174,0	9,40	2644,73	2202,60	1875,35	1570,37
W 610 x 195,0	9,33	2657,96	2215,46	1884,44	1580,04
W 610 x 217,0	9,28	2660,67	2218,17	1883,50	1579,76

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

A rigidez efetiva do concreto em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela C.16.

Tabela C.16: Rigidez efetiva da alma do perfil de aço em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef,c} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	7,27E+11	2,34E+11	4,28E+10	0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	8,00E+11	2,61E+11	4,92E+10	0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,94E+12	8,28E+11	3,52E+11	9,23E+10
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2,02E+12	8,61E+11	3,63E+11	9,56E+10
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2,04E+12	8,58E+11	3,64E+11	1,01E+11
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2,10E+12	8,91E+11	3,78E+11	1,08E+11
HP 310 x 132 (H)	12,76	2,14E+12	9,08E+11	3,86E+11	1,11E+11
W 250 x 73,0 (H)	15,78	7,14E+11	2,24E+11	4,03E+10	0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	7,33E+11	2,31E+11	4,21E+10	0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	7,55E+11	2,39E+11	4,44E+10	0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	7,73E+11	2,45E+11	4,59E+10	0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	8,06E+11	2,58E+11	4,98E+10	0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,92E+12	8,03E+11	3,37E+11	8,83E+10
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,96E+12	8,20E+11	3,43E+11	9,08E+10
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,99E+12	8,35E+11	3,48E+11	9,32E+10
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2,03E+12	8,54E+11	3,56E+11	9,72E+10
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,20E+12	4,67E+11	1,72E+11	2,76E+10
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,23E+12	4,79E+11	1,77E+11	2,91E+10
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,25E+12	4,90E+11	1,81E+11	3,04E+10
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,27E+12	4,99E+11	1,85E+11	3,15E+10
W 410 x 46,1	19,25	1,35E+11	2,19E+10	0	0
W 410 x 53,0	16,26	3,68E+11	1,01E+11	1,29E+10	0
W 410 x 60,0	16,15	3,79E+11	1,05E+11	1,38E+10	0
W 410 x 75,0	15,95	3,99E+11	1,12E+11	1,53E+10	0
W 410 x 85,0	15,85	4,01E+11	1,12E+11	1,60E+10	0
W 460 x 52,0	17,60	2,27E+11	5,33E+10	3,25E+09	0
W 460 x 68,0	17,34	2,42E+11	5,80E+10	3,86E+09	0
W 460 x 82,0	14,82	5,86E+11	1,94E+11	4,59E+10	0
W 460 x 97,0	14,65	6,14E+11	2,05E+11	5,01E+10	1,16E+09
W 460 x 106,0	14,57	6,28E+11	2,11E+11	5,21E+10	1,23E+09
W 530 x 66,0	15,93	3,94E+11	1,20E+11	2,05E+10	0
W 530 x 74,0	15,83	4,05E+11	1,24E+11	2,16E+10	0
W 530 x 85,0	15,79	4,07E+11	1,24E+11	2,15E+10	0
W 530 x 92,0	13,32	1,04E+12	4,19E+11	1,56E+11	2,95E+10
W 530 x 101,0	13,25	1,06E+12	4,30E+11	1,62E+11	3,04E+10
W 530 x 109,0	13,19	1,08E+12	4,39E+11	1,66E+11	3,13E+10
W 610 x 125,0	12,00	1,70E+12	7,90E+11	3,82E+11	1,45E+11
W 610 x 140,0	11,94	1,73E+12	8,07E+11	3,90E+11	1,47E+11
W 610 x 155,0	9,45	5,94E+12	3,52E+12	2,24E+12	1,50E+12
W 610 x 174,0	9,40	6,02E+12	3,57E+12	2,27E+12	1,52E+12
W 610 x 195,0	9,33	6,17E+12	3,67E+12	2,34E+12	1,57E+12
W 610 x 217,0	9,28	6,25E+12	3,73E+12	2,37E+12	1,60E+12

Fonte: Próprio autor

C.1.4 ARMADURA LONGITUDINAL

A Tabela C.17 apresenta a temperatura média da armadura longitudinal, segundo Equação (5.18).

Tabela C.17: Temperatura média do aço da armadura longitudinal em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	$\theta_{s,t}$ [°C]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	209,4	439,0	598,7	716,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	205,6	431,1	588,9	705,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	204,6	412,9	560,8	679,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	202,6	409,2	556,4	674,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	197,5	401,1	547,3	664,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	195,7	397,7	543,2	660,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	194,8	396,1	541,2	658,0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	204,4	431,0	589,6	706,2
W 250 x 80,0 (H)	15,66	203,0	428,2	586,1	702,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	201,3	424,8	581,9	698,2
W 250 x 101,0 (H)	15,36	199,0	420,5	576,9	692,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	196,4	415,6	570,9	686,6
W 310 x 97,0 (H)	13,05	197,7	402,2	548,8	665,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	196,2	399,5	545,6	662,5
W 310 x 117,0 (H)	12,88	194,6	396,6	542,3	659,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	192,7	393,4	538,5	654,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	197,3	405,2	553,8	670,6
W 360 x 101,0 (H)	13,45	195,5	402,0	550,1	666,6
W 360 x 110,0 (H)	13,37	194,0	399,3	547,0	663,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	192,3	396,4	543,6	659,6
W 410 x 46,1	19,25	280,3	526,6	674,7	776,9
W 410 x 53,0	16,26	252,3	489,5	639,1	736,4
W 410 x 60,0	16,15	249,4	484,7	634,0	731,7
W 410 x 75,0	15,95	244,4	476,6	625,2	723,6
W 410 x 85,0	15,85	241,2	471,2	619,4	718,2
W 460 x 52,0	17,60	264,3	505,1	653,9	753,6
W 460 x 68,0	17,34	257,3	493,7	641,6	742,2
W 460 x 82,0	14,82	231,3	457,9	606,7	703,9
W 460 x 97,0	14,65	226,8	450,5	598,7	696,5
W 460 x 106,0	14,57	224,5	446,6	594,5	692,6
W 530 x 66,0	15,93	245,7	479,0	628,0	725,8
W 530 x 74,0	15,83	242,6	473,9	622,5	720,8
W 530 x 85,0	15,79	239,4	468,1	616,1	715,2
W 530 x 92,0	13,32	218,5	441,4	591,2	685,6
W 530 x 101,0	13,25	216,0	437,3	586,8	681,5
W 530 x 109,0	13,19	214,0	434,0	583,2	678,3
W 610 x 125,0	12,00	198,5	411,3	560,1	654,6
W 610 x 140,0	11,94	195,4	405,8	554,1	649,2
W 610 x 155,0	9,45	176,5	383,0	533,6	623,3
W 610 x 174,0	9,40	173,5	377,8	527,8	618,2
W 610 x 195,0	9,33	170,1	371,8	521,3	612,4
W 610 x 217,0	9,28	166,4	365,4	514,3	606,2

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Os valores dos coeficientes de redução $k_{ys,\theta}$ e $k_{ES,\theta}$ estão apresentados na Tabela C.18 e na Tabela C.19, respectivamente.

Tabela C.18: Coeficientes de redução da resistência ao escoamento da armadura longitudinal

Perfil	$(u/A)_p$	$k_{ys,0}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,00	0,83	0,40	0,12
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,00	0,86	0,43	0,12
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,00	0,91	0,51	0,18
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1,00	0,92	0,52	0,19
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,00	0,94	0,54	0,22
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,00	0,94	0,55	0,23
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,00	0,94	0,56	0,24
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,00	0,86	0,43	0,12
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,00	0,86	0,44	0,12
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,00	0,87	0,45	0,13
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1,00	0,88	0,46	0,14
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,00	0,90	0,48	0,16
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,00	0,93	0,54	0,22
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,00	0,94	0,55	0,22
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,00	0,94	0,56	0,23
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,00	0,94	0,57	0,25
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,00	0,93	0,52	0,20
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,00	0,93	0,53	0,21
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,00	0,94	0,54	0,22
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,00	0,94	0,55	0,23
W 410 x 46,1	19,25	1,00	0,60	0,19	0,11
W 410 x 53,0	16,26	1,00	0,70	0,29	0,12
W 410 x 60,0	16,15	1,00	0,71	0,30	0,12
W 410 x 75,0	15,95	1,00	0,73	0,33	0,12
W 410 x 85,0	15,85	1,00	0,75	0,35	0,12
W 460 x 52,0	17,60	1,00	0,66	0,25	0,11
W 460 x 68,0	17,34	1,00	0,69	0,28	0,12
W 460 x 82,0	14,82	1,00	0,78	0,38	0,12
W 460 x 97,0	14,65	1,00	0,80	0,40	0,13
W 460 x 106,0	14,57	1,00	0,81	0,41	0,14
W 530 x 66,0	15,93	1,00	0,73	0,32	0,12
W 530 x 74,0	15,83	1,00	0,74	0,34	0,12
W 530 x 85,0	15,79	1,00	0,76	0,35	0,12
W 530 x 92,0	13,32	1,00	0,83	0,42	0,16
W 530 x 101,0	13,25	1,00	0,84	0,44	0,17
W 530 x 109,0	13,19	1,00	0,85	0,45	0,18
W 610 x 125,0	12,00	1,00	0,91	0,51	0,25
W 610 x 140,0	11,94	1,00	0,92	0,52	0,26
W 610 x 155,0	9,45	1,00	0,95	0,58	0,33
W 610 x 174,0	9,40	1,00	0,95	0,59	0,35
W 610 x 195,0	9,33	1,00	0,96	0,61	0,37
W 610 x 217,0	9,28	1,00	0,96	0,63	0,38

Fonte: Próprio autor

A Tabela C.19 apresenta os coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das armaduras longitudinais em situação de incêndio.

Tabela C.19: Coeficientes de redução para o módulo de elasticidade das armaduras longitudinais

Perfil	$(u/A)_p$	$k_{Es,0}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,86	0,50	0,24	0,08
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,86	0,51	0,26	0,08
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,86	0,54	0,30	0,11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,87	0,55	0,31	0,12
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,87	0,56	0,32	0,14
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,88	0,56	0,33	0,14
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,88	0,57	0,33	0,15
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,86	0,51	0,26	0,08
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,87	0,51	0,26	0,08
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,87	0,52	0,27	0,08
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,87	0,53	0,28	0,09
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,87	0,54	0,29	0,10
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,87	0,56	0,32	0,13
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,87	0,56	0,33	0,14
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,88	0,57	0,33	0,15
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,88	0,57	0,34	0,15
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,87	0,55	0,31	0,13
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,88	0,56	0,32	0,13
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,88	0,56	0,32	0,14
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,88	0,57	0,33	0,14
W 410 x 46,1	19,25	0,75	0,36	0,12	0,06
W 410 x 53,0	16,26	0,79	0,42	0,18	0,07
W 410 x 60,0	16,15	0,80	0,42	0,19	0,07
W 410 x 75,0	15,95	0,80	0,44	0,20	0,08
W 410 x 85,0	15,85	0,81	0,45	0,21	0,08
W 460 x 52,0	17,60	0,77	0,39	0,15	0,07
W 460 x 68,0	17,34	0,78	0,41	0,17	0,07
W 460 x 82,0	14,82	0,82	0,47	0,23	0,08
W 460 x 97,0	14,65	0,83	0,48	0,24	0,09
W 460 x 106,0	14,57	0,83	0,49	0,25	0,09
W 530 x 66,0	15,93	0,80	0,43	0,20	0,07
W 530 x 74,0	15,83	0,81	0,44	0,20	0,08
W 530 x 85,0	15,79	0,81	0,45	0,21	0,08
W 530 x 92,0	13,32	0,84	0,49	0,25	0,10
W 530 x 101,0	13,25	0,85	0,50	0,26	0,11
W 530 x 109,0	13,19	0,85	0,51	0,27	0,11
W 610 x 125,0	12,00	0,87	0,54	0,30	0,15
W 610 x 140,0	11,94	0,88	0,55	0,31	0,16
W 610 x 155,0	9,45	0,90	0,59	0,35	0,20
W 610 x 174,0	9,40	0,90	0,60	0,36	0,21
W 610 x 195,0	9,33	0,91	0,61	0,37	0,22
W 610 x 217,0	9,28	0,91	0,62	0,38	0,23

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

As Tabelas C.20 e C.21 apresentam os valores da força axial de plastificação de cálculo e os valores da rigidez efetiva das barras da armadura longitudinal em situação de incêndio, respectivamente.

Tabela C.20: Força axial de plastificação de cálculo das barras da armadura

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd,s} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	633,7	528,9	255,8	75,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	633,7	542,4	272,5	75,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	985,7	892,3	498,6	176,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	985,7	902,1	510,3	189,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1613,1	1511,5	874,8	354,2
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1613,1	1518,6	892,6	373,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	1613,1	1520,2	901,2	383,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	985,7	844,0	422,0	117,7
W 250 x 80,0 (H)	15,66	985,7	851,5	431,2	118,0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	985,7	860,6	442,4	123,2
W 250 x 101,0 (H)	15,36	985,7	871,8	455,8	137,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	985,7	885,1	471,8	155,4
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1613,1	1506,9	868,3	347,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1613,1	1516,9	882,1	362,8
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1613,1	1519,6	896,5	378,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1613,1	1522,7	913,2	397,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1613,1	1493,9	846,5	326,5
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1613,1	1507,7	862,7	344,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1613,1	1517,0	876,2	359,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1613,1	1519,8	891,1	375,9
W 410 x 46,1	19,25	633,7	379,0	121,0	71,2
W 410 x 53,0	16,26	985,7	688,4	286,3	114,7
W 410 x 60,0	16,15	985,7	701,0	300,4	115,2
W 410 x 75,0	15,95	985,7	722,8	324,6	116,0
W 410 x 85,0	15,85	1613,1	1206,3	557,5	190,6
W 460 x 52,0	17,60	985,7	646,9	245,6	113,0
W 460 x 68,0	17,34	985,7	677,2	279,5	114,1
W 460 x 82,0	14,82	1613,1	1264,0	615,1	193,0
W 460 x 97,0	14,65	1613,1	1296,3	650,9	209,5
W 460 x 106,0	14,57	1613,1	1313,3	669,4	227,0
W 530 x 66,0	15,93	1613,1	1172,4	518,8	189,4
W 530 x 74,0	15,83	1613,1	1194,5	543,6	190,2
W 530 x 85,0	15,79	1613,1	1219,5	572,3	191,1
W 530 x 92,0	13,32	1613,1	1335,8	683,4	258,6
W 530 x 101,0	13,25	1613,1	1353,8	703,0	277,0
W 530 x 109,0	13,19	1613,1	1368,1	718,4	291,6
W 610 x 125,0	12,00	2520,5	2292,3	1279,5	623,1
W 610 x 140,0	11,94	2520,5	2329,5	1320,3	660,8
W 610 x 155,0	9,45	2520,5	2395,0	1459,9	843,9
W 610 x 174,0	9,40	2520,5	2402,9	1499,2	879,8
W 610 x 195,0	9,33	2520,5	2411,9	1543,7	920,9
W 610 x 217,0	9,28	2520,5	2421,5	1591,7	964,6

Fonte: Próprio autor

A rigidez efetiva das barras da armadura longitudinal em situação de incêndio, para os perfis estudados, pode ser verificada conforme a Tabela C.21.

Tabela C.21: Rigidez efetiva das barras da armadura em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,efs} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,33E+12	7,71E+11	0	0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,40E+12	8,31E+11	0	0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3,62E+12	2,26E+12	1,05E+12	0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3,71E+12	2,33E+12	1,06E+12	0
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	6,25E+12	4,00E+12	1,52E+12	0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	6,39E+12	4,11E+12	1,60E+12	0
HP 310 x 132 (H)	12,76	6,45E+12	4,17E+12	1,65E+12	0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2,03E+12	1,20E+12	0	0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2,06E+12	1,23E+12	0	0
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2,10E+12	1,26E+12	0	0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2,13E+12	1,29E+12	0	0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2,19E+12	1,34E+12	0	0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	5,96E+12	3,80E+12	1,35E+12	0
W 310 x 107,0 (H)	12,97	6,03E+12	3,86E+12	1,38E+12	0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	6,10E+12	3,93E+12	1,42E+12	0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	6,18E+12	4,01E+12	1,47E+12	0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3,38E+12	2,13E+12	2,77E+11	0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3,43E+12	2,18E+12	2,89E+11	0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3,48E+12	2,23E+12	3,03E+11	0
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3,54E+12	2,27E+12	3,18E+11	0
W 410 x 46,1	19,25	8,10E+10	4,94E+09	0	0
W 410 x 53,0	16,26	4,75E+11	2,10E+11	0	0
W 410 x 60,0	16,15	4,90E+11	2,29E+11	0	0
W 410 x 75,0	15,95	5,20E+11	2,65E+11	0	0
W 410 x 85,0	15,85	8,90E+11	4,27E+11	0	0
W 460 x 52,0	17,60	2,19E+11	7,24E+10	0	0
W 460 x 68,0	17,34	2,38E+11	9,28E+10	0	0
W 460 x 82,0	14,82	1,14E+12	6,45E+11	0	0
W 460 x 97,0	14,65	1,19E+12	6,89E+11	0	0
W 460 x 106,0	14,57	1,22E+12	7,13E+11	0	0
W 530 x 66,0	15,93	5,81E+11	2,99E+11	0	0
W 530 x 74,0	15,83	6,01E+11	3,23E+11	0	0
W 530 x 85,0	15,79	6,05E+11	3,36E+11	0	0
W 530 x 92,0	13,32	1,65E+12	9,68E+11	0	0
W 530 x 101,0	13,25	1,69E+12	9,98E+11	0	0
W 530 x 109,0	13,19	1,72E+12	1,03E+12	0	0
W 610 x 125,0	12,00	3,75E+12	2,33E+12	7,48E+10	0
W 610 x 140,0	11,94	3,82E+12	2,40E+12	8,18E+10	0
W 610 x 155,0	9,45	1,15E+13	7,49E+12	4,41E+12	1,44E+12
W 610 x 174,0	9,40	1,16E+13	7,66E+12	4,57E+12	1,47E+12
W 610 x 195,0	9,33	1,19E+13	7,92E+12	4,79E+12	1,57E+12
W 610 x 217,0	9,28	1,21E+13	8,13E+12	4,98E+12	1,64E+12

Fonte: Próprio autor

C.1.5 FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DE CÁLCULO

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos pela proposta de aprimoramento do método simplificado de cálculo, segundo a ABNT NBR 14323:2013 e considerando a soma ponderada da resistência das quatro componentes.

C.1.5.1 Força axial de plastificação de cálculo total em situação de incêndio

A solução da Equação (4.2) leva a obtenção da força axial de plastificação de cálculo em situação de incêndio. Os valores podem ser observados na Tabela C.22.

Tabela C.22: Força axial de plastificação de cálculo total dos perfis em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	N _{f,pl,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2570,1	1641,1	720,0	247,4
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3186,1	1937,5	846,6	304,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3722,8	2805,6	1680,6	763,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	4126,3	3041,4	1801,5	828,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	5217,7	3893,0	2291,9	1063,6
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	5645,8	4130,5	2433,1	1150,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	5853,7	4241,5	2502,6	1194,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3033,0	1943,4	907,4	312,3
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3225,3	2024,3	947,6	329,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3497,6	2141,4	1002,9	357,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3833,2	2267,2	1064,3	400,2
W 250 x 115,0 (H)	15,16	4264,3	2438,2	1150,2	454,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4664,8	3428,4	2068,5	963,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4948,1	3563,9	2145,4	1013,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	5257,3	3695,8	2225,5	1066,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	5634,5	3859,0	2326,3	1132,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4617,3	3369,0	1920,9	816,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4925,8	3521,1	2003,9	871,8
W 360 x 110,0 (H)	13,37	5204,4	3653,3	2077,3	920,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	5590,5	3843,5	2177,5	983,8
W 410 x 46,1	19,25	2349,9	1436,2	499,1	250,3
W 410 x 53,0	16,26	3066,2	2171,0	1125,5	510,9
W 410 x 60,0	16,15	3197,7	2244,2	1178,8	534,3
W 410 x 75,0	15,95	3656,2	2591,6	1372,1	607,1
W 410 x 85,0	15,85	4573,8	3254,6	1711,2	729,9
W 460 x 52,0	17,60	3079,6	2117,4	908,8	389,9
W 460 x 68,0	17,34	3521,5	2429,0	1073,4	449,6
W 460 x 82,0	14,82	4697,4	3495,6	2079,9	878,2
W 460 x 97,0	14,65	5157,3	3801,5	2307,0	1021,0
W 460 x 106,0	14,57	5471,7	4021,3	2464,0	1109,2
W 530 x 66,0	15,93	4415,0	3379,0	1750,6	696,8
W 530 x 74,0	15,83	4664,8	3564,0	1873,9	743,6
W 530 x 85,0	15,79	4929,6	3723,1	1975,0	780,4
W 530 x 92,0	13,32	5406,4	4208,8	2867,5	1572,0
W 530 x 101,0	13,25	5679,4	4383,5	3010,5	1661,9
W 530 x 109,0	13,19	5922,3	4541,3	3139,9	1743,2

Tabela C.22 (Continuação): Força axial de plastificação de cálculo total dos perfis em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	7710,3	6187,8	4544,4	2925,8
W 610 x 140,0	11,94	8223,7	6512,3	4827,1	3121,7
W 610 x 155,0	9,45	9236,9	7454,0	6055,4	4916,4
W 610 x 174,0	9,40	9881,5	7789,1	6378,0	5199,9
W 610 x 195,0	9,33	10645,0	8172,4	6745,8	5533,0
W 610 x 217,0	9,28	11455,8	8498,4	7048,8	5805,7

Fonte: Próprio autor

C.1.5.2 Força axial de flambagem elástica em situação de incêndio

A solução das Equações (4.6) e (4.7), onde a soma ponderada da contribuição de cada componente para a rigidez efetiva do pilar misto à flexão é apresentado pela Tabela C.23.

Tabela C.23: Rigidez efetiva do pilar misto à flexão em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2,69E+12	1,25E+12	2,77E+11	2,34E+11
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3,47E+12	1,51E+12	3,89E+11	3,36E+11
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	6,67E+12	3,37E+12	1,56E+12	4,93E+11
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	7,41E+12	3,62E+12	1,67E+12	5,90E+11
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,08E+13	5,31E+12	2,16E+12	7,07E+11
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,17E+13	5,62E+12	2,34E+12	8,08E+11
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,22E+13	5,77E+12	2,43E+12	8,59E+11
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3,89E+12	1,76E+12	3,52E+11	3,07E+11
W 250 x 80,0 (H)	15,66	4,20E+12	1,86E+12	3,92E+11	3,44E+11
W 250 x 89,0 (H)	15,50	4,61E+12	1,97E+12	4,41E+11	3,88E+11
W 250 x 101,0 (H)	15,36	5,20E+12	2,12E+12	5,06E+11	4,50E+11
W 250 x 115,0 (H)	15,16	5,99E+12	2,31E+12	5,89E+11	5,24E+11
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,02E+13	5,03E+12	1,96E+12	6,61E+11
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,09E+13	5,23E+12	2,07E+12	7,35E+11
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,17E+13	5,44E+12	2,19E+12	8,15E+11
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,26E+13	5,69E+12	2,33E+12	9,08E+11
W 360 x 91,0 (H)	13,54	6,09E+12	2,89E+12	7,38E+11	3,85E+11
W 360 x 101,0 (H)	13,45	6,58E+12	3,04E+12	8,04E+11	4,37E+11
W 360 x 110,0 (H)	13,37	7,05E+12	3,17E+12	8,66E+11	4,82E+11
W 360 x 122,0 (H)	13,29	7,61E+12	3,32E+12	9,35E+11	5,34E+11
W 410 x 46,1	19,25	3,22E+11	8,62E+10	4,13E+10	3,94E+10
W 410 x 53,0	16,26	1,04E+12	3,97E+11	9,31E+10	7,91E+10
W 410 x 60,0	16,15	1,16E+12	4,45E+11	1,11E+11	9,52E+10
W 410 x 75,0	15,95	1,41E+12	5,37E+11	1,44E+11	1,25E+11
W 410 x 85,0	15,85	1,95E+12	7,21E+11	1,67E+11	1,46E+11
W 460 x 52,0	17,60	5,66E+11	1,88E+11	5,43E+10	4,92E+10
W 460 x 68,0	17,34	7,59E+11	2,55E+11	8,16E+10	7,44E+10
W 460 x 82,0	14,82	2,30E+12	9,85E+11	1,96E+11	1,51E+11
W 460 x 97,0	14,65	2,68E+12	1,10E+12	2,39E+11	1,88E+11
W 460 x 106,0	14,57	2,91E+12	1,17E+12	2,63E+11	2,09E+11
W 530 x 66,0	15,93	1,14E+12	4,76E+11	8,83E+10	6,79E+10
W 530 x 74,0	15,83	1,26E+12	5,28E+11	1,06E+11	8,33E+10
W 530 x 85,0	15,79	1,41E+12	5,74E+11	1,26E+11	1,02E+11
W 530 x 92,0	13,32	3,38E+12	1,53E+12	3,30E+11	2,19E+11
W 530 x 101,0	13,25	3,65E+12	1,61E+12	3,63E+11	2,47E+11
W 530 x 109,0	13,19	3,89E+12	1,69E+12	3,92E+11	2,71E+11

Apêndice C

Tabela C.23 (Continuação): Rigidez efetiva do pilar misto à flexão em situação de incêndio

Perfil	(u/A) _p	(EI) _{fi,ef} [N.mm ²]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	6,94E+12	3,28E+12	7,14E+11	4,49E+11
W 610 x 140,0	11,94	7,55E+12	3,46E+12	7,84E+11	5,04E+11
W 610 x 155,0	9,45	2,13E+13	1,11E+13	6,28E+12	3,56E+12
W 610 x 174,0	9,40	2,29E+13	1,15E+13	6,58E+12	3,75E+12
W 610 x 195,0	9,33	2,50E+13	1,22E+13	6,99E+12	4,07E+12
W 610 x 217,0	9,28	2,76E+13	1,28E+13	7,37E+12	4,34E+12

Fonte: Próprio autor

Após o cálculo da rigidez efetiva, é possível então calcular a força de flambagem elástica do pilar misto em situação de incêndio, conforme Equação (4.6).

As Tabelas C.24 até a Tabela C.26 apresentam a força de flambagem elástica para a coluna de 3 metros, com respeito as três condições de vinculação dos pilares e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.24: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	11802,5	6021,7	2950,6	5502,1
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	15225,7	7768,2	3806,4	6614,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	29278,9	14938,2	7319,7	14773,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	32511,4	16587,4	8127,8	15878,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	47279,4	24122,1	11819,8	23300,7
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	51453,2	26251,7	12863,3	24640,4
HP 310 x 132 (H)	12,76	53618,3	27356,3	13404,6	25314,0
W 250 x 73,0 (H)	15,78	17057,0	8702,5	4264,2	7725,6
W 250 x 80,0 (H)	15,66	18431,7	9403,9	4607,9	8137,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	20223,4	10318,0	5055,8	8637,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	22799,2	11632,2	5699,8	9282,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	26277,9	13407,1	6569,5	10150,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	44771,8	22842,8	11192,9	22043,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	47732,1	24353,1	11933,0	22930,0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	51128,8	26086,1	12782,2	23882,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	55235,6	28181,4	13808,9	24973,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	26697,1	13621,0	6674,3	12696,6
W 360 x 101,0 (H)	13,45	28866,2	14727,7	7216,6	13325,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	30919,6	15775,3	7729,9	13899,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	33375,9	17028,5	8344,0	14542,1
W 410 x 46,1	19,25	1414,1	721,5	353,5	378,0
W 410 x 53,0	16,26	4545,1	2318,9	1136,3	1739,6
W 410 x 60,0	16,15	5076,6	2590,1	1269,2	1952,5
W 410 x 75,0	15,95	6192,3	3159,3	1548,1	2353,7
W 410 x 85,0	15,85	8574,5	4374,8	2143,6	3160,8
W 460 x 52,0	17,60	2481,2	1265,9	620,3	823,3
W 460 x 68,0	17,34	3327,9	1697,9	832,0	1118,2
W 460 x 82,0	14,82	10101,3	5153,7	2525,3	4319,7
W 460 x 97,0	14,65	11758,9	5999,5	2939,7	4832,4
W 460 x 106,0	14,57	12746,5	6503,3	3186,6	5118,6
W 530 x 66,0	15,93	4981,7	2541,7	1245,4	2087,3
W 530 x 74,0	15,83	5538,7	2825,9	1384,7	2314,0
W 530 x 85,0	15,79	6194,4	3160,4	1548,6	2518,7
W 530 x 92,0	13,32	14828,9	7565,8	3707,2	6692,8
W 530 x 101,0	13,25	16020,0	8173,5	4005,0	7069,7
W 530 x 109,0	13,19	17083,3	8716,0	4270,8	7398,5

Tabela C.24: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	30444,2	15532,7	7611,0	14400,9
W 610 x 140,0	11,94	33097,1	16886,3	8274,3	15197,7
W 610 x 155,0	9,45	93357,0	47631,1	23339,2	48540,0
W 610 x 174,0	9,40	100388,5	51218,6	25097,1	50593,9
W 610 x 195,0	9,33	109841,0	56041,3	27460,2	53417,3
W 610 x 217,0	9,28	120896,0	61681,7	30224,0	55993,5

Fonte: Próprio autor

Tabela C.25: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	6021,7	2807,2	620,6	523,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	7768,2	3374,7	870,9	751,4
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	14938,2	7537,4	3489,1	1102,8
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	16587,4	8101,4	3745,1	1320,1
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	24122,1	11888,1	4831,3	1581,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	26251,7	12571,6	5230,5	1809,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	27356,3	12915,3	5442,4	1922,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	8702,5	3941,6	787,8	687,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	9403,9	4151,8	876,5	769,1
W 250 x 89,0 (H)	15,50	10318,0	4407,0	986,4	869,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	11632,2	4735,9	1133,2	1006,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	13407,1	5178,9	1317,3	1173,2
W 310 x 97,0 (H)	13,05	22842,8	11246,6	4389,1	1478,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	24353,1	11699,0	4627,7	1644,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	26086,1	12184,7	4891,4	1824,1
W 310 x 129,0 (H)	12,78	28181,4	12741,3	5217,6	2031,6
W 360 x 91,0 (H)	13,54	13621,0	6477,9	1651,3	862,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	14727,7	6798,8	1798,5	977,0
W 360 x 110,0 (H)	13,37	15775,3	7091,6	1937,6	1078,7
W 360 x 122,0 (H)	13,29	17028,5	7419,4	2092,6	1194,8
W 410 x 46,1	19,25	721,5	192,8	92,4	88,2
W 410 x 53,0	16,26	2318,9	887,5	208,4	177,1
W 410 x 60,0	16,15	2590,1	996,2	247,6	213,1
W 410 x 75,0	15,95	3159,3	1200,8	321,8	279,7
W 410 x 85,0	15,85	4374,8	1612,6	374,1	326,8
W 460 x 52,0	17,60	1265,9	420,0	121,5	110,2
W 460 x 68,0	17,34	1697,9	570,5	182,7	166,6
W 460 x 82,0	14,82	5153,7	2203,9	437,8	337,7
W 460 x 97,0	14,65	5999,5	2465,5	533,9	421,8
W 460 x 106,0	14,57	6503,3	2611,5	589,0	468,6
W 530 x 66,0	15,93	2541,7	1064,9	197,7	152,0
W 530 x 74,0	15,83	2825,9	1180,6	236,6	186,3
W 530 x 85,0	15,79	3160,4	1285,0	281,5	228,4
W 530 x 92,0	13,32	7565,8	3414,7	738,6	490,1
W 530 x 101,0	13,25	8173,5	3607,0	813,4	553,2
W 530 x 109,0	13,19	8716,0	3774,8	876,6	606,4
W 610 x 125,0	12,00	15532,7	7347,4	1596,8	1003,9
W 610 x 140,0	11,94	16886,3	7753,9	1754,4	1129,0
W 610 x 155,0	9,45	47631,1	24765,3	14050,5	7960,9
W 610 x 174,0	9,40	51218,6	25813,2	14729,2	8397,7
W 610 x 195,0	9,33	56041,3	27253,7	15652,1	9101,2
W 610 x 217,0	9,28	61681,7	28568,1	16493,7	9715,8

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.26: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fl,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2950,6	1375,5	304,1	256,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	3806,4	1653,6	426,7	368,2
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	7319,7	3693,3	1709,6	540,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	8127,8	3969,7	1835,1	646,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	11819,8	5825,2	2367,3	774,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	12863,3	6160,1	2562,9	886,5
HP 310 x 132 (H)	12,76	13404,6	6328,5	2666,8	942,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	4264,2	1931,4	386,0	337,0
W 250 x 80,0 (H)	15,66	4607,9	2034,4	429,5	376,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	5055,8	2159,4	483,3	426,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	5699,8	2320,6	555,3	492,9
W 250 x 115,0 (H)	15,16	6569,5	2537,7	645,5	574,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	11192,9	5510,8	2150,7	724,7
W 310 x 107,0 (H)	12,97	11933,0	5732,5	2267,6	805,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	12782,2	5970,5	2396,8	893,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	13808,9	6243,2	2556,6	995,5
W 360 x 91,0 (H)	13,54	6674,3	3174,1	809,2	422,6
W 360 x 101,0 (H)	13,45	7216,6	3331,4	881,2	478,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	7729,9	3474,9	949,4	528,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	8344,0	3635,5	1025,4	585,5
W 410 x 46,1	19,25	353,5	94,5	45,3	43,2
W 410 x 53,0	16,26	1136,3	434,9	102,1	86,8
W 410 x 60,0	16,15	1269,2	488,1	121,3	104,4
W 410 x 75,0	15,95	1548,1	588,4	157,7	137,1
W 410 x 85,0	15,85	2143,6	790,2	183,3	160,2
W 460 x 52,0	17,60	620,3	205,8	59,5	54,0
W 460 x 68,0	17,34	832,0	279,6	89,5	81,6
W 460 x 82,0	14,82	2525,3	1079,9	214,5	165,4
W 460 x 97,0	14,65	2939,7	1208,1	261,6	206,7
W 460 x 106,0	14,57	3186,6	1279,6	288,6	229,6
W 530 x 66,0	15,93	1245,4	521,8	96,9	74,5
W 530 x 74,0	15,83	1384,7	578,5	115,9	91,3
W 530 x 85,0	15,79	1548,6	629,7	137,9	111,9
W 530 x 92,0	13,32	3707,2	1673,2	361,9	240,2
W 530 x 101,0	13,25	4005,0	1767,4	398,6	271,1
W 530 x 109,0	13,19	4270,8	1849,6	429,5	297,1
W 610 x 125,0	12,00	7611,0	3600,2	782,5	491,9
W 610 x 140,0	11,94	8274,3	3799,4	859,6	553,2
W 610 x 155,0	9,45	23339,2	12135,0	6884,7	3900,8
W 610 x 174,0	9,40	25097,1	12648,5	7217,3	4114,9
W 610 x 195,0	9,33	27460,2	13354,3	7669,5	4459,6
W 610 x 217,0	9,28	30224,0	13998,4	8081,9	4760,8

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas C.27 até a Tabela C.29 apresentam a força de flambagem elástica para a coluna de 5 metros, com respeito as três condições de vinculação dos pilares e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.27: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	4248,9	1980,7	437,9	369,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	5481,2	2381,2	614,5	530,2
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	10540,4	5318,4	2461,9	778,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	11704,1	5716,3	2642,5	931,5
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	17020,6	8388,3	3409,0	1115,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	18523,2	8870,5	3690,6	1276,5
HP 310 x 132 (H)	12,76	19302,6	9113,0	3840,1	1356,8
W 250 x 73,0 (H)	15,78	6140,5	2781,2	555,9	485,3
W 250 x 80,0 (H)	15,66	6635,4	2929,5	618,5	542,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	7280,4	3109,5	696,0	613,5
W 250 x 101,0 (H)	15,36	8207,7	3341,6	799,6	709,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	9460,0	3654,3	929,5	827,8
W 310 x 97,0 (H)	13,05	16117,8	7935,6	3097,0	1043,5
W 310 x 107,0 (H)	12,97	17183,6	8254,8	3265,3	1160,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	18406,4	8597,5	3451,4	1287,1
W 310 x 129,0 (H)	12,78	19884,8	8990,3	3681,5	1433,5
W 360 x 91,0 (H)	13,54	9610,9	4570,8	1165,2	608,5
W 360 x 101,0 (H)	13,45	10391,8	4797,2	1269,0	689,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	11131,1	5003,8	1367,2	761,1
W 360 x 122,0 (H)	13,29	12015,3	5235,2	1476,5	843,1
W 410 x 46,1	19,25	509,1	136,1	65,2	62,2
W 410 x 53,0	16,26	1636,2	626,2	147,0	125,0
W 410 x 60,0	16,15	1827,6	702,9	174,7	150,3
W 410 x 75,0	15,95	2229,2	847,3	227,1	197,4
W 410 x 85,0	15,85	3086,8	1137,9	264,0	230,6
W 460 x 52,0	17,60	893,2	296,4	85,7	77,7
W 460 x 68,0	17,34	1198,0	402,6	128,9	117,6
W 460 x 82,0	14,82	3636,5	1555,1	308,9	238,2
W 460 x 97,0	14,65	4233,2	1739,7	376,7	297,6
W 460 x 106,0	14,57	4588,7	1842,7	415,6	330,6
W 530 x 66,0	15,93	1793,4	751,4	139,5	107,2
W 530 x 74,0	15,83	1993,9	833,0	166,9	131,5
W 530 x 85,0	15,79	2230,0	906,7	198,6	161,1
W 530 x 92,0	13,32	5338,4	2409,4	521,2	345,8
W 530 x 101,0	13,25	5767,2	2545,1	574,0	390,3
W 530 x 109,0	13,19	6150,0	2663,5	618,5	427,9
W 610 x 125,0	12,00	10959,9	5184,3	1126,7	708,3
W 610 x 140,0	11,94	11915,0	5471,2	1237,9	796,6
W 610 x 155,0	9,45	33608,5	17474,4	9914,0	5617,2
W 610 x 174,0	9,40	36139,9	18213,8	10392,9	5925,4
W 610 x 195,0	9,33	39542,7	19230,2	11044,1	6421,8
W 610 x 217,0	9,28	43522,6	20157,6	11637,9	6855,5

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.28: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fl,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2167,8	1010,6	223,4	188,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2796,6	1214,9	313,5	270,5
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	5377,8	2713,5	1256,1	397,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	5971,5	2916,5	1348,2	475,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	8684,0	4279,7	1739,3	569,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	9450,6	4525,8	1883,0	651,3
HP 310 x 132 (H)	12,76	9848,3	4649,5	1959,3	692,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	3132,9	1419,0	283,6	247,6
W 250 x 80,0 (H)	15,66	3385,4	1494,7	315,6	276,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3714,5	1586,5	355,1	313,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	4187,6	1704,9	407,9	362,2
W 250 x 115,0 (H)	15,16	4826,5	1864,4	474,2	422,4
W 310 x 97,0 (H)	13,05	8223,4	4048,8	1580,1	532,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	8767,1	4211,6	1666,0	592,0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	9391,0	4386,5	1760,9	656,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	10145,3	4586,9	1878,3	731,4
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4903,5	2332,0	594,5	310,5
W 360 x 101,0 (H)	13,45	5302,0	2447,6	647,4	351,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	5679,1	2553,0	697,5	388,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	6130,3	2671,0	753,3	430,1
W 410 x 46,1	19,25	259,7	69,4	33,3	31,8
W 410 x 53,0	16,26	834,8	319,5	75,0	63,8
W 410 x 60,0	16,15	932,4	358,6	89,1	76,7
W 410 x 75,0	15,95	1137,4	432,3	115,9	100,7
W 410 x 85,0	15,85	1574,9	580,5	134,7	117,7
W 460 x 52,0	17,60	455,7	151,2	43,7	39,7
W 460 x 68,0	17,34	611,2	205,4	65,8	60,0
W 460 x 82,0	14,82	1855,3	793,4	157,6	121,6
W 460 x 97,0	14,65	2159,8	887,6	192,2	151,8
W 460 x 106,0	14,57	2341,2	940,1	212,0	168,7
W 530 x 66,0	15,93	915,0	383,4	71,2	54,7
W 530 x 74,0	15,83	1017,3	425,0	85,2	67,1
W 530 x 85,0	15,79	1137,7	462,6	101,3	82,2
W 530 x 92,0	13,32	2723,7	1229,3	265,9	176,4
W 530 x 101,0	13,25	2942,4	1298,5	292,8	199,2
W 530 x 109,0	13,19	3137,7	1358,9	315,6	218,3
W 610 x 125,0	12,00	5591,8	2645,1	574,9	361,4
W 610 x 140,0	11,94	6079,1	2791,4	631,6	406,5
W 610 x 155,0	9,45	17147,2	8915,5	5058,2	2865,9
W 610 x 174,0	9,40	18438,7	9292,8	5302,5	3023,2
W 610 x 195,0	9,33	20174,9	9811,3	5634,8	3276,4
W 610 x 217,0	9,28	22205,4	10284,5	5937,7	3497,7

Fonte: Próprio autor

Tabela C.29: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1062,2	495,2	109,5	92,4
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1370,3	595,3	153,6	132,5
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2635,1	1329,6	615,5	194,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2926,0	1429,1	660,6	232,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4255,1	2097,1	852,2	279,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4630,8	2217,6	922,7	319,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	4825,7	2278,3	960,0	339,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1535,1	695,3	139,0	121,3
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1658,9	732,4	154,6	135,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1820,1	777,4	174,0	153,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2051,9	835,4	199,9	177,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2365,0	913,6	232,4	207,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4029,5	1983,9	774,2	260,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4295,9	2063,7	816,3	290,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4601,6	2149,4	862,9	321,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4971,2	2247,6	920,4	358,4
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2402,7	1142,7	291,3	152,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2598,0	1199,3	317,2	172,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2782,8	1251,0	341,8	190,3
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3003,8	1308,8	369,1	210,8
W 410 x 46,1	19,25	127,3	34,0	16,3	15,6
W 410 x 53,0	16,26	409,1	156,6	36,8	31,2
W 410 x 60,0	16,15	456,9	175,7	43,7	37,6
W 410 x 75,0	15,95	557,3	211,8	56,8	49,3
W 410 x 85,0	15,85	771,7	284,5	66,0	57,7
W 460 x 52,0	17,60	223,3	74,1	21,4	19,4
W 460 x 68,0	17,34	299,5	100,6	32,2	29,4
W 460 x 82,0	14,82	909,1	388,8	77,2	59,6
W 460 x 97,0	14,65	1058,3	434,9	94,2	74,4
W 460 x 106,0	14,57	1147,2	460,7	103,9	82,7
W 530 x 66,0	15,93	448,4	187,9	34,9	26,8
W 530 x 74,0	15,83	498,5	208,3	41,7	32,9
W 530 x 85,0	15,79	557,5	226,7	49,7	40,3
W 530 x 92,0	13,32	1334,6	602,3	130,3	86,5
W 530 x 101,0	13,25	1441,8	636,3	143,5	97,6
W 530 x 109,0	13,19	1537,5	665,9	154,6	107,0
W 610 x 125,0	12,00	2740,0	1296,1	281,7	177,1
W 610 x 140,0	11,94	2978,7	1367,8	309,5	199,2
W 610 x 155,0	9,45	8402,1	4368,6	2478,5	1404,3
W 610 x 174,0	9,40	9035,0	4553,5	2598,2	1481,4
W 610 x 195,0	9,33	9885,7	4807,6	2761,0	1605,5
W 610 x 217,0	9,28	10880,6	5039,4	2909,5	1713,9

Fonte: Próprio autor

C.1.5.3 Fatores de redução associados ao dimensionamento à compressão

C.1.5.3.1. Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio

A esbeltez adimensional além de ser um parâmetro utilizado determinar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, é também de fundamental importância para a comparação dos resultados com a modelagem numérica.

As Tabelas C.30 até a Tabela C.32 apresentam os índices de esbeltez reduzido para o pilar misto de 3 metros, com respeito as três condições de vinculações e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.30: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fi}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,467	0,546	0,769	0,491
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,457	0,541	0,704	0,455
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,357	0,436	0,496	0,594
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,356	0,438	0,495	0,566
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,332	0,409	0,492	0,586
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,331	0,409	0,487	0,570
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,330	0,409	0,484	0,563
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,422	0,502	0,767	0,481
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,418	0,499	0,743	0,467
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,416	0,498	0,720	0,458
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,410	0,494	0,692	0,451
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,403	0,490	0,667	0,445
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,323	0,394	0,490	0,576
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,322	0,394	0,486	0,561
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,321	0,393	0,482	0,546
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,319	0,393	0,477	0,533
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,416	0,515	0,770	0,695
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,413	0,514	0,754	0,675
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,410	0,513	0,740	0,660
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,409	0,514	0,729	0,648
W 410 x 46,1	19,25	1,289	1,949	1,660	1,203
W 410 x 53,0	16,26	0,821	1,117	1,660	1,213
W 410 x 60,0	16,15	0,794	1,072	1,559	1,131
W 410 x 75,0	15,95	0,768	1,049	1,475	1,052
W 410 x 85,0	15,85	0,730	1,015	1,528	1,067
W 460 x 52,0	17,60	1,114	1,604	1,953	1,344
W 460 x 68,0	17,34	1,029	1,474	1,731	1,173
W 460 x 82,0	14,82	0,682	0,900	1,557	1,152
W 460 x 97,0	14,65	0,662	0,887	1,485	1,111
W 460 x 106,0	14,57	0,655	0,886	1,461	1,099
W 530 x 66,0	15,93	0,941	1,272	2,126	1,530
W 530 x 74,0	15,83	0,918	1,241	2,010	1,427
W 530 x 85,0	15,79	0,892	1,216	1,892	1,320
W 530 x 92,0	13,32	0,604	0,793	1,407	1,279
W 530 x 101,0	13,25	0,595	0,787	1,374	1,238
W 530 x 109,0	13,19	0,589	0,783	1,352	1,211

Tabela C.30 (Cont.): Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fl}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	0,503	0,655	1,205	1,219
W 610 x 140,0	11,94	0,498	0,655	1,185	1,188
W 610 x 155,0	9,45	0,315	0,392	0,469	0,561
W 610 x 174,0	9,40	0,314	0,392	0,470	0,562
W 610 x 195,0	9,33	0,311	0,391	0,469	0,557
W 610 x 217,0	9,28	0,308	0,390	0,467	0,552

Fonte: Próprio autor

Tabela C.31: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fl}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,653	0,765	1,077	0,687
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,640	0,758	0,986	0,637
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,499	0,610	0,694	0,832
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,499	0,613	0,694	0,792
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,465	0,572	0,689	0,820
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,464	0,573	0,682	0,798
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,463	0,573	0,678	0,788
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,590	0,702	1,073	0,674
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,586	0,698	1,040	0,654
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,582	0,697	1,008	0,641
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,574	0,692	0,969	0,631
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,564	0,686	0,934	0,622
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,452	0,552	0,687	0,807
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,451	0,552	0,681	0,785
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,449	0,551	0,675	0,764
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,447	0,550	0,668	0,747
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,582	0,721	1,079	0,973
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,578	0,720	1,056	0,945
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,574	0,718	1,035	0,924
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,573	0,720	1,020	0,907
W 410 x 46,1	19,25	1,805	2,729	2,324	1,684
W 410 x 53,0	16,26	1,150	1,564	2,324	1,698
W 410 x 60,0	16,15	1,111	1,501	2,182	1,584
W 410 x 75,0	15,95	1,076	1,469	2,065	1,473
W 410 x 85,0	15,85	1,022	1,421	2,139	1,494
W 460 x 52,0	17,60	1,560	2,245	2,735	1,881
W 460 x 68,0	17,34	1,440	2,063	2,424	1,643
W 460 x 82,0	14,82	0,955	1,259	2,180	1,613
W 460 x 97,0	14,65	0,927	1,242	2,079	1,556
W 460 x 106,0	14,57	0,917	1,241	2,045	1,539
W 530 x 66,0	15,93	1,318	1,781	2,976	2,141
W 530 x 74,0	15,83	1,285	1,737	2,814	1,998
W 530 x 85,0	15,79	1,249	1,702	2,649	1,849
W 530 x 92,0	13,32	0,845	1,110	1,970	1,791
W 530 x 101,0	13,25	0,834	1,102	1,924	1,733
W 530 x 109,0	13,19	0,824	1,097	1,893	1,696
W 610 x 125,0	12,00	0,705	0,918	1,687	1,707
W 610 x 140,0	11,94	0,698	0,916	1,659	1,663
W 610 x 155,0	9,45	0,440	0,549	0,656	0,786
W 610 x 174,0	9,40	0,439	0,549	0,658	0,787
W 610 x 195,0	9,33	0,436	0,548	0,656	0,780
W 610 x 217,0	9,28	0,431	0,545	0,654	0,773

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.32: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,fi}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,933	1,092	1,539	0,982
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,915	1,082	1,408	0,910
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,713	0,872	0,991	1,188
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,713	0,875	0,991	1,132
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,664	0,817	0,984	1,172
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,662	0,819	0,974	1,139
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,661	0,819	0,969	1,126
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,843	1,003	1,533	0,963
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,837	0,998	1,485	0,935
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,832	0,996	1,440	0,916
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,820	0,988	1,385	0,901
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,806	0,980	1,335	0,889
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,646	0,789	0,981	1,153
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,644	0,788	0,973	1,121
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,641	0,787	0,964	1,092
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,639	0,786	0,954	1,067
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,832	1,030	1,541	1,390
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,826	1,028	1,508	1,349
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,821	1,025	1,479	1,320
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,819	1,028	1,457	1,296
W 410 x 46,1	19,25	2,578	3,899	3,321	2,406
W 410 x 53,0	16,26	1,643	2,234	3,320	2,426
W 410 x 60,0	16,15	1,587	2,144	3,117	2,262
W 410 x 75,0	15,95	1,537	2,099	2,950	2,105
W 410 x 85,0	15,85	1,461	2,029	3,055	2,135
W 460 x 52,0	17,60	2,228	3,207	3,907	2,688
W 460 x 68,0	17,34	2,057	2,948	3,463	2,347
W 460 x 82,0	14,82	1,364	1,799	3,114	2,304
W 460 x 97,0	14,65	1,325	1,774	2,970	2,223
W 460 x 106,0	14,57	1,310	1,773	2,922	2,198
W 530 x 66,0	15,93	1,883	2,545	4,251	3,059
W 530 x 74,0	15,83	1,835	2,482	4,021	2,854
W 530 x 85,0	15,79	1,784	2,432	3,784	2,641
W 530 x 92,0	13,32	1,208	1,586	2,815	2,558
W 530 x 101,0	13,25	1,191	1,575	2,748	2,476
W 530 x 109,0	13,19	1,178	1,567	2,704	2,422
W 610 x 125,0	12,00	1,007	1,311	2,410	2,439
W 610 x 140,0	11,94	0,997	1,309	2,370	2,375
W 610 x 155,0	9,45	0,629	0,784	0,938	1,123
W 610 x 174,0	9,40	0,627	0,785	0,940	1,124
W 610 x 195,0	9,33	0,623	0,782	0,938	1,114
W 610 x 217,0	9,28	0,616	0,779	0,934	1,104

Fonte: Próprio autor

As Tabelas C.33 até a Tabela C.35 apresentam os índices de esbeltez reduzido para o pilar misto de 5 metros, com respeito as três condições de vinculações e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.33: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,778	0,910	1,282	0,818
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,762	0,902	1,174	0,758
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,594	0,726	0,826	0,990
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,594	0,729	0,826	0,943
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,554	0,681	0,820	0,976
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,552	0,682	0,812	0,949
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,551	0,682	0,807	0,938
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,703	0,836	1,278	0,802
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,697	0,831	1,238	0,779
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,693	0,830	1,200	0,763
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,683	0,824	1,154	0,751
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,671	0,817	1,112	0,741
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,538	0,657	0,817	0,961
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,537	0,657	0,811	0,934
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,534	0,656	0,803	0,910
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,532	0,655	0,795	0,889
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,693	0,859	1,284	1,158
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,688	0,857	1,257	1,125
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,684	0,854	1,233	1,100
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,682	0,857	1,214	1,080
W 410 x 46,1	19,25	2,148	3,249	2,767	2,005
W 410 x 53,0	16,26	1,369	1,862	2,767	2,022
W 410 x 60,0	16,15	1,323	1,787	2,598	1,885
W 410 x 75,0	15,95	1,281	1,749	2,458	1,754
W 410 x 85,0	15,85	1,217	1,691	2,546	1,779
W 460 x 52,0	17,60	1,857	2,673	3,256	2,240
W 460 x 68,0	17,34	1,714	2,456	2,885	1,956
W 460 x 82,0	14,82	1,137	1,499	2,595	1,920
W 460 x 97,0	14,65	1,104	1,478	2,475	1,852
W 460 x 106,0	14,57	1,092	1,477	2,435	1,832
W 530 x 66,0	15,93	1,569	2,121	3,543	2,549
W 530 x 74,0	15,83	1,530	2,068	3,351	2,378
W 530 x 85,0	15,79	1,487	2,026	3,154	2,201
W 530 x 92,0	13,32	1,006	1,322	2,346	2,132
W 530 x 101,0	13,25	0,992	1,312	2,290	2,063
W 530 x 109,0	13,19	0,981	1,306	2,253	2,018
W 610 x 125,0	12,00	0,839	1,092	2,008	2,032
W 610 x 140,0	11,94	0,831	1,091	1,975	1,980
W 610 x 155,0	9,45	0,524	0,653	0,782	0,936
W 610 x 174,0	9,40	0,523	0,654	0,783	0,937
W 610 x 195,0	9,33	0,519	0,652	0,782	0,928
W 610 x 217,0	9,28	0,513	0,649	0,778	0,920

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.34: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	$(u/A)_p$	$\lambda_{0,fi}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,089	1,274	1,795	1,145
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,067	1,263	1,643	1,062
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,832	1,017	1,157	1,387
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,831	1,021	1,156	1,321
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,775	0,954	1,148	1,367
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,773	0,955	1,137	1,329
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,771	0,955	1,130	1,314
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,984	1,170	1,789	1,123
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,976	1,164	1,733	1,091
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,970	1,162	1,681	1,069
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,957	1,153	1,615	1,051
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,940	1,144	1,557	1,037
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,753	0,920	1,144	1,345
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,751	0,920	1,135	1,308
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,748	0,918	1,124	1,274
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,745	0,917	1,113	1,245
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,970	1,202	1,798	1,621
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,964	1,199	1,759	1,574
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,957	1,196	1,726	1,540
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,955	1,200	1,700	1,512
W 410 x 46,1	19,25	3,008	4,548	3,874	2,807
W 410 x 53,0	16,26	1,916	2,607	3,873	2,831
W 410 x 60,0	16,15	1,852	2,502	3,637	2,639
W 410 x 75,0	15,95	1,793	2,448	3,441	2,455
W 410 x 85,0	15,85	1,704	2,368	3,564	2,491
W 460 x 52,0	17,60	2,600	3,742	4,558	3,136
W 460 x 68,0	17,34	2,400	3,439	4,040	2,738
W 460 x 82,0	14,82	1,591	2,099	3,633	2,688
W 460 x 97,0	14,65	1,545	2,070	3,465	2,593
W 460 x 106,0	14,57	1,529	2,068	3,409	2,564
W 530 x 66,0	15,93	2,197	2,969	4,960	3,569
W 530 x 74,0	15,83	2,141	2,896	4,691	3,329
W 530 x 85,0	15,79	2,082	2,837	4,415	3,081
W 530 x 92,0	13,32	1,409	1,850	3,284	2,985
W 530 x 101,0	13,25	1,389	1,837	3,206	2,889
W 530 x 109,0	13,19	1,374	1,828	3,154	2,826
W 610 x 125,0	12,00	1,174	1,529	2,812	2,845
W 610 x 140,0	11,94	1,163	1,527	2,765	2,771
W 610 x 155,0	9,45	0,734	0,914	1,094	1,310
W 610 x 174,0	9,40	0,732	0,916	1,097	1,311
W 610 x 195,0	9,33	0,726	0,913	1,094	1,300
W 610 x 217,0	9,28	0,718	0,909	1,090	1,288

Fonte: Próprio autor

Tabela C.35: Índice de esbeltez reduzido da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\lambda_{0,\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1,555	1,820	2,564	1,636
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1,525	1,804	2,347	1,517
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1,189	1,453	1,652	1,981
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1,188	1,459	1,651	1,886
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1,107	1,362	1,640	1,953
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1,104	1,365	1,624	1,899
HP 310 x 132 (H)	12,76	1,101	1,364	1,615	1,877
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1,406	1,672	2,555	1,604
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1,394	1,663	2,476	1,558
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1,386	1,660	2,401	1,527
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1,367	1,647	2,308	1,502
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1,343	1,634	2,225	1,482
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1,076	1,315	1,635	1,922
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1,073	1,314	1,621	1,869
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1,069	1,311	1,606	1,820
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1,065	1,310	1,590	1,778
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1,386	1,717	2,568	2,316
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1,377	1,713	2,513	2,249
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1,368	1,709	2,465	2,200
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1,364	1,714	2,429	2,161
W 410 x 46,1	19,25	4,297	6,498	5,534	4,011
W 410 x 53,0	16,26	2,738	3,724	5,533	4,044
W 410 x 60,0	16,15	2,646	3,574	5,195	3,770
W 410 x 75,0	15,95	2,561	3,498	4,916	3,508
W 410 x 85,0	15,85	2,435	3,382	5,092	3,558
W 460 x 52,0	17,60	3,714	5,346	6,511	4,479
W 460 x 68,0	17,34	3,429	4,913	5,771	3,911
W 460 x 82,0	14,82	2,273	2,999	5,189	3,840
W 460 x 97,0	14,65	2,208	2,956	4,949	3,704
W 460 x 106,0	14,57	2,184	2,955	4,870	3,663
W 530 x 66,0	15,93	3,138	4,241	7,086	5,098
W 530 x 74,0	15,83	3,059	4,137	6,701	4,756
W 530 x 85,0	15,79	2,974	4,053	6,307	4,401
W 530 x 92,0	13,32	2,013	2,643	4,691	4,264
W 530 x 101,0	13,25	1,985	2,625	4,580	4,127
W 530 x 109,0	13,19	1,963	2,612	4,506	4,037
W 610 x 125,0	12,00	1,678	2,185	4,017	4,065
W 610 x 140,0	11,94	1,662	2,182	3,949	3,959
W 610 x 155,0	9,45	1,048	1,306	1,563	1,871
W 610 x 174,0	9,40	1,046	1,308	1,567	1,874
W 610 x 195,0	9,33	1,038	1,304	1,563	1,856
W 610 x 217,0	9,28	1,026	1,299	1,556	1,841

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

C.1.5.3.2. Fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão

O fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão é calculado utilizando o índice de esbeltez adimensional e o fator de imperfeição para curvas de flambagem “c” de valor igual a 0,49 do dimensionamento para perfis metálicos do CEN EN 1993-1-1:2005, segundo as recomendações do CEN EN 1994-1-2:2005 e o mesmo valor de $\alpha = 0,49$ é recomendado pelo Anexo B da ABNT NBR 14323:2013. As formulações estão apresentadas nas Equações (4.3), (4.4) e (4.5) desse trabalho.

As Tabelas C.36 até a Tabela C.38 apresentam os fatores de redução associado à curva de dimensionamento à compressão para a coluna de 3m, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.36: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{fi}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,861	0,817	0,681	0,848
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,866	0,820	0,722	0,868
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,920	0,878	0,845	0,789
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,920	0,877	0,846	0,805
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,933	0,893	0,847	0,794
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,933	0,892	0,850	0,803
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,934	0,892	0,852	0,807
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,886	0,842	0,683	0,853
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,888	0,844	0,698	0,861
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,889	0,844	0,712	0,866
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,892	0,846	0,729	0,870
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,896	0,849	0,745	0,873
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,937	0,900	0,848	0,799
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,938	0,900	0,851	0,808
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,939	0,901	0,853	0,817
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,939	0,901	0,856	0,824
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,889	0,834	0,681	0,728
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,890	0,835	0,691	0,740
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,892	0,836	0,700	0,749
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,892	0,835	0,707	0,756
W 410 x 46,1	19,25	0,393	0,205	0,268	0,432
W 410 x 53,0	16,26	0,649	0,475	0,268	0,428
W 410 x 60,0	16,15	0,666	0,499	0,296	0,468
W 410 x 75,0	15,95	0,682	0,512	0,323	0,510
W 410 x 85,0	15,85	0,706	0,531	0,306	0,502
W 460 x 52,0	17,60	0,477	0,283	0,204	0,371
W 460 x 68,0	17,34	0,523	0,323	0,250	0,447
W 460 x 82,0	14,82	0,736	0,600	0,297	0,457
W 460 x 97,0	14,65	0,748	0,608	0,320	0,478
W 460 x 106,0	14,57	0,752	0,608	0,328	0,485
W 530 x 66,0	15,93	0,575	0,401	0,177	0,305
W 530 x 74,0	15,83	0,589	0,415	0,194	0,339
W 530 x 85,0	15,79	0,605	0,426	0,216	0,380
W 530 x 92,0	13,32	0,783	0,667	0,346	0,398
W 530 x 101,0	13,25	0,788	0,670	0,359	0,416
W 530 x 109,0	13,19	0,792	0,673	0,368	0,429

Tabela C.36 (Cont.): Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{ri}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	0,841	0,752	0,431	0,425
W 610 x 140,0	11,94	0,844	0,753	0,441	0,440
W 610 x 155,0	9,45	0,942	0,902	0,860	0,808
W 610 x 174,0	9,40	0,942	0,901	0,860	0,808
W 610 x 195,0	9,33	0,943	0,902	0,860	0,811
W 610 x 217,0	9,28	0,945	0,903	0,861	0,813

Fonte: Próprio autor

Tabela C.37: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{ri}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,753	0,684	0,497	0,733
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,761	0,689	0,548	0,763
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,843	0,779	0,728	0,642
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,844	0,778	0,729	0,667
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,862	0,802	0,732	0,650
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,863	0,801	0,736	0,664
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,864	0,801	0,738	0,670
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,791	0,723	0,499	0,741
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,794	0,726	0,517	0,753
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,796	0,726	0,535	0,761
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,801	0,730	0,558	0,767
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,807	0,733	0,579	0,772
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,870	0,813	0,733	0,658
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,870	0,813	0,736	0,672
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,871	0,814	0,740	0,684
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,872	0,814	0,745	0,696
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,796	0,712	0,496	0,556
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,798	0,712	0,508	0,573
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,800	0,714	0,520	0,585
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,801	0,712	0,528	0,595
W 410 x 46,1	19,25	0,233	0,113	0,151	0,262
W 410 x 53,0	16,26	0,458	0,295	0,151	0,258
W 410 x 60,0	16,15	0,478	0,314	0,169	0,289
W 410 x 75,0	15,95	0,497	0,325	0,186	0,323
W 410 x 85,0	15,85	0,527	0,342	0,175	0,316
W 460 x 52,0	17,60	0,296	0,160	0,113	0,218
W 460 x 68,0	17,34	0,335	0,186	0,140	0,272
W 460 x 82,0	14,82	0,567	0,406	0,169	0,281
W 460 x 97,0	14,65	0,583	0,414	0,184	0,297
W 460 x 106,0	14,57	0,589	0,415	0,189	0,302
W 530 x 66,0	15,93	0,381	0,239	0,097	0,174
W 530 x 74,0	15,83	0,395	0,249	0,107	0,197
W 530 x 85,0	15,79	0,411	0,257	0,119	0,224
W 530 x 92,0	13,32	0,634	0,479	0,201	0,236
W 530 x 101,0	13,25	0,641	0,483	0,210	0,250
W 530 x 109,0	13,19	0,647	0,486	0,216	0,259
W 610 x 125,0	12,00	0,722	0,589	0,261	0,256
W 610 x 140,0	11,94	0,726	0,590	0,268	0,267
W 610 x 155,0	9,45	0,876	0,815	0,751	0,671
W 610 x 174,0	9,40	0,876	0,815	0,750	0,670
W 610 x 195,0	9,33	0,878	0,816	0,751	0,675
W 610 x 217,0	9,28	0,881	0,817	0,753	0,679

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.38: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{fi}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,580	0,488	0,302	0,551
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,591	0,494	0,346	0,594
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,717	0,617	0,545	0,439
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,717	0,615	0,545	0,468
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,747	0,651	0,549	0,448
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,748	0,650	0,555	0,464
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,749	0,650	0,558	0,471
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,635	0,538	0,304	0,562
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,639	0,541	0,319	0,579
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,642	0,542	0,335	0,590
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,650	0,547	0,355	0,599
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,659	0,552	0,374	0,607
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,758	0,669	0,551	0,457
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,759	0,669	0,556	0,473
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,761	0,670	0,561	0,488
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,762	0,671	0,567	0,502
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,642	0,523	0,302	0,353
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,646	0,524	0,312	0,369
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,649	0,525	0,321	0,381
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,651	0,524	0,329	0,390
W 410 x 46,1	19,25	0,125	0,058	0,079	0,142
W 410 x 53,0	16,26	0,272	0,162	0,079	0,140
W 410 x 60,0	16,15	0,288	0,174	0,089	0,158
W 410 x 75,0	15,95	0,303	0,181	0,098	0,180
W 410 x 85,0	15,85	0,328	0,191	0,092	0,175
W 460 x 52,0	17,60	0,163	0,084	0,058	0,116
W 460 x 68,0	17,34	0,187	0,098	0,073	0,148
W 460 x 82,0	14,82	0,363	0,235	0,089	0,153
W 460 x 97,0	14,65	0,379	0,240	0,097	0,163
W 460 x 106,0	14,57	0,384	0,241	0,100	0,167
W 530 x 66,0	15,93	0,217	0,128	0,050	0,092
W 530 x 74,0	15,83	0,227	0,134	0,055	0,104
W 530 x 85,0	15,79	0,238	0,139	0,062	0,120
W 530 x 92,0	13,32	0,430	0,288	0,107	0,127
W 530 x 101,0	13,25	0,438	0,291	0,112	0,135
W 530 x 109,0	13,19	0,445	0,294	0,115	0,140
W 610 x 125,0	12,00	0,536	0,384	0,141	0,138
W 610 x 140,0	11,94	0,542	0,385	0,146	0,145
W 610 x 155,0	9,45	0,768	0,672	0,577	0,472
W 610 x 174,0	9,40	0,769	0,672	0,575	0,472
W 610 x 195,0	9,33	0,772	0,673	0,577	0,477
W 610 x 217,0	9,28	0,776	0,675	0,579	0,482

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas C.39 até a Tabela C.41 apresentam os fatores de redução para determinar a força axial resistente de cálculo para os pilares mistos de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.39: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,676	0,594	0,396	0,651
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,686	0,599	0,446	0,688
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,789	0,708	0,646	0,546
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,789	0,706	0,646	0,574
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,812	0,736	0,650	0,554
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,813	0,736	0,655	0,570
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,814	0,736	0,658	0,576
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,723	0,640	0,398	0,661
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,726	0,643	0,416	0,675
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,729	0,643	0,434	0,685
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,735	0,647	0,456	0,693
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,742	0,652	0,478	0,699
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,822	0,751	0,651	0,563
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,822	0,751	0,656	0,579
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,824	0,752	0,660	0,594
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,825	0,752	0,665	0,607
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,729	0,626	0,396	0,454
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,732	0,627	0,408	0,471
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,735	0,628	0,418	0,484
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,736	0,627	0,427	0,495
W 410 x 46,1	19,25	0,173	0,082	0,110	0,195
W 410 x 53,0	16,26	0,361	0,222	0,110	0,193
W 410 x 60,0	16,15	0,379	0,237	0,124	0,217
W 410 x 75,0	15,95	0,397	0,246	0,137	0,245
W 410 x 85,0	15,85	0,426	0,260	0,128	0,239
W 460 x 52,0	17,60	0,223	0,117	0,082	0,161
W 460 x 68,0	17,34	0,254	0,137	0,102	0,204
W 460 x 82,0	14,82	0,465	0,315	0,124	0,210
W 460 x 97,0	14,65	0,482	0,322	0,135	0,224
W 460 x 106,0	14,57	0,489	0,322	0,139	0,228
W 530 x 66,0	15,93	0,293	0,177	0,070	0,128
W 530 x 74,0	15,83	0,305	0,185	0,078	0,145
W 530 x 85,0	15,79	0,319	0,192	0,087	0,166
W 530 x 92,0	13,32	0,536	0,380	0,148	0,176
W 530 x 101,0	13,25	0,544	0,384	0,155	0,186
W 530 x 109,0	13,19	0,551	0,386	0,159	0,193
W 610 x 125,0	12,00	0,638	0,488	0,195	0,191
W 610 x 140,0	11,94	0,643	0,489	0,201	0,200
W 610 x 155,0	9,45	0,829	0,753	0,674	0,578
W 610 x 174,0	9,40	0,830	0,753	0,673	0,577
W 610 x 195,0	9,33	0,832	0,754	0,674	0,583
W 610 x 217,0	9,28	0,836	0,756	0,676	0,587

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.40: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ^R			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,490	0,400	0,236	0,461
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,502	0,405	0,272	0,505
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,642	0,530	0,455	0,354
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,643	0,528	0,455	0,380
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,678	0,567	0,459	0,362
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,679	0,566	0,465	0,377
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,680	0,566	0,468	0,383
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,549	0,448	0,237	0,472
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,554	0,451	0,250	0,489
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,557	0,452	0,263	0,501
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,565	0,457	0,280	0,511
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,575	0,462	0,297	0,519
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,692	0,587	0,461	0,370
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,693	0,588	0,466	0,385
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,695	0,589	0,472	0,400
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,697	0,589	0,477	0,413
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,557	0,433	0,235	0,278
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,561	0,434	0,244	0,292
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,565	0,436	0,251	0,302
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,566	0,434	0,258	0,311
W 410 x 46,1	19,25	0,095	0,044	0,059	0,107
W 410 x 53,0	16,26	0,211	0,123	0,059	0,106
W 410 x 60,0	16,15	0,224	0,132	0,067	0,120
W 410 x 75,0	15,95	0,236	0,138	0,074	0,137
W 410 x 85,0	15,85	0,257	0,146	0,069	0,133
W 460 x 52,0	17,60	0,123	0,063	0,043	0,088
W 460 x 68,0	17,34	0,142	0,074	0,055	0,112
W 460 x 82,0	14,82	0,287	0,180	0,067	0,116
W 460 x 97,0	14,65	0,300	0,185	0,073	0,124
W 460 x 106,0	14,57	0,305	0,185	0,075	0,127
W 530 x 66,0	15,93	0,167	0,097	0,037	0,069
W 530 x 74,0	15,83	0,174	0,101	0,041	0,078
W 530 x 85,0	15,79	0,183	0,105	0,046	0,091
W 530 x 92,0	13,32	0,346	0,224	0,080	0,096
W 530 x 101,0	13,25	0,353	0,227	0,084	0,102
W 530 x 109,0	13,19	0,359	0,229	0,087	0,106
W 610 x 125,0	12,00	0,446	0,305	0,107	0,105
W 610 x 140,0	11,94	0,452	0,306	0,110	0,110
W 610 x 155,0	9,45	0,704	0,591	0,487	0,385
W 610 x 174,0	9,40	0,705	0,590	0,486	0,384
W 610 x 195,0	9,33	0,708	0,592	0,487	0,389
W 610 x 217,0	9,28	0,713	0,594	0,490	0,394

Fonte: Próprio autor

Tabela C.41: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,297	0,230	0,127	0,274
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,307	0,234	0,148	0,309
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,439	0,330	0,270	0,199
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,440	0,328	0,270	0,217
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,480	0,363	0,273	0,204
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,482	0,363	0,278	0,214
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,484	0,363	0,280	0,219
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,347	0,265	0,127	0,283
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,351	0,267	0,135	0,296
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,354	0,268	0,142	0,306
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,362	0,271	0,153	0,314
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,371	0,275	0,163	0,320
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,497	0,383	0,275	0,210
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,499	0,383	0,278	0,220
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,501	0,384	0,283	0,230
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,503	0,384	0,287	0,239
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,354	0,254	0,126	0,152
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,358	0,254	0,131	0,160
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,362	0,256	0,136	0,166
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,363	0,254	0,140	0,172
W 410 x 46,1	19,25	0,049	0,022	0,030	0,055
W 410 x 53,0	16,26	0,112	0,064	0,030	0,055
W 410 x 60,0	16,15	0,120	0,069	0,034	0,062
W 410 x 75,0	15,95	0,127	0,072	0,038	0,071
W 410 x 85,0	15,85	0,139	0,076	0,035	0,069
W 460 x 52,0	17,60	0,064	0,032	0,022	0,045
W 460 x 68,0	17,34	0,074	0,038	0,028	0,058
W 460 x 82,0	14,82	0,157	0,095	0,034	0,060
W 460 x 97,0	14,65	0,165	0,098	0,037	0,064
W 460 x 106,0	14,57	0,168	0,098	0,038	0,066
W 530 x 66,0	15,93	0,088	0,050	0,019	0,035
W 530 x 74,0	15,83	0,092	0,052	0,021	0,040
W 530 x 85,0	15,79	0,097	0,054	0,023	0,046
W 530 x 92,0	13,32	0,194	0,120	0,041	0,049
W 530 x 101,0	13,25	0,199	0,121	0,043	0,052
W 530 x 109,0	13,19	0,203	0,122	0,044	0,055
W 610 x 125,0	12,00	0,263	0,168	0,055	0,054
W 610 x 140,0	11,94	0,267	0,169	0,057	0,057
W 610 x 155,0	9,45	0,512	0,386	0,295	0,220
W 610 x 174,0	9,40	0,514	0,386	0,294	0,219
W 610 x 195,0	9,33	0,518	0,387	0,295	0,223
W 610 x 217,0	9,28	0,525	0,389	0,297	0,226

Fonte: Próprio autor

C.1.5.4 Força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio

Por fim, calculado os devidos fatores de redução, é possível determinar a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, conforme a Equação (4.1) do capítulo 4 desse trabalho. As Tabelas C.42 até a Tabela C.44 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 3 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.42: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2214,0	1340,5	490,6	209,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2760,7	1588,1	611,3	264,6
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3425,2	2464,0	1420,8	602,0
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3797,1	2667,9	1523,3	667,4
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4866,3	3475,2	1942,3	844,3
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	5268,3	3685,7	2068,5	924,2
HP 310 x 132 (H)	12,76	5464,9	3785,0	2131,5	964,3
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2686,6	1636,6	619,9	266,5
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2862,7	1707,9	661,5	283,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	3109,0	1807,7	714,2	309,7
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3419,2	1918,6	776,4	348,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3820,0	2068,8	856,6	397,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4373,2	3086,6	1754,9	769,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4640,9	3208,8	1824,9	819,0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4934,3	3329,2	1898,6	870,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	5292,1	3476,9	1990,8	933,7
W 360 x 91,0 (H)	13,54	4104,3	2811,4	1307,7	594,0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4385,8	2940,5	1384,8	645,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4641,7	3053,7	1454,2	689,9
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4989,0	3209,6	1539,3	744,2
W 410 x 46,1	19,25	924,6	294,4	133,7	108,2
W 410 x 53,0	16,26	1989,2	1031,7	301,5	218,5
W 410 x 60,0	16,15	2130,1	1120,5	349,3	250,0
W 410 x 75,0	15,95	2493,5	1326,5	442,9	309,7
W 410 x 85,0	15,85	3228,3	1729,6	523,2	366,3
W 460 x 52,0	17,60	1468,4	599,6	185,7	144,6
W 460 x 68,0	17,34	1843,4	785,0	268,5	200,8
W 460 x 82,0	14,82	3456,5	2097,7	617,3	401,6
W 460 x 97,0	14,65	3857,2	2310,8	737,1	488,3
W 460 x 106,0	14,57	4115,9	2445,9	807,0	537,7
W 530 x 66,0	15,93	2537,0	1354,0	309,0	212,6
W 530 x 74,0	15,83	2747,5	1477,8	364,4	252,4
W 530 x 85,0	15,79	2981,0	1587,1	425,9	296,8
W 530 x 92,0	13,32	4233,9	2805,4	993,6	625,2
W 530 x 101,0	13,25	4475,9	2937,2	1080,7	691,4
W 530 x 109,0	13,19	4690,5	3054,2	1154,4	747,0
W 610 x 125,0	12,00	6485,7	4653,4	1960,5	1242,3
W 610 x 140,0	11,94	6939,5	4900,9	2129,1	1372,5
W 610 x 155,0	9,45	8698,5	6720,6	5208,9	3972,8
W 610 x 174,0	9,40	9309,6	7020,7	5482,5	4199,6
W 610 x 195,0	9,33	10042,1	7371,5	5802,8	4485,1
W 610 x 217,0	9,28	10827,4	7672,5	6071,0	4722,1

Fonte: Próprio autor

Tabela C.43: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1936,2	1123,2	357,5	181,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2425,2	1334,4	464,0	232,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	3139,9	2186,7	1224,1	490,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3481,3	2365,6	1312,7	552,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4499,3	3121,0	1676,9	690,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4872,5	3309,1	1790,2	763,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	5055,7	3398,4	1847,4	799,9
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2399,3	1405,8	452,5	231,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2560,4	1469,2	490,1	247,9
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2783,7	1555,7	536,7	272,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3069,1	1654,4	593,9	307,0
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3439,3	1787,8	665,8	350,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	4056,1	2788,6	1516,3	633,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4305,5	2899,2	1580,1	680,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4579,7	3009,1	1647,8	729,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4913,8	3142,9	1732,0	788,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3674,7	2397,2	952,3	453,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3931,5	2508,8	1018,8	499,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	4165,9	2607,3	1079,5	538,8
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4479,6	2738,2	1150,5	585,6
W 410 x 46,1	19,25	548,7	162,4	75,3	65,5
W 410 x 53,0	16,26	1405,5	639,7	169,8	131,9
W 410 x 60,0	16,15	1529,7	705,2	198,8	154,4
W 410 x 75,0	15,95	1818,2	841,7	254,8	196,3
W 410 x 85,0	15,85	2410,4	1112,0	298,9	230,9
W 460 x 52,0	17,60	911,4	339,6	102,4	84,9
W 460 x 68,0	17,34	1178,8	451,6	150,3	122,5
W 460 x 82,0	14,82	2661,7	1420,6	351,5	246,5
W 460 x 97,0	14,65	3007,9	1575,1	423,4	303,3
W 460 x 106,0	14,57	3224,3	1667,7	465,1	335,4
W 530 x 66,0	15,93	1683,5	806,3	168,9	121,4
W 530 x 74,0	15,83	1843,9	886,2	200,3	146,2
W 530 x 85,0	15,79	2026,5	957,5	235,7	175,0
W 530 x 92,0	13,32	3426,2	2015,4	577,2	371,8
W 530 x 101,0	13,25	3641,0	2117,1	631,2	414,9
W 530 x 109,0	13,19	3831,1	2206,8	676,8	451,2
W 610 x 125,0	12,00	5565,9	3644,6	1186,0	748,8
W 610 x 140,0	11,94	5970,5	3840,7	1294,7	834,0
W 610 x 155,0	9,45	8089,2	6078,0	4550,2	3299,1
W 610 x 174,0	9,40	8659,8	6348,2	4786,5	3485,9
W 610 x 195,0	9,33	9348,4	6668,6	5068,9	3734,2
W 610 x 217,0	9,28	10090,5	6945,3	5308,4	3942,7

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.44: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1489,4	801,5	217,7	136,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1882,0	956,5	293,0	181,0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2667,5	1732,2	915,8	335,3
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2958,3	1870,7	982,3	387,5
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3895,5	2535,0	1259,0	476,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4221,7	2686,1	1350,3	533,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	4383,1	2758,8	1397,2	562,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1925,8	1045,8	275,9	175,5
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2061,5	1095,9	302,6	190,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2246,3	1161,4	335,6	211,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2489,9	1239,4	377,9	239,8
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2808,4	1344,7	430,7	275,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3536,2	2294,4	1140,2	440,1
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3755,8	2385,6	1192,7	479,2
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3998,8	2477,9	1249,3	520,7
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4294,5	2588,7	1319,3	568,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2965,4	1760,6	579,5	288,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3180,7	1844,4	625,2	321,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3379,0	1919,3	667,6	350,4
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3636,7	2013,0	715,9	384,1
W 410 x 46,1	19,25	294,5	83,9	39,3	35,5
W 410 x 53,0	16,26	835,4	351,2	88,7	71,4
W 410 x 60,0	16,15	920,4	390,2	104,5	84,6
W 410 x 75,0	15,95	1107,5	467,8	134,6	109,1
W 410 x 85,0	15,85	1498,4	622,6	157,4	127,9
W 460 x 52,0	17,60	500,6	178,0	52,9	45,3
W 460 x 68,0	17,34	658,0	238,6	78,3	66,7
W 460 x 82,0	14,82	1704,9	820,4	184,7	134,6
W 460 x 97,0	14,65	1952,7	913,4	223,5	166,7
W 460 x 106,0	14,57	2103,7	967,3	245,9	184,7
W 530 x 66,0	15,93	960,1	433,6	86,8	63,9
W 530 x 74,0	15,83	1058,8	478,2	103,3	77,5
W 530 x 85,0	15,79	1173,2	518,3	122,0	93,7
W 530 x 92,0	13,32	2325,6	1213,1	306,4	199,8
W 530 x 101,0	13,25	2488,5	1277,6	336,0	224,0
W 530 x 109,0	13,19	2633,1	1334,2	361,1	244,4
W 610 x 125,0	12,00	4134,1	2377,4	642,8	405,2
W 610 x 140,0	11,94	4454,9	2506,9	703,7	453,1
W 610 x 155,0	9,45	7094,0	5011,8	3492,6	2322,2
W 610 x 174,0	9,40	7598,7	5232,3	3670,1	2452,1
W 610 x 195,0	9,33	8216,8	5502,4	3890,8	2638,8
W 610 x 217,0	9,28	8890,5	5738,5	4082,3	2798,1

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas C.45 até a Tabela C.47 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.45: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1737,7	974,1	285,4	161,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2184,9	1159,7	378,0	209,9
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2936,4	1987,3	1085,2	416,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3256,0	2148,4	1163,8	475,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4239,4	2866,3	1488,9	589,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4592,3	3038,2	1592,8	655,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	4766,2	3120,3	1645,7	688,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2192,7	1243,1	361,5	206,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2342,9	1300,7	394,3	222,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2549,6	1377,8	434,8	245,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2817,2	1467,5	485,8	277,3
W 250 x 115,0 (H)	15,16	3165,4	1588,7	549,4	317,8
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3832,2	2574,5	1347,3	542,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	4068,8	2676,7	1406,4	586,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4329,5	2779,0	1469,4	632,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4647,1	2902,9	1547,8	687,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3365,7	2107,3	760,0	370,7
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3604,7	2206,4	816,9	410,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3823,7	2294,4	869,3	445,9
W 360 x 122,0 (H)	13,29	4113,1	2408,2	929,7	486,8
W 410 x 46,1	19,25	407,2	117,9	55,0	48,9
W 410 x 53,0	16,26	1106,8	481,1	124,1	98,4
W 410 x 60,0	16,15	1213,0	532,8	145,7	115,9
W 410 x 75,0	15,95	1451,8	637,5	187,3	148,6
W 410 x 85,0	15,85	1946,7	845,9	219,4	174,5
W 460 x 52,0	17,60	685,6	248,6	74,3	62,8
W 460 x 68,0	17,34	895,1	332,1	109,6	91,7
W 460 x 82,0	14,82	2185,1	1100,3	257,7	184,8
W 460 x 97,0	14,65	2487,1	1222,9	311,2	228,2
W 460 x 106,0	14,57	2673,1	1294,9	342,2	252,7
W 530 x 66,0	15,93	1294,4	599,0	122,3	89,1
W 530 x 74,0	15,83	1423,5	659,8	145,3	107,7
W 530 x 85,0	15,79	1571,8	714,1	171,3	129,7
W 530 x 92,0	13,32	2899,3	1598,5	425,7	276,1
W 530 x 101,0	13,25	3091,8	1681,6	466,2	309,0
W 530 x 109,0	13,19	3262,3	1754,7	500,5	336,6
W 610 x 125,0	12,00	4918,1	3021,2	885,2	558,3
W 610 x 140,0	11,94	5286,5	3184,8	967,9	623,3
W 610 x 155,0	9,45	7660,4	5616,4	4079,9	2842,5
W 610 x 174,0	9,40	8202,6	5865,0	4289,8	3002,5
W 610 x 195,0	9,33	8860,8	6163,7	4545,0	3223,5
W 610 x 217,0	9,28	9573,2	6423,0	4763,7	3410,5

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.46: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1259,9	656,2	169,6	114,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1599,0	784,4	230,5	154,0
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2390,3	1487,6	764,6	270,4
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2651,3	1605,1	820,3	315,1
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3536,4	2208,1	1052,8	384,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3834,4	2338,9	1131,6	433,5
HP 310 x 132 (H)	12,76	3982,8	2402,3	1172,3	457,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1666,1	871,0	215,0	147,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1786,6	913,8	236,7	161,1
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1949,3	968,8	263,4	179,2
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2167,3	1035,5	298,0	204,4
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2454,1	1125,4	341,2	235,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3226,0	2014,1	954,2	356,7
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3427,8	2094,3	999,9	390,4
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3652,0	2176,4	1049,4	426,3
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3924,5	2274,0	1110,7	467,9
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2573,3	1458,2	451,5	227,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2764,2	1528,3	488,1	254,2
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2940,9	1591,3	522,3	278,0
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3166,9	1668,0	561,1	305,5
W 410 x 46,1	19,25	222,4	62,7	29,5	26,9
W 410 x 53,0	16,26	647,0	266,7	66,5	54,0
W 410 x 60,0	16,15	715,1	296,9	78,4	64,2
W 410 x 75,0	15,95	863,1	356,4	101,2	83,1
W 410 x 85,0	15,85	1174,1	475,1	118,2	97,3
W 460 x 52,0	17,60	380,3	133,5	39,5	34,2
W 460 x 68,0	17,34	501,7	179,4	58,6	50,5
W 460 x 82,0	14,82	1346,9	630,8	138,7	102,1
W 460 x 97,0	14,65	1548,8	703,1	168,0	126,6
W 460 x 106,0	14,57	1671,0	744,6	185,0	140,4
W 530 x 66,0	15,93	735,9	327,5	64,8	48,0
W 530 x 74,0	15,83	813,0	361,6	77,1	58,3
W 530 x 85,0	15,79	902,6	392,2	91,2	70,7
W 530 x 92,0	13,32	1870,3	942,5	230,7	150,9
W 530 x 101,0	13,25	2006,0	993,3	253,2	169,4
W 530 x 109,0	13,19	2126,6	1037,8	272,2	185,0
W 610 x 125,0	12,00	3440,7	1888,3	486,6	306,6
W 610 x 140,0	11,94	3715,1	1991,6	533,1	343,2
W 610 x 155,0	9,45	6498,8	4405,5	2951,2	1891,5
W 610 x 174,0	9,40	6964,0	4598,1	3099,6	1996,8
W 610 x 195,0	9,33	7539,8	4838,6	3287,7	2152,5
W 610 x 217,0	9,28	8172,0	5050,6	3452,7	2286,1

Fonte: Próprio autor

Tabela C.47: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	763,9	377,7	91,1	67,8
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	976,9	452,7	125,5	94,3
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1635,2	926,9	453,6	152,2
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1814,6	998,3	486,7	179,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2506,4	1415,0	626,2	217,4
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2721,5	1497,7	675,3	246,6
HP 310 x 132 (H)	12,76	2830,3	1538,4	701,1	261,2
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1052,9	514,7	115,6	88,4
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1133,1	541,0	127,8	97,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1239,4	573,8	142,8	109,4
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1386,9	614,9	162,7	125,7
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1583,1	670,3	187,5	145,7
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2319,3	1312,1	568,2	202,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2467,5	1364,6	597,1	223,1
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2634,2	1419,5	628,8	245,4
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2836,3	1483,7	667,9	271,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1636,2	854,2	242,5	123,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1762,9	895,8	262,9	139,4
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1881,4	933,5	282,2	153,1
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2028,2	977,6	303,8	168,8
W 410 x 46,1	19,25	114,2	31,7	15,0	13,9
W 410 x 53,0	16,26	344,6	138,2	33,8	27,9
W 410 x 60,0	16,15	382,5	154,3	39,9	33,2
W 410 x 75,0	15,95	463,7	185,4	51,6	43,2
W 410 x 85,0	15,85	635,4	247,9	60,2	50,6
W 460 x 52,0	17,60	197,0	67,9	19,9	17,5
W 460 x 68,0	17,34	261,5	91,5	29,7	26,1
W 460 x 82,0	14,82	737,2	332,7	70,6	52,8
W 460 x 97,0	14,65	852,2	371,3	85,7	65,6
W 460 x 106,0	14,57	921,4	393,3	94,4	72,8
W 530 x 66,0	15,93	386,4	168,4	32,6	24,5
W 530 x 74,0	15,83	427,9	186,1	38,9	29,8
W 530 x 85,0	15,79	476,4	202,1	46,1	36,2
W 530 x 92,0	13,32	1049,2	504,2	118,0	77,5
W 530 x 101,0	13,25	1129,0	531,9	129,6	87,2
W 530 x 109,0	13,19	1200,0	556,1	139,5	95,3
W 610 x 125,0	12,00	2030,7	1041,1	250,9	157,9
W 610 x 140,0	11,94	2199,7	1098,3	275,1	177,1
W 610 x 155,0	9,45	4732,3	2878,7	1786,0	1080,4
W 610 x 174,0	9,40	5077,4	3002,7	1874,1	1140,2
W 610 x 195,0	9,33	5518,2	3164,5	1989,6	1232,1
W 610 x 217,0	9,28	6013,7	3309,3	2092,8	1311,7

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

C.1.5.4.1. Novo fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão

Nessa seção é apresentado o fator de redução associado à curva de dimensionamento à compressão é calculado utilizando o novo fator de imperfeição para curvas de flambagem α de valor igual a 2,0. As formulações estão apresentadas nas Equações (4.3), (4.4) e (4.5) desse trabalho.

As Tabelas C.48 até a Tabela C.50 apresentam os fatores de redução associado à curva de dimensionamento à compressão para a coluna de 3m, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.48: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{fi}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,619	0,547	0,401	0,596
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,628	0,551	0,437	0,630
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,743	0,650	0,591	0,510
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,743	0,648	0,591	0,531
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,776	0,680	0,594	0,516
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,777	0,679	0,599	0,528
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,778	0,679	0,602	0,534
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,665	0,586	0,403	0,604
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,669	0,588	0,415	0,618
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,672	0,589	0,428	0,627
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,678	0,592	0,444	0,635
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,687	0,596	0,460	0,641
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,789	0,696	0,596	0,523
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,790	0,697	0,600	0,536
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,792	0,698	0,604	0,547
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,794	0,698	0,609	0,558
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,672	0,574	0,401	0,443
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,675	0,575	0,409	0,455
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,678	0,576	0,417	0,464
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,679	0,574	0,423	0,472
W 410 x 46,1	19,25	0,224	0,128	0,160	0,244
W 410 x 53,0	16,26	0,375	0,267	0,160	0,241
W 410 x 60,0	16,15	0,389	0,280	0,175	0,263
W 410 x 75,0	15,95	0,402	0,287	0,188	0,286
W 410 x 85,0	15,85	0,422	0,298	0,180	0,281
W 460 x 52,0	17,60	0,268	0,168	0,128	0,212
W 460 x 68,0	17,34	0,294	0,188	0,151	0,251
W 460 x 82,0	14,82	0,451	0,341	0,175	0,257
W 460 x 97,0	14,65	0,463	0,346	0,186	0,268
W 460 x 106,0	14,57	0,468	0,346	0,190	0,272
W 530 x 66,0	15,93	0,325	0,228	0,113	0,179
W 530 x 74,0	15,83	0,334	0,235	0,122	0,196
W 530 x 85,0	15,79	0,344	0,241	0,134	0,217
W 530 x 92,0	13,32	0,503	0,389	0,200	0,226
W 530 x 101,0	13,25	0,509	0,392	0,206	0,235
W 530 x 109,0	13,19	0,514	0,394	0,211	0,242

Tabela C.48 (Cont.): Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{ri}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
W 610 x 125,0	12,00	0,584	0,467	0,243	0,240
W 610 x 140,0	11,94	0,589	0,468	0,248	0,248
W 610 x 155,0	9,45	0,801	0,699	0,616	0,535
W 610 x 174,0	9,40	0,802	0,699	0,615	0,534
W 610 x 195,0	9,33	0,806	0,700	0,616	0,539
W 610 x 217,0	9,28	0,811	0,702	0,618	0,542

Fonte: Próprio autor

Tabela C.49: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ_{ri}			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,469	0,404	0,278	0,447
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,477	0,407	0,308	0,480
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,588	0,498	0,443	0,370
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,588	0,496	0,443	0,389
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,620	0,526	0,446	0,376
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,622	0,526	0,451	0,387
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,623	0,526	0,453	0,391
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,513	0,438	0,280	0,456
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,516	0,441	0,290	0,468
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,519	0,441	0,300	0,477
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,525	0,444	0,314	0,484
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,533	0,448	0,327	0,490
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,633	0,542	0,448	0,382
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,635	0,543	0,451	0,393
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,636	0,543	0,455	0,404
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,638	0,544	0,459	0,413
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,519	0,427	0,278	0,313
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,522	0,428	0,285	0,323
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,525	0,429	0,292	0,331
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,526	0,428	0,297	0,338
W 410 x 46,1	19,25	0,143	0,077	0,099	0,157
W 410 x 53,0	16,26	0,258	0,174	0,099	0,155
W 410 x 60,0	16,15	0,268	0,184	0,109	0,171
W 410 x 75,0	15,95	0,279	0,189	0,118	0,188
W 410 x 85,0	15,85	0,296	0,198	0,112	0,185
W 460 x 52,0	17,60	0,175	0,104	0,077	0,135
W 460 x 68,0	17,34	0,194	0,118	0,093	0,163
W 460 x 82,0	14,82	0,320	0,230	0,109	0,167
W 460 x 97,0	14,65	0,330	0,235	0,117	0,175
W 460 x 106,0	14,57	0,334	0,235	0,119	0,178
W 530 x 66,0	15,93	0,218	0,145	0,068	0,112
W 530 x 74,0	15,83	0,225	0,151	0,074	0,124
W 530 x 85,0	15,79	0,233	0,155	0,081	0,138
W 530 x 92,0	13,32	0,364	0,269	0,126	0,144
W 530 x 101,0	13,25	0,370	0,271	0,130	0,151
W 530 x 109,0	13,19	0,374	0,273	0,134	0,156
W 610 x 125,0	12,00	0,437	0,334	0,157	0,154
W 610 x 140,0	11,94	0,441	0,334	0,161	0,160
W 610 x 155,0	9,45	0,645	0,545	0,467	0,393
W 610 x 174,0	9,40	0,647	0,545	0,466	0,392
W 610 x 195,0	9,33	0,650	0,546	0,467	0,396
W 610 x 217,0	9,28	0,655	0,548	0,468	0,399

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.50: Fator de redução da força resistente da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ^2			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,328	0,274	0,178	0,310
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,335	0,277	0,200	0,337
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,432	0,353	0,306	0,248
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,432	0,351	0,307	0,263
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,462	0,377	0,309	0,252
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,463	0,377	0,312	0,261
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,464	0,377	0,314	0,264
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,365	0,302	0,179	0,317
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,368	0,304	0,186	0,327
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,371	0,305	0,194	0,334
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,376	0,307	0,204	0,340
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,383	0,310	0,214	0,345
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,474	0,391	0,310	0,257
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,475	0,391	0,313	0,266
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,477	0,392	0,316	0,274
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,478	0,392	0,320	0,282
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,371	0,293	0,177	0,203
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,373	0,294	0,183	0,211
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,376	0,295	0,187	0,217
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,377	0,294	0,191	0,222
W 410 x 46,1	19,25	0,084	0,044	0,057	0,094
W 410 x 53,0	16,26	0,163	0,105	0,057	0,093
W 410 x 60,0	16,15	0,171	0,111	0,063	0,103
W 410 x 75,0	15,95	0,178	0,115	0,068	0,115
W 410 x 85,0	15,85	0,191	0,121	0,065	0,112
W 460 x 52,0	17,60	0,105	0,060	0,043	0,079
W 460 x 68,0	17,34	0,118	0,069	0,053	0,097
W 460 x 82,0	14,82	0,208	0,143	0,063	0,100
W 460 x 97,0	14,65	0,216	0,146	0,068	0,106
W 460 x 106,0	14,57	0,219	0,146	0,070	0,107
W 530 x 66,0	15,93	0,135	0,086	0,038	0,065
W 530 x 74,0	15,83	0,139	0,089	0,041	0,072
W 530 x 85,0	15,79	0,145	0,092	0,046	0,081
W 530 x 92,0	13,32	0,243	0,171	0,074	0,085
W 530 x 101,0	13,25	0,247	0,172	0,077	0,090
W 530 x 109,0	13,19	0,250	0,174	0,078	0,093
W 610 x 125,0	12,00	0,301	0,219	0,094	0,092
W 610 x 140,0	11,94	0,304	0,219	0,096	0,096
W 610 x 155,0	9,45	0,485	0,394	0,326	0,265
W 610 x 174,0	9,40	0,486	0,393	0,325	0,265
W 610 x 195,0	9,33	0,489	0,394	0,326	0,268
W 610 x 217,0	9,28	0,494	0,396	0,327	0,270

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas C.51 até a Tabela C.53 apresentam os fatores de redução para determinar a força axial resistente de cálculo para os pilares mistos de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.51: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,397	0,337	0,225	0,377
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,405	0,340	0,251	0,407
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,510	0,424	0,373	0,307
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,510	0,423	0,373	0,324
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,541	0,451	0,376	0,312
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,542	0,450	0,380	0,321
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,544	0,450	0,382	0,326
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,438	0,369	0,226	0,385
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,441	0,371	0,235	0,396
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,444	0,371	0,245	0,404
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,450	0,374	0,257	0,411
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,457	0,377	0,268	0,416
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,554	0,466	0,377	0,317
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,555	0,466	0,380	0,327
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,557	0,467	0,384	0,337
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,559	0,468	0,388	0,345
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,444	0,358	0,225	0,255
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,447	0,359	0,231	0,265
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,449	0,360	0,237	0,272
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,450	0,359	0,241	0,277
W 410 x 46,1	19,25	0,111	0,059	0,076	0,123
W 410 x 53,0	16,26	0,207	0,137	0,076	0,121
W 410 x 60,0	16,15	0,217	0,145	0,083	0,134
W 410 x 75,0	15,95	0,226	0,149	0,091	0,149
W 410 x 85,0	15,85	0,240	0,156	0,086	0,146
W 460 x 52,0	17,60	0,137	0,080	0,059	0,104
W 460 x 68,0	17,34	0,153	0,091	0,071	0,127
W 460 x 82,0	14,82	0,261	0,184	0,084	0,131
W 460 x 97,0	14,65	0,271	0,188	0,090	0,138
W 460 x 106,0	14,57	0,274	0,188	0,092	0,140
W 530 x 66,0	15,93	0,173	0,113	0,051	0,086
W 530 x 74,0	15,83	0,179	0,117	0,056	0,095
W 530 x 85,0	15,79	0,186	0,121	0,062	0,107
W 530 x 92,0	13,32	0,301	0,217	0,097	0,112
W 530 x 101,0	13,25	0,306	0,219	0,101	0,118
W 530 x 109,0	13,19	0,310	0,220	0,104	0,122
W 610 x 125,0	12,00	0,367	0,274	0,123	0,121
W 610 x 140,0	11,94	0,371	0,274	0,126	0,125
W 610 x 155,0	9,45	0,566	0,469	0,395	0,327
W 610 x 174,0	9,40	0,567	0,468	0,394	0,326
W 610 x 195,0	9,33	0,570	0,470	0,395	0,330
W 610 x 217,0	9,28	0,575	0,471	0,397	0,333

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.52: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	χ^R			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,275	0,227	0,144	0,259
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,281	0,230	0,163	0,283
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,370	0,298	0,256	0,204
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,371	0,296	0,256	0,217
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,398	0,320	0,258	0,208
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,399	0,319	0,261	0,215
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,400	0,319	0,263	0,219
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,309	0,252	0,145	0,265
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,312	0,254	0,151	0,274
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,314	0,254	0,158	0,281
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,319	0,257	0,167	0,286
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,325	0,259	0,175	0,291
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,410	0,333	0,259	0,212
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,411	0,333	0,262	0,220
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,412	0,334	0,265	0,227
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,414	0,334	0,268	0,234
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,314	0,244	0,144	0,166
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,316	0,245	0,148	0,172
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,319	0,246	0,152	0,178
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,319	0,245	0,155	0,182
W 410 x 46,1	19,25	0,066	0,034	0,044	0,074
W 410 x 53,0	16,26	0,131	0,083	0,044	0,073
W 410 x 60,0	16,15	0,138	0,088	0,049	0,081
W 410 x 75,0	15,95	0,144	0,091	0,053	0,091
W 410 x 85,0	15,85	0,155	0,096	0,051	0,089
W 460 x 52,0	17,60	0,083	0,047	0,034	0,062
W 460 x 68,0	17,34	0,094	0,054	0,041	0,077
W 460 x 82,0	14,82	0,170	0,115	0,049	0,079
W 460 x 97,0	14,65	0,177	0,117	0,053	0,084
W 460 x 106,0	14,57	0,179	0,117	0,054	0,085
W 530 x 66,0	15,93	0,108	0,068	0,029	0,050
W 530 x 74,0	15,83	0,112	0,070	0,032	0,056
W 530 x 85,0	15,79	0,116	0,073	0,035	0,064
W 530 x 92,0	13,32	0,200	0,138	0,058	0,067
W 530 x 101,0	13,25	0,203	0,139	0,060	0,071
W 530 x 109,0	13,19	0,206	0,140	0,062	0,073
W 610 x 125,0	12,00	0,251	0,179	0,074	0,072
W 610 x 140,0	11,94	0,254	0,180	0,076	0,076
W 610 x 155,0	9,45	0,420	0,335	0,273	0,219
W 610 x 174,0	9,40	0,421	0,335	0,273	0,219
W 610 x 195,0	9,33	0,424	0,336	0,273	0,222
W 610 x 217,0	9,28	0,429	0,337	0,275	0,224

Fonte: Próprio autor

Tabela C.53: Fator de redução da força resistente da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	$\chi_{\bar{n}}$			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	0,175	0,141	0,085	0,164
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	0,180	0,143	0,097	0,181
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	0,248	0,192	0,161	0,125
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	0,248	0,191	0,162	0,134
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	0,270	0,209	0,163	0,128
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	0,270	0,208	0,165	0,133
HP 310 x 132 (H)	12,76	0,271	0,208	0,167	0,135
W 250 x 73,0 (H)	15,78	0,200	0,159	0,086	0,168
W 250 x 80,0 (H)	15,66	0,202	0,160	0,090	0,175
W 250 x 89,0 (H)	15,50	0,204	0,160	0,094	0,180
W 250 x 101,0 (H)	15,36	0,208	0,162	0,100	0,184
W 250 x 115,0 (H)	15,16	0,213	0,164	0,106	0,187
W 310 x 97,0 (H)	13,05	0,279	0,218	0,164	0,131
W 310 x 107,0 (H)	12,97	0,280	0,218	0,166	0,136
W 310 x 117,0 (H)	12,88	0,281	0,219	0,168	0,141
W 310 x 129,0 (H)	12,78	0,282	0,219	0,170	0,146
W 360 x 91,0 (H)	13,54	0,204	0,153	0,085	0,099
W 360 x 101,0 (H)	13,45	0,206	0,154	0,088	0,104
W 360 x 110,0 (H)	13,37	0,208	0,154	0,090	0,107
W 360 x 122,0 (H)	13,29	0,208	0,154	0,092	0,110
W 410 x 46,1	19,25	0,037	0,018	0,024	0,042
W 410 x 53,0	16,26	0,077	0,047	0,024	0,041
W 410 x 60,0	16,15	0,081	0,050	0,027	0,046
W 410 x 75,0	15,95	0,085	0,052	0,030	0,052
W 410 x 85,0	15,85	0,092	0,055	0,028	0,051
W 460 x 52,0	17,60	0,047	0,026	0,018	0,035
W 460 x 68,0	17,34	0,054	0,030	0,022	0,043
W 460 x 82,0	14,82	0,102	0,067	0,027	0,045
W 460 x 97,0	14,65	0,107	0,068	0,029	0,047
W 460 x 106,0	14,57	0,108	0,068	0,030	0,048
W 530 x 66,0	15,93	0,062	0,038	0,016	0,028
W 530 x 74,0	15,83	0,065	0,040	0,017	0,031
W 530 x 85,0	15,79	0,068	0,041	0,019	0,036
W 530 x 92,0	13,32	0,122	0,081	0,032	0,038
W 530 x 101,0	13,25	0,125	0,082	0,033	0,040
W 530 x 109,0	13,19	0,127	0,083	0,034	0,041
W 610 x 125,0	12,00	0,158	0,108	0,041	0,041
W 610 x 140,0	11,94	0,160	0,109	0,043	0,043
W 610 x 155,0	9,45	0,287	0,220	0,174	0,136
W 610 x 174,0	9,40	0,288	0,220	0,174	0,135
W 610 x 195,0	9,33	0,291	0,221	0,174	0,137
W 610 x 217,0	9,28	0,295	0,222	0,175	0,139

Fonte: Próprio autor

C.1.5.5 Força axial resistente de cálculo com a nova curva de flambagem

Nessa seção será apresentada a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio, conforme a Equação (4.1) do capítulo 4 desse trabalho, com a utilização do fator de imperfeição $\alpha = 2,0$. As Tabelas C.54 até a Tabela C.56 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 3 metros, respeitando as três condições de vinculação em TRRF 30, 60, 90 e 120 minutos.

Tabela C.54: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1590,1	898,1	288,8	147,3
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	2000,3	1068,2	370,1	192,2
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2766,1	1824,2	993,3	389,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	3067,7	1971,5	1065,3	440,3
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	4047,4	2646,5	1362,5	548,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	4386,9	2804,8	1457,4	608,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	4555,3	2880,6	1505,6	637,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	2018,1	1138,3	365,3	188,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	2158,1	1190,8	393,5	203,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	2349,8	1261,4	429,1	224,3
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2600,3	1343,1	472,9	254,1
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2927,7	1453,7	528,7	291,3
W 310 x 97,0 (H)	13,05	3680,2	2387,5	1232,8	504,0
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3909,4	2482,4	1286,7	542,5
W 310 x 117,0 (H)	12,88	4163,4	2578,0	1344,3	583,4
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4472,5	2693,2	1415,9	632,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	3101,9	1932,5	769,4	361,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3324,5	2023,1	820,0	396,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	3529,1	2103,4	866,2	427,6
W 360 x 122,0 (H)	13,29	3797,2	2208,1	921,3	464,5
W 410 x 46,1	19,25	525,9	183,8	80,1	61,0
W 410 x 53,0	16,26	1150,9	579,0	180,6	123,3
W 410 x 60,0	16,15	1243,1	628,3	206,0	140,4
W 410 x 75,0	15,95	1468,3	743,9	258,1	173,7
W 410 x 85,0	15,85	1930,7	970,9	307,2	205,4
W 460 x 52,0	17,60	824,0	356,1	116,0	82,8
W 460 x 68,0	17,34	1034,3	457,4	162,5	113,0
W 460 x 82,0	14,82	2116,6	1192,1	364,0	225,8
W 460 x 97,0	14,65	2387,6	1316,2	430,1	274,0
W 460 x 106,0	14,57	2558,1	1393,3	469,4	301,6
W 530 x 66,0	15,93	1432,8	768,8	197,6	124,9
W 530 x 74,0	15,83	1556,7	836,5	229,4	146,1
W 530 x 85,0	15,79	1696,3	896,3	263,8	169,4
W 530 x 92,0	13,32	2718,3	1637,5	573,6	355,2
W 530 x 101,0	13,25	2890,4	1717,7	621,1	391,2
W 530 x 109,0	13,19	3043,1	1788,6	661,6	421,7
W 610 x 125,0	12,00	4504,2	2891,6	1106,1	701,8
W 610 x 140,0	11,94	4839,8	3047,1	1199,4	773,3
W 610 x 155,0	9,45	7396,5	5212,9	3732,9	2630,3
W 610 x 174,0	9,40	7924,4	5442,7	3924,8	2778,9
W 610 x 195,0	9,33	8574,5	5722,4	4158,5	2979,5
W 610 x 217,0	9,28	9286,5	5966,4	4358,9	3148,7

Fonte: Próprio autor

Tabela C.55: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1204,7	662,3	200,5	110,7
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1520,6	789,0	260,9	146,2
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	2188,4	1397,9	744,9	282,7
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2427,3	1509,8	798,9	322,7
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	3236,2	2049,4	1023,1	399,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3509,1	2171,4	1096,2	445,1
HP 310 x 132 (H)	12,76	3645,1	2230,2	1133,5	467,7
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1554,9	851,9	253,7	142,3
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1664,9	892,1	274,9	154,2
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1814,5	945,2	301,4	170,5
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2012,6	1007,8	334,4	193,6
W 250 x 115,0 (H)	15,16	2272,5	1092,3	376,3	222,5
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2954,9	1859,5	926,2	368,2
W 310 x 107,0 (H)	12,97	3140,2	1933,5	968,1	398,3
W 310 x 117,0 (H)	12,88	3346,2	2008,6	1013,0	430,3
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3596,7	2098,6	1068,8	468,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2395,4	1439,6	534,0	255,4
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2570,1	1507,7	571,3	281,9
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2731,2	1568,3	605,5	305,0
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2939,9	1645,5	645,7	332,4
W 410 x 46,1	19,25	335,6	111,1	49,3	39,4
W 410 x 53,0	16,26	790,0	377,7	111,3	79,4
W 410 x 60,0	16,15	858,3	412,5	128,0	91,4
W 410 x 75,0	15,95	1019,6	490,1	161,6	114,4
W 410 x 85,0	15,85	1352,7	643,1	191,4	134,9
W 460 x 52,0	17,60	537,7	220,4	70,1	52,5
W 460 x 68,0	17,34	683,6	286,4	99,6	73,2
W 460 x 82,0	14,82	1500,9	805,6	226,2	146,6
W 460 x 97,0	14,65	1701,9	891,6	269,0	178,9
W 460 x 106,0	14,57	1827,0	943,9	294,2	197,3
W 530 x 66,0	15,93	960,8	491,6	118,2	77,8
W 530 x 74,0	15,83	1048,4	536,8	138,1	91,9
W 530 x 85,0	15,79	1147,9	577,0	160,0	107,8
W 530 x 92,0	13,32	1969,6	1130,8	361,4	227,0
W 530 x 101,0	13,25	2099,5	1187,7	392,7	251,2
W 530 x 109,0	13,19	2214,8	1237,8	419,3	271,6
W 610 x 125,0	12,00	3369,0	2065,0	713,0	451,6
W 610 x 140,0	11,94	3626,0	2176,5	775,2	499,6
W 610 x 155,0	9,45	5961,1	4064,0	2825,9	1930,4
W 610 x 174,0	9,40	6388,9	4242,4	2970,0	2039,0
W 610 x 195,0	9,33	6920,8	4462,6	3148,1	2189,8
W 610 x 217,0	9,28	7507,4	4655,8	3302,1	2317,6

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.56: Força axial resistente de cálculo da coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	842,0	449,5	128,0	76,6
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1066,8	536,4	169,2	102,7
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1607,9	989,7	514,8	188,9
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1783,8	1068,0	552,2	217,6
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2408,4	1468,4	708,1	267,9
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2612,8	1555,3	760,0	299,8
HP 310 x 132 (H)	12,76	2715,4	1597,5	786,8	315,6
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1107,6	587,4	162,1	98,9
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1187,8	615,8	176,6	107,7
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1295,9	652,7	194,6	119,6
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1441,1	696,8	217,5	136,2
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1632,6	756,5	246,3	156,9
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2210,4	1341,2	641,4	247,4
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2350,0	1394,7	671,4	269,0
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2506,0	1449,5	703,8	292,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2695,4	1514,6	744,0	319,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1710,8	987,8	340,9	165,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1837,8	1034,9	366,0	184,1
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1955,5	1077,0	389,3	200,0
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2105,9	1129,5	416,2	218,6
W 410 x 46,1	19,25	198,4	62,6	28,3	23,5
W 410 x 53,0	16,26	499,0	227,6	63,8	47,3
W 410 x 60,0	16,15	545,3	250,1	73,9	55,0
W 410 x 75,0	15,95	651,2	298,1	93,9	69,5
W 410 x 85,0	15,85	871,4	393,1	110,8	81,9
W 460 x 52,0	17,60	324,2	126,9	39,5	30,9
W 460 x 68,0	17,34	416,9	166,5	56,9	43,8
W 460 x 82,0	14,82	978,6	501,5	130,7	88,0
W 460 x 97,0	14,65	1115,3	556,3	156,3	107,9
W 460 x 106,0	14,57	1199,6	589,0	171,3	119,2
W 530 x 66,0	15,93	593,9	291,1	66,1	45,0
W 530 x 74,0	15,83	650,6	319,0	77,6	53,6
W 530 x 85,0	15,79	715,5	343,8	90,5	63,5
W 530 x 92,0	13,32	1312,4	718,5	211,3	134,3
W 530 x 101,0	13,25	1402,5	755,5	230,3	149,3
W 530 x 109,0	13,19	1482,5	788,0	246,4	161,9
W 610 x 125,0	12,00	2321,7	1355,7	425,3	268,9
W 610 x 140,0	11,94	2503,2	1429,3	463,5	298,6
W 610 x 155,0	9,45	4479,5	2934,7	1973,4	1303,6
W 610 x 174,0	9,40	4803,1	3062,8	2073,1	1376,6
W 610 x 195,0	9,33	5210,1	3223,7	2198,3	1480,8
W 610 x 217,0	9,28	5662,8	3365,7	2307,7	1569,8

Fonte: Próprio autor

Já as Tabelas C.57 até a Tabela C.59 apresentam a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos em situação de incêndio para a coluna de 5 metros, respeitando as três condições de vinculação e os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

Tabela C.57: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1019,7	552,6	162,2	93,2
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	1289,5	658,8	212,8	124,1
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1897,7	1190,7	627,0	234,1
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	2105,0	1285,4	672,6	268,4
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2823,4	1755,7	861,8	331,5
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	3062,3	1860,0	924,2	369,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	3181,7	1910,4	956,2	389,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	1328,4	716,3	205,4	120,1
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1423,4	750,5	223,1	130,5
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1552,1	795,3	245,2	144,5
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1723,7	848,5	273,1	164,4
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1949,4	920,4	308,3	189,2
W 310 x 97,0 (H)	13,05	2584,3	1598,2	780,4	305,6
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2746,9	1661,8	816,3	331,5
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2928,2	1726,8	854,9	359,0
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3148,4	1804,2	902,9	391,3
W 360 x 91,0 (H)	13,54	2049,0	1207,6	432,1	208,5
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2199,7	1264,9	463,1	230,7
W 360 x 110,0 (H)	13,37	2339,1	1316,0	491,7	250,1
W 360 x 122,0 (H)	13,29	2518,3	1380,5	525,0	273,0
W 410 x 46,1	19,25	261,1	84,3	37,8	30,8
W 410 x 53,0	16,26	635,7	296,7	85,2	62,0
W 410 x 60,0	16,15	692,7	325,1	98,4	71,7
W 410 x 75,0	15,95	825,1	386,8	124,6	90,3
W 410 x 85,0	15,85	1099,5	508,9	147,3	106,4
W 460 x 52,0	17,60	422,5	169,1	53,2	40,7
W 460 x 68,0	17,34	540,3	220,9	76,1	57,3
W 460 x 82,0	14,82	1227,3	643,4	173,9	114,9
W 460 x 97,0	14,65	1395,3	713,0	207,4	140,6
W 460 x 106,0	14,57	1499,2	754,9	227,0	155,2
W 530 x 66,0	15,93	764,7	382,7	89,3	59,9
W 530 x 74,0	15,83	836,1	418,7	104,7	71,0
W 530 x 85,0	15,79	917,5	450,6	121,6	83,7
W 530 x 92,0	13,32	1628,2	912,7	279,6	176,7
W 530 x 101,0	13,25	1737,8	959,1	304,2	195,9
W 530 x 109,0	13,19	1835,1	1000,0	325,1	212,2
W 610 x 125,0	12,00	2832,0	1694,5	557,2	352,6
W 610 x 140,0	11,94	3050,6	1786,2	606,5	390,8
W 610 x 155,0	9,45	5224,8	3494,9	2390,9	1606,5
W 610 x 174,0	9,40	5601,0	3647,8	2512,3	1696,7
W 610 x 195,0	9,33	6071,2	3838,3	2663,5	1823,6
W 610 x 217,0	9,28	6592,0	4005,9	2794,9	1931,6

Fonte: Próprio autor

Apêndice C

Tabela C.58: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	706,6	372,7	103,6	64,0
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	896,6	445,0	137,7	86,3
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	1378,9	835,0	429,9	155,6
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1529,8	900,8	461,2	179,9
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	2077,2	1245,3	591,7	221,0
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	2254,1	1318,8	635,6	247,7
HP 310 x 132 (H)	12,76	2343,0	1354,6	658,3	261,1
W 250 x 73,0 (H)	15,78	937,0	490,2	131,2	82,8
W 250 x 80,0 (H)	15,66	1005,4	514,0	143,3	90,4
W 250 x 89,0 (H)	15,50	1097,5	544,9	158,2	100,5
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1221,9	582,1	177,2	114,6
W 250 x 115,0 (H)	15,16	1386,2	632,4	201,2	132,2
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1910,9	1140,7	536,1	204,3
W 310 x 107,0 (H)	12,97	2032,0	1186,2	561,6	222,6
W 310 x 117,0 (H)	12,88	2167,6	1233,1	589,1	242,1
W 310 x 129,0 (H)	12,78	2332,2	1288,5	623,3	265,0
W 360 x 91,0 (H)	13,54	1448,8	822,5	275,9	135,2
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1557,3	861,9	296,6	150,3
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1657,9	897,2	315,9	163,5
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1785,8	940,7	338,0	179,0
W 410 x 46,1	19,25	156,0	48,4	22,0	18,5
W 410 x 53,0	16,26	402,2	180,3	49,6	37,3
W 410 x 60,0	16,15	440,4	198,5	57,6	43,5
W 410 x 75,0	15,95	527,0	236,8	73,4	55,2
W 410 x 85,0	15,85	707,7	312,9	86,5	65,0
W 460 x 52,0	17,60	256,8	98,8	30,5	24,2
W 460 x 68,0	17,34	331,6	130,1	44,1	34,6
W 460 x 82,0	14,82	798,4	401,9	101,9	69,5
W 460 x 97,0	14,65	911,8	446,2	122,1	85,5
W 460 x 106,0	14,57	981,4	472,5	133,9	94,5
W 530 x 66,0	15,93	474,8	229,0	50,9	35,1
W 530 x 74,0	15,83	520,8	251,2	59,9	42,0
W 530 x 85,0	15,79	573,8	271,0	70,0	49,9
W 530 x 92,0	13,32	1079,9	580,3	165,5	105,6
W 530 x 101,0	13,25	1155,3	610,5	180,5	117,6
W 530 x 109,0	13,19	1222,2	637,0	193,3	127,7
W 610 x 125,0	12,00	1936,8	1109,1	335,5	212,0
W 610 x 140,0	11,94	2089,8	1169,4	365,9	235,7
W 610 x 155,0	9,45	3880,6	2497,4	1655,3	1078,5
W 610 x 174,0	9,40	4161,8	2606,1	1738,6	1138,7
W 610 x 195,0	9,33	4517,3	2743,7	1844,0	1225,8
W 610 x 217,0	9,28	4914,3	2865,5	1936,4	1300,3

Fonte: Próprio autor

Tabela C.59: Força axial resistente de cálculo da coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	450,4	231,6	61,3	40,5
HP 250 x 85,0 (H)	15,57	573,4	276,9	82,4	55,3
HP 310 x 79,0 (H)	13,22	921,4	538,5	271,3	95,5
HP 310 x 93,0 (H)	13,09	1022,4	580,4	291,1	111,2
HP 310 x 110,0 (H)	12,95	1406,2	812,0	373,9	135,8
HP 310 x 125,0 (H)	12,82	1526,8	859,7	402,2	152,9
HP 310 x 132 (H)	12,76	1587,8	883,1	417,0	161,5
W 250 x 73,0 (H)	15,78	607,7	308,7	77,7	52,5
W 250 x 80,0 (H)	15,66	653,0	324,1	85,1	57,6
W 250 x 89,0 (H)	15,50	713,5	343,6	94,4	64,2
W 250 x 101,0 (H)	15,36	796,3	367,5	106,4	73,5
W 250 x 115,0 (H)	15,16	906,2	399,8	121,4	85,0
W 310 x 97,0 (H)	13,05	1300,5	748,6	338,9	125,9
W 310 x 107,0 (H)	12,97	1383,6	778,5	355,5	137,7
W 310 x 117,0 (H)	12,88	1477,1	809,5	373,5	150,4
W 310 x 129,0 (H)	12,78	1590,4	846,1	395,8	165,2
W 360 x 91,0 (H)	13,54	941,9	515,8	163,2	81,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	1013,6	540,7	176,0	90,5
W 360 x 110,0 (H)	13,37	1080,4	563,1	187,8	98,8
W 360 x 122,0 (H)	13,29	1164,2	590,1	201,4	108,4
W 410 x 46,1	19,25	87,1	26,1	12,0	10,4
W 410 x 53,0	16,26	236,0	102,1	27,1	21,0
W 410 x 60,0	16,15	259,5	112,9	31,6	24,6
W 410 x 75,0	15,95	311,9	135,0	40,5	31,5
W 410 x 85,0	15,85	421,6	179,1	47,5	37,0
W 460 x 52,0	17,60	145,5	54,1	16,4	13,5
W 460 x 68,0	17,34	189,5	71,8	24,0	19,5
W 460 x 82,0	14,82	480,1	233,2	55,9	39,3
W 460 x 97,0	14,65	550,5	259,4	67,3	48,4
W 460 x 106,0	14,57	593,4	274,6	73,9	53,6
W 530 x 66,0	15,93	274,0	128,1	27,3	19,3
W 530 x 74,0	15,83	301,5	140,8	32,2	23,2
W 530 x 85,0	15,79	333,3	152,2	37,8	27,8
W 530 x 92,0	13,32	660,8	342,0	91,7	59,0
W 530 x 101,0	13,25	708,4	360,1	100,2	65,9
W 530 x 109,0	13,19	750,7	376,0	107,4	71,7
W 610 x 125,0	12,00	1219,2	670,6	188,6	119,0
W 610 x 140,0	11,94	1317,6	707,2	206,0	132,7
W 610 x 155,0	9,45	2653,9	1640,7	1054,2	667,3
W 610 x 174,0	9,40	2847,6	1711,7	1106,9	704,4
W 610 x 195,0	9,33	3095,3	1803,1	1174,4	759,4
W 610 x 217,0	9,28	3374,4	1884,5	1234,1	806,6

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE D – RESULTADOS NUMÉRICOS DO MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Nesse apêndice são apresentados todos os resultados obtidos pelas análises numéricas do ANSYS.

D.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS

O presente apêndice apresenta as tabelas contendo os resultados numéricos das modelagens tridimensionais das cargas resistentes dos pilares mistos em situação de incêndio.

D.1.1 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM LINEAR ELÁSTICA

A partir da Tabela D.1 até a Tabela D.3 são apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas tridimensionais para a resistência à flambagem elástica dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de 3m, para diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo e para diferentes comprimentos de flambagem.

Tabela D.1: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	16488.0	9288.0	4438.9	8306.1
W 250 x 101.0 (H)	15.36	29931.0	17042.0	8148.6	12590.0
W 310 x 129.0 (H)	12.78	61560.0	38366.0	18579.0	29573.0
W 360 x 101.0 (H)	13.45	35379.0	20254.0	9727.1	17789.0
W 410 x 60.0	16.15	8345.2	4367.9	2064.3	4215.5
W 460 x 68.0	17.34	6143.5	3144.8	1478.8	2811.2
W 460 x 106.0 v	14.57	18811.0	10005.0	4743.6	8740.8
W 530 x 74.0	15.83	9026.3	4794.6	2206.2	4719.1
W 610 x 125.0	12.00	38078.0	20336.0	10141.0	20380.0
W 610 x 174.0	9.40	108790.0	66824.0	32619.0	58582.0
HEB200	20.00	9254.2	4988.2	2367.1	3435.0
HEB220	18.18	15350.0	8165.5	4053.2	6171.2
HEB240	16.67	21496.0	12096.0	5782.1	8768.9
HEB260	15.38	33514.0	19575.0	9451.3	14853.0
HEB280	14.29	43123.0	25654.0	12411.0	19373.0
HEB300	13.33	55462.0	33585.0	16276.0	24870.0
HEB320	12.92	60242.0	36331.0	17577.0	26431.0
HEB340	12.55	74018.0	45436.0	22167.0	33864.0
HEB360	12.22	77910.0	47650.0	23213.0	35317.0
HEB400	11.67	85074.0	51769.0	25184.0	40297.0
HEB450	11.11	93785.0	56751.0	27542.0	43561.0
HEB500	10.67	102470.0	61741.0	29911.0	46718.0

Fonte: Próprio autor

Apêndice D

Tabela D.2: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	9288.0	4438.9	8306.1	4801.0
W 250 x 101.0 (H)	15.36	17042.0	8148.6	12590.0	7399.8
W 310 x 129.0 (H)	12.78	38366.0	18579.0	29573.0	18578.0
W 360 x 101.0 (H)	13.45	20254.0	9727.1	17789.0	10443.0
W 410 x 60.0	16.15	4367.9	2064.3	4215.5	2222.8
W 460 x 68.0	17.34	3144.8	1478.8	2811.2	1441.5
W 460 x 106.0 v	14.57	10005.0	4743.6	8740.8	4698.2
W 530 x 74.0	15.83	4794.6	2206.2	4719.1	2510.7
W 610 x 125.0	12.00	20336.0	10141.0	20380.0	11077.0
W 610 x 174.0	9.40	66824.0	32619.0	58582.0	36431.0
HEB200	20.00	4988.2	2367.1	3435.0	1884.0
HEB220	18.18	8165.5	4053.2	6171.2	3367.8
HEB240	16.67	12096.0	5782.1	8768.9	5058.7
HEB260	15.38	19575.0	9451.3	14853.0	8964.9
HEB280	14.29	25654.0	12411.0	19373.0	11877.0
HEB300	13.33	33585.0	16276.0	24870.0	15468.0
HEB320	12.92	36331.0	17577.0	26431.0	16305.0
HEB340	12.55	45436.0	22167.0	33864.0	21380.0
HEB360	12.22	47650.0	23213.0	35317.0	22139.0
HEB400	11.67	51769.0	25184.0	40297.0	25111.0
HEB450	11.11	56751.0	27542.0	43561.0	26814.0
HEB500	10.67	61741.0	29911.0	46718.0	28471.0

Fonte: Próprio autor

Tabela D.3: Força de flambagem elástica para a coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	4438.9	8306.1	4801.0	2324.9
W 250 x 101.0 (H)	15.36	8148.6	12590.0	7399.8	3602.7
W 310 x 129.0 (H)	12.78	18579.0	29573.0	18578.0	9208.4
W 360 x 101.0 (H)	13.45	9727.1	17789.0	10443.0	5106.4
W 410 x 60.0	16.15	2064.3	4215.5	2222.8	1058.2
W 460 x 68.0	17.34	1478.8	2811.2	1441.5	680.6
W 460 x 106.0 v	14.57	4743.6	8740.8	4698.2	2253.8
W 530 x 74.0	15.83	2206.2	4719.1	2510.7	1170.5
W 610 x 125.0	12.00	10141.0	20380.0	11077.0	5620.2
W 610 x 174.0	9.40	32619.0	58582.0	36431.0	18150.0
HEB200	20.00	2367.1	3435.0	1884.0	901.6
HEB220	18.18	4053.2	6171.2	3367.8	1693.1
HEB240	16.67	5782.1	8768.9	5058.7	2452.1
HEB260	15.38	9451.3	14853.0	8964.9	4416.2
HEB280	14.29	12411.0	19373.0	11877.0	5856.6
HEB300	13.33	16276.0	24870.0	15468.0	7633.1
HEB320	12.92	17577.0	26431.0	16305.0	8021.4
HEB340	12.55	22167.0	33864.0	21380.0	10666.0
HEB360	12.22	23213.0	35317.0	22139.0	11016.0
HEB400	11.67	25184.0	40297.0	25111.0	12470.0
HEB450	11.11	27542.0	43561.0	26814.0	13259.0
HEB500	10.67	29911.0	46718.0	28471.0	14034.0

Fonte: Próprio autor

Já para a Tabela D.4 até a Tabela D.6 são apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas tridimensionais para a resistência à flambagem elástica dos pilares mistos

parcialmente revestidos em situação de incêndio de 5m, para diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo e para diferentes comprimentos de flambagem.

Tabela D.4: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	6248.6	3367.2	1614.4	3230.8
W 250 x 101.0 (H)	15.36	11385.0	6177.7	2962.4	4957.7
W 310 x 129.0 (H)	12.78	24957.0	14115.0	6799.8	12128.0
W 360 x 101.0 (H)	13.45	13587.0	7391.5	3550.0	7048.4
W 410 x 60.0	16.15	3054.4	1576.8	752.8	1563.0
W 460 x 68.0	17.34	2223.6	1134.2	540.5	1025.9
W 460 x 106.0 v	14.57	6939.9	3612.9	1726.8	3291.9
W 530 x 74.0	15.83	3382.3	1734.2	827.4	1783.3
W 610 x 125.0	12.00	14718.0	7838.0	3759.4	8106.4
W 610 x 174.0	9.40	44278.0	25145.0	12129.0	24511.0
HEB200	20.00	3468.1	1820.2	870.4	1304.5
HEB220	18.18	5771.2	3075.2	1473.8	2381.9
HEB240	16.67	8164.1	4396.6	2108.2	3418.0
HEB260	15.38	13043.0	7185.0	3457.9	5988.6
HEB280	14.29	16962.0	9459.7	4556.1	7866.2
HEB300	13.33	21903.0	12365.0	5958.8	10119.0
HEB320	12.92	23715.0	13353.0	6430.4	10693.0
HEB340	12.55	29481.0	16786.0	8109.3	13992.0
HEB360	12.22	30997.0	17605.0	8500.3	14522.0
HEB400	11.67	33769.0	19113.0	9223.1	16492.0
HEB450	11.11	37030.0	20881.0	10066.0	17672.0
HEB500	10.67	40376.0	22701.0	10936.0	18839.0

Fonte: Próprio autor

Tabela D.5: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	3367.2	1614.4	3230.8	1766.5
W 250 x 101.0 (H)	15.36	6177.7	2962.4	4957.7	2738.3
W 310 x 129.0 (H)	12.78	14115.0	6799.8	12128.0	7009.9
W 360 x 101.0 (H)	13.45	7391.5	3550.0	7048.4	3886.1
W 410 x 60.0	16.15	1576.8	752.8	1563.0	808.9
W 460 x 68.0	17.34	1134.2	540.5	1025.9	523.3
W 460 x 106.0 v	14.57	3612.9	1726.8	3291.9	1720.0
W 530 x 74.0	15.83	1734.2	827.4	1783.3	916.3
W 610 x 125.0	12.00	7838.0	3759.4	8106.4	4346.3
W 610 x 174.0	9.40	25145.0	12129.0	24511.0	14003.0
HEB200	20.00	1820.2	870.4	1304.5	691.0
HEB220	18.18	3075.2	1473.8	2381.9	1286.2
HEB240	16.67	4396.6	2108.2	3418.0	1865.7
HEB260	15.38	7185.0	3457.9	5988.6	3363.2
HEB280	14.29	9459.7	4556.1	7866.2	4470.1
HEB300	13.33	12365.0	5958.8	10119.0	5809.0
HEB320	12.92	13353.0	6430.4	10693.0	6103.5
HEB340	12.55	16786.0	8109.3	13992.0	8105.2
HEB360	12.22	17605.0	8500.3	14522.0	8369.9
HEB400	11.67	19113.0	9223.1	16492.0	9465.3
HEB450	11.11	20881.0	10066.0	17672.0	10056.0
HEB500	10.67	22701.0	10936.0	18839.0	10646.0

Fonte: Próprio autor

Apêndice D

Tabela D.6: Força de flambagem elástica para a coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,el} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	1614.4	3230.8	1766.5	851.1
W 250 x 101.0 (H)	15.36	2962.4	4957.7	2738.3	1322.0
W 310 x 129.0 (H)	12.78	6799.8	12128.0	7009.9	3407.3
W 360 x 101.0 (H)	13.45	3550.0	7048.4	3886.1	1879.2
W 410 x 60.0	16.15	752.8	1563.0	808.9	387.3
W 460 x 68.0	17.34	540.5	1025.9	523.3	249.8
W 460 x 106.0 v	14.57	1726.8	3291.9	1720.0	825.7
W 530 x 74.0	15.83	827.4	1783.3	916.3	438.4
W 610 x 125.0	12.00	3759.4	8106.4	4346.3	2099.4
W 610 x 174.0	9.40	12129.0	24511.0	14003.0	6809.7
HEB200	20.00	870.4	1304.5	691.0	331.5
HEB220	18.18	1473.8	2381.9	1286.2	619.6
HEB240	16.67	2108.2	3418.0	1865.7	899.3
HEB260	15.38	3457.9	5988.6	3363.2	1631.0
HEB280	14.29	4556.1	7866.2	4470.1	2168.9
HEB300	13.33	5958.8	10119.0	5809.0	2818.7
HEB320	12.92	6430.4	10693.0	6103.5	2958.2
HEB340	12.55	8109.3	13992.0	8105.2	3948.9
HEB360	12.22	8500.3	14522.0	8369.9	4073.7
HEB400	11.67	9223.1	16492.0	9465.3	4603.1
HEB450	11.11	10066.0	17672.0	10056.0	4882.3
HEB500	10.67	10936.0	18839.0	10646.0	5162.2

Fonte: Próprio autor

D.1.2 RESULTADOS DA FORÇA AXIAL DE PLASTIFICAÇÃO

Os resultados da resistência plástica obtidos por meio das simulações numéricas tridimensionais no ANSYS estão apresentados na Tabela D.7.

Tabela D.7: Resistência plástica à compressão axial em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,pl,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250x62.0 (H)	15.94	3173.0	1979.0	1200.1	691.6
W 250 x 101.0 (H)	15.36	3685.1	1650.1	927.5	470.7
W 310 x 129.0 (H)	12.78	5895.8	3685.6	2827.8	1856.2
W 360 x 101.0 (H)	13.45	4747.5	3230.0	2584.0	1575.1
W 410 x 60.0	16.15	3143.2	2357.2	1568.6	943.9
W 460 x 68.0	17.34	3207.9	2475.7	1542.0	894.2
W 460 x 106.0 v	14.57	5392.6	4128.5	2953.8	1863.5
W 530 x 74.0	15.83	4690.6	3472.8	2416.3	1464.8
W 610 x 125.0	12.00	7888.0	6170.8	4881.0	3529.9
W 610 x 174.0	9.40	9625.8	7344.0	6425.9	4914.6
HEB200	20.00	1993.9	1217.2	560.8	277.3
HEB220	18.18	2685.8	1823.5	923.5	418.2
HEB240	16.67	3081.6	2158.5	1174.5	599.6
HEB260	15.38	4036.9	3037.6	1810.0	978.8
HEB280	14.29	4459.1	3361.3	2143.9	1245.6
HEB300	13.33	4961.4	3712.9	2490.2	1541.9
HEB320	12.92	5331.2	3953.1	2709.1	1724.3
HEB340	12.55	6501.1	5029.0	3476.2	2206.5
HEB360	12.22	6823.1	5268.1	3696.4	2410.9
HEB400	11.67	7442.0	5799.7	4515.4	3222.8
HEB450	11.11	8207.8	6352.9	5025.3	3751.9
HEB500	10.67	8956.6	6904.4	5536.0	4244.2

Fonte: Próprio autor

D.1.3 RESULTADOS DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

A partir da Tabela D.8 até a Tabela D.10 são apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas tridimensionais para a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de 3m, para diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo e para diferentes comprimentos de flambagem.

Tabela D.8: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 3m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2341,7	2106,6	1620,0	1439,1
W 250 x 101,0 (H)	15,36	3609,5	2985,4	2542,4	2045,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	5209,3	4510,0	4406,5	3368,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4841,9	4082,7	3246,6	2808,0
W 410 x 60,0	16,15	2772,5	2537,7	1137,1	1363,6
W 460 x 68,0	17,34	2361,4	1530,2	854,8	1165,9
W 460 x 106,0	14,57	4642,8	3553,1	2311,0	2473,8
W 530 x 74,0	15,83	3291,9	2270,1	1310,0	1762,7
W 610 x 125,0	12,00	7334,2	5882,1	4297,7	4498,4
W 610 x 174,0	9,40	9875,0	9500,4	7948,7	6865,0
HEB200	20,00	1651,2	1301,6	922,7	886,8
HEB220	18,18	2305,5	1899,7	1440,1	1348,7
HEB240	16,67	2757,4	2335,0	1795,1	1734,4
HEB260	15,38	3798,2	3276,9	2648,9	2437,9
HEB280	14,29	4587,1	3710,0	3103,6	2978,6
HEB300	13,33	4775,0	4310,0	3519,0	3039,0
HEB320	12,92	5137,5	4510,0	3804,2	3366,2
HEB340	12,55	6887,6	5725,4	4840,0	4237,5
HEB360	12,22	7261,9	6027,2	5076,1	4487,5
HEB400	11,67	7781,7	6556,0	5554,1	4937,5
HEB450	11,11	8210,0	7137,5	6095,2	5387,5
HEB500	10,67	8761,1	7844,7	6496,2	5805,0

Fonte: Próprio autor

Tabela D.9: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 3m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	2106,6	1620,0	1439,1	1135,3
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2985,4	2542,4	2045,9	1609,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4510,0	4406,5	3368,9	2897,5
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4082,7	3246,6	2808,0	2301,4
W 410 x 60,0	16,15	2537,7	1137,1	1363,6	950,2
W 460 x 68,0	17,34	1530,2	854,8	1165,9	710,0
W 460 x 106,0	14,57	3553,1	2311,0	2473,8	1801,9
W 530 x 74,0	15,83	2270,1	1310,0	1762,7	1208,2
W 610 x 125,0	12,00	5882,1	4297,7	4498,4	3551,2
W 610 x 174,0	9,40	9500,4	7948,7	6865,0	6236,2
HEB200	20,00	1301,6	922,7	886,8	575,2
HEB220	18,18	1899,7	1440,1	1348,7	973,7
HEB240	16,67	2335,0	1795,1	1734,4	1276,0
HEB260	15,38	3276,9	2648,9	2437,9	1964,0
HEB280	14,29	3710,0	3103,6	2978,6	2333,5
HEB300	13,33	4310,0	3519,0	3039,0	2702,8
HEB320	12,92	4510,0	3804,2	3366,2	2887,6
HEB340	12,55	5725,4	4840,0	4237,5	3708,9
HEB360	12,22	6027,2	5076,1	4487,5	3904,1
HEB400	11,67	6556,0	5554,1	4937,5	4337,4
HEB450	11,11	7137,5	6095,2	5387,5	4720,1
HEB500	10,67	7844,7	6496,2	5805,0	5209,2

Fonte: Próprio autor

Tabela D.10: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 3m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1620,0	1439,1	1135,3	792,7
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2542,4	2045,9	1609,9	1126,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4406,5	3368,9	2897,5	2258,3
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3246,6	2808,0	2301,4	1718,1
W 410 x 60,0	16,15	1137,1	1363,6	950,2	577,1
W 460 x 68,0	17,34	854,8	1165,9	710,0	400,1
W 460 x 106,0	14,57	2311,0	2473,8	1801,9	1116,1
W 530 x 74,0	15,83	1310,0	1762,7	1208,2	679,1
W 610 x 125,0	12,00	4297,7	4498,4	3551,2	2496,0
W 610 x 174,0	9,40	7948,7	6865,0	6236,2	5134,0
HEB200	20,00	922,7	886,8	575,2	381,0
HEB220	18,18	1440,1	1348,7	973,7	696,0
HEB240	16,67	1795,1	1734,4	1276,0	925,8
HEB260	15,38	2648,9	2437,9	1964,0	1513,0
HEB280	14,29	3103,6	2978,6	2333,5	1819,4
HEB300	13,33	3519,0	3039,0	2702,8	2158,0
HEB320	12,92	3804,2	3366,2	2887,6	2287,8
HEB340	12,55	4840,0	4237,5	3708,9	2977,3
HEB360	12,22	5076,1	4487,5	3904,1	3122,4
HEB400	11,67	5554,1	4937,5	4337,4	3561,5
HEB450	11,11	6095,2	5387,5	4720,1	3906,0
HEB500	10,67	6496,2	5805,0	5209,2	4251,6

Fonte: Próprio autor

Apêndice D

A partir da Tabela D.11 até a Tabela D.13 são apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas tridimensionais para a força axial resistente de cálculo dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio de 5m, para diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo e para diferentes comprimentos de flambagem.

Tabela D.11: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 5m e 0,5L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1923,0	1506,2	1008,8	1130,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2849,4	2300,1	1651,3	1519,6
W 310 x 129,0 (H)	12,78	5218,4	4332,6	3237,5	2760,0
W 360 x 101,0 (H)	13,45	4051,8	3130,2	2114,6	2185,3
W 410 x 60,0	16,15	1696,1	1043,2	553,7	855,4
W 460 x 68,0	17,34	1352,7	776,0	399,1	634,0
W 460 x 106,0	14,57	3384,3	2150,4	1195,0	1645,6
W 530 x 74,0	15,83	2069,1	1210,0	627,4	1074,7
W 610 x 125,0	12,00	5943,7	4194,7	2510,2	3424,3
W 610 x 174,0	9,40	8950,0	7751,0	5922,5	6155,0
HEB200	20,00	1253,9	903,9	526,8	537,2
HEB220	18,18	1814,6	1410,4	872,4	924,7
HEB240	16,67	2272,1	1777,5	1183,9	1214,6
HEB260	15,38	3175,0	2606,0	1862,2	2109,3
HEB280	14,29	3696,3	3066,8	2272,5	2354,8
HEB300	13,33	4265,5	3498,7	2730,6	2656,7
HEB320	12,92	4530,0	3813,1	2919,4	2842,3
HEB340	12,55	5564,2	4802,1	3712,7	3581,8
HEB360	12,22	6206,9	5017,5	3874,3	3786,8
HEB400	11,67	6381,5	5395,0	4266,9	4667,1
HEB450	11,11	7146,0	6140,0	4576,0	5001,1
HEB500	10,67	7590,1	6445,4	4951,5	5150,0

Fonte: Próprio autor

Tabela D.12: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 5m e 0,7L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1506,2	1008,8	1130,0	811,0
W 250 x 101,0 (H)	15,36	2300,1	1651,3	1519,6	1135,9
W 310 x 129,0 (H)	12,78	4332,6	3237,5	2760,0	2193,9
W 360 x 101,0 (H)	13,45	3130,2	2114,6	2185,3	1636,6
W 410 x 60,0	16,15	1043,2	553,7	855,4	523,2
W 460 x 68,0	17,34	776,0	399,1	634,0	365,9
W 460 x 106,0	14,57	2150,4	1195,0	1645,6	1040,0
W 530 x 74,0	15,83	1210,0	627,4	1074,7	640,0
W 610 x 125,0	12,00	4194,7	2510,2	3424,3	2350,2
W 610 x 174,0	9,40	7751,0	5922,5	6155,0	5040,6
HEB200	20,00	903,9	526,8	537,2	363,8
HEB220	18,18	1410,4	872,4	924,7	657,8
HEB240	16,67	1777,5	1183,9	1214,6	880,3
HEB260	15,38	2606,0	1862,2	2109,3	1451,9
HEB280	14,29	3066,8	2272,5	2354,8	1765,1
HEB300	13,33	3498,7	2730,6	2656,7	2107,1
HEB320	12,92	3813,1	2919,4	2842,3	2225,1
HEB340	12,55	4802,1	3712,7	3581,8	2893,7
HEB360	12,22	5017,5	3874,3	3786,8	3074,2
HEB400	11,67	5395,0	4266,9	4667,1	3488,9
HEB450	11,11	6140,0	4576,0	5001,1	3784,3
HEB500	10,67	6445,4	4951,5	5150,0	4154,3

Fonte: Próprio autor

Tabela D.13: Força axial resistente de cálculo para a coluna de 5m e 1,0L em TRRF 30, 60, 90 e 120

Perfil	(u/A) _p	N _{fi,Rd} [kN]			
		TRRF 30	TRRF 60	TRRF 90	TRRF 120
HP 250 x 62,0 (H)	15,94	1008,8	1130,0	811,0	495,3
W 250 x 101,0 (H)	15,36	1651,3	1519,6	1135,9	722,8
W 310 x 129,0 (H)	12,78	3237,5	2760,0	2193,9	1595,1
W 360 x 101,0 (H)	13,45	2114,6	2185,3	1636,6	1084,3
W 410 x 60,0	16,15	553,7	855,4	523,2	286,3
W 460 x 68,0	17,34	399,1	634,0	365,9	188,3
W 460 x 106,0	14,57	1195,0	1645,6	1040,0	592,5
W 530 x 74,0	15,83	627,4	1074,7	640,0	339,8
W 610 x 125,0	12,00	2510,2	3424,3	2350,2	1397,5
W 610 x 174,0	9,40	5922,5	6155,0	5040,6	3565,0
HEB200	20,00	526,8	537,2	363,8	208,8
HEB220	18,18	872,4	924,7	657,8	401,4
HEB240	16,67	1183,9	1214,6	880,3	565,0
HEB260	15,38	1862,2	2109,3	1451,9	990,0
HEB280	14,29	2272,5	2354,8	1765,1	1243,2
HEB300	13,33	2730,6	2656,7	2107,1	1519,4
HEB320	12,92	2919,4	2842,3	2225,1	1610,4
HEB340	12,55	3712,7	3581,8	2893,7	2141,7
HEB360	12,22	3874,3	3786,8	3074,2	2249,7
HEB400	11,67	4266,9	4667,1	3488,9	2585,5
HEB450	11,11	4576,0	5001,1	3784,3	2798,2
HEB500	10,67	4951,5	5150,0	4154,3	3034,5

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE E – MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Nesse apêndice são apresentados os procedimentos adotados para o Método Avançado de Cálculo.

E.1 TEMPERATURA MÉDIA DO MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL

O presente capítulo desse apêndice apresenta alguns procedimentos adotados para elaborar as formulações para estimar a temperatura média de cada componente da seção transversal do pilar misto parcialmente revestido em situação de incêndio.

Primeiramente foram elaborados modelos bidimensionais para a análise térmica utilizando o *software* ANSYS e coletadas as temperaturas nodais correspondentes a essas componentes das seções transversais de interesse. Para as mesas, a alma, o núcleo de concreto e as armaduras longitudinais, foram coletadas as temperaturas nodais dos elementos que representavam essas componentes na seção transversal mista, em cada um dos TRRF, de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Para calcular a temperatura média nas componentes da seção transversal mista foi elaborada uma planilha no *software* EXCEL contendo as temperaturas nodais, a média aritmética simples foi então aplicada utilizando a relação da soma de todas as temperaturas pela quantidade de nós, em cada uma das componentes, para cada um dos TRRF e para cada uma das 42 seções transversais de interesse.

Os resultados das temperaturas médias dos perfis estruturais estudados por Piloto et al. (2013, 2015, 2017, 2018) foram compilados e agregados aos resultados numéricos do presente trabalho, formando uma base de dados com 83 perfis estruturais.

E.1.1 TEMPERATURA MÉDIA NAS MESAS

Em posse dos resultados numéricos das temperaturas médias do ANSYS, foi elaborada uma nova planilha no *software* EXCEL para buscar padrões e relações na dispersão gráfica dos resultados numéricos.

O EXCEL dispõe de uma função conhecida como CORREL, que retorna um coeficiente da relação de dois intervalos de células. Os resultados variam de -1 até +1, esses valores extremos indicam uma forte correlação entre as matrizes relacionadas. Já o valor zero representa não haver correlação entre os intervalos de células analisados.

Buscou-se, portanto, correlações entre a temperatura média e os parâmetros geométricos das seções transversais estudadas.

Dentre todos os parâmetros geométricos da seção transversal, os que apresentaram maior correlação com a temperatura foram a espessura da mesa e o índice de massividade, apresentados conforme Tabela E.1.

Tabela E.1: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

	Correlação com a Temperatura	
	(u/A)_p	t_f
TRRF30	0,84	-0,98
TRRF60	0,85	-0,97
TRRF90	0,93	-0,91
TRRF120	0,94	-0,88

Fonte: Próprio autor

Para elaborar uma formulação que estime a temperatura média nas mesas do perfil estrutural misto foi empregada a função PROJ.LIN, utilizada para calcular os coeficientes de uma linha reta que melhor se ajusta aos dados, a função realiza a regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados e retorna uma matriz que descreve essa linha.

A matriz resultante retornou os valores dos coeficientes angulares e o termo independente de uma equação linear da reta que melhor se adequou aos dados de entrada.

Dessa forma foi possível estabelecer uma equação linear de primeiro grau para a elevação de temperatura para as mesas do perfil estrutural utilizando dois parâmetros geométricos. A equação resultante para estimar a temperatura média das mesas está novamente apresentada conforme Equação (E.1), e seus coeficientes conforme Tabela E.2.

$$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p + k_{f,t}(t_f) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{E.1})$$

Tabela E.2: Parâmetros para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil

Resistência ao incêndio-padrão	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m.$^{\circ}\text{C}$]	$k_{f,t}$ [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$]
TRRF 30	730	1,80	-5,50
TRRF 60	905	1,50	-3,30
TRRF 90	965	1,30	-1,00
TRRF 120	1015	1,15	-0,64

Fonte: Próprio autor

A respeito da temperatura das mesas, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +2,5% e -2,4%, para todos os perfis estruturais estudados. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +11,2% e -13,0%, para todos os perfis estudados.

E.1.2 TEMPERATURA MÉDIA NA ALMA

O mesmo procedimento das mesas foi realizado para buscar uma equação que estime a temperatura média na alma das seções transversais.

Dentre todos os parâmetros geométricos da seção transversal, os que apresentaram maior correlação com a temperatura foram o índice de massividade e o inverso da área da alma, apresentados conforme Tabela E.3.

Tabela E.3: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

$d_c/b_c \leq 1,7$	Correlação com a Temperatura	
	$(u/A)_p$	$1/A_w$
TRRF30	0,97	0,87
TRRF60	0,95	0,84
TRRF90	0,94	0,81
TRRF120	0,93	0,81
Todos os demais	$(u/A)_p$	$1/A_w$
TRRF30	0,98	0,99
TRRF60	0,99	0,96
TRRF90	0,98	0,92
TRRF120	0,97	0,90

Fonte: Próprio autor

Aplicando a função PROJ.LIN, em cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidas as matrizes contendo os coeficientes da reta que melhor se adequaram aos dados.

A equação resultante para estimar a temperatura média da alma das seções transversais mistas está novamente apresentada conforme Equação (E.2), e seus coeficientes conforme Tabela E.4.

$$\theta_{w,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p + k_{w,t}\left(\frac{1}{A_w}\right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{E.2})$$

Tabela E.4: Parâmetros para a determinação da temperatura média na alma do perfil

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 1,7$			Todos os demais		
	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m. $^{\circ}\text{C}$]	$k_{w,t}$ [mm 2 . $^{\circ}\text{C}$]	$\theta_{0,t}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$k_{IM,t}$ [m. $^{\circ}\text{C}$]	$k_{w,t}$ [mm 2 . $^{\circ}\text{C}$]
TRRF 30	-47,65	23,06	-0,05	35,51	6,92	0,24
TRRF 60	-25,59	38,25	-0,15	17,72	22,72	0,08
TRRF 90	86,59	42,09	-0,19	27,76	35,83	-0,19
TRRF 120	204,78	41,28	-0,19	84,58	40,88	-0,29

Fonte: Próprio autor

Quanto a temperatura da alma, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +8,8% e -12,3% para os perfis nacionais, e entre +9,5% e -19,6% para todos os perfis estudados.

E.1.3 CONCRETO

Para estabelecer a temperatura média de concreto, dentre todos os parâmetros geométricos da seção transversal, os que apresentaram maior correlação com a temperatura foram o índice de massividade e o inverso da área de concreto, apresentados conforme Tabela E.5.

Tabela E.5: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

	Correlação com a Temperatura	
	$(u/A)_p$	$1/A_c$
TRRF30	1,00	0,97
TRRF60	0,99	0,95
TRRF90	0,97	0,96
TRRF120	0,96	0,97

Fonte: Próprio autor

Aplicando a função PROJ.LIN, em cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidas as matrizes contendo os coeficientes da reta que melhor se adequaram aos dados.

A equação resultante para estimar a temperatura média do concreto das seções transversais mistas está novamente apresentada conforme Equação (E.3), e seus coeficientes conforme Tabela E.6.

$$\theta_{c,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p + k_{Ac,t} \left(\frac{1}{A_c} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{E.3})$$

Tabela E.6: Coeficientes para a estimar a temperatura média do núcleo de concreto

Resistência ao incêndio-padrão	$\theta_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m]	$k_{Ac,t}$ [mm.m ²]
TRRF 30	27	13,00	0,45
TRRF 60	55	16,80	2,75
TRRF 90	105	16,00	6,75
TRRF 120	125	15,80	11,00

Fonte: Próprio autor

Já para a camada externa horizontal a ser negligenciada a correlação que melhor se apresentou foi entre o índice de massividade ao quadrado e o inverso da área de concreto, conforme Tabela E.7, Equação (E.4), e coeficientes da fórmula na Tabela E.8.

Tabela E.7: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

dc/bc ≤ 2	Correlação com a Temperatura	
	(u/A)_p²	1/b_c
TRRF30	0,71	0,64
TRRF60	0,95	0,88
TRRF90	0,90	0,88
TRRF120	0,75	0,78
Todos os demais	(u/A)_p²	1/b_c
TRRF30	0,96	0,95
TRRF60	0,95	0,86
TRRF90	0,97	0,97
TRRF120	0,97	0,93

Fonte: Próprio autor

$$b_{c,fi,h} = b_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p^2 + k_{Ac,t} \left(\frac{1}{A_c} \right) \quad [\text{mm}] \quad (\text{E.4})$$

Tabela E.8: Coeficientes para a redução da espessura horizontal do concreto

Resistência ao incêndio-padrão	b_{0,t} [mm]	k_{IM,t} [mm.m ²]	k_{Ac,t} [mm.m ²]
TRRF 30	10,7	0,0025	0,025
TRRF 60	17,5	0,0055	0,450
TRRF 90	18,0	0,0355	1,150
TRRF 120	14,0	0,1311	1,950

Fonte: Próprio autor

Para a camada externa vertical a ser negligenciada a correlação que melhor se apresentou foi entre o índice de massividade ao quadrado, o inverso da largura da seção transversal e o inverso da espessura da mesa, conforme Tabela E.9, Equação (E.5) e coeficientes da fórmula na Tabela E.10.

Tabela E.9: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

dc/bc ≤ 2	Correlação com a Temperatura		
	(u/A)_p²	1/b_c	1/t_r
TRRF 30	0,71	0,64	0,83
TRRF 60	0,95	0,88	0,52
TRRF 90	0,90	0,88	0,17
TRRF 120	0,75	0,78	0,04
Todos os demais	(u/A)_p²	1/b_c	1/t_r
TRRF 30	0,96	0,95	0,83
TRRF 60	0,95	0,86	0,77
TRRF 90	0,97	0,97	0,69
TRRF 120	0,97	0,93	0,69

Fonte: Próprio autor

$$b_{c,fi,v} = b_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p^2 + k_{bc,t} \left(\frac{1}{b_c} \right) + k_{f,t} \left(\frac{1}{t_f} \right) \quad [\text{mm}] \quad (\text{E.5})$$

Tabela E.10: Coeficientes e parâmetros para a redução da espessura vertical do concreto

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 2,0$				Todos os demais			
	$b_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m ²]	$k_{bc,t}$ [mm.m]	$k_{f,t}$ [mm.m]	$b_{0,t}$ [mm]	$k_{IM,t}$ [mm.m ²]	$k_{bc,t}$ [mm.m]	$k_{f,t}$ [mm.m]
TRRF 30	-1,35	0,005	0,40	0,08	0,31	0,015	0,45	0,03
TRRF 60	8,15	0,035	2,15	0,05	18,55	0,235	-6,85	0,02
TRRF 90	-25,25	0,195	13,15	-0,11	-20,95	0,255	12,65	-0,09
TRRF 120	-54,55	0,435	22,85	-0,21	93,55	1,950	-53,65	-0,91

Fonte: Próprio autor

Para as temperaturas do núcleo de concreto, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +5,0% e -8,9%, para todos os perfis estudados. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +29,9% e -28,4%, para todos os perfis estruturais estudados.

A respeito da distância horizontal da porção de concreto a ser desprezada, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +17,4% e -23,1%, para todos os perfis estudados. Apesar de ser um erro relativo consideravelmente alto, o erro absoluto entre as distâncias obtidas de forma analítica e numérica ficaram entre +4,4mm e -6,2mm, ou seja, um erro de no máximo 0,6 centímetros na espessura horizontal de concreto a ser desprezado. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +299,8% e -8,5%, para todos os perfis estruturais estudados, e um erro absoluto que ficou entre +84mm e -35,9mm.

Já para a distância vertical da porção de concreto a ser desprezada, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +23,9% e -15,3%, para todos os perfis nacionais, e entre +23,9% e -29,9% entre todos os perfis estudados. Novamente, apesar de ser um erro relativo consideravelmente alto, o erro absoluto máximo entre as distâncias obtidas de forma analítica e numérica ficaram entre +13,1mm e -13,8mm, ou seja, um erro de no máximo 1,38 centímetros na espessura vertical de concreto a ser desprezado. Já o erro relativo dos valores da ABNT NBR 14323:2013 comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +356,8% e -16,7%, para todos os perfis estruturais estudados, um erro absoluto entre +84mm e -146,5mm.

E.1.4 TEMPERATURA MÉDIA DA ARMADURA LONGITUDINAL

Para estabelecer a temperatura média das armaduras longitudinais, dentre todos os parâmetros geométricos da seção transversal, os que apresentaram maior correlação com a temperatura foram o índice de massividade e o parâmetro u_s , apresentados conforme Tabela E.11.

Tabela E.11: Correlação entre os parâmetros geométricos da seção transversal e a temperatura média

$d_c/b_c \leq 1,7$	Correlação com a Temperatura	
	$(u/A)_p$	u_s
TRRF30	0,72	-0,93
TRRF60	0,90	-0,87
TRRF90	0,94	-0,85
TRRF120	0,93	-0,87
Todos os demais	$(u/A)_p$	u_s
TRRF30	0,96	-0,87
TRRF60	0,97	-0,90
TRRF90	0,97	-0,91
TRRF120	0,97	-0,89

Fonte: Próprio autor

Aplicando a função PROJ.LIN, em cada tempo requerido de resistência ao fogo, foram obtidas as matrizes contendo os coeficientes da reta que melhor se adequaram aos dados.

A equação resultante para estimar a temperatura média das barras das armaduras longitudinais das seções transversais mistas está novamente apresentada conforme Equação (E.6), e seus coeficientes conforme Tabela E.12.

$$\theta_{s,t} = \theta_{0,t} + k_{IM,t}(u/A)_p + k_{s,t}(u_s) \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{E.6})$$

A expressão para determinar o valor de u_s está apresentada conforme a Equação (E.7).

$$u_s = \sqrt{(u_1 + t_f)^2 + u_2^2 + \phi^2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{E.7})$$

Os parâmetros e coeficientes necessários para estimar a temperatura média da armadura longitudinal são definidos conforme a Tabela E.12.

Tabela E.12: Parâmetros para a determinação da temperatura média na armadura longitudinal

Resistência ao incêndio-padrão	$d_c/b_c \leq 1,7$ $(u/A)_p \leq 20,0$			Todos os demais		
	$\theta_{0,t}$ [°C]	$k_{IM,t}$ [m.°C]	$k_{s,t}$ [°C/mm]	$\theta_{0,t}$ [°C]	$k_{IM,t}$ [m.°C]	$k_{s,t}$ [°C/mm]
TRRF 30	290	1,05	-1,20	220	8,85	-1,35
TRRF 60	435	8,65	-1,65	505	11,50	-2,45
TRRF 90	535	12,90	-1,75	690	10,85	-2,75
TRRF 120	675	12,50	-1,95	725	12,65	-2,35

Fonte: Próprio autor

E quanto a temperatura da armadura longitudinal, o erro relativo dos valores da proposta de aprimoramento comparados com os valores obtidos pelo ANSYS ficaram entre +14,8% e -8,1% para os perfis nacionais, e entre +14,8% e -13,6% para todos os perfis estudados.

E.2 MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

E.2.1 ANÁLISE TÉRMICA NÃO LINEAR DO MODELO TRIDIMENSIONAL

Para o método avançado de cálculo, primeiramente busca-se determinar a distribuição de temperaturas na seção transversal do elemento estrutural em diferentes tempos de exposição ao fogo. Os modelos de cálculo levam em consideração as propriedades térmicas dos materiais para cada incremento de tempo. Lembrando que a análise térmica não proporciona uma resposta da capacidade resistente da estrutura, entretanto é fundamental conhecer o campo de temperaturas do elemento para uma posterior análise estática estrutural e a avaliação de seu comportamento em situação de incêndio.

Para estabelecer o campo de temperaturas, conhecendo os mecanismos de transferência de calor envolvidos, o método dos elementos finitos requer a solução da Equação (E.8) no domínio da seção transversal, (Ω) e Equação (E.9) no limite ($\partial\Omega$), quando exposto ao fogo.

$$\nabla(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) = \rho_{(T)} \cdot c_{(T)} \cdot \partial T / \partial t \quad (\Omega) \quad (E.8)$$

$$\lambda_{(T)} \cdot \nabla T \cdot \vec{n} = \alpha_c (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [T_g^4 - T_m^4] \quad (\partial\Omega) \quad (E.9)$$

Nessas equações, T_m representa a temperatura de cada material; $\rho_{(T)}$ é a massa específica em função da temperatura; $c_{(T)}$ representa o calor específico em função da temperatura; $\lambda_{(T)}$ é a condutividade térmica em função da temperatura; α_c especifica o coeficiente de convecção; T_g representa a temperatura do gás do compartimento de incêndio,

utilizando o incêndio-padrão ISO 834-1:1999 em torno da seção transversal, com os quatro lados expostos; Φ representa o fator de configuração; ε_m representa a emissividade de cada material; ε_f específica a emissividade do fogo; e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann.

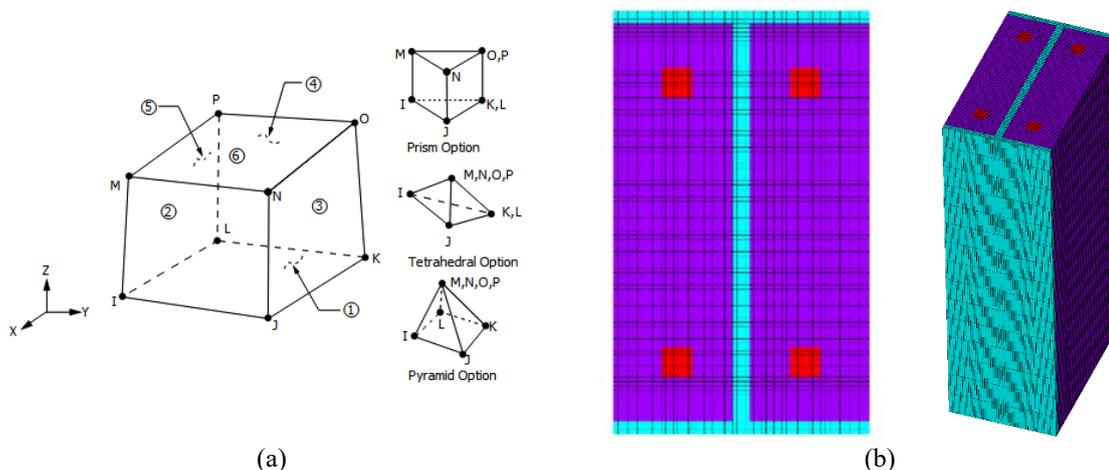
A análise térmica transiente não linear foi definida com um passo de tempo de integração de 60s, onde, não havendo a convergência, o passo pode diminuir para 1s e aumentar até 60s. O critério de convergência usa um valor de tolerância do fluxo de calor, menor que 0,1% com um valor de referência mínimo de 1×10^{-6} %.

As condições de contorno foram aplicadas de acordo com o as formulações da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, na superfície externa da seção transversal, sendo elas as condições de radiação do fogo, $\varepsilon_f = 1,0$ e a temperatura do gás, T_g recebendo o valor conforme evolução da temperatura, segundo a curva de incêndio-padrão ISO 834-1:1999 em [°C].

A condição de convecção $\alpha = 25$ [W/m².K] foi definida nos nós da face externa que representa a seção transversal. A condição inicial de 20°C foi definida para todos os nós da malha de elementos finitos. As propriedades dos materiais foram definidas de acordo com as normas brasileiras e europeias pertinentes de cada material e previamente definidas nos capítulos anteriores do corpo desse trabalho.

Como já mencionado, para realizar uma análise térmica transiente não linear, utilizou-se o elemento “SOLID70” do ANSYS que possui uma capacidade de condução térmica 3D. O elemento possui oito nós com um único grau de liberdade, a temperatura nodal. O elemento também pode compensar o fluxo de calor com transporte de massa a partir de um campo de velocidade constante.

Figura E.1: Geometria do Elemento Finito “SOLID70” e a seção transversal das colunas modeladas



Fonte: Adaptado de ANSYS (2017)

As funções de interpolação são lineares e esse elemento usa pontos de integração completos (2x2x2) para definir a matriz de condutividade. O elemento foi aplicado ao volume do perfil de aço, do concreto e das barras de reforço.

O modelo foi criado geometricamente utilizando a interface gráfica do ANSYS, com *Keypoints*, *Lines*, *Areas* e *Volumes*. Posteriormente foram divididos os segmentos que dariam a forma da malha tridimensional.

O campo de temperatura foi determinado pelo tempo total de 7200s, que representa uma duração máxima de incêndio de 2 horas ou TRRF 120. A curva de temperatura ISO834-1:1999 pode ser definida utilizando a introdução das linhas de comando correspondentes, representados no quadro a seguir.

Quadro E.1: Função da temperatura definida como um parâmetro de entrada no ANSYS.

ISO 834
*DIM,ISO834,TABLE,241,1,1,,,
*SET,ISO834(1,0,1),0
*SET,ISO834(1,1,1),20
*SET,ISO834(2,0,1),60
*SET,ISO834(2,1,1),349.2
*SET,ISO834(3,0,1),120
*SET,ISO834(3,1,1),444.5
*SET,ISO834(4,0,1),180
...

As condições de fronteira foram introduzidas no ANSYS de acordo com:

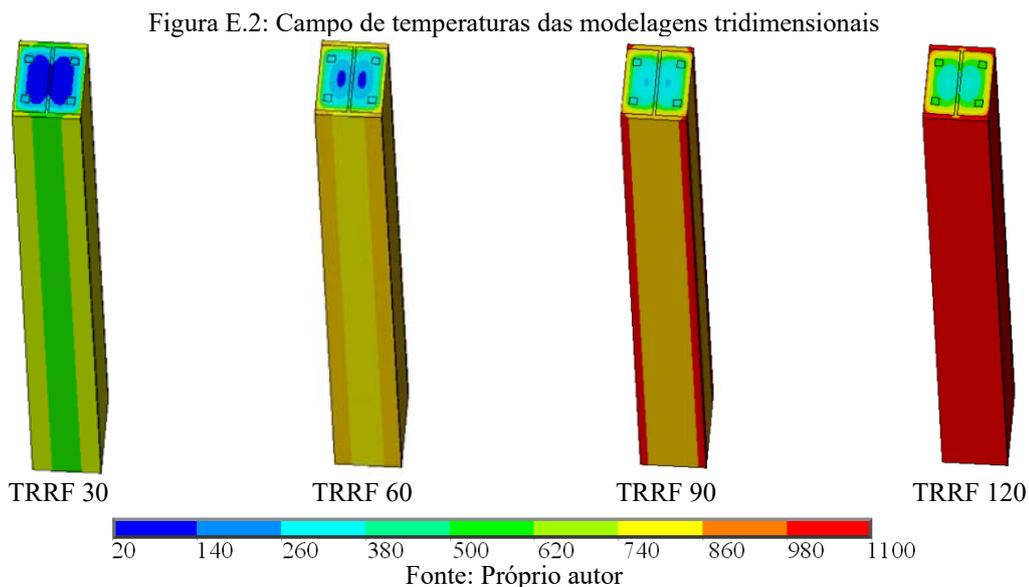
- Foi definida temperatura no nó para o *enclosure*, por exemplo o nó “77777”, com curva nominal de incêndio-padrão ISO 834-1:1999;
- Foram definidas as opções de radiação: constante Stefan Boltzmann de $5,67 \times 10^{-8}$, temperatura *OFFSET* de 273,15, identificando o *Enclosure* com valor 1,0;
- Foi definida a condição inicial de fronteira. Todas as temperaturas nos nós do elemento iguais a 20° C durante o tempo igual a zero;
- Foram definidas as condições de fronteira da convecção, com base num coeficiente de convecção constante 25 [W/m².K] e uma temperatura conforme ISO 834-1:1999;
- Foi selecionada a face adequada de cada elemento que é submetido a convecção, aplicando a todos os Elementos Finitos;
- Foram definidas as condições de fronteira da radiação e selecionadas todas as faces da seção transversal e aplicada a condição de fronteira em todos seus elementos.

Para iniciar a fase de solução, foi definida a análise transiente por meio do controle de solução. O incremento de tempo suficiente para esta solução não linear convergisse de forma satisfatória. A solução de controle é definida no Quadro E.2.

Quadro E.2: Parâmetros imputados no Controle de Solução do ANSYS

<i>Solution Controls</i>	
<i>Time control</i>	<i>Value [s]</i>
<i>Time at the end of loadstep</i>	7200
<i>Time step size</i>	60
<i>Minimum step size</i>	1
<i>Maximum step size</i>	60

Os resultados obtidos foram devidamente analisados nos capítulos do texto principal. A Figura E.2 apresenta o campo de temperaturas obtido por meio da análise térmica tridimensional.



E.2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA LINEAR E NÃO LINEAR

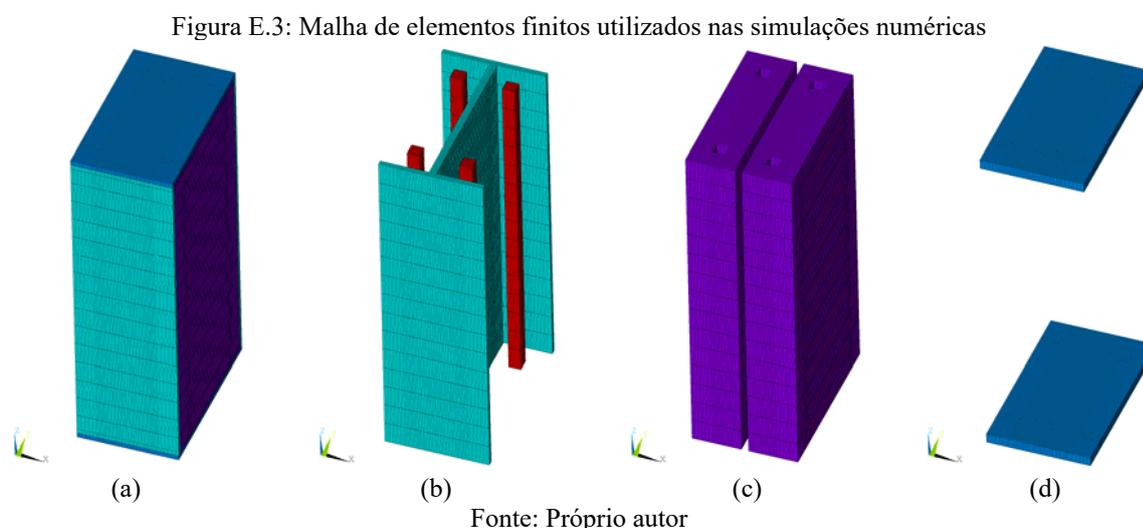
Para que o comportamento da estrutura idealizada se aproxime da realidade, é imprescindível incluir nas análises numéricas o comportamento não linear dos materiais e da geometria do elemento.

Tradicionalmente assume-se o comportamento linear elástico de estruturas de aço ou mistos de aço e concreto em situações de serviço. Entretanto, esse pressuposto ignora possíveis plastificações prematuras devido à tensões residuais ou concentração de tensões nos materiais da seção transversal ou mesmo imperfeições geométricas do elemento como um todo.

É comum que em estruturas compostas de aço e concreto haja um comportamento não linear ao se aproximar de sua resistência última, a não ser que os elementos apresentem falha por fadiga, fratura ou devido instabilidades locais ou globais do elemento.

Em uma análise não linear, o comportamento estrutural não é proporcional à carga aplicada, principalmente por ser considerada a imperfeição geométrica da coluna e importado o campo de temperaturas da análise térmica em conjunto com a consideração das propriedades do regime plástico dos materiais em diversas temperaturas.

Para que fosse efetuada a análise não linear, primeiramente foram alterados os elementos finitos da análise térmica para a análise mecânica. Como já mencionado, para a análise estrutural, o modelo tridimensional utiliza o elemento “SOLID185” para a modelagem da malha do perfil de aço e das barras de reforço, o elemento “SOLID65” foi utilizado para modelar o preenchimento de concreto na coluna, além do elemento “SHELL181” que foi fundamental para modelar as placas rígidas no topo e na base da coluna, nas simulações numéricas.



E.2.2.1 Carga de flexão linear elástica

Para se obter o valor da carga crítica pelo método numérico será considerado o comportamento elástico-linear dos materiais, usando a teoria *eigenvalue*, presente no ANSYS.

A principal finalidade para se utilizar esta teoria dos *eigenvalues* e *eigenvectors*, autovetor e autovalor ou valores e vetores característicos, de um sistema, é determinar a relação entre um sistema estático com diversas variáveis.

Para a presente análise numérica, a teoria de *eigenvalue* produz uma força teórica de flexão de uma estrutura elástica ideal. Esse método calcula os valores estruturais para o sistema de carregamento e restrições. Isso é conhecido como análise clássica de flexão de Euler.

As fontes das não linearidades estruturais podem ser do material, da geometria ou das condições de contorno. Os materiais de interesse têm um comportamento não linear em situação de incêndio, seu entendimento é de fundamental importância para a correta utilização de programas de simulação numérica.

A consequência é que, ao invés de se estabelecerem equações algébricas lineares, equações diferenciais tomam em consideração todos os fatores de contorno do problema.

A análise estática e linear tem como base a solução da Equação (E.10), assumindo que $\{F_{ref}\}$ é uma carga arbitrária sendo aplicada na coluna, $[K]$ é a matriz de rigidez e $\{d\}$ é o vetor de deslocamento. Quando os deslocamentos são conhecidos o campo de tensões pode ser calculado para a carga de referência $\{F_{ref}\}$, na qual pode ser utilizada para formar a matriz de rigidez das tensões $\{K_{\sigma,ref}\}$. Uma vez que a matriz de rigidez das tensões é proporcional ao vetor das cargas $\{F_{ref}\}$, uma matriz de rigidez de tensões $[K_{\sigma}]$ e um vetor de cargas $\{F\}$ arbitrários podem definir uma constante λ como mostrado nas Equações (E.11) e (E.12).

A matriz de rigidez não se altera quando a carga é aplicada, pois a solução é linear. A relação entre as matrizes de rigidez, os deslocamentos e a carga crítica são apresentados conforme a Equação (E.13), onde pode ser previsto a bifurcação do equilíbrio associado a sistemas ideais. A carga crítica é definida como sendo $\{F_{cr}\}$. Uma vez que o modo de flexão é definido como uma alteração no deslocamento da trajetória fundamental para a mesma carga, as Equações (E.13) e (E.14) são válidas, onde $\{\delta d\}$ representa o vetor de incremento de flexão. A diferença entre Equações (E.13) e (E.14) produz um problema de *eigenvalue*, autovalor, representado pelas Equação (E.15), onde o menor valor de sua raiz define o primeiro modo de flexão onde a bifurcação é esperada.

$$[K]\{d\} = \{F_{ref}\} \quad (E.10)$$

$$[K_{\sigma}] = \lambda\{K_{\sigma,ref}\} \quad (E.11)$$

$$\{F\} = \lambda\{F_{ref}\} \quad (E.12)$$

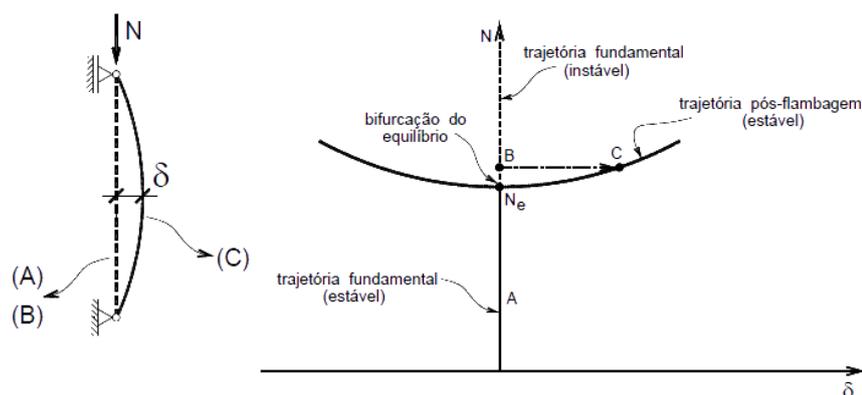
$$[[K] + \lambda_{cr}[K_{\sigma,ref}]] \{d\} = \lambda_{cr}\{F_{ref}\} \quad (E.13)$$

$$[[K] + \lambda_{cr}[K_{\sigma,ref}]] \{ \{d\} + \{\delta d\} \} = \lambda_{cr}\{F_{ref}\} \quad (E.14)$$

$$[[K] + \lambda[K_{\sigma,ref}]] \{\delta d\} = \{0\} \quad (E.15)$$

A Figura E.4 apresenta a coluna de Euler para análise do caso fundamental da barra ideal, utilizado para representar as trajetórias de estabilidade de flexão em uma coluna ideal.

Figura E.4: Comportamento da Coluna de Euler de material elástico-linear



Fonte: Adaptado de Wang (2002)

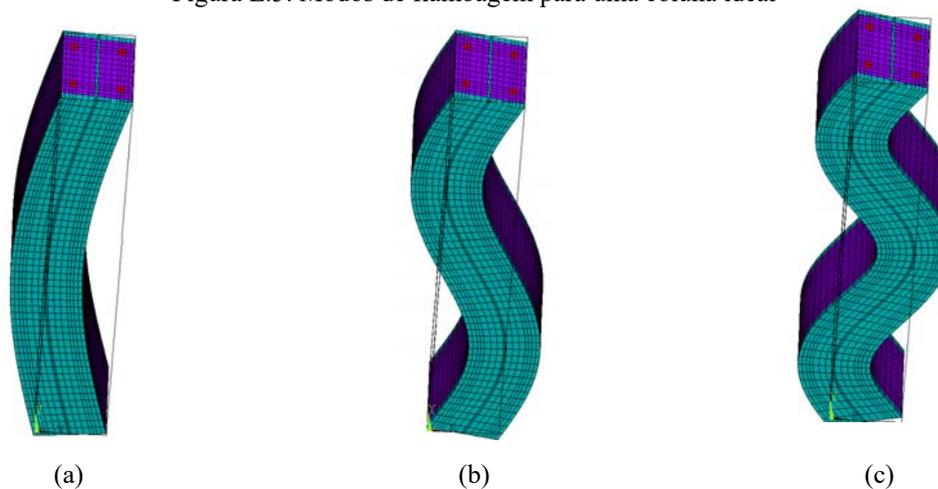
O comportamento do material para essa análise é considerado elástico, observadas as devidas reduções nas propriedades resistentes devido ao efeito das altas temperaturas na coluna.

Para executar a análise para a determinação da carga crítica pelo método de *eigenvalue*, esse utiliza um vetor que representa a carga de flexão necessária para atingir a bifurcação do equilíbrio estático.

O primeiro passo no ANSYS foi aplicar uma força vertical, uma carga pontual, negativa e unitária no topo da coluna, em seguida foram aplicadas as condições de fronteira necessárias. Ao executar a análise estática com a opção “*Small Displacement Static*” e a opção “*calculate prestress effects*” acionada, executando a solução o programa conclui a primeira etapa da análise. O próximo passo é alterar o tipo de análise, para a “*Eigen Buckling Analysis*”. O valor do primeiro modo de flambagem foi coletado, e dessa forma foi determinado os valores das cargas críticas resistentes à flexão do pilar misto parcialmente revestido para todas as seções em estudo.

No entanto, imperfeições e não linearidades presentes na maioria das estruturas reais não são ponderadas na análise para determinação da força axial de flambagem elástica. Assim, a análise de valores próprios de flexão frequentemente produz resultados não conservadores, porém de fundamental importância para a determinação de outros parâmetros pertinentes ao dimensionamento de estruturas. A Figura E.5 apresenta os três métodos de flexão solicitados da solução numérica.

Figura E.5: Modos de flambagem para uma coluna ideal

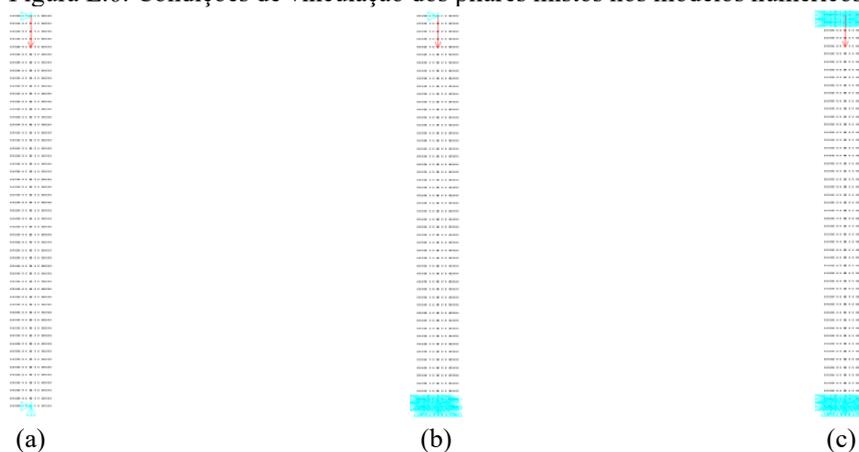


Fonte: Próprio autor

Como pode ser observado na Figura E.5 a deflexão máxima no primeiro modo de flambagem (a) ocorre no ponto médio da coluna, a carga unitária utilizada no início da análise é um fator de multiplicação da força axial de flambagem elástica. Já para o segundo modo de flambagem, em que aparecem duas ondas na forma flambada (b) e três ondas no terceiro modo de flambagem (c), os valores foram ignorados.

A Figura E.6 apresenta as condições de contorno estabelecidas para simular as condições de vinculação articulado fixo - articulado móvel (a) $1,0L$, engaste - articulado móvel (b) $0,7L$ e engaste - engaste (c) $0,5L$.

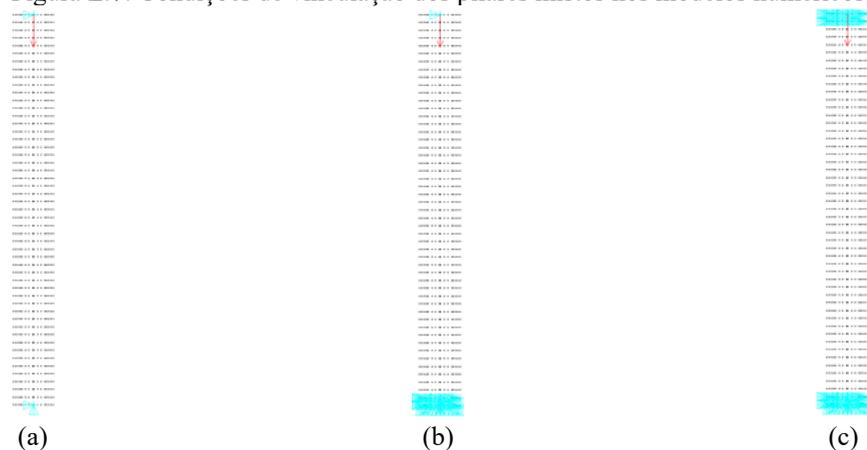
Figura E.6: Condições de vinculação dos pilares mistos nos modelos numéricos



Fonte: Próprio autor

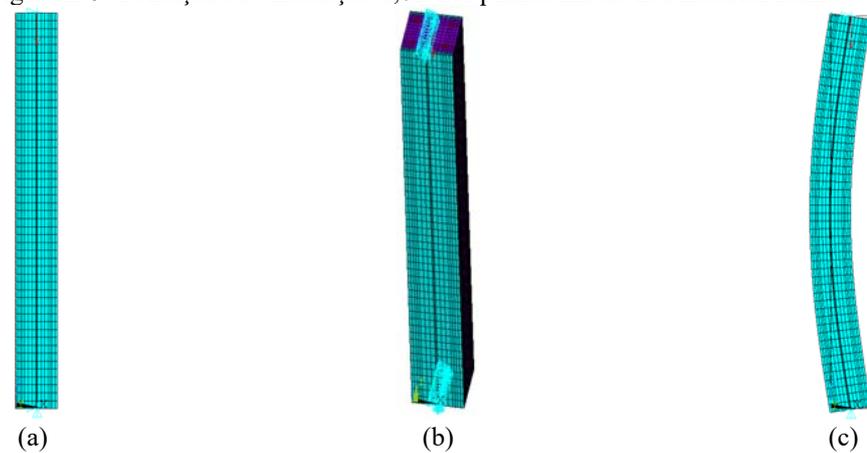
A Figura E.7 apresenta as condições de contorno estabelecidas para simular as condições de vinculação articulado fixo - articulado móvel (a) $1,0L$, engaste - articulado móvel (b) $0,7L$ e engaste - engaste (c) $0,5L$.

Figura E.7: Condições de vinculação dos pilares mistos nos modelos numéricos



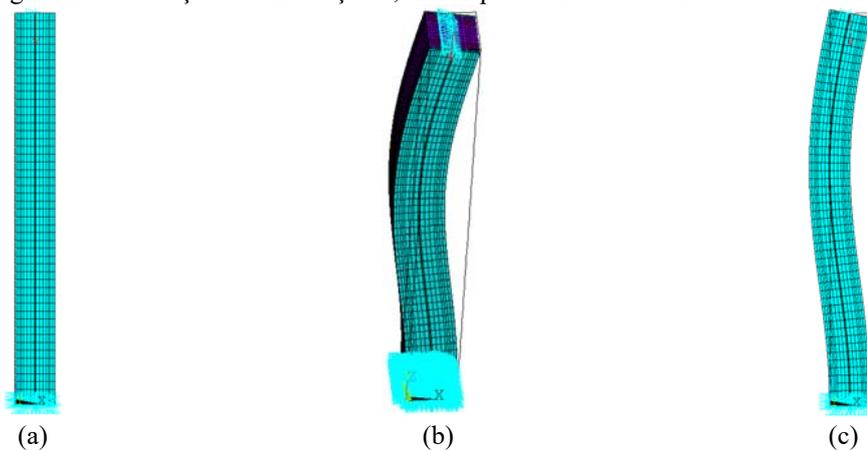
Fonte: Próprio autor

Figura E.8: Condição de vinculação 1,0L dos pilares mistos nos modelos numéricos



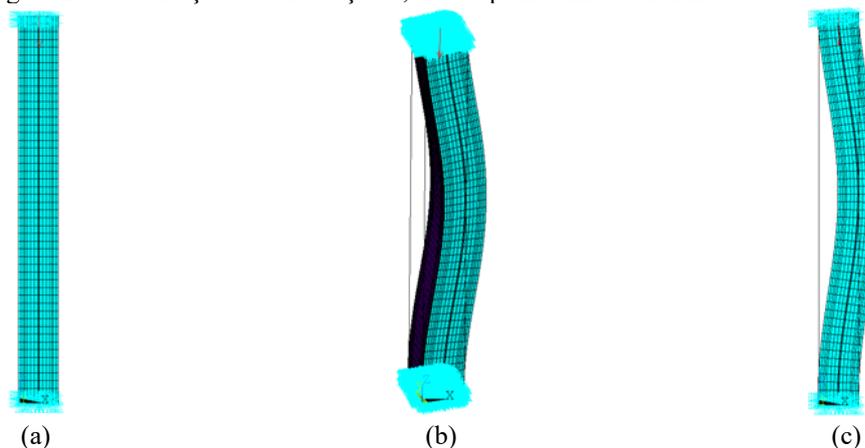
Fonte: Próprio autor

Figura E.9: Condição de vinculação 0,7L dos pilares mistos nos modelos numéricos



Fonte: Próprio autor

Figura E.10: Condição de vinculação 0,5L dos pilares mistos nos modelos numéricos



Fonte: Próprio autor

A Figura E.8 (a) apresenta a coluna indeformada, aplicando a condição de contorno (b), restringindo apenas uma linha de nós no topo e da base é possível simular a condição de vinculação articulado fixo - articulado móvel 1,0L de (c).

A Figura E.9 (a) apresenta a coluna indeformada, aplicando a condição de contorno (b), restringindo apenas uma linha de nós no topo e todos os nós da base é possível simular a condição de vinculação engaste – articulado móvel 0,7L de (c).

A Figura E.10 (a) apresenta a coluna indeformada, aplicando a condição de contorno (b), restringindo o deslocamento vertical de todos de nós no topo e da base é possível simular a condição de vinculação engaste - engaste 0,5L de (c).

Um parâmetro importante para a posterior análise não linear a ser coletado da análise elástica é o deslocamento nodal máximo do primeiro modo de flambagem, que foi utilizado para atualizar a posição nodal e simular as imperfeições geométricas da coluna.

O Quadro E.3 apresenta, de forma geral, os valores coletados das distancias nodais máximas do primeiro modo de flambagem, para as colunas de 3 metros de comprimento. O Quadro E.4 apresenta os valores para as colunas de 5 metros.

Apêndice E

Quadro E.3: Distâncias nodais máximas do primeiro modo de flambagem das colunas de 3m

Perfil	d _{máx} – 3m –											
	TRRF 30			TRRF 60			TRRF 90			TRRF 120		
	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L
HP 250x62,0 (H)	1,93E-04	2,49E-04	3,71E-04	2,71E-04	3,47E-04	5,13E-04	3,45E-04	4,38E-04	6,46E-04	4,61E-04	5,88E-04	8,71E-04
W 250x101,0 (H)	1,43E-04	1,84E-04	2,74E-04	2,20E-04	2,80E-04	4,13E-04	2,77E-04	3,48E-04	5,10E-04	3,65E-04	4,60E-04	6,79E-04
W 310x129,0 (H)	1,01E-04	5,14E-05	1,82E-04	1,44E-04	1,77E-04	2,59E-04	1,74E-04	2,12E-04	3,05E-04	2,28E-04	2,79E-04	4,05E-04
W 360x101,0 (H)	1,32E-04	1,69E-04	2,51E-04	1,85E-04	2,36E-04	3,47E-04	2,26E-04	2,85E-04	4,17E-04	2,97E-04	3,79E-04	5,57E-04
W 410x60,0	2,69E-04	3,63E-04	5,45E-04	3,78E-04	5,09E-04	7,61E-04	4,93E-04	6,65E-04	9,94E-04	6,50E-04	8,81E-04	1,32E-03
W 460x68,0	3,12E-04	4,28E-04	6,44E-04	4,61E-04	6,32E-04	9,49E-04	6,16E-04	8,46E-04	1,27E-03	7,90E-04	1,08E-03	1,63E-03
W 460x106,0	1,79E-04	5,41E-04	3,60E-04	2,63E-04	3,51E-04	5,22E-04	3,35E-04	4,47E-04	6,63E-04	4,38E-04	5,89E-04	8,80E-04
W 530x74,0	2,58E-04	3,47E-04	5,27E-04	3,56E-04	4,80E-04	7,24E-04	4,75E-04	6,41E-04	9,71E-04	6,25E-04	8,50E-04	1,29E-03
W 610x125,0	1,26E-04	1,96E-04	2,46E-04	1,73E-04	2,70E-04	3,31E-04	2,11E-04	3,37E-04	4,02E-04	2,72E-04	4,64E-04	5,30E-04
W 610x174,0	7,51E-05	9,34E-05	1,38E-04	1,02E-04	1,27E-04	1,85E-04	1,20E-04	1,48E-04	2,13E-04	1,48E-04	1,86E-04	2,72E-04
HEB200	2,56E-04	3,39E-04	5,08E-04	4,20E-04	5,52E-04	8,23E-04	5,61E-04	7,35E-04	1,10E-03	7,04E-04	9,26E-04	1,39E-03
HEB220	1,99E-04	2,68E-04	3,88E-04	3,14E-04	4,18E-04	6,01E-04	4,19E-04	5,55E-04	7,98E-04	5,58E-04	7,47E-04	1,08E-03
HEB240	1,69E-04	2,18E-04	3,25E-04	2,64E-04	3,38E-04	5,00E-04	3,46E-04	4,41E-04	6,52E-04	4,53E-04	5,80E-04	8,61E-04
HEB260	1,35E-04	1,72E-04	2,55E-04	2,03E-04	2,54E-04	3,73E-04	2,64E-04	3,29E-04	4,81E-04	3,46E-04	4,33E-04	6,37E-04
HEB280	1,19E-04	1,50E-04	2,22E-04	1,78E-04	2,21E-04	3,24E-04	2,28E-04	2,83E-04	4,13E-04	2,95E-04	3,66E-04	5,36E-04
HEB300	1,06E-04	1,32E-04	1,94E-04	1,57E-04	1,94E-04	2,84E-04	2,00E-04	2,46E-04	3,59E-04	2,54E-04	3,13E-04	4,58E-04
HEB320	1,01E-04	1,27E-04	1,87E-04	1,53E-04	1,89E-04	2,77E-04	1,93E-04	2,39E-04	3,49E-04	2,44E-04	3,02E-04	4,43E-04
HEB340	9,14E-05	1,13E-04	1,67E-04	1,35E-04	1,65E-04	2,40E-04	1,71E-04	2,09E-04	3,03E-04	2,16E-04	2,66E-04	3,87E-04
HEB360	8,91E-05	1,11E-04	1,63E-04	1,32E-04	1,62E-04	2,37E-04	1,67E-04	2,05E-04	2,98E-04	2,10E-04	2,60E-04	3,78E-04
HEB400	8,53E-05	1,06E-04	1,56E-04	1,24E-04	1,53E-04	2,22E-04	1,52E-04	1,87E-04	2,71E-04	1,85E-04	2,28E-04	3,31E-04
HEB450	8,12E-05	1,01E-04	1,50E-04	1,19E-04	1,48E-04	2,16E-04	1,46E-04	1,80E-04	2,63E-04	1,76E-04	2,19E-04	3,18E-04
HEB500	7,71E-05	9,72E-05	1,44E-04	1,15E-04	1,43E-04	2,10E-04	1,40E-04	1,75E-04	2,55E-04	1,68E-04	2,11E-04	3,08E-04

Quadro E.4: Distâncias nodais máximas do primeiro modo de flambagem das colunas de 5m

Perfil	d _{máx} – 5m –											
	TRRF 30			TRRF 60			TRRF 90			TRRF 120		
	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L
HP 250x62,0 (H)	4,04E-04	5,34E-04	7,93E-04	5,61E-04	7,38E-04	1,09E-03	7,09E-04	1,37E-03	1,37E-03	9,91E-04	1,85E-03	1,85E-03
W 250x101,0 (H)	2,99E-04	3,94E-04	5,86E-04	4,54E-04	5,93E-04	8,77E-04	5,66E-04	7,33E-04	1,08E-03	7,51E-04	9,76E-04	1,44E-03
W 310x129,0 (H)	2,03E-04	2,61E-04	3,87E-04	2,91E-04	3,71E-04	5,47E-04	3,47E-04	4,38E-04	6,43E-04	4,58E-04	5,81E-04	8,55E-04
W 360x101,0 (H)	2,74E-04	3,61E-04	5,35E-04	3,80E-04	4,98E-04	7,36E-04	4,59E-04	5,98E-04	8,82E-04	6,10E-04	8,00E-04	1,18E-03
W 410x60,0	5,74E-04	7,80E-04	1,16E-03	8,02E-04	1,09E-03	1,62E-03	1,05E-03	1,42E-03	2,11E-03	1,39E-03	1,89E-03	2,81E-03
W 460x68,0	6,71E-04	9,20E-04	1,37E-03	9,88E-04	1,35E-03	2,02E-03	1,32E-03	1,81E-03	2,70E-03	1,70E-03	2,33E-03	3,48E-03
W 460x106,0	3,81E-04	5,16E-04	7,67E-04	5,53E-04	7,48E-04	1,11E-03	7,03E-04	9,50E-04	1,41E-03	9,29E-04	1,26E-03	1,87E-03
W 530x74,0	5,45E-04	7,44E-04	1,11E-03	7,50E-04	1,02E-03	1,52E-03	1,00E-03	1,37E-03	2,03E-03	1,33E-03	1,82E-03	2,71E-03
W 610x125,0	2,63E-04	3,51E-04	5,20E-04	3,54E-04	4,71E-04	6,97E-04	4,29E-04	5,71E-04	8,42E-04	5,63E-04	7,54E-04	1,12E-03
W 610x174,0	1,53E-04	1,96E-04	2,90E-04	2,05E-04	2,63E-04	3,87E-04	2,37E-04	3,04E-04	4,46E-04	2,99E-04	3,87E-04	5,70E-04
HEB200	5,40E-04	7,26E-04	1,08E-03	8,80E-04	1,18E-03	1,75E-03	1,18E-03	1,57E-03	2,33E-03	1,49E-03	1,99E-03	2,96E-03
HEB220	4,19E-04	5,59E-04	8,30E-04	6,53E-04	8,64E-04	1,28E-03	8,69E-04	1,15E-03	1,70E-03	1,17E-03	1,55E-03	2,31E-03
HEB240	3,53E-04	4,67E-04	6,94E-04	5,46E-04	7,18E-04	1,06E-03	7,14E-04	9,36E-04	1,39E-03	9,42E-04	1,24E-03	1,84E-03
HEB260	2,80E-04	3,66E-04	5,42E-04	4,13E-04	5,35E-04	7,90E-04	5,35E-04	6,91E-04	1,02E-03	7,07E-04	9,15E-04	1,35E-03
HEB280	2,46E-04	3,19E-04	4,72E-04	3,61E-04	4,64E-04	6,85E-04	4,62E-04	5,92E-04	8,73E-04	5,99E-04	7,70E-04	1,14E-03
HEB300	2,17E-04	2,79E-04	4,13E-04	3,19E-04	4,07E-04	6,01E-04	4,03E-04	5,15E-04	7,58E-04	5,14E-04	6,57E-04	9,69E-04
HEB320	2,08E-04	2,69E-04	3,98E-04	3,10E-04	3,97E-04	5,87E-04	3,91E-04	5,01E-04	7,39E-04	4,95E-04	6,35E-04	9,37E-04
HEB340	1,87E-04	2,40E-04	3,54E-04	2,71E-04	3,45E-04	5,08E-04	3,42E-04	4,35E-04	6,39E-04	4,35E-04	5,55E-04	8,17E-04
HEB360	1,82E-04	2,34E-04	3,46E-04	2,66E-04	3,40E-04	5,00E-04	3,35E-04	4,27E-04	6,28E-04	4,24E-04	5,43E-04	7,99E-04
HEB400	1,75E-04	2,25E-04	3,32E-04	2,50E-04	3,19E-04	4,70E-04	3,05E-04	3,89E-04	5,72E-04	3,71E-04	4,74E-04	6,97E-04
HEB450	1,67E-04	2,15E-04	3,18E-04	2,41E-04	3,10E-04	4,57E-04	2,93E-04	3,77E-04	5,55E-04	3,55E-04	4,57E-04	6,72E-04
HEB500	1,60E-04	2,06E-04	3,05E-04	2,34E-04	3,01E-04	4,44E-04	2,83E-04	3,65E-04	5,38E-04	3,41E-04	4,41E-04	6,50E-04

Já os Quadros E.5 e E.6 apresentam, de forma geral, os valores dos fatores de correção calculados para atualizar a geometria das colunas, simulando a imperfeição geométrica nos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio.

Quadro E.5: Fatores de correção do primeiro modo de flambagem das colunas de 3m

Perfil	Fatores de correção – 3m –											
	TRRF 30			TRRF 60			TRRF 90			TRRF 120		
	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L
HP 250x62,0 (H)	103,9	80,3	53,9	73,8	57,6	39,0	58,0	45,7	31,0	43,4	34,0	23,0
W 250x101,0 (H)	139,8	108,7	72,9	90,8	71,5	48,5	72,2	57,5	39,2	54,8	43,4	29,4
W 310x129,0 (H)	198,5	388,8	109,9	138,6	112,8	77,3	114,8	94,5	65,5	87,9	71,8	49,4
W 360x101,0 (H)	151,9	118,3	79,6	107,8	84,8	57,7	88,5	70,1	48,0	67,3	52,8	35,9
W 410x60,0	74,4	55,1	36,7	52,9	39,3	26,3	40,6	30,1	20,1	30,8	22,7	15,1
W 460x68,0	64,0	46,8	31,1	43,4	31,7	21,1	32,5	23,7	15,7	25,3	18,4	12,3
W 460x106,0	111,5	79,0	55,6	76,1	57,0	38,3	59,8	44,8	30,1	45,7	33,9	22,7
W 530x74,0	77,6	57,7	37,9	56,1	41,7	27,6	42,1	31,2	20,6	32,0	23,5	15,5
W 610x125,0	158,2	102,2	81,2	115,8	74,2	60,4	94,7	59,3	49,7	73,5	43,1	37,7
W 610x174,0	266,2	214,2	145,4	195,3	157,8	108,3	167,3	135,4	93,7	135,0	107,3	73,5
HEB200	59,0	39,4	47,6	36,2	24,3	35,6	27,2	18,2	28,4	21,6	14,4	59,0
HEB220	74,6	51,5	63,7	47,8	33,3	47,8	36,0	25,1	35,9	26,8	18,5	74,6
HEB240	91,6	61,5	75,8	59,2	40,0	57,8	45,3	30,7	44,2	34,5	23,2	91,6
HEB260	116,3	78,5	98,6	78,6	53,6	75,8	60,7	41,6	57,8	46,1	31,4	116,3
HEB280	133,0	89,9	112,3	90,4	61,7	87,6	70,7	48,4	67,8	54,7	37,3	133,0
HEB300	152,0	102,9	127,1	103,0	70,4	100,1	81,3	55,7	78,8	63,9	43,7	152,0
HEB320	158,1	106,9	131,0	105,8	72,2	103,5	83,7	57,3	82,1	66,2	45,2	158,1
HEB340	176,6	120,0	148,3	120,9	83,2	117,0	95,5	66,0	92,4	75,2	51,7	176,6
HEB360	180,8	122,8	151,4	123,1	84,6	119,8	97,4	67,1	95,1	77,0	52,9	180,8
HEB400	188,4	127,9	161,6	131,0	89,9	131,5	106,9	73,7	108,2	87,7	60,5	188,4
HEB450	197,3	133,7	168,0	135,4	92,7	137,4	110,9	76,2	113,7	91,5	62,8	197,3
HEB500	205,7	139,3	173,9	139,5	95,3	142,9	114,5	78,5	118,8	94,8	65,0	205,7

Quadro E.6: Fatores de correção do primeiro modo de flambagem das colunas de 5m

Perfil	Fatores de correção – 5m –											
	TRRF 30			TRRF 60			TRRF 90			TRRF 120		
	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L	0,5L	0,7L	1,0L
HP 250x62,0 (H)	49,6	37,4	25,2	35,6	27,1	18,3	28,2	14,6	14,6	20,2	10,8	10,8
W 250x101,0 (H)	66,8	50,7	34,2	44,1	33,7	22,8	35,4	27,3	18,5	26,6	20,5	13,8
W 310x129,0 (H)	98,5	76,5	51,7	68,7	53,9	36,6	57,7	45,7	31,1	43,7	34,4	23,4
W 360x101,0 (H)	73,0	55,4	37,4	52,6	40,2	27,2	43,5	33,4	22,7	32,8	25,0	16,9
W 410x60,0	34,8	25,6	17,2	24,9	18,4	12,3	19,1	14,1	9,5	14,4	10,6	7,1
W 460x68,0	29,8	21,7	14,6	20,2	14,8	9,9	15,1	11,0	7,4	11,8	8,6	5,8
W 460x106,0	52,4	38,8	26,1	36,1	26,7	18,0	28,4	21,0	14,2	21,5	15,9	10,7
W 530x74,0	36,7	26,9	18,0	26,7	19,5	13,1	20,0	14,6	9,8	15,0	11,0	7,4
W 610x125,0	76,0	57,0	38,4	56,5	42,4	28,7	46,6	35,1	23,8	35,5	26,5	17,9
W 610x174,0	130,9	102,0	69,0	97,5	76,0	51,7	84,3	65,8	44,9	67,0	51,7	35,1
HEB200	37,1	27,6	18,5	22,7	17,0	11,4	17,0	12,7	8,6	13,4	10,0	6,8
HEB220	47,7	35,8	24,1	30,6	23,1	15,6	23,0	17,5	11,8	17,1	12,9	8,7
HEB240	56,6	42,8	28,8	36,7	27,9	18,8	28,0	21,4	14,4	21,2	16,2	10,9
HEB260	71,4	54,7	36,9	48,4	37,4	25,3	37,4	29,0	19,6	28,3	21,9	14,8
HEB280	81,3	62,7	42,3	55,4	43,1	29,2	43,3	33,8	22,9	33,4	26,0	17,6
HEB300	92,3	71,6	48,4	62,7	49,1	33,3	49,6	38,8	26,4	38,9	30,4	20,6
HEB320	96,1	74,5	50,3	64,5	50,3	34,1	51,1	39,9	27,1	40,4	31,5	21,3
HEB340	107,0	83,4	56,5	73,8	58,0	39,4	58,4	46,0	31,3	46,0	36,0	24,5
HEB360	109,8	85,5	57,8	75,2	58,9	40,0	59,7	46,8	31,8	47,2	36,9	25,0
HEB400	114,5	89,0	60,2	80,1	62,6	42,5	65,6	51,4	35,0	53,9	42,2	28,7
HEB450	119,9	93,0	62,9	82,9	64,5	43,8	68,2	53,1	36,1	56,3	43,8	29,8
HEB500	125,2	97,0	65,5	85,6	66,4	45,0	70,6	54,7	37,1	58,6	45,3	30,8

E.2.2.2 Análise de resistência plástica

O principal objetivo da análise de resistência plástica é de determinar a carga para a qual uma estrutura entra em colapso devido ao aparecimento de deformações excessivas relacionado ao regime não linear dos materiais que compõe a seção transversal.

O cálculo da carga resistente neste regime requer o conhecimento do comportamento da estrutura quando em algum ponto material do elemento estrutural seja atinja a tensão limite de elasticidade.

A análise plástica é de grande importância, pois é possível calcular a capacidade limite de carregamento que, em geral, é muito maior do que o carregamento correspondente ao limite de proporcionalidade do regime elástico.

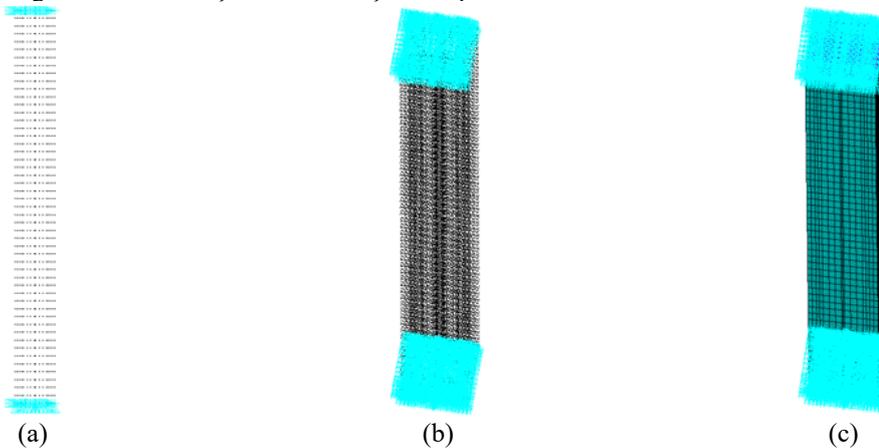
Nesse sentido, é necessário conhecer o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da seção transversal, pois o objetivo principal das formulações das prescrições normativas é determinar a carga resistente à flexão, considerando as não linearidades dos materiais e da geometria.

Quanto a estratégia numérica para a obtenção da resistência plástica à compressão axial, representando a terceira etapa do desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizadas as malhas das simulações numéricas de determinação da carga crítica de flambagem.

Após excluir todos os carregamentos existentes na malha da simulação anterior, foram carregados os arquivos contendo os valores das propriedades não lineares dos três materiais. O menu utilizado para definir o comportamento do material foi o *Misis Plasticity > Multilinear Isotropic*.

Para a malha da coluna nos nós do topo foram restritos os deslocamentos horizontais ($u_x = u_y = 0$) e permitido o deslocamento vertical (u_z). Já os nós da base da coluna, foram restritos os três graus de liberdade ($u_x = u_y = u_z = 0$). A Figura E.11 apresenta a coluna com os nós do topo e da base da seção transversal.

Figura E.11: Condição de vinculação dos pilares mistos nos modelos numéricos



Fonte: Próprio autor

Para aplicar o método Newton-Raphson com incremento de deslocamento foi criada uma tabela que contém as informações incrementais. O deslocamento vertical foi atribuído a todos os nós do topo da coluna com as informações da tabela de deslocamentos. O Quadro E.7 representa os valores que foram atribuídos para o incremento do deslocamento do método.

Quadro E.7: Parâmetros atribuídos para o deslocamento do método Newton-Raphson

<i>Time</i>	<i>Displacement (m)</i>
0	0
100	-0,05

Atribuindo esses valores é possível então controlar os deslocamentos a cada passo de iteração do método.

No painel de controle de solução, foram atribuídos os seguintes parâmetros:

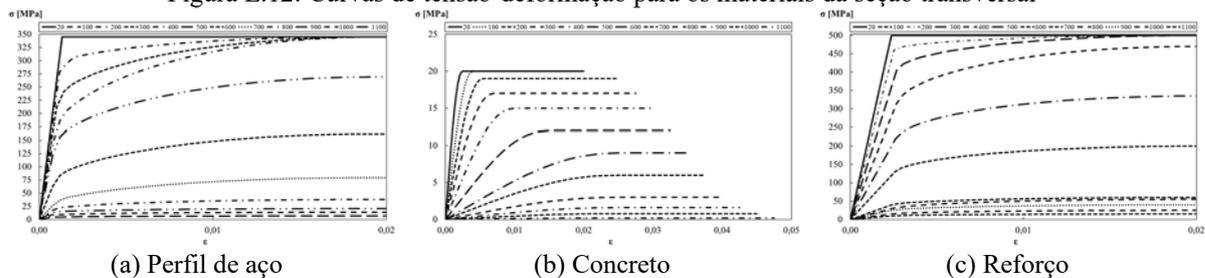
Quadro E.8: Parâmetros imputados no Controle de Solução do ANSYS

<i>Solution Controls</i>	
<i>Time control</i>	<i>Value [s]</i>
<i>Time at the end of loadstep</i>	100
<i>Time step size</i>	0,1
<i>Minimum step size</i>	0,05
<i>Maximum step size</i>	1,0

Por meio desses parâmetros o incremento de deslocamento foi de 0,5mm com o critério de convergência de $1 \times 10^{-3} \%$ para a carga.

A Figura E.12 apresenta o gráfico dos valores das propriedades plásticas dos materiais que foram consideradas como parâmetros para método numérico.

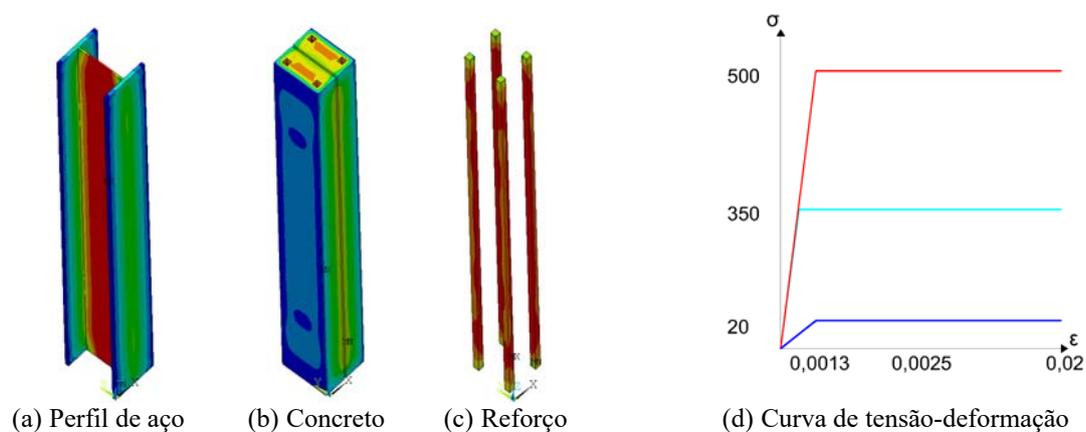
Figura E.12: Curvas de tensão-deformação para os materiais da seção transversal



Fonte: Próprio autor

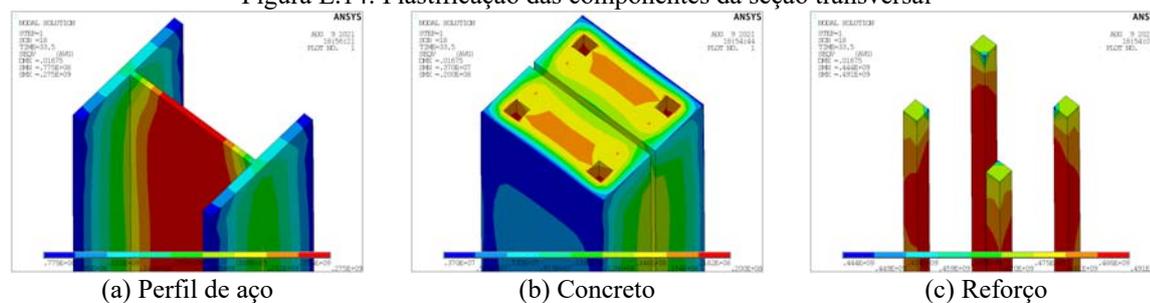
Para estimar a força axial de plastificação da seção transversal, foi escolhido o instante de deslocamento de 30mm da simulação numérica. Instante esse que já ocorria a plastificação de toda a seção transversal e por estar em conformidade com a Seção 4.3.6 do presente trabalho.

Figura E.13: Curva de tensão-deformação para a plastificação da seção transversal



Fonte: Próprio autor

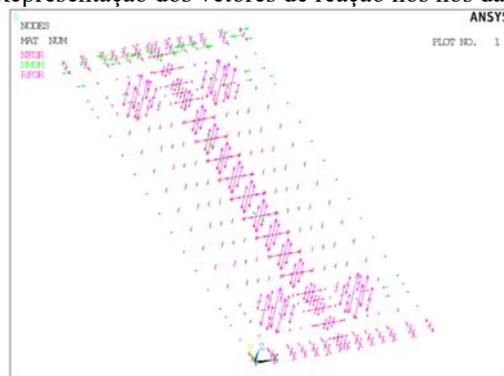
Figura E.14: Plastificação das componentes da seção transversal



Fonte: Próprio autor

Quanto aos resultados numéricos do ANSYS, ao aplicar um deslocamento vertical no topo da coluna geraram vetores de reação mensuráveis em sua base. O valor da soma desses vetores representa a carga de resistência plástica da seção transversal. A Figura E.15 apresenta a imagem gerada pelos valores dos nós da base da seção transversal do pilar.

Figura E.15: Representação dos vetores de reação nos nós da base da coluna



Fonte: Próprio autor

Realizando esse mesmo procedimento para elaborar o modelo numérico para as 22 seções transversais, para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo, foi possível auferir a resistência plástica das seções transversais.

E.2.2.3 Análise de flambagem não linear

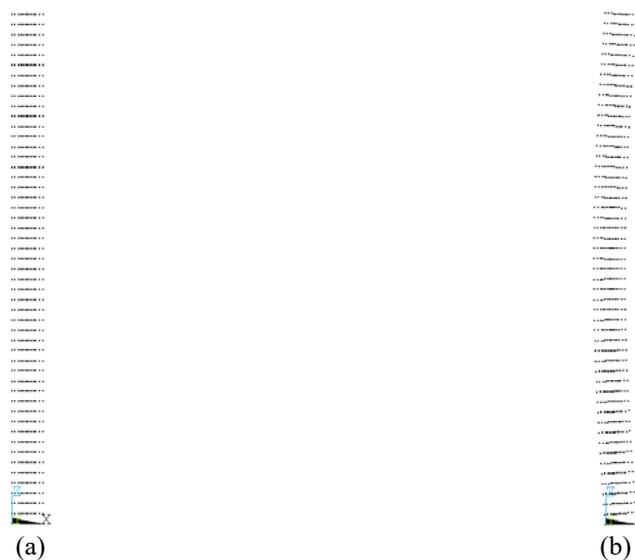
A análise não linear de flexão simples representa uma melhor aproximação do desempenho real da estrutura do que a análise linear elástica do *eigenvalue*. O método utilizado semelhante ao da obtenção da força axial de plastificação foi o Método Newton-Raphson com incremento gradual carga, sendo esse aplicado até atingir um nível em que a estrutura se torne instável, ou seja, um leve acréscimo na carga, irá provocar a instabilidade do elemento e o decréscimo gradual da carga resistente.

Portanto, a quarta etapa foi desenvolvida para determinar a resistência à flambagem dos pilares mistos parcialmente revestidos em situação de incêndio utilizando a análise não linear, considerando não apenas as não linearidades das propriedades dos materiais, mas também considerando a imperfeição geométrica. Desta forma foi possível determinar a força axial resistente de cálculo, para todas as 22 seções transversais, para os dois comprimentos de pilar, para os três comprimentos de flambagem e para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo.

A modelagem do material apresenta os aspectos lineares e não lineares. O comportamento elástico–perfeitamente plástico foi introduzido na modelagem por partes no segmento multilinear das propriedades dos materiais. O ANSYS realiza uma comparação entre o módulo de elasticidade previamente definidos e o módulo de elasticidade determinado, utilizando os dados introduzidos no programa como pontos de tensão e deformação total ou plástica.

A fim de introduzir as não linearidades geométricas, após realizar a análise linear, foi realizada a atualização da geometria da coluna, simulando as condições de serviço para o cálculo estrutural, foi consultado o valor de deflexão máxima da simulação da carga crítica, conforme Quadros E.5 e E.6, simulando numericamente a imperfeição geométrica do elemento estrutural. A Figura E.16 apresenta a atualização da posição nodal da geometria para simular as imperfeições geométricas dos pilares mistos parcialmente revestidos.

Figura E.16: Representação da coluna sem imperfeições geométricas



Fonte: Próprio autor

Para aplicar o método Newton-Raphson com incremento de carga foi criada uma tabela que contém as informações incrementais. O carregamento vertical foi atribuído ao nó central do topo da coluna com as informações da tabela criada. O Quadro E.9 representa os valores que foram atribuídos para o incremento do carregamento.

Quadro E.9: Parâmetros atribuídos para o método Newton-Raphson com incremento de carregamento

<i>Time</i>	<i>Load (N)</i>
0	0
5 000 000	-5 000 000

A atribuição dos valores de carga vertical foram arbitrários e variáveis, tendo por base a carga calculada por meio da ABNT NBR 14323:2013, sendo possível então controlar os incrementos de carregamento a cada passo de interação do método.

No painel de controle de solução, foi atribuído os seguintes parâmetros:

Quadro E.10: Parâmetros imputados no Controle de Solução do ANSYS

<i>Solution Constrols</i>	
<i>Time control</i>	<i>Value [s]</i>
<i>Time at the and of loadstep</i>	5000000
<i>Time step size</i>	10000
<i>Minimum step size</i>	1000
<i>Maximum step size</i>	20000

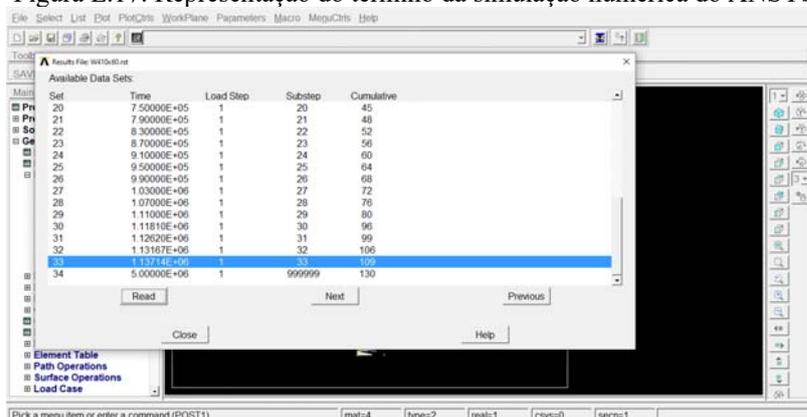
Dessa forma, a cada passo da simulação foi realizado um incremento de 10kN. Se a solução não convergir, o ANSYS automaticamente modula o passo de interação para 1kN, se a

solução estiver convergindo sem muitas iterações o ANSYS pode modular automaticamente o passo para 20kN. O critério de convergência foi estabelecido com uma tolerância de 5% do valor do carregamento.

De acordo com o critério de convergência, o ANSYS vai buscar o equilíbrio entre o carregamento e o deslocamento do elemento estrutural a partir da condição da geometria deformada, considerando também as não linearidades dos materiais, assim como o campo de temperaturas da seção transversal.

Quando a solução não convergir, o ANSYS grava o último passo de iteração, esse passo representa o carregamento pelo qual é considerado a força axial resistente de cálculo do elemento estrutural em situação de incêndio.

Figura E.17: Representação do término da simulação numérica do ANSYS

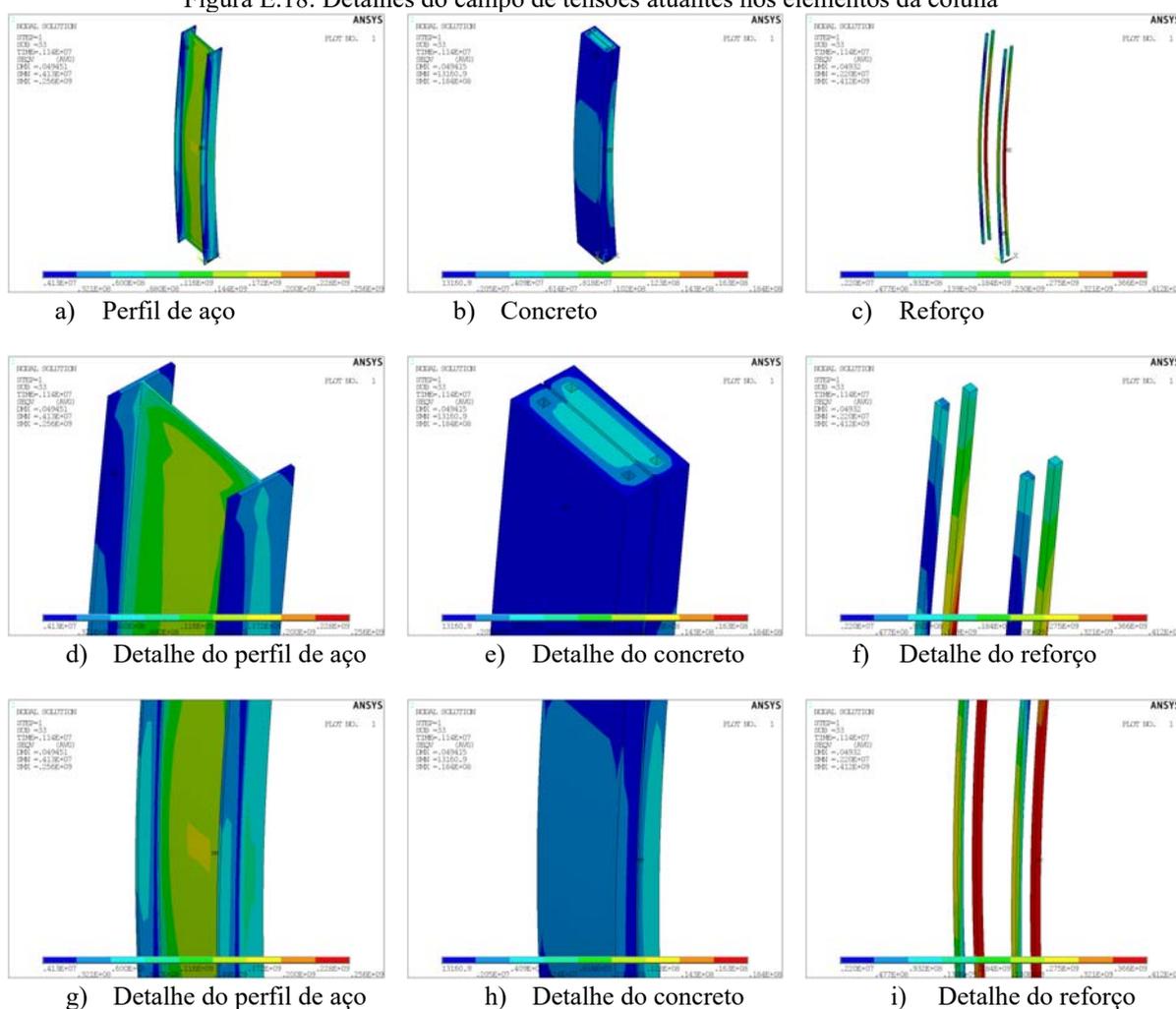


Fonte: Próprio autor

O ANSYS também fornece o valor da soma vetorial das reações na base do pilar por meio do caminho: *General Postproc > List Results > Reaction Solution*.

A Figura E.18 apresenta em detalhes as tensões da coluna deformada de seção transversal W 410x60, 1,0L em TRRF 30, quando atingido o valor de $N_{fi,Rd}$.

Figura E.18: Detalhes do campo de tensões atuantes nos elementos da coluna



Fonte: Próprio autor

Utilizando os parâmetros supracitados, além da modelagem da placa rígida no topo e na base dos elementos estruturais, que evitou problemas de concentrações de tensões e elementos extremamente distorcidos, as simulações se apresentaram estáveis e sem problemas de convergência, produzindo resultados satisfatórios para a elaboração do presente trabalho.