

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

ERIC GUILHERME MENDES

**COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE AÇO INOXIDÁVEL COM
ABERTURAS CASTELADAS SOB COMPRESSÃO E ELEVADAS
TEMPERATURAS**

MARINGÁ

2024

ERIC GUILHERME MENDES

**COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE AÇO INOXIDÁVEL COM
ABERTURAS CASTELADAS SOB COMPRESSÃO E ELEVADAS
TEMPERATURAS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi

MARINGÁ

2024

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

M538c

Mendes, Eric Guilherme

Comportamento de colunas de aço inoxidável com aberturas casteladas sob compressão e elevadas temperaturas / Eric Guilherme Mendes. -- Maringá, PR, 2024. 111 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Colunas casteladas. 2. Aço inoxidável. 3. Altas temperaturas. 4. Análise numérica. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. Rossi, Alexandre, 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. 624.17725

Rosana de Souza Costa de Oliveira - 9/1366

ERIC GUILHERME MENDES

COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE AÇO INOXIDÁVEL COM ABERTURAS CASTELADAS SOB COMPRESSÃO E ELEVADAS TEMPERATURAS

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 09/08/2024, 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

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS HUMBERTO MARTINS**
Data: 09/08/2024 16:06:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE ROSSI**
Data: 09/08/2024 16:02:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Rossi
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Uberlândia
Professor Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **RENATO SILVA NICOLETTI**
Data: 09/08/2024 16:12:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato Silva Nicoletti
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas
Universidade de São Paulo

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE PIANA VENDRAMELL FERREIRA**
Data: 09/08/2024 16:31:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Piana Vendramell Ferreira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

*Aos meus pais, Lindomar e Debora, à minha
esposa Lays e à minha filha Maria Júlia.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela graça de ter chegado até aqui e a Nossa Senhora Auxiliadora, cuja intercessão constante foi um pilar de apoio e força, especialmente durante este período desafiador do mestrado.

A minha profunda gratidão vai para meus pais, Lindomar e Debora, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando e fazendo todo o possível para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

A minha esposa, Lays, merece um agradecimento especial por estar ao meu lado desde o início dos meus estudos. Seu apoio incondicional e encorajamento foram essenciais para que eu pudesse continuar e superar os desafios.

À minha filha, Maria Júlia, agradeço por trazer um novo e profundo significado à minha vida. Sua presença tem sido uma fonte de alegria e inspiração, me incentivando a seguir em frente com ainda mais determinação.

Meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Carlos Humberto Martins e Alexandre Rossi. A confiança que depositaram em mim e a orientação valiosa ao longo deste árduo trabalho foram fundamentais para a conclusão deste projeto.

Agradeço também aos colegas e amigos que conheci durante este período, com um agradecimento especial ao meu amigo Adriano Silva de Carvalho, por sua amizade e pelo apoio inestimável.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para meu crescimento pessoal e acadêmico. A todos vocês, meu mais sincero obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“A engenharia de uma estrutura não é apenas
uma ciência, mas também uma arte”*

John Smeaton

RESUMO

O uso do aço inoxidável em estruturas metálicas tem aumentado devido às suas propriedades mecânicas superiores em relação ao aço carbono, como a resistência à corrosão, às altas temperaturas, a ductilidade, entre outras. Simultaneamente, perfis alveolares estão se tornando populares em vigas e colunas, pois melhoram a resistência à flexão sem a adição de material, além de permitirem a passagem de tubulações de serviço, como sistemas de prevenção de incêndio. No entanto, há uma lacuna na literatura sobre o comportamento de colunas com aberturas na alma e colunas de aço inoxidável expostas a altas temperaturas. Este estudo visa investigar o comportamento estrutural de colunas casteladas de aço inoxidável sob compressão e altas temperaturas, utilizando análises numéricas com o *software* ABAQUS®. Foram realizadas verificações numéricas do comportamento mecânico das colunas, comparando resultados experimentais e numéricos da literatura, demonstrando a eficácia do modelo em representar a capacidade de carga resistente à compressão e a trajetória de equilíbrio dessas colunas. Um estudo paramétrico abrangente, com 2520 análises numéricas, explorou o comportamento dessas estruturas por meio da variação de parâmetros como seção transversal, comprimento, tempo de exposição ao fogo, entre outros. Os resultados de carga crítica para colunas de alma sólida em temperatura ambiente demonstraram boa concordância com a equação de Euler. Para colunas casteladas, o método da seção 2T mostrou-se altamente preciso. Em termos de capacidade de carga resistente à compressão, a norma EN 1993-1-1 (CEN, 2022) apresentou previsões conservadoras para aço carbono e ainda mais conservadoras para o aço inoxidável, sugerindo a necessidade de ajustes. A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) forneceu boas previsões para aço carbono e previsões não conservadoras para o aço inoxidável com baixos índices de esbeltez. A norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005), para situações de incêndio, foi conservadora para o aço carbono, mas subestimou as propriedades do aço inoxidável, indicando a necessidade de ajustar os fatores de imperfeição. Finalmente, a norma NBR 14323 (ABNT, 2013) subestimou a capacidade resistente do aço carbono em exposições curtas a incêndios e foi excessivamente conservadora para o aço inoxidável. O estudo destaca a importância de desenvolver modelos de cálculo e normas mais adequadas para colunas de aço inoxidável e casteladas em condições de elevadas temperaturas.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Colunas casteladas. Incêndio. Análise numérica.

ABSTRACT

The use of stainless steel in metal structures has increased due to its superior mechanical properties compared to carbon steel, such as corrosion resistance, high-temperature resistance, ductility, among others. Simultaneously, cellular profiles are becoming popular in beams and columns, as they improve flexural resistance without adding material, and also allow for the passage of service pipes, such as fire protection systems. However, there is a gap in the literature regarding the behavior of columns with web openings and stainless steel columns exposed to high temperatures. This study aims to investigate the structural behavior of castellated stainless steel columns under compression and high temperatures using numerical analyses with the ABAQUS® software. Numerical validations of the mechanical behavior of the columns were carried out by comparing experimental and numerical results from the literature, demonstrating the model's effectiveness in representing the load-bearing capacity under compression and the equilibrium path of these columns. A comprehensive parametric study, with 2520 numerical analyses, explored the behavior of these structures by varying parameters such as cross-section, length, fire exposure time, among others. The critical load results for solid-web columns at room temperature showed good agreement with Euler's equation. For castellated columns, the 2T section method proved to be highly accurate. In terms of load-bearing capacity under compression, the EN 1993-1-1 (CEN, 2022) standard provided conservative predictions for carbon steel and even more conservative predictions for stainless steel, suggesting the need for adjustments. The NBR 8800 (ABNT, 2008) standard provided good predictions for carbon steel and non-conservative predictions for stainless steel with low slenderness ratios. The EN 1993-1-2 (CEN, 2005) standard, for fire situations, was conservative for carbon steel but underestimated the properties of stainless steel, indicating the need to adjust imperfection factors. Finally, the NBR 14323 (ABNT, 2013) standard underestimated the load-bearing capacity of carbon steel in short fire exposures and was overly conservative for stainless steel. The study highlights the importance of developing more adequate calculation models and standards for stainless steel and castellated columns under high-temperature conditions.

Keywords: Stainless steel. Castellated columns. Fire. Numerical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fabricação de perfis com aberturas casteladas	19
Figura 2 - Fluxograma do procedimento metodológico	22
Figura 3 - Flambagem em coluna ideal	24
Figura 4 - Comportamento de colunas em diferentes condições.....	25
Figura 5 - Seção transversal de perfis alveolares	28
Figura 6 - Dimensões de aberturas casteladas	29
Figura 7 - Seção de alma cheia.....	31
Figura 8 - Seção 2T	32
Figura 9 - Método da ponderação por superfície.....	33
Figura 10 - Método da ponderação por linha	35
Figura 11 - Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura	40
Figura 12 - Comparação de curvas de flambagem em situação de incêndio	41
Figura 13 - Alongamento térmico do aço inoxidável.....	45
Figura 14 - Calor específico do aço inoxidável.....	46
Figura 15 - Condutividade térmica do aço inoxidável	47
Figura 16 - Alongamento térmico do aço carbono	49
Figura 17 - Calor específico do aço carbono.....	50
Figura 18 - Condutividade térmica do aço carbono	51
Figura 19 - Curvas tensão-deformação do aço carbono	54
Figura 20 - Condições de contorno de colunas casteladas	54
Figura 21 - Trajetória de equilíbrio da coluna L30-R1.3	56
Figura 22 - Trajetória de equilíbrio da coluna L30-R1.5	57
Figura 23 - Configuração deformada numérica das colunas casteladas.....	57
Figura 24 - Esquema geométrico de colunas HEA, dimensões em mm	58
Figura 25 - Curvas tensão-deformação do aço carbono para diferentes temperaturas.....	59
Figura 26 - Condições de apoio do modelo numérico.....	59
Figura 27 - Trajetória de equilíbrio da coluna L16	61
Figura 28 - Trajetória de equilíbrio da coluna L11	61
Figura 29 - Configuração deformada numérica das colunas em situação de incêndio	62
Figura 30 - Geometria da seção transversal por superfície média.....	63
Figura 31 - Modelo constitutivo de Earls (1999)	64

Figura 32 - Condições de apoio em torno do menor eixo de inércia.....	68
Figura 33 - Condições de apoio em torno do maior eixo de inércia.....	68
Figura 34 - Fluxograma do estudo paramétrico	71
Figura 35 - Carga crítica de colunas de alma sólida.....	73
Figura 36 - Carga crítica de colunas casteladas de aço carbono	74
Figura 37 - Carga crítica de colunas casteladas de aço inoxidável	74
Figura 38 - Comparação da carga crítica de colunas casteladas	76
Figura 39 - Capacidade resistente de colunas de alma sólida	77
Figura 40 - Curvas de projeto EN 1993-1-1 (CEN, 2022)	78
Figura 41 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço carbono	79
Figura 42 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço inoxidável	80
Figura 43 - Curvas de projeto EN 1993-1-1 (CEN, 2022) para colunas casteladas	81
Figura 44 - Curvas de projeto EN 1993-1-4 (CEN, 2006) para colunas casteladas	82
Figura 45 - Capacidade de carga de colunas de alma sólida	83
Figura 46 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008).....	84
Figura 47 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço carbono.....	85
Figura 48 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço inoxidável.....	86
Figura 49 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008) para colunas casteladas de aço carbono	87
Figura 50 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008) para colunas casteladas de aço inoxidável	88
Figura 51 - Capacidade resistente de colunas de alma sólida sob incêndio	90
Figura 52 - Curva de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005).....	91
Figura 53 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço carbono sob incêndio.....	92
Figura 54 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço inoxidável sob incêndio.....	93
Figura 55 - Curvas de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005) para colunas casteladas de aço carbono	95
Figura 56 - Curvas de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005) para colunas casteladas de aço inoxidável	95
Figura 57 - Capacidade de carga de colunas de alma sólida em elevadas temperaturas.....	97
Figura 58 - Curvas de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013).....	99
Figura 59 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço carbono em elevadas temperaturas.....	100

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 60 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço inoxidável em elevadas temperaturas.....	101
Figura 61 - Curva de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013) para colunas casteladas de aço carbono	103
Figura 62 - Curva de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013) para colunas casteladas de aço inoxidável	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de dimensões para diferentes formatos de aberturas.....	29
Tabela 2 - Precisão dos resultados de colunas sob incêndio	42
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável.....	37
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável	38
Tabela 5 - Fatores de redução do aço inoxidável austenítico	44
Tabela 6 - Fatores de redução do aço carbono	48
Tabela 7 - Parâmetros geométricos das colunas casteladas.....	53
Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova	53
Tabela 9 - Comparação dos resultados de colunas casteladas	55
Tabela 10 - Identificação e características de colunas H.....	58
Tabela 11 - Comparação dos resultados de colunas submetidas a incêndio.....	60
Tabela 12 - Propriedades dos materiais	63
Tabela 13 - Fatores de redução do aço carbono em elevadas temperaturas	66
Tabela 14 - Fatores de redução do aço inoxidável em função da temperatura.....	67
Tabela 15 - Análise da escolha do elemento finito.....	69
Tabela 16 - Comparação da carga crítica numérica e analítica	75
Tabela 17 - Comparação da capacidade resistente de colunas de alma sólida	77
Tabela 18 - Comparação da capacidade resistente de colunas casteladas	80
Tabela 19 - Comparação da capacidade de carga de colunas de alma sólida.....	84
Tabela 20 - Comparação da capacidade de carga de colunas casteladas.....	86
Tabela 21 - Comparação da capacidade resistente de colunas de alma sólida sob incêndio...	91
Tabela 22 - Comparação da capacidade resistente de colunas casteladas sob incêndio.....	93
Tabela 23 - Comparação da capacidade de carga de colunas de alma sólida em elevadas temperaturas.....	97
Tabela 24 - Comparação da capacidade de carga de colunas casteladas em elevadas temperaturas.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
GMNIA	<i>Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections</i> (Análise não-linear geométrica e material com imperfeições)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{cr}	Carga crítica de flambagem
E	Módulo de elasticidade do material
I	Momento de inércia da seção transversal
k	Fator de comprimento efetivo
l	Comprimento da coluna
P_{euler}	Carga crítica de Euler
n	Fator numérico dependente da forma da seção transversal
A	Área da seção transversal
G	Módulo de elasticidade transversal do material
ν	Coefficiente de Poisson do material
A_T	Área da seção tê
a	Metade da altura da abertura castelada
e	Distância entre o centroide da seção T e o centro da abertura castelada
t_w	Espessura da alma do perfil I
b_f	Largura transversal da mesa do perfil I
t_f	Espessura da mesa do perfil I
h_w	Altura transversal da alma do perfil I
h	Altura da seção castelada
h_0	Altura da abertura castelada
a_0	Comprimento total da abertura castelada
s_0	Espaçamento entre aberturas casteladas
A_c	Área da seção de alma cheia
I_z	Momento de inércia em torno do menor eixo da seção transversal
I_y	Momento de inércia em torno do maior eixo da seção transversal
A_{2T}	Área da seção duplo tê
A_{sup}	Área da seção transversal pelo método da ponderação por superfície
$I_{i,sup}$	Momento de inércia da seção transversal pelo método da ponderação por superfície
A_{linha}	Área da seção transversal pelo método da ponderação por linha
$I_{i,linha}$	Momento de inércia da seção transversal pelo método da ponderação por linha

LISTA DE SÍMBOLOS

$N_{fi,Rd}$	Força axial resistente de cálculo em situação de incêndio
χ_{fi}	Fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio
$k_{y,\theta}$	Coefficiente de redução de resistência do material
f_y	Resistência ao escoamento do aço
$\bar{\lambda}_\theta$	Índice de esbeltez para determinada temperatura
$\bar{\lambda}$	Índice de esbeltez do elemento
$k_{E,\theta}$	Coefficiente de redução da rigidez do material
$k_{0.2p,\theta}$	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço inoxidável
θ_a	Temperatura do aço
$\Delta l/l$	Alongamento do aço em função da temperatura
c_a	Calor específico do aço
λ_a	Condutividade térmica do aço
$k_{\sigma,\theta}$	Fator de redução da resistência de seções sujeitas à instabilidade local em temperatura elevada
$\lambda_{0,fi}$	Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio
λ_0	Índice de esbeltez reduzido
σ	Tensão de engenharia do material
ε	Deformação de engenharia do material
P_{exp}	Carga resistente obtida por ensaio experimental
P_{abaqus}	Carga resistente obtida no <i>software</i> ABAQUS®
f_u	Resistência última do aço
ε_u	Deformação última do aço
$\varepsilon_{u,\theta}$	Deformação última do aço em determinada temperatura
σ_{real}	Tensão real do material
ε_{real}	Deformação real do material
θ_g	Temperatura dos gases quentes
t	Tempo de exposição aos gases quentes
χ_{abaqus}	Fator de redução associado à resistência à compressão pelo <i>software</i> ABAQUS®
N_{Rd}	Força de compressão resistente de cálculo
$N_{Rd,abaqus}$	Força de compressão resistente pelo <i>software</i> ABAQUS®

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA.....	20
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.2.1.Objetivo geral	20
1.2.2.Objetivos específicos	21
1.3. METODOLOGIA RESUMIDA.....	21
2. COMPORTAMENTO DE COLUNAS SOB COMPRESSÃO	23
3. EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS	26
4. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	31
4.1. MÉTODO DA SEÇÃO DE ALMA CHEIA.....	31
4.2. MÉTODO DA SEÇÃO 2T.....	32
4.3. MÉTODO DA PONDERAÇÃO POR SUPERFÍCIE.....	33
4.4. MÉTODO DA PONDERAÇÃO POR LINHA.....	34
5. AÇO INOXIDÁVEL EM ESTRUTURAS	36
5.1. PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL	37
5.1.1.Composição química e estrutura	37
5.1.2.Propriedades mecânicas	37
5.1.3.Ductilidade e Tenacidade	38
6. RESPOSTA ESTRUTURAL AO FOGO	39
7. NORMAS E REGULAMENTAÇÕES.....	43
7.1. EN 1993-1-2 (CEN, 2005) – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	43
7.1.1.Alongamento térmico segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005)	45
7.1.2.Calor específico segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005)	46
7.1.3.Conductividade térmica segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005).....	46
7.2. NBR 14323 (ABNT, 2013) - PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO E DE ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE EDIFÍCIOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	47
7.2.1.Alongamento térmico segundo NBR 14323 (ABNT, 2013).....	49
7.2.2.Calor específico segundo NBR 14323 (ABNT, 2013)	49

7.2.3. Condutividade térmica segundo NBR 14323 (ABNT, 2013).....	50
8. MODELAGEM NUMÉRICA	52
8.1. VERIFICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS	52
8.1.1. El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021).....	52
8.1.2. Kucukler, Xing e Gardner (2020).....	58
8.2. MODELO NUMÉRICO.....	62
8.2.1. Definição da geometria	63
8.2.2. Material do elemento	63
8.2.3. Condições de contorno	67
8.2.4. Discretização do elemento	68
8.2.5. Análise de estabilidade elástica	69
8.2.6. Análise não linear física e geométrica	70
8.2.7. Análise térmica	70
8.3. PREMISSAS PARA ESTUDO PARAMÉTRICO	71
9. RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE.....	72
9.1. CARGA CRÍTICA	72
9.2. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO EN 1993-1-1 (CEN, 2022).....	76
9.3. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO NBR 8800 (ABNT, 2008).....	83
10. RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	90
10.1. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO EN 1993-1-2 (CEN, 2005).....	90
10.2. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO NBR 14323 (ABNT, 2013).....	97
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
11.1. CONCLUSÃO.....	106
11.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

CAPÍTULO 1

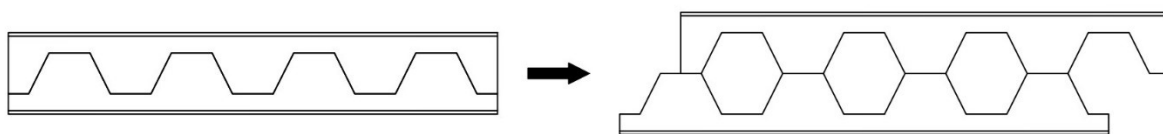
INTRODUÇÃO

Desde sua introdução como material de construção, o aço tem demonstrado grande eficiência em estruturas de pequeno e grande porte. O aço estrutural possui propriedades específicas que o tornam ideal para elementos submetidos a altos níveis de carregamento, destacando-se por sua resistência mecânica, ductilidade, resistência à corrosão, entre outras propriedades que o fazem sobressair em comparação com outros materiais estruturais (Souza, Morais e Lacerda, 2022).

O aço inoxidável tem se destacado na construção civil devido às suas propriedades de resistência à corrosão, durabilidade e estética. Em particular, o uso de colunas de aço inoxidável em edificações tem se tornado cada vez mais comum, especialmente em estruturas onde a estética e a durabilidade são fatores determinantes. Além disso, essas colunas são frequentemente submetidas a cargas de compressão axial, exigindo uma compreensão detalhada de seu comportamento estrutural para garantir a segurança e a eficiência do projeto (Rajić e Rašeta, 2022).

Para reduzir o peso das estruturas e facilitar a passagem de sistemas, como instalações elétricas e hidráulicas, é comum o uso de perfis alveolares em vigas e colunas metálicas. A utilização de perfis alveolares proporciona uma resistência à flexão superior em torno do eixo de maior inércia da seção transversal, devido ao aumento da altura da seção. No entanto, as aberturas presentes nesses perfis podem influenciar significativamente a resistência e a estabilidade das colunas, especialmente quando submetidas a cargas axiais (El-Tobgy, Abu-Sena e Fares, 2021). Isso torna a análise do comportamento dessas colunas ainda mais complexa e necessária, uma vez que é fundamental garantir que a integridade estrutural não seja comprometida.

A produção de perfis alveolares segue um processo que começa com o corte térmico de um perfil sólido, geralmente I ou H, de acordo com o padrão de aberturas desejado. As partes resultantes do corte são deslocadas longitudinalmente para criar as aberturas, que podem ser hexagonais (casteladas), circulares ou outras formas geométricas, e em seguida são soldadas para formar a seção final. A Figura 1 ilustra o processo de fabricação de um perfil castelado.

Figura 1 - Fabricação de perfis com aberturas casteladas

Fonte: Autor (2023)

Em um projeto estrutural eficiente, é fundamental prever diversas ações acidentais que possam comprometer a durabilidade e a segurança das estruturas. Segundo Ng e Gardner (2007), o risco de incêndio é particularmente relevante em estruturas metálicas. Embora o aço inoxidável apresente alta resistência mecânica, ele é mais vulnerável aos efeitos do fogo do que o aço carbono, devido ao rápido aumento de temperatura nos elementos estruturais e à alta condutividade térmica do material. A exposição ao fogo é uma preocupação crítica na engenharia estrutural, pois altas temperaturas podem degradar significativamente as propriedades mecânicas e gerar solicitações adicionais devido à expansão do aço.

A NBR 14432 (ABNT, 2001) estabelece requisitos para a resistência ao fogo das estruturas em edificações, visando garantir a segurança durante situações de incêndio. A estrutura deve permitir a evacuação segura das pessoas e a segurança nas operações de combate ao incêndio. Além disso, é necessário evitar a propagação do fogo por toda a estrutura e minimizar os danos às edificações adjacentes. Para atender a essas exigências, a norma define o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) como o período mínimo durante o qual uma estrutura deve manter sua integridade e estabilidade sob condições de incêndio. Esse tempo varia de acordo com o tipo de uso, a ocupação e o tamanho da edificação.

Por fim, destaca-se que os elementos alveolares são amplamente utilizados como vigas devido à sua elevada resistência à flexão, mas há poucos estudos sobre colunas alveolares. De maneira semelhante, embora existam pesquisas significativas sobre colunas de aço inoxidável expostas a altas temperaturas, geralmente são estudados apenas perfis com alma sólida. Esta pesquisa aborda a estabilidade de colunas casteladas em aço inoxidável submetidas à compressão e expostas ao fogo, buscando compreender o comportamento estrutural sob a influência de fatores como variação de geometria e exposição ao fogo.

1.1. JUSTIFICATIVA

A crescente utilização do aço inoxidável na construção civil se deve às suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, que garantem durabilidade e baixos custos de manutenção ao longo da vida útil das estruturas. No entanto, o comportamento de colunas de aço inoxidável com aberturas na alma, especialmente sob compressão axial e exposição ao fogo, ainda é pouco explorado na literatura. A introdução de aberturas, embora funcional para reduzir o peso das estruturas e facilitar a passagem de serviços, pode comprometer a estabilidade e a resistência das colunas. Portanto, entender como essas aberturas afetam o desempenho estrutural é essencial para desenvolver diretrizes de projeto seguras e eficientes.

Além disso, a segurança contra incêndio é uma preocupação primordial em projetos de engenharia civil. As altas temperaturas resultantes de um incêndio podem degradar significativamente as propriedades mecânicas do aço inoxidável, alterando seu comportamento sob carga. Embora existam normas que abordam o desempenho de estruturas de aço em situações de fogo, como a EN 1993-1-2 (CEN, 2005), a especificidade das colunas com aberturas na alma ainda requer investigações adicionais. A análise numérica se apresenta como uma ferramenta poderosa para simular essas condições e prever o comportamento das estruturas, contribuindo para o aprimoramento das normas existentes e para a segurança das edificações. Este estudo, portanto, não apenas amplia o conhecimento técnico sobre o comportamento de colunas de aço inoxidável, mas também tem implicações práticas diretas para a segurança e a economia na construção civil.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico de colunas casteladas em aço inoxidável submetidas a compressão axial e elevadas temperaturas, através de simulação numérica no *software* ABAQUS®.

1.2.2. Objetivos específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência dos parâmetros geométricos, como seção transversal, comprimento, tempo de exposição ao fogo, tipo de material, entre outros, na capacidade de carga resistente à compressão de colunas casteladas;
- Avaliar o efeito da elevação de temperatura em colunas casteladas de aço inoxidável;
- Avaliar a perda da capacidade de carga resistente à compressão de colunas casteladas de aço inoxidável em situação de incêndio ao longo do tempo.

1.3. METODOLOGIA RESUMIDA

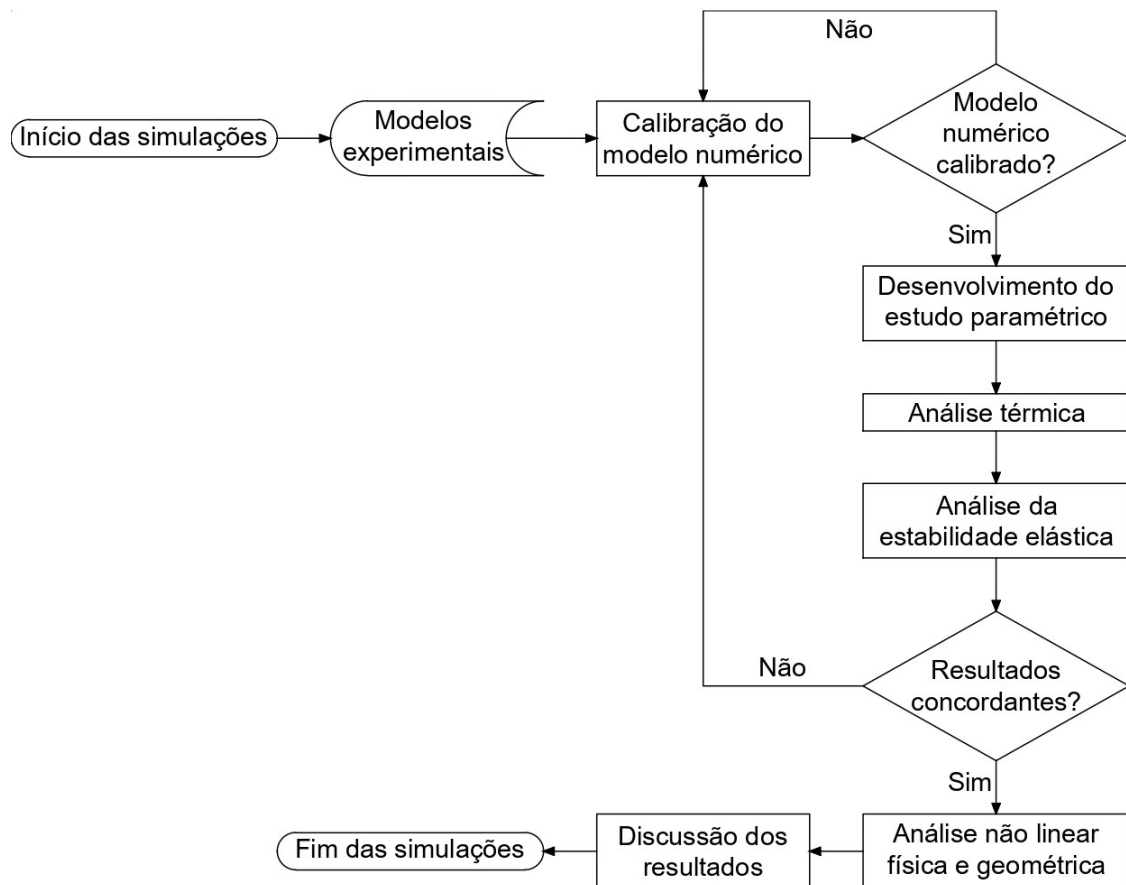
Este estudo analisou colunas de aço inoxidável com aberturas casteladas na alma, submetidas à compressão axial e situações de incêndio, utilizando o *software* de elementos finitos ABAQUS®. A metodologia incluiu a modelagem numérica, a definição de condições de contorno e simulação térmica, além da verificação dos modelos com base em dados experimentais e numéricos.

Perfis de aço carbono S355 e aço inoxidável 1.4301 foram utilizados, com propriedades dos materiais ajustadas para altas temperaturas, conforme as normas EN 1993-1-2 (CEN, 2005) e EN 1993-1-4 (CEN, 2006). As colunas foram modeladas com elementos de casca quadrilaterais (S4), considerando duas condições de apoio para análise da instabilidade em torno dos eixos principais de inércia.

A análise incluiu uma fase elástica (*buckling*) para determinar a carga crítica de flambagem e uma fase não linear para avaliar a capacidade de carga. A situação de incêndio foi simulada com a curva de incêndio-padrão presente na ISO 834 (1999), aplicando a análise térmica para calcular a temperatura média das colunas.

Os resultados foram obtidos através de um estudo paramétrico abrangente, envolvendo variações na altura das aberturas das colunas casteladas, tempos de exposição ao fogo e tipo de material, totalizando 2.520 modelos numéricos. A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada para realização da pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma do procedimento metodológico



Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 2

COMPORTAMENTO DE COLUNAS SOB COMPRESSÃO

O comportamento de colunas metálicas sob compressão axial é um aspecto crucial na engenharia estrutural. As colunas são elementos estruturais primários que suportam cargas verticais significativas, e sua eficiência é determinada pela capacidade de resistir a essas cargas sem perder a estabilidade. No caso de colunas metálicas, o material utilizado, a geometria da seção transversal e as condições de carregamento são fatores determinantes no comportamento sob compressão. Colunas de aço inoxidável, devido à sua alta resistência e ductilidade, apresentam um desempenho confiável e eficiente sob compressão axial, permitindo um controle mais efetivo sobre a instabilidade em comparação com o aço carbono (K hate, Patton e Marthong, 2018).

O comportamento de colunas metálicas sob compressão axial é influenciado principalmente pelo fenômeno da flambagem, que ocorre quando a coluna se deforma lateralmente sob a ação de uma carga axial. Este comportamento é governado pela teoria da elasticidade e pode ser previsto pela equação de Euler para flambagem crítica, expressa na Equação 1.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \quad (1)$$

Onde:

P_{cr} : carga crítica de flambagem;

E : módulo de elasticidade longitudinal do material;

I : momento de inércia da seção transversal;

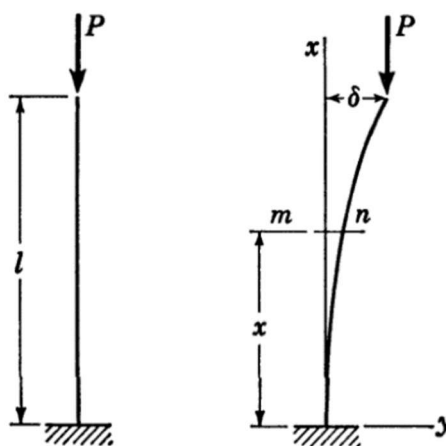
k : fator de comprimento efetivo;

l : comprimento da coluna.

CAPÍTULO 2 - COMPORTAMENTO DE COLUNAS SOB COMPRESSÃO

Segundo Timoshenko e Gere (1961), a equação de Euler considera uma coluna ideal, inicialmente isenta de imperfeições geométricas, sujeita à compressão centrada, cujo material apresenta comportamento perfeitamente elástico e está isenta de tensões residuais. A carga crítica de Euler pode ser definida como a força axial suficiente para provocar deslocamentos laterais na coluna, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Flambagem em coluna ideal

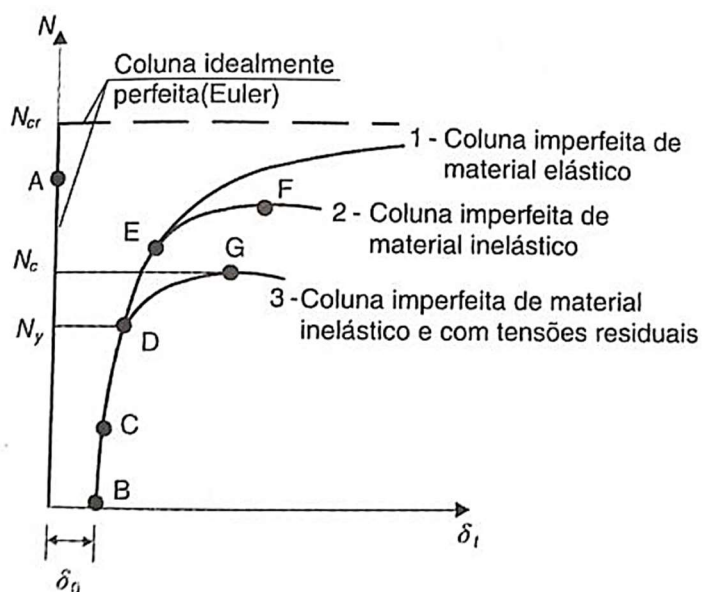


Fonte: Timoshenko e Gere (1961)

A presença de imperfeições geométricas e carregamentos excêntricos pode influenciar significativamente o comportamento de colunas metálicas sob compressão axial. Imperfeições geométricas, como desvios iniciais da linearidade perfeita, podem reduzir a carga crítica de flambagem, levando a uma perda precoce de estabilidade. Carregamentos excêntricos, onde a carga aplicada não coincide com o eixo central da coluna, podem introduzir momentos fletores adicionais, exacerbando a tendência de flambagem (Bezas *et al.*, 2021).

A Figura 4 apresenta o gráfico do comportamento estrutural de colunas sob diversas condições, abrangendo desde colunas idealmente perfeitas até colunas imperfeitas, compostas de material inelástico com tensões residuais.

Figura 4 - Comportamento de colunas em diferentes condições



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

O material da coluna e a geometria da seção transversal desempenham papéis cruciais no comportamento sob compressão axial. Colunas de aço inoxidável, devido à sua alta resistência e ductilidade, podem suportar cargas maiores antes de atingir a instabilidade em comparação com colunas de aço carbono.

A geometria da seção transversal, incluindo a forma e o momento de inércia, influencia a resistência à flambagem e a capacidade de carga da coluna. Seções transversais com maior momento de inércia, como perfis tubulares ou perfis em "I", oferecem maior resistência à instabilidade. Além disso, seções transversais compactas são menos propensas a flambagem local, o que pode ocorrer em seções esbeltas sob altas cargas (Dokšanović, Radić e Biserčić, 2023).

CAPÍTULO 3

EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS

A introdução de aberturas na alma de perfis metálicos é uma prática comum para permitir a passagem de instalações, reduzir o peso da estrutura e, em alguns casos, melhorar a eficiência material. No entanto, essas aberturas também alteram o comportamento estrutural dos perfis, especialmente sob cargas de compressão axial e flexão. Entender os efeitos dessas aberturas é essencial para garantir que a integridade e a capacidade de carga da estrutura não sejam comprometidas (Abbas, 2023).

A equação da carga crítica de Euler considera apenas a rigidez à flexão e as deformações laterais, desprezando os efeitos das deformações de cisalhamento nas colunas. Engesser (1891) modificou a equação de Euler para incluir os efeitos das deformações de cisalhamento na resistência elástica de colunas, resultando na Equação 2.

$$P_{cr} = \frac{P_{euler}}{1 + \left(\frac{nP_{euler}}{AG}\right)} \quad (2)$$
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Onde:

n : fator numérico dependente da forma da seção transversal;

A : área da seção transversal da coluna;

G : módulo de elasticidade transversal do material;

E : módulo de elasticidade longitudinal do material;

ν : coeficiente de Poisson do material.

CAPÍTULO 3 - EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS

A presença de aberturas na alma de perfis metálicos afeta diretamente a distribuição de tensões e a resistência da seção. As aberturas podem causar concentrações de tensão ao redor de suas bordas, o que pode levar a falhas locais antes que a capacidade de carga total do perfil seja atingida. Além disso, a redução da área da alma devido às aberturas diminui a resistência global do perfil à compressão axial e aumenta a suscetibilidade à flambagem local e global (Sayed, 2022).

Os parâmetros geométricos das aberturas, como tamanho, forma e espaçamento, desempenham um papel crucial na determinação do impacto das aberturas na capacidade de carga do perfil. Segundo Li *et al.* (2023), grandes aberturas ou aberturas muito próximas podem reduzir significativamente a resistência à compressão axial e aumentar a possibilidade de falhas por flambagem local. Em contrapartida, aberturas menores e bem espaçadas podem minimizar esses efeitos adversos.

El-Sawy, Sweedan e Martini (2009) conduziram um extenso estudo paramétrico por meio de análise numérica para investigar o comportamento das colunas casteladas em relação à instabilidade ao redor do eixo de maior inércia. Os autores acrescentaram à equação de Euler um fator de modificação da instabilidade para determinar a carga crítica dessas colunas. Esse fator depende de parâmetros geométricos da coluna, como a largura das aberturas, a espessura da alma e o comprimento da coluna, entre outros, e pode ser obtido por meio de gráficos que apresentam a relação desses parâmetros.

Yuan, Kim e Li (2014) propuseram uma nova solução analítica para calcular a carga crítica de colunas casteladas, levando em consideração as deformações de cisalhamento na alma. A solução analítica proposta para a carga crítica é apresentada na Equação 3. Os autores concluíram que essas deformações têm um impacto significativo na capacidade de resistência à instabilidade das colunas, e negligenciá-las pode resultar em uma superestimação da carga crítica de até 25%.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_0}{l^2} \left(1 - \frac{64\pi^2 A_T^2 a e^2}{3I_0 t_w l^2} \right) \quad (3)$$

$$I_0 = 2 \left[\frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w}{12} [h_w^3 - (2a)^3]$$

Onde:

l : comprimento da coluna;

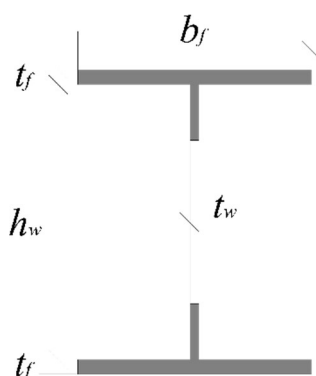
A_T : área da seção acima da abertura (seção T);

CAPÍTULO 3 - EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS

I_0 : momento de inércia da seção T;
 a : metade da altura da abertura castelada;
 e : distância entre o centroide da seção T e o centro da abertura;
 t_w : espessura da alma da seção transversal I;
 b_f : largura da mesa da seção transversal I;
 t_f : espessura da mesa da seção transversal I;
 h_w : altura da alma da seção transversal I.

Sonck e Belis (2016) analisaram a carga crítica e a capacidade de carga resistente à compressão de colunas alveolares, considerando a influência da geometria das aberturas e das tensões residuais. Por meio de análise numérica foram avaliados modelos geométricos variando altura, ângulo de abertura e largura entre alvéolos. Os resultados da carga crítica mostraram boa concordância com a equação de Euler quando utilizadas as propriedades geométricas da seção transversal no centro da abertura, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Seção transversal de perfis alveolares



Fonte: Autor (2024)

Onde:

b_f : largura da mesa da seção transversal I;
 t_f : espessura da mesa da seção transversal I;
 h_w : altura da alma da seção transversal I;
 t_w : espessura da alma da seção transversal I.

CAPÍTULO 3 - EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS

De acordo com Sonck e Belis (2016), a abordagem de seção duplo T ou seção 2T, quando combinada com as curvas de projeto da norma europeia EN 1993-1-1 (CEN, 2022), demonstra uma alta eficiência na previsão da capacidade resistente de colunas alveolares submetidas à compressão.

A norma EN 1993-1-13 (CEN, 2024) aborda o projeto de vigas com grandes aberturas na alma, estabelecendo diretrizes detalhadas para garantir a resistência e a estabilidade desses elementos. Embora a norma seja focada principalmente no projeto de vigas, ela também fornece diretrizes aplicáveis a diferentes formatos de aberturas que podem ser utilizados em elementos de coluna. A norma recomenda considerar limites nas dimensões das aberturas, conforme apresentado na Tabela 1.

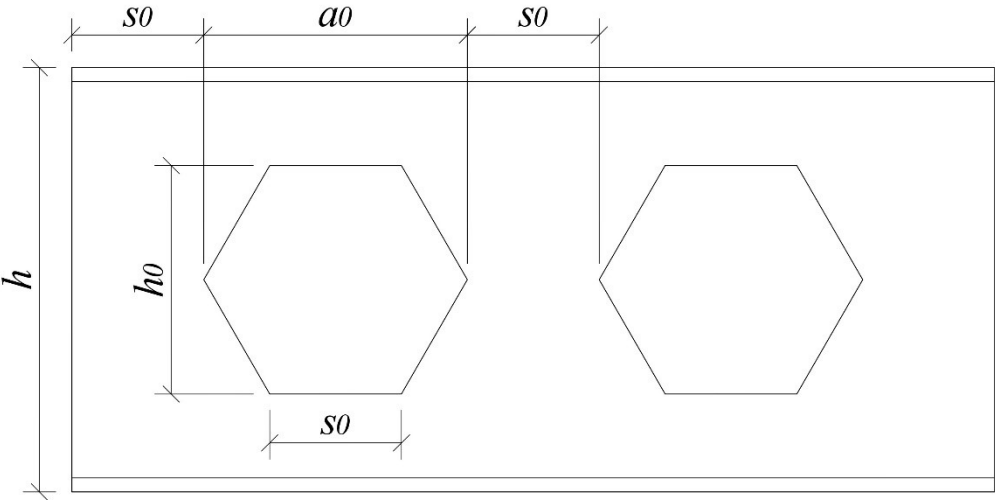
Tabela 1 - Limites de dimensões para diferentes formatos de aberturas

Formato da abertura	Altura máxima da abertura (h_0)	Comprimento máximo da abertura (a_0)	Espaçamento mínimo entre aberturas (s_0)
Circular	$0,8h$	-	$0,1h_0$
Hexagonal	$0,75h$	$1,5h_0$	$0,25h_0$
Senoidal	$0,8h$	$5h_0$	$0,25h_0$

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-13 (CEN, 2024)

Considerando que o objetivo da pesquisa é o estudo de colunas com aberturas casteladas, as dimensões das aberturas hexagonais especificadas na Tabela 1 estão ilustradas na Figura 6.

Figura 6 - Dimensões de aberturas casteladas



Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 3 - EFEITOS DE ABERTURAS NA ALMA DE PERFIS METÁLICOS

Onde:

h : altura da seção castelada;

h_0 : altura da abertura;

a_0 : comprimento total da abertura;

s_0 : espaçamento entre aberturas.

A abordagem desses parâmetros permite o dimensionamento e a análise de estruturas de aço, assegurando que tanto vigas quanto colunas com aberturas sejam projetadas de acordo com requisitos técnicos rigorosos para manter a integridade estrutural e a estabilidade.

CAPÍTULO 4

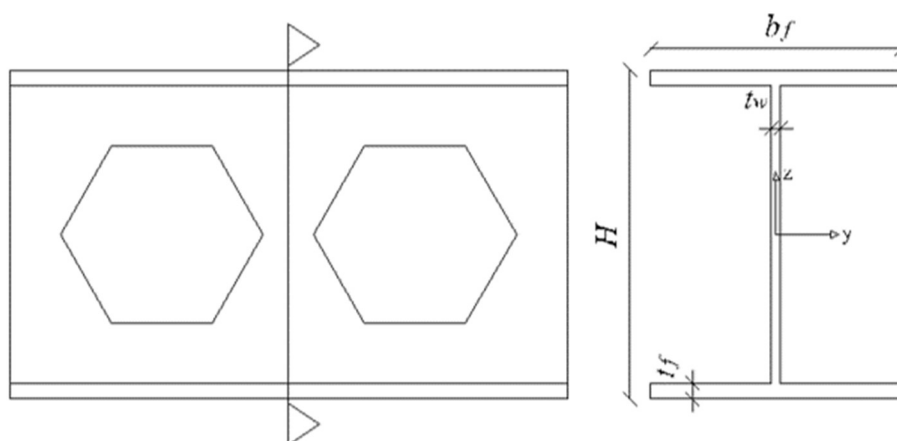
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Para comparar os resultados das colunas casteladas com equações analíticas, foram utilizados diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal. Esses métodos incluem: o método da seção de alma cheia, o método da seção 2T, o método da ponderação por superfície e o método da ponderação por linha.

4.1. MÉTODO DA SEÇÃO DE ALMA CHEIA

O método da seção de alma cheia desconsidera a presença de aberturas ao longo da coluna, conforme ilustrado na Figura 7. Dessa forma, as propriedades geométricas da seção transversal são apresentadas nas Equações 4 a 6.

Figura 7 - Seção de alma cheia



Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 4 - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

$$A_c = 2b_f t_f + (H - 2t_f)t_w \quad (4)$$

$$I_z = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(H - 2t_f)t_w^3}{12} \quad (5)$$

$$I_y = \frac{b_f t_f^3}{6} + 2b_f t_f \left(\frac{H - t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (H - 2t_f)^3}{12} \quad (6)$$

Onde:

A_c : área da seção de alma cheia;

b_f : largura da mesa da seção transversal I;

t_f : espessura da mesa da seção transversal I;

H : altura da seção transversal I;

t_w : espessura da alma da seção transversal I;

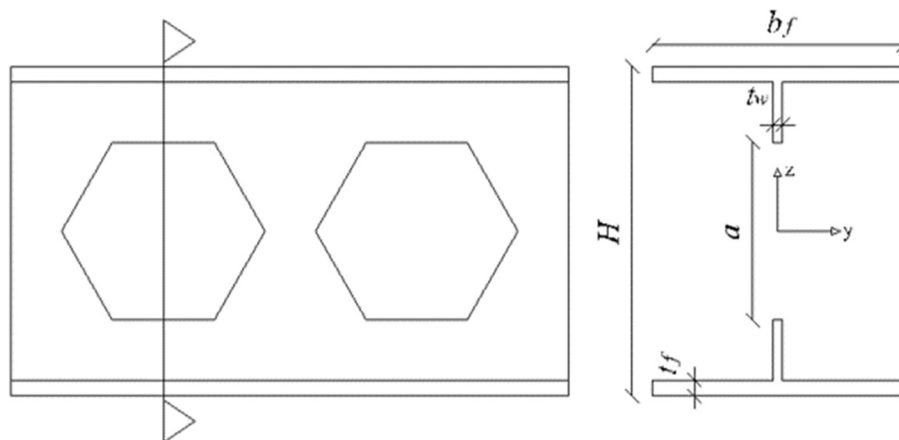
I_z : momento de inércia da seção transversal em torno do eixo z;

I_y : momento de inércia da seção transversal em torno do eixo y.

4.2. MÉTODO DA SEÇÃO 2T

Ao contrário do método da seção de alma cheia, o método da seção 2T considera a presença de aberturas ao longo de toda a coluna, como mostrado na Figura 8. As propriedades geométricas da seção transversal 2T podem ser calculadas pelas Equações 7 a 9.

Figura 8 - Seção 2T



Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 4 - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

$$A_{2T} = 2b_f t_f + (H - 2t_f)t_w - at_w \quad (7)$$

$$I_z = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(H - 2t_f)t_w^3}{12} - \frac{at_w^3}{12} \quad (8)$$

$$I_y = \frac{b_f t_f^3}{6} + 2b_f t_f \left(\frac{H - t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (H - 2t_f)^3}{12} - \frac{t_w a^3}{12} \quad (9)$$

Onde:

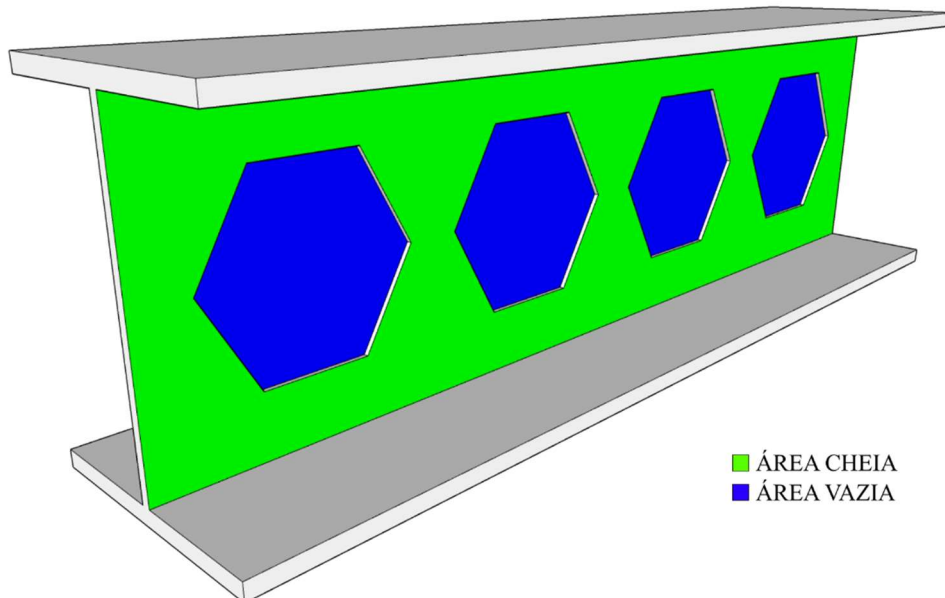
A_{2T} : área da seção 2T;

a : altura da abertura castelada;

4.3. MÉTODO DA PONDERAÇÃO POR SUPERFÍCIE

O método da ponderação por superfície, proposto por Carvalho, Rossi e Martins (2022) utiliza uma aproximação geométrica para determinar as propriedades da seção transversal alveolar, ponderando as áreas vazias e preenchidas ao longo do comprimento do perfil. A Figura 9 ilustra o método da ponderação por superfície.

Figura 9 - Método da ponderação por superfície



Fonte: Autor (2024)

As propriedades desse método são expressas em função de pesos, que correspondem à área vazia e à área preenchida do perfil. A área vazia é calculada multiplicando-se a área de

CAPÍTULO 4 - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

cada abertura pelo número total de aberturas no perfil. As Equações 10 e 11 fornecem o cálculo da área vazia e da área preenchida do perfil.

$$A_{vazia} = n \left(a^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (10)$$

$$A_{cheia} = (H - 2t_f)l - A_{vazia} \quad (11)$$

Onde:

A_{vazia} : área total das aberturas casteladas presentes no perfil metálico;

n : número de aberturas ao longo do perfil;

A_{cheia} : área sólida da coluna castelada;

l : comprimento da coluna.

Vale destacar que a Equação 10, que fornece a área da abertura, é válida apenas para perfis que possuem aberturas casteladas ao longo da alma. A área da seção transversal a ser considerada nesse método é determinada pela ponderação das áreas ao longo do perfil, conforme expresso na Equação 12.

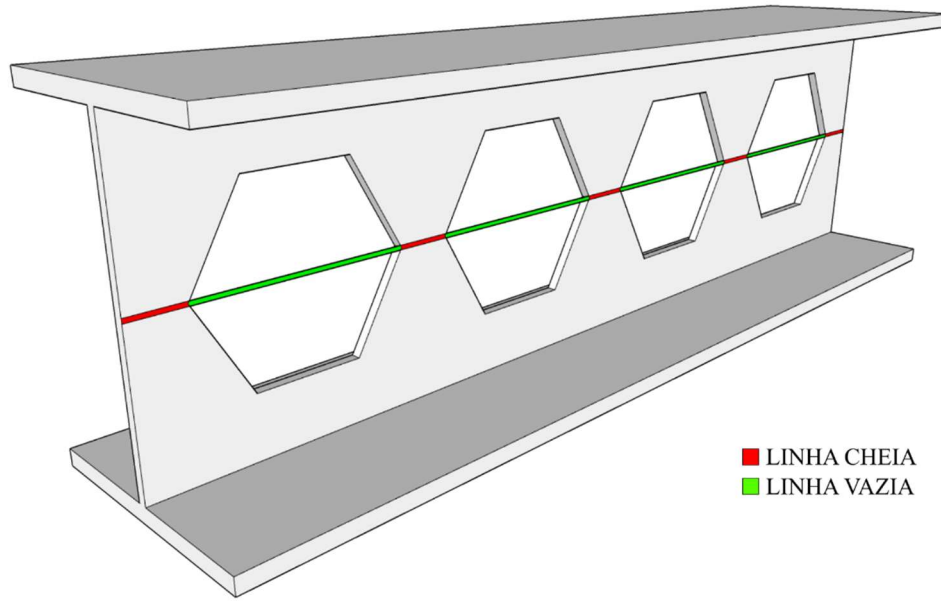
$$A_{sup} = \frac{A_c \times A_{cheia} + A_{2T} \times A_{vazia}}{A_{cheia} + A_{vazia}} \quad (12)$$

De maneira semelhante, a inércia da seção transversal é calculada com base na ponderação das áreas, conforme a Equação 13.

$$I_{i,sup} = \frac{I_{i,cheia} \times A_{cheia} + I_{i,2T} \times A_{vazia}}{A_{cheia} + A_{vazia}} \quad (13)$$

4.4. MÉTODO DA PONDERAÇÃO POR LINHA

Por fim, o método da ponderação por linha, também proposto por Carvalho, Rossi e Martins (2022), considera os trechos da linha central do perfil alveolar, conforme ilustrado na Figura 10. A linha vazia é calculada pelo comprimento da parte central das aberturas multiplicado pela quantidade de aberturas. As Equações 14 e 15 fornecem o cálculo da linha vazia e da linha preenchida.

Figura 10 - Método da ponderação por linha

Fonte: Autor (2024)

$$l_{vazia} = n \left(\frac{2a}{\sqrt{3}} \right) \quad (14)$$

$$l_{cheia} = l - l_{vazia} \quad (15)$$

Vale destacar que a Equação 14, que fornece o comprimento da abertura, é válida apenas para colunas com aberturas casteladas. Assim como no método da ponderação por superfície, a área e a inércia da seção transversal no método de ponderação por linha são expressas em função da ponderação dos pesos correspondentes aos trechos vazios e preenchidos na linha central do perfil. As Equações 16 e 17 fornecem o cálculo desses parâmetros.

$$A_{linha} = \frac{A_c \times L_{cheia} + A_{2T} \times L_{vazia}}{L_{cheia} + L_{vazia}} \quad (16)$$

$$I_{i,linha} = \frac{I_{i,cheia} \times L_{cheia} + I_{i,2T} \times L_{vazia}}{L_{cheia} + L_{vazia}} \quad (17)$$

CAPÍTULO 5

AÇO INOXIDÁVEL EM ESTRUTURAS

O uso de aço inoxidável em estruturas tem crescido significativamente devido às suas propriedades únicas que o distinguem de outros materiais estruturais. O aço inoxidável é amplamente reconhecido por sua resistência à corrosão, resultante da formação de uma camada passiva de óxido de cromo na superfície do material, que protege contra a oxidação em ambientes agressivos (Mohammed e Afshan, 2019). Esta característica torna o aço inoxidável especialmente adequado para aplicações em ambientes marinhos, industriais e arquitetônicos, onde a durabilidade é essencial. Além da resistência à corrosão, o aço inoxidável apresenta boa resistência mecânica e ductilidade, permitindo a construção de estruturas mais leves sem comprometer a segurança.

De acordo com Gardner (2019) o aço inoxidável é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações estruturais devido às suas vantagens específicas. Além de pontes e estruturas expostas a ambientes marinhos, o aço inoxidável é empregado em sistemas de transporte, equipamentos industriais, e componentes arquitetônicos. Sua resistência à corrosão prolonga a vida útil das estruturas e reduz a necessidade de manutenção, o que resulta em custos operacionais mais baixos ao longo do tempo.

A versatilidade do aço inoxidável também permite a criação de designs arquitetônicos inovadores, combinando funcionalidade e estética. Muitos projetos modernos utilizam aço inoxidável em fachadas, estruturas de suporte e elementos decorativos, aproveitando sua aparência elegante e a capacidade de resistir aos efeitos do tempo e do uso.

Apesar de suas muitas vantagens, o uso de aço inoxidável em estruturas também apresenta desafios, como o custo inicial mais elevado em comparação com outros materiais estruturais. No entanto, os custos de manutenção significativamente reduzidos e a longa vida útil do material geralmente compensam esse investimento inicial ao longo do tempo (Gardner, 2019).

5.1. PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL

O aço inoxidável é amplamente utilizado em diversas aplicações estruturais devido às suas propriedades únicas, que incluem alta resistência à corrosão, excelente resistência mecânica e boa ductilidade. A seguir serão exploradas as principais propriedades do aço inoxidável, com ênfase nas suas características químicas, físicas e mecânicas.

5.1.1. Composição química e estrutura

Os aços inoxidáveis austeníticos, amplamente utilizados por sua resistência à corrosão, devem suas propriedades protetoras principalmente à presença de cromo em sua composição química. O cromo, quando presente em quantidades de pelo menos 10,5%, forma uma camada passiva de óxido de cromo na superfície do aço, o que impede a progressão da corrosão. Além disso, elementos de liga como níquel, molibdênio e nitrogênio são frequentemente adicionados para melhorar a resistência à corrosão e outras propriedades mecânicas. Esses elementos ajudam a estabilizar a estrutura austenítica e aumentam a resistência a ambientes corrosivos, incluindo atmosferas com cloretos, comuns em aplicações industriais e marinhas (Borgioli, 2023). A Tabela 2 ilustra a diversidade de composições químicas dos diferentes tipos de aço inoxidável.

Tabela 2 - Composição química do aço inoxidável

Tipo de aço inoxidável	Cromo (%)	Níquel (%)	Molibdênio (%)	Outros elementos
Austenítico	16 - 26	6 - 22	0 - 3	N, Mn
Ferrítico	10,5 - 30	0 - 1	0 - 4	Ti, Nb
Duplex	18 - 28	4,5 - 8	2,5 - 4,5	N

Fonte: Velling (2020)

5.1.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do aço inoxidável variam de acordo com a composição da liga, sendo classificadas em austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex. A resistência à tração do aço inoxidável geralmente varia entre 400 MPa e 700 MPa, dependendo da liga e do tratamento térmico aplicado. Além disso, a ductilidade é uma característica importante, permitindo a deformação plástica antes da ruptura, o que melhora a capacidade de absorção de

energia e a segurança estrutural. Aços inoxidáveis austeníticos combinam excelente resistência e ductilidade, permitindo absorver deformações significativas sem falha, enquanto aços inoxidáveis ferríticos, embora menos dúcteis, oferecem maior resistência ao cloreto (Gardner, 2019).

A Tabela 3 destaca as propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço inoxidável, como resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, facilitando a comparação entre as ligas mais comumente utilizadas em aplicações estruturais.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável

Tipo de aço inoxidável	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Austenítico	500 - 750	200 - 350	200	40 - 60
Ferrítico	400 - 600	250 - 350	220	20 - 30
Duplex	600 - 800	450 - 600	200	25 - 35

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-4 (CEN, 2006)

5.1.3. Ductilidade e Tenacidade

O aço inoxidável é amplamente reconhecido por suas notáveis propriedades de ductilidade e tenacidade, que permitem que o material suporte grandes deformações sem falhar. Essas características são particularmente valiosas em aplicações que exigem alta absorção de energia, como em zonas sísmicas, onde a capacidade de deformar-se sem fraturar é crucial para a segurança estrutural. Segundo Gardner (2005), a tenacidade do aço inoxidável faz com que ele seja menos suscetível a fraturas frágeis, mesmo em temperaturas baixas, o que é essencial para garantir a integridade das estruturas em condições adversas.

O aço inoxidável se destaca como um material de construção extremamente versátil e robusto devido às suas propriedades excepcionais. Sua resistência à corrosão e excelente ductilidade o tornam ideal para aplicações em ambientes agressivos e situações onde a integridade estrutural precisa ser mantida sob altas cargas e temperaturas extremas. A sua capacidade de suportar grandes deformações sem falhar e a resistência a fraturas frágeis em temperaturas baixas amplificam sua adequação para projetos estruturais críticos, especialmente em zonas sísmicas. Assim, a utilização de aço inoxidável em estruturas não só garante durabilidade e resistência, mas também contribui para a segurança e eficácia das construções em diversos cenários desafiadores.

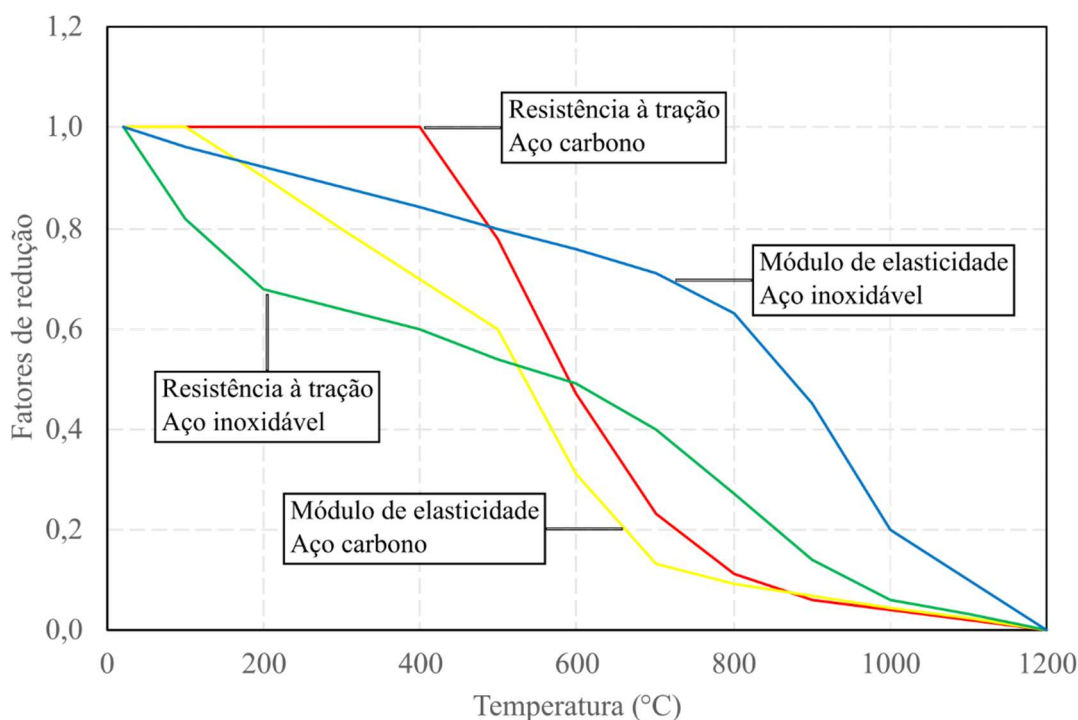
CAPÍTULO 6

RESPOSTA ESTRUTURAL AO FOGO

Durante a etapa de projeto de estruturas, é essencial considerar todas as ações presentes e prever possíveis ações acidentais, como incêndios, devido aos potenciais riscos à vida e à estabilidade estrutural. A resposta estrutural de colunas metálicas ao fogo é um aspecto crítico na engenharia de estruturas, pois a exposição a altas temperaturas pode comprometer significativamente a integridade e a capacidade de carga das colunas. Embora o aço inoxidável apresente uma resistência ao fogo superior à do aço carbono, ele ainda sofre degradação das suas propriedades mecânicas quando exposto a temperaturas elevadas (Rajić e Rašeta, 2022).

O aço inoxidável é uma liga metálica composta principalmente por ferro, cromo e outros elementos como níquel e molibdênio, conhecidos por sua excelente resistência à corrosão e oxidação. Entre os tipos de aço inoxidável, o austenítico, com uma estrutura cristalina específica estabilizada pela adição de níquel, destaca-se por sua resistência à corrosão e ao fogo. Uma de suas vantagens em aplicações estruturais é a capacidade de manter uma porção significativa de sua resistência mecânica quando exposto a altas temperaturas, comparado a outros aços como o carbono. No entanto, à medida que a temperatura aumenta, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à tração do aço inoxidável diminuem, o que afeta a capacidade de carga da estrutura. O aço inoxidável austenítico, em particular, exibe boa resistência ao fogo devido à sua composição química e estrutura cristalina (Gardner e Baddoo, 2006).

A Figura 11 demonstra a influência da temperatura na variação do módulo de elasticidade e da resistência à tração do aço carbono e inoxidável.

Figura 11 - Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

Observa-se que o fator de redução da resistência à tração do aço carbono é mais acentuado até aproximadamente 600°C, o que corresponde a cerca de 30 minutos de exposição em condições de incêndio. No entanto, para temperaturas superiores a 600°C, o aço inoxidável demonstra um desempenho superior, com menor redução na resistência à tração em comparação ao aço carbono. Além disso, o fator de redução do módulo de elasticidade do aço inoxidável é consistentemente maior, o que indica que os elementos fabricados com esse material mantêm maior rigidez estrutural mesmo sob elevadas temperaturas, reforçando sua adequação em situações de exposição ao fogo.

Gardner e Baddoo (2006) realizaram um extenso programa de estudos para investigar o desempenho de vigas e colunas de aço inoxidável durante incêndios. Os autores conduziram testes em diferentes tipos de aço inoxidável, visando determinar fatores de redução de resistência e rigidez em altas temperaturas. Com base nos resultados obtidos nos experimentos e na análise paramétrica, os autores propuseram recomendações de projeto para elementos de aço inoxidável, que foram posteriormente incluídas na norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005).

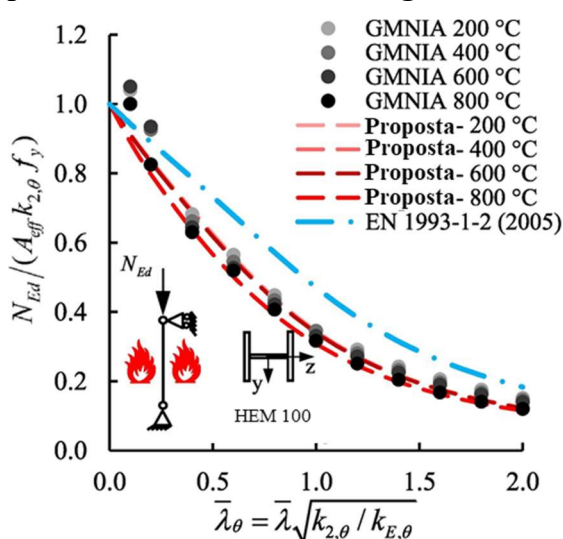
Ng e Gardner (2007) realizaram um estudo paramétrico por meio de análise numérica para propor melhorias nas recomendações de cálculo para colunas de aço inoxidável em incêndios. Eles identificaram resultados conservadores e inconsistências no tratamento de fenômenos de instabilidade. Como resposta, os autores propuseram uma nova abordagem para

a classificação de seções, resultando em melhorias significativas: 6% na resistência à instabilidade de colunas, 28% na resistência de colunas curtas e 14% na resistência à flexão, em comparação com as recomendações de EN 1993-1-2 (CEN, 2005).

Kucukler, Xing e Gardner (2020) desenvolveram modelos numéricos para simular a resposta estrutural de colunas de aço inoxidável em situações de incêndio. Realizaram extensos estudos paramétricos, analisando diferentes níveis de temperatura, geometrias, valores de esbeltez e tipos de aço inoxidável. Os resultados obtidos serviram como base para a criação de uma nova abordagem de projeto para colunas de aço inoxidável em condições de incêndio.

A Figura 12 apresenta a comparação entre as curvas de flambagem obtidas por diferentes métodos: análise não-linear geométrica e material com inclusão de imperfeições (GMNIA), a proposta de cálculo de Kucukler, Xing e Gardner (2020) e as recomendações de EN 1993-1-2 (CEN, 2005).

Figura 12 - Comparação de curvas de flambagem em situação de incêndio



Fonte: Adaptado de Kucukler, Xing e Gardner (2020)

Os resultados decorrentes da proposta de Kucukler, Xing e Gardner (2020) apresentaram-se mais precisos e conservadores quando comparados a EN 1993-1-2 (CEN, 2005). A nova abordagem de cálculo mostrou-se mais eficiente para a determinação da capacidade de carga resistente à compressão em situação de incêndio.

Rajić e Rašeta (2022) conduziram um estudo paramétrico de elementos finitos para replicar a resposta ao fogo de colunas de aço inoxidável, simulando condições reais de incêndio. No experimento, a coluna foi primeiramente carregada e, em seguida, aquecida até a falha. Os autores sugeriram a inclusão de parâmetros adicionais que consideram a razão entre a área da

mesa e da alma da seção, bem como a razão entre a espessura da mesa e da alma da seção, para melhorar a precisão dos resultados. A Tabela 4 apresenta a comparação da precisão dos resultados de colunas sob temperaturas elevadas por diferentes propostas de cálculo.

Tabela 4 - Precisão dos resultados de colunas sob incêndio

	Grau	Média	Desvio padrão
Rajić e Rašeta	Austenítico	1,047	0,0025
	Duplex	1,049	0,0028
	Ferrítico	1,054	0,0021
EN 1993-1-2	Austenítico	0,846	0,0116
	Duplex	0,899	0,0175
	Ferrítico	1,121	0,0131
Kucukler, Xing e Gardner	Austenítico	1,201	0,0380
	Duplex	1,451	0,0424
	Ferrítico	1,617	0,0914

Fonte: Adaptado de Rajić e Rašeta (2022)

A análise da precisão dos resultados revelou que as recomendações da norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005) apresentaram valores de resistência imprecisos e inseguros. Em contrapartida, a proposta de Kucukler, Xing e Gardner (2020) forneceu resultados seguros, porém imprecisos, com média e desvio padrão elevados. A proposta de Rajić e Raseta (2022) demonstrou resultados seguros e precisos.

A norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005) foi comparada com as propostas de diversos autores, revelando uma significativa margem para melhorias no cálculo da capacidade de carga resistente à compressão de colunas em situação de incêndio. É essencial avaliar a influência das aberturas no perfil de aço na capacidade resistente, devido à concentração de tensões em torno delas. Além disso, imperfeições geométricas, como desvios iniciais e excentricidades de carga, podem se tornar ainda mais críticas sob condições de incêndio.

CAPÍTULO 7

NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

As normas e regulamentações desempenham um papel crucial no projeto e na análise de estruturas metálicas, especialmente no que se refere ao uso de aço inoxidável em condições de compressão axial e exposição ao fogo. Este capítulo apresenta uma revisão das principais normas e regulamentações aplicáveis, destacando suas diretrizes e exigências específicas.

O cumprimento das normas e regulamentações aplicáveis é essencial para garantir a segurança e a eficiência das estruturas de aço inoxidável, especialmente em condições de incêndio.

7.1. EN 1993-1-2 (CEN, 2005) – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O *Eurocode 3* é uma das normas mais amplamente utilizadas para o projeto de estruturas de aço na Europa. Especificamente, EN 1993-1-2 (CEN, 2005) aborda o projeto de estruturas de aço em condições de incêndio. Esta norma fornece diretrizes detalhadas sobre como considerar os efeitos do fogo nas propriedades dos materiais, nas cargas aplicadas e nas condições de contorno das estruturas.

Para uma determinada temperatura, a capacidade de carga resistente à compressão, de acordo com a norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005), pode ser calculado utilizando a Equação 18.

$$N_{fi,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (18)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$\phi_{\theta} = \frac{1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2}{2}$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

Onde:

χ_{fi} : fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio;

A : área da seção transversal da coluna;

$k_{y,\theta}$: fatores de redução de resistência do material em determinada temperatura;

f_y : resistência ao escoamento do aço;

$\bar{\lambda}_\theta$: índice de esbeltez em determinada temperatura;

$\bar{\lambda}$: índice de esbeltez do elemento;

$k_{E,\theta}$: fatores de redução da rigidez do material em determinada temperatura.

Os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço inoxidável austenítico grau 1.4301 estão apresentados na Tabela 5, levando em consideração a temperatura do elemento estrutural em situações de incêndio.

Tabela 5 - Fatores de redução do aço inoxidável austenítico

Temperatura (°C)	$k_{0.2p,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20	1,00	1,00
100	0,82	0,96
200	0,68	0,92
300	0,64	0,88
400	0,60	0,84
500	0,54	0,80
600	0,49	0,76
700	0,40	0,71
800	0,27	0,63
900	0,14	0,45
1000	0,06	0,20
1100	0,03	0,10
1200	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

Onde:

$k_{0,2p,\theta}$: fator de redução da resistência ao escoamento do aço inoxidável.

A norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005) fornece as propriedades térmicas de diferentes tipos de aço. Portanto, serão apresentadas as propriedades térmicas do aço inoxidável austenítico, utilizadas nas análises paramétricas, incluindo alongamento térmico, calor específico e condutividade térmica.

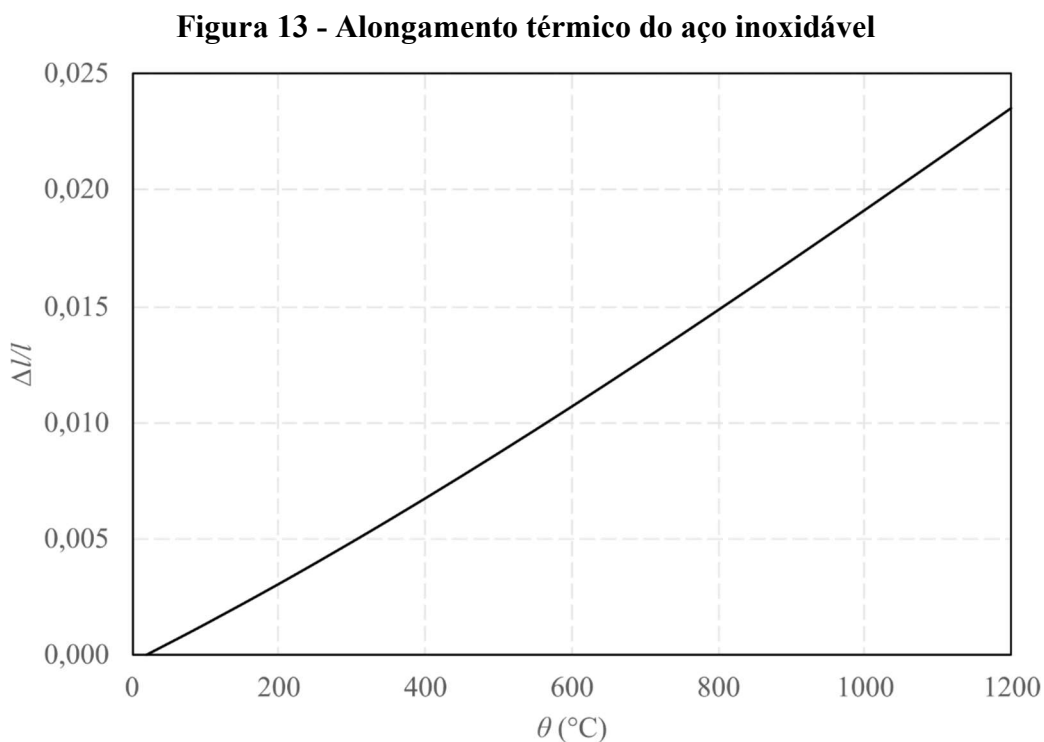
7.1.1. Alongamento térmico segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

O alongamento térmico do aço inoxidável pode ser determinado utilizando a Equação 19, que descreve a variação do comprimento do material em função da temperatura, cuja representação gráfica é ilustrada na Figura 13.

$$\frac{\Delta l}{l} = (16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta_a - 1,243 \times 10^{-6} \theta_a^2) \cdot (\theta_a - 20) \times 10^{-6} \quad (19)$$

Onde:

θ_a : temperatura do aço em determinada temperatura.



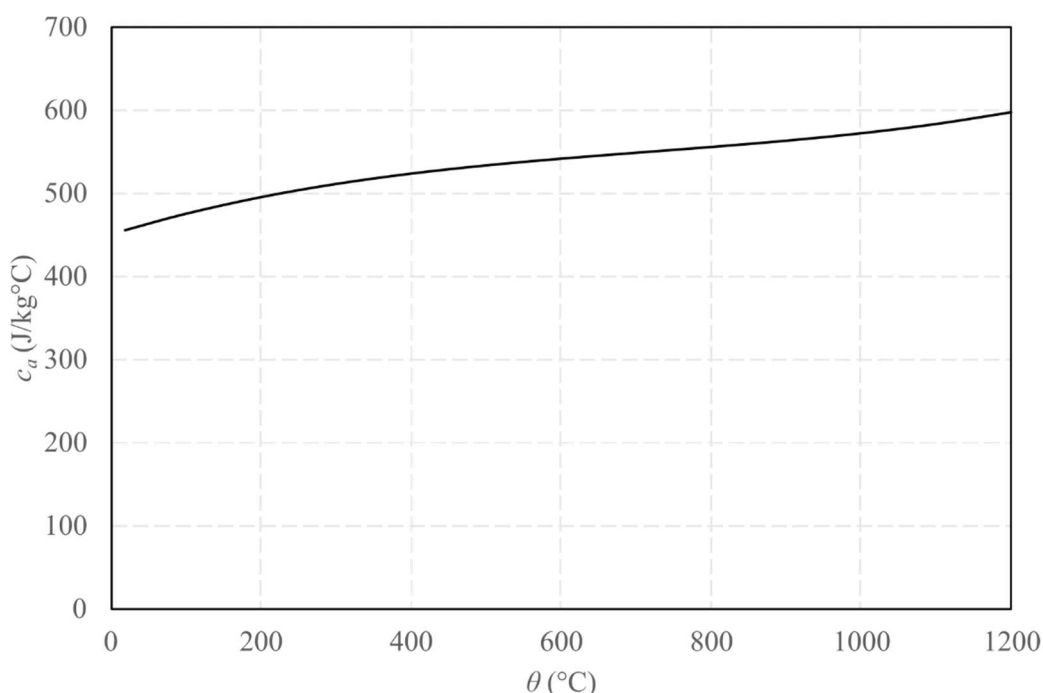
Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

7.1.2. Calor específico segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

O calor específico do aço inoxidável pode ser calculado utilizando a Equação 20. A equação fornece a relação para determinar a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do aço inoxidável em uma unidade de massa, conforme Figura 14.

$$c_a = 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3 - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 0,28 \theta_a + 450 \quad (20)$$

Figura 14 - Calor específico do aço inoxidável

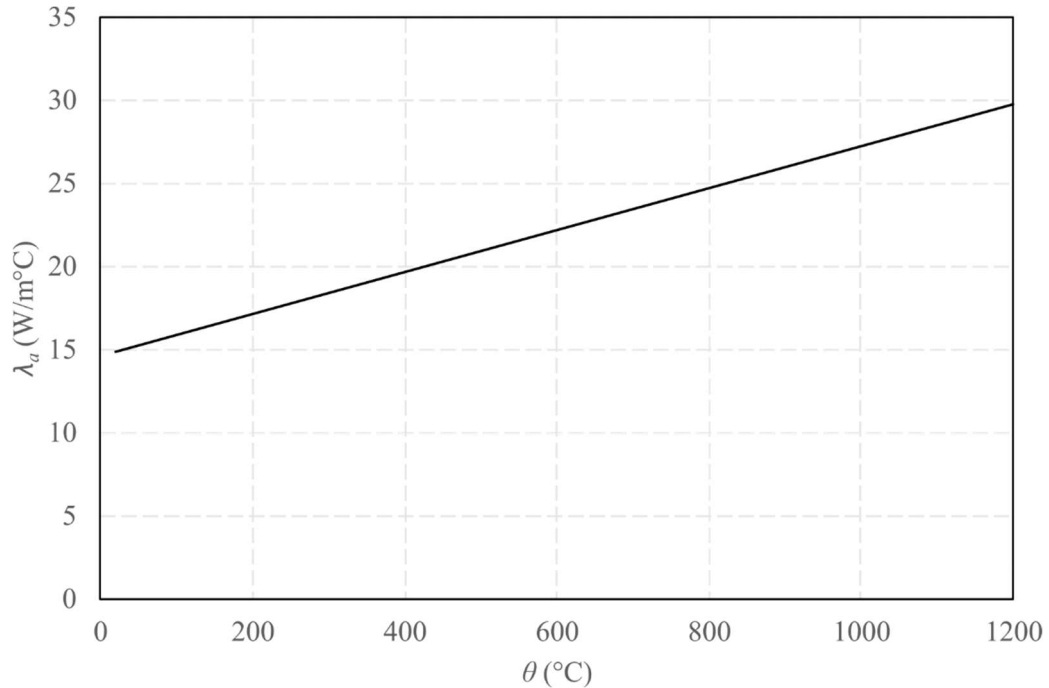


Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

7.1.3. Condutividade térmica segundo EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

Por fim, a variação da condutividade térmica do aço inoxidável é ilustrada na Figura 15 e pode ser expressa pela Equação 21. Esta equação permite calcular a capacidade do material de conduzir calor em diferentes temperaturas.

$$\lambda_a = 1,27 \times 10^{-2} \theta_a + 14,6 \quad (21)$$

Figura 15 - Condutividade térmica do aço inoxidável

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

7.2. NBR 14323 (ABNT, 2013) - PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO E DE ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE EDIFÍCIOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A NBR 14323 (ABNT, 2013) trata especificamente do dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. Esta norma fornece diretrizes detalhadas para a análise e o dimensionamento de componentes estruturais de aço considerando a exposição ao fogo.

Essa norma recomenda a utilização da Equação 22 para calcular a capacidade resistente de elementos estruturais submetidos à compressão em situações de incêndio.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A f_y \quad (22)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{0,fi} + \sqrt{\phi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}}$$

$$\phi_{0,fi} = \frac{1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2}{2}$$

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85}$$

Onde:

$\lambda_{0,fi}$: índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio;

λ_0 : índice de esbeltez reduzido.

Ao contrário da norma europeia, a NBR 14323 (ABNT, 2013) considera apenas elementos de aço carbono. Portanto, os fatores de redução apresentam valores distintos em relação aos apresentados na Tabela 5, devido ao tipo de material. A Tabela 6 apresenta os fatores de redução do aço carbono.

Tabela 6 - Fatores de redução do aço carbono

Temperatura (°C)	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20	1,00	1,000
100	1,00	1,000
200	1,00	0,900
300	1,00	0,800
400	1,00	0,700
500	0,78	0,600
600	0,47	0,310
700	0,23	0,130
800	0,11	0,090
900	0,06	0,068
1000	0,04	0,045
1100	0,02	0,023
1200	0,00	0,000

Fonte: Adaptado de NBR 14323 (ABNT, 2013)

A análise da capacidade resistente de colunas submetidas a altas temperaturas depende das propriedades térmicas do material, como alongamento, condutividade térmica e calor específico. Essas propriedades variam com o aumento da temperatura no elemento, conforme apresentado a seguir.

7.2.1. Alongamento térmico segundo NBR 14323 (ABNT, 2013)

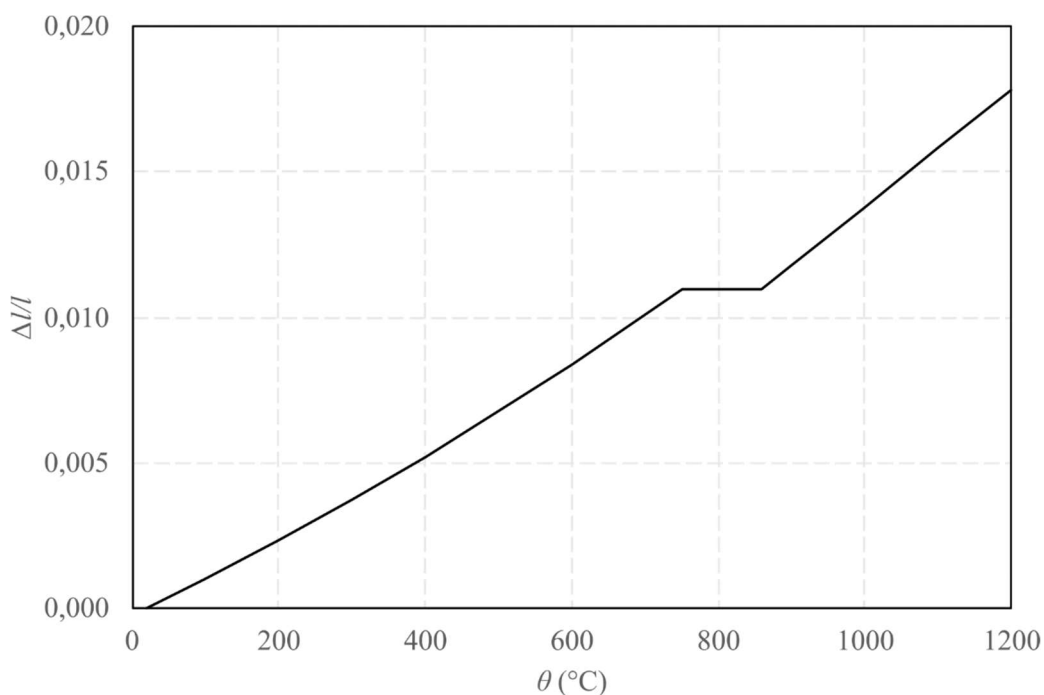
O alongamento do aço, ilustrado na Figura 16, pode ser calculado pela Equação 23.

$$\frac{\Delta l}{l} = 4 \times 10^{-9} \theta_a^2 + 1,2 \times 10^{-5} \theta_a - 2,416 \times 10^{-4}, 20 \leq \theta_a < 750 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \times 10^{-2}, 750 \leq \theta_a \leq 860 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}, 860 < \theta_a \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Figura 16 - Alongamento térmico do aço carbono



Fonte: Adaptado de NBR 14323 (ABNT, 2013)

7.2.2. Calor específico segundo NBR 14323 (ABNT, 2013)

A Equação 24 permite determinar a variação do calor específico do aço em função da temperatura, conforme ilustrado na Figura 17.

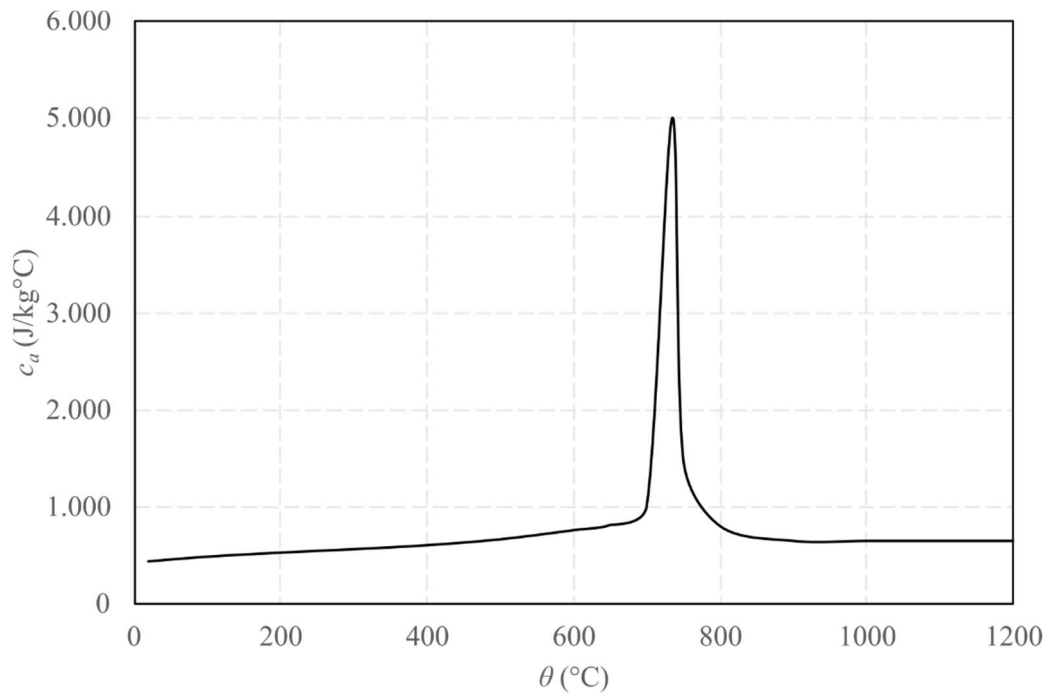
$$c_a = 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 0,773 \theta_a + 425, 20 \leq \theta_a < 600 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (24)$$

$$c_a = \frac{13002}{738 - \theta_a} + 666, 600 \leq \theta_a < 735 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = \frac{17820}{\theta_a - 731} + 545, 735 \leq \theta_a < 900 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 650, 900 \leq \theta_a \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Figura 17 - Calor específico do aço carbono



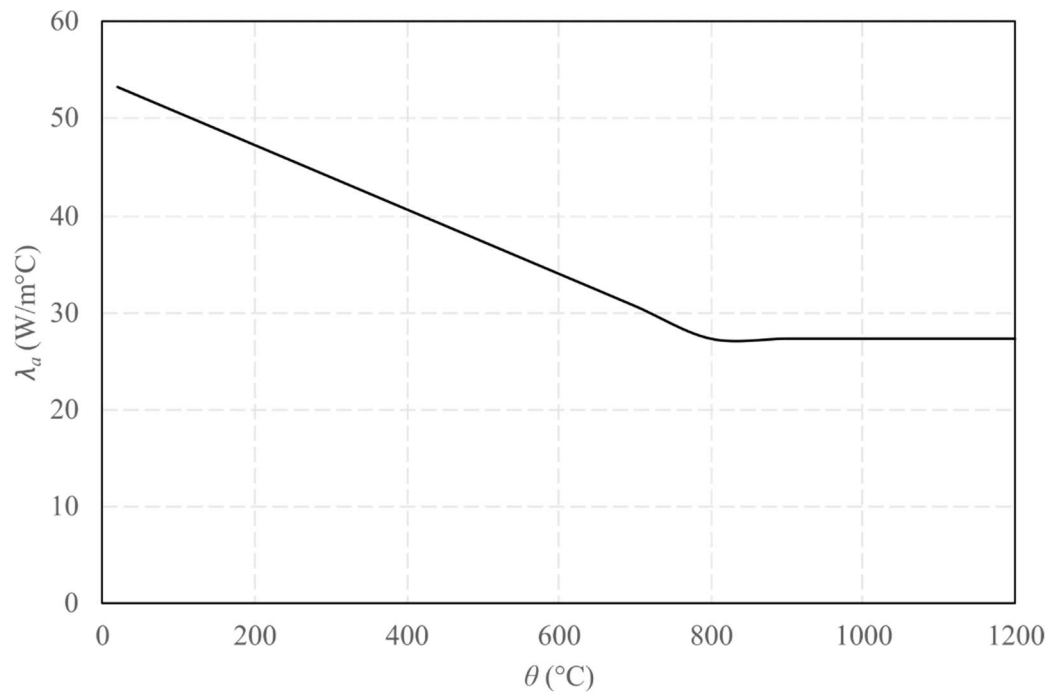
Fonte: Adaptado de NBR 14323 (ABNT, 2013)

7.2.3. Condutividade térmica segundo NBR 14323 (ABNT, 2013)

Por último, a condutividade térmica do aço carbono pode ser determinada pela Equação 25 e demonstrada na Figura 18.

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a, 20 \leq \theta_a < 800 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (25)$$

$$\lambda_a = 27,3, 800 \leq \theta_a \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Figura 18 - Condutividade térmica do aço carbono

Fonte: Adaptado de NBR 14323 (ABNT, 2013)

CAPÍTULO 8

MODELAGEM NUMÉRICA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para a análise de colunas de aço inoxidável com aberturas casteladas na alma, submetidas a compressão axial em torno dos dois principais eixos de inércia da seção transversal e expostas a situação de incêndio. A metodologia é dividida em várias etapas, que incluem a modelagem numérica, as condições de contorno, a simulação de incêndio, a verificação dos resultados e a verificação do modelo.

A modelagem numérica foi realizada utilizando o *software* de elementos finitos ABAQUS®, amplamente reconhecido por sua capacidade de simular com precisão o comportamento de materiais e estruturas sob várias condições de carga e temperatura.

8.1. VERIFICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

A verificação dos modelos numéricos nesta pesquisa foi realizada com base em resultados experimentais e numéricos previamente documentados na literatura. Os estudos conduzidos por El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021), que abordam o comportamento de colunas casteladas de aço em compressão à temperatura ambiente, e a análise numérica de colunas submetidas ao fogo realizada por Kucukler, Xing e Gardner (2020), foram fundamentais para a compreensão do problema analisado e serviram como referência crucial para a verificação do modelo numérico.

8.1.1. El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021)

Os autores investigaram o comportamento estrutural de vigas e colunas casteladas de aço carbono por meio de ensaios experimentais em doze elementos. Dentre esses, dois elementos de coluna foram selecionados, com foco na compressão axial, para a verificação do modelo numérico. A Tabela 7 apresenta os parâmetros geométricos considerados nesses ensaios de colunas.

Tabela 7 - Parâmetros geométricos das colunas casteladas

Identificação	Comprimento (mm)	h (mm)	h_0 (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	a_0 (mm)	s_0 (mm)
L30-R1.3	2979,13	260	120	100	8,5	5,6	138,56	69,28
L30-R1.5	3233,16	300	200	100	8,5	5,6	230,97	115,47

Fonte: Adaptado de El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021)

Onde:

h : altura da seção castelada;

h_0 : altura da abertura castelada;

b_f : largura da mesa da seção transversal I;

t_f : espessura da mesa da seção transversal I;

t_w : espessura da alma da seção transversal I;

a_0 : comprimento total da abertura;

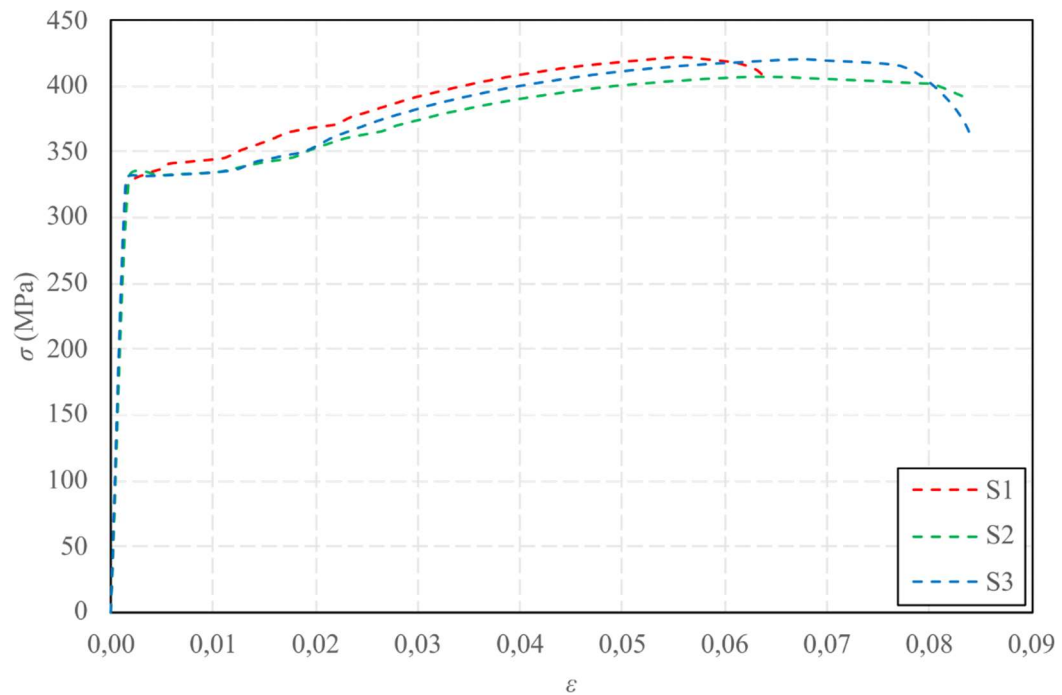
s_0 : espaçamento entre aberturas.

As propriedades mecânicas foram integradas ao modelo numérico utilizando curvas tensão-deformação obtidas experimentalmente pelos autores da pesquisa. A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas, que são ilustradas na Figura 19.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos corpos de prova

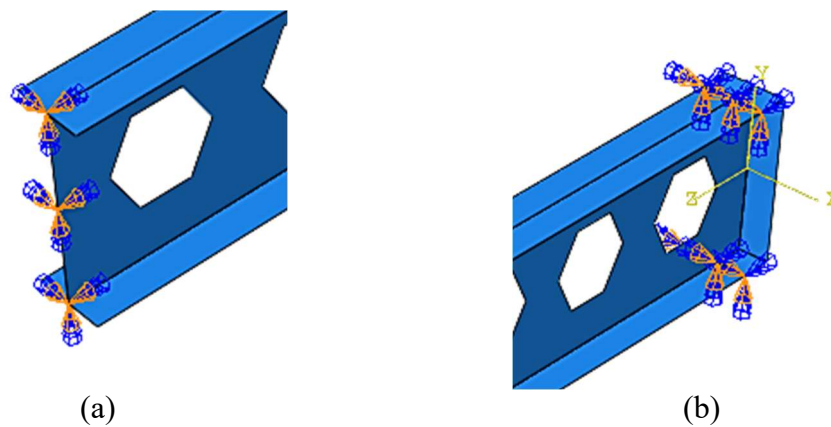
Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)
S1	186,4	331	421
S2	189,6	321	407
S3	213,8	303	420

Fonte: Adaptado de El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021)

Figura 19 - Curvas tensão-deformação do aço carbono

Fonte: Adaptado de El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021)

As colunas ensaiadas foram fixadas ao piso em suas extremidades inferiores com o auxílio de uma placa de aço e parafusos. Já a extremidade superior foi restringida lateralmente por um suporte, posicionado 50 mm abaixo do ponto de aplicação da carga, permitindo o deslocamento vertical. A Figura 20 ilustra detalhadamente as condições de apoio das colunas no modelo numérico.

Figura 20 - Condições de contorno de colunas casteladas

Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 8 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com base no trabalho de El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021), foram desenvolvidos modelos numéricos para verificar o comportamento e a trajetória de equilíbrio de colunas casteladas sob compressão. Na análise não linear, foram testadas diferentes combinações de modelos constitutivos e imperfeições geométricas iniciais, visando aproximar os resultados numéricos ao comportamento real das colunas.

Optou-se por desconsiderar as tensões residuais, embora existam modelos eficientes para representar as colunas analisadas na verificação, devido à ausência de modelos de tensões residuais que considerem colunas casteladas de aço inoxidável, foco da presente pesquisa. No entanto, a imperfeição geométrica inicial de $l/500$, recomendada por Yuan *et al.* (2012), considera indiretamente as tensões residuais decorrentes do processo de fabricação das colunas.

A Tabela 9 apresenta os resultados numéricos da capacidade de carga resistente à compressão comparados com os resultados experimentais.

Tabela 9 - Comparação dos resultados de colunas casteladas

ID	P_{exp} (kN)	Amostra	Imperfeição geométrica	P_{abaqus} (kN)	Erro relativo (%)
L30-R1.3	392,70	S1	$l/500$	318,11	18,99
			$l/1000$	351,67	10,45
		S2	$l/500$	324,00	17,49
			$l/1000$	356,89	9,12
		S3	$l/500$	351,05	10,61
			$l/1000$	391,06	0,42
L30-R1.5	305,81	S1	$l/500$	282,42	7,65
			$l/1000$	309,47	1,20
		S2	$l/500$	287,73	5,91
			$l/1000$	315,23	3,08
		S3	$l/500$	310,32	1,48
			$l/1000$	344,87	12,77

Fonte: Autor (2023)

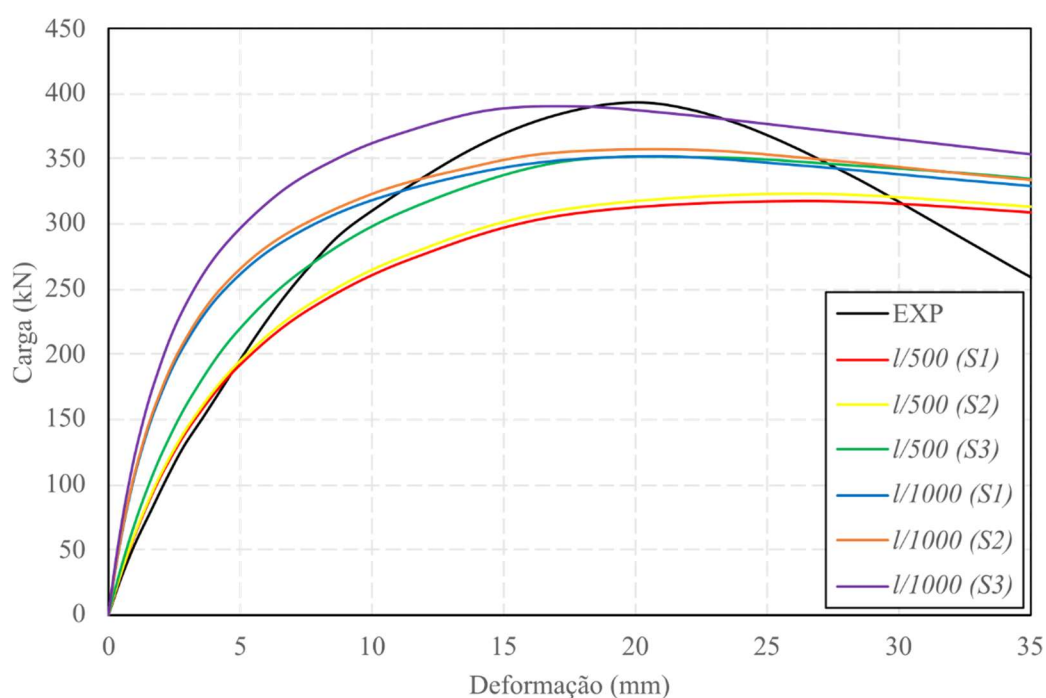
Onde:

P_{exp} : capacidade de carga resistente à compressão obtida experimentalmente;

P_{abaqus} : capacidade de carga resistente à compressão obtida no *software* ABAQUS®.

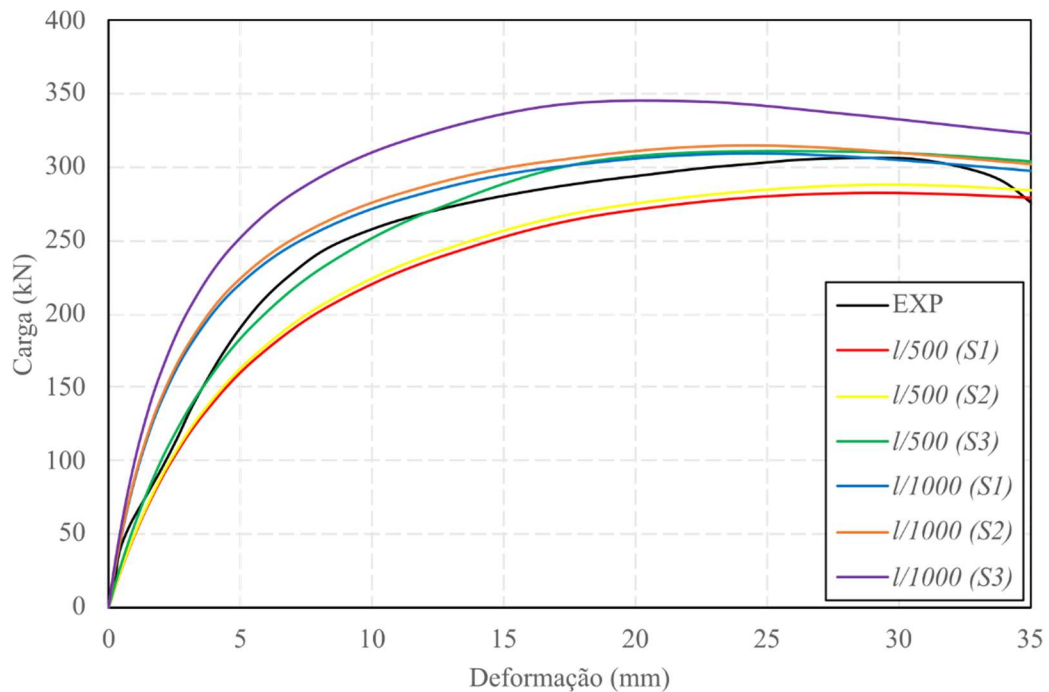
Os resultados numéricos obtidos pelo *software* ABAQUS® se mostram bastante satisfatórios na maioria dos casos, especialmente quando a imperfeição geométrica é reduzida para $l/1000$. Em algumas amostras, como S3 da coluna L30-R1.3, a correspondência é quase exata, com um erro de apenas 0,42%. No entanto, algumas discrepâncias ainda ocorrem, particularmente com maiores imperfeições. De forma geral, os resultados são considerados adequados as análises de colunas casteladas. As Figuras 21 e 22 ilustram as trajetórias de equilíbrio obtidas numericamente em comparação com as trajetórias experimentais.

Figura 21 - Trajetória de equilíbrio da coluna L30-R1.3



Fonte: Autor (2023)

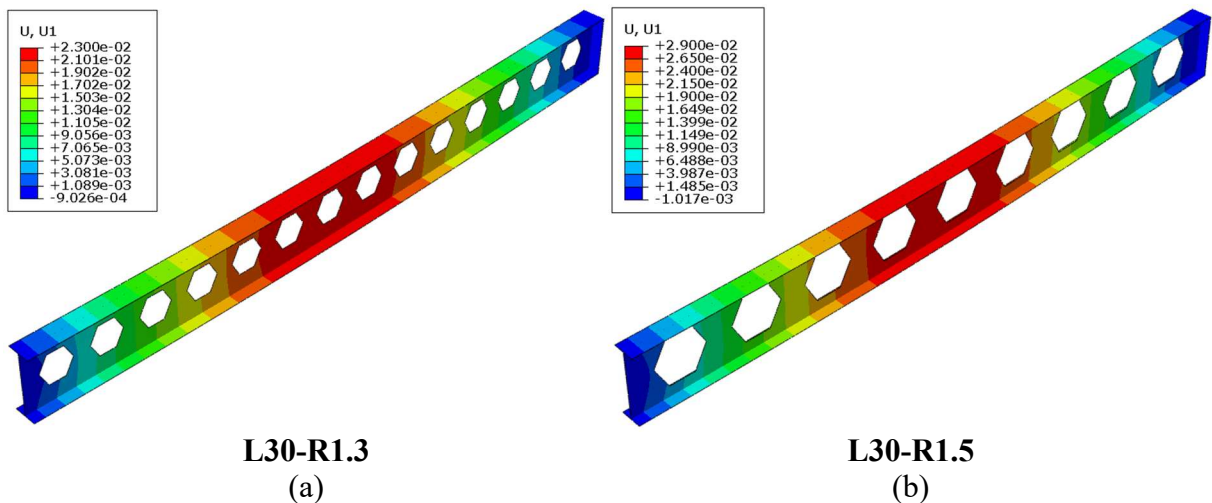
Figura 22 - Trajetória de equilíbrio da coluna L30-R1.5



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que, embora as colunas modeladas com imperfeição geométrica de $l/1000$ tenham apresentado melhor capacidade resistente, as colunas modeladas com imperfeição de $l/500$ mostraram um comportamento mais próximo do real, conforme ilustrado nas Figuras 21 e 22. Apesar de os autores não terem apresentado as configurações deformadas das colunas casteladas analisadas, a Figura 23 ilustra a configuração deformada obtida numericamente para as duas colunas usadas na verificação.

Figura 23 - Configuração deformada numérica das colunas casteladas



Fonte: Autor (2023)

8.1.2. Kucukler, Xing e Gardner (2020)

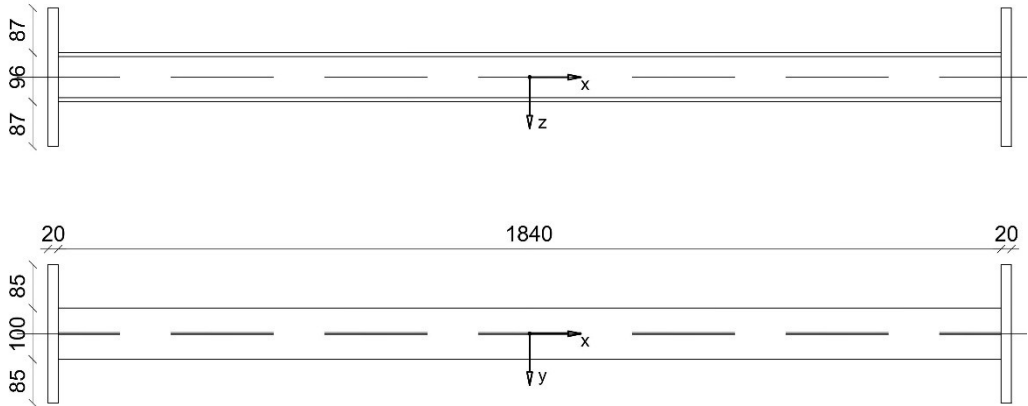
Kucukler, Xing e Gardner (2020) realizaram a verificação numérica do estudo de Pauli *et al.* (2012), que se baseou em diversos testes de colunas submetidas a altas temperaturas. Para verificação dos modelos numéricos, foram selecionadas colunas de seção H, ensaiadas de maneira isotérmica, onde as colunas são inicialmente aquecidas e submetidas a compressão posteriormente. Os parâmetros geométricos das colunas são apresentados na Tabela 10 e ilustrados na Figura 24.

Tabela 10 - Identificação e características de colunas H

Teste	Identificação	Temperatura do aço (°C)	Comprimento (mm)
HEA100 SL 400C z0	L16	400	1840
HEA100 SL 550C z0	L11	550	1840

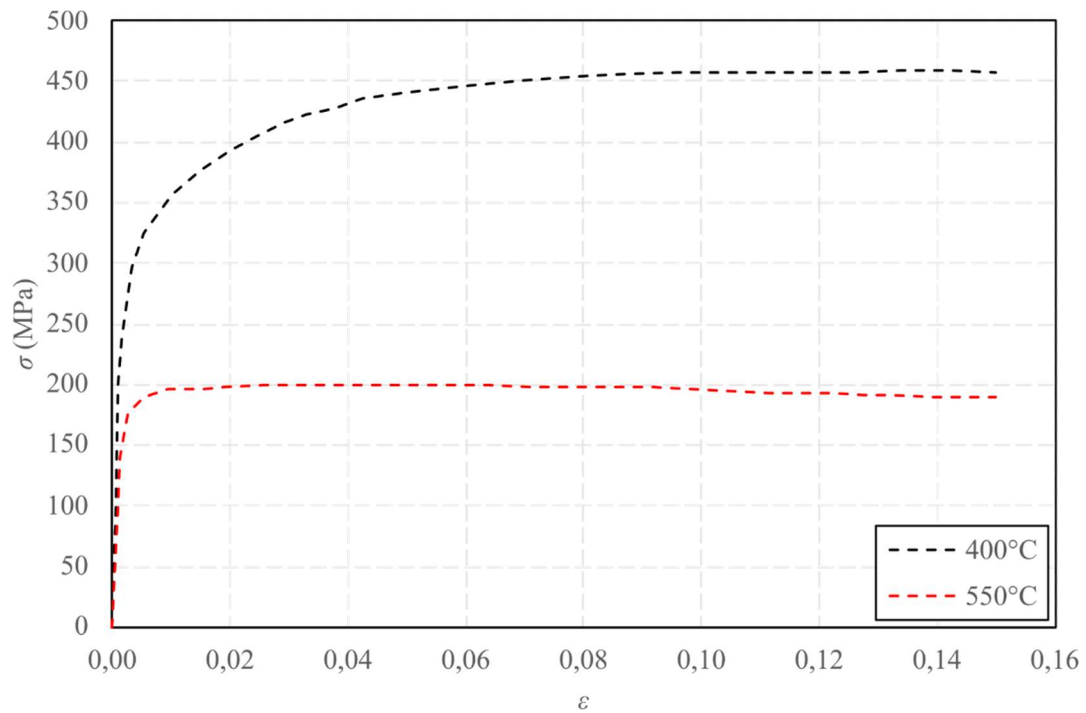
Fonte: Adaptado de Pauli *et al.* (2012)

Figura 24 - Esquema geométrico de colunas HEA, dimensões em mm



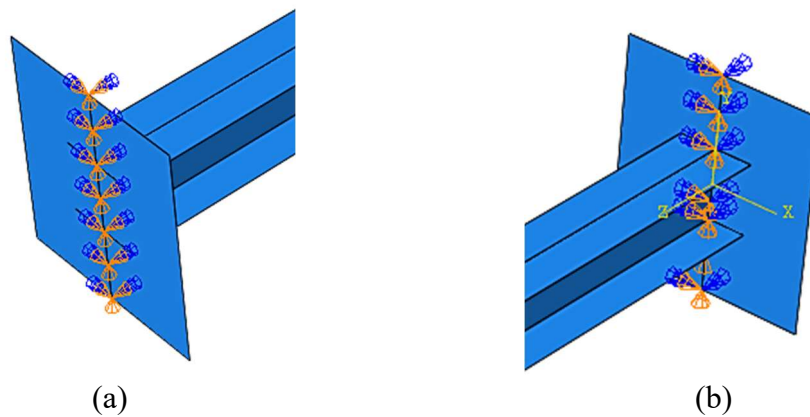
Fonte: Adaptado de Pauli *et al.* (2012)

As propriedades mecânicas foram incorporadas ao modelo numérico utilizando curvas tensão-deformação obtidas experimentalmente para diferentes níveis de temperatura, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Curvas tensão-deformação do aço carbono para diferentes temperaturas

Fonte: Adaptado de Pauli *et al.* (2012)

As colunas foram ensaiadas utilizando um atuador hidráulico para a aplicação da carga e pinos articulados nas extremidades. Durante o ensaio, as colunas foram colocadas dentro de um forno e aquecidas sob uma carga constante de 5 kN. Após atingir a temperatura requerida, o forno manteve a temperatura constante e a carga foi aumentada até a falha das colunas. A Figura 26 ilustra as condições de apoio das colunas no modelo numérico.

Figura 26 - Condições de apoio do modelo numérico

Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 8 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

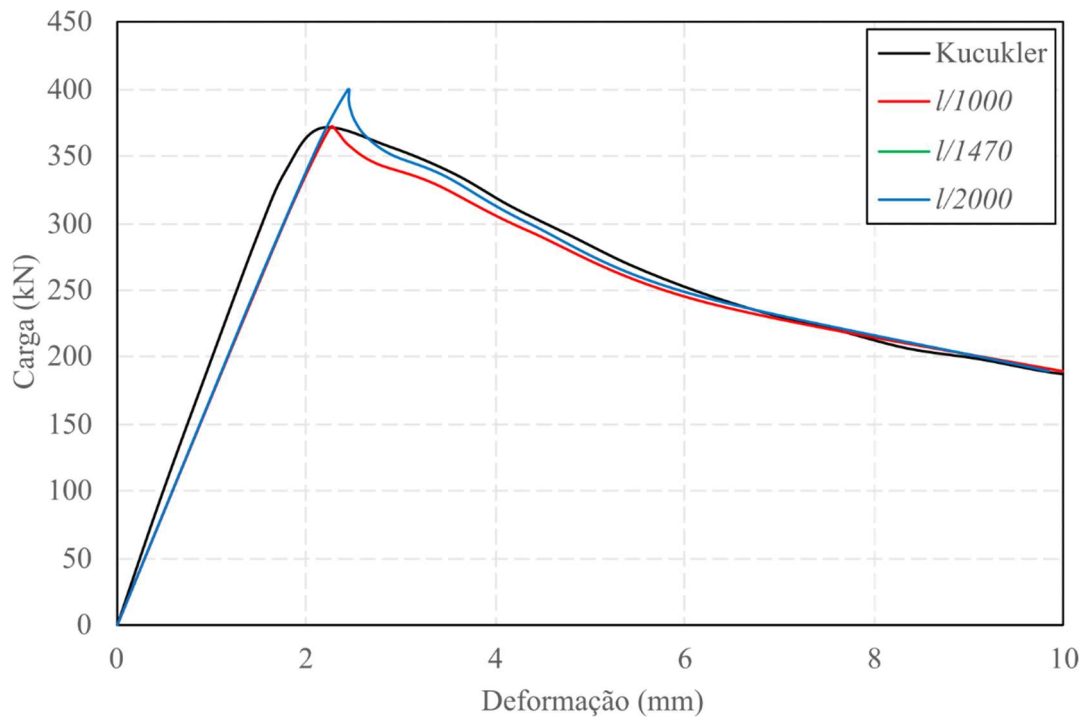
Com base nas informações apresentadas, foi realizada a verificação do modelo numérico para analisar o comportamento das colunas submetidas a elevadas temperaturas. A Tabela 11 apresenta os resultados das análises numéricas, comparados aos obtidos por Kucukler, Xing e Gardner (2020).

Tabela 11 - Comparação dos resultados de colunas submetidas a incêndio

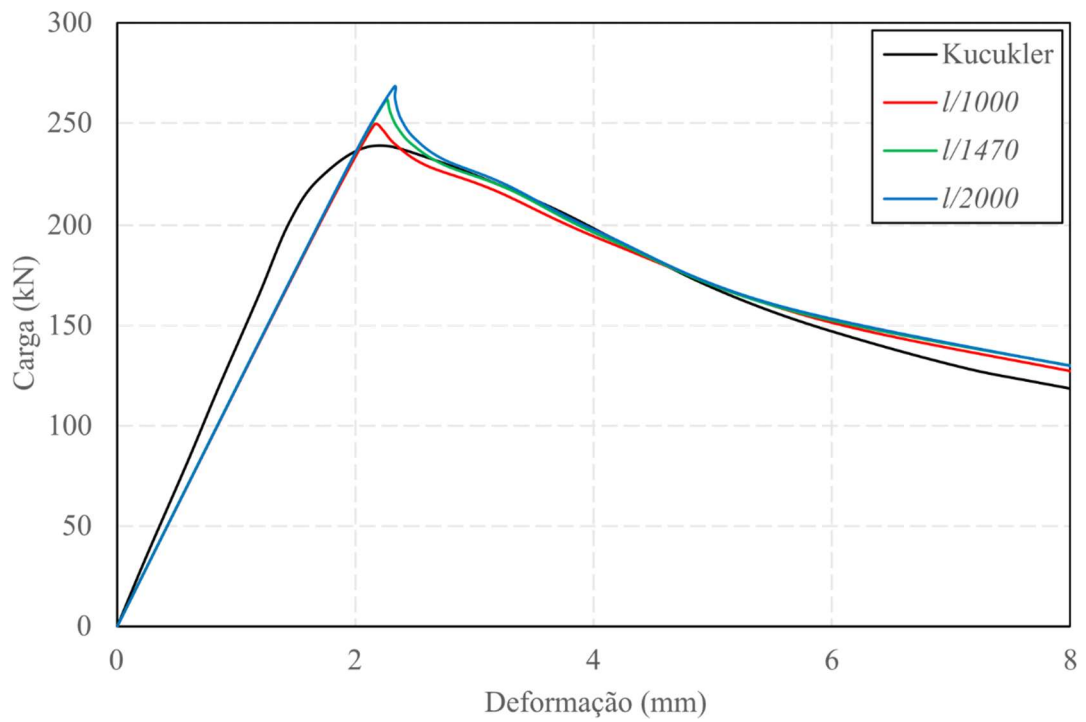
ID	$P_{Kucukler}$ (kN)	Imperfeição geométrica	P_{abaqus} (kN)	Erro relativo (%)
L16	373,00	$l/1000$	371,87	0,30
		$l/1470$	389,69	4,47
		$l/2000$	399,54	7,12
L11	239,00	$l/1000$	249,09	4,22
		$l/1470$	261,59	9,45
		$l/2000$	268,41	12,31

Fonte: Autor (2023)

A análise dos dados da Tabela 11 revela que os erros relativos variam de 0,30% a 12,31%, sendo menores para as colunas com imperfeição geométrica $l/1000$ e aumentando conforme a imperfeição cresce. Na coluna L16, o erro relativo é extremamente baixo, chegando a apenas 0,30%, o que indica uma excelente correspondência entre os resultados numéricos e experimentais, tornando esses resultados altamente satisfatórios. Já na coluna L11, os erros aumentam progressivamente, mas permanecem em níveis aceitáveis, com valores de 4,22% para $l/1000$ e até 12,31% para $l/2000$. No geral, os resultados numéricos podem ser considerados satisfatórios, especialmente para menores imperfeições geométricas. As trajetórias de equilíbrio dos resultados numéricos são comparadas as trajetórias experimentais e são ilustradas nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Trajetória de equilíbrio da coluna L16

Fonte: Autor (2023)

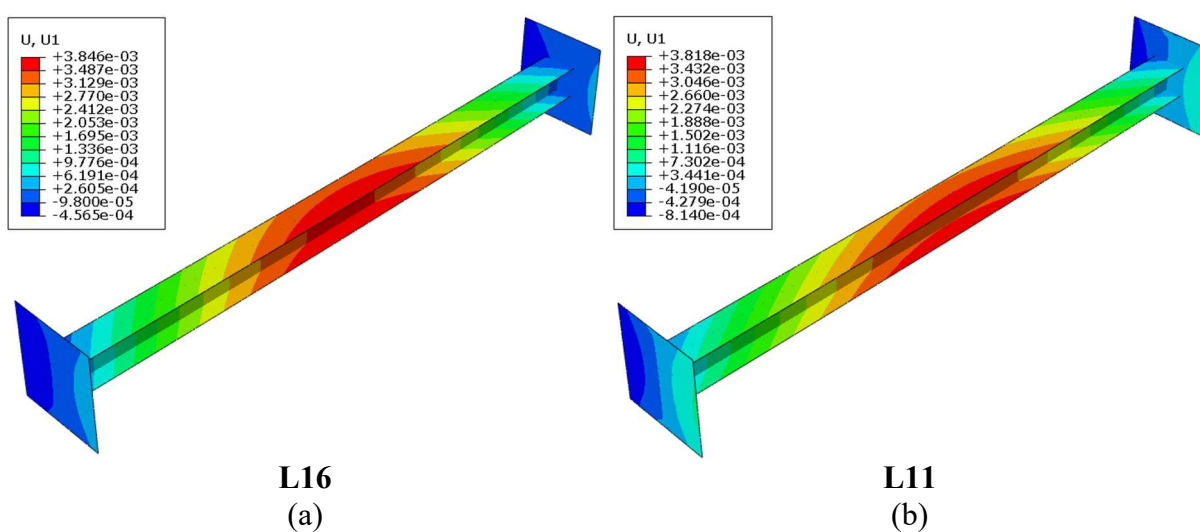
Figura 28 - Trajetória de equilíbrio da coluna L11

Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados apresentados, observa-se que os modelos numéricos desenvolvidos produziram resultados satisfatórios em comparação aos modelos verificados por Kucukler, Xing e Gardner (2020). As colunas com imperfeição inicial de $l/1000$ apresentaram resultados mais precisos e comportamento estrutural mais próximo da referência.

Embora os autores não tenham apresentado as configurações deformadas das colunas analisadas, a Figura 29 ilustra a configuração deformada obtida numericamente para as colunas usadas na verificação.

Figura 29 - Configuração deformada numérica das colunas em situação de incêndio



8.2. MODELO NUMÉRICO

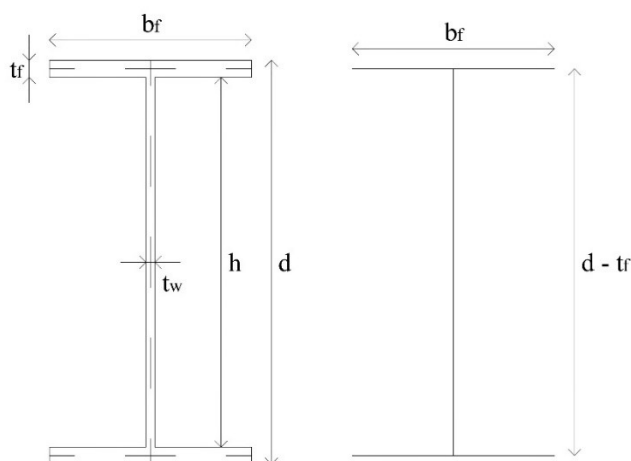
As análises numéricas no *software* ABAQUS® foram realizadas para determinar a carga crítica e o modo de instabilidade na análise elástica. Com esses resultados, a capacidade resistente foi obtida através da análise não linear. Esses procedimentos foram realizados utilizando um *script* em Python, capaz de modelar e extrair resultados do estudo paramétrico. No entanto, para alcançar os resultados desejados, é necessário definir uma série de configurações previamente. As etapas para a elaboração dos modelos numéricos são descritas a seguir.

8.2.1. Definição da geometria

A primeira etapa no desenvolvimento de modelos numéricos é a definição da geometria do elemento estrutural. Neste trabalho, serão utilizados perfis estruturais com seção transversal bissimétrica, onde a espessura é significativamente menor em relação às outras dimensões. Por isso, optou-se por um modelo geométrico tridimensional formado por elementos de casca.

O uso de elementos de casca simplifica a representação geométrica, considerando apenas a superfície média dos elementos que compõem o perfil. A Figura 30 ilustra a geometria adotada no desenvolvimento dos modelos numéricos.

Figura 30 - Geometria da seção transversal por superfície média



Fonte: Autor (2023)

8.2.2. Material do elemento

Os materiais considerados na análise paramétrica foram: aço carbono S355 e o aço inoxidável austenítico grau 1.4301, amplamente utilizado em projetos de engenharia. A Tabela 12 apresenta os valores nominais das propriedades dos materiais.

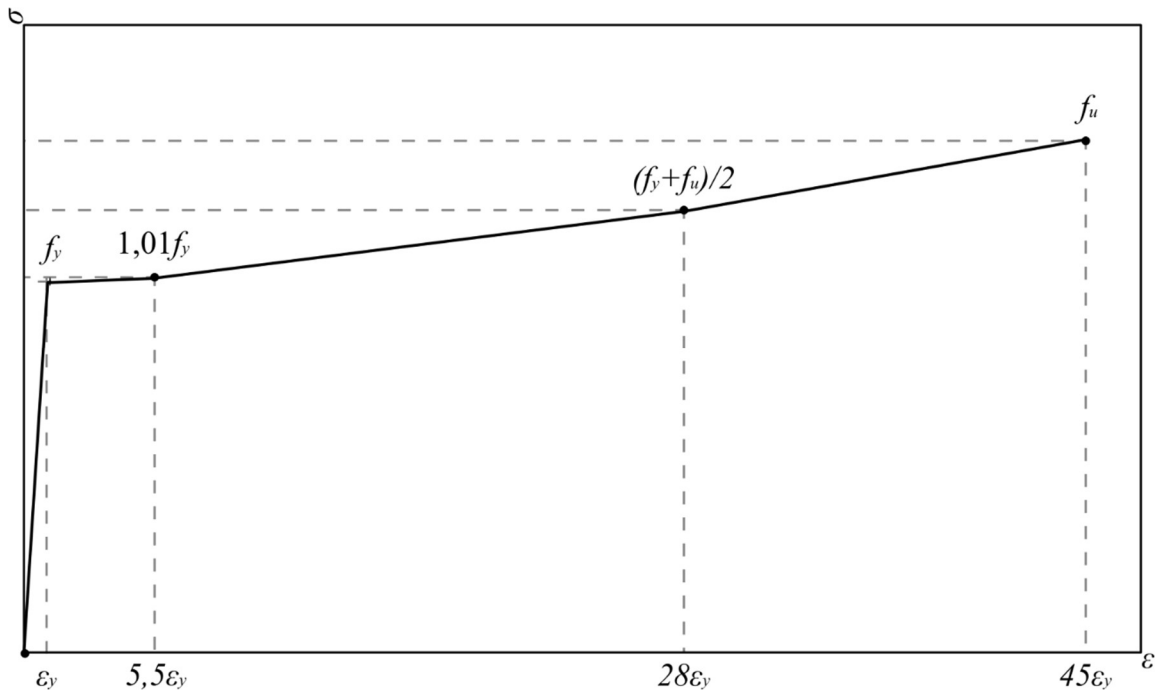
Tabela 12 - Propriedades dos materiais

Material	E (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
S355	210	355	490
1.4301	200	210	520

Fonte: Autor (2024)

Em relação ao comportamento dos materiais, foram adotados 4 modelos constitutivos, sendo 2 para temperatura ambiente e outros 2 para situação de incêndio. Para o aço carbono em temperatura ambiente foi adotado o modelo constitutivo proposto por Earls (1999). A relação tensão-deformação, apresentada na Figura 31, considera um modelo elastoplástico cujo encruamento aço é dada por uma região tri-linear.

Figura 31 - Modelo constitutivo de Earls (1999)



Fonte: Autor (2024)

O modelo constitutivo do aço inoxidável proposto na norma EN 1993-1-4 (CEN, 2006) foi utilizado para representar o comportamento do material nas análises paramétricas. A curva tensão-deformação pode ser calculada pela Equação 26.

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n, & \sigma \leq f_y \\ 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m, & f_y < \sigma \leq f_u \end{cases} \quad (26)$$

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002n E/f_y}$$

$$\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$$

$$m = 1 + 3,5 \frac{f_y}{f_u}$$

Os modelos constitutivos adotados em situação de incêndio, para os dois tipos de aço, foram propostos por EN 1993-1-2 (CEN, 2005). A relação tensão-deformação para o aço carbono é expressa na Equação 27.

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E_{a,\theta}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta} \\ f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}, & \varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta} \\ f_{y,\theta}, & \varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta} \\ f_{y,\theta} \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}} \right), & \varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta} \\ 0, & \varepsilon = \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (27)$$

$$\varepsilon_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{E_{a,\theta}} \quad \varepsilon_{y,\theta} = 0,02 \quad \varepsilon_{t,\theta} = 0,15 \quad \varepsilon_{u,\theta} = 0,20$$

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)$$

$$b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$$

Os parâmetros presentes no modelo constitutivo do aço carbono em situação de incêndio podem ser obtidos por meio da Tabela 13.

CAPÍTULO 8 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Tabela 13 - Fatores de redução do aço carbono em elevadas temperaturas

θ_a (°C)	$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$
20	1,00	1,000	1,000
100	1,00	1,000	1,000
200	1,00	0,807	0,900
300	1,00	0,613	0,800
400	1,00	0,420	0,700
500	0,78	0,360	0,600
600	0,47	0,180	0,310
700	0,23	0,075	0,130
800	0,11	0,050	0,090
900	0,06	0,038	0,068
1000	0,04	0,025	0,045
1100	0,02	0,013	0,023
1200	0,00	0,000	0,000

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

Por fim, a curva tensão-deformação do aço inoxidável sob elevadas temperaturas pode ser calculada através da Equação 28. Os fatores de redução relevantes para a determinação do modelo constitutivo são apresentados na Tabela 14, considerando apenas o aço inoxidável austenítico 1.4301.

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E\varepsilon}{1 + a\varepsilon^b}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta} \\ f_{0.2p,\theta} - e + \frac{d}{c} \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}, & \varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (28)$$

$$\varepsilon_{c,\theta} = \frac{f_{0.2p,\theta}}{E_{a,\theta}} + 0,002$$

$$a = \frac{E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta} - f_{0.2p,\theta}}{f_{0.2p,\theta}\varepsilon_{c,\theta}^b}$$

$$b = \frac{\left(1 - \frac{\varepsilon_{c,\theta}E_{ct,\theta}}{f_{0.2p,\theta}}\right)E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta}}{\left(\frac{E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta}}{f_{0.2p,\theta}} - 1\right)f_{0.2p,\theta}}$$

$$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})\left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \frac{e}{E_{ct,\theta}}\right)$$

$$d^2 = e(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})E_{ct,\theta} + e^2$$

$$e = \frac{(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})E_{ct,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})}$$

Tabela 14 - Fatores de redução do aço inoxidável em função da temperatura

θ (°C)	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{E_{ct,\theta}} = \frac{E_{ct,\theta}}{E_a}$	$k_{0.2p,\theta} = \frac{f_{0.2p,\theta}}{f_y}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_u}$	$\varepsilon_{u,\theta}$
20	1,00	0,11	1,00	1,00	0,40
100	0,96	0,05	0,82	0,87	0,40
200	0,92	0,02	0,68	0,77	0,40
300	0,88	0,02	0,64	0,73	0,40
400	0,84	0,02	0,60	0,72	0,40
500	0,80	0,02	0,54	0,67	0,40
600	0,76	0,02	0,49	0,58	0,35
700	0,71	0,02	0,40	0,43	0,30
800	0,63	0,02	0,27	0,27	0,20
900	0,45	0,02	0,14	0,15	0,20
1000	0,20	0,02	0,06	0,07	0,20
1100	0,10	0,02	0,03	0,03	0,20
1200	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20

Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

A consideração dos modelos constitutivos no *software* ABAQUS® é feita através de tensões e deformações reais. Sendo assim, as tensões e deformações de engenharia apresentadas nos modelos acima, devem ser convertidas em valores reais. As Equações 29 e 30 expressam o cálculo das tensões e deformações reais a serem inseridas no *software* ABAQUS®.

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (29)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (30)$$

Onde:

σ : tensão de engenharia do material;

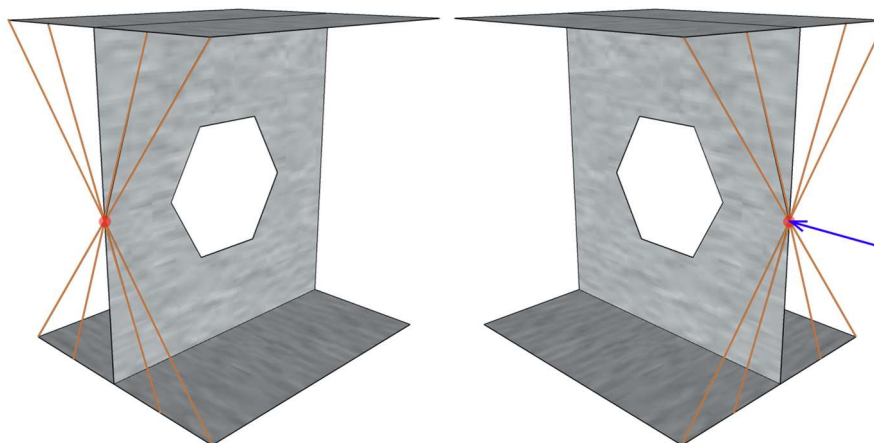
ε : deformação de engenharia do material.

8.2.3. Condições de contorno

Duas condições de apoio das colunas foram consideradas na análise paramétrica, permitindo a avaliação da instabilidade em torno dos dois eixos de inércia da seção transversal. Para colunas sob compressão em torno do menor eixo de inércia, a base do elemento permite

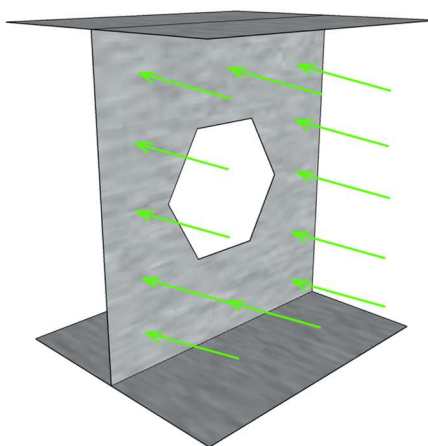
apenas a rotação, enquanto o topo permite tanto a rotação quanto o deslocamento axial. As condições de contorno em torno do maior eixo de inércia são similares, variando apenas o eixo de restrição. Além disso, há também o travamento da alma do perfil. As Figuras 32 e 33 ilustram essas condições.

Figura 32 - Condições de apoio em torno do menor eixo de inércia



Fonte: Autor (2024)

Figura 33 - Condições de apoio em torno do maior eixo de inércia



Fonte: Autor (2024)

8.2.4. Discretização do elemento

A seleção do elemento finito e a definição da malha foram baseadas na comparação da capacidade resistente de colunas casteladas com dados experimentais de El-Tobgy, Abu-Sena e Fares (2021). Foram considerados o erro relativo e o tempo de processamento do modelo numérico, conforme detalhado na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise da escolha do elemento finito

Autores	P_{exp} (kN)	Elemento	Dimensão dos elementos	Número de elementos	P_{abaqus} (kN)	Erro (%)	Tempo de processamento
El-Tobgy, Abu-Sena e Fares	305.81	S4	10	12791	301,83	1,30	02'06"
			20	4577	331,40	8,37	01'07"
		S4R	10	12791	296,87	2,92	01'39"
			20	4577	324,07	5,97	01'01"

Tempo de processamento para análise não linear realizada em computador com processador AMD Ryzen 5, 3600 MHz, 6 núcleos e memória RAM 16 GB.

Fonte: Autor (2023)

Com base nos dados apresentados, o elemento S4 com dimensão de 10 mm foi selecionado para a discretização das colunas casteladas no estudo paramétrico, pois apresentou resultado mais próximo da referência.

O S4 é um elemento de casca quadrilateral de quatro nós que utiliza integração completa. Isso significa que o volume do elemento é integralmente integrado usando pontos de Gauss para capturar a resposta do elemento sem omitir nenhum termo das equações de equilíbrio. A integração completa oferece alta precisão, especialmente em problemas com variações complexas de tensões e deformações. No entanto, pode aumentar significativamente o tempo de cálculo e os recursos computacionais necessários para resolver problemas dessa natureza.

8.2.5. Análise de estabilidade elástica

A análise elástica constitui a primeira etapa crucial para determinar a resistência de um elemento estrutural. No *software* ABAQUS®, esta análise é conduzida aplicando-se uma carga que atua como uma perturbação linear de flambagem. Os resultados são então expressos por meio de autovalores e autovetores. Os autovalores indicam o fator de carga no qual ocorre a instabilidade do elemento; quando multiplicados pelo carregamento aplicado, determinam a carga crítica de flambagem. Por outro lado, os autovetores representam os possíveis modos de instabilidade do elemento analisado (Rossi, 2018).

Na prática, essa abordagem não apenas fornece um meio preciso de prever a capacidade de carga de estruturas, mas também identifica os comportamentos críticos que podem levar à falha. Ao explorar os autovetores, é possível entender como diferentes formas de deformação podem influenciar a estabilidade estrutural sob diversas condições de

carregamento. Isso não só ajuda na otimização do projeto, mas também na mitigação de potenciais falhas estruturais, garantindo assim um desempenho seguro e confiável ao longo da vida útil da estrutura.

8.2.6. Análise não linear física e geométrica

A segunda etapa envolve uma análise não linear física e geométrica da estrutura. Nesta fase, a carga obtida na análise elástica é aplicada à estrutura junto com um dos possíveis modos de instabilidade. De acordo com Dessault Systèmes (2014), o carregamento é aplicado de forma incremental e a trajetória de equilíbrio é determinada pelo algoritmo modificado de Riks, capaz de descrever a trajetória de equilíbrio da estrutura após atingir a carga máxima.

A análise com o algoritmo modificado de Riks requer a definição do incremento inicial do comprimento de arco, sendo os demais incrementos determinados automaticamente pelo *software* ABAQUS®, com base no número de iterações necessárias para a convergência do incremento (Rossi, 2018).

Como comentado na verificação numérica, foi considerada apenas uma imperfeição geométrica inicial de $l/500$ conforme recomendação de Yuan *et al.* (2012), visto que durante a verificação tal imperfeição proporcionou resultados satisfatórios.

8.2.7. Análise térmica

A modelagem numérica para colunas em situação de incêndio é realizada em três etapas: análise térmica, análise elástica e análise não linear. A análise térmica consiste no aquecimento das colunas por meio da curva de incêndio-padrão presente na ISO 834 (1999), expressa na Equação 31.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (31)$$

Onde:

θ_g : temperatura dos gases quentes (°C);

t : tempo (min).

Além da curva de incêndio-padrão, as propriedades térmicas apresentadas no Capítulo 7 são implementadas nos modelos numéricos a fim de obter a temperatura média das colunas

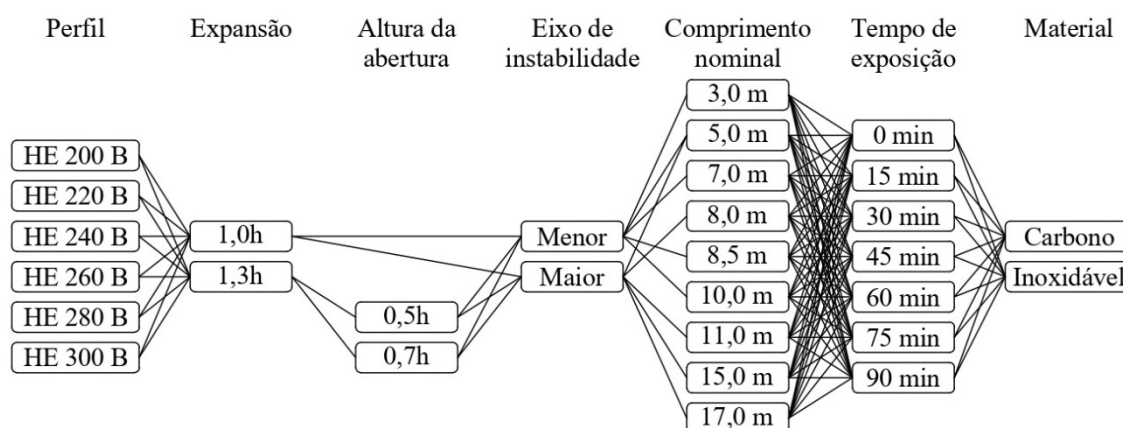
para determinado intervalo de tempo. As demais etapas seguiram o mesmo procedimento para temperatura ambiente, porém com a consideração das propriedades do material degradadas devido a elevação da temperatura.

8.3. PREMISSAS PARA ESTUDO PARAMÉTRICO

Com os modelos calibrados e as configurações bem definidas, iniciaram-se as análises numéricas do estudo paramétrico. Foram selecionados perfis em forma de H com diferentes comprimentos nominais, definidos pela quantidade de aberturas ao longo da alma. Esses parâmetros foram escolhidos para manter o limite de esbeltez recomendado pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Analisaram-se colunas de alma sólida e colunas casteladas com uma expansão de 30%, para verificar a influência das aberturas na instabilidade das colunas em torno dos dois eixos de inércia da seção transversal. Para as colunas casteladas, a altura das aberturas variou em função da altura do perfil original de alma sólida.

Para a situação de incêndio, consideraram-se sete tempos de exposição ao fogo, em intervalos de 15 minutos, totalizando 90 minutos de exposição. Além disso, o tipo de material foi outro parâmetro avaliado no extenso estudo paramétrico. A Figura 34 apresenta os parâmetros analisados, totalizando 2.520 modelos numéricos desenvolvidos no *software* ABAQUS®, otimizados por meio de *scripts* em Python.

Figura 34 - Fluxograma do estudo paramétrico



Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 9

RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

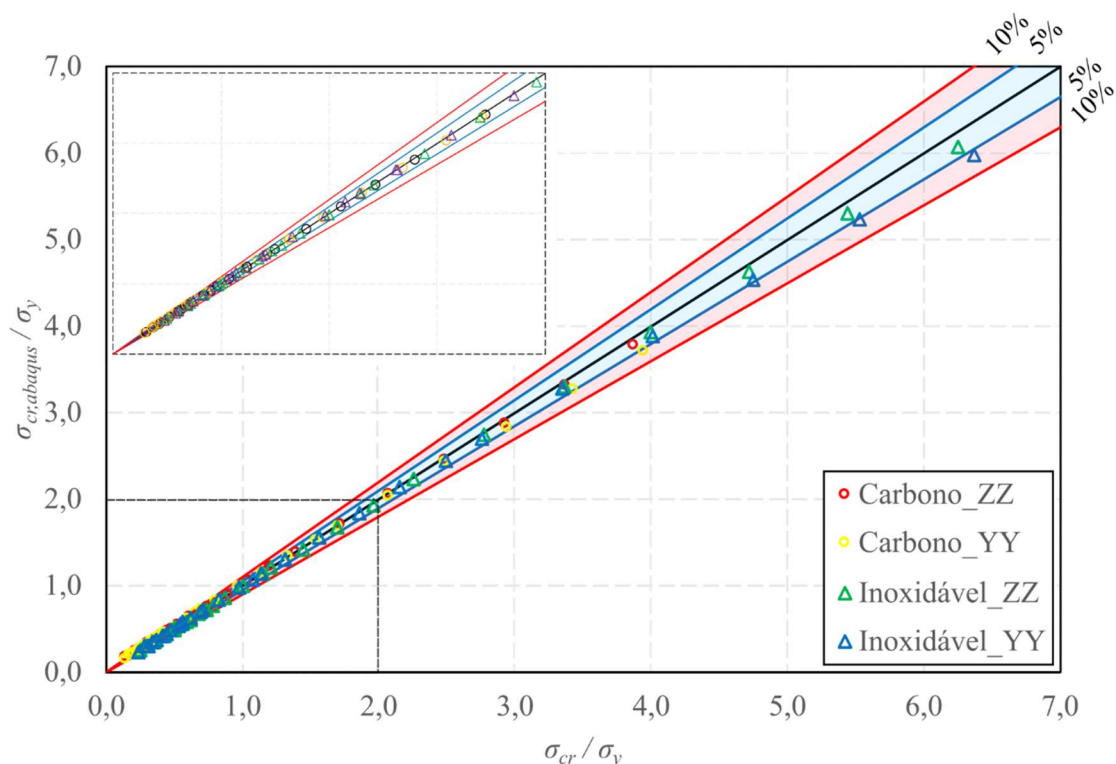
Neste capítulo, serão apresentados os resultados das simulações numéricas da análise paramétrica de colunas em temperatura ambiente. Além disso, apresenta-se uma comparação desses resultados com os resultados obtidos segundo as normas EN 1993-1-1 (CEN, 2022) e NBR 8800 (ABNT, 2008), utilizando os diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal discutidos no Capítulo 4.

9.1. CARGA CRÍTICA

Conforme descrito no Capítulo 8, a primeira etapa da análise de colunas em temperatura ambiente envolve a determinação da carga crítica utilizando o fator de carga obtido pelo *software* ABAQUS®. Esse fator é calculado aplicando um carregamento unitário centralizado no topo das colunas.

Os resultados obtidos numericamente foram comparados com a equação de Euler para verificar a precisão do modelo numérico. Os termos "ZZ" e "YY" presentes nas legendas representam os eixos considerados na determinação da carga crítica, sendo "ZZ" o eixo de menor inércia e "YY" o eixo de maior inércia da seção transversal. A Figura 35 apresenta a carga crítica de colunas com alma sólida para diferentes tipos de aço, incluindo carbono e inoxidável.

Figura 35 - Carga crítica de colunas de alma sólida

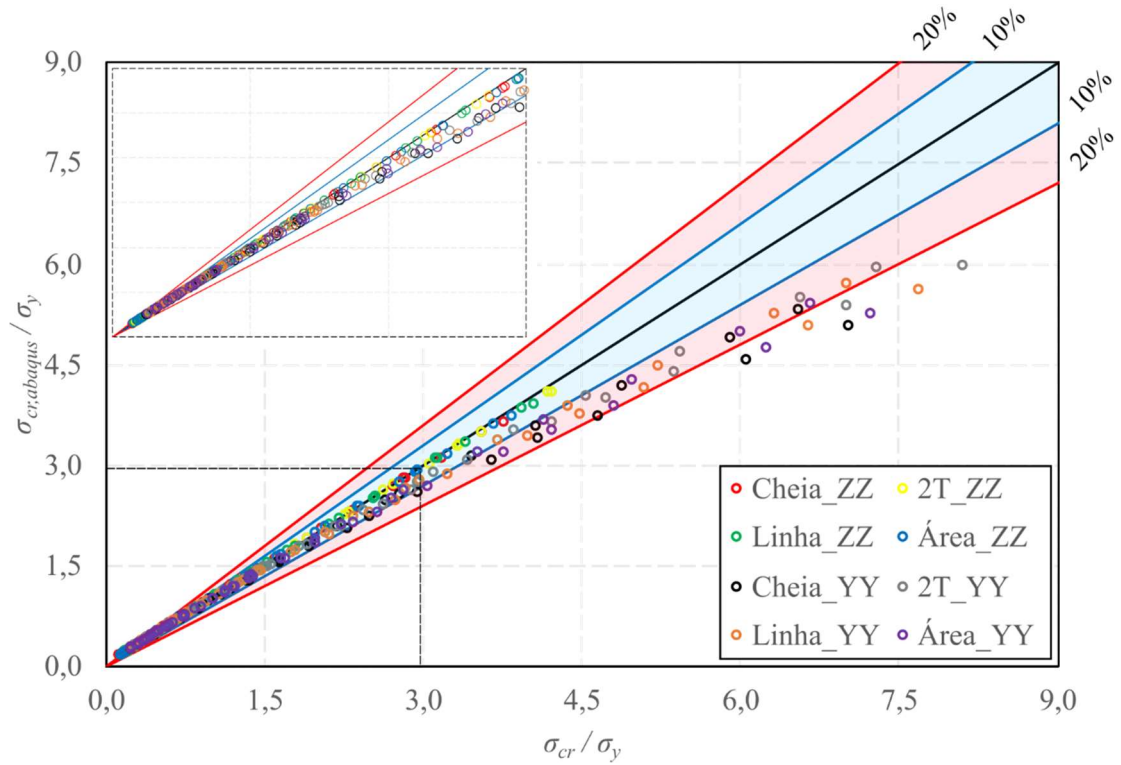


Fonte: Autor (2023)

Para o eixo de menor inércia, independentemente do material, os resultados numéricos da carga crítica apresentaram um erro médio de 0,87% com um desvio padrão de 0,58%. Para o eixo de maior inércia, o erro médio foi de 0,30% com um desvio padrão de 2,02%. Observou-se que o erro encontrado diminuiu com o aumento do comprimento das colunas. Isso quer dizer que a carga crítica numérica tende a apresentar maior erro para colunas curtas, no entanto o erro tende a diminuir para colunas longas.

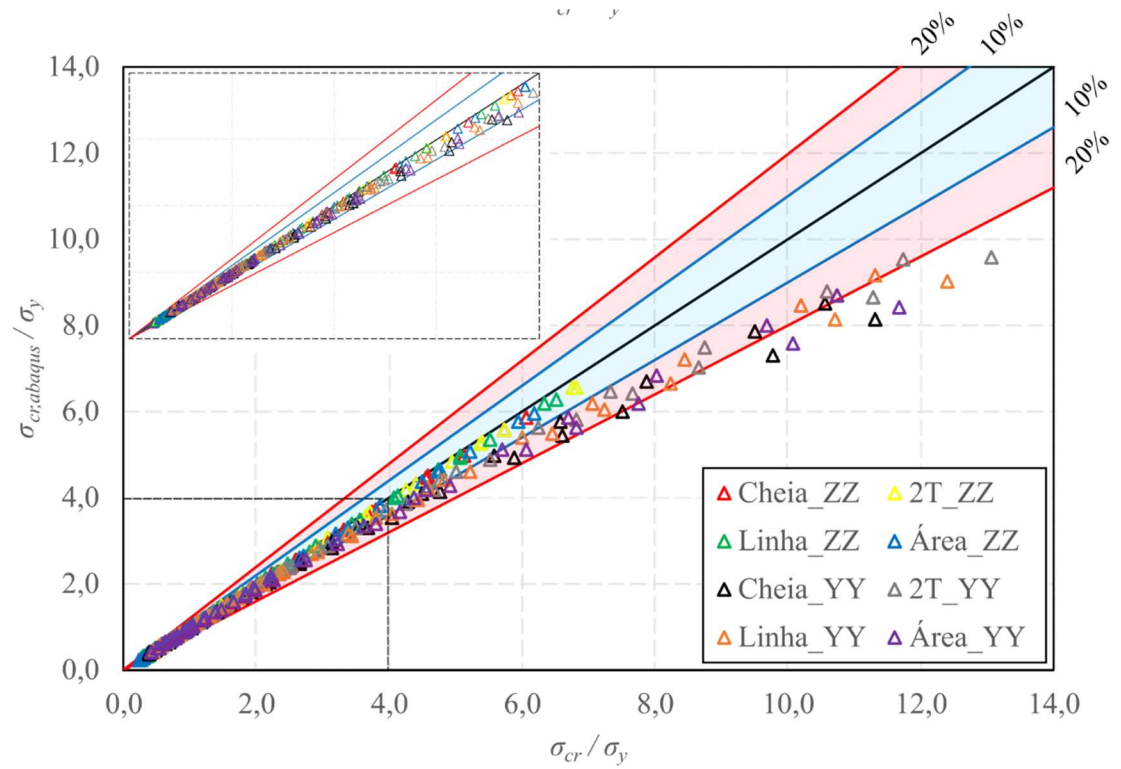
As Figuras 36 e 37 mostram a comparação da carga crítica de colunas casteladas de aço carbono e aço inoxidável, considerando os diferentes métodos de cálculo das propriedades geométricas da seção transversal.

Figura 36 - Carga crítica de colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2023)

Figura 37 - Carga crítica de colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

A Tabela 16 apresenta a média de erro e o desvio padrão dos resultados obtidos na análise numérica em comparação com a equação de Euler para diferentes métodos de cálculo das propriedades geométricas.

Tabela 16 - Comparação da carga crítica numérica e analítica

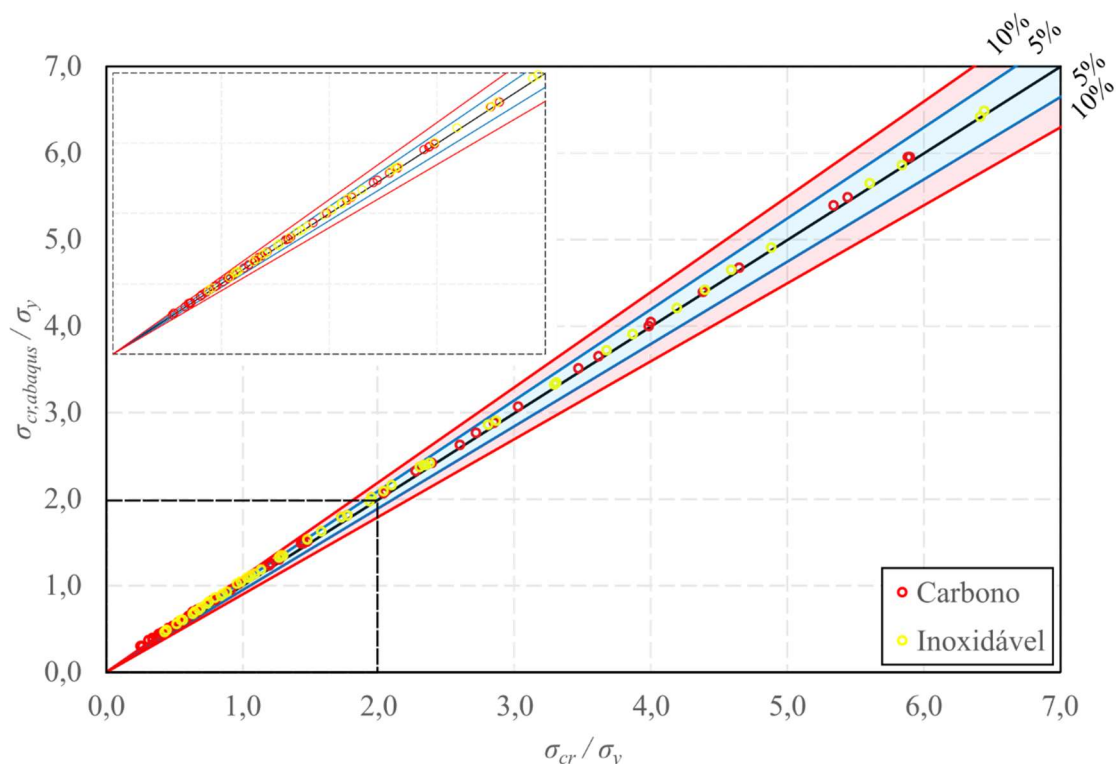
Método	Eixo	Erro médio (%)	Desvio padrão (%)
Alma cheia	ZZ	0,92	0,66
	YY	6,04	6,53
Seção 2T	ZZ	0,89	0,66
	YY	4,74	6,53
Área	ZZ	0,92	0,66
	YY	5,76	6,52
Linha	ZZ	0,90	0,66
	YY	5,19	6,52

Fonte: Autor (2024)

Para ambos os eixos, os resultados numéricos obtidos pelo método da seção 2T se aproximaram mais dos resultados analíticos. Similarmente às colunas de alma sólida, os modelos numéricos de colunas casteladas curtas apresentaram um erro maior em comparação com os resultados analíticos.

Além da comparação com a equação de Euler considerando diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal, os resultados numéricos foram comparados com a equação analítica de Yuan, Kim e Li (2014), conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Comparação da carga crítica de colunas casteladas



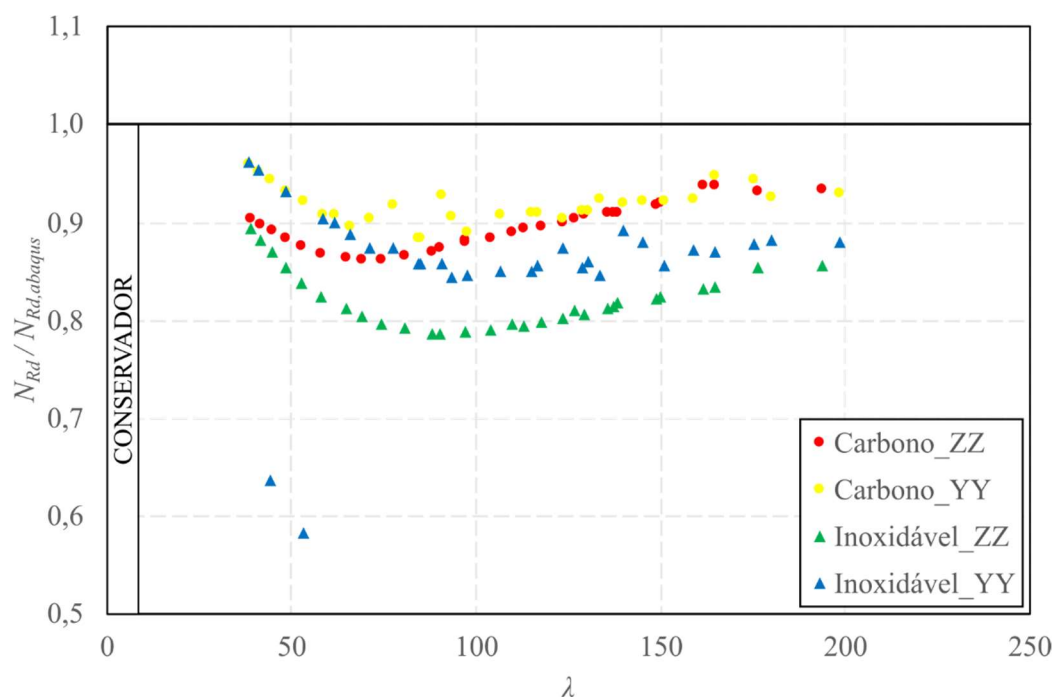
Fonte: Autor (2024)

A comparação dos resultados numéricos com a equação de Yuan, Kim e Li (2014) revelou um erro médio de 0,97% e um desvio padrão de 0,69%. Esses resultados indicam que a equação analítica proporciona estimativas precisas e confiáveis da carga crítica para colunas casteladas em torno do maior eixo de inércia da seção transversal.

9.2. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO EN 1993-1-1 (CEN, 2022)

Na análise não linear dos modelos numéricos, foi considerada a aplicação de uma imperfeição geométrica inicial na ordem de $l/500$, visando incorporar as imperfeições e tensões residuais resultantes do processo de fabricação dos perfis. Essa consideração se justifica pela complexidade dos parâmetros do extenso estudo paramétrico desenvolvido.

A capacidade resistente das colunas foi determinada identificando o ponto máximo de carga na curva carga-deslocamento, o que permitiu comparar os resultados da capacidade resistente obtidos numericamente e analiticamente. A Figura 38 mostra a comparação da capacidade resistente de colunas de alma sólida de aço carbono e aço inoxidável.

Figura 39 - Capacidade resistente de colunas de alma sólida

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 17 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados numéricos comparados os resultados analíticos obtidos pelas recomendações da norma EN 1993-1-1 (CEN, 2022) para o aço carbono e da norma EN 1993-1-4 (CEN, 2006) para o aço inoxidável.

Tabela 17 - Comparação da capacidade resistente de colunas de alma sólida

Eixo	Material	Média	Desvio padrão
ZZ	Carbono	0,90	0,02
	Inoxidável	0,82	0,03
YY	Carbono	0,92	0,02
	Inoxidável	0,86	0,07

Fonte: Autor (2024)

A comparação entre as capacidades resistentes dos diferentes tipos de aço revela que as recomendações normativas geralmente produzem estimativas conservadoras quando comparadas aos resultados numéricos obtidos. Essa tendência conservadora é esperada, pois as normas são projetadas para garantir a segurança estrutural, considerando uma margem de segurança para lidar com incertezas e variações nos materiais e condições de uso.

No entanto, é notável que, no caso do aço inoxidável, algumas estimativas apresentaram um nível de conservadorismo excessivo no cálculo analítico. Esse conservadorismo pode ser atribuído a diferentes fatores, como as distintas propriedades mecânicas e comportamentos

CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

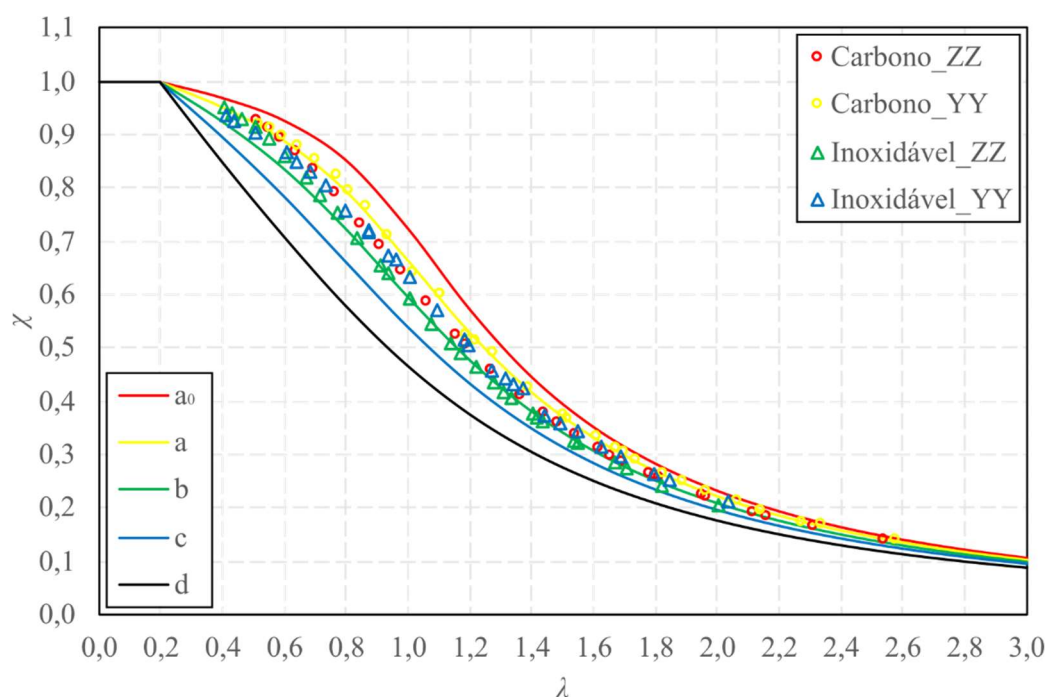
estruturais do aço inoxidável, a utilização de modelos simplificados nas normas, a falta de dados experimentais específicos e as variações no processo de fabricação desse tipo de aço.

Os resultados de capacidade resistente obtidos no *software* ABAQUS® podem ser utilizados para verificar qual curva de projeto melhor representa o comportamento das colunas. Para isso, é necessário determinar o fator de redução associado à resistência à compressão, que pode ser expresso na Equação 32.

$$\chi_{abaqus} = \frac{N_{Rd, abaqus}}{Af_y} \quad (32)$$

Com base na Equação 31, os dados das análises foram plotados no gráfico de curvas de projeto proposto pela EN 1993-1-1 (CEN, 2022) conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Curvas de projeto EN 1993-1-1 (CEN, 2022)



Fonte: Autor (2023)

Observou-se que, para colunas de aço carbono, os resultados numéricos se ajustam melhor à curva de projeto “a” da norma EN 1993-1-1 (CEN, 2022). Esse alinhamento sugere que as características de resistência e comportamento do aço carbono são bem representadas por essa curva, o que proporciona uma boa correlação entre os dados numéricos e os modelos normativos. No entanto, para colunas de aço inoxidável, os resultados se aproximaram mais da

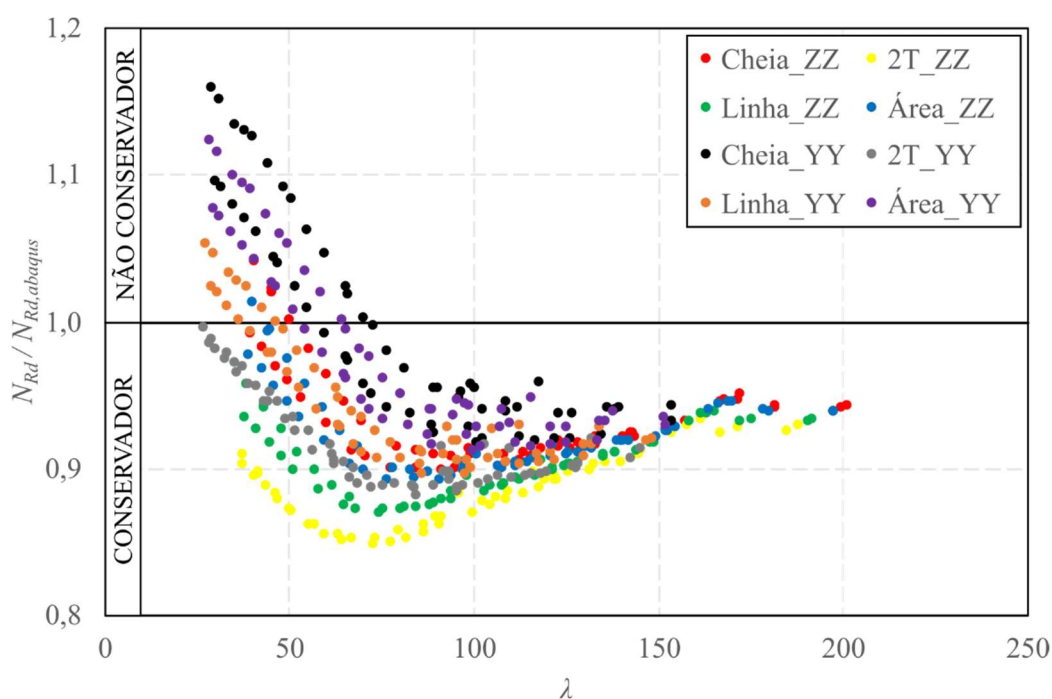
CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

curva “b”. A norma EN 1993-1-4 (CEN, 2006), específica para aço inoxidável, considera apenas as curvas de projeto “c” e “d”, que são mais conservadoras.

Esse desajuste pode explicar o comportamento conservador observado na Figura 39. A razão para isso pode incluir uma inadequação dos modelos de cálculo atuais para capturar completamente o comportamento do aço inoxidável, que possui propriedades distintas em comparação ao aço carbono, como maior ductilidade e diferentes respostas a esforços. Além disso, a falta de curvas de projeto mais adequadas na norma EN 1993-1-4 (CEN, 2006) para o aço inoxidável pode resultar em uma estimativa excessivamente conservadora da capacidade resistente.

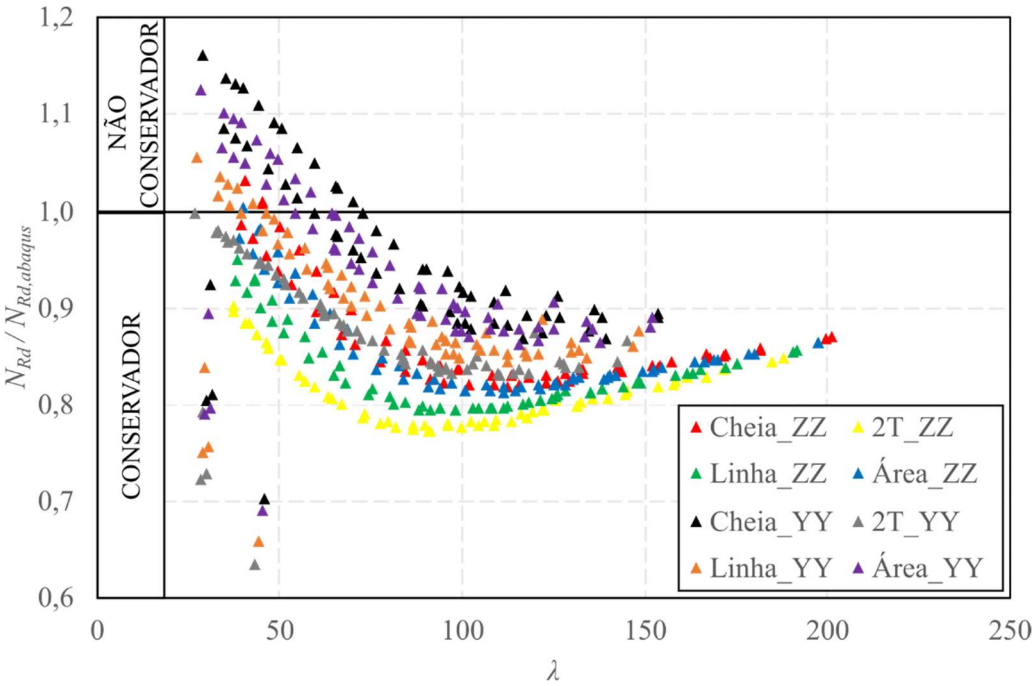
As Figuras 41 e 42 apresentam a comparação da capacidade resistente de colunas casteladas, considerando diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal.

Figura 41 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2023)

Figura 42 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 18 apresenta a média e desvio padrão dos resultados numéricos em comparação com os resultados analíticos obtidos pelas recomendações das normas EN 1993-1-1 (CEN, 2022) e EN 1993-1-4 (CEN, 2006) para diferentes métodos de propriedades da seção transversal.

Tabela 18 - Comparação da capacidade resistente de colunas casteladas

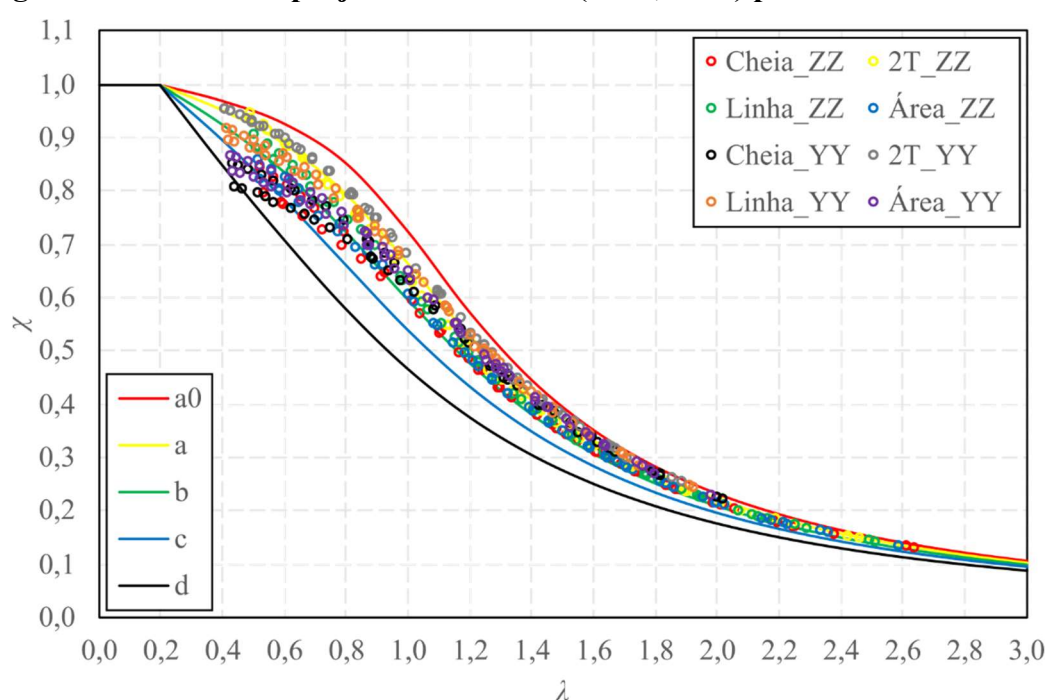
Método	Eixo	Material	Média	Desvio padrão
Alma Cheia	ZZ	Carbono	0,93	0,03
		Inoxidável	0,87	0,06
	YY	Carbono	0,99	0,07
		Inoxidável	0,96	0,09
Seção 2T	ZZ	Carbono	0,89	0,02
		Inoxidável	0,81	0,03
	YY	Carbono	0,92	0,03
		Inoxidável	0,87	0,06
Área	ZZ	Carbono	0,92	0,03
		Inoxidável	0,86	0,05
	YY	Carbono	0,98	0,06
		Inoxidável	0,94	0,08
Linha	ZZ	Carbono	0,90	0,02
		Inoxidável	0,83	0,04
	YY	Carbono	0,94	0,04
		Inoxidável	0,90	0,07

Fonte: Autor (2024)

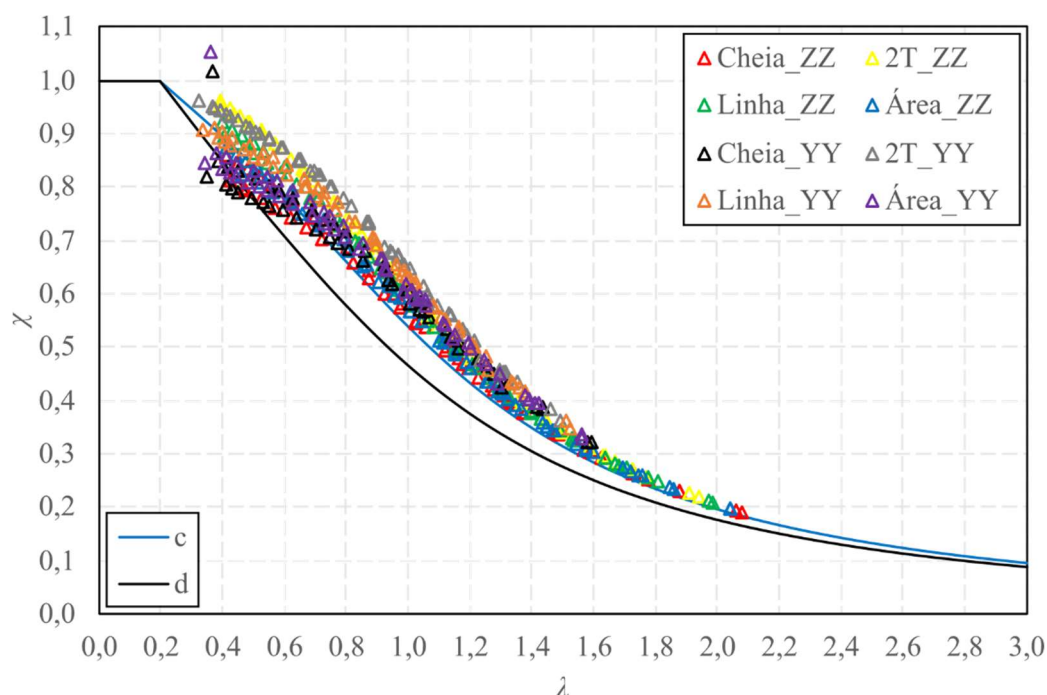
CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

Diferente do comportamento observado para colunas de alma sólida, as Figuras 41 e 42 revelaram alguns resultados não conservadores, especialmente em relação à instabilidade em torno do maior eixo de inércia. Essa observação é crucial, pois indica que as estimativas normativas podem não estar proporcionando a margem de segurança necessária em todos os casos. As Figuras 43 e 44, que apresentam as curvas de projeto, são úteis para compreender o comportamento das colunas casteladas, evidenciando as diferenças em relação às colunas de alma sólida.

Figura 43 - Curvas de projeto EN 1993-1-1 (CEN, 2022) para colunas casteladas



Fonte: Autor (2023)

Figura 44 - Curvas de projeto EN 1993-1-4 (CEN, 2006) para colunas casteladas

Fonte: Autor (2023)

A análise dos gráficos e dados da Tabela 18 revela que o método da seção 2T foi o mais eficaz em representar o comportamento de colunas casteladas sob compressão nos dois principais eixos de inércia da seção transversal. Este método foi o único a fornecer resultados conservadores, garantindo uma margem de segurança adequada para a aplicação prática. Esses achados estão em consonância com os estudos de Sonck e Belis (2016), que também identificaram a seção 2T como a abordagem mais adequada para a análise de colunas alveolares sob compressão.

A eficácia do método da seção 2T pode ser explicada por sua capacidade de capturar de forma mais precisa as complexidades estruturais associadas às colunas casteladas. Essas colunas, com aberturas em sua alma, apresentam uma distribuição de tensões e uma resposta estrutural diferentes das colunas de alma sólida. O método da seção 2T leva em consideração as variações na geometria e nas propriedades de material ao longo da seção transversal, o que é crucial para prever corretamente a capacidade de carga e o comportamento estrutural.

Em resumo, a análise da capacidade resistente de colunas segundo a norma EN 1993-1-1 (CEN, 2022) revela que as recomendações normativas tendem a produzir estimativas conservadoras, especialmente para colunas de aço carbono, cujos resultados numéricos se alinham bem com a curva de projeto “a” da norma. Isso indica que as características de resistência e comportamento desse tipo de aço são bem representadas, proporcionando uma boa

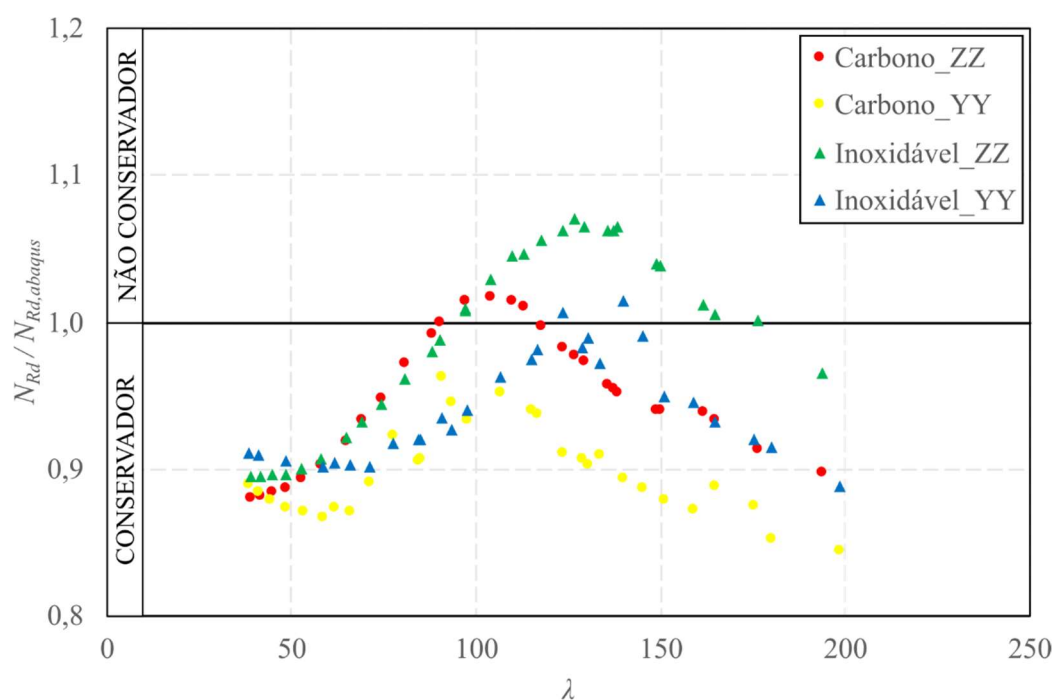
CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

correlação entre os dados numéricos e os modelos normativos. No entanto, para colunas de aço inoxidável, que possuem propriedades distintas, como maior ductilidade e diferentes respostas a esforços, os resultados se aproximam mais da curva “b”. A norma EN 1993-1-4 (CEN, 2006), específica para aço inoxidável, utiliza apenas as curvas de projeto “c” e “d”, que são mais conservadoras, podendo levar a estimativas excessivamente cautelosas da capacidade resistente. A inadequação dos modelos de cálculo atuais para capturar o comportamento específico do aço inoxidável pode explicar o conservadorismo excessivo observado, destacando a necessidade de curvas de projeto mais apropriadas para este material.

9.3. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO NBR 8800 (ABNT, 2008)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) oferece diretrizes para o projeto de colunas de aço carbono, mas não inclui elementos estruturais de aço inoxidável. Apesar disso, suas recomendações foram avaliadas para diferentes tipos de aço para verificar sua validade para colunas de aço inoxidável. A Figura 45 ilustra a comparação entre os resultados analíticos e numéricos da capacidade de carga das colunas de alma sólida.

Figura 45 - Capacidade de carga de colunas de alma sólida



Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

A Tabela 19 detalha a média e o desvio padrão dos resultados numéricos em relação aos resultados analíticos fornecidos pela norma.

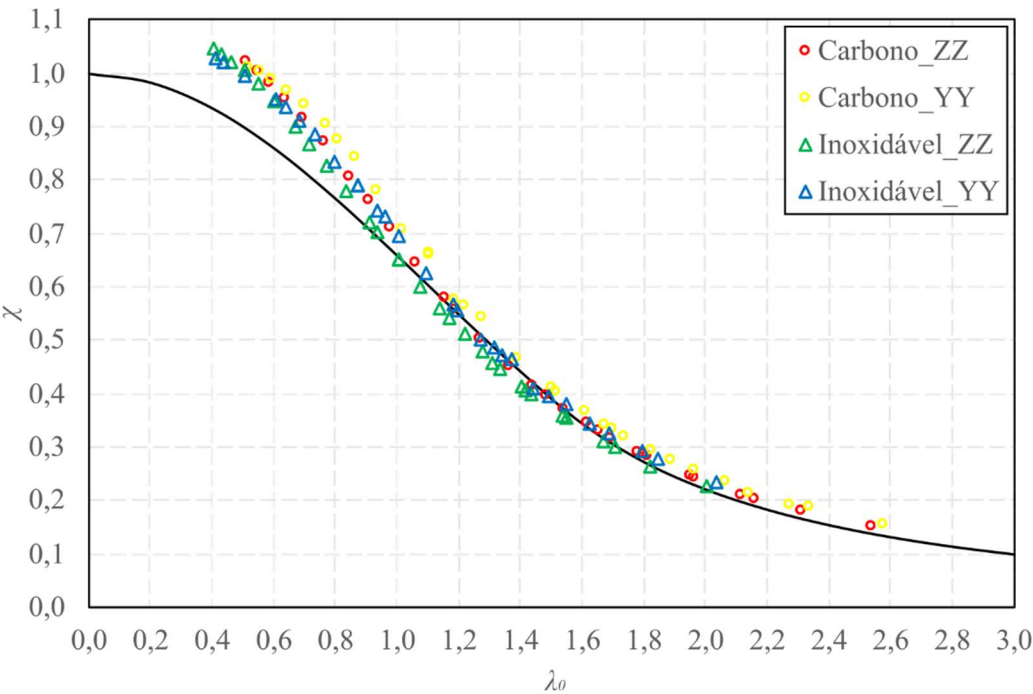
Tabela 19 - Comparação da capacidade de carga de colunas de alma sólida

Eixo	Material	Média	Desvio padrão
ZZ	Carbono	0,95	0,04
	Inoxidável	0,99	0,06
YY	Carbono	0,90	0,03
	Inoxidável	0,92	0,09

Fonte: Autor (2024)

Embora a maioria dos resultados tenha se mostrado conservadora e precisa, houve exceções notáveis, especialmente no caso de colunas de aço inoxidável, onde foram observadas previsões não conservadoras. A Figura 46, que apresenta a curva de projeto da NBR 8800 (ABNT, 2008), oferece um ponto de referência para entender melhor o comportamento dessas colunas.

Figura 46 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008)



Fonte: Autor (2023)

A curva de projeto da NBR 8800 (ABNT, 2008) geralmente mostra boa concordância com o comportamento estrutural das colunas. No entanto, há uma divergência notável no fator

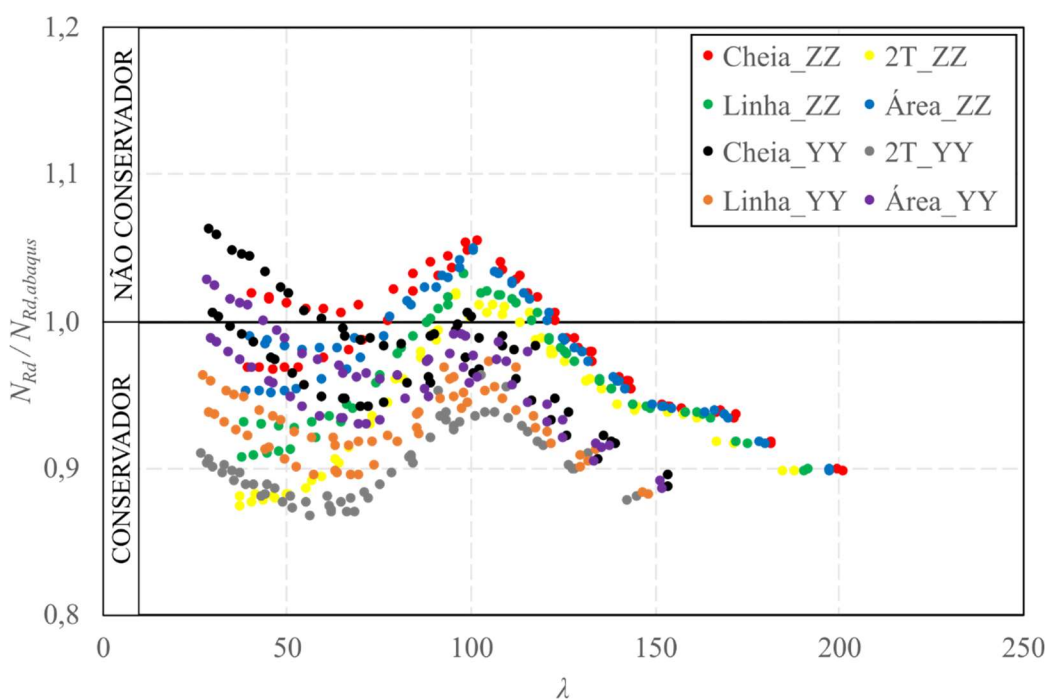
CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

de redução de flambagem para índices de esbeltez inferiores a 1,0. Essa discrepância pode explicar os resultados acentuadamente não conservadores observados na Figura 45.

A divergência para índices de esbeltez baixos pode ser atribuída ao fato de que a NBR 8800 (ABNT, 2008) pode não capturar de forma precisa o comportamento de colunas com esbeltez reduzida, especialmente para materiais como o aço inoxidável. Em estruturas com baixos índices de esbeltez, a capacidade de carga é mais influenciada pela resistência ao escoamento e pela rigidez do material, enquanto os efeitos de instabilidade de flambagem são menos predominantes. Se o fator de redução de flambagem não é suficientemente rigoroso ou não considera adequadamente a transição entre comportamento elástico e plástico, isso pode resultar em previsões não conservadoras da capacidade de carga.

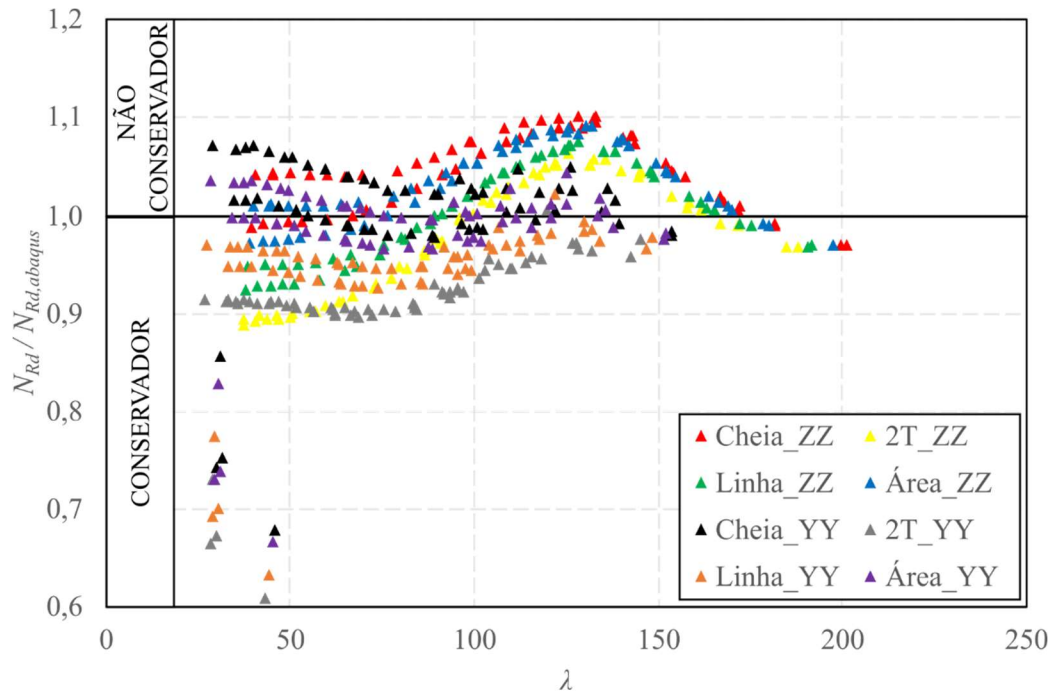
As Figuras 47 e 48 comparam a capacidade de carga de colunas casteladas usando diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal.

Figura 47 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2023)

Figura 48 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 20 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados numéricos em comparação com os resultados analíticos para diferentes métodos.

Tabela 20 - Comparação da capacidade de carga de colunas casteladas

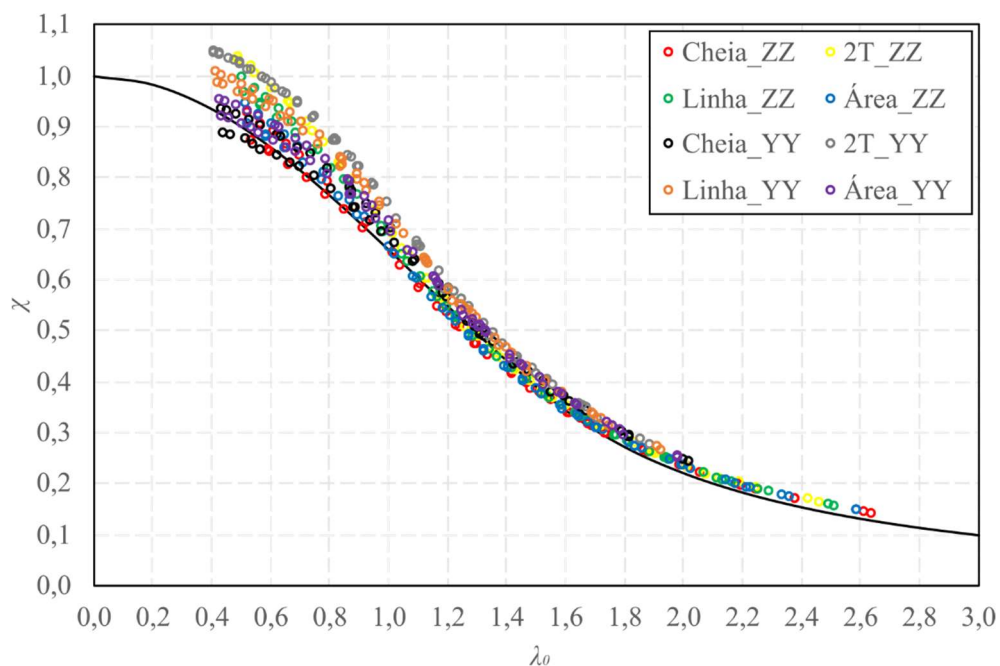
Método	Eixo	Material	Média	Desvio padrão
Alma Cheia	ZZ	Carbono	0,99	0,04
		Inoxidável	1,05	0,04
	YY	Carbono	0,98	0,04
		Inoxidável	1,00	0,07
Seção 2T	ZZ	Carbono	0,94	0,05
		Inoxidável	0,98	0,06
	YY	Carbono	0,90	0,02
		Inoxidável	0,91	0,07
Área	ZZ	Carbono	0,98	0,04
		Inoxidável	1,03	0,04
	YY	Carbono	0,96	0,03
		Inoxidável	0,98	0,07
Linha	ZZ	Carbono	0,96	0,04
		Inoxidável	1,01	0,05
	YY	Carbono	0,93	0,02
		Inoxidável	0,94	0,07

Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

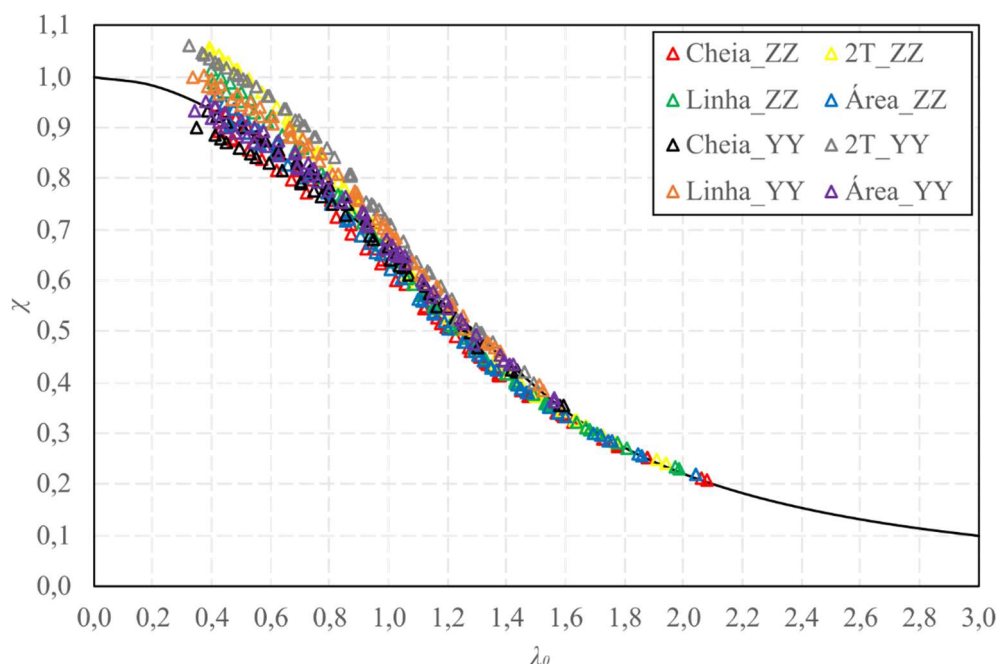
Embora a norma tenha mostrado boa concordância na capacidade resistente das colunas, alguns resultados, particularmente para aço inoxidável, revelaram comportamentos não conservadores. As Figuras 49 e 50 apresentam a curva de projeto da NBR 8800 (ABNT, 2008) para auxiliar na compreensão do comportamento de colunas casteladas.

Figura 49 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008) para colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2023)

Figura 50 - Curva de projeto NBR 8800 (ABNT, 2008) para colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2023)

As figuras apresentadas indicam que a curva de projeto da NBR 8800 (ABNT, 2008) mostra boa concordância estrutural para diversos métodos de cálculo das propriedades da seção transversal. Isso sugere que a norma é eficaz em prever o comportamento geral das colunas casteladas. No entanto, uma análise mais detalhada revelou que colunas com índices de esbelteza reduzidos, inferiores a 1,0, apresentaram divergências significativas no fator de redução de flambagem. Esse comportamento é semelhante ao observado em colunas de alma sólida, indicando uma possível limitação nos modelos de cálculo para esses casos específicos.

A análise dos dados mostrou que o método de seção 2T forneceu resultados mais conservadores, o que é geralmente preferível para garantir a segurança estrutural. Essa abordagem conservadora pode ser benéfica ao fornecer uma margem de segurança adicional, especialmente em situações onde há incerteza nos parâmetros de entrada ou nas condições de carregamento. O conservadorismo observado no método de seção 2T pode ser atribuído à sua capacidade de considerar mais completamente os efeitos de redistribuição de tensões e as variações nas propriedades da seção ao longo da coluna.

Por outro lado, o método de ponderação por superfície foi identificado como o que melhor representou o comportamento real das colunas casteladas. Isso pode ser explicado pelo fato de que esse método leva em consideração a distribuição de tensões na superfície da seção transversal, capturando de maneira mais precisa os efeitos locais causados pelas aberturas na

CAPÍTULO 9 - RESULTADOS PARA TEMPERATURA AMBIENTE

alma da coluna. As colunas casteladas, com suas aberturas, apresentam um comportamento estrutural complexo, onde a redistribuição de tensões pode afetar significativamente a capacidade de carga e a estabilidade global. O método de ponderação por superfície parece lidar melhor com essas complexidades, proporcionando uma representação mais fiel do comportamento das colunas sob carga.

Em suma, a NBR 8800 (ABNT, 2008) mostrou uma adequada precisão na previsão da capacidade de carga para colunas de aço carbono, mas ao ser aplicada a colunas de aço inoxidável, alguns resultados apresentaram previsões não conservadoras, principalmente devido a divergências no fator de redução de flambagem para índices de esbeltez reduzida. Isso sugere que ajustes na norma podem ser necessários para melhorar a acurácia das previsões para o aço inoxidável.

CAPÍTULO 10

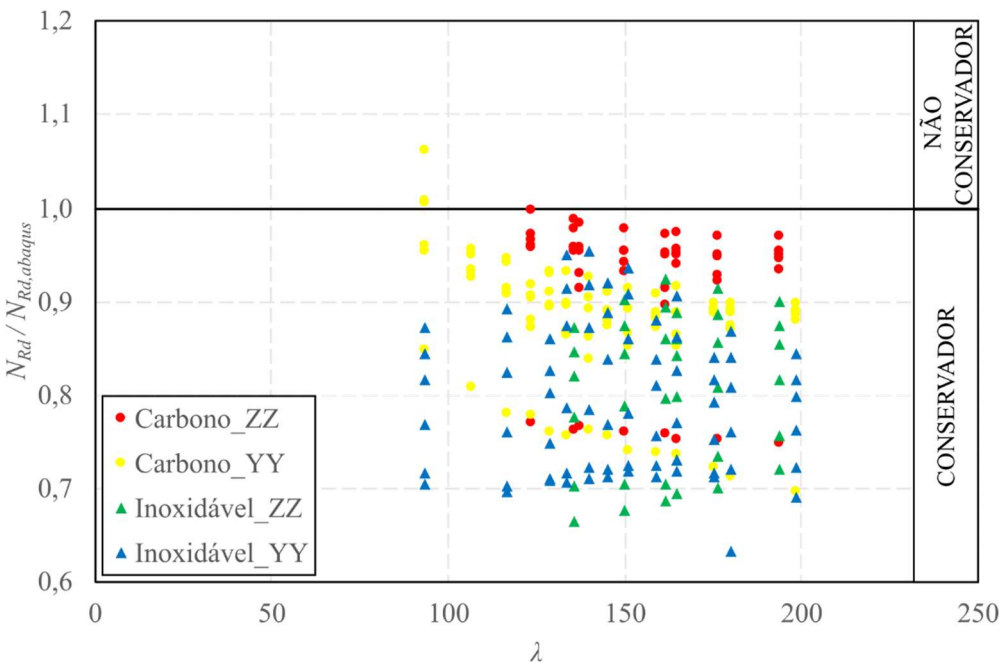
RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações numéricas da análise paramétrica de colunas em situação de incêndio. Além disso, é feita uma comparação desses resultados com as recomendações das normas EN 1993-1-2 (CEN, 2005) e NBR 14323 (ABNT, 2013), utilizando diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal.

10.1. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO EN 1993-1-2 (CEN, 2005)

A capacidade resistente das colunas foi comparada com os resultados numéricos e as recomendações da norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005) para diferentes tipos de aço, conforme ilustrado na Figura 51. A Tabela 21 apresenta a média e o desvio padrão dessa comparação.

Figura 51 - Capacidade resistente de colunas de alma sólida sob incêndio



Fonte: Autor (2024)

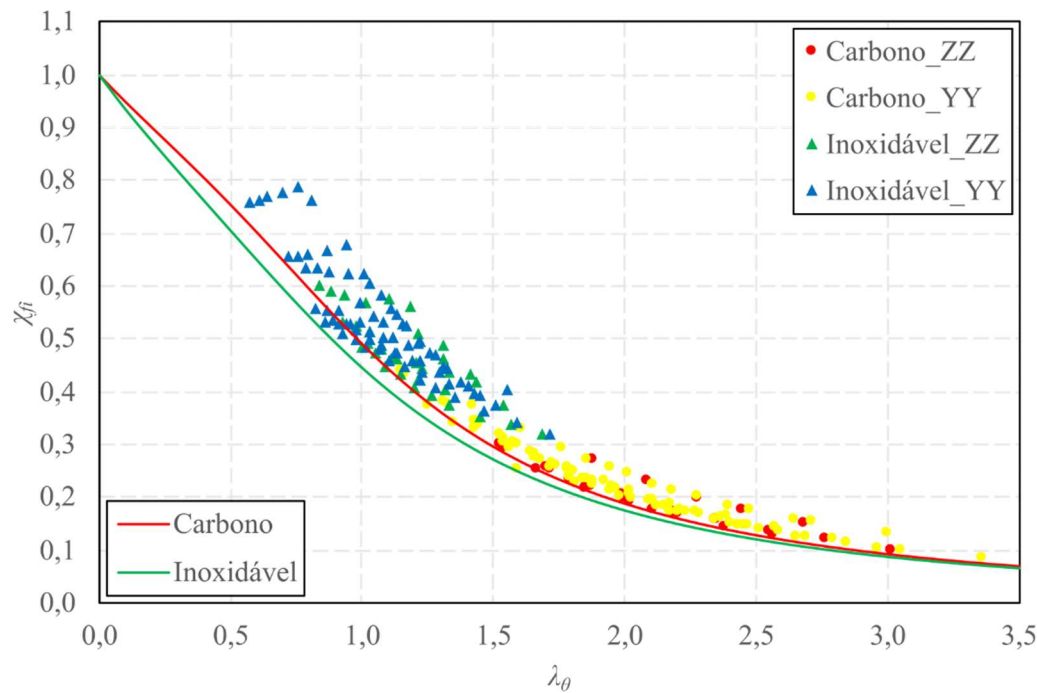
Tabela 21 - Comparação da capacidade resistente de colunas de alma sólida sob incêndio

Eixo	Material	Média	Desvio padrão
ZZ	Carbono	0,92	0,07
	Inoxidável	0,81	0,08
YY	Carbono	0,88	0,07
	Inoxidável	0,80	0,08

Fonte: Autor (2024)

Os resultados indicam que as recomendações normativas da EN 1993-1-2 (CEN, 2005) são, em geral, conservadoras e seguras para a maioria dos materiais, fornecendo uma margem de segurança adequada ao projetar colunas para situações de altas temperaturas. Essa abordagem conservadora é crucial para garantir a integridade estrutural durante incêndios ou exposições prolongadas a calor intenso. No entanto, uma análise específica do comportamento do aço inoxidável sob essas condições revelou um conservadorismo significativo, indicando que as estimativas normativas podem estar subestimando a capacidade resistente deste material em situações de alta temperatura. Para uma melhor compreensão dos resultados, a Figura 52 compara as curvas de projeto da norma europeia com os resultados numéricos.

Figura 52 - Curva de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005)



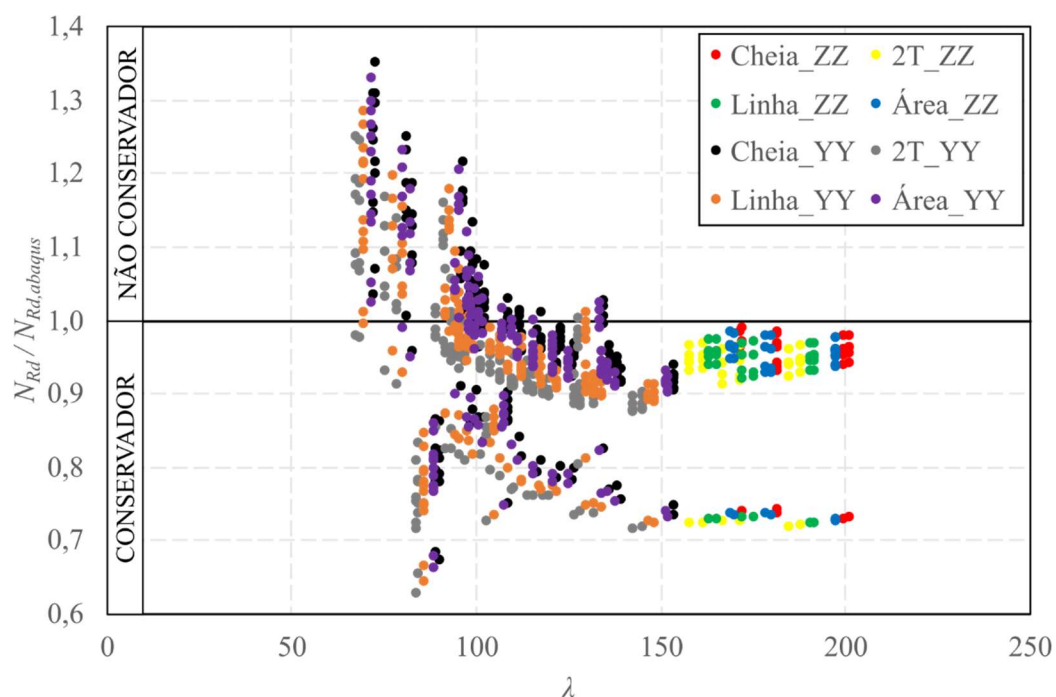
Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As curvas de projeto presentes na EN 1993-1-2 (CEN, 2005) geralmente representam bem o comportamento das colunas sob altas temperaturas, ajustando-se adequadamente aos materiais mais comuns, como o aço carbono. No entanto, no caso do aço inoxidável, observou-se uma certa divergência, especialmente na fase crítica de resistência ao fogo. Essa divergência pode ser atribuída às propriedades mecânicas distintas do aço inoxidável, como maior ductilidade e resistência à corrosão, que influenciam seu comportamento sob altas temperaturas de maneira diferente do aço carbono. Além disso, os fatores de imperfeição adotados na norma podem ser excessivamente conservadores para o aço inoxidável, não refletindo com precisão suas características específicas.

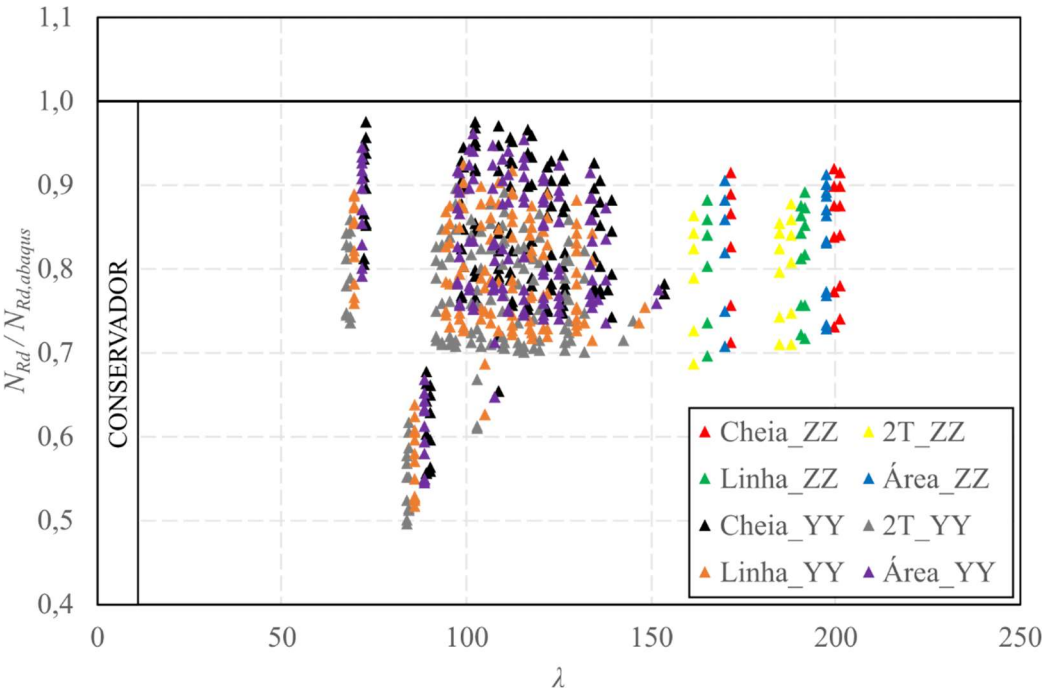
Assim como no Capítulo 9, as colunas casteladas foram analisadas utilizando diferentes métodos de cálculo das propriedades geométricas, conforme descrito no Capítulo 4. As Figuras 53 e 54 comparam a capacidade resistente de colunas casteladas por meio de análise numérica e recomendações normativas.

Figura 53 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço carbono sob incêndio



Fonte: Autor (2024)

Figura 54 - Capacidade resistente de colunas casteladas de aço inoxidável sob incêndio



A Tabela 22 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados numéricos em comparação com os resultados analíticos para diferentes métodos de cálculo das propriedades geométricas da seção transversal.

Tabela 22 - Comparação da capacidade resistente de colunas casteladas sob incêndio

Método	Eixo	Material	Média	Desvio padrão
Alma Cheia	ZZ	Carbono	0,92	0,09
		Inoxidável	0,84	0,07
	YY	Carbono	0,98	0,12
		Inoxidável	0,83	0,10
Seção 2T	ZZ	Carbono	0,91	0,08
		Inoxidável	0,80	0,06
	YY	Carbono	0,93	0,11
		Inoxidável	0,75	0,09
Área	ZZ	Carbono	0,92	0,08
		Inoxidável	0,83	0,07
	YY	Carbono	0,97	0,12
		Inoxidável	0,81	0,10
Linha	ZZ	Carbono	0,91	0,08
		Inoxidável	0,81	0,06
	YY	Carbono	0,95	0,12
		Inoxidável	0,78	0,09

Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

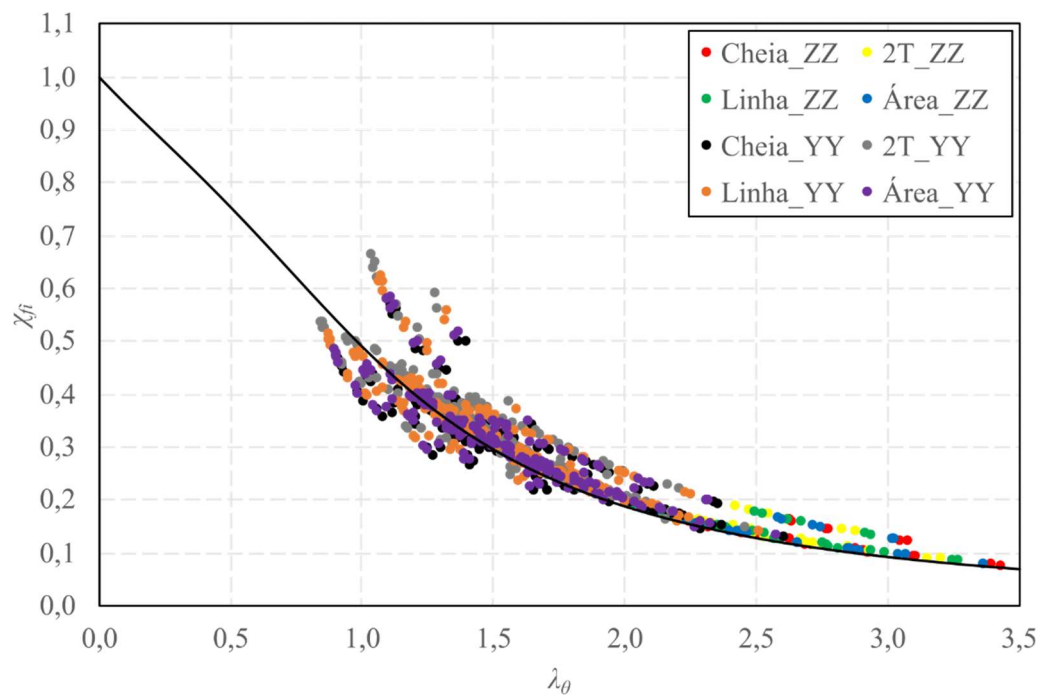
Para colunas casteladas de aço carbono, foram observados dois cenários distintos em relação à estabilidade estrutural. No caso de colunas cuja instabilidade ocorre em torno do menor eixo de inércia da seção transversal, todos os métodos de cálculo apresentaram resultados conservadores e significativamente precisos. Isso sugere que as abordagens normativas são adequadas para prever o comportamento dessas colunas em condições de compressão e flambagem, garantindo uma margem de segurança satisfatória.

Por outro lado, para colunas com instabilidade em torno do maior eixo de inércia, os resultados mostraram uma grande discrepância, especialmente em colunas com menor índice de esbeltez. Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de que a norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005) não diferencia entre os eixos de instabilidade, utilizando uma única curva de projeto para ambos os casos. Isso contrasta com a abordagem da norma para elementos em temperatura ambiente, que utiliza diferentes curvas de projeto dependendo do eixo de instabilidade, considerando de maneira mais detalhada a anisotropia das propriedades mecânicas. A utilização de uma única curva de projeto para colunas casteladas de aço carbono em altas temperaturas pode não capturar adequadamente as diferenças no comportamento estrutural entre os eixos, levando a previsões menos precisas e, em alguns casos, potencialmente não conservadoras.

Para colunas casteladas de aço inoxidável, os resultados foram consistentemente conservadores, o que é um aspecto positivo para a segurança estrutural. No entanto, observou-se uma considerável dispersão nos resultados em relação à instabilidade em torno do eixo de maior inércia, com valores variando entre previsões mais e menos conservadoras. Essa dispersão pode ser explicada por várias razões: o aço inoxidável possui características mecânicas distintas, como maior ductilidade e capacidade de redistribuição de tensões, que influenciam de forma significativa seu comportamento sob carga. Além disso, a variabilidade nos resultados pode refletir a sensibilidade do aço inoxidável a fatores como imperfeições geométricas e variações nas propriedades do material, que podem não ser completamente capturadas pelos modelos normativos existentes.

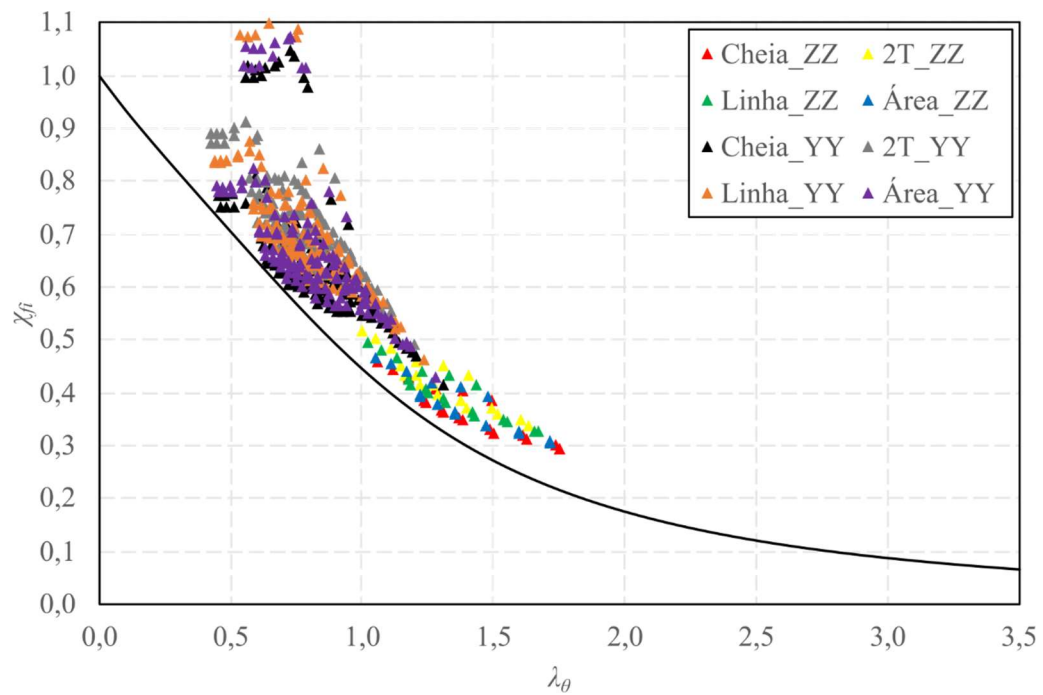
As Figuras 55 e 56 ilustram as curvas de projeto comparadas aos resultados numéricos, proporcionando uma visão mais clara do comportamento de colunas casteladas sob compressão em altas temperaturas.

Figura 55 - Curvas de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005) para colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2024)

Figura 56 - Curvas de projeto EN 1993-1-2 (CEN, 2005) para colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Em geral, todos os métodos considerados no cálculo analítico forneceram previsões semelhantes, indicando que a variação dos parâmetros geométricos relacionados à seção transversal não exerce uma influência significativa na determinação da capacidade resistente de colunas casteladas. Essa consistência sugere que, para este tipo de estrutura, os métodos normativos são suficientemente robustos para prever o comportamento geral das colunas, independentemente das variações menores nos parâmetros geométricos. A análise da Figura 55 confirma a necessidade de curvas de projeto distintas para cada eixo de instabilidade. A ausência dessa distinção nas curvas de projeto atuais pode levar a previsões conservadoras em um eixo e possivelmente não conservadoras no outro, evidenciando a importância de considerar as diferenças de comportamento entre os eixos de menor e maior inércia.

Um comportamento similar foi observado na Figura 56, onde os resultados para o maior eixo de inércia apresentaram-se dispersos, mas consistentemente acima da curva de projeto. Isso indica que, embora as previsões sejam conservadoras e garantam segurança estrutural, elas podem não ser tão precisas quanto o desejado. Essa imprecisão pode resultar da sensibilidade das colunas casteladas às imperfeições geométricas e às variações nas propriedades do material, como resistência e ductilidade. Além disso, pode haver uma inadequação dos modelos normativos atuais para capturar completamente o comportamento dessas colunas sob condições de carga complexas, especialmente em altas temperaturas.

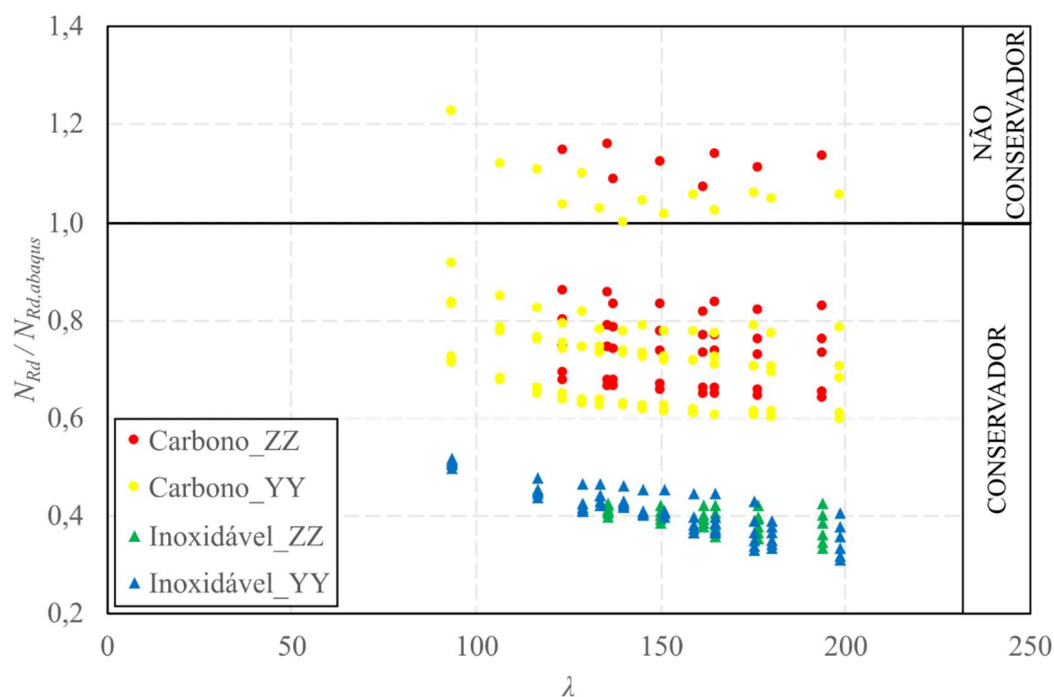
A análise do cálculo da capacidade resistente de colunas em elevadas temperaturas, de acordo com as recomendações da norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005), indica que, de maneira geral, as estimativas normativas são conservadoras e seguras, especialmente para materiais como o aço carbono. As curvas de projeto desta norma conseguem representar adequadamente o comportamento estrutural sob altas temperaturas, garantindo uma margem de segurança essencial para situações de incêndio ou exposição prolongada ao calor. No entanto, observou-se um conservadorismo significativo para colunas de aço inoxidável, o que pode resultar em uma subestimação da capacidade resistente desse material, principalmente devido às suas propriedades mecânicas distintas, como maior ductilidade e resistência à corrosão. Além disso, a norma não diferencia entre os eixos de instabilidade, utilizando uma única curva de projeto, o que pode não capturar completamente as diferenças no comportamento estrutural entre os eixos de menor e maior inércia, levando a previsões menos precisas.

10.2. CAPACIDADE RESISTENTE SEGUNDO NBR 14323 (ABNT, 2013)

A NBR 14323 (ABNT, 2013) apresenta diretrizes para o projeto de estruturas de aço, concreto e mistas em situações de incêndio. No entanto, assim como a NBR 8800 (ABNT, 2008), as recomendações para estruturas de aço não abrangem o aço inoxidável. Portanto, as mesmas recomendações aplicáveis ao aço carbono foram consideradas para colunas de aço inoxidável.

A capacidade de carga de colunas de alma cheia em situação de incêndio foi comparada com os resultados obtidos segundo a NBR 14323 (ABNT, 2013), tanto para o aço carbono quanto para o aço inoxidável. A Figura 57 ilustra essa comparação, enquanto a Tabela 23 detalha a média e o desvio padrão dos resultados.

Figura 57 - Capacidade de carga de colunas de alma sólida em elevadas temperaturas



Fonte: Autor (2024)

Tabela 23 - Comparação da capacidade de carga de colunas de alma sólida em elevadas temperaturas

Eixo	Material	Média	Desvio padrão
ZZ	Carbono	0,80	0,16
	Inoxidável	0,39	0,02
YY	Carbono	0,77	0,15
	Inoxidável	0,41	0,05

Fonte: Autor (2024)

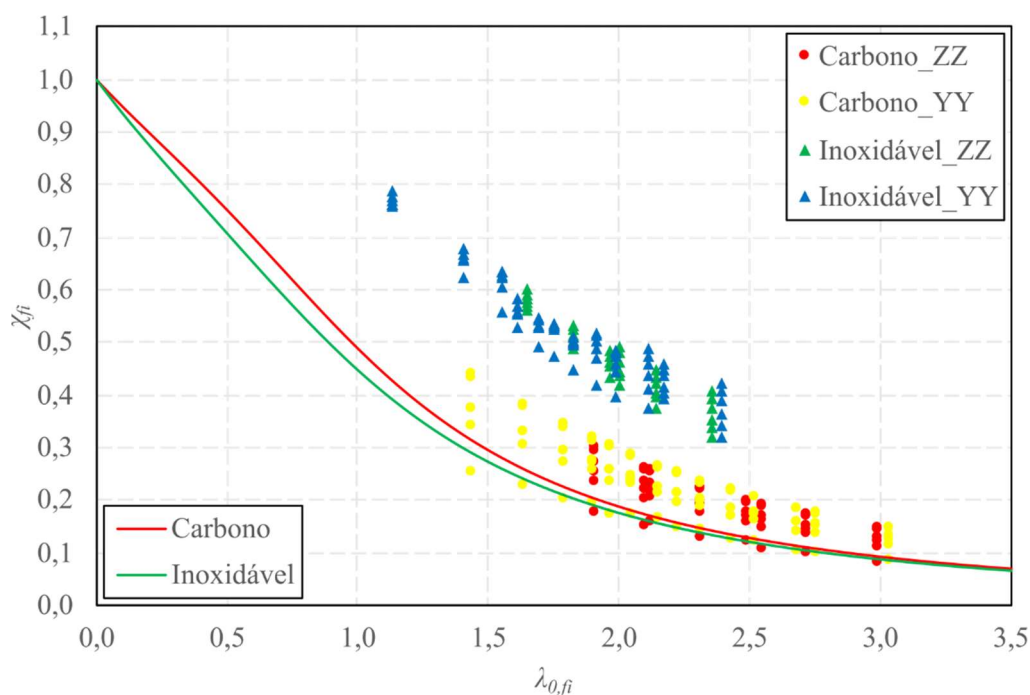
CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As recomendações normativas para o aço carbono geralmente forneceram resultados conservadores, garantindo uma margem de segurança adequada na maioria dos casos. No entanto, uma exceção significativa foi observada para colunas expostas a 30 minutos de incêndio, onde os resultados não foram conservadores. Isso aponta para uma possível inadequação nos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço carbono para curtos períodos de exposição ao fogo. Esse comportamento pode ser atribuído a uma subestimação da perda de resistência e rigidez do aço carbono em temperaturas elevadas, especialmente durante as fases iniciais de um incêndio. A norma pode não estar considerando de forma precisa as rápidas mudanças nas propriedades do material que ocorrem durante esse período crítico, resultando em previsões menos seguras.

Para o aço inoxidável, as previsões fornecidas pela NBR 14323 (ABNT, 2013) mostraram-se excessivamente conservadoras. Essa tendência conservadora pode ser explicada pelas características distintas do aço inoxidável, como maior resistência à corrosão, ductilidade e capacidade de manter a resistência a temperaturas mais elevadas em comparação com o aço carbono. As recomendações podem estar aplicando fatores de redução excessivos que não refletem com precisão o comportamento real do aço inoxidável sob altas temperaturas. Além disso, a norma pode não estar considerando adequadamente a capacidade do aço inoxidável de redistribuir tensões e resistir à degradação em altas temperaturas. Portanto, há necessidade de revisar as diretrizes da NBR 14323 (ABNT, 2013) para fornecer estimativas mais precisas e menos conservadoras para o aço inoxidável, garantindo segurança sem superdimensionamento.

A Figura 58 apresenta as curvas de projeto, facilitando a compreensão do comportamento de colunas de alma sólida.

Figura 58 - Curvas de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013)



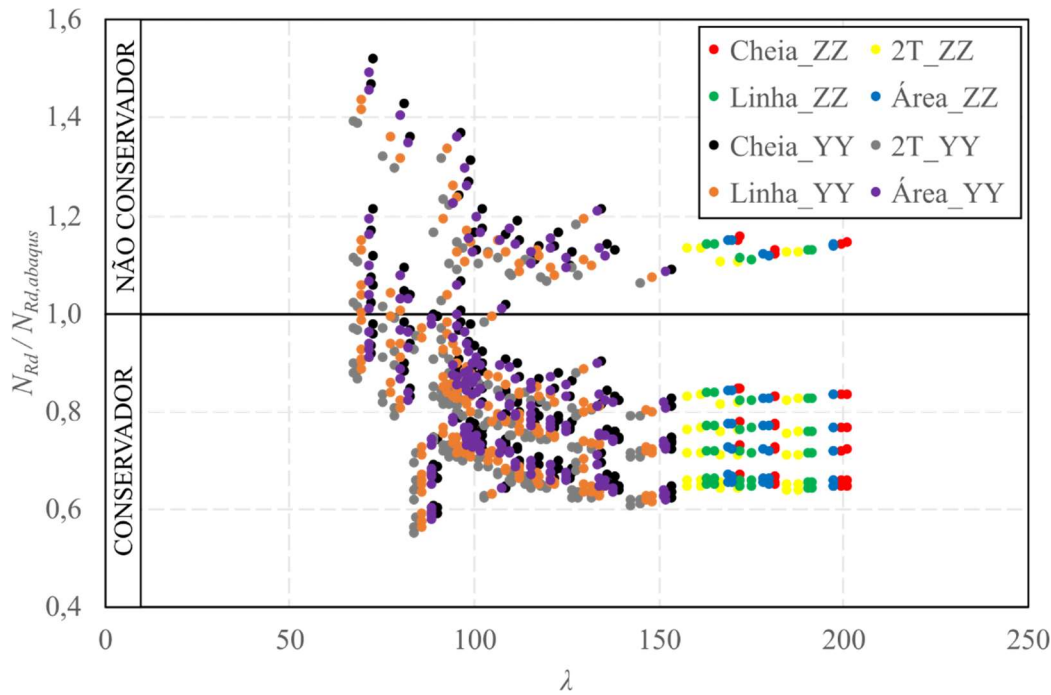
Fonte: Autor (2024)

No caso das colunas de aço carbono, as recomendações normativas resultaram em uma dispersão significativa em relação à curva de projeto, sugerindo que a atual abordagem pode não estar capturando adequadamente o comportamento dessas colunas sob condições de incêndio. Essa dispersão indica a necessidade de revisão da curva de projeto ou dos fatores de redução das propriedades mecânicas, especialmente em função do tempo de exposição ao fogo ou da temperatura específica do elemento. A introdução de curvas que considerem explicitamente esses parâmetros poderia melhorar a precisão das previsões, assegurando que as margens de segurança sejam mantidas sem superestimar ou subestimar a capacidade resistente das colunas de aço carbono.

Para o aço inoxidável, os resultados mostraram um comportamento que se aproxima da curva de projeto, mas com resultados numéricos significativamente superiores. Isso indica que as recomendações normativas atuais podem ser excessivamente conservadoras para este material. A diferença entre os resultados numéricos e a curva de projeto sugere que os fatores de imperfeição adotados nas normas não refletem com precisão as características mecânicas do aço inoxidável. Esses fatores, se ajustados, poderiam alinhar melhor as previsões normativas com o comportamento real do aço inoxidável, permitindo uma utilização mais eficiente e segura desse material em aplicações estruturais expostas a altas temperaturas.

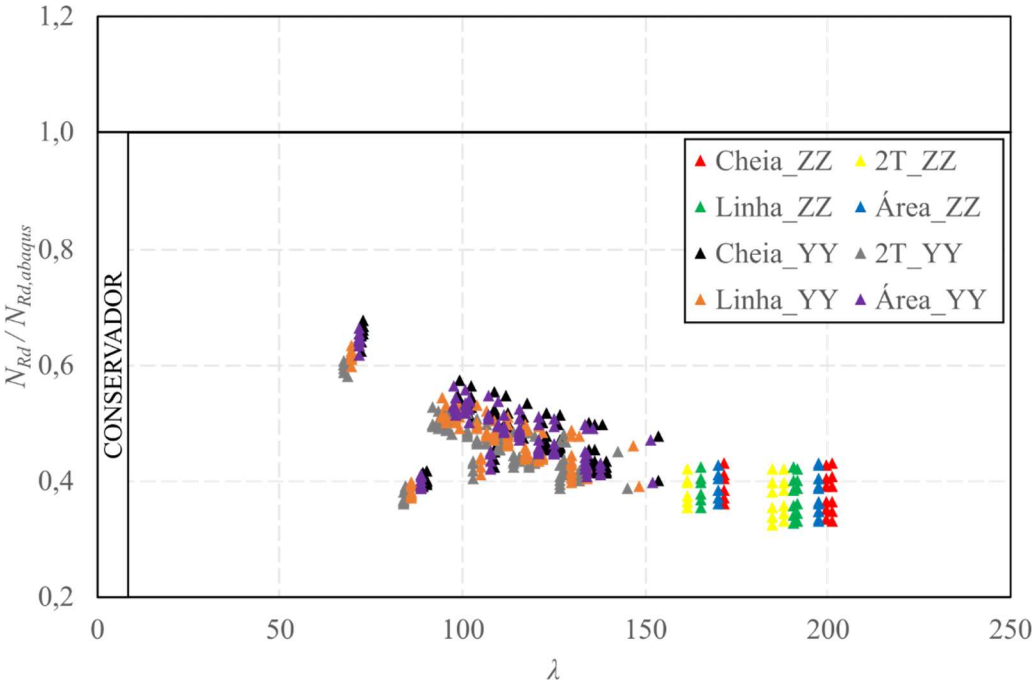
As Figuras 59 e 60 comparam a capacidade de carga de colunas casteladas considerando diferentes métodos e a Tabela 24 apresenta a média e o desvio padrão desses resultados comparados com os resultados analíticos.

Figura 59 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço carbono em elevadas temperaturas



Fonte: Autor (2024)

Figura 60 - Capacidade de carga de colunas casteladas de aço inoxidável em elevadas temperaturas



A Tabela 24 apresenta a média e o desvio padrão desses resultados comparados com os resultados analíticos.

Tabela 24 - Comparação da capacidade de carga de colunas casteladas em elevadas temperaturas

Método	Eixo	Material	Média	Desvio padrão
Alma Cheia	ZZ	Carbono	0,80	0,17
		Inoxidável	0,38	0,03
	YY	Carbono	0,87	0,19
		Inoxidável	0,50	0,07
Seção 2T	ZZ	Carbono	0,78	0,16
		Inoxidável	0,38	0,03
	YY	Carbono	0,83	0,18
		Inoxidável	0,47	0,06
Área	ZZ	Carbono	0,79	0,16
		Inoxidável	0,38	0,03
	YY	Carbono	0,86	0,19
		Inoxidável	0,49	0,07
Linha	ZZ	Carbono	0,79	0,16
		Inoxidável	0,38	0,03
	YY	Carbono	0,84	0,18
		Inoxidável	0,48	0,06

Fonte: Autor (2024)

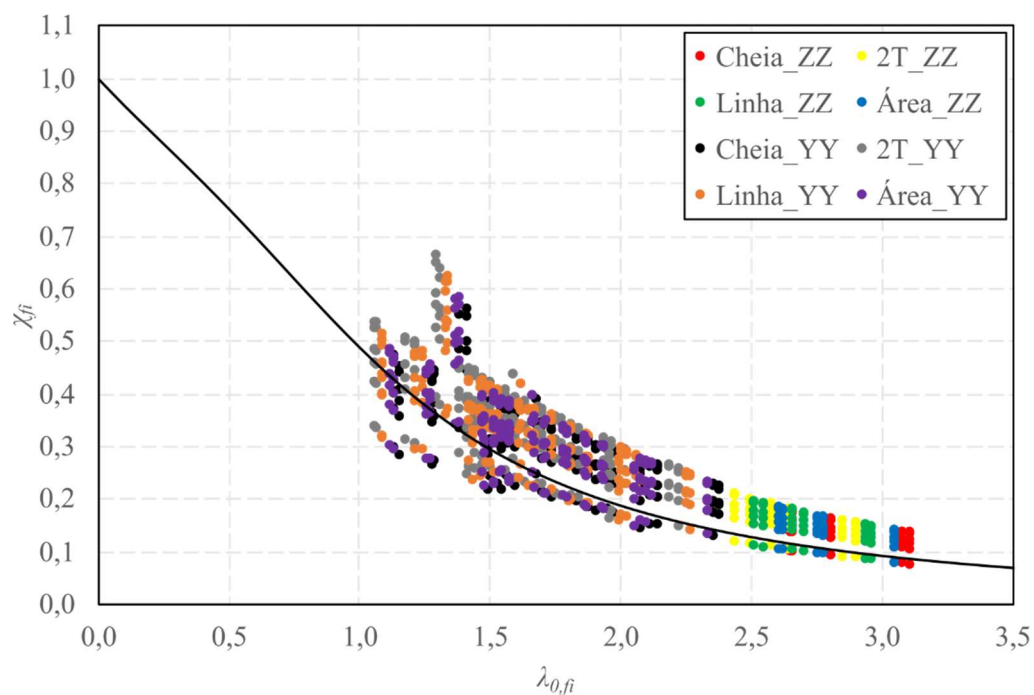
CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Assim como observado em colunas de alma sólida, as recomendações normativas para colunas casteladas de aço carbono geralmente forneceram previsões conservadoras, assegurando uma margem de segurança adequada para a maioria das situações de incêndio. No entanto, uma exceção importante foi notada em colunas expostas ao fogo por 30 minutos, quando a temperatura do elemento estrutural alcançou aproximadamente 700°C. Nessas condições, as previsões foram menos conservadoras, sugerindo que os fatores de redução das propriedades mecânicas podem não estar adequadamente calibrados para temperaturas específicas ou durações de exposição ao fogo. Além disso, colunas com instabilidade em torno do maior eixo de inércia também mostraram uma maior dispersão nos resultados, indicando que a norma atual pode não capturar plenamente as complexidades associadas a essa configuração estrutural, possivelmente devido à simplificação dos modelos ou à falta de consideração para diferentes eixos de instabilidade.

Para colunas casteladas de aço inoxidável, os resultados foram consistentemente excessivamente conservadores. Isso pode ser explicado pelas propriedades mecânicas distintas do aço inoxidável, como sua maior ductilidade e resistência à corrosão, que permitem uma maior capacidade de carga do que a prevista pelas normas atuais. A abordagem normativa pode estar subestimando a resistência deste material em altas temperaturas devido à aplicação de fatores de redução e imperfeição que não refletem com precisão o comportamento real do aço inoxidável. Essa diferença sugere a necessidade de revisar e ajustar as recomendações normativas para que possam fornecer estimativas mais precisas, sem comprometer a segurança, mas também sem subutilizar as capacidades reais do material.

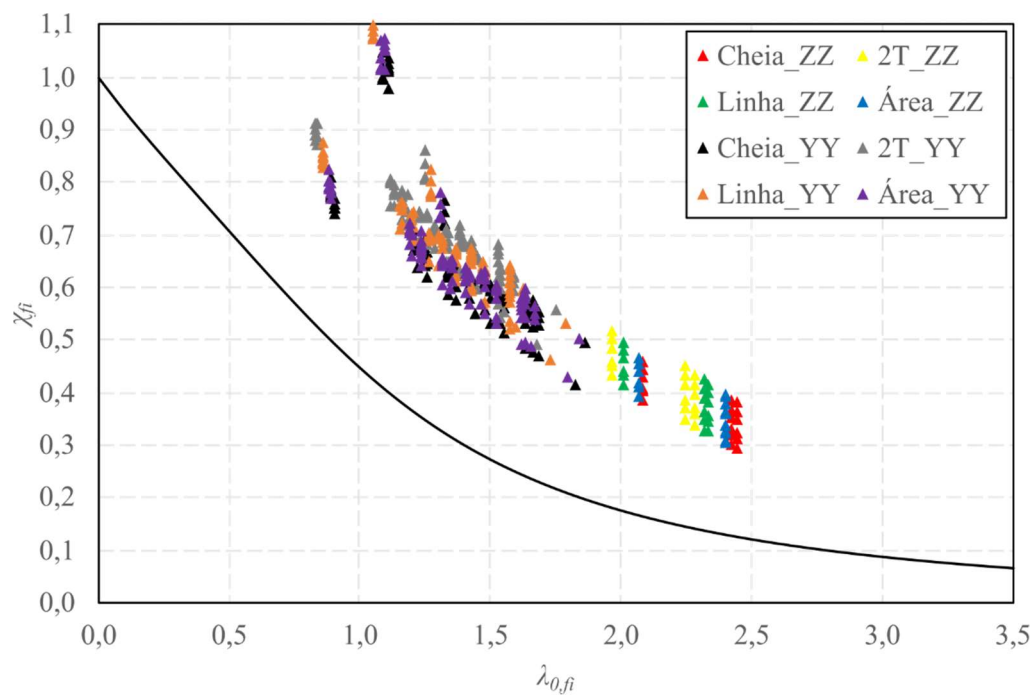
As Figuras 61 e 62 mostram as curvas de projeto da NBR 14323 (ABNT, 2013) para colunas casteladas de diferentes tipos de aço.

Figura 61 - Curva de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013) para colunas casteladas de aço carbono



Fonte: Autor (2024)

Figura 62 - Curva de projeto NBR 14323 (ABNT, 2013) para colunas casteladas de aço inoxidável



Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As recomendações da norma brasileira NBR 14323 (ABNT, 2013) forneceram previsões conservadoras na maioria das colunas analisadas, garantindo uma margem de segurança adequada para a maioria das situações. No entanto, duas exceções notáveis foram identificadas: colunas com instabilidade em torno do maior eixo de inércia e aquelas expostas a 30 minutos de incêndio. Nesses casos, as previsões não foram tão conservadoras quanto esperado, indicando uma possível necessidade de revisão dos fatores de redução ou das curvas de projeto para melhor refletir o comportamento dessas colunas sob condições específicas.

A falta de conservadorismo para colunas com instabilidade no maior eixo de inércia pode ser devido a uma inadequação dos modelos normativos em capturar a complexidade das interações estruturais ao longo deste eixo. A norma pode não estar diferenciando adequadamente entre os diferentes comportamentos das colunas, levando a previsões que não garantem uma margem de segurança suficiente. Além disso, a exposição a 30 minutos de incêndio, atingindo temperaturas de cerca de 700°C, também mostrou previsões menos conservadoras. Isso sugere que os fatores de redução usados para essas condições podem não estar totalmente ajustados para refletir a resistência real do aço carbono a curtas exposições a altas temperaturas.

Para as colunas casteladas de aço inoxidável, as previsões foram excessivamente conservadoras, refletindo as propriedades superiores desse material em comparação ao aço carbono, como maior ductilidade e resistência à corrosão. Essas propriedades permitem que o aço inoxidável mantenha uma capacidade resistente superior à prevista pelas recomendações normativas. Embora as previsões conservadoras garantam segurança estrutural, elas podem ser excessivamente restritivas, indicando que as diretrizes da NBR 14323 (ABNT, 2013) poderiam ser aplicadas a colunas casteladas de aço inoxidável, desde que ajustes sejam feitos na curva de projeto para refletir com maior precisão as características específicas desse material.

Os resultados também indicaram que a escolha do método para determinar as propriedades geométricas da seção transversal não tem uma influência significativa na determinação do esforço resistente de colunas casteladas em altas temperaturas. Essa consistência sugere que os métodos normativos são suficientemente robustos para prever o comportamento geral dessas colunas, independentemente das variações nos parâmetros geométricos. No entanto, o tempo de exposição ao fogo e a temperatura atingida pelo elemento são fatores cruciais que impactam diretamente a previsão do esforço resistente.

A análise das colunas de aço carbono e aço inoxidável de acordo com a NBR 14323 (ABNT, 2013) indicou que, embora as previsões normativas sejam geralmente conservadoras e assegurem uma margem de segurança adequada, algumas exceções importantes foram

CAPÍTULO 10 - RESULTADOS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

identificadas. Colunas expostas a 30 minutos de incêndio e aquelas com instabilidade em torno do maior eixo de inércia apresentaram resultados menos conservadores, sugerindo uma subestimação das perdas de resistência e rigidez nas fases iniciais de um incêndio ou em configurações estruturais complexas. Para o aço inoxidável, as previsões foram consistentemente excessivamente conservadoras, refletindo uma necessidade de ajuste nos fatores de imperfeição e redução para melhor capturar o comportamento real deste material em altas temperaturas. Em suma, enquanto a norma fornece uma base segura, ajustes específicos nos fatores de redução e nas curvas de projeto são recomendados para melhorar a precisão das previsões para ambos os tipos de aço, assegurando uma utilização eficiente e segura em condições de incêndio.

CAPÍTULO 11

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados encontrados e as sugestões de trabalhos futuros a partir desta pesquisa.

11.1. CONCLUSÃO

Este estudo focou na análise do comportamento de colunas de aço sob compressão, abrangendo tanto colunas de alma sólida quanto colunas casteladas, em condições de temperatura ambiente e alta temperatura. A investigação foi conduzida por meio de simulações numéricas avançadas utilizando o *software* ABAQUS®, visando determinar a carga crítica e a capacidade resistente das colunas. Os resultados obtidos foram comparados com as previsões fornecidas pelas normas EN 1993-1-1 (CEN, 2022), EN 1993-1-2 (CEN, 2005), NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14323 (ABNT, 2013), levando em consideração diferentes métodos de cálculo das propriedades da seção transversal.

A análise da carga crítica revelou que os resultados numéricos para colunas de alma sólida mostraram um erro médio reduzido quando comparados com a equação de Euler. Especificamente, para o eixo de menor inércia, o erro médio foi de 0,87%, enquanto para o eixo de maior inércia foi de 0,30%. Esses resultados indicam uma boa concordância entre o modelo numérico e a teoria analítica, evidenciando uma menor tendência de erro em colunas mais longas. No caso das colunas casteladas, o método da seção 2T demonstrou ser o mais eficaz, oferecendo resultados que se aproximam dos valores analíticos e destacando a sua precisão na representação da carga crítica.

No que tange à capacidade resistente, a norma EN 1993-1-1 (CEN, 2022) foi avaliada com simulações não lineares que incorporaram imperfeições geométricas iniciais. A comparação com os valores analíticos fornecidos pela norma mostrou que as estimativas para aço carbono foram geralmente conservadoras e bem alinhadas com a curva de projeto “a”. No entanto, para o aço inoxidável, a norma revelou um conservadorismo excessivo, indicando a necessidade de desenvolvimento de curvas de projeto mais adequadas para capturar a resposta

específica deste material. O método da seção 2T, por outro lado, provou ser eficaz em fornecer uma margem de segurança adequada, conforme recomendado por Sonck e Belis (2016).

A análise dos resultados segundo a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), que se aplica predominantemente ao aço carbono, revelou boas previsões de capacidade resistente para esse material. No entanto, as previsões para aço inoxidável mostraram-se menos conservadoras, especialmente em índices de esbeltez baixos. Isso sugere que os modelos de cálculo da norma podem não ser adequados para capturar o comportamento das colunas de aço inoxidável com baixo índice de esbeltez. O método de ponderação por superfície destacou-se como o que melhor representou o comportamento real das colunas casteladas, oferecendo estimativas mais precisas da capacidade de carga.

Em relação à capacidade resistente segundo a norma EN 1993-1-2 (CEN, 2005), que trata da análise de estruturas de aço em situações de incêndio, os resultados mostraram que as diretrizes dessa norma são adequadas e conservadoras para o aço carbono, garantindo uma margem de segurança substancial. No entanto, para o aço inoxidável, as previsões foram excessivamente conservadoras, sugerindo uma subestimação das propriedades mecânicas desse material, como maior ductilidade e resistência à corrosão. A análise também indicou que os fatores de imperfeição adotados pela norma podem não refletir com precisão o comportamento do aço inoxidável em altas temperaturas, o que pode afetar a precisão das previsões. Além disso, as colunas casteladas mostraram que a influência dos métodos de cálculo das propriedades geométricas é limitada, sendo necessário usar curvas de projeto distintas para diferentes eixos de instabilidade para melhorar a precisão das previsões.

Finalmente, a análise segundo a norma NBR 14323 (ABNT, 2013) demonstrou uma abordagem conservadora para o aço carbono, garantindo segurança na maioria dos cenários. No entanto, foi observada uma subestimação significativa da capacidade resistente para exposições mais curtas a incêndios, como 30 minutos, evidenciando a necessidade de ajustar os fatores de redução das propriedades mecânicas para refletir mais precisamente a degradação rápida do aço carbono em altas temperaturas. Para o aço inoxidável, a norma apresentou previsões excessivamente conservadoras, sugerindo que os ajustes nos fatores de imperfeição e redução são necessários para alinhar as previsões com o comportamento real desse material.

11.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em face dos resultados apresentados, são sugeridos questões e problemas que podem ser abordados em futuros trabalhos, a fim de complementar este ou torná-lo mais preciso:

- Desenvolvimento de curvas de projeto específicas: É necessário desenvolver curvas de projeto mais adequadas para o aço inoxidável e para colunas com baixo índice de esbeltez, ajustando os modelos normativos para refletir com maior precisão o comportamento desses materiais.
- Estudos experimentais complementares: Realizar experimentos laboratoriais para validar os resultados numéricos e fornecer dados empíricos que possam ajustar e refinar os modelos de cálculo e as recomendações normativas.
- Análise de outros tipos de aço: Investigar o comportamento de outros tipos de aço, como o aço de alta resistência e o aço de baixa liga, sob condições de compressão e incêndio, para expandir o conhecimento sobre a capacidade resistente desses materiais em diferentes cenários.
- Simulações anisotérmicas: Utilizar técnicas de simulação que incluam análise de elementos finitos mais refinados e modelos de comportamento térmico, para obter previsões mais precisas e realistas das propriedades das colunas em situações de incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, J. L. Behaviour of steel I beams with web openings. **Civil Engineering Journal**, v. 9, n. 03, 2023.

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

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

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

BEZAS, M. Z.; DEMONCEAU, J. F.; VAYAS, I.; JASPART, J. P. Experimental and numerical investigations on large angle high strength steel columns. **Thin-Walled Structures**, v. 159, 2021.

BORGIOLO, F. The corrosion behavior in different environments of austenitic stainless steels subjected to thermochemical surface treatments at low temperatures: an overview. **Metals**, v. 13, n. 4, 2023.

CARVALHO, A. S.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Assessment of lateral-torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. **Thin-Walled Structures**, v. 175, 2022.

DESSAULT SYSTÈMES. **ABAQUS® v. 6.14 reference manual**. Simulia, 2014.

DOKŠANOVIĆ, T.; RADIĆ, I.; BISERČIĆ, B. Buckling resistance of tapered steel columns. **Applied Sciences**, v. 13, n. 20, 2023.

EARLS, C. J. Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 51, p. 147-175, 1999.

EL-SAWY, K. M.; SWEEDAN, A. M. I.; MARTINI, M. I. Major-axis elastic buckling of axially loaded castellated steel columns. **Thin-Walled Structures**, v. 47, n. 11, p. 1295-1304, 2009.

EL-TOBGY, H. H.; ABU-SENA, A. B. B.; FARES, M. W. Experimental and parametric investigation of castellated steel beam-column in various expansion ratios, lengths and loading conditions. **Structures**, v. 33, p. 484-507, 2021.

ENGESSER, F. Die Knickfestigkeit gerader Stäbe. **Zentralblatt der Bauverwaltung**, v. 11, p. 483-486, 1891.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **EN 1993-1-1 (CEN, 2022)** (*Eurocode 3*) – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **EN 1993-1-2 (CEN, 2005)** (*Eurocode 3*) – Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **EN 1993-1-4 (CEN, 2006)** (*Eurocode 3*) – Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels. Brussels, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **EN 1993-1-13 (CEN, 2024)** (*Eurocode 3*) – Design of steel structures – Part 1-13: Beams with large web openings. Brussels, 2024.

GARDNER, L.; BADDOO, N. R. Fire testing and design of stainless steel structures. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 6, p. 532-543, 2006.

GARDNER, L. Stability and design of stainless steel structures – review and outlook. **Thin-Walled Structures**, v. 141, p. 208-216, 2019.

GARDNER, L. The use of stainless steel in structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 7, n. 2, p. 45-55, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 834 (1999)** – Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1.1: General requirements for fire resistance testing. Geneva, 1999.

KHATE, K.; PATTON, M. L.; MARTHONG, C. Structural behavior of stainless steel stub column under axial compression: a FE study. **International Journal of Steel Structures**, v. 18, p. 1723-1740, 2018.

KUCUKLER, M.; XING, Z.; GARDNER, L. Behaviour and design of stainless steel I-section columns in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 165, 2020.

LI, Y. W.; LI, G. Q.; XIAO, L.; YAM, M. C. H.; ZHANG, J.Z. Shear resistance of corrugated web steel beams with circular web openings: Test and machine learning-based prediction. **Steel and Composite Structures**, v. 47, n. 1, p. 103-117, 2023.

MOHAMMED, A.; AFSHAN, S. Numerical modelling and fire design of stainless steel hollow section columns. **Thin-Walled Structures**, v. 144, 2019.

NG, K. T.; GARDNER, L. Buckling of stainless steel columns and beams in fire. **Engineering Structures**, v. 29, n. 5, p. 717-730, 2007.

PAULI, J.; SOMAINI, D.; KNOBLOCH, M.; FONTANA, M. **Experiments on steel columns under fire conditions**. 2012. Institute of Structural Engineering, Zurich, 2012.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RAJIĆ, N.; RAŠETA, A. Stainless steel I-section columns fire design considering the influence of loading history. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 198, 2022.

ROSSI, A. **Flambagem lateral com torção e distorção da alma em vigas de perfis I metálicos duplamente simétricos**. 2018. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

SAYED, A. M. Numerical study of the effects of web openings on the load capacity of steel beams with corrugated webs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 196, 2022.

SONCK, D.; BELIS, J. Weak-axis flexural buckling of cellular and castellated columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 124, p. 91-100, 2016.

SOUZA, P. R. R.; MORAIS, J. M. N.; LACERDA, B. M. A utilização da estrutura metálica na Engenharia Civil. **Revistaft**, v. 26, ed. 116, 2022.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1961.

VELLING, A. **What is stainless steel? Properties and applications**. Fractory, 2020. Disponível em: < <https://fractory.com/what-is-stainless-steel/> . Acesso em: 22/06/2024.

YUAN, W.; KIM, B.; LI, L. Buckling of axially loaded castellated steel columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 92, p. 40-45, 2014.

YUAN, X.; LIU, F.; LI, Z.; XU, Y. Finite element analysis for castellated steel columns with two different expansion ratios. **IEEE Xplore**, p. 2589-2592, 2012.