



Ana Regina Correia de Sousa **Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas**



**Ana Regina Correia de
Sousa**

**Resistência ao fogo de colunas tubulares
quadrangulares e circulares em aço inoxidável
axialmente comprimidas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À minha família

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Doutor Carlos André Soares Couto
Consultor, Lindab S.A. (arguente)

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador).

agradecimentos

Sendo este o culminar de mais uma etapa e a concretização de um objetivo pessoal, gostaria de aqui expressar os meus agradecimentos a todos os que de alguma forma me ajudaram neste percurso e no desenvolvimento da presente dissertação.

O trabalho realizado nesta dissertação não seria possível sem o apoio ímpar do Professor Doutor Nuno Lopes, meu orientador, a quem estou profundamente grata pela excelência da sua supervisão, a partilha do seu conhecimento, a infinita disponibilidade e dedicação, a paciência e o compromisso a este trabalho foram um contributo imensurável para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Doutor Paulo Vila Real, meu coorientador, agradeço toda a disponibilidade e sentido crítico entregue a este trabalho permitindo elevar a sua qualidade.

Um agradecimento a todos os que desta instituição, sem exceção, de alguma maneira contribuíram para a minha formação académica e pessoal. A amizade não se agradece, recebe-se e retribui-se.

Agradecer aos meus companheiros de sempre, aqueles cuja paciência é inesgotável e que contribuíram de uma maneira ou de outra para o fecho desta etapa, mas principalmente à Silvério, Chica, Catarina Mendes, Fábio Vidal, Hugo Pina, Telmo Cruz, Frederico Correia, Diogo Pinheiro, Tiago Carvalho, Samuel Carvalho, Ricardo Dias. Um muito obrigado.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais, irmão e a toda a minha família, pela forma como me acompanharam, ajudaram e motivaram para a conclusão deste meu percurso académico.

Um sincero e enorme muito obrigada!

palavras-chave

Aço inoxidável, Colunas, Fogo, Eurocódigo 3, Compressão.

resumo

A presente dissertação resulta de um trabalho de investigação, cujo principal objetivo é o aumento de conhecimento relativo ao comportamento estrutural do aço inoxidável na construção.

O aço inoxidável tem diversas características desejáveis num material estrutural, destacando-se a sua resistência à corrosão. Apesar do seu custo inicial elevado este pode ser compensado pelo facto de ter um custo de ciclo de vida baixo e adicionalmente poder necessitar de menor quantidade de material de proteção térmica.

As colunas em aço inoxidável possuem, em grande parte das situações, secções transversais tubulares. Neste tipo de elementos a consideração da possibilidade de ocorrência de fenómenos de encurvadura como a encurvadura por flexão e, no caso de secções esbeltas, a encurvadura local é muito importante, já que estes fenómenos são agravados na presença de temperaturas elevadas.

Este trabalho apresenta um estudo numérico do comportamento ao fogo de colunas tubulares, mais concretamente com secções quadrangulares e circulares de aço inoxidável quando submetidas a altas temperaturas e sujeitas a compressão axial.

Este estudo numérico foi efetuado através do programa de elementos finitos SAFIR com o objetivo de avaliar a influência do tipo de aço, do tipo de classe e do tipo de secção transversal nos elementos tubulares sujeitos a altas temperaturas.

Por fim, esses resultados numéricos foram comparados com a metodologia utilizada pelo EC3 bem como com outras propostas analisando também estatisticamente qual o grau de precisão das abordagens de dimensionamento.

keywords

Stainless steel; Column; Fire; Eurocode 3; Compression.

abstract

The present thesis is the result of a research work which has the main purpose of increasing the knowledge on the structural behaviour of stainless steel in construction.

Stainless steel has several desirable characteristics for a structural material, being emphasized to its resistance to corrosion. Despite having a high initial cost, it could be paid off considering its low life cycle cost, in addition it requires less thermal protection material.

In most situations, stainless steel columns have tubular cross-sections. In columns it is important to consider the possibility of occurrence of buckling phenomena, such as flexural buckling, and, in the case of slender cross-sections, local buckling, which are aggravated in the presence of high temperatures.

This work presents a numerical study on the behaviour of tubular columns to fire, more specifically, stainless steel columns with quadrangular and circular cross-sections when submitted to high temperatures and axial compression.

This numerical analysis was performed using the finite element program SAFIR, with the purpose of evaluating the influence of the steel type, the cross-section classification and the type of cross-section of the tubular elements subject to high temperatures.

Finally, these numerical results are compared with the EC3 methodology and with other proposals. This analysis on the accuracy of the different proposals was also performed statistically.

Índice Geral

Índice de Figuras	XVII
Índice de Tabelas	XXIII
Nomenclatura.....	XXV
Lista de acrónimos	XXVII
Capítulo 1. Introdução	3
1.1. Considerações gerais	3
1.2. Âmbito e objetivos	5
1.3. Estrutura da dissertação	6
Capítulo 2. O aço inoxidável	9
2.1. Considerações gerais	9
2.2. Aplicações estruturais	11
2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas	13
Capítulo 3. Cálculo estrutural para colunas de aço inoxidável	21
3.1. Instabilidade de elementos comprimidos.....	21
3.1.1. Considerações gerais.....	21
3.1.2. Encurvadura por Flexão.....	21
3.1.3. Encurvadura Local.....	22
3.2. Regras de cálculo para colunas em aço inoxidável sujeitos a compressão axial em situação de incêndio	24
3.2.1. Considerações Gerais.....	24
3.2.2. Classificação das secções.....	25
3.2.3. Resistência da secção.....	27
3.2.4. Resistência do elemento.....	28
3.3. Outras Propostas.....	31
3.3.1. Proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I de classe 1 e 2	32
3.3.2. Proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng	33
Capítulo 4. Modelação Numérica	37
4.1. Considerações gerais	37
4.2. Descrição geral do programa SAFIR	37
4.3. Casos de estudo	39
4.4. Restrições, cargas, malha.....	41
4.4.1. Elementos.....	41
4.4.2. Cálculo da resistência numérica da secção de classe 4.....	45
4.5. Imperfeições	46

4.5.1. Imperfeições geométricas.....	46
4.5.2. Tensões residuais	52
4.5.3. Tensões de canto melhoradas.....	55
Capítulo 5. Estudo Paramétrico	63
5.1. Considerações gerais	63
5.2. Análise de sensibilidade.....	64
5.2.1. Influência das imperfeições.....	64
5.2.2. Influência das tensões residuais.....	66
5.2.3. Influência das tensões de canto melhoradas.....	67
5.3. Análise da precisão das propostas de cálculo	68
5.4. Avaliação estatística das propostas de cálculo	78
5.4.1. Análise do EC3.....	79
5.4.2. Análise da proposta da UA.....	83
5.4.3. Análise da proposta de Gardner e Ng	87
Capítulo 6. Considerações finais.....	95
6.1. Conclusões.....	95
6.2. Desenvolvimentos futuros	97
Referências Bibliográficas	101
Anexos	109
A. Restantes resultados	109

Índice de Figuras

Capítulo 1. Introdução

Figura 1.1 - Comportamento à flexão das secções (adaptado de Simões da Silva *et al.*, 2010). 4

Capítulo 2. O aço inoxidável

Figura 2.1 - Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000). 9

Figura 2.2 - Curva experimental típica para aços inoxidáveis e aço carbono em condições de temperatura normal (adaptado de Euro Inox, 2006). 10

Figura 2.3 - Edifício residencial em aço inoxidável, Finlândia (Euro Inox, 2002): a) Fase Final; b) Fase de construção. 12

Figura 2.4 - Estádio de Sain Nicola, Itália (Euro Inox, 2005): a) Vista geral da cobertura; b) Ligação entre aço inoxidável e aço carbono; c) Pormenor dos tubulares da cobertura. 12

Figura 2.5 - Sanomatalo Building, Finlândia (Miettinen, 2002): a) Vista exterior; b) Vista Interior. 13

Figura 2.6 - Fatores de redução da tensão de cedência a altas temperaturas (Lopes e Vila Real, 2013; CEN, 2005b). 14

Figura 2.7 - Comparação do $k_{E,\theta}$ entre o aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b). 14

Figura 2.8 - Relação tensão-extensão para o aço inoxidável sujeito a altas temperaturas (CEN, 2005b)... 15

Figura 2.9 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301: a) 20°C (adaptado de Lopes, 2009; CEN, 2005b); b) 600°C (adaptado de Lopes, 2012; CEN, 2005b). 16

Capítulo 3. Cálculo estrutural para colunas de aço inoxidável

Figura 3.1 - Coluna sujeita à carga P e respetiva deformação lateral (encurvadura). 22

Figura 3.2 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010). 23

Figura 3.3 - Conceito de largura efetiva (Simões da Silva e Gervásio, 2007). 23

Figura 3.4 - Coluna tubular metálica sujeita a uma carga axial P (Baptista, 2014). 24

Figura 3.5 - Redução do fator para determinar a classe da secção transversal a elevadas temperaturas (adaptado de Lopes, 2009). 26

Figura 3.6 - Representação gráfica das curvas de encurvadura para os três tipos de aço em estudo. 29

Figura 3.7 - Variação do valor $\left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0.5}$ das cinco classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura. 30

Figura 3.8 - Variação do valor $\left[\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0.5}$ das cinco classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura. 31

Figura 3.9 - Representação gráfica das curvas de encurvadura para os três tipos de propostas em estudo. 34

Capítulo 4. Modelação numérica

Figura 4.1 - Elemento finito de casca (Lopes, 2009). 39

Figura 4.2 - Pormenor da malha do canto da secção transversal quadrangular. 42

Figura 4.3 - Pormenor da malha da secção transversal circular. 42

Figura 4.4 - Modelo numérico com as restrições utilizadas para SHS.	43
Figura 4.5 - Modelo numérico com as restrições utilizadas para CHS.....	44
Figura 4.6 - Representação das fixações consideradas para o cálculo do $N_{c,rd}$ da SHS 200x200x10: a) ao longo do comprimento; b) na secção transversal.	45
Figura 4.7 - Representação das fixações consideradas para o cálculo do $N_{c,rd}$ da CHS 244.5x8: a) ao longo do comprimento; b) na secção transversal.	46
Figura 4.8 - Tolerância das imperfeições globais (adaptado de CEN, 2011).....	47
Figura 4.9 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal SHS 200x200x10: a) ao longo do comprimento; b) vista de topo.....	48
Figura 4.10 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal CHS 244.5x10.	49
Figura 4.11 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal CHS 244.5x10 ao longo do comprimento: a) vista de topo; b) vista lateral.	50
Figura 4.12 - Imperfeições geométricas ampliadas introduzidas nos colunas SHS 200x200x10: a) só imperfeições locais; b) só imperfeições globais; c) imperfeições globais e locais.	51
Figura 4.13 - Imperfeições geométricas ampliadas introduzidas nos colunas CHS 244.5x10: a) só imperfeições locais; b) só imperfeições globais; c) imperfeições globais e locais.	51
Figura 4.14 - Distribuição de tensões residuais em SHS 200x200x10: a) tensões residuais de membrana; b) tensões residuais de flexão.	53
Figura 4.15 - Representação da proposta de distribuição das tensões residuais de flexão.	53
Figura 4.16 - Representação da proposta de distribuição de tensões residuais de membrana.	54
Figura 4.17 - Definição da geometria e da posição dos eixos locais.	54
Figura 4.18 - Processo de fabrico de tubulares: a) a frio; b) a quente (Steel construction products, 2014).	56
Figura 4.19 - Região do canto (Ashraf <i>et al</i> , 2005).	57
Figura 4.20 - Influência da resistência dos cantos na resistência final do elemento (adaptado de Lopes e Vila Real, 2014).	58
Figura 4.21 - Representação da resistência dos cantos da secção SHS 200x200x10.	59

Capítulo 5. Estudo paramétrico

Figura 5.1 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções quadrangulares de classe 1.	65
Figura 5.2 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções quadrangulares de classe 4.	65
Figura 5.3 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções circulares de classe 1.	65
Figura 5.4 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções circulares de classe 4.	66
Figura 5.5 - Influência das tensões residuais em colunas axialmente comprimido com secção de classe 1: a) com tensões de canto melhoradas; b) sem tensões de canto melhoradas.	66
Figura 5.6 - Influência das tensões residuais em colunas axialmente comprimido com secção de classe 4: a) com tensões de canto melhoradas; b) sem tensões de canto melhoradas.	67
Figura 5.7 - Influência da tensão de cantos em colunas axialmente comprimido com secção de classe 1.	68

Figura 5.8 - Influência da tensão de cantos em colunas axialmente comprimido com secção de classe 4.	68
Figura 5.9 - Instante da carga última para uma coluna de secção transversal quadrangular e aço inoxidável 1.4462 com 3 metros de vão.....	69
Figura 5.10 - Instante da carga última para uma coluna de secção transversal circular e aço inoxidável 1.4462 com 3 metros de vão.....	70
Figura 5.11 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	71
Figura 5.12 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	71
Figura 5.13 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	72
Figura 5.14 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	72
Figura 5.15 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	73
Figura 5.16 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	73
Figura 5.17 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	74
Figura 5.18 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	75
Figura 5.19 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	75
Figura 5.20 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	76
Figura 5.21 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	76
Figura 5.22 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	77
Figura 5.23 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	78
Figura 5.24 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	78
Figura 5.25 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangulares e aço austenítico (1.4301).	80
Figura 5.26 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).	81
Figura 5.27 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	81

Figura 5.28 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).	82
Figura 5.29 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).	83
Figura 5.30 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	83
Figura 5.31 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico (1.4301).	84
Figura 5.32 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).	85
Figura 5.33 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	85
Figura 5.34 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).	86
Figura 5.35 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).	87
Figura 5.36 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	87
Figura 5.37 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico (1.4301).	88
Figura 5.38 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).	89
Figura 5.39 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	89
Figura 5.40 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).	90
Figura 5.41 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).	91
Figura 5.42 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).	91

Anexos

Figura A.1 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	110
Figura A.2 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	110
Figura A.3 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	111
Figura A.4 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	111

Figura A.5 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	112
Figura A.6 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	112
Figura A.7 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	113
Figura A.8 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	113
Figura A.9 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	114
Figura A.10 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).	114
Figura A.11 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	115
Figura A.12 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	115
Figura A.13 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	116
Figura A.14 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	116
Figura A.15 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	117
Figura A.16 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	117
Figura A.17 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	118
Figura A.18 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	118
Figura A.19 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	119
Figura A.20 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).	119
Figura A.21 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	120
Figura A.22 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	120
Figura A.23 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).	121

Figura A.24 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	121
Figura A.25 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	122
Figura A.26 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	122
Figura A.27 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	123
Figura A.28 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	123
Figura A.29 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	124
Figura A.30 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).....	124

Índice de Tabelas

Capítulo 2. O aço inoxidável

Tabela 2.1 - Valores nominais da tensão de cedência f_y , tensão última f_u e modulo de elasticidade E para aço inoxidável estrutural (adaptado da CEN, 2006a).	11
---	----

Capítulo 3. Cálculo estrutural para colunas de aço inoxidável

Tabela 3.1 - Fator de redução ϵ	25
--	----

Capítulo 4. Modelação numérica

Tabela 4.1 - Propostas de secções transversais para os diferentes grupos de aço inoxidável (secções quadrangulares e circulares).	40
Tabela 4.2 - Tolerância para secções quadrangulares e retangulares (adaptado de EN10219-2) (CEN, 2011).	47
Tabela 4.3 - Tolerância para secções circulares (adaptado de EN10219-2) (CEN, 2011).	49
Tabela 4.4 - Valores das tensões residuais consideradas (Scifo, 2013).	53
Tabela 4.5 - Valores para os diferentes aços da tensão de cedência (f_y) e da tensão última (f_u).	58

Capítulo 5. Estudo paramétrico

Tabela 5.1 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados do proposto no EC3 e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrangular.	80
Tabela 5.2 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados do proposto no EC3 e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.	82
Tabela 5.3 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta da UA e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrada.	84
Tabela 5.4 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta da UA e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.	86
Tabela 5.5 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrada.	88
Tabela 5.6 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.	90

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

A	área da secção transversal;
A_{eff}	área efetiva da secção transversal;
E	módulo de elasticidade longitudinal do aço;
E_a	módulo de elasticidade longitudinal do aço à temperatura normal;
$E_{a,\theta}$	declive que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a ;
$E_{ct,\theta}$	declive que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a ;
I	momento de inércia;
L	comprimento do elemento;
M	valor do momento atuante;
M_{el}	valor de cálculo do momento fletor elástico;
M_{pl}	valor de cálculo do momento fletor plástico;
$N_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura de um elemento, em situação de incêndio, no instante t ;
N_{cr}	valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástica considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta;
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão de uma secção transversal;
$N_{fi,d}$	valor de cálculo do esforço axial atuante;
$N_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente no instante t para uma distribuição de temperatura não uniforme ao longo da secção transversal;
$N_{fi,\theta,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente para uma temperatura uniforme θ_a ;
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente da secção transversal para temperatura ambiente de acordo com EN 1993-1-1;
N_{Rd}	valor de cálculo do esforço axial resistente da secção transversal;
$N_{ult,i}^{Analítico}$	valor analítico do esforço axial;
$N_{ult,i}^{SAFIR}$	valor do esforço axial último obtido através da simulação i do SAFIR.

Letras minúsculas latinas

b	largura da secção transversal;
c_a	calor específico do aço;
d	diâmetro externo da secção transversal circular;
$f_{0,2p,\theta}$	tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C;
f_u	tensão última do aço;
$f_{u,\theta}$	tensão última do aço a temperaturas elevadas θ_a ;
f_y	tensão de cedência do aço a 20 °C;
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas θ_a ;

h	altura da secção transversal;
$k_{0,2p,\theta}$	fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções de Classe 4;
$k_{2,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t ;
$k_{y,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t ;
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t ;
t	espessura da secção transversal;
x_i	quociente entre o $N_{ult,i}^{Analítico}$ e o $N_{ult,i}^{SAFIR}$.

Caracteres do alfabeto grego

α	fator de imperfeição;
χ_i	fator de redução associado à encurvadura para o eixo i ;
χ_{fi}	fator de redução associado à encurvadura por flexão na situação de incêndio;
$\chi_{min,fi}$	valor mínimo entre $\chi_{y,fi}$ e $\chi_{z,fi}$;
$\chi_{y,fi}$	fator de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo y-y;
$\chi_{z,fi}$	fator de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo z-z;
\mathcal{E}_θ	extensão a altas temperaturas;
\mathcal{E}	extensão; fator que dependo do f_y ;
$\mathcal{E}_{c,\theta}$	extensão total associado à tensão limite convencional de proporcionalidade;
$\mathcal{E}_{u,\theta}$	extensão associado a tensão última de cedência;
$\sigma_{0,2c}$	tensão limite de proporcionalidade do material dos cantos;
$\sigma_{0,2v}$	tensão limite de proporcionalidade do material da secção;
σ_{uc}	tensão última do material dos cantos;
σ_{uv}	tensão última do material da secção;
Φ_θ	coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução associado à encurvadura por flexão em situação de incêndio;
$\gamma_{M,fi}$	coeficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura em situação de incêndio;
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada à temperatura ambiente;
$\bar{\lambda}_\theta$	esbelteza normalizada em situação de incêndio;
θ	temperatura;
θ_a	temperatura do aço.

Lista de acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
CHC	Circular hollow section (secção transversal circular)
EC3	Eurocódigo 3
EN	Norma Europeia
EN 1993-1-1	Parte 1-1 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-2	Parte 1-2 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-4	Parte 1-4 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-5	Parte 1-5 do Eurocódigo 3
SAFIR	Safety Fire Resistance
SHS	Square hollow section (secção transversal quadrada)

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1. Introdução

- 1.1. Considerações gerais
- 1.2. Âmbitos e objetivos
- 1.3. Estrutura da dissertação

Capítulo 1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A utilização do aço inoxidável para fins estruturais e de construção tem vindo a aumentar (Gardner, 2005). O número elevado de características desejáveis que este possui para a sua utilização estrutural, o seu carácter durável, a sua excelência estética e a sua fácil manutenção, são alguns dos principais motivos para esta crescente utilização. Embora o investimento inicial seja mais elevado em comparação ao da aplicação do aço de carbono, os aços podem ser mais competitivos, uma vez que possuem um baixo custo de ciclo de vida, contribuindo para a construção mais sustentável (Euro Inox, 2006). No entanto, o comportamento destas estruturas e o seu dimensionamento em situação de incêndio são ainda pouco conhecidos.

Dentro das diferentes classes de aços inoxidáveis o austenítico é aquele que mais se utiliza para aplicações estruturais devido essencialmente às suas boas propriedades de fabrico, no entanto, recentemente tem vindo a aumentar o interesse pelo uso de aços ferríticos e duplex (austenítico-ferrítico) para fins estruturais devido, no caso dos ferríticos, ao seu custo inferior e ao facto de manterem uma boa resistência mecânica e à corrosão e no caso dos duplex à sua alta resistência mecânica e ao desgaste (Gamelas, 2014). Os aços austeníticos, para além das características descritas em cima, apresentam uma ductilidade superior aos aços ferríticos ou até mesmo aos aços duplex, permitindo que este tipo de aço possa absorver grandes impactos sem fraturar.

A classificação da secção transversal de um elemento estrutural traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciados por fenómenos de encurvadura (Simões da Silva *et al.*, 2010). O comportamento (elástico ou plástico) de uma secção pode variar mediante a sua esbelteza, na medida em que quanto maior a sua esbelteza, maior a probabilidade de não existir plastificação devido a fenómenos de encurvadura local.

Na presente dissertação serão tratadas secções de 3 das 4 classes existentes, a classe 1 permitindo a formação de rótulas plásticas, classe 3 atingindo a tensão de cedência mas não formando rótula plástica devido ao efeito da encurvadura local e finalmente classe 4, onde os fenómenos de instabilidade local impedem que se desenvolva toda a capacidade elástica

resistente da secção em causa (CEN, 2005a). A Figura 1.1 demonstra o comportamento à flexão das 4 classes existentes.

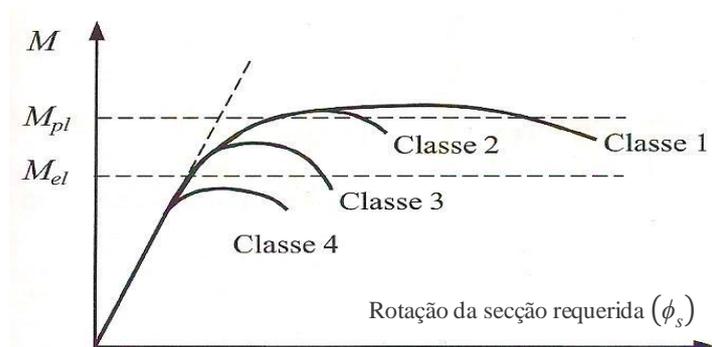


Figura 1.1 - Comportamento à flexão das secções (adaptado de Simões da Silva *et al.*, 2010).

São comumente utilizadas secções de classe 4 em edifícios com estrutura em aço inoxidável. Este facto torna estes perfis de paredes finas muito suscetíveis à ocorrência de rotura por encurvadura local e de flexão (Lopes e Vila Real, 2014).

Nestes tipos de secções tubulares deve-se ter especial atenção à sua forma, uma vez que estes exibem características específicas que afetam diretamente a resistência final do elemento correspondente, como o aumento da resistência dos cantos durante o fabrico a frio de secções retangulares e quadrangulares (Lopes e Vila Real, 2014).

A Parte 1-4 do Eurocódigo 3, EN 1993-1-4 (CEN, 2006a), refere-se às regras de cálculo estrutural para elementos estruturais em aço inoxidável à temperatura normal. Para a análise da resistência ao fogo esta parte remete-nos para a Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo, EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), onde é descrito que elementos estruturais feitos de aço inoxidável devem ser verificados usando as mesmas fórmulas desenvolvidas para secções em I de aço carbono. Ainda assim, estes dois materiais têm diferentes leis constitutivas em situação de incêndio (assim como à temperatura normal), descritas no Anexo C da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), e como referido anteriormente a forma da secção terá influência na capacidade resistente destes elementos.

O comportamento do aço, em geral, apresenta um fraco desempenho quando sujeito a altas temperaturas (Vila Real, 2003) já que este possui uma condutividade térmica elevada. Esta característica permite a rápida propagação da temperatura, degradando as suas propriedades mecânicas surgindo por isso, o interesse no estudo do comportamento de elementos de aço em caso de incêndio. Vários estudos têm sido feitos em estruturas de aço inoxidável

resultando em diferentes novas propostas, muitos deles baseados em elementos com secções em I de classe 1 e 2 (compactas) (Lopes e Vila Real, 2014).

Recentemente foi desenvolvido um estudo em colunas de aço inoxidável com secções transversais I das classes 1 e 2, que resultou na proposta de formulações específicas para o dimensionamento destes colunas mantendo a filosofia do EC3 (Lopes et al, 2010). Estas fórmulas resultam da conclusão de que a conceção originalmente desenvolvida para elementos em aço carbono e presente na Parte 1-2 do EC3 não são seguras quando ocorre a encurvadura por flexão (segundo o eixo forte ou fraco) em perfis em I sujeitos a altas temperaturas. Ainda demonstrado neste estudo está que à semelhança do que acontece na Parte 1-4 do EC3 as curvas de encurvadura devem variar consoante o eixo segundo o qual se dá a encurvadura.

A encurvadura por flexão em colunas de aço carbono em situação de incêndio foi estudada por Franssen *et al.* (1996), resultando na proposta da expressão adotada na Parte 1-2 do EC3 que é também aplicada em colunas de aço inoxidável.

Para além do referido anteriormente, existem ainda inúmeros estudos desenvolvidos por Euro Inox (2006), Ng e Gardner (2007) e Uppfeld *et al.*(2008) que resultaram em diferentes propostas de dimensionamento de colunas em aço inoxidável em situação de incêndio.

Para este estudo vão ser considerados vários tipos de aço inoxidável, representando diferentes classes de aço de acordo com a sua estrutura metalúrgica (austenítico, ferrítico e austenítico-ferrítico), assim como diferentes secções.

A simulação de todas estas variantes foi feita recorrendo a uma análise numérica através do *software* SAFIR, criado e desenvolvido na Universidade de Liège (Franssen, 2005), aplicando análises não lineares para o estudo do comportamento destes elementos. Finalmente foram feitas comparações entre os resultados numéricos e os obtidos por diferentes metodologias de cálculo incluindo os previstos no EC3.

1.2. Âmbito e objetivos

O uso de elementos estruturais em aço inoxidável está muito relacionado com a aparência estética devido à sua associação a soluções leves. O seu preço inicial elevado tem feito com que o seu uso se limite a projetos com grande valor arquitetónico mas, de facto, o aço

inoxidável possui várias características desejáveis quando se fala de um material estrutural como a resistência à corrosão e ao fogo.

O principal objetivo desta dissertação será o de realizar um estudo numérico, com o auxílio do programa SAFIR, do comportamento ao fogo de colunas axialmente comprimidas em aço inoxidável com secções tubulares, quadrangulares e circulares, de classe 1, 3 e 4. Com esses resultados far-se-ão comparações com a metodologia prevista pelo EC3 assim como com outras propostas.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em seis capítulos. Após um primeiro capítulo de descrição e enquadramento da dissertação bem como definição dos objetivos e organização do trabalho, segue-se um segundo capítulo onde é feita uma apresentação do aço inoxidável, exibindo alguns exemplos de aplicações estruturais bem como descrevendo o seu comportamento mecânico.

O terceiro capítulo é destinado à explicação do cálculo estrutural segundo o Eurocódigo 3, desde a resistência da secção até à determinação do esforço axial resistente do elemento incluindo ainda a formulação das restantes propostas em estudo.

O quarto capítulo é dedicado à modelação numérica onde é feita uma breve descrição do programa de elementos finitos utilizado (SAFIR), são apresentados os casos de estudo e é feita uma definição do modelo numérico utilizado, descrevendo todos os procedimentos adotados relativos a restrições, cargas, malhas, imperfeições geométricas, tensões de canto e residuais.

No capítulo 5 é feita uma análise de sensibilidades de maneira a estudar a influência que cada um dos parâmetros tem no elemento e é apresentado um estudo paramétrico, onde é feita a discussão dos resultados baseados na classe de aço, na classe e tipo de secção transversal e nas diferentes temperaturas em análise. Finalmente e ainda neste capítulo foi elaborada uma análise estatística dos resultados obtidos.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões da dissertação e são descritos os trabalhos a serem desenvolvidos futuramente que complementarão este estudo.

Capítulo 2

O aço inoxidável

Capítulo 2. O aço inoxidável

- 2.1. Considerações gerais
- 2.2. Aplicações estruturais
- 2.3. Comportamento mecânico aço inoxidável a altas temperaturas

Capítulo 2. O aço inoxidável

2.1. Considerações gerais

Existem diferentes tipos de aço inoxidável que se dividem em cinco grupos classificados de acordo com a sua estrutura metalúrgica: austenítico, ferrítico, martensítico, duplex (austenítico-ferrítico) e os endurecidos por precipitação (Figura 2.1). Nem todos eles são adequados para uso estrutural, particularmente quando estão contempladas ligações soldadas. Os austeníticos e os duplex são os mais úteis para aplicações estruturais (Euro Inox, 2006).

A diferença entre estes tipos de aço reside na sua composição química, onde a percentagem de níquel é preponderante relativamente aos restantes compostos presentes no aço. De notar que os aços do grupo austenítico são aqueles que apresentam maior percentagem e os do grupo ferrítico menor (Gamelas, 2014). Tipicamente estas percentagens de níquel variam entre os 8 a 13% e refletem-se no preço final do aço (Lopes, 2009).

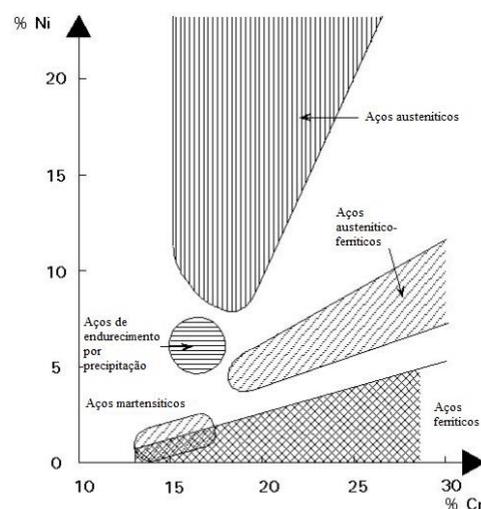


Figura 2.1 - Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).

Dentro dos grupos acima descritos podemos classificar o aço inoxidável segundo diferentes tipologias, sendo as mais utilizadas as referentes ao grupo dos aços austeníticos, designados por 1.4301 (ou 304) e 1.4401 (ou 316). Devido à sua composição química diferente a sua utilização difere consoante o efeito que se pretende. O uso frequente em aplicações estruturais deste tipo específico de aço (austenítico) pode ser explicado pela boa combinação

entre resistência à corrosão (principalmente quando sujeito a ambientes mais agressivos) e às cargas que este apresenta.

Sendo este material bastante resistente à corrosão quando sujeito a ambientes mais agressivos (Palacios, 2005) este tem sido utilizado em estruturas localizadas à beira mar, instalações nucleares, químicas, petrolíferas e de águas residuais. Esta resistência resulta do facto de este material conter na sua base uma camada superficial de óxido, rica em crómio, que se forma espontaneamente na presença do ar (oxigénio) e que quando é danificada (se risca ou corta) se regenera imediatamente.

O ferrítico apresenta a vantagem de ter na sua composição química menos percentagem de níquel, o que diminui o seu custo inicial, mantendo a sua boa resistência à corrosão assim como a sua resistência estrutural. O duplex apresenta uma elevada resistência às cargas e uma boa resistência à corrosão e ao desgaste. Embora o austenítico seja vulgarmente mais utilizado, tem havido um aumento na procura dos outros dois tipos.

As ligas de aço inoxidável são caracterizadas pela sua relação tensão-extensão não linear com uma zona de tensão linear curta e um extenso patamar de plastificação, contrariamente ao aço carbono (Lopes, 2009).

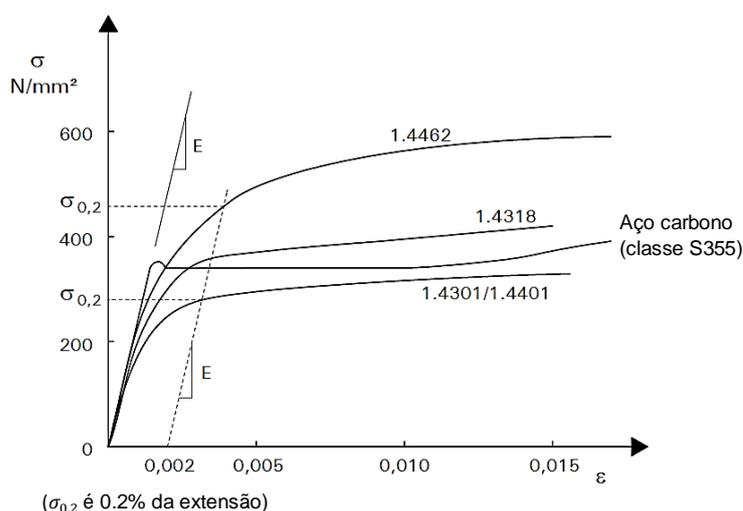


Figura 2.2 - Curva experimental típica para aços inoxidáveis e aço carbono em condições de temperatura normal (adaptado de Euro Inox, 2006).

Para o aço inoxidável não existe uma tensão de cedência bem definida pelo que geralmente é usado o valor correspondente a uma deformação residual de 0.2% (limite convencional de elasticidade) (Figura 2.2) (Lopes, 2009).

A EN 1993-1-4 (CEN, 2006a) menciona apenas a resistência de elementos em aço inoxidável referindo-se à parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) quando se tratam de altas temperaturas. Numa situação de incêndio, devido à sua natureza acidental, são aceitáveis deformações mais elevadas do que aquelas consideradas à temperatura normal, assim a EN 1993-1-2 sugere o uso de 2% da extensão total como a tensão de cedência a elevadas temperaturas θ_a , sendo $f_{y,\theta} = f_{2\%,\theta}$ para secções de classe 1, 2 e 3 e $f_{y,\theta} = f_{0,2p,\theta}$ para secções de Classe 4 (Anexo E da EN 1993-1-2).

Os valores característicos da tensão de cedência f_y , da tensão última f_u e do módulo de elasticidade E à temperatura normal, considerados ao longo desta dissertação, encontram-se indicados na Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a) e são sumariamente representados na Tabela 2.1 da presente dissertação.

Tabela 2.1 - Valores nominais da tensão de cedência f_y , tensão última f_u e módulo de elasticidade E para aço inoxidável estrutural (adaptado da CEN, 2006a).

Tipo	Classe	Tensão de cedência f_y (MPa)		Tensão última de cedência f_u (MPa)		Módulo de elasticidade E (Gpa)
		$t \leq 12$ mm	$t \leq 75$ mm	$t \leq 12$ mm	$t \leq 75$ mm	
Ferrítico	1.4003	280	250	450		220
	1.4301		210		520	200
Austenítico	1.4401		220	530	520	200
	1.4404		220	530	520	200
	1.4571		220	540	520	200
Austenítico-ferrítico	1.4462		460	600	640	200

2.2. Aplicações estruturais

Devido ao elevado investimento inicial do aço inoxidável, não é normal o uso desse tipo de material em estruturas mais correntes, no entanto existem atualmente alguns exemplos de habitações concebidos com este material. Com maior regularidade é aplicado em espaços públicos, pontes, reabilitação, são inúmeras as estruturas existentes que usam o aço

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

inoxidável na sua constituição, aproveitando as vantagens que este material tem relativamente ao aço carbono.

Na Figura 2.3 apresenta-se um exemplo de uma habitação construída apenas com elementos estruturais em aço inoxidável desde a fase de construção até ao seu resultado final (Euro Inox, 2002). De notar que a grande maioria da parte estrutural desta habitação foi realizada em perfis tubulares.



a)



b)

Figura 2.3 - Edifício residencial em aço inoxidável, Finlândia (Euro Inox, 2002): a) Fase Final; b) Fase de construção.

No caso específico de secções tubulares, encontra-se representado na Figura 2.4 a estrutura da cobertura de um estádio que usa perfis tubulares em aço inoxidável para o suporte da cobertura em fibra de vidro (Euro Inox, 2005). Mostra ainda a união entre o aço carbono, pintado de branco, e o aço inoxidável.



a)



b)



c)

Figura 2.4 - Estádio de Sain Nicola, Itália (Euro Inox, 2005): a) Vista geral da cobertura; b) Ligação entre aço inoxidável e aço carbono; c) Pormenor dos tubulares da cobertura.

Finalizando também com estruturas de grande porte é visivelmente notável o uso de elementos estruturais de aço inoxidável no edifício da Figura 2.5 com um elevado número de andares (Miettinen, 2002). Aqui, os perfis soldados em aço inoxidável garantem o suporte de todos os vãos envidraçados que compõem as fachadas.



a)



b)

Figura 2.5 - Sanomatalo Building, Finlândia (Miettinen, 2002): a) Vista exterior; b) Vista Interior.

2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas

Quando sujeito a altas temperaturas o aço inoxidável, à semelhança do carbono, sofre uma variação significativa das suas propriedades mecânicas. Com o aumento da temperatura verificam-se reduções da tensão de cedência e do módulo de elasticidade linear (CEN, 2005b). No caso do aço inoxidável, estas reduções são diferentes para cada tipo de aço dentro do mesmo grupo (Lopes, 2009).

As diferentes propriedades dos aços são afetadas de fatores de redução que vão diminuindo o seu valor com o aumento da temperatura.

Tendo em conta a Figura 2.6, facilmente se observa que o fator de redução correspondente à tensão limite de proporcionalidade ($k_{0,2p,\theta}$) e de tensão de cedência correspondente à extensão total de 2% ($k_{2,\theta}$) para os diferentes aços vai sofrendo uma gradual redução à medida do aumento da temperatura. É possível ainda constatar que a variação deste fator com a temperatura para o aço da classe 1.4003 (o único tipo de aço ferrítico que se refere a Parte 1-2 do EC3) é diferente das restantes classes. Este facto sugere que o tipo de aço inoxidável deve ser tido em conta no dimensionamento e elementos estruturais neste material (Lopes e Vila Real, 2013).

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

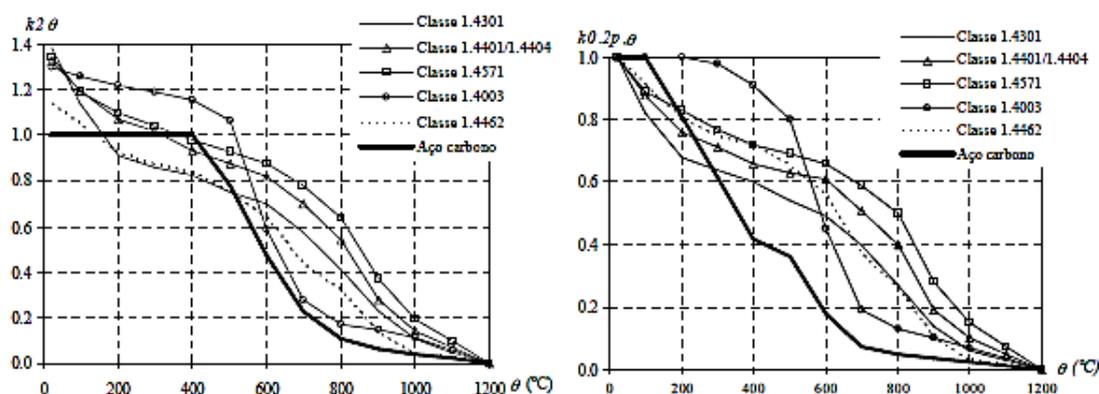


Figura 2.6 - Fatores de redução da tensão de cedência a altas temperaturas (Lopes e Vila Real, 2013; CEN, 2005b).

A variação do fator de redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) com a temperatura está representada na Figura 2.7. Existe uma clara melhoria no comportamento mecânico, no que diz respeito ao módulo de elasticidade, por parte do aço inoxidável a altas temperaturas comparativamente ao aço carbono.

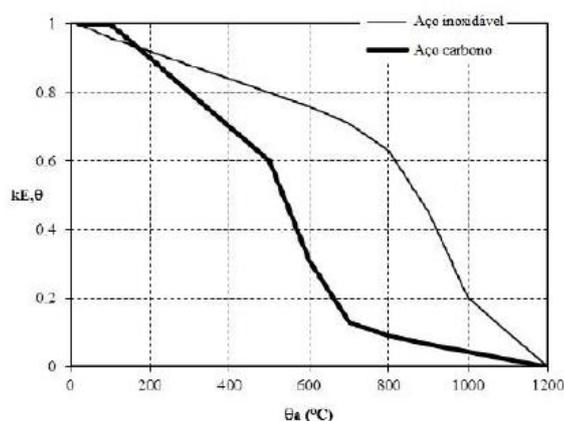


Figura 2.7 - Comparação do $k_{E,\theta}$ entre o aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b).

Para além destes dois, as tabelas C.1 e C.2 do Anexo C da Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) dão os valores do fator de redução para as diferentes classes de aço inoxidável a diferentes temperaturas.

O comportamento deste material é conhecido por possuir relações tensão-extensão sempre não-lineares (Lopes e Vila Real, 2013). Na relação tensão-deformação proposta na Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) podem-se distinguir duas zonas: a primeira quase linear até ao limite de proporcionalidade ($f_{0,2p,\theta}$), e a segunda uma curva que acaba quando é atingida a tensão última ($f_{u,\theta}$). $E_{a,\theta}$ corresponde à inclinação da reta que representa o domínio elástico, $E_{ct,\theta}$

representa a inclinação da lei na tensão limite convencional de proporcionalidade, $\epsilon_{c,\theta}$ é a extensão total na tensão limite convencional de proporcionalidade e a $\epsilon_{u,\theta}$ determina a extensão última (Figura 2.8) (Gamelas, 2014).

De realçar que a tensão de cedência não está bem definida, pois o gráfico representativo da lei constitutiva do material é sempre não linear (Gamelas, 2014).

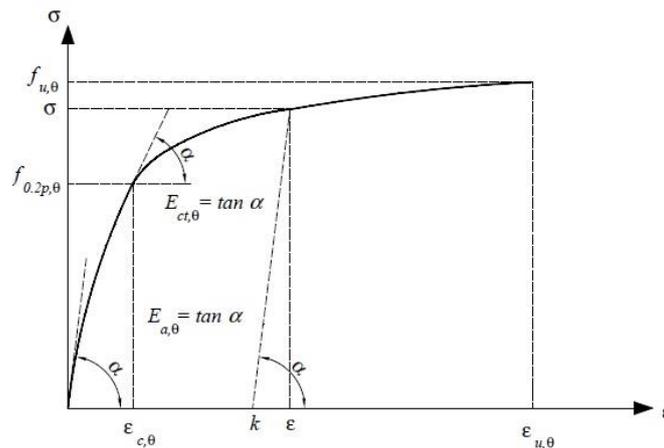


Figura 2.8 - Relação tensão-extensão para o aço inoxidável sujeito a altas temperaturas (CEN, 2005b).

Esta relação de tensão-deformação pode ser usada para a determinação da tensão, compressão, flexão ou resistência ao corte de elementos em aço inoxidável quando sujeitos a altas temperaturas (Lopes, 2009).

A Figura 2.9a compara as leis dos aços inoxidável 1.4301 ($f_y = 210\text{MPa}$) e carbono S235 ($f_y = 235\text{MPa}$), de acordo com as EN 1993-1-1 e a EN 1993-1-4, onde se pode identificar a consideração do endurecimento no aço inoxidável.

Observa-se que mesmo a tensão de cedência sendo maior no aço carbono não é suficiente para um melhor comportamento deste. Tal se sucede devido ao aço carbono S235 possuir uma plastificação sem endurecimento, enquanto o aço inoxidável 1.4301 possui uma plastificação com endurecimento (Gamelas, 2014).

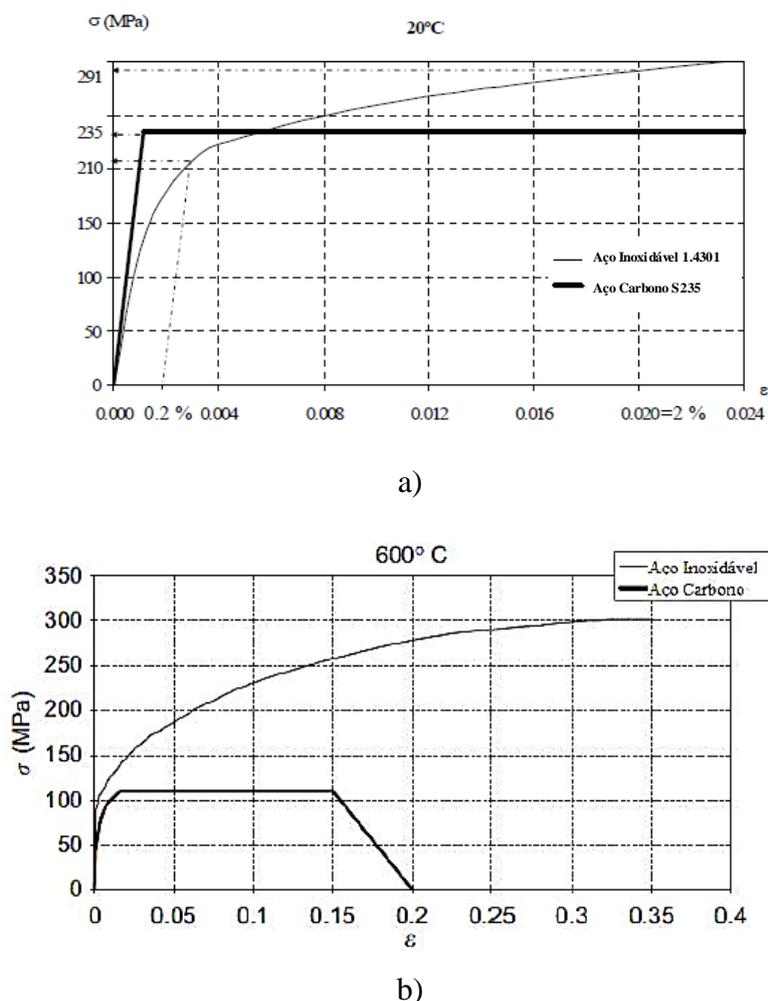


Figura 2.9 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301: a) 20°C (adaptado de Lopes, 2009; CEN, 2005b); b) 600°C (adaptado de Lopes, 2012; CEN, 2005b).

Estudos recentes avaliaram as leis constitutivas do aço carbono e inoxidável a altas temperaturas e propuseram fórmulas diferentes (Gardner *et al*, 2010; Couto *et al*, 2013). No entanto, como esta dissertação tem como objetivo avaliar a metodologia do EC3, irão ser utilizadas as relações existentes no mesmo Eurocódigo no que se refere à variação de tensão-extensão (Gamelas, 2014).

Assim, de acordo com a fórmula da lei constitutiva dada pela Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) são comparadas na Figura 2.9b a relação tensão-extensão entre o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301 a 600°C (Lopes *et al*, 2012).

A análise da Figura 2.9b demonstra o diferente comportamento ao fogo entre os aços. O aço carbono apresenta um comportamento linear até atingir a tensão de cedência, seguindo-se uma zona de patamar até à tensão de endurecimento (CEN, 2005b). Devido à forma curva

do comportamento do aço inoxidável torna-se difícil perceber, à semelhança do seu comportamento à temperatura normal, onde se encontra a tensão de cedência comparativamente ao aço carbono. Para tal, a EN 1993-1-2 sugere que a tensão definida para o aço inoxidável seja determinada a partir de um limite de proporcionalidade definido para uma extensão de 0,2% para secções de classe 4 ($f_{y,\theta}=f_{0,2\text{proof},\theta}$) e uma tensão correspondente à extensão total de 2% para elementos de classe 1, 2 e 3 ($f_{y,\theta}=f_{2,\theta}$) (Lopes e Vila Real, 2013). Recentemente Couto *et al.* (2013) propõem que o valor limite da extensão para secções transversais de classe 4 seja de 2%.

Capítulo 3

*Cálculo estrutural para
colunas de aço inoxidável*

Capítulo 3. Cálculo estrutural para colunas de aço inoxidável

- 3.1. Instabilidade de elementos comprimidos
 - 3.1.1. Considerações gerais
 - 3.1.2. Encurvadura por flexão
 - 3.1.3. Encurvadura local
- 3.2. Regras de cálculo para colunas em aço inoxidável sujeitos a compressão axial em situação de incêndio
 - 3.2.1. Considerações gerais
 - 3.2.2. Classificação das secções
 - 3.2.3. Resistência da secção
 - 3.2.4. Resistência do elemento
- 3.3. Outras propostas
 - 3.3.1. Proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I de classe 1 e 2
 - 3.3.2. Proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng

Capítulo 3. Cálculo estrutural para colunas de aço inoxidável

3.1. Instabilidade de elementos comprimidos.

3.1.1. Considerações gerais

O uso de elementos de aço inoxidável com secções tubulares em estruturas de edifícios tem vindo a aumentar. O facto de serem maioritariamente elementos comprimidos torna estas estruturas especialmente suscetíveis a fenómenos de encurvadura.

Este conceito de estabilidade estrutural está estreitamente relacionado com a capacidade de um estrutura conseguir estabelecer uma posição de equilíbrio após a introdução de uma perturbação externa (força ou deslocamento) (Pinto, 2010).

Os fenómenos de instabilidade podem ser distinguidos entre global (barras) e local (placas) e a sua influência no comportamento estrutural de um elemento irá depender da sua geometria (comprimento do elementos, características da secção transversal, tipo de apoio).

Estes fenómenos são, em estruturas metálicas, habitualmente designados por encurvadura, e correspondem ao efeito geometricamente não linear nas zonas comprimidas (Baptista, 2014).

3.1.2. Encurvadura por Flexão

A encurvadura por flexão é um exemplo de um fenómeno de instabilidade global. Este caracteriza-se por uma deformação segundo o eixo longitudinal da barra, sendo que as secções transversais que constituem o perfil sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido (rotação e/ou translação) (Pinto, 2010).

Este fenómeno é facilmente compreendido quando se considera um elemento simplesmente apoiado sujeito a uma carga axial. À medida que esta carga P se aproxima da carga de colapso as deformações laterais começam a aumentar muito rapidamente (Figura 3.1) pelo que o colapso de colunas reais (colunas com imperfeições, e que por isso possuem um equilíbrio estável até à rotura) pode dar-se por dois modos distintos (Jacinto *et al.*, 2013).



Figura 3.1 - Coluna sujeita à carga P e respetiva deformação lateral (encurvadura).

Um dos colapsos dá-se pela perda de rigidez, isto é, a coluna deixa de suportar carga adicional devido à falta de rigidez provocada pelo aumento das deformações mesmo que não tenha ocorrido ainda a plastificação do material, ou seja a coluna permanece em regime elástico (Jacinto *et al.*, 2013).

Por outro lado, o facto de as deformações aumentarem, significa que os momentos fletores (associados à flexão lateral) vão também aumentar e, conseqüentemente a possibilidade de se atingirem as tensões de cedência nas fibras extremas, o que se traduz num acréscimo das deformações. Assim o colapso dá-se com a plastificação do material (Jacinto *et al.*, 2013).

3.1.3. Encurvadura Local

A encurvadura local das secções afeta os resultados da análise global de uma estrutura, devendo assim ser considerada no seu dimensionamento (CEN, 2006b).

Segundo Pinto (2010) o fenómeno de instabilidade local “*envolve deformações das paredes da barra, enquanto o seu eixo longitudinal permanece na configuração indeformada*”.

Este tipo de instabilidade ocorre em secções delgadas quando solicitadas por forças no seu plano e é por isso especialmente importante quando as secções a tratar são de classe 4 (Vila Real, 2010). Estas por possuírem uma esbelteza elevada necessitam na sua maioria de reforços (transversais ou longitudinais).

Para compreender melhor o conceito do fenómeno apresenta-se em seguida a situação de uma placa retangular comprimida e de uma coluna tubular esta última mais próxima ao caso em estudo.

Estas placas comprimidas axialmente (não reforçadas) foram estudadas por Bryan em 1891. Este estudou o fenómeno que ocorria numa placa retangular, com uma espessura t , simplesmente apoiada no seu contorno e submetida a uma tensão de compressão uniforme segundo a maior direcção (Figura 3.2) (Simões da Silva e Gervásio, 2007).

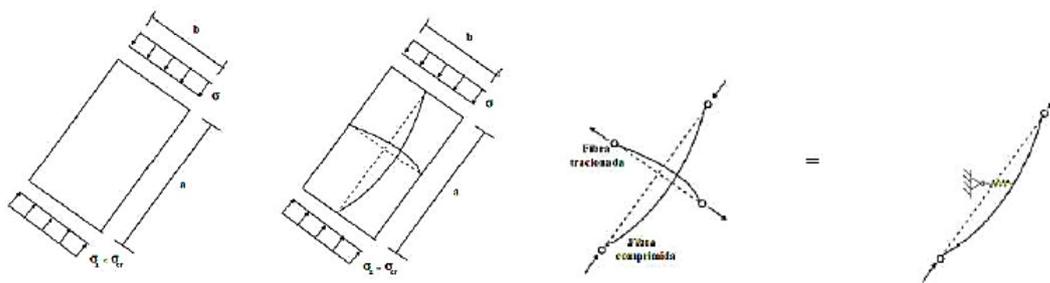


Figura 3.2 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010).

Na Figura 3.2 está representado o momento em que a tensão de compressão exercida na placa é maior ou igual à tensão crítica de encurvadura local (σ_{CR}). Esta tensão crítica é definida como a menor tensão capaz de manter a placa numa forma ligeiramente fletida. Para tensões menor que esta, a placa volta para a sua forma inicial (Vila Real, 2010). A partir do momento em que as tensões se igualam a placa fica sujeita à encurvadura local.

Von Karman estudou a avaliação da resistência última de uma placa comprimida uniaxialmente e constatou que a maior parte do carregamento é resistido pelas zonas contíguas aos bordos longitudinais da placa (Figura 3.3). Este estudo criou o conceito de largura efetiva representado na mesma figura (Simões da Silva e Gervásio, 2007).

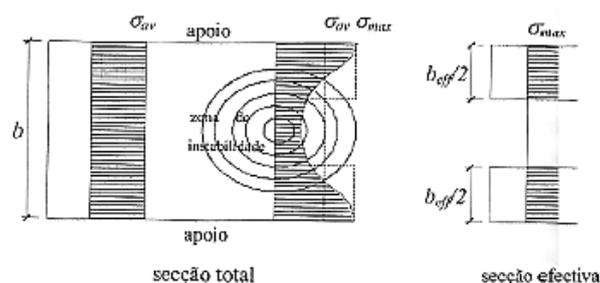


Figura 3.3 - Conceito de largura efetiva (Simões da Silva e Gervásio, 2007).

Segundo Karman, a largura efetiva é "a largura de uma placa fictícia sujeita a uma distribuição uniforme de tensões estaticamente equivalente à distribuição efetivamente instalada na placa real" (Simões da Silva e Gervásio, 2007).

Se se considerar uma coluna tubular metálica sujeita a uma carga axial P distribuída pelas paredes da coluna (Figura 3.4) estas estão submetidas a uma tensão uniforme, σ , de valor igual a P/A (sendo A a área da secção transversal). Quando a tensão aplicada atinge o valor crítico (σ_{CR}) as chapas que constituem a parede podem entrar em instabilidade, permanecendo, no entanto, as arestas retas ocorrendo assim o fenómeno designado por encurvadura local (Baptista, 2014).

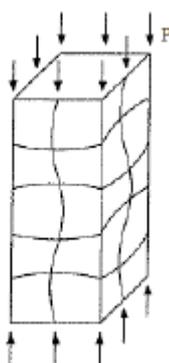


Figura 3.4 - Coluna tubular metálica sujeita a uma carga axial P (Baptista, 2014).

3.2. Regras de cálculo para colunas em aço inoxidável sujeitos a compressão axial em situação de incêndio

3.2.1. Considerações Gerais

Muitas propostas têm vindo a ser desenvolvidas por diferentes autores. Dentro destas está o estudo desenvolvido pelo *Design Manual for Structural Stainless Steel* (Euro Inox, 2006) que propõem o uso da tensão de cedência igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% para todas as classes. Ng e Gardner (Ng e Gardner, 2007) desenvolveram um estudo em que propõem que o fator de redução a utilizar seja o correspondente à tensão limite de proporcionalidade a 2% para a classe 1 e 2 e a 0,2% para as classes 3 e 4 (à temperatura ambiente).

Finalmente e com base num estudo realizado em colunas de secção I de classe 1 e 2, Lopes e Vila Real (Lopes e Vila Real, 2013) mantêm a opção proposta pelo EC3 e adotam para a

classe 1, 2 e 3 os valores correspondentes à tensão limite de proporcionalidade a 2% e para a classe 4 a 0,2%.

Apesar de o aço inoxidável apresentar diferentes comportamentos mecânicos quando sujeito a altas temperaturas e quando comparado com aço carbono, a Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a) refere que os elementos estruturais em aço inoxidável sujeitos a altas temperaturas devem ser calculados com a mesma fórmula desenvolvida e usada para o aço carbono, incluída na Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b). Esta norma recomenda ainda o uso de 1,0 como o valor para o fator de segurança parcial $\gamma_{M,fi}$ em situação de incêndio.

3.2.2. Classificação das secções

A classificação da secção transversal depende da relação entre a largura e a espessura dos elementos comprimidos (ou parcialmente comprimidos) sob o carregamento a que está sujeita e é classificada segundo a classe mais elevada (mais desfavorável) desses mesmos elementos (Gamelas, 2014). A classificação das secções é feita mediante a Parte 1-4 do EC3 de maneira semelhante à descrita na Parte 1-1 do mesmo EC3 (CEN, 2005a).

Esta classificação é conseguida segundo um limite obtido através do fator ε que varia em função da tensão de cedência e do módulo de elasticidade. Este fator difere entre os aços carbono e inoxidável, e varia com a temperatura (com o aumento da temperatura sofre uma redução), devido à diferença entre os fatores de redução de ambas as variáveis nomeadamente o módulo de elasticidade e tensão de cedência como demonstra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fator de redução ε .

Parte 1-1 do EC3 para secções em aço carbono	$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y}\right)^{0,5}$
Parte 1-4 do EC3 para secções em aço inoxidável	$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}\right)^{0,5}$
Parte 1-2 do EC3 para situação de fogo aço carbono	$\varepsilon_{\theta} = 0,85 \left(\frac{235}{f_y}\right)^{0,5}$
Parte 1-2 do EC3 para situação de fogo aço inoxidável	$\varepsilon_{\theta} = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}} \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}\right)^{0,5}$

Na Figura 3.5 é visível para o aço carbono uma redução do fator ε com o aumento da temperatura. Isto significa que a classificação da secção feita à temperatura normal não é segura para essas temperaturas. Assim a Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) recomenda o uso de um fator de redução de 0,85.

O aço inoxidável exibe um comportamento diferente do aço carbono, mas como o fator ε é sempre maior do que o obtido pela equação na situação de fogo da Tabela 3.1, o uso desta equação para determinar a classe da secção de aço inoxidável em caso de fogo está do lado da segurança.

Com isto parte-se do princípio que a constante 0,85 terá em conta as variáveis $k_{y,\theta}$, $k_{0,2p,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ (fatores de redução que minoram a tensão de cedência e o módulo de elasticidade) apesar de não ser o mais correto já que corresponde a admitir que todas as classes de aços inoxidáveis têm o mesmo valor tanto da tensão de cedência f_y como do módulo de elasticidade E (Figura 3.5).

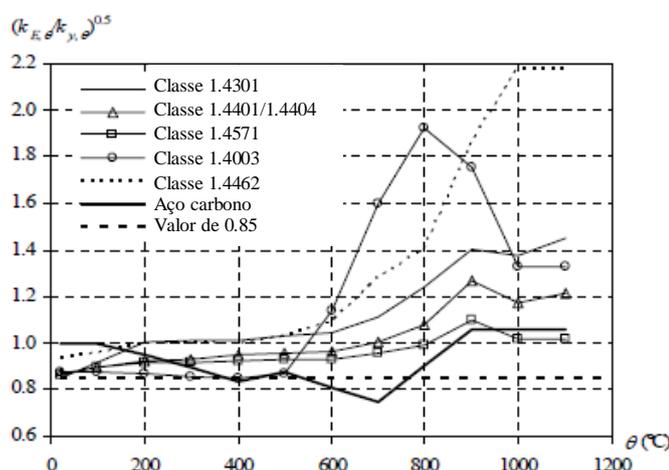


Figura 3.5 - Redução do fator para determinar a classe da secção transversal a elevadas temperaturas (adaptado de Lopes, 2009).

Todas as secções cujo limite ultrapasse o estipulado para a classe 3 são de classe 4 e deverão ser abordadas da mesma forma do que o preconizado para a temperatura normal, isto é, o cálculo da sua secção efetiva deverá ser feito segundo a EN 1993-1-5 (ponto 4.3) onde é aplicado o método das larguras efetivas para ter em conta as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local devendo apenas ser contabilizado o fator de redução que é obtido através da EN 1993-1-4. Para o caso específico das áreas efetivas das secções circulares ver o ponto 3.2.4.

3.2.3. Resistência da secção

Segundo a EN 1993-1-2 (CEN, 2005b) o cálculo da resistência da secção em situação de incêndio deverá ser feito considerando uma temperatura uniforme na secção e fazendo as modificações dos parâmetros de resistência à temperatura normal tendo em conta as propriedades mecânicas a altas temperaturas, considerando a condição $E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$, em que $E_{fi,d} (N_{fi,d})$ representa o valor do esforço axial de compressão atuante no instante t a altas temperaturas e $R_{fi,d,t} (N_{fi,t,Rd})$ o valor de cálculo do esforço axial de compressão resistente no mesmo instante.

Para secções de classe 1, 2, 3 a Parte 1-2 do EC3 recomenda que o cálculo da resistência da secção seja feito de acordo com a equação (3.1):

$$N_{fi,t,Rd} = \frac{A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.1)$$

Onde $k_{y,\theta}$ representa o fator de redução de cálculo respetivo à tensão de cedência correspondente a uma extensão de 2% presente na tabela C1 do Anexo C da Parte 1-2 da EN1992-1-2 (CEN, 2005b).

Para as secções de classe 4, o Anexo E da EN 1993-1-2 indica que o valor de cálculo da tensão de cedência deverá ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%.

Este valor, representado como $f_{0,2p,\theta}$ segundo este mesmo anexo é determinado usando $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y$, sendo $k_{0,2p,\theta}$ o fator de redução de cálculo determinado a partir do Quadro C1 do Anexo C da EN 1993-1-2. No entanto para a classe 4 a resistência da secção foi calculada numericamente como descrito no ponto 4.4.2.

O mesmo Anexo E refere ainda que a área da secção transversal efetiva e o módulo de flexão efetivo deverão ser determinados em conformidade com a EN 1993-1-3 em conjunto com a EN 1993-1-5, ou seja, com base nos materiais a frio.

3.2.4. Resistência do elemento

De acordo com o EC3 (CEN, 2005b) a resistência à encurvadura de um elemento comprimido de secção transversal de classe 1, 2 ou 3 sujeito a uma temperatura uniforme θ_a durante um tempo t é determinado pela equação (3.2):

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{\min,fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.2)$$

Onde:

$\chi_{\min,fi}$ é o fator de redução para encurvadura por flexão na situação de fogo e o mínimo entre os valores $\chi_{y,fi}$ e $\chi_{z,fi}$;

$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$ é o fator de correção da tensão de cedência para aço a uma temperatura θ_a durante um tempo t .

Tratando-se de aço inoxidável, e para o uso deste método de cálculo da resistência à compressão, o Anexo C da EN 1993-1-2, remete-nos para um valor de tensão de cedência $f_{y,0} = f_{0,2p,0} + k_{2\%,0} (f_{u,0} - f_{0,2p,0})$, que depende do fator de correção $k_{2\%,0}$ tabelado no mesmo Anexo (Tabela C1).

A determinação do mínimo do fator $\chi_{\min,fi}$ é feita através da equação (3.3):

$$\chi_{i,fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \text{ com } \chi_{i,fi} \leq 1 \quad (3.3)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2 \right] \quad (3.4)$$

e o fator de imperfeição α a depender do tipo de aço e determinado a partir de

$$\alpha = 0,65 \varepsilon \quad (3.5)$$

onde ε é dado na parte 1-1 do EC3 (CEN, 2005a) pela equação (3.6):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.6)$$

Tal que, o fator de imperfeição toma o valor de

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.7)$$

A esbelteza para altas temperaturas é dada por:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} \quad (3.8)$$

Onde $k_{E,\theta}$ é a inclinação da reta que representa o domínio elástico $\left(k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \right)$, $\bar{\lambda}$ é o valor da esbelteza normalizada à temperatura ambiente dada por $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$, e N_{cr} é a carga crítica de Euler dado pela expressão (3.9).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.9)$$

Quando graficamente representamos as equações (3.3) a (3.8) o resultado é o refletido na Figura 3.6 em forma de curvas de encurvadura que, como é facilmente observável, variam consoante o tipo de aço.

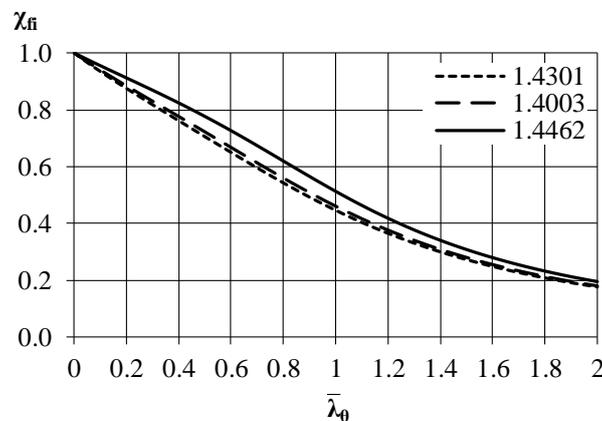


Figura 3.6 - Representação gráfica das curvas de encurvadura para os três tipos de aço em estudo.

A metodologia para a avaliação da segurança da encurvadura por flexão através do cálculo da resistência à compressão, para secções de classe 4, segue o mesmo procedimento que para as restantes classes e descrito em 4.2, considerando agora a área efetiva da secção A_{eff} em vez da área total A e assumindo $f_{y,\theta} = f_{0,2p,\theta}$, e por consequência o fator de redução $k_{0,2p,\theta}$.

Com o objetivo de perceber qual a diferença entre o cálculo a frio e o comportamento ao fogo segundo a EN 1993-1-1 e a EN-1993-1-2, para os diferentes tipos de aço, na expressão (3.8), recorreu-se à Figura 3.7 e Figura 3.8 onde é observável a relação entre a variável $\left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0.5}$ ou $\left[\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0.5}$, respetivamente, e o aumento da temperatura.

Percebe-se que existe um decréscimo deste fator à medida que aumenta a temperatura e que este nem sempre é linear e tem especial acentuação entre os 600°C e os 800°C, o que indica que a esbelteza calculada em situação de incêndio será sempre inferior à esbelteza calculada à temperatura ambiente. De notar ainda que o aço inoxidável de classe 1.4003 apresenta um comportamento diferente dos restantes na primeira fase de aquecimento, considerada até aos 450°C, podendo ser condicionante nos resultados obtidos.

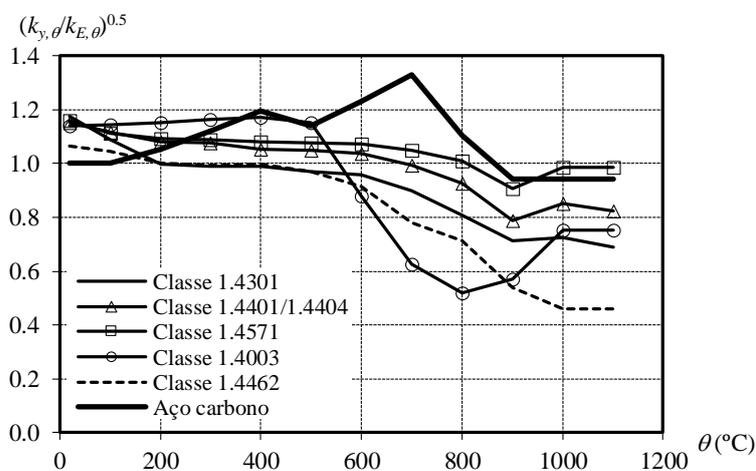


Figura 3.7 - Variação do valor $\left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0.5}$ das cinco classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura.

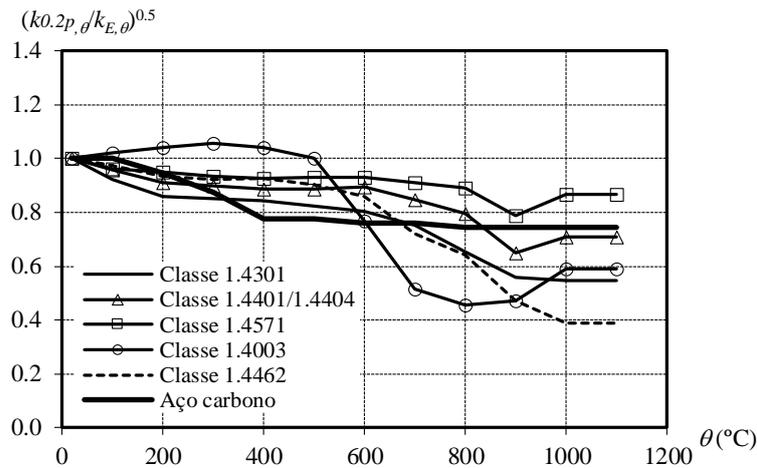


Figura 3.8 - Variação do valor $\left[\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}$ das cinco classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura.

A área efetiva a considerar nestes perfis de paredes finas resulta do cálculo feito para temperatura ambiente (Anexo E da EN 1993-1-2) e segundo o ponto 5.2.3 da EN 1993-1-4, juntamente com a EN 1993-1-5. Estas normas propõem que a secção efetiva tenha a largura dos elementos internos reduzida em função da sua suscetibilidade à encurvadura local (Lopes e Vila Real, 2014).

A parte 1-4 do EC3 respeitante aos perfis circulares de classe 4 e à respetiva área efetiva, remete para a parte 6 do mesmo Eurocódigo. Trahair *et al.* (2007) apresenta uma fórmula onde a área efetiva é reduzida de acordo com a equação (3.10).

$$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{90}{d/(t\epsilon^2)}} A \quad (3.10)$$

O valor de cálculo da tensão de cedência deverá ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%, de acordo com o Anexo E da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), para o cálculo em situação de incêndio.

3.3. Outras Propostas

Neste subcapítulo serão descritas as restantes propostas em análise. Para além daquelas que estão incluídos nesta dissertação existem ainda outras propostas como é o caso do *Design Manual for Structure in Stainless Steel* (Euro Inox, 2006) referido anteriormente que propõem o uso da tensão de cedência igual à tensão limite convencional de

proporcionalidade a 0,2% para todas as classes bem como uma alteração no fator de redução da encurvadura $\chi_{i,fi}$ através do valor de $\phi_{i,\theta}$ e o anexo nacional Francês da EN 1993-1-2 (CEN, 2007) propõe para o dimensionamento de secções de classe 4 (quer para aço carbono, quer para aço inoxidável) um outro valor para $\phi_{i,\theta}$, alterando assim o fator de redução da encurvadura $\chi_{i,fi}$.

3.3.1. Proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I de classe 1 e 2

Com base num estudo realizado em colunas de secção I de Classe 1 e 2, Lopes e Vila Real (2013) desenvolveram uma nova proposta para o cálculo da resistência à compressão axial onde, mantendo a formulação principal proposta pelo EC3 modificam os seguintes parâmetros:

$$\chi_{i,fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - \beta[\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \quad (3.11)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + \beta (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2 \right] \quad (3.12)$$

Em que β vale 1.0 para a encurvadura no eixo forte e 1,5 para a encurvadura no eixo fraco. No presente trabalho foi utilizado o valor de 1.0.

O fator de imperfeição α é dado por

$$\alpha = \eta \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}}} \quad (3.13)$$

Em que η é igual a 1.3 para todas as classes de aço inoxidável expeto para o 1.4462 em que toma o valor de 0,9.

Lopes e Vila Real (2013) propõem uma simplificação da anterior formulação que garante a segurança e um nível de precisão satisfatório no dimensionamento deste elementos onde a

única alteração às expressões do EC3 é apenas no fator de imperfeição que para os aços inoxidáveis passa a ser dado por:

$$\alpha = 1.5 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.14)$$

Apesar de este estudo ter sido feito para secções diferentes e não abranger todas as classes de secção e de aço, o EC3 não especifica regras de cálculo para o tipo de secção em estudo pelo que o raciocínio a efetuar é o mesmo independentemente da secção.

3.3.2. Proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng

Ng e Gardner (2007) efetuaram um estudo para secções circulares e retangulares de classe 1 e 4 onde propõem uma fórmula diferente para classificar a secção transversal a elevadas temperaturas alterando o valor de ϵ . Em conjunto com a anterior estes defendem a adoção das curvas de encurvadura à temperatura ambiente para elementos a elevadas temperaturas usando a expressão descrita pela equação (3.15) substituindo os fatores α pelo valor 0.55 e $\bar{\lambda}_0$ por 0.20.

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} \times \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{i,\theta} - \bar{\lambda}_0) + (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2 \right] \quad (3.15)$$

Finalmente estes ainda sugerem o uso do fator de redução da tensão de cedência baseado no seu limite de 2% ($k_{2,\theta}$) para as secções transversais de classes 1 e 2. Esta proposta estende-se ao fator de redução para secções transversais de classe 3 e 4 baseando-se na tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% ($k_{0,2p,\theta}$) ambos para determinação da resistência ao fogo tanto da secção transversal como do elemento.

Com o objetivo de melhor ver as diferenças entre as três propostas em análise, estas foram representadas graficamente (Figura 3.9) segundo as suas curvas de encurvadura e tendo em conta o acima descrito.

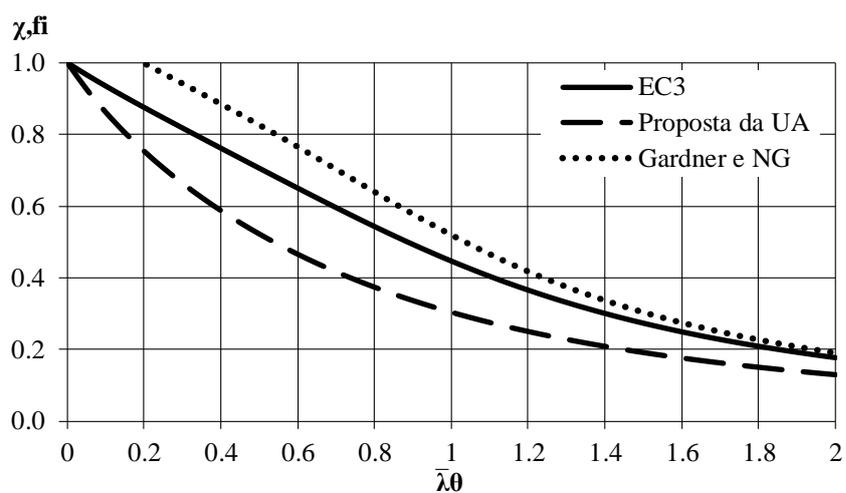


Figura 3.9 - Representação gráfica das curvas de encurvadura para os três tipos de propostas em estudo.

Capítulo 4

Modelação Numérica

Capítulo 4. Modelação Numérica

- 4.1. Considerações gerais
- 4.2. Descrição geral do programa SAFIR
- 4.3. Casos de estudo
- 4.4. Restrições, carga e malha
 - 4.4.1. Elementos
 - 4.4.2. Cálculo da resistência numérica da secção de classe 4
- 4.5. Imperfeições
 - 4.5.1. Imperfeições geométricas
 - 4.5.2. Tensões residuais
 - 4.5.3. Tensões de canto melhoradas

Capítulo 4. Modelação Numérica

4.1. Considerações gerais

A análise da resistência de estruturas ao fogo pode ser realizada utilizando programas com diferentes graus de complexidade. Estes podem variar desde métodos de cálculo mais simplificados (definidos no Eurocódigo) até aos mais complexos baseados em métodos de elementos finitos e incluindo métodos avançados de cálculo (mencionados também estes nos Eurocódigos).

A existência destes modelos de análise baseados em métodos de elementos finitos, permitem a reprodução de comportamentos de estruturas com materiais e geometrias não lineares. Esta técnica foi desenvolvida de maneira a dar resposta a problemas estruturais complexos. Neste método de elementos finitos, o sistema estrutural é modelado através de um número apropriado de elementos que estão conectados por pontos, designados de nós.

O *software* utilizado no presente estudo numérico é o SAFIR. Este programa inclui um modelo de elementos finitos para a análise geométrica e material não linear, especialmente desenvolvido na Universidade de Liège, Bélgica, para a análise de estruturas sujeitas ao fogo (Franssen, 2011).

Neste capítulo será feita uma breve introdução ao programa SAFIR, bem como as modificações necessariamente introduzidas e a sua justificação.

4.2. Descrição geral do programa SAFIR

Sendo o SAFIR um programa de elementos finitos este tem por base variados e diferentes tipos de elementos, métodos de cálculo e comportamentos de materiais para ter em consideração as relações tensão-extensão. Este é essencialmente utilizado para análise de estruturas a temperaturas elevadas (Franssen, 2011).

Os elementos finitos deste programa incluem elementos treliçados (apenas admite esforços axiais), elementos de vigas (admite não só esforços axiais mas também esforços de corte e momentos fletores), elementos de casca (elementos planos) e elementos sólidos. A relação tensão-extensão do aço carbono no programa é contemplada de acordo com a Parte 1-2 do EC3 (Lopes, 2009).

O programa SAFIR possui dois módulos distintos de cálculo: um para a análise do comportamento térmico e outro para a análise do comportamento mecânico da estrutura.

Tendo em conta que o objetivo é fazer uma comparação direta entre os resultados obtidos neste trabalho com o programa SAFIR e os métodos simplificados propostos pelo Eurocódigo, os testes foram feitos considerando uma temperatura uniforme na secção transversal. Assim, as temperaturas foram impostas a cada elemento da secção de tal modo que a secção ficasse sujeita à mesma temperatura.

Para a análise estrutural não-linear, os seguintes dados são lidos através do ficheiro de introdução de dados (*input*): o histórico de tempo das temperaturas, as propriedades de torção e a geometria da secção (Lopes, 2009).

A estratégia de cálculo é baseada num processo incremental (“passo a passo”), permitindo obter, até ao colapso da estrutura, os deslocamentos para cada nó e os esforços (axial, de corte, momento fletor, tensões) nos pontos de integração de cada elemento finito.

Para as diversas aplicações do programa SAFIR têm vindo a ser observados excelentes resultados. Para os comprovar têm sido feitas comparações entre os resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR e experimentalmente e os resultados numéricos de outros programas e soluções teóricas (Lopes, 2009; Scifo, 2013).

Na presente dissertação foram utilizados unicamente elementos de casca (elemento finito) em todas as colunas, com o objetivo de serem estudados os fenómenos de encurvadura do elemento estrutural.

O uso de elementos finitos de casca é o método mais preciso quando se trata de estudos de elementos estruturais de paredes finas. A sua utilização em detrimento de elementos finitos de viga é inevitável neste tipo de elementos e secções devido essencialmente ao tipo de encurvadura a que estão sujeitos, nomeadamente a encurvadura local (modo de encurvadura dominante). Para a modelação deste tipo de estruturas, o SAFIR utiliza elementos de casca baseado na teoria de flexão de Kirchhoff. Estes elementos são caracterizados pela sua capacidade de combinar no meio da sua superfície um estado de resistência à flexão com um estado de resistência à força axial, designado de estado de membrana. No SAFIR são constituídos por quatro pontos de integração na superfície do elemento (Figura 4.1). Em cada direção essa integração é feita através do método de Gauss. O número de camadas, com

pontos de integração, sobre a espessura pode variar entre um mínimo de dois e um máximo de nove. O elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade cada: três deslocamentos e três rotações (Lopes, 2009).

Este elemento, que necessita de análise do estado plano de tensão, foi introduzido inicialmente para materiais elásticos e posteriormente para leis materiais elasto-plásticas: uma para o aço carbono e outra para o betão, tendo a lei constitutiva não linear do aço inoxidável sido também introduzida no SAFIR.

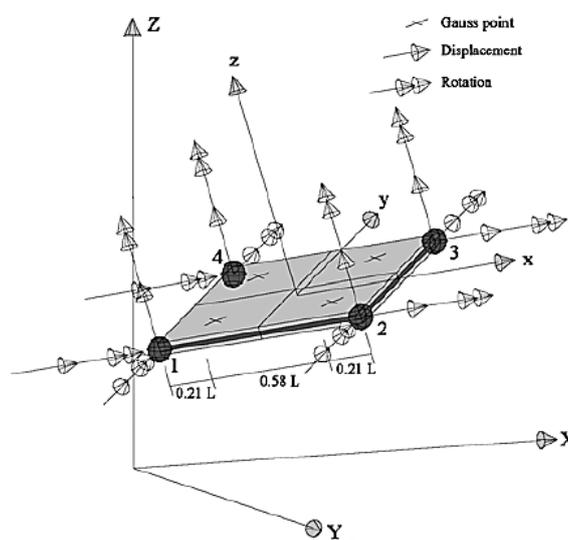


Figura 4.1 - Elemento finito de casca (Lopes, 2009).

4.3. Casos de estudo

Considerando diferentes secções de vários fabricantes (Tubinox, Stalotube, Condesa, Ferpinta, Online Metals), foram estudadas as suas classes, de maneira a escolher quais os perfis a analisar. Este cálculo da classe foi feito para situação de incêndio, tendo em conta o descrito na Parte 1-2 do EC3 e para os três grupos de aços existentes.

Para o cálculo das classes, recorreu-se à Parte 1-4 do Eurocódigo 3, mais concretamente à Tabela 5.1 (CEN, 2006), mas utilizando o fator de redução ϵ proposto pela parte 1-2.

As secções consideradas para o estudo foram as quadrangulares e as circulares. No caso das primeiras, e para o cálculo da classe, dispensa-se a separação entre as partes comprimidas análogas ao banzo e à alma uma vez que as dimensões são iguais.

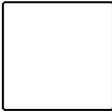
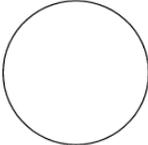
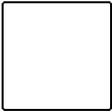
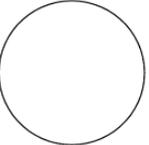
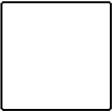
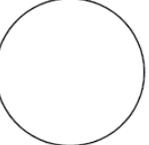
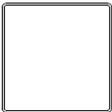
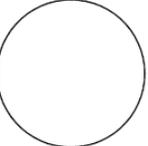
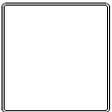
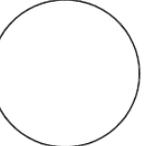
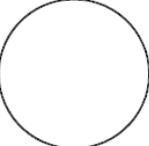
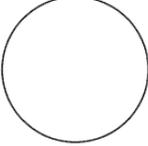
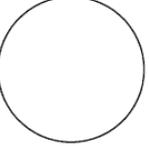
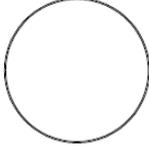
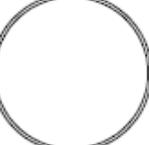
Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

As secções circulares tem uma análise própria da secção também esta apresentada na Tabela 5.1.da parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006).

Este raciocínio foi repetido para os três aços inoxidáveis mais comumente utilizados o aço austenítico (1.4031), ferrítico (1.4003) e austenítico-ferrítico (1.4462).

Os resultados propostos para as secções circulares e quadrangulares estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propostas de secções transversais para os diferentes grupos de aço inoxidável (secções quadrangulares e circulares).

Classe	Austenítico (1.4301)		Ferrítico (1.4003)		Austenítico-Ferrítico (1.4462)	
	Quadrangular (mm)	Circular (mm)	Quadrangular (mm)	Circular (mm)	Quadrangular (mm)	Circular (mm)
C4	200x200x2	Ø244.5x1	200x200x2	Ø244.5x1	200x200x2	Ø244.5x1,5
						
C4	200x200x4	Ø244.5x1.5	200x200x4	Ø244.5x1.5	200x200x4	Ø244.5x3
						
C3	200x200x7	Ø244.5x2	200x200x7.5	Ø244.5x2	200x200x10	Ø244.5x4
						
C1	200x200x10	Ø244.5x8	200x200x10	Ø244.5x8	200x200x12	Ø244.5x10
						

Nos resultados apresentados na Tabela 4.1 note-se que o único valor que não foi baseado em medidas de fabricantes é a espessura de 7,5 mm.

A norma britânica EN 10219-2 (CEN, 2006) especifica tolerâncias para secções tubulares circulares, quadrangulares e retangulares enformadas a frio com espessuras até 40 mm.

Este documento não se centra no material, mas sim na geometria da secção. Através deste foi possível fazer uma comparação com as secções propostas para análise.

Verificou-se que todas as secções escolhidas estão de acordo com a norma, salvo exceções que ou por escolha específica do fabricante ou por apenas estarem contemplados alguns exemplos na norma, não são coerentes. Dá-se como exemplo concreto as espessuras das paredes das secções cuja gama varia muito mais quando se recorre aos catálogos dos fabricantes.

As colunas em estudo apresentam secções de classe 1, 3 e duas secções diferentes de classe 4 com comprimentos que variam entre 1 m e 17 m até que a esbelteza atinja o valor de dois ou próximo deste. Optou-se, de maneira a uniformizar os elementos, por definir secções iguais variando apenas as espessuras de maneira a obter as diferentes classes.

4.4. Restrições, cargas, malha

4.4.1. Elementos

As secções criadas no SAFIR possuem pequenas diferenças quando comparadas com as reais. As colunas foram discretizadas em vários elementos de casca quadrangulares e não-quadrangulares (tendo em conta os elementos curvos de ambas as secções) com quatro nós, cada um com seis graus de liberdade (três deslocamentos e três rotações) segundo os pressupostos descritos anteriormente relativos à formulação destes elementos de casca (Couto, 2015). A definição da malha e a sua refinação é dos aspetos mais importantes no modelo numérico tendo em conta que a precisão dos resultados aumenta com a diminuição dos elementos da malha. Esta foi definida partindo sempre do pressuposto de que quanto mais refinada esta fosse, mais exatos seriam os resultados. No entanto, e devido ao tempo que demoraria e dos atrasos que esse refinamento acarretaria, tendo em conta o número elevado de modelos existentes, a malha considerada inicialmente foi aquela que se manteve no estudo, sem haver posterior alteração dos elementos.

A definição e criação da malha do modelo numérico foi realizada com o auxílio de uma folha de cálculo automática facilitando todo o processo quando existe variação da secção transversal. A malha utilizada neste estudo é definida tendo por base a linha média das secções e é composta por 5898 nós, 5896 elementos no caso de secções quadrangulares e por 5970 nós e 5968 elementos para secções transversais circulares. Os elementos dividem-se em 100 ao longo do comprimento da coluna e dependendo do tipo na secção transversal variavam entre os 148 (no caso da secção quadrangular) e os 304 (no caso dos circulares).

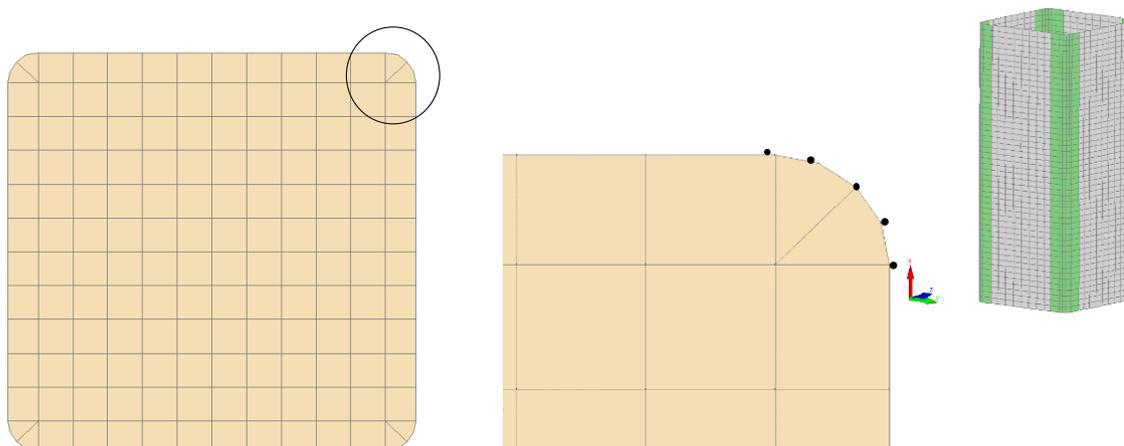


Figura 4.2 - Pormenor da malha do canto da secção transversal quadrangular.

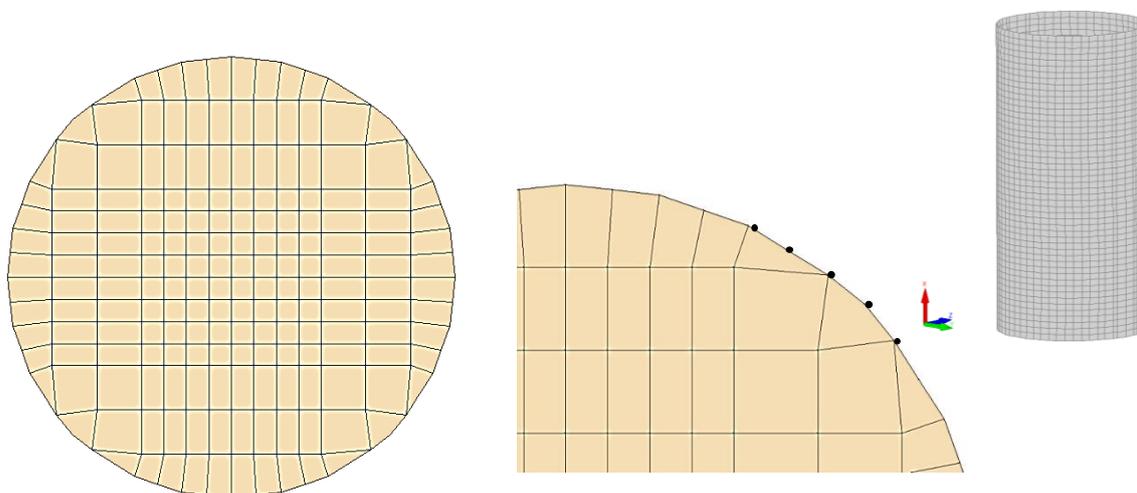


Figura 4.3 - Pormenor da malha da secção transversal circular.

Devido à configuração da secção transversal dos elementos foi tida especial atenção na zona dos cantos relativa à secção quadrangular (Figura 4.2) e em toda a secção circular (Figura 4.3) atendendo ao facto de que os elementos que compõem a zona dos cantos e os que definem a secção circular não serem retilíneos. Assim, e sabendo que a definição de um

elemento é feita com a conexão de quatro pontos, tentou desenvolver-se a curva através de pequenas retas. De notar que a secção transversal do elemento não é preenchida como poderá parecer pela Figura 4.2 e Figura 4.3. O aspecto deve-se a terem sido introduzidas placas de extremidade que não sofrem aumento de temperatura com 80 mm usada no topo e na base da coluna de maneira a transmitir as cargas verticais pontuais à coluna sem introduzir encurvadura local (Scifo, 2013).

As restrições foram impostas em ambas as extremidades de forma a reproduzir um apoio duplo (elemento que bloqueia os deslocamentos nas direções y e z) (Figura 4.4 e Figura 4.5).

Para além das extremidades, também foram aplicadas restrições a meio do elemento impedindo os deslocamentos na direção x apenas para garantir a simetria do elemento e dos esforços.

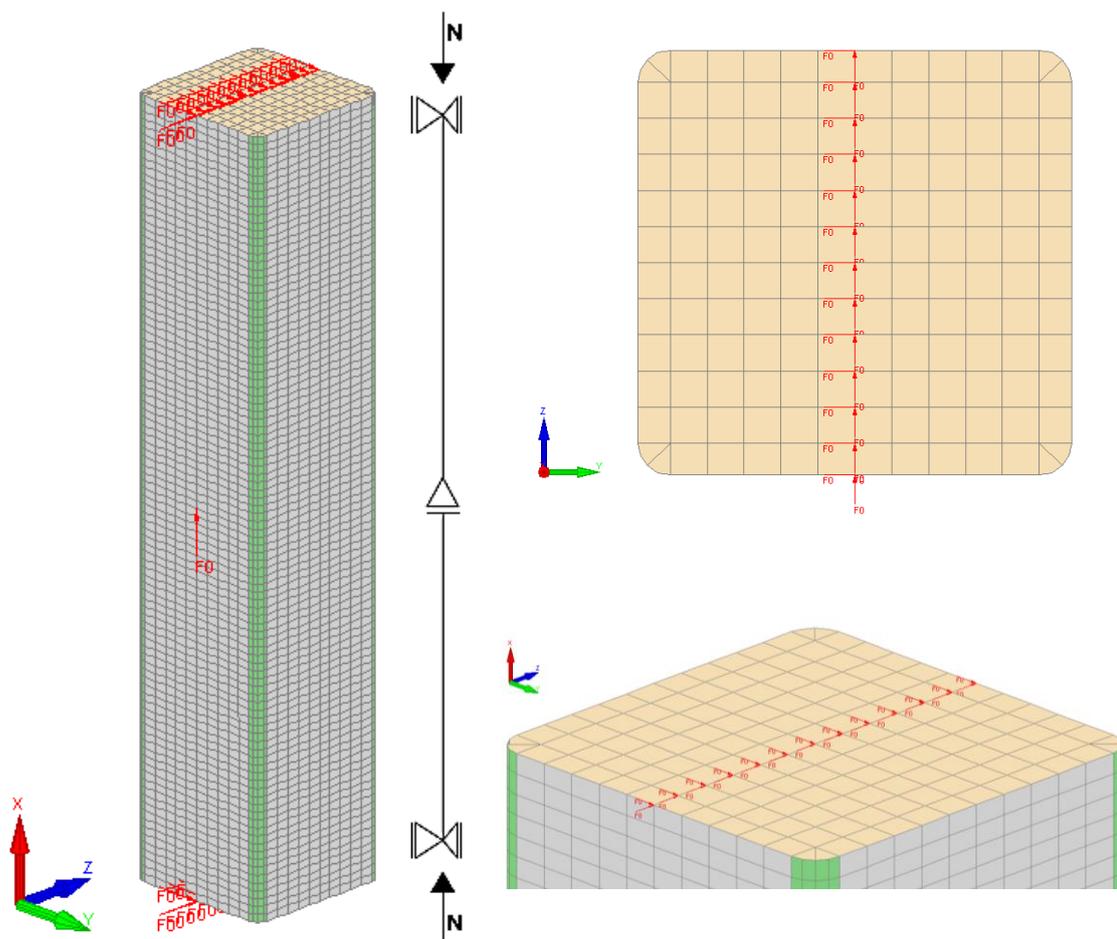


Figura 4.4 - Modelo numérico com as restrições utilizadas para SHS.

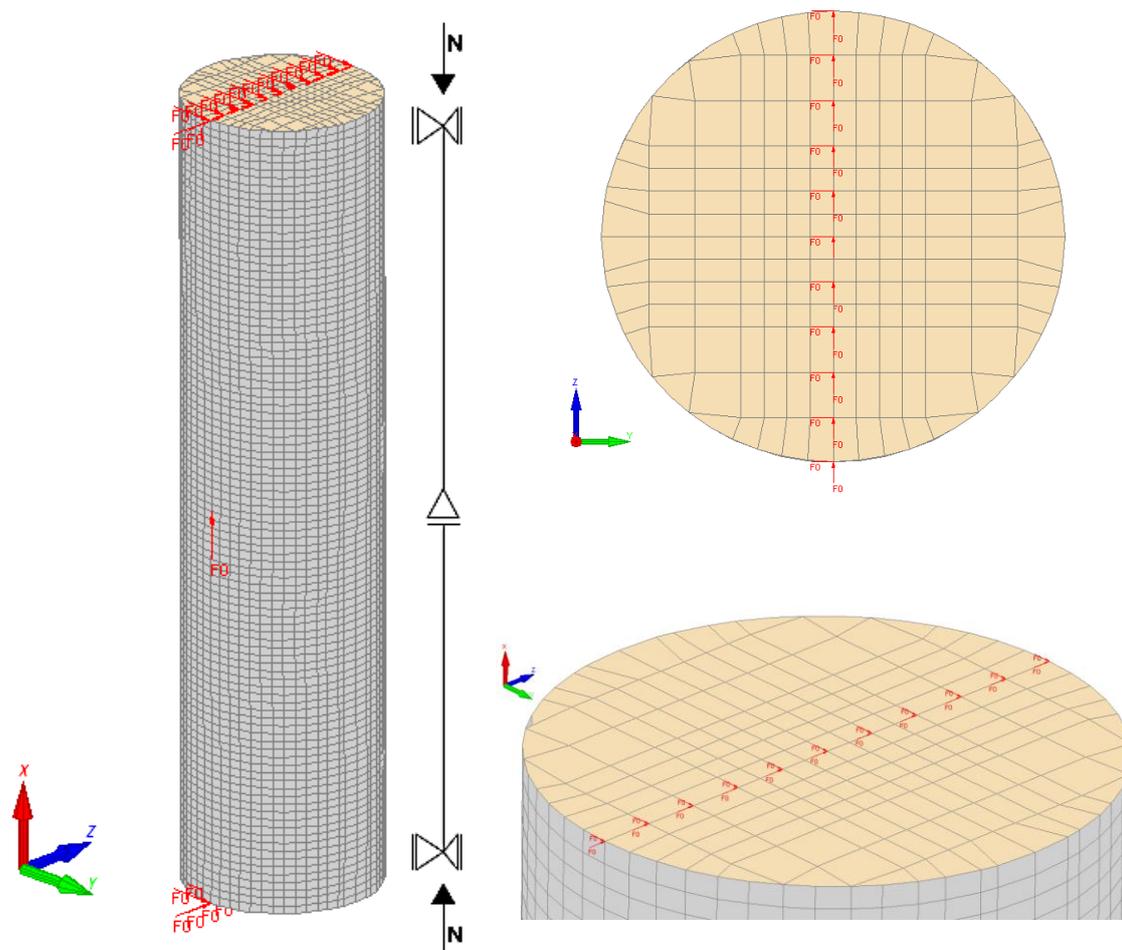


Figura 4.5 - Modelo numérico com as restrições utilizadas para CHS.

A aplicação das cargas é também um aspeto fundamental uma vez que estas, quando mal aplicadas, podem produzir no elemento efeitos, deslocamentos ou rotações indesejadas (Gamelas, 2014). Estas foram aplicadas verticalmente, paralelas à coluna, em ambas as extremidades e distribuídas pelos mesmos pontos de restrição (Figura 4.4 e Figura 4.5). No entanto considerou-se que a carga nas extremidades seria apenas metade do valor que na zona central da distribuição devido à área de influência ser menor nas extremidades. As cargas foram modeladas aplicando-as distributivamente nos pontos de restrição da superfície da secção. A carga de colapso para temperaturas elevadas é obtida aumentando primeiramente a temperatura da secção até ao valor desejado e aplicando de seguida uma carga crescente até a estrutura colapsar (Couto, 2015).

Os modelos foram ensaiados a temperaturas de 350 °C, 500 °C, 600°C e 700 °C consideradas representativas das temperaturas críticas em elementos estruturais de aço. De notar que 350°C é a temperatura crítica recomendada para perfis com secções de classe 4 quando não

for feito nenhum cálculo. A distribuição dessas temperaturas foi uniforme na secção para facilitar a posterior comparação com as curvas do EC3.

4.4.2. Cálculo da resistência numérica da secção de classe 4

Para elementos de classe 4 foi feito o cálculo numérico da resistência da secção, $N_{c,rd}$, com o auxílio do SAFIR. Para o cálculo considerou-se todo o elemento restringido lateralmente colocando fixações nas direções y e z ao longo do elemento no caso das secções quadrangulares na zona dos cantos (Figura 4.6) e no caso das circulares em quatro pontos da secção (Figura 4.7) aplicando a mesma carga.

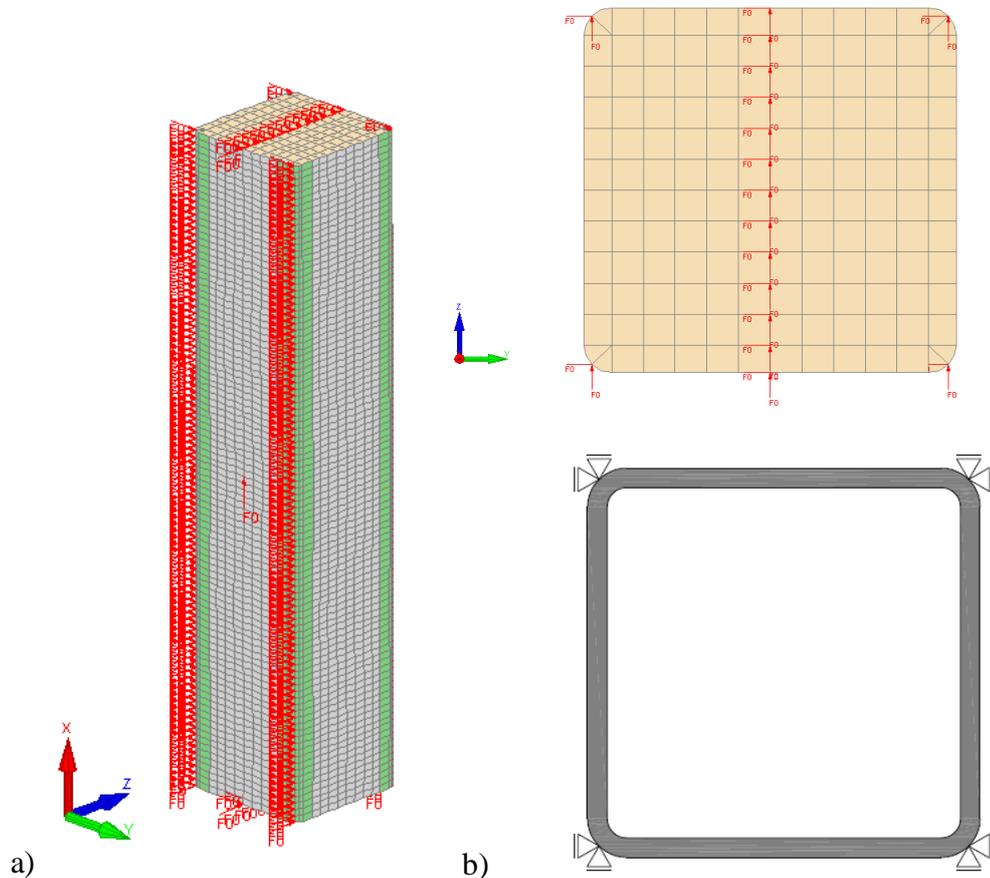


Figura 4.6 - Representação das fixações consideradas para o cálculo do $N_{c,rd}$ da SHS 200x200x10: a) ao longo do comprimento; b) na secção transversal.

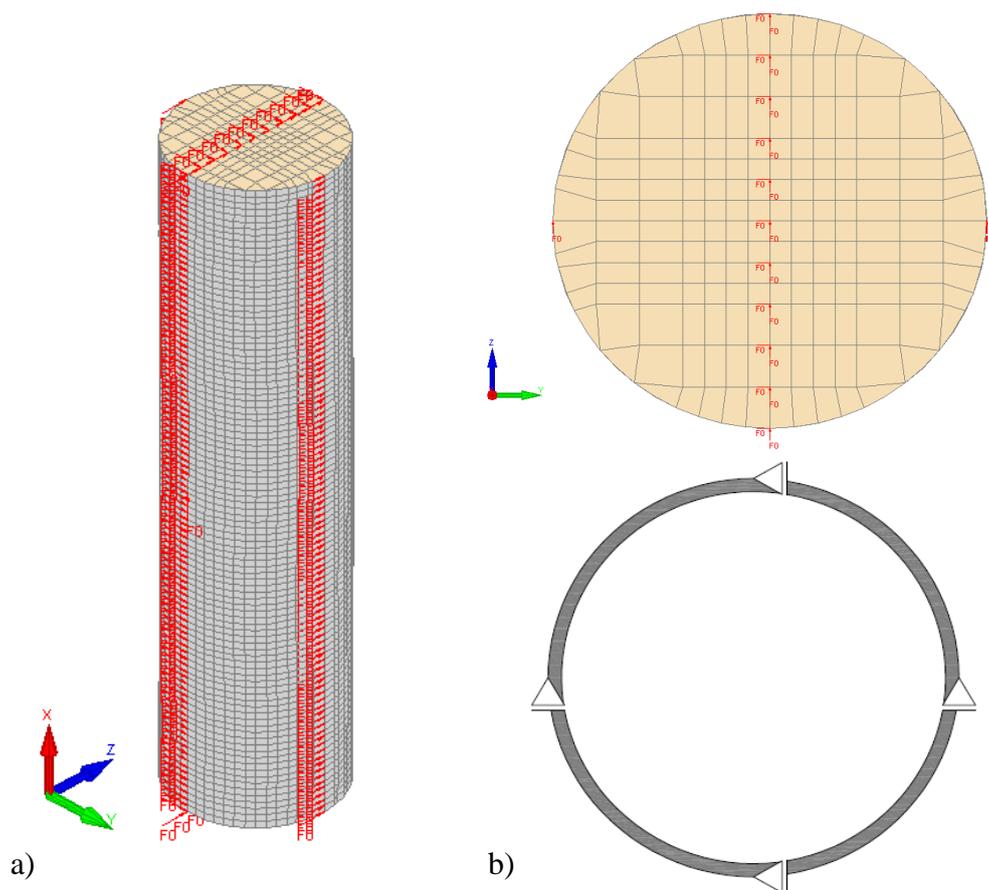


Figura 4.7 - Representação das fixações consideradas para o cálculo do $N_{c,rd}$ da CHS 244.5x8: a) ao longo do comprimento; b) na secção transversal.

Atendendo ao facto de que a resistência da secção é muito semelhante para os diferentes comprimentos o valor desta resistência varia apenas consoante a qualidade do aço, a classe da secção e a temperatura.

4.5. Imperfeições

4.5.1. Imperfeições geométricas

Com a produção de elementos estruturais vêm associadas tolerâncias específicas, ainda assim existem imperfeições associadas à maneira de produção (Cruise, 2007).

As imperfeições geométricas consideradas na análise dos elementos estruturais podem ser agrupadas em imperfeições globais e locais. Ambos os tipos influenciam a secção transversal em estudo, no entanto, as imperfeições locais (distorção da secção reta, falta de esquadria e deformações da alma e no banzo) tem maior influência em secções transversais esbeltas

estando na origem de fenómenos de instabilidade locais, e as globais em secções transversais compactas influenciando a resistência à encurvadura (Piloto *et al.*, 2003).

As amplitudes das imperfeições globais foram adotadas de acordo com o Anexo C da Parte 1-5 do EC3 (CEN, 2006b) que, para ambos os modelos, propõe a aplicação de 80 % das tolerâncias geométricas de fabrico que por sua vez podem ser obtidas nas normas EN 1090-2:2008+A1 (CEN, 2011) e EN10219-2 (CEN, 2006) (Lopes e Vila Real, 2013).

Para elementos estruturais tubulares a EN1090-2 recomenda a consideração de uma tolerância com o valor $\Delta = \frac{L}{750}$ como demonstrado na Figura 4.8.

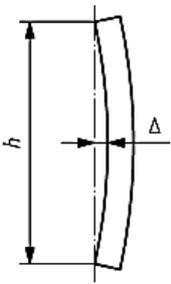
4	<p>Linearidade de uma coluna isolada:</p> 	<p>Localização da coluna no plano, relativo a uma linha reta entre as posições dos pontos do topo e da base:</p> <ul style="list-style-type: none"> -geral -secções tubulares ocas 	$\Delta = \pm h/750$ $\Delta = \pm h/750$
---	--	--	--

Figura 4.8 - Tolerância das imperfeições globais (adaptado de CEN, 2011)

Assim, para os elementos em estudo, consideraram-se as imperfeições globais de acordo com:

$$y = 0.8 \frac{L}{750} \quad (4.1)$$

No que diz respeito às imperfeições locais, as tolerâncias são geralmente definidas pelo fornecedor de aço baseadas na EN10219-2 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Tolerância para secções quadrangulares e retangulares (adaptado de EN10219-2) (CEN, 2006).

Comprimento lateral (mm)	Tolerância
H, B < 100mm	±1% com um mínimo de ± 0.5mm
100mm ≤ H, B ≤ 200mm	±0.8%
H, B > 200mm	±0.6%

Assim, a amplitude máxima considerada para os elementos com secção quadrangular é $0.8b/100$ (sendo b a dimensão da largura do tubo) e as imperfeições locais são consideradas de acordo com a equação (4.2).

$$y=0.8 \times \frac{0.8b}{100} \quad (4.2)$$

As imperfeições são distribuídas na secção transversal de acordo com Figura 4.9 b).

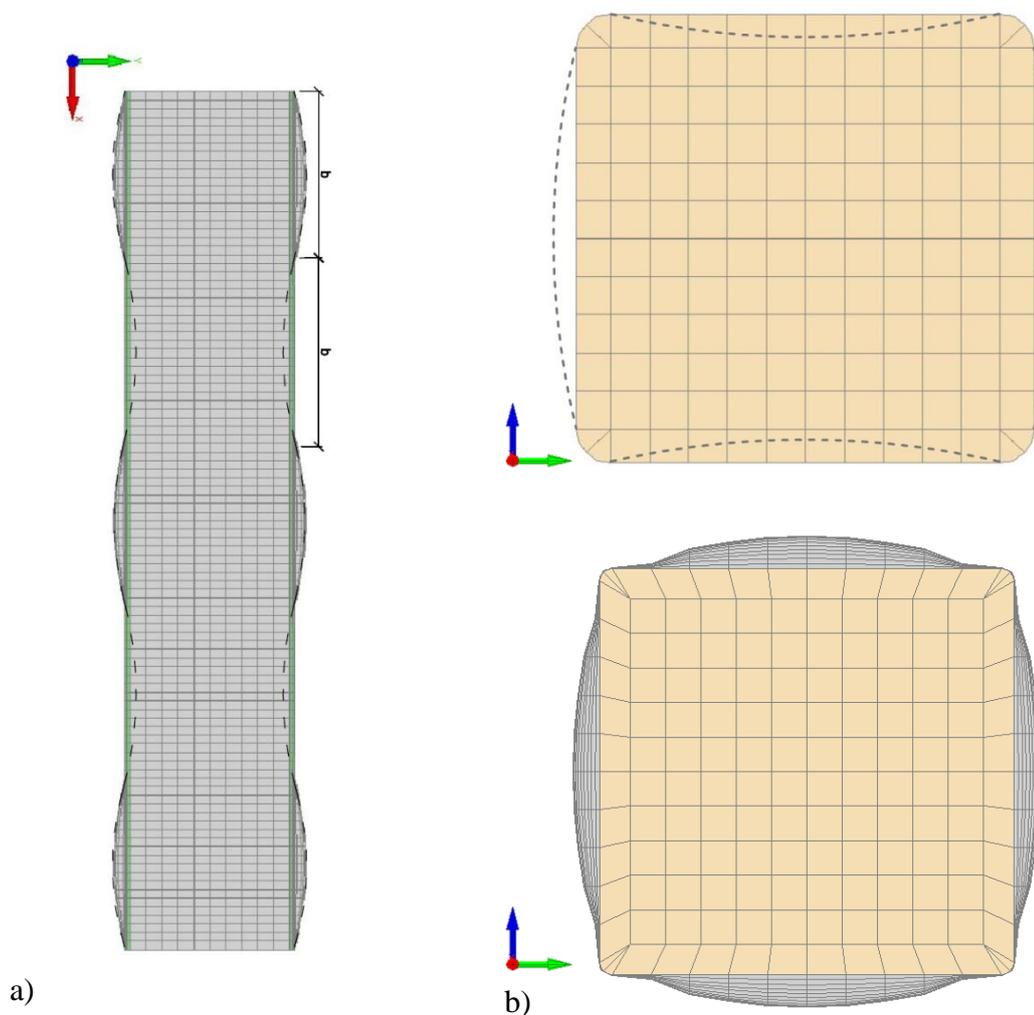


Figura 4.9 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal SHS 200x200x10: a) ao longo do comprimento; b) vista de topo.

A forma como estas imperfeições locais se desenvolvem ao longo do comprimento é representada na forma de uma onda sinusoidal cujo meio comprimento é igual à largura da secção transversal como mostra a Figura 4.9 a).

As tolerâncias respeitantes à secção circular são igualmente baseadas na EN10219-2 (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Tolerância para secções circulares (adaptado de EN10219-2) (CEN, 2006).

Secção transversal circular
±1% com um mínimo de ± 0.5mm e um máximo de ± 10 mm

Assim, para os elementos de secção circular, o raciocínio passa por considerar a forma elíptica da secção. A amplitude máxima para secções transversais circulares é o correspondente a $d/100$ (sendo d o diâmetro exterior da secção) e as imperfeições locais consideradas de acordo com a equação (4.3).

$$y=0.8 \times \frac{d}{100} \quad (4.3)$$

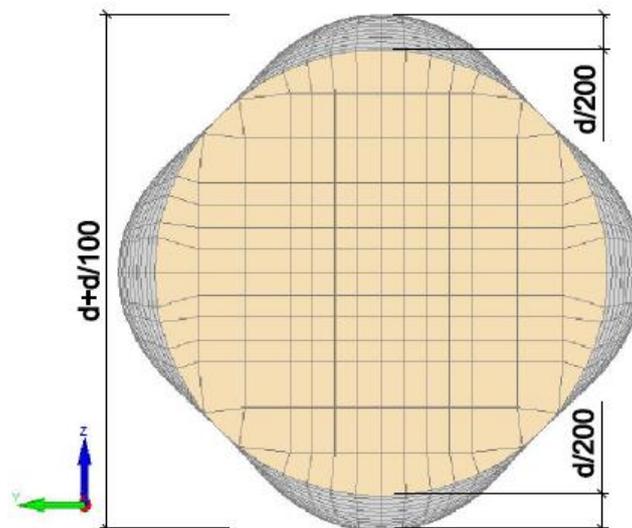


Figura 4.10 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal CHS 244.5x10.

Mais uma vez, e de maneira semelhante ao que ocorre nas secções quadrangulares, a forma como estas imperfeições locais se desenvolvem ao longo do comprimento é representada como uma onda sinusoidal cujo meio comprimento é não a largura da secção mas sim o seu diâmetro (Figura 4.11).

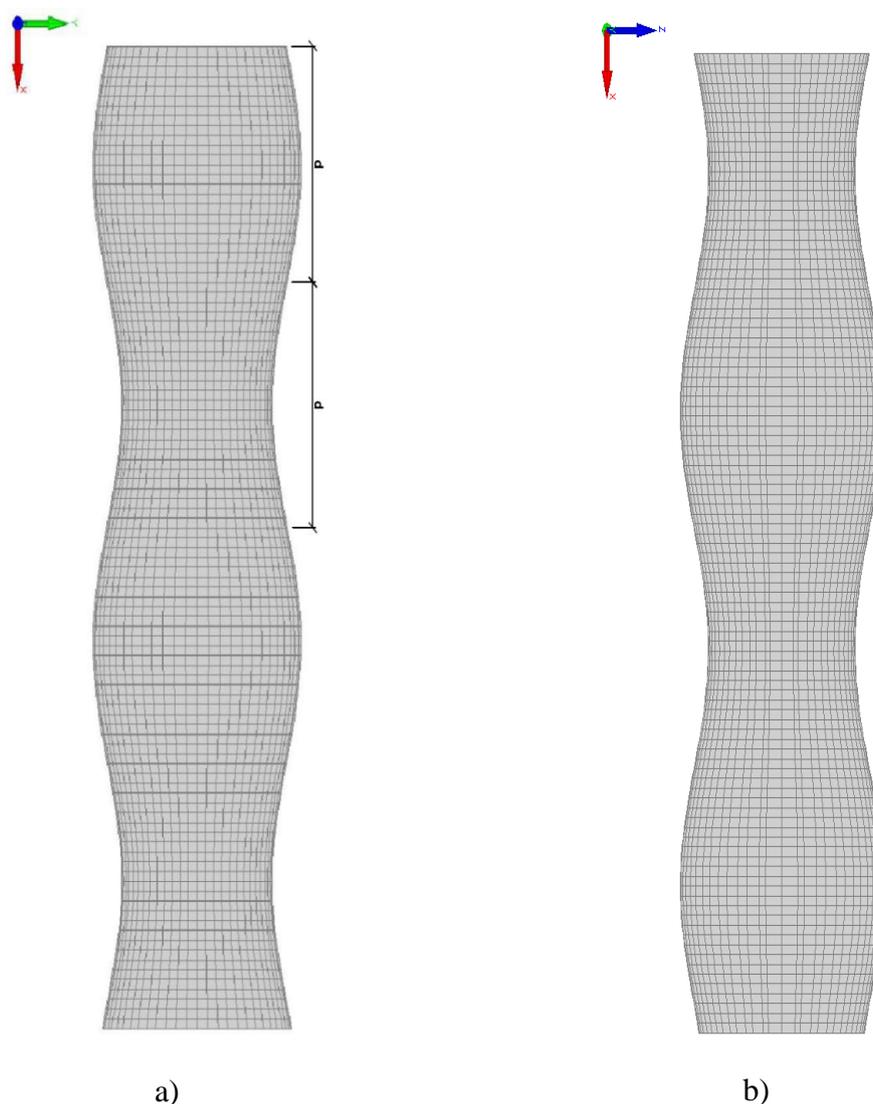


Figura 4.11 - Representação das imperfeições geométricas locais da secção transversal CHS 244.5x10 ao longo do comprimento: a) vista de topo; b) vista lateral.

De acordo com a parte 1-5 do EC3 deve ser introduzida no modelo numérico uma combinação das imperfeições em que se escolhe uma imperfeição principal e as restantes poderão ter os seus valores reduzido para 70%. Análises prévias concluíram que a combinação dessa redução não tem influências significativas pelo que foi aplicado no presente estudo numérico a adição simples das imperfeições (Lopes e Vila Real, 2013).

As imperfeições geométricas foram introduzidas no modelo através de variações nas coordenadas dos nós, de acordo com o descrito anteriormente (Couto, 2015). A representação dessas imperfeições ampliadas é feita através da Figura 4.12 e Figura 4.13.

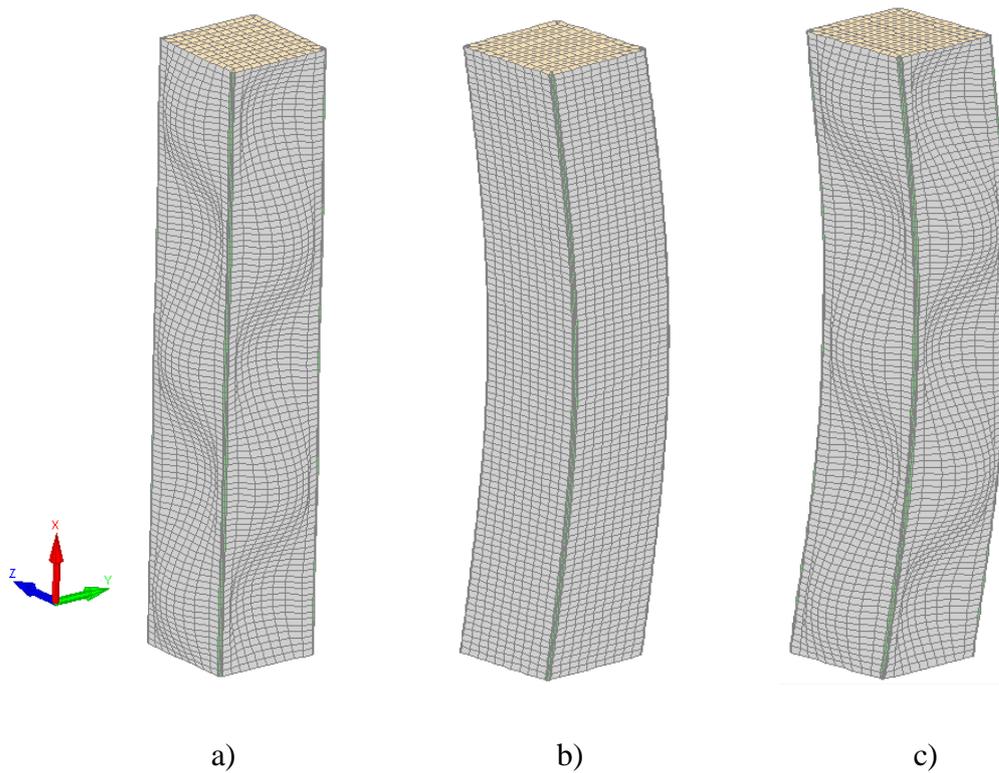


Figura 4.12 - Imperfeições geométricas ampliadas introduzidas nos colunas SHS 200x200x10: a) só imperfeições locais; b) só imperfeições globais; c) imperfeições globais e locais.

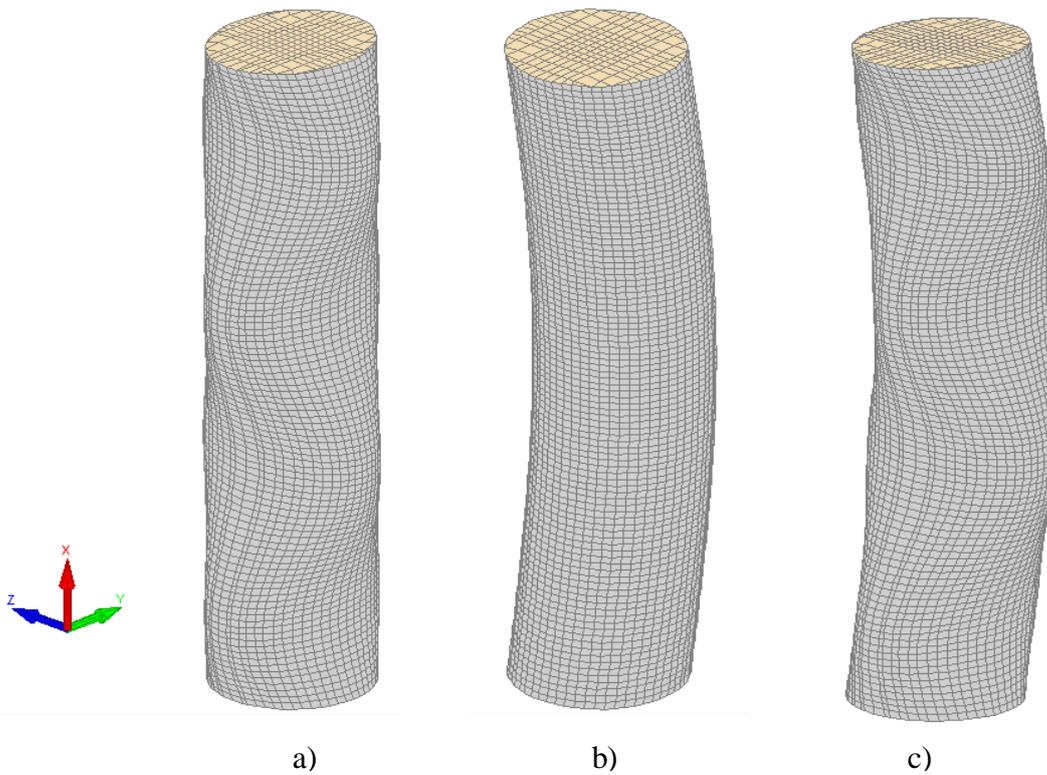


Figura 4.13 - Imperfeições geométricas ampliadas introduzidas nos colunas CHS 244.5x10: a) só imperfeições locais; b) só imperfeições globais; c) imperfeições globais e locais.

4.5.2. Tensões residuais

As tensões residuais correspondem a um estado de tensão autoequilibrada. Estas surgem nos elementos devido essencialmente ao seu processo de fabrico descrito no ponto 4.5.3 e às deformações plásticas a ele associadas que dependem não só da produção, mas também de todo o processo de formação da secção em causa, mais especificamente da técnica usada, apresentando mediante a mesma diferentes níveis de deformação plástica (Cruise e Gardner, 2008). Geralmente após passar por esse processo de fabrico, o material pode apresentar deformação axial e curvatura correspondentes a tensões residuais de membrana e de flexão (Cruise, 2007).

Devido às características térmicas (elevada expansão térmica e menor condutividade térmica quando comparada com o aço carbono) e físicas (curva de tensão-deformação redonda com um grande patamar de endurecimento) do aço inoxidável, não se deve assumir que as tensões residuais são da mesma magnitude e distribuição que as existentes no aço carbono (Cruise e Gardner, 2008).

Gardner e Cruise (2009) propuseram uma forma de introduzir essas tensões residuais no modelo numérico em elementos de aço inoxidável. Essa proposta apenas considera as tensões residuais longitudinais, sendo essas aquelas que mais influenciam o comportamento estrutural (Cruise, 2007).

Gardner (Gardner e Cruise, 2009) encontrou valores característicos para as tensões residuais de flexão (Figura 4.15) e de membrana (Figura 4.16) apresentados na Tabela 4.4.

Essas tensões dividem-se de maneiras diferentes ao longo da secção, pelo que apresentam diagramas também eles distintos. As tensões de membrana apresentam uma distribuição diferente nos cantos e na zona plana da secção sendo geralmente introduzidas na fase de soldadura do tubular. A zona plana da secção divide-se em parte central e exterior da placa (Figura 4.14a). Já as de flexão diferem o seu valor também em relação aos cantos e à zona plana, não apresentando no entanto diferença entre parte central e exterior (Figura 4.14b) mas variando linearmente ao longo da espessura e surgindo como resultado das deformações plásticas durante o processo de formação (Theofanous e Gardner, 2009).

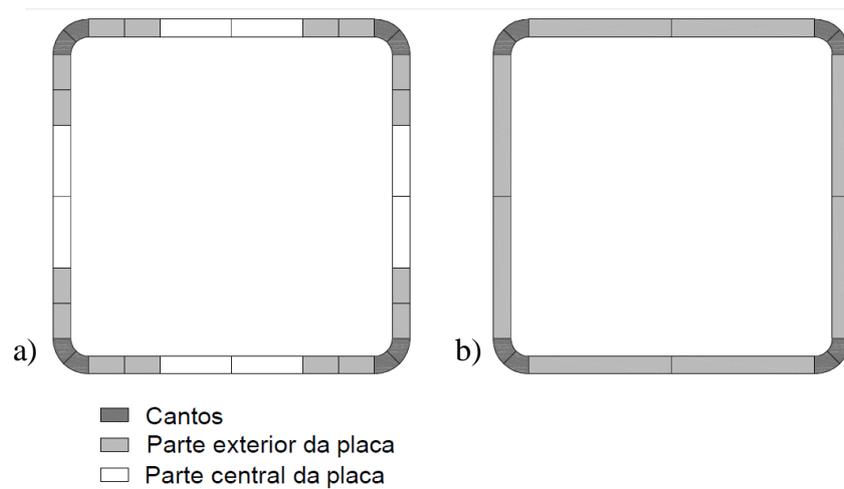


Figura 4.14 - Distribuição de tensões residuais em SHS 200x200x10: a) tensões residuais de membrana; b) tensões residuais de flexão.

Tabela 4.4 - Valores das tensões residuais consideradas (Scifo, 2013).

	Tensões residuais de flexão	Tensões residuais de membranas
Parte central da placa	$\pm 0.63\sigma_{0.2}$	$+0.37\sigma_{0.2}$
Parte exterior da placa	$\pm 0.63\sigma_{0.2}$	$-0.24\sigma_{0.2}$
Cantos	$\pm 0.37\sigma_{0.2}$	$-0.24\sigma_{0.2}$

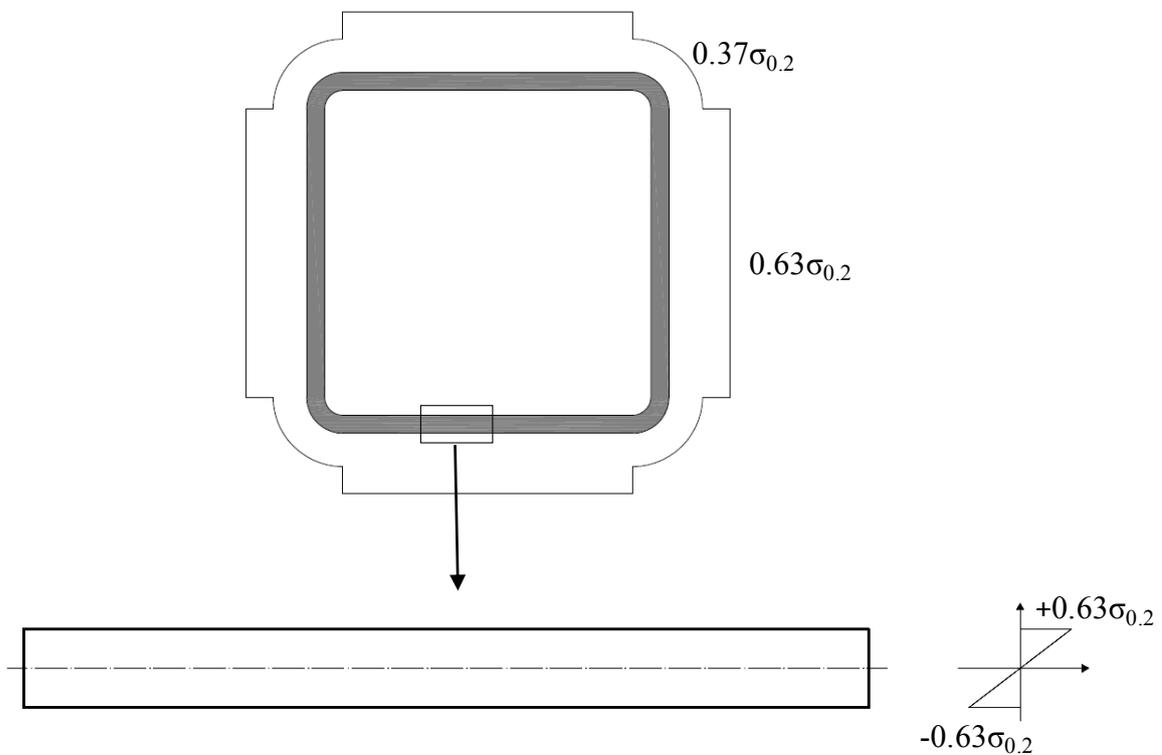


Figura 4.15 - Representação da proposta de distribuição das tensões residuais de flexão.

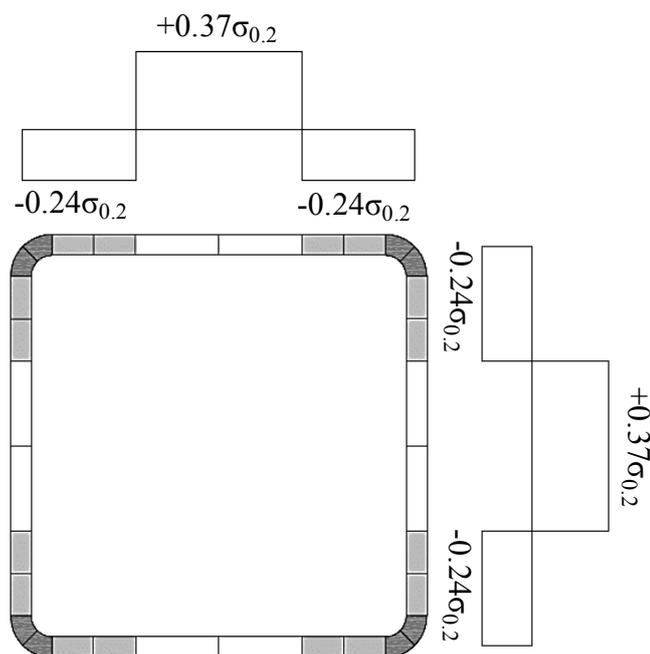


Figura 4.16 - Representação da proposta de distribuição de tensões residuais de membrana.

A atribuição destas tensões residuais no modelo é feita com o auxílio de um ficheiro de introdução de dados (*input*) onde para cada ponto de integração as tensões são colocadas em Pa (Pascal). O número de pontos de integração no plano é apresentado na Figura 4.17 (Lopes, 2009).

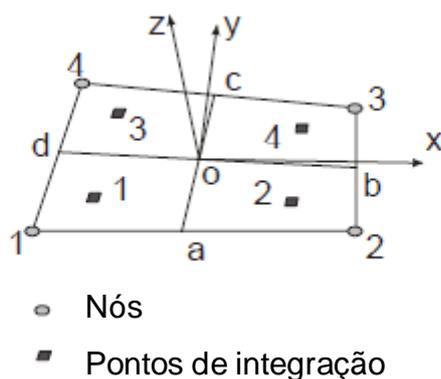


Figura 4.17 - Definição da geometria e da posição dos eixos locais.

Cada elemento de casca pode ter duas a nove camadas e para cada uma existem quatro pontos de integração de Gauss como referido anteriormente. Assim, as três tensões residuais $\sigma_{x,res}$, $\sigma_{y,res}$ e $\tau_{xy,res}$ são introduzidas quatro vezes por cada espessura de cada elemento. Para a

presente dissertação foram consideradas três camadas e conseqüentemente doze pontos de integração.

De acordo com Jandera *et al.* (2008) a influência destas tensões residuais não é significativa, isto é, a sensibilidade às tensões residuais vai diminuindo com o aumento da esbelteza, podendo até ser uma influência positiva para colunas com pequenas esbeltezas, pois aumenta a sua resistência inicial. De notar que apesar de não ser significativa a influência das tensões de flexão estas sobrepõem-se às de membrana (Theofanous e Gradner, 2009).

Geralmente às secções circulares não estão associadas tensões residuais consideráveis uma vez que não está relacionado nenhum processo de fabrico da secção que seja muito favorável à ocorrência das mesmas, no entanto Cruise e Gardner (2008) defendem que as tensões residuais podem ser influenciadas pela solda usada para fechar a folha de material num tubo pondo em causa a consideração ou não de tensões residuais. No presente trabalho optou-se por não se considerar.

4.5.3. Tensões de canto melhoradas

Secções quadrangulares ou retangulares apresentam características específicas que afetam diretamente a resistência final do elemento, nomeadamente o aumento da resistência nos cantos devido ao processo de fabrico (Lopes e Vila Real, 2014; Ashraf *et al.*, 2005).

Para além da quinagem, que é um processo mais manual e menos utilizado, a produção de secções tubulares pode ser feita recorrendo a três métodos, enformados a frio, acabados a quente ou laminados a quente (Steel construction products, 2014). Note que nos laminados a quente o ganho de resistência nos cantos é menor do que nos enformados a frio ou nos acabados a quente onde há um aumento significativo da resistência nos cantos. A metodologia de fabrico dos perfis enformados a frio é mais utilizada e por isso é aquela considerada na presente dissertação. A obtenção de secções retangulares é feita após primeiro a formação das secções circulares e posteriormente através de séries de formas adequadas que vão mudando a forma da secção progressivamente. Esta mudança de forma pode ser feita com acabamento a quente (Figura 4.18b) ou a frio (Figura 4.18a). A diferença entre estes dois acabamentos está no raio do canto da secção que para o processo a frio não é tão apertado como aquele que se consegue obter no processo a quente (Steel construction products, 2014).

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

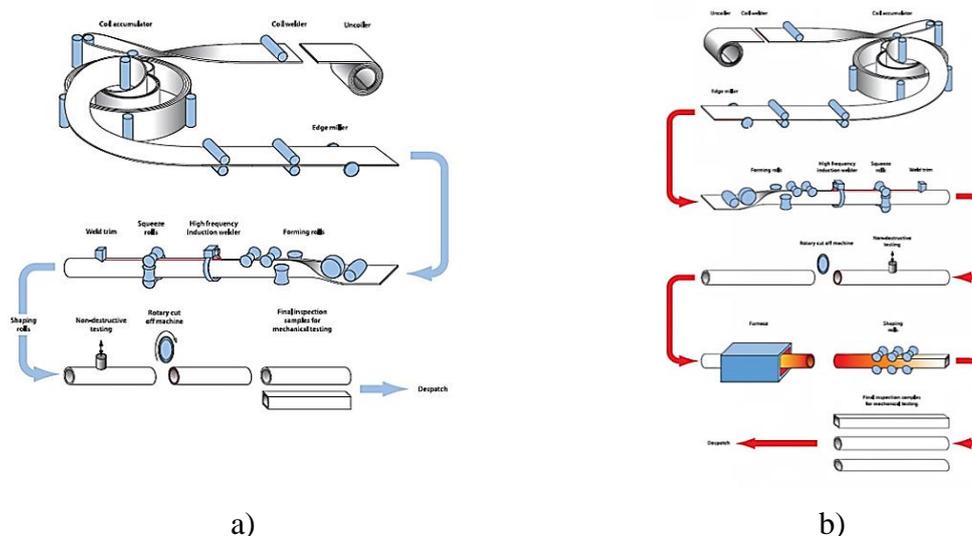


Figura 4.18 - Processo de fabricação de tubulares: a) a frio; b) a quente (Steel construction products, 2014).

Como já apresentado para além do aumento das tensões resistentes nos cantos, a escolha do processo afeta também as tensões residuais na secção. E ambos os fenómenos afetam a resistência final dos elementos estruturais de forma diferente.

As deformações plásticas que ocorrem durante o processo de fabrico a frio resultam num aumento da tensão de proporcionalidade ($\sigma_{0,2}$) e da tensão última (σ_u) do material com uma correspondente queda na ductilidade (Ashraf *et al*, 2005).

Geralmente os fatores que devem ser considerados na previsão da resistência dos cantos durante o processo de fabrico a frio são $\sigma_{0,2}$ e σ_u do material “virgem” (dependem da composição do material), a espessura da placa, t , e o grau de curvatura, ou seja, o raio interior do canto e o ângulo incluído (que neste caso e nos casos de estudo analisados é de 90° , isto é, ângulos retos) (Ashraf *et al*, 2005).

Os estudos realizados por Ashraf *et al*. (2005) referem-se à tensão limite de proporcionalidade na região correspondente aos cantos como aquela que se desenvolve numa distância que vai desde o canto até a um ponto ao dobro da espessura da secção (Figura 4.19 e Figura 4.21) e que é dada por:

$$\sigma_{0,2,c} = \frac{1,881\sigma_{0,2,v}}{(r_i/t)^{0,194}} \quad (4.4)$$

Onde $\sigma_{0,2,v}$ é a tensão limite de proporcionalidade do material (placa), t é a espessura da placa e r_i o raio interno do canto.

Ainda nesse mesmo trabalho, Ashraf *et al.* (2005) procede à definição da tensão última de cedência pela equação (4.5), segundo a qual a previsão desta tensão pode ser obtida mediante três parâmetros, nomeadamente a tensão limite de proporcionalidade do material (placa) ($\sigma_{0,2,v}$), a tensão limite de proporcionalidade dos cantos ($\sigma_{0,2,c}$) e a tensão última do material ($\sigma_{u,v}$).

$$\sigma_{u,c} = 0.75 \sigma_{0,2,c} \left(\frac{\sigma_{u,v}}{\sigma_{0,2,v}} \right) \quad (4.5)$$



Figura 4.19 - Região do canto (Ashraf *et al.*, 2005).

Durante o processo de fabrico de uma secção quadrangular ou retangular 10 a 20% da deformação plástica ocorre na zona dos cantos. Como consequência deste processo de fabrico a frio, a tensão de cedência pode aumentar o seu valor 20 a 100% (Jandera e Machacek, 2007).

A pesquisa de Ashraf *et al.* (2005) resultou em várias aproximações para calcular a tensão limite de proporcionalidade nos cantos das secções e desta forma incorporar o seu valor no cálculo na resistência das secções, minimizando o risco de subdimensionamento.

Destas aproximações, para além da equação acima descrita resulta ainda uma mais simplista que estima a tensão limite de proporcionalidade do canto para secções formadas por processo mecânicos (rolos) através de $\sigma_{0,2,c} = 0,82 \sigma_{u,f}$, onde $\sigma_{u,f}$ é a tensão limite de proporcionalidade

da parte plana da secção. De notar que esta equação só é válida para aços austeníticos e como dito em cima para ângulos retos (Jandera e Machacek, 2007).

Lopes e Vila Real (2014) verificaram que a influência da resistência dos cantos em colunas de aço inoxidável axialmente comprimidas sujeitas a elevadas temperaturas é alta. Para tal utilizaram uma secção SHS 200x200x4 de aço inoxidável da classe 1.4301 a 500°C obtendo o resultado apresentado na Figura 4.20, onde se vê que as tensões têm uma influência positiva na resistência final.

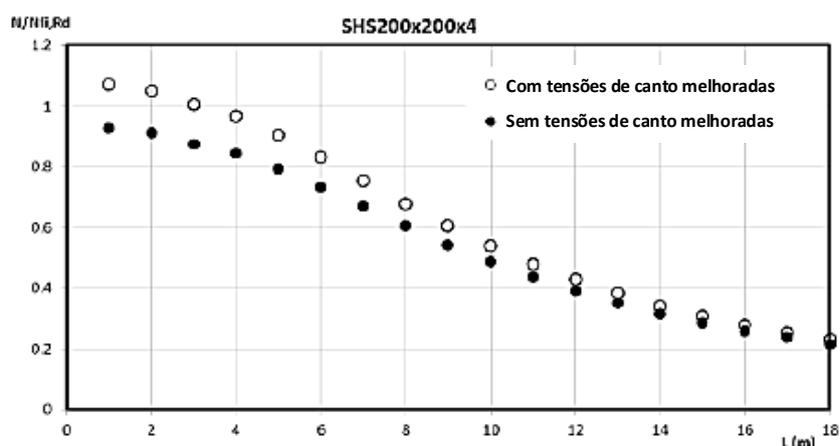


Figura 4.20 - Influência da resistência dos cantos na resistência final do elemento (adaptado de Lopes e Vila Real, 2014).

Para as secções retangulares da presente dissertação foi feito um estudo semelhante ao de Lopes e Vila Real (2014) apresentado no ponto 5.2.3.

Este foi realizado baseado nas afirmações descritas em cima e tendo em conta as considerações feitas por Ashraf (2005). Assim, e de acordo com as equações descritas anteriormente (Equação (4.4) e Equação (4.5)), para cada tipo de aço foram consideradas as tensões de cedência e última representadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores para os diferentes aços da tensão de cedência (f_y) e da tensão última (f_u).

	$\sigma_{0,2,c}$ (MPa)	$\sigma_{u,c}$ (MPa)
Austenítico	395	734
Ferrítico	470	635
Austenítico - Ferrítico	865	930

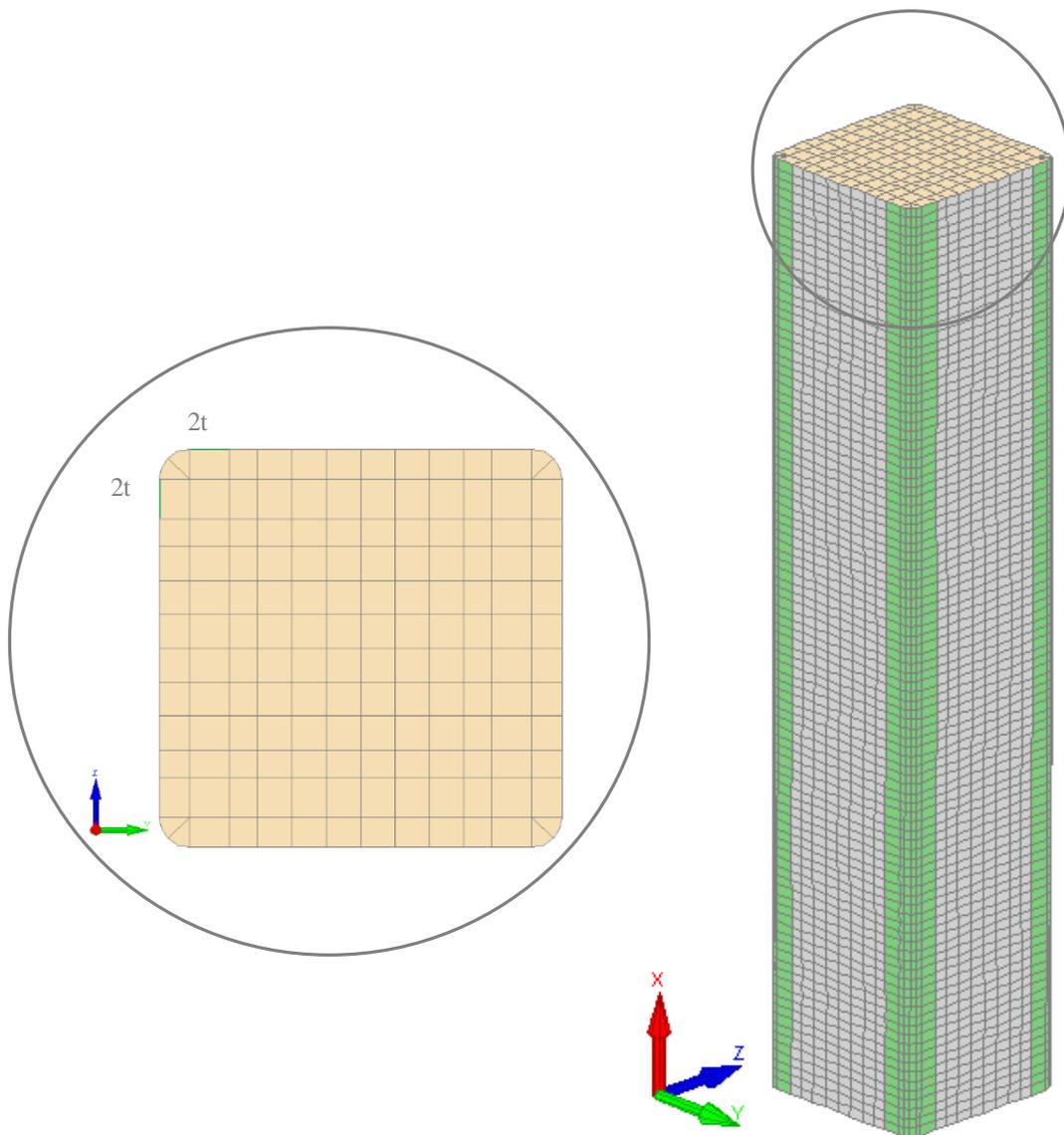


Figura 4.21 - Representação da resistência dos cantos da secção SHS 200x200x10.

Capítulo 5

Estudo Paramétrico

Capítulo 5. Estudo Paramétrico

- 5.1. Considerações gerais
- 5.2. Análise de sensibilidade
 - 5.2.1. Influência das imperfeições
 - 5.2.2. Influência das tensões residuais
 - 5.2.3. Influência das tensões de canto
- 5.3. Análise da precisão das propostas de cálculo
- 5.4. Avaliação estatística das propostas de cálculo
 - 5.4.1. Análise do EC3
 - 5.4.2. Análise da proposta da UA
 - 5.4.3. Análise da proposta de Gardner e Ng

Capítulo 5. Estudo Paramétrico

5.1. Considerações gerais

Após a definição do modelo numérico, segue-se a comparação entre a metodologia de dimensionamento preconizada pelo EC3, a proposta para o cálculo da resistência de perfis I de classe 1 e 2 denominada na presente dissertação como proposta da UA e a proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng denominada como proposta de Gardner e Ng e os resultados obtidos pelo SAFIR. Essa comparação é facilmente feita através de gráficos (para todas as secções, tipo de aço e classes em causa) cujas ordenadas são dadas pelo valor de χ_{fi} e as abcissas pelo valor de $\bar{\lambda}_{\theta}$.

O valor destas duas variáveis vai depender da classe a ser analisada uma vez que para as classes 1 e 3 o valor da carga última obtida no SAFIR correspondente à resistência da secção pode ser excessivamente superior à carga correspondente à tensão de cedência do material devido à lei constitutiva do mesmo (considerar endurecimento), assim optou-se por utilizar a resistência de cálculo obtida do EC3 para a definição das diferentes variáveis. Já nas secções de classe 4, uma vez que a cedência do material se dá antes deste atingir a tensão de cedência por ocorrência de encurvadura local, optou-se pela utilização dos valores obtidos pelo SAFIR.

De notar que as restantes propostas em análise são, em termos de definição de variáveis, semelhantes à do EC3 pelo que os tratamentos dos resultados numéricos seguem as mesmas premissas exceto a classe 3 que no caso da proposta de Gardner e Ng altera ligeiramente. Esta sugere a utilização do fator de redução relativo à tensão definida pelo limite de proporcionalidade obtido para uma extensão de 0.2% ($k_{p0.2,\theta}$) à semelhança do proposto pelo Eurocódigo 3 parte 1-2 para as classes 4 de aço inoxidável.

O cálculo do fator de redução χ_{fi} é feito através do quociente entre duas variáveis: a carga última obtida pelo SAFIR e o esforço axial máximo resistente da secção para a temperatura considerada. No caso da representação das diferentes curvas, o fator é o calculado através das diferentes metodologias de cálculo.

O valor da esbelteza ($\bar{\lambda}_{\theta}$) foi obtido mediante duas maneiras associadas à classe em estudo como explicado anteriormente. Assim, para classe 1 e 3 foi feito o cálculo segundo o EC3

ou, no caso da classe 3, segundo a proposta de Gardner e Ng. Para a classe 4 a metodologia é a mesma da anterior apenas mudando a resistência da secção que neste caso foi obtida através do SAFIR.

5.2. Análise de sensibilidade

Foi feita inicialmente uma análise de sensibilidades para perceber e comprovar a influência que os diferentes parâmetros têm no elemento. Para tal, foram realizados testes para secções transversais de classe 1 e 4 quadrangulares e circulares de aço austenítico à temperatura de 500 °C fazendo variar primeiramente as imperfeições, isto é, para a mesma secção foi analisado o caso de não serem tidas em conta as imperfeições, de considerar apenas as imperfeições locais ou globais e de considerar ambos os tipos (sem considerar tensões de canto e tensões residuais). Seguidamente estudou-se o efeito das tensões de canto melhoradas para as mesmas secções e comprimentos tendo em conta ambas as imperfeições e finalmente o efeito das tensões residuais comparando o efeito da tensão de flexão e de membrana individualmente e em conjunto considerando ambas as imperfeições a atuar e com e sem tensões de canto melhoradas.

5.2.1. Influência das imperfeições

O comportamento da coluna é visivelmente afetado com as imperfeições globais em ambas as secções transversais. Estas imperfeições são as responsáveis pela aproximação do comportamento dos elementos ao proposto pelo EC3 tanto para secções de classe 1 como de classe 4. De notar que para a classe 1 (Figura 5.1 e Figura 5.3) a influência das imperfeições locais é pouco significativa, o que seria de esperar se considerarmos que se tratam de secções com menos apetência para a ocorrência de encurvadura local. O mesmo não se passa com as secções de classe 4 (Figura 5.2 e Figura 5.4) onde a grande esbelteza da secção se reflete numa diminuição da resistência da secção quando apenas aplicadas as imperfeições geométricas locais. Essa influência é mais notória nas secções retangulares.

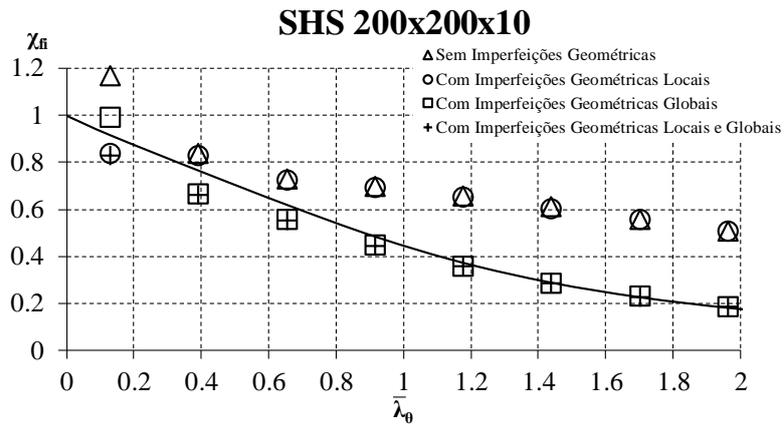


Figura 5.1 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções quadrangulares de classe 1.

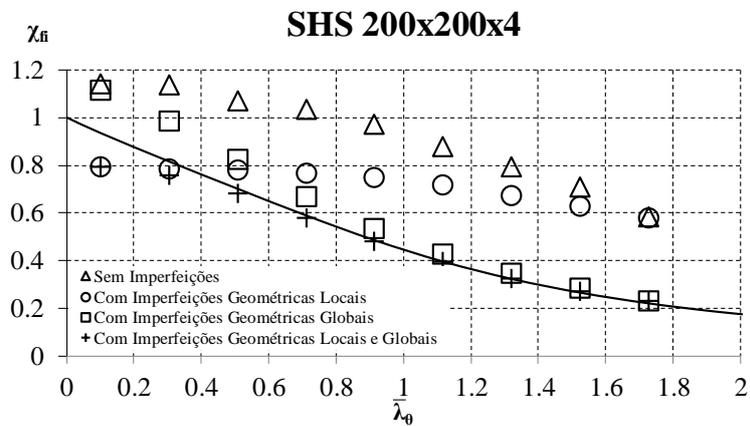


Figura 5.2 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções quadrangulares de classe 4.

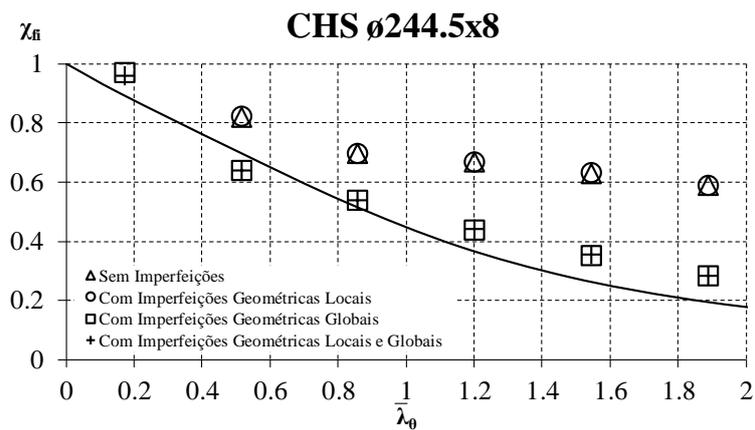


Figura 5.3 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em secções circulares de classe 1.

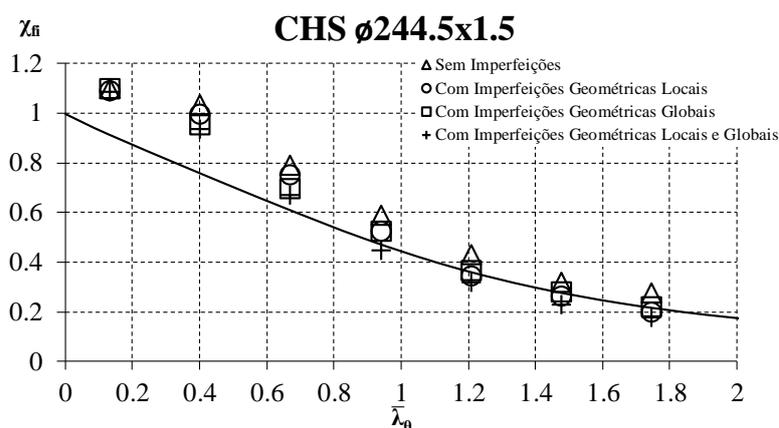


Figura 5.4 - Influência das imperfeições geométricas locais e globais em seções circulares de classe 4.

5.2.2. Influência das tensões residuais

A influência das tensões residuais no comportamento dos elementos de secção quadrangular é visivelmente pequena para ambas as classes analisadas (Figura 5.5 e Figura 5.6).

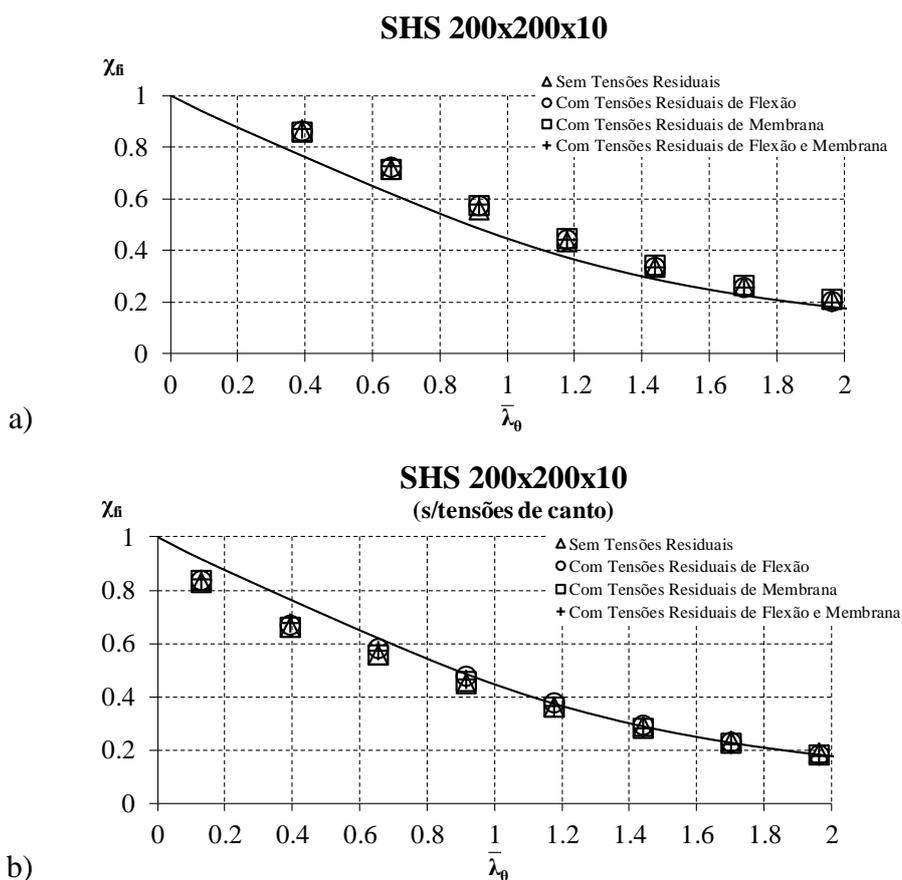


Figura 5.5 - Influência das tensões residuais em colunas axialmente comprimido com seção de classe 1: a) com tensões de canto melhoradas; b) sem tensões de canto melhoradas.

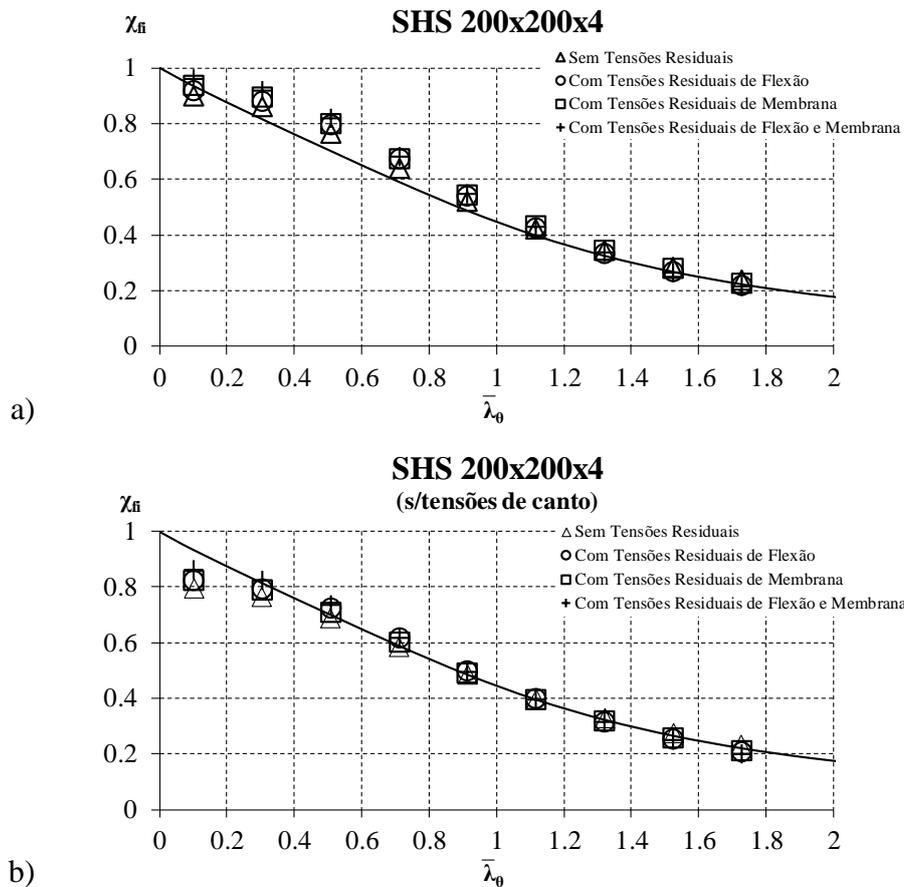


Figura 5.6 - Influência das tensões residuais em colunas axialmente comprimido com secção de classe 4: a) com tensões de canto melhoradas; b) sem tensões de canto melhoradas.

As Figura 5.5 e Figura 5.6 demonstram uma sobreposição dos resultados obtidos para as diferentes situações em estudo, considerando ou não as tensões de canto melhoradas. Para além da reduzida influência que estas têm nos resultados consegue-se denotar um decréscimo na resistência dos elementos para valores de esbelteza intermédios e quando estão aplicadas na secção ambas as tensões residuais. Deste modo e à semelhança de Jandera e Machacek (2014) verifica-se que para valores de esbelteza até 1.3 as tensões residuais têm uma influência positiva na resistência da secção. Para esbeltezas superiores é evidente uma influência negativa, contribuindo para uma redução dessa mesma resistência.

5.2.3. Influência das tensões de canto melhoradas

À semelhança dos resultados obtidos por Lopes e Vila Real (2014) verificou-se a grande influência que a resistência dos cantos tem nas colunas com secções quadrangulares de classe 1 e 4 (Figura 5.7 e Figura 5.8).

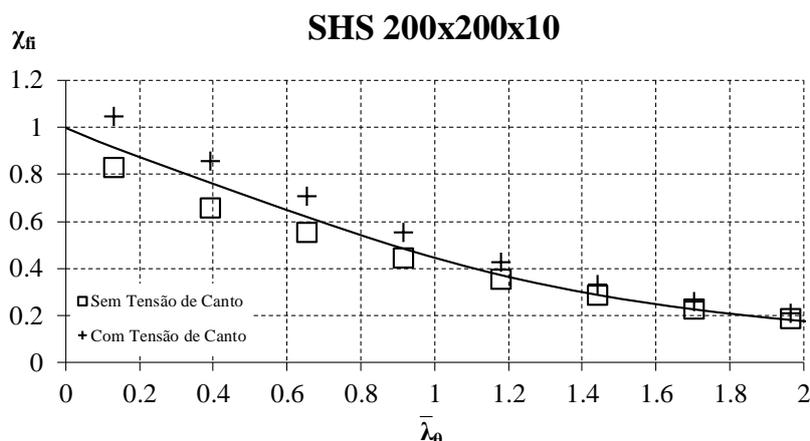


Figura 5.7 - Influência da tensão de cantos em colunas axialmente comprimido com secção de classe 1.

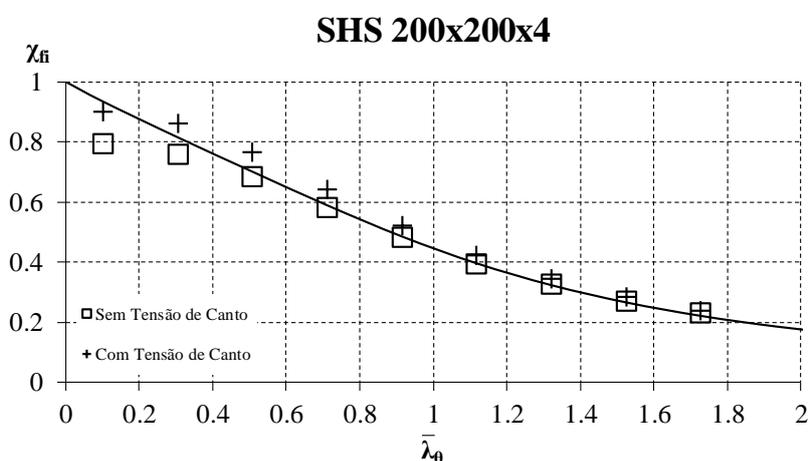


Figura 5.8 - Influência da tensão de cantos em colunas axialmente comprimido com secção de classe 4.

Apesar de se conseguir verificar a influência em ambos os casos, esta é mais notória na secção de classe 1. Quando se têm em conta o ponto 4.5.3 da presente dissertação percebe-se que para maiores espessuras, a resistência das secções é maior, uma vez que a tensão de canto é maior quanto maior for a tensão do material, aliado ao facto de esta se desenvolver ao longo de uma distância que vai desde o canto e se estende até o dobro da espessura.

5.3. Análise da precisão das propostas de cálculo

No presente capítulo procede-se à análise da influência do tipo de aço e da secção transversal comparando-os com a formulação do Eurocódigo, com a proposta para o cálculo da resistência de perfis I de classe 1 e 2 denominada na presente dissertação como proposta da UA e com a proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng denominada como proposta de Gardner e Ng.

Esta comparação será feita através de elementos com secções transversais quadrangulares e circulares de classes 1 e 4 (denominados nos gráficos como C1 e C4 respetivamente) e considerando os três tipos de aço inoxidável em estudo. Em Anexo encontram-se ainda representados os resultados respeitantes às secções de classe 3 e as restantes de classe 4. De notar que para elementos com secções de classe 3 a proposta de Gardner e Ng sugere a utilização da tensão de proporcionalidade a 0.2%. Esta alteração vai interferir também com os resultados numéricos, uma vez que com a alteração do fator de redução, a resistência da secção e o cálculo da esbelteza sofrem também modificações, conseqüentemente há uma variação nos resultados numéricos que leva à criação de um gráfico diferente para a análise desta classe 3 mais concretamente da proposta de Gardner e Ng.

Antes da análise gráfica de resultados são apresentados dois exemplos de colapso da estrutura (Figura 5.9 e Figura 5.10). Para as diferentes variáveis e propriedades em estudo, o tipo de colapso é diferente, no entanto estes demonstraram serem os mais representativos entre os resultados obtidos com ilustração de ambos os fenómenos de encurvadura local e global e razão pela qual são seguidamente apresentados.

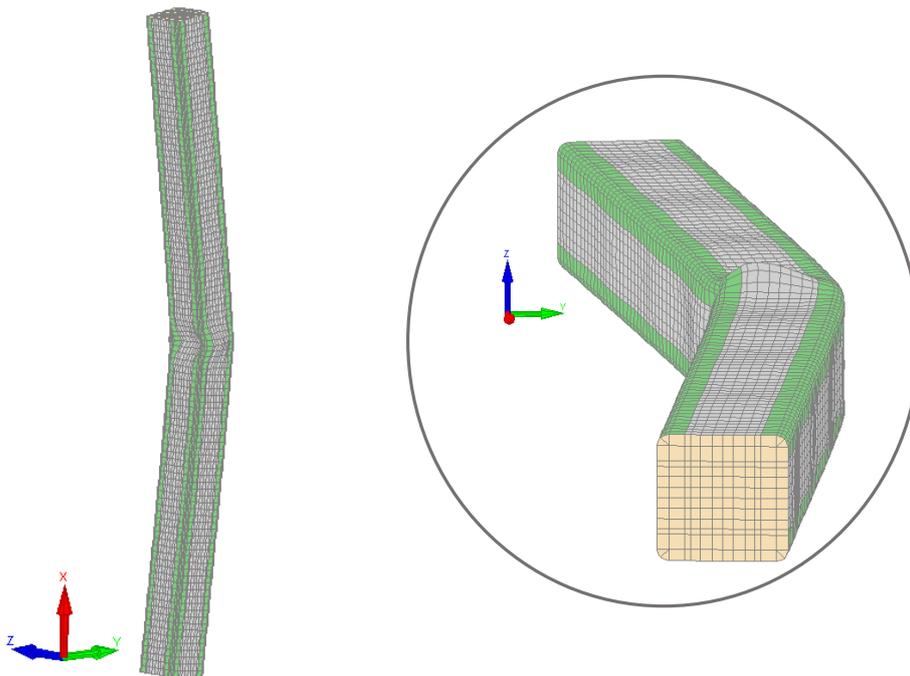


Figura 5.9 - Instante da carga última para uma coluna de secção transversal quadrangular e aço inoxidável 1.4462 com 3 metros de vão.

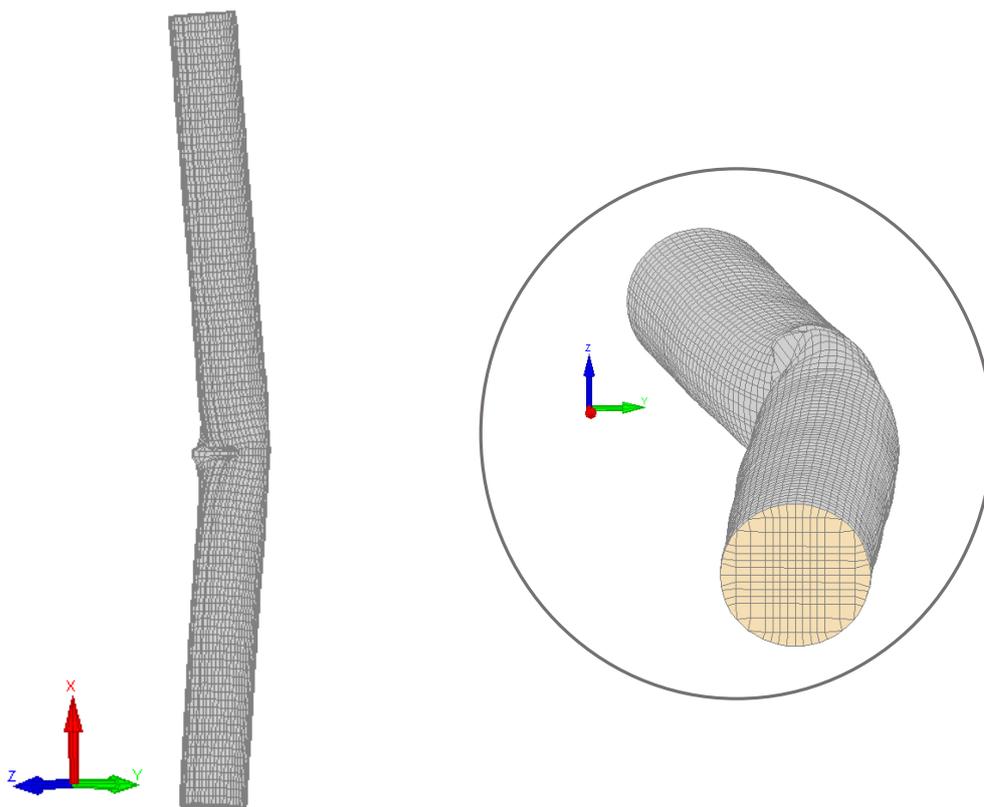


Figura 5.10 - Instante da carga última para uma coluna de secção transversal circular e aço inoxidável 1.4462 com 3 metros de vão.

Da Figura 5.11 à Figura 5.14 encontram-se representadas as curvas das diferentes propostas, comparandas com os resultados numéricos obtidos para secções quadrangulares e circulares, considerando as diferentes temperaturas e relativas ao aço inoxidável da classe 1.4301.

É visível nos gráficos representados pelas Figura 5.11 e Figura 5.12 que a EN 1993-1-2 se encontra do lado da segurança comparativamente aos resultados numéricos obtidos. Para esbeltezas mais próximas de dois os resultados numéricos aproximam-se mais dos valores da curva correspondente ao EC3.

A proposta da UA é a mais conservativa das três em análise, constatando-se que todos os resultados obtidos estão em segurança o que se pode justificar por ter sido desenvolvida para perfis I de classe 1 e 2.

A proposta de Gardner e Ng é a mais insegura das três. Apesar de acompanhar o comportamento e a linha dos resultados obtidos, estes situam-se na sua maioria abaixo ou sobrepostos a essa linha que representa a proposta.

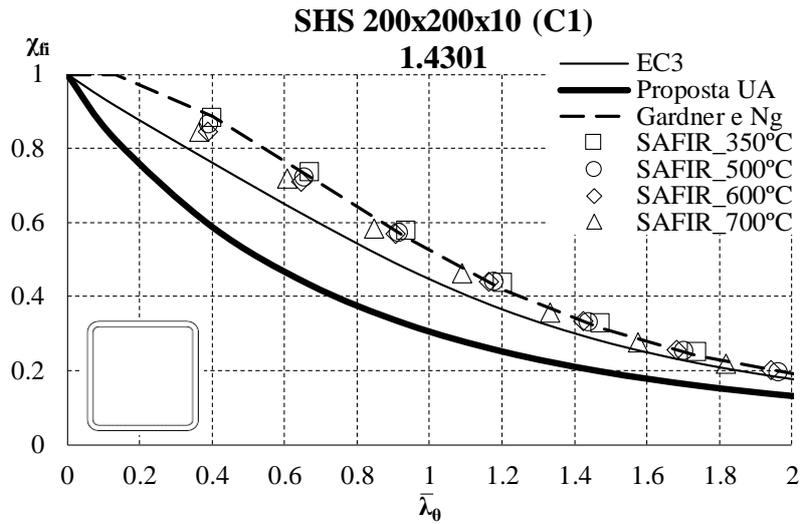


Figura 5.11 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

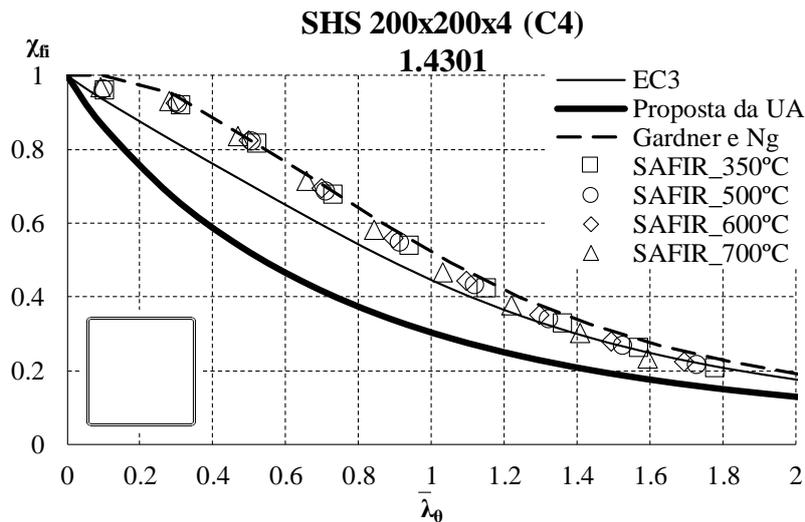


Figura 5.12 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

No gráfico representado pela Figura 5.13 verifica-se que à medida que o valor da esbelteza aumenta existe um aumento da segurança dos valores relativos à EN 1993-1-2. A Proposta da UA continua a ser muito conservativa. No entanto, e contrariamente ao verificado para as secções quadrangulares, a proposta de Gardner e Ng mostra-se segura para valores de esbelteza menores. Já na Figura 5.14 o aumento do valor da esbelteza coloca em causa a segurança dos valores obtidos através da EN 1993-1-2 e da proposta de Gardner e Ng. A proposta da UA demonstra-se sempre conservativa.

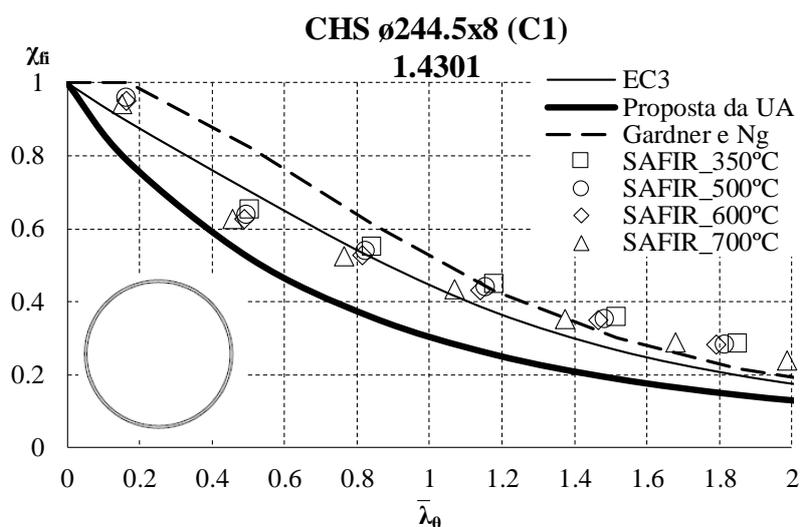


Figura 5.13 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

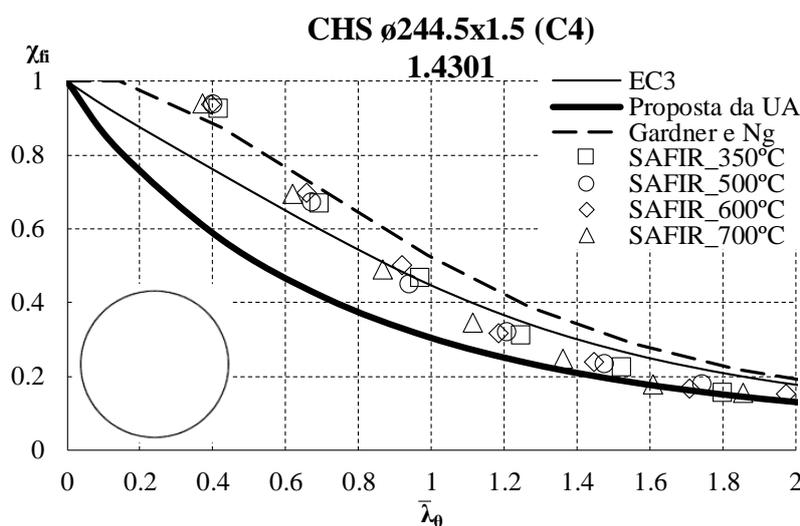


Figura 5.14 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

Quando a análise recai sobre as curvas da proposta da EN 1993-1-2 e dos resultados numéricos obtidos para elementos em aço inoxidável da classe 1.4003 com secções quadrangulares e circulares, considerando as diferentes temperaturas, os resultados sofrem algumas alterações.

Para esta classe de aço os resultados numéricos têm um comportamento semelhante ao obtido para a classe de aço 1.4301 à exceção dos resultados à temperatura de 700°C que se encontram inseguros em ambas as classes de secção para secções quadrangulares (Figura 5.15 e Figura 5.16).

O comportamento das restantes propostas é muito semelhante ao anteriormente descrito, sendo a proposta da UA bastante conservativa e a de Gardner e Ng insegura. No entanto para valores da esbelteza menores e para as temperaturas de 500°C e 600°C esta última proposta está do lado da segurança para a classe 1.

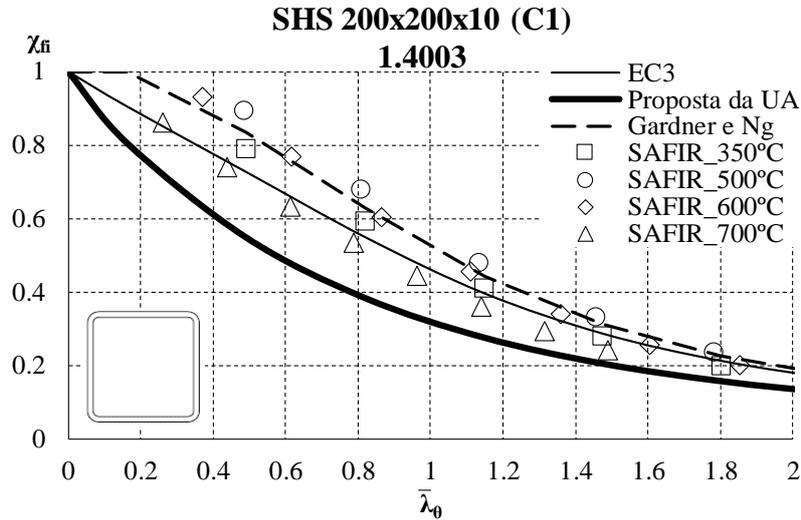


Figura 5.15 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

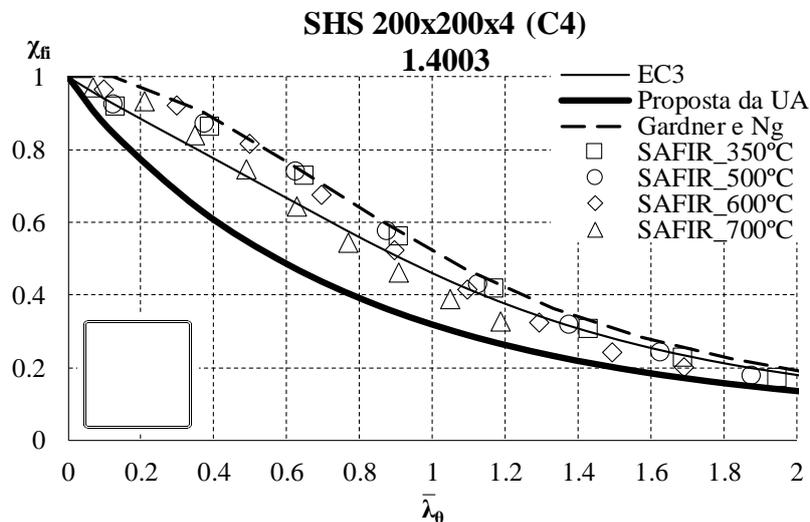


Figura 5.16 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

À semelhança do que acontece nas secções quadrangulares para a classe 1 a norma EN 1993-1-2 encontra-se em segurança à exceção dos resultados à temperatura de 700°C que da mesma forma se encontram inseguros (Figura 5.17e Figura 5.18). Este comportamento em relação aos resultados relativos à temperatura de 700°C é também verificado na proposta da

UA que apesar de para os restantes ser bastante segura para os resultados a essa temperatura esta pode ser considerada insegura visto que estes se localizam quase sobrepostos.

Realça-se ainda que para as secções circulares de classe 4 (Figura 5.18) apenas os resultados para valores de pequenas esbeltezas se apresentam em segurança em relação às três propostas. À medida que há um aumento da esbelteza, apesar de “acompanharem” a linha proposta, os resultados vão ficando inseguros para todas as temperaturas e um pouco para todas as propostas excetuando casos pontuais onde mediante a proposta o resultado está ou não em segurança.

A dispersão dos resultados em ambas as secções para as diferentes temperaturas deve-se ao diferente comportamento do fator de redução relativo ao aço 1.4003 quando comparado com as restantes classe de aço inoxidável. Este fator, representado sobre a forma de gráfico na Figura 3.7 e Figura 3.8, sofre um decréscimo acentuado no seu valor entre as temperaturas de 600 e 1000°C independentemente da classe da secção em análise, influenciando os resultados relativos à resistência do elemento nessa gama de temperaturas.

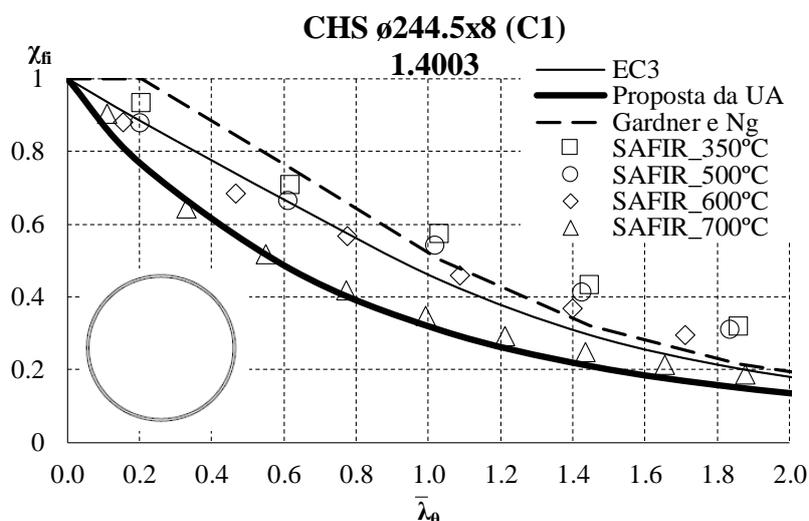


Figura 5.17 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

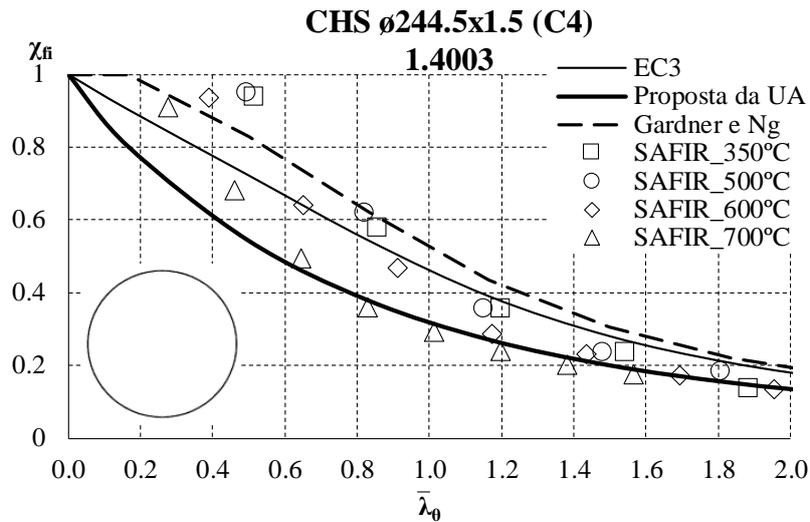


Figura 5.18 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

Finalmente e para a classe de aço inoxidável austenítico – ferrítico ou duplex (1.4462) é facilmente verificado que a EN 1993-1-2, a proposta da UA e a proposta de Gardner e Ng estão todas do lado da segurança sendo para a classe 1 bastante conservativas quando a secção a tratar é quadrangular (Figura 5.19). Para os elementos de classe 4 (Figura 5.20) existe uma notória sobreposição dos resultados numéricos em relação ao obtido pelo proposto no EC3 e por Gardner e Ng aumentando assim probabilidade de insegurança dos resultados. No entanto a proposta da UA continua a demonstrar-se segura.

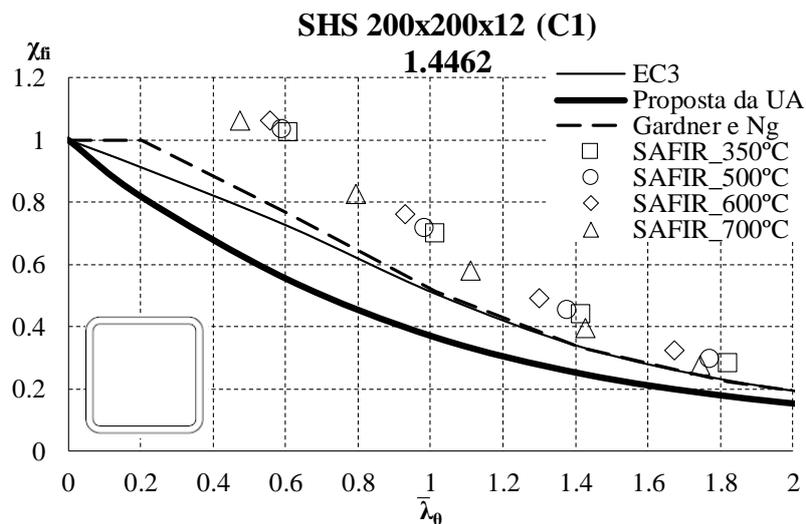


Figura 5.19 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

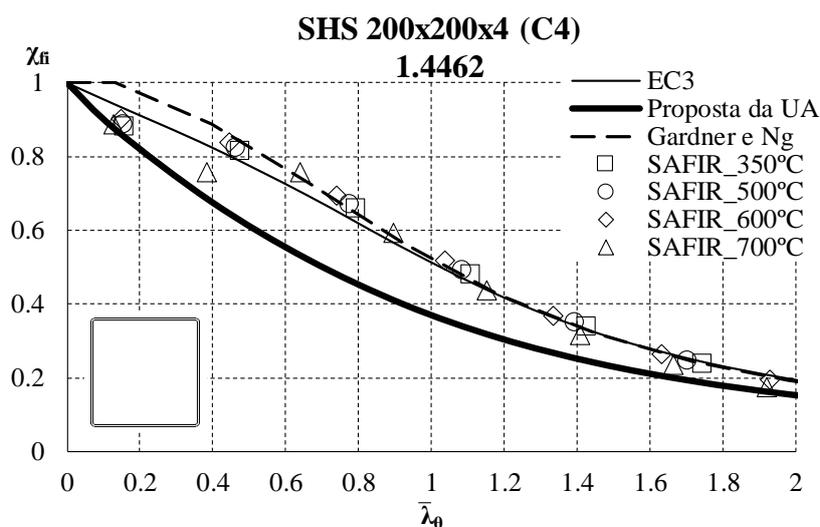


Figura 5.20 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

Se a secção a tratar for circular e considerando a mesma classe de aço os resultados obtidos da proposta da EN 1993-1-2 estão do lado da segurança e de maneira bastante conservativa principalmente para esbeltezas de maior valor e para ambas as classes do elemento. O descrito anteriormente mantêm-se quando as propostas em análise são a da UA e a de Gardner e Ng tendo especial atenção nesta última aos resultados para menores esbeltezas que estão mais inseguros.

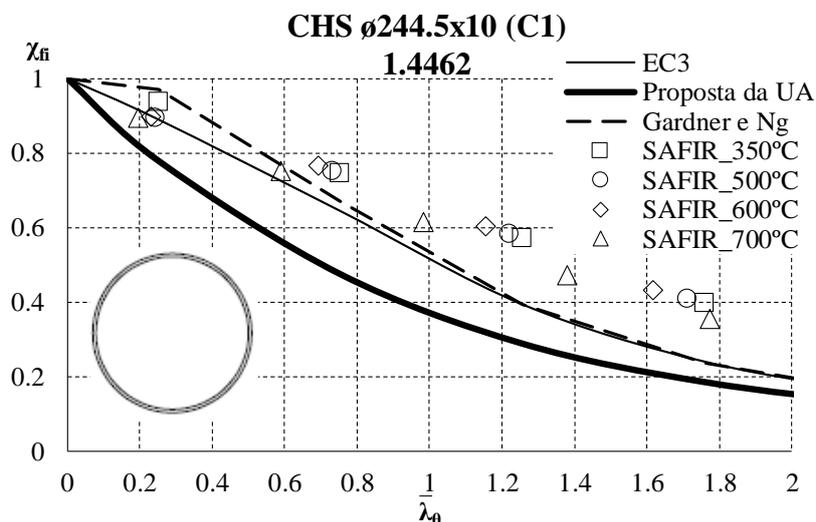


Figura 5.21 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

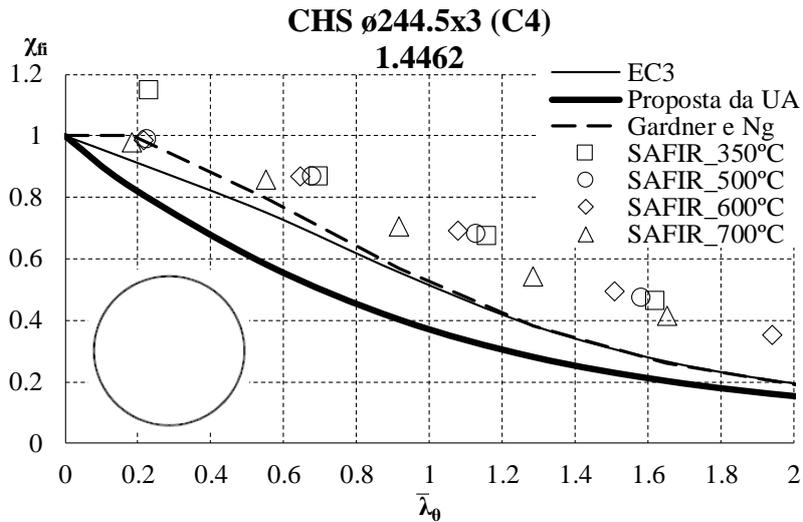


Figura 5.22 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

Após a análise de todos os resultados é facilmente verificável que o aço inoxidável duplex (1.4462) é aquele que apresenta valores de maior resistência e consequentemente os resultados mais seguros. Pelo contrário é o aço inoxidável ferrítico (1.4003) que apresenta maior dispersão de valores, ou seja, existe uma grande variação entre os resultados obtidos para diferentes temperaturas. Este fenómeno pode ser justificado pelo diferente comportamento do fator de redução da tensão de cedência para esta classe de aço descrito no subcapítulo 2.3 da presente dissertação.

No que toca à análise das diferentes propostas facilmente se verifica que a proposta da UA é de longe a mais conservativa tendo como exceção os resultados relativos ao aço de classe 1.4003 (ferrítico) onde os resultados obtidos para a temperatura de 700°C se encontram sobrepostos pondo em causa a segurança da mesma. Por outro lado é a proposta de Gardner e Ng que se apresenta como a mais insegura e com poucas exceções a esta condição de insegurança.

As secções de classe 4, principalmente as mais esbeltas, apresentam resultados não coerentes e muito inseguros quando relacionados com a proposta da EN1993-1-2 como se pode verificar pelos gráficos apresentados na Figura 5.23 e Figura 5.24. Este facto pode dever-se à maior suscetibilidade a fenómenos de encurvadura local tal como concluiu Couto (2015) num estudo para vigas com classe 4 em I de aço carbono ao fogo. Neste estudo Couto (2015) recomenda a alteração de alguns pressupostos do Eurocódigo de maneira a aumentar a precisão do cálculo deste tipo de secções que em estudos futuros poderão ser consideradas.

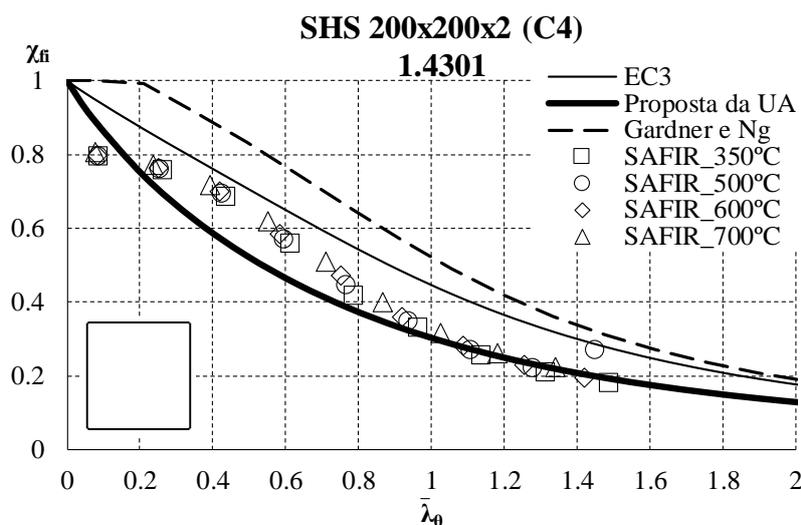


Figura 5.23 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

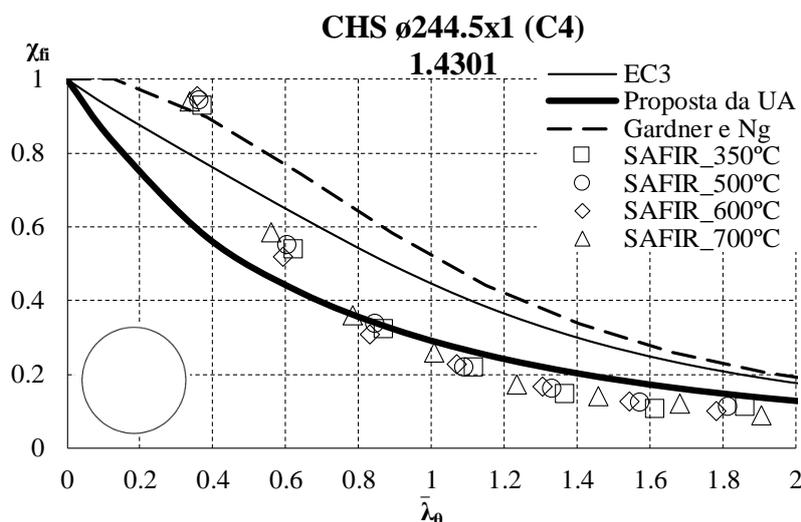


Figura 5.24 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

As considerações descritas relativamente às secções transversais de classe 4 muito esbeltas vão influenciar fortemente os resultados obtidos da análise estatística, uma vez que numericamente são resultados que se afastam da proposta em análise e consequentemente são na sua maioria inseguros.

5.4. Avaliação estatística das propostas de cálculo

Com o objetivo de validar o estudo numérico realizado, foi feita uma análise estatística comparando os resultados obtidos através do SAFIR com os resultantes das três abordagens diferentes: através do EC3, da proposta para o cálculo da resistência de perfis I de classe 1 e

2 denominada na presente dissertação como proposta da UA e da proposta de Leroy Gardner e Kai Tat Ng denominada como proposta de Gardner e Ng.

É possível estabelecer uma razão entre o valor analítico do esforço axial último ($N_{ult,i}^{Analítico}$) das diferentes propostas e o correspondente esforço axial obtido através do SAFIR. Este quociente pode também ser estabelecido entre o valor analítico e o relativo ao SAFIR do coeficiente de encurvadura como descrito na equação (5.1).

$$x_i = \frac{N_{ult,i}^{Analítico}}{N_{ult,i}^{SAFIR}} = \frac{\chi_i^{Analítico}}{\chi_i^{SAFIR}} \quad (5.1)$$

Esta razão permite uma perceção dos resultados em termos estatísticos. Tendo por base o tratamento destes consegue-se calcular parâmetros como o número de amostras, a média, o desvio padrão e o número de amostras em segurança ou fora de segurança relativamente aos resultados do SAFIR.

A elaboração dos gráficos é feita com base numa linha auxiliar correspondente ao limite de segurança entre as propostas e os resultados numéricos. As restantes duas linhas a tracejado correspondem a 10% deste último limite, tanto superior como inferior, atendendo a que se trata de linhas meramente de referência e se encontram representadas apenas para uma melhorar a visualização gráfica.

A representação dos resultados é feita através de pontos cujas coordenadas são o valor do coeficiente de encurvadura (obtido através do EC3 e das outras duas propostas e do SAFIR). Estes encontrando-se divididos por classe, tipo de aço e secção transversal.

5.4.1. Análise do EC3

É apresentado graficamente na Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30 os resultados obtidos da comparação entre o proposto pelo EC3 e o numérico. É visível que as diferentes classes da secção transversal e o tipo de aço têm uma grande influência nos resultados de ambas as secções.

Quando esta análise recai sobre as secções quadrangulares é notória a diferença entre as diferentes classes. No caso das secções transversais de classe 1 e 3 (denominadas nas tabelas seguintes como C1 e C3 respetivamente) a maioria dos resultados encontra-se em segurança (os pontos localizam-se abaixo da linha de referência) e com um desvio padrão inferior ao

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

obtido nas secções circulares (cerca de 0.10) notando também uma maior quantidade de amostras fora de segurança no aço ferrítico (1.4003). O valor da média é inferior a um e apenas 19% dos resultados estão fora da segurança. Quando comparado com a classe 4 (denominada nas tabelas seguintes como C4) o número de amostras fora da segurança aumenta mais do dobro rondando os 84% pelo que quase todos os pontos se localizam acima da linha de referência apesar de o desvio padrão ter um valor relativamente reduzido. Estes valores percentuais são relativos aos resultados obtidos para as diferentes classes da secção transversal mas considerando as três classes de aço. O valor da média superior a um vem apenas confirmar que os resultados não se encontram em segurança.

A tendência irregular principalmente relativa às secções transversais de classe 4 deve-se aos resultados obtidos para as secções mais esbeltas como referido no subcapítulo 5.3.

Tabela 5.1 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados do proposto no EC3 e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrangular.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.93	1.23	0.99	1.38	0.83	1.76
Desvio-Padrão	0.06	0.35	0.10	0.48	0.07	0.68
Amostras fora da segurança	10 (14%)	51 (71%)	31 (43%)	59 (82%)	0 (0%)	72 (100%)

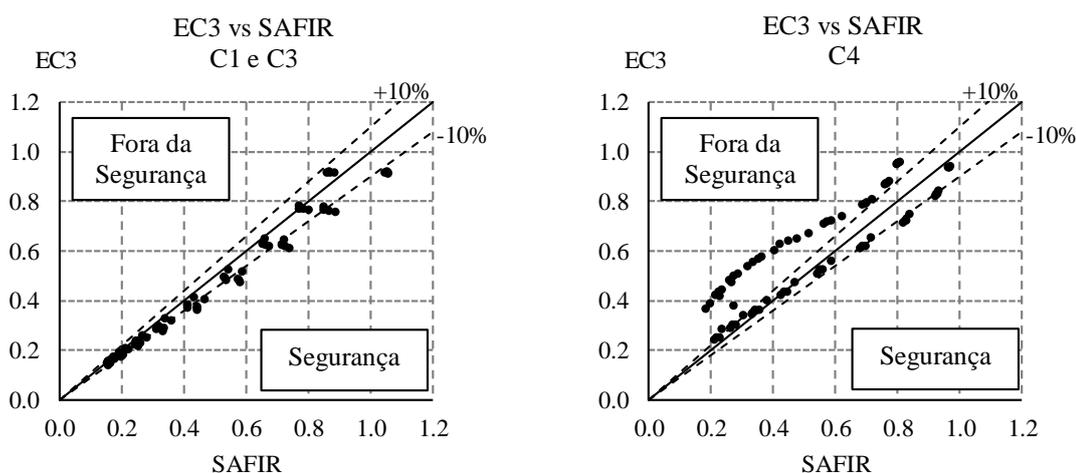


Figura 5.25 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangulares e aço austenítico (1.4301).

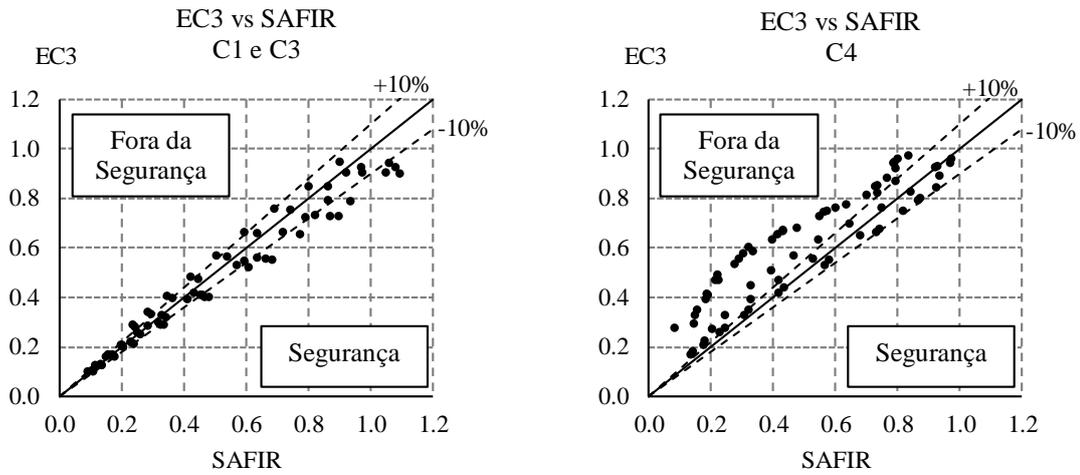


Figura 5.26 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).

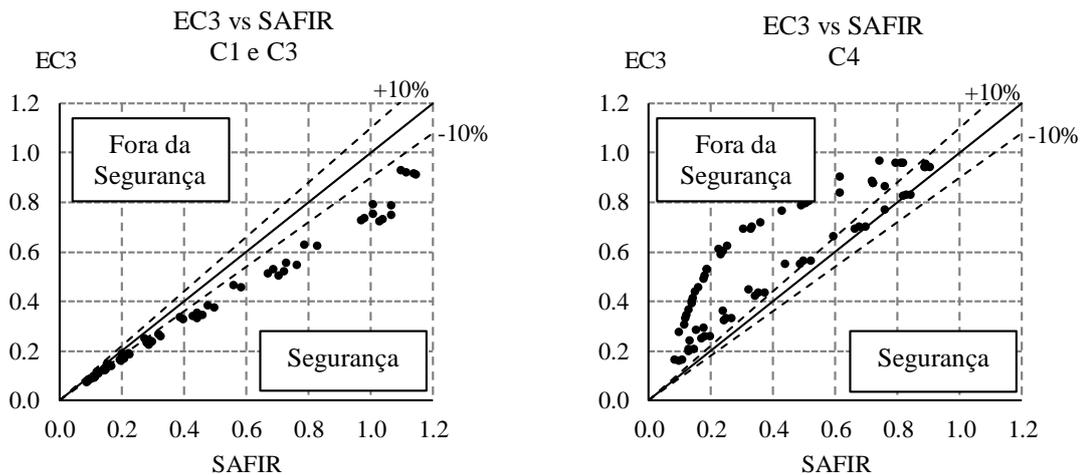


Figura 5.27 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

De forma análoga ao realizado para as secções transversais quadrangulares também são representados na Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27 e Tabela 5.1 os resultados obtidos da comparação do proposto pelo EC3 e os numéricos para as secções circulares. No caso da secção circular e da classe 1 e 3, e à semelhança do que acontece nas secções quadrangulares, a maioria dos pontos encontram-se em segurança (os pontos estão localizados abaixo da linha de referência) sendo que o desvio-padrão é baixo para os três aços. No entanto é de notar que existe uma quantidade significativa de pontos acima desta linha limite quando o

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

aço é o ferrítico (1.4003). Ainda relativamente a estas secções a média dos pontos é inferior a um confirmando-se mais uma vez a segurança e apenas 26% das amostras de classe 1 e 3 considerando todos os aços se encontram fora da segurança sendo que o número mais alto é o correspondente às amostras relativas ao aço ferrítico (1.4003). Se verificarmos a classe 4 para a mesma secção, mais uma vez, o número de amostras fora de segurança, quando se considera todos os aços, aumenta mais do dobro (60%) resultando num número elevado de pontos acima da linha de referência e numa média de valores superior a um apesar de o desvio padrão se manter relativamente pequeno (consultar Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados do proposto no EC3 e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.90	1.28	0.97	1.43	0.68	1.33
Desvio-Padrão	0.16	0.45	0.24	0.55	0.16	0.67
Amostras fora da segurança	19 (26%)	48 (67%)	33 (46%)	53 (74%)	5 (7%)	28 (39%)

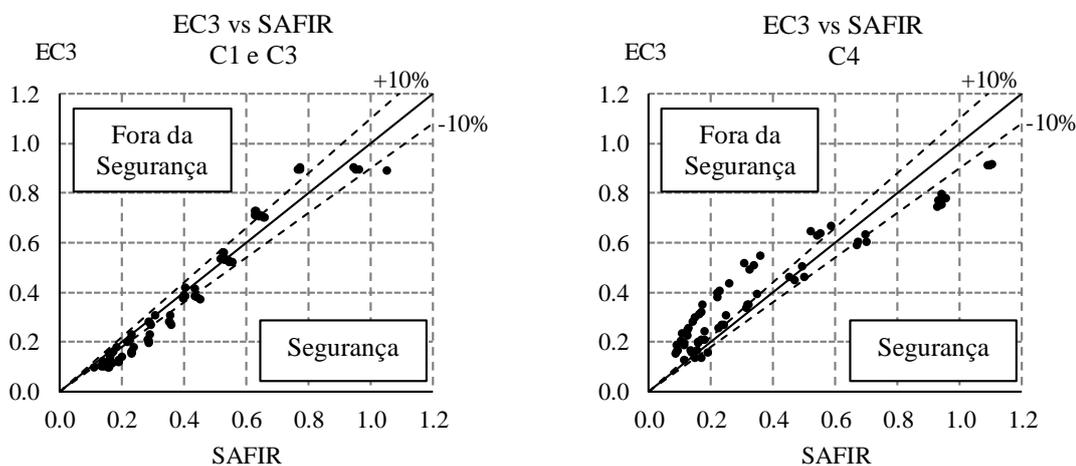


Figura 5.28 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).

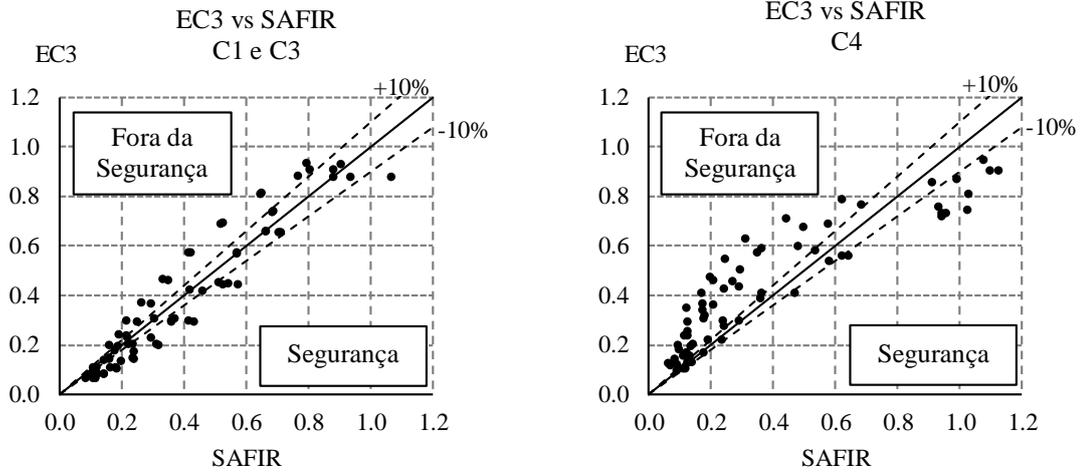


Figura 5.29 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).

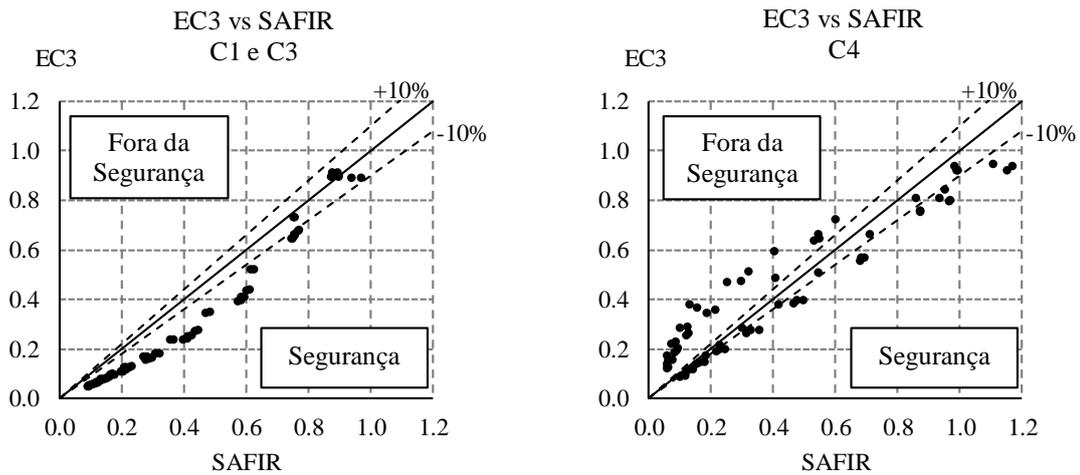


Figura 5.30 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

5.4.2. Análise da proposta da UA

Também nesta proposta a diferença entre classes e tipos de aço se reflete nos resultados e é bastante notória. Esta proposta é aquela que entre as três apresenta resultados mais positivos a nível estatístico para ambas as secções transversais. Os gráficos representados da Figura

5.31 até à Figura 5.36 dizem respeito à análise de ambas as secções transversais (quadrangular e circular) segundo a proposta da UA descrita no ponto 3.3.1.

Existe uma diferença significativa entre os resultados da classe 1 e 3 e os da classe 4. Nas secções quadrangulares de classe 1 e 3 nenhuma das amostras se encontra fora da segurança para os três tipos de aço e a média nesses três tipos tem um valor bastante inferior a um reforçando a ideia de segurança como se pode verificar na Figura 5.31, Figura 5.32 e Figura 5.33 (todos os valores abaixo da linha de referência). De ressaltar ainda o valor reduzido do desvio padrão. Já nas secções de classe 4 considerando todas as classes de aço existem resultados inseguros (acima da linha de referência) (48%) em maior número para o aço da classe 1.4462 (cerca de 74%) (Figura 5.33). As médias para os elementos desta classe são muito próximas de um ou no caso do aço da classe 1.4462 ultrapassa este valor. Também os desvios padrão apresentam valores superiores aos das secções de classe 1 e 3 variando entre 0.23 e 0.46 como é visível na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta da UA e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrada.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.68	0.91	0.74	1.03	0.67	1.35
Desvio-Padrão	0.09	0.23	0.09	0.31	0.08	0.46
Amostras fora da segurança	0 (0%)	21 (29%)	0 (0%)	30 (42%)	0 (0%)	53 (74%)

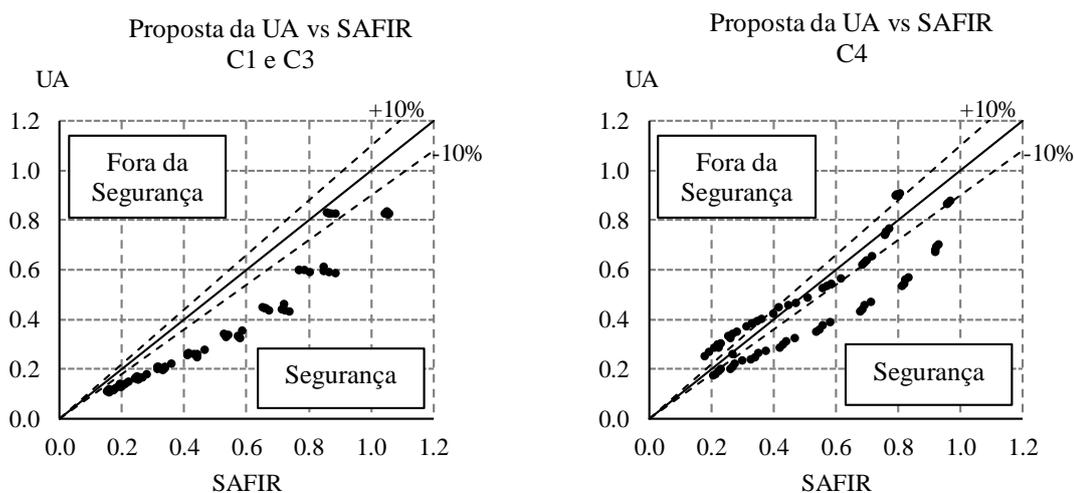


Figura 5.31 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico (1.4301).

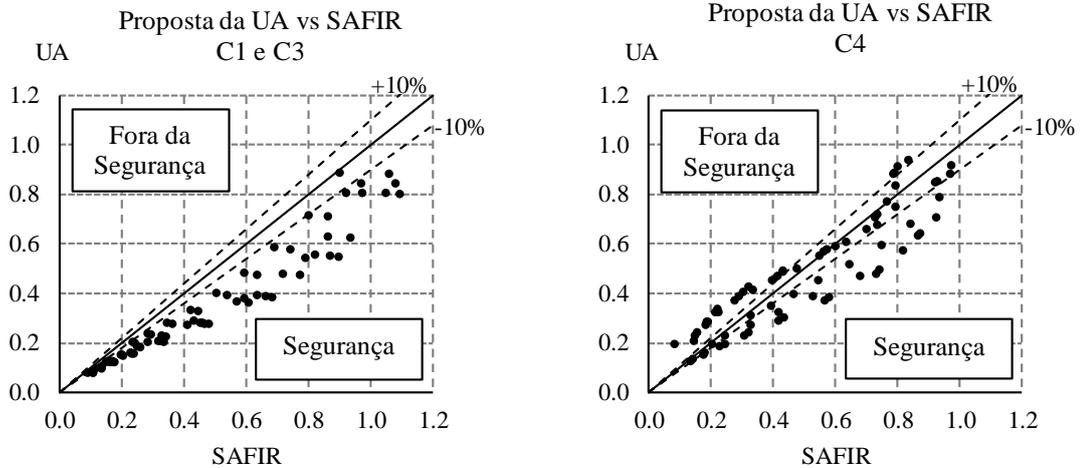


Figura 5.32 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).

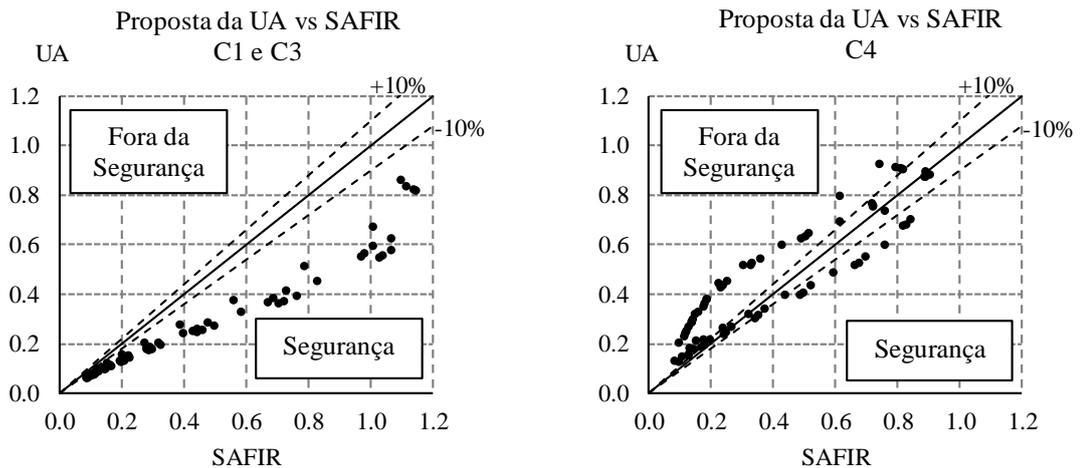


Figura 5.33 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

Apesar de haver uma pequena percentagem de resultados fora de segurança (cerca de 2% quando se considera os três tipos de aço simultaneamente) (Tabela 5.4) o comportamento para classes 1 e 3 das secções circulares é semelhante ao das quadrangulares apresentando por isso da mesma forma uma média muito inferior a um e um desvio padrão muito reduzido (Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36). No que diz respeito à classe 4 cerca de 40% das amostras estão fora da segurança (quando não há diferenciação da classe de aço) e é no aço ferrítico (classe 1.4003) que se encontra a maior percentagem (54%) de resultados inseguros

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

(Figura 5.35) (acima da linha de referência) apesar de as restantes classe de aço apresentarem também uma percentagem de resultados fora da segurança rondando os 30%. De modo análogo às secções quadrangulares a média é muito próxima de um sendo natural essa percentagem de resultados inseguros e o desvio padrão mais elevado do que os das classes 1 e 3.

Tabela 5.4 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta da UA e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.67	0.92	0.64	1.05	0.55	1.05
Desvio-Padrão	0.13	0.30	0.17	0.36	0.14	0.51
Amostras fora da segurança	3 (4%)	24 (33%)	1 (1%)	39 (54%)	0 (0%)	23 (32%)

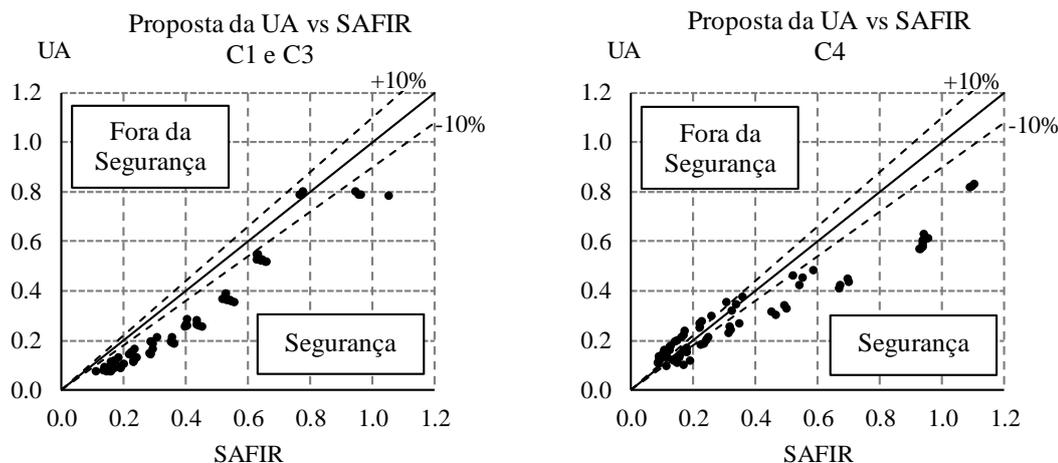


Figura 5.34 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).

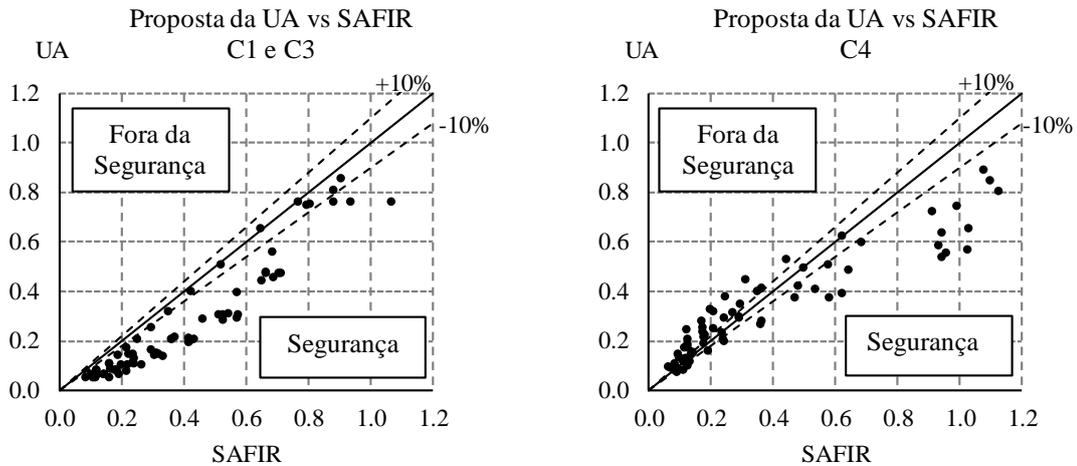


Figura 5.35 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).

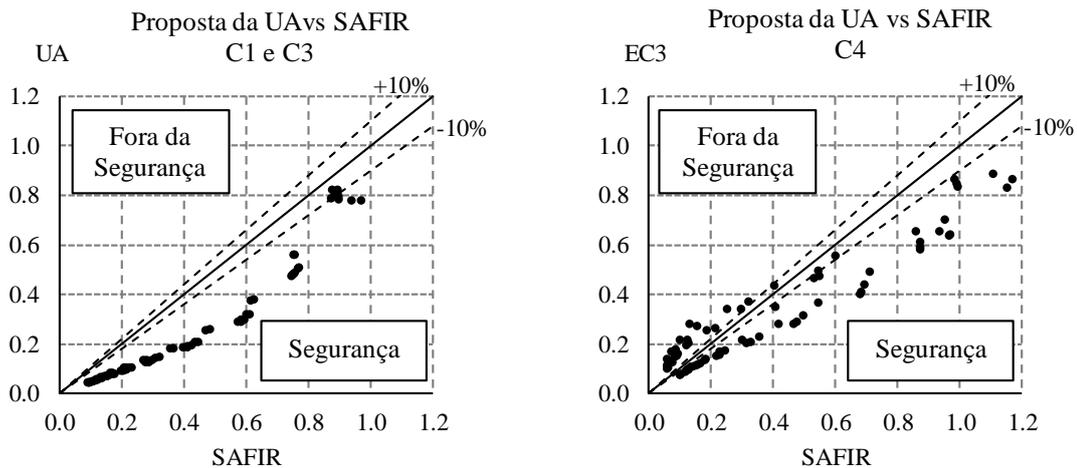


Figura 5.36 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

5.4.3. Análise da proposta de Gardner e Ng

Esta proposta é aquela que entre as três apresenta piores resultados a nível estatístico para ambas as secções transversais aparecendo em maior percentagem nas quadrangulares (cerca de 64%). Os gráficos representados da Figura 5.37 até à Figura 5.42 dizem respeito à análise de ambas as secções transversais (quadrangular e circular) segundo a proposta de Gardner e Ng descrita no ponto 3.3.2. Quando analisados em detalhe verifica-se que as secções quadrangulares de classe 1 e 3 são as mais seguras apresentando apenas 29% de amostras

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

fora da segurança quando se consideram os três tipos de aço. Mais detalhadamente e para o aço de classe 1.4003 os resultados são os mais inseguros apresentando 53% dos mesmos acima da linha de referência (Figura 5.38). Em oposição os resultados obtidos para o aço austenítico – ferrítico (1.4462) estão 100% seguros, isto é, nenhum resultado se encontra acima da linha de referência, sendo por isso esta classe de aço aquela que apresenta melhores resultados. Tendo em conta a grande percentagem de valores seguros é espectável um valor da média abaixo de um ou próximo, o que realmente sucede. O desvio padrão para os diferentes tipos de aço varia mantendo um valor reduzido.

Os resultados da classe 4 encontram-se 100% inseguros (todos acima da linha de referência) pelo que a média apresenta valores muito superiores a um. O desvio padrão para todas as classes de aço é elevado. Estes resultados e percentagens podem ser verificados através da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal quadrada.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.97	1.43	1.01	1.55	0.81	1.81
Desvio-Padrão	0.06	0.41	0.12	0.53	0.06	0.67
Amostras fora da segurança	25 (35%)	71 (99%)	38 (53%)	72 (100%)	0 (0%)	72 (100%)

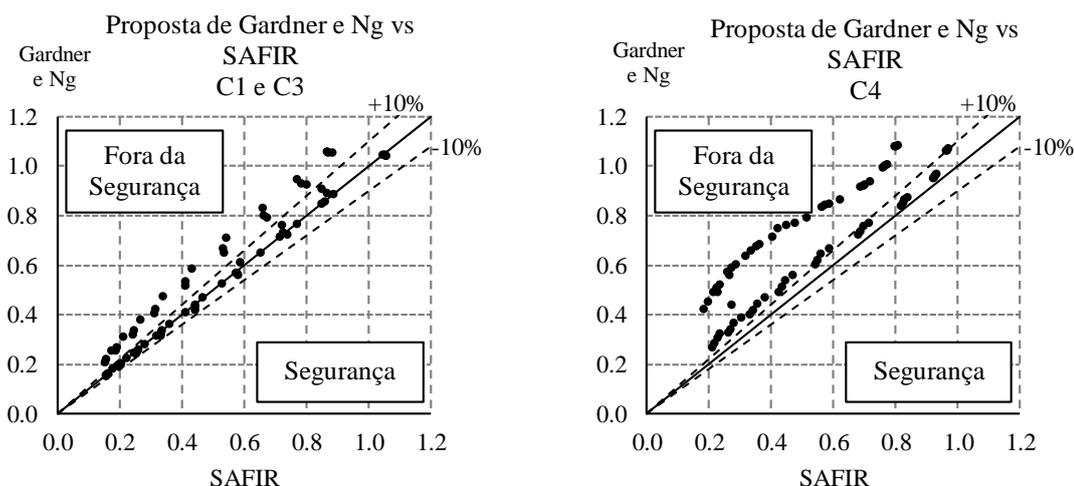


Figura 5.37 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico (1.4301).

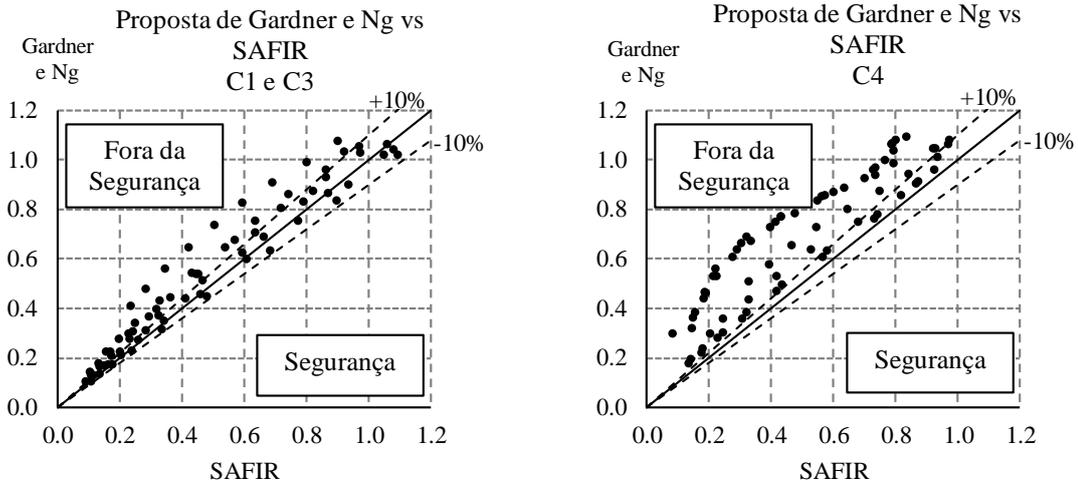


Figura 5.38 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço ferrítico (1.4003).

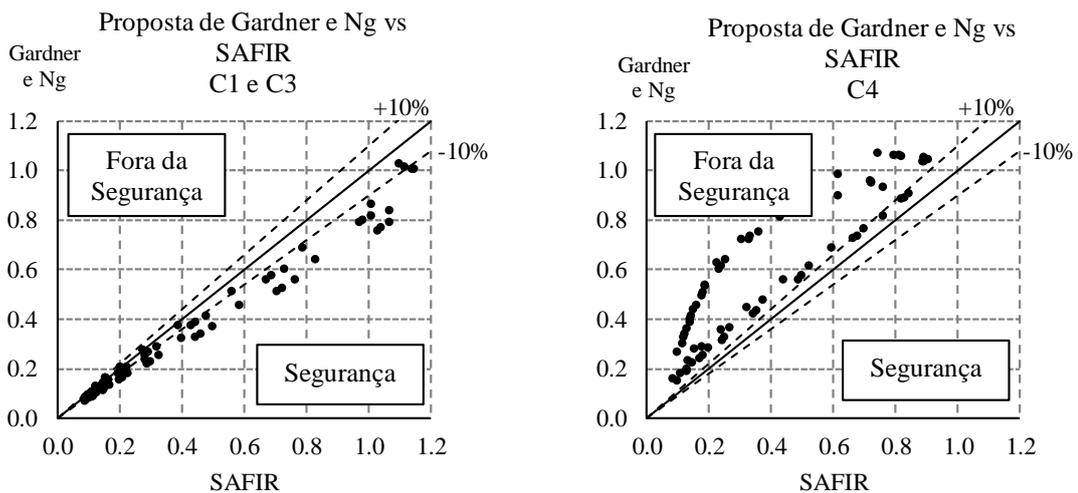


Figura 5.39 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

À semelhança dos resultados obtidos para as secções quadrangulares de classe 1 e 3, são os gráficos respeitantes às classes de aço 1.4003 e 1.4462 (Figura 5.41 e Figura 5.42) que se destacam pelos piores resultados (43%) e pelos melhores (7%) respetivamente e em termos de segurança dos resultados (Tabela 5.6). Se não houver diferenciação no tipo de aço apenas 23% dos resultados para esta classe de secção transversal se encontram inseguros, menos do dobro do que ocorre para a classe 4 (66%). Apesar de serem resultados comparáveis com a secção transversal quadrangular em termos de segurança e gráficos, esta secção apresenta

Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas

desvios padrão mais elevados que os correspondentes anteriores mas a média sempre inferior ao valor de um. Na classe 4 destaque para a classe de aço 1.4462 onde menos de metade dos resultados se encontra fora de segurança (44%). Novamente é o aço ferrítico que apresenta os resultados piores ao nível da segurança. No entanto, e de uma forma geral a quantidade de pontos acima da linha é superior à da classe 1 e 3 (estão inseguros) podendo ser justificado pelo valor da média superior a um. De notar que à semelhança das secções quadrangulares de classe 4 também o valor de desvio padrão é elevado.

Tabela 5.6 - Avaliação estatística referente à comparação entre os resultados da proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos para as diferentes classes e aços para a secção transversal circular.

	1.4301		1.4003		1.4462	
	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4	C1 e C3	C4
Nº de amostras	72	72	72	72	72	72
Média	0.93	1.44	0.99	1.58	0.67	1.35
Desvio-Padrão	0.16	0.50	0.24	0.60	0.17	0.65
Amostras fora da segurança	14 (19%)	54 (75%)	31 (43%)	57 (79%)	5 (7%)	32 (44%)

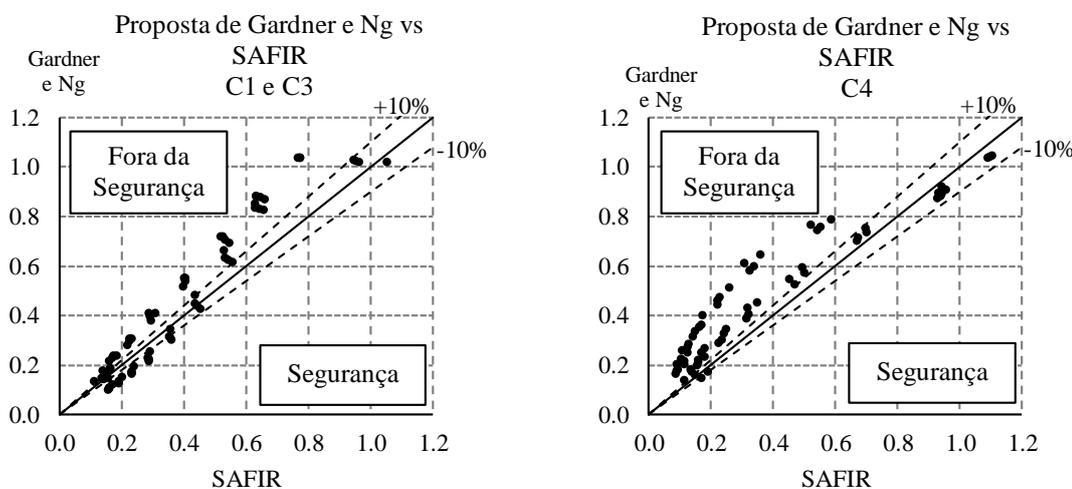


Figura 5.40 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço austenítico (1.4301).

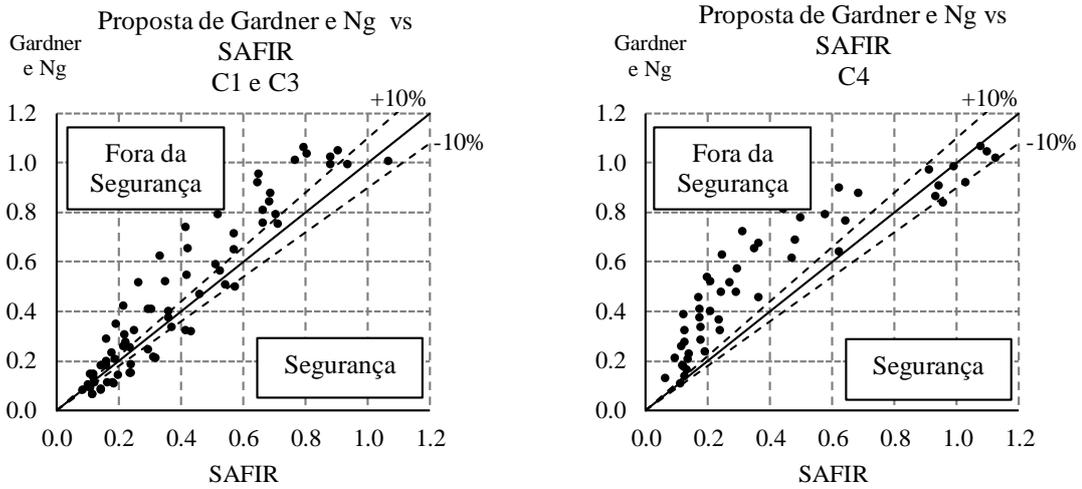


Figura 5.41 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção circular e aço ferrítico (1.4003).

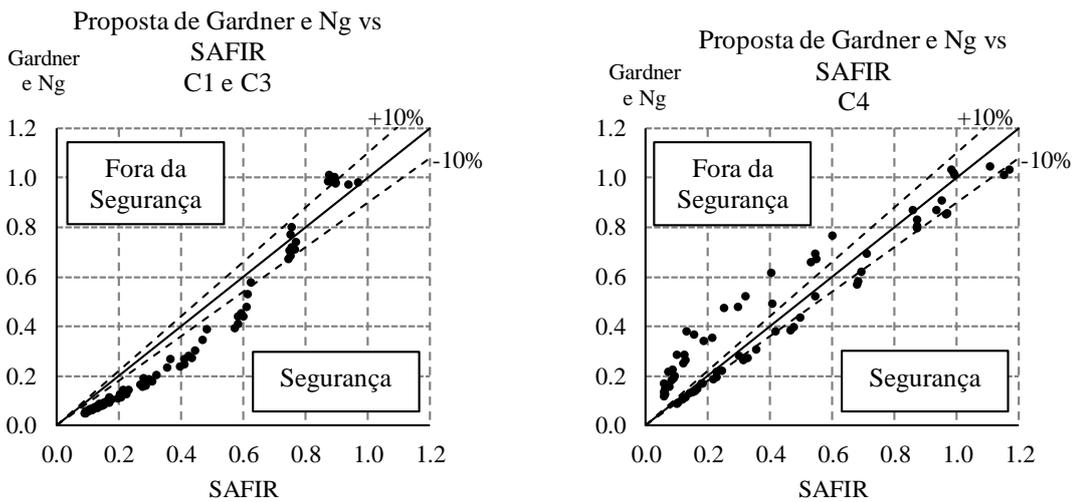


Figura 5.42 - Comparação estatística entre a proposta de Gardner e Ng e os resultados numéricos relativo às classes C1, C3 e C4 para secção quadrangular e aço austenítico – ferrítico (1.4462).

Capítulo 6

Considerações finais

Capítulo 6. Considerações Finais

- 6.1. Conclusões
- 6.2. Desenvolvimentos Futuros

Capítulo 6. Considerações finais

6.1. Conclusões

A finalização desta dissertação é feita através do presente capítulo onde se analisa o trabalho desenvolvido e se focam os pontos importantes a reter do mesmo.

Este trabalho pretende apresentar um estudo numérico sobre o comportamento de colunas de diferentes classes de aço inoxidável com secções tubulares quadradas e circulares de classe 1, 3 e 4 em situação de incêndio uma vez que quando comparado com o aço carbono, este tem um comportamento mecânico diferente a temperaturas elevadas. Para tal foi realizada uma comparação entre as cargas últimas obtidas com o programa de elementos finitos SAFIR e as diferentes metodologias de verificação de segurança nomeadamente os requisitos previstos na EN 1992-1-2, a proposta desenvolvida para perfis I de classe 1 e 2 e a proposta de Gardner e Ng.

A modelação numérica apresenta uma breve descrição do *software* em causa (SAFIR), os casos de estudo e a definição e descrição do modelo numérico.

Antes de serem obtidos os resultados foi feita uma análise de sensibilidade com o objetivo de estudar a influência das imperfeições geométricas dos perfis (globais e locais), tensões de canto melhoradas e tensões residuais resultantes da fabricação dos perfis nos resultados finais.

A precisão e a segurança das metodologias descritas no EC3 bem como das restantes abordagens de cálculo em análise puderam ser avaliadas através dos resultados numéricos obtidos. Estes resultados foram comparados com as curvas de encurvadura das propostas em causa para os diferentes elementos. Para finalizar e resumir todos os resultados numéricos obtidos é feita ainda uma breve avaliação estatística.

Finalizada a análise, obtidos os resultados e após tratamento dos mesmos foi possível chegar a algumas conclusões dividindo-as nos parâmetros de influência:

- Tipo de aço: O EC3 encontra-se mais seguro para o aço austenítico (1.4301) repercutindo-se, a nível estatístico, num número de amostras fora da segurança menor. Por outro lado, para o aço ferrítico (1.4003) o EC3 encontra-se mais inseguro.

Relativamente às restantes duas propostas, a da UA é a mais conservativa, em certos casos até demasiado e neste caso o número de amostras fora da segurança depende do tipo de secção transversal. A proposta de Gardner e Ng é a mais insegura das três em estudo para todas as classes de aço, no entanto esta insegurança deve-se maioritariamente aos resultados obtidos para secções de classe 4 com maiores esbeltezas. Importante referir, devido à sua diferente metodologia de cálculo, que esta proposta apresenta para elementos com secção transversal de classe 3 resultados seguros, para ambas as secções transversais, excetuando os resultados do ferrítico (1.4003) mais concretamente para a temperatura de 700°C.

É o aço ferrítico (1.4003) que se apresenta como o mais problemático devido à discrepância de resultados para as quatro temperaturas em estudo e o austenítico- ferrítico (1.4462) aquele que apresenta os maiores valores de resistência das três classes de aço.

- Tipo de secção transversal: os perfis compostos por secções circulares têm resultados mais dispersos do que as quadrangulares, no entanto estas apresentam um valor de resistência do elemento maior, diminuindo a sua suscetibilidade a fenómenos de encurvadura e refletindo-se numa maior segurança do EC3 e das restantes propostas.
- Classe: A classe da secção transversal tem grande influência nos resultados, particularmente os resultados da classe 4 (com especial destaque para aqueles que derivam de uma menor espessura da secção transversal) já que resultam em resistências muito reduzidas e na insegurança de todas as propostas. Assim, para as classes 1 e 3 o EC3 apresenta resultados seguros na sua maioria, independentemente do aço e da secção, ao contrário do que acontece para a classe 4. As restantes propostas apresentam um comportamento semelhante ao EC3, assim, para as classes 1 e 3 estão seguras, sendo até bastante conservativas em alguns dos casos, no entanto, para a classe 4 até a mais conservativa das propostas é posta em causa. Ressalva-se que a avaliação da segurança das diferentes metodologias de dimensionamento foi feita de forma distinta para secções de classe 4 já que nestes casos a resistência das secções foi avaliada numericamente.

Ao nível estatístico e para ambas as secções transversais em estudo, sem diferenciação entre classe de aço, classes de secção ou temperaturas, é a proposta da UA aquela que apresenta a

menor média e desvio-padrão e conseqüentemente os resultados mais seguros, ou seja, menor número de amostras fora da segurança (rondando os 20% para ambas as secções transversais), sendo demasiado conservativa. A proposta de Gardner é aquela que apresenta maior número de amostras fora da segurança (>50% no caso da secção quadrada e 45% no caso da circular) e logo a média mais elevada também. De ressaltar e como dito anteriormente estes resultados são muito influenciados pelos elementos de classe 4. Dada a discrepância de resultados para estes elementos a análise quantitativa não será muito viável para estas secções. Estas observações são a razão pela qual na dissertação toda a análise estatística se encontra dividida por classes.

O EC3 apresenta no geral resultados inseguros pelo que há necessidade, pelos resultados apresentados neste trabalho e conclusões, de estudos mais aprofundados que resultem em proposta e curvas mais precisas e adequadas que mantenham a metodologia de dimensionamento do EC3, principalmente para secções de classe 4.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, alguns assuntos relacionados com o comportamento ao fogo de aço inoxidável não foram abordados pelo que serão descritos no presente capítulo como futuras áreas de investigação.

Todos os resultados numéricos foram obtidos para três classes de aço (1.4301, 1.4003 e 1.4462). O estudo deverá estender-se para mais classes de aço como 1.4571 e 1.4401 (exemplos de aços austeníticos). Também na presente dissertação foram apenas apresentados os resultados para colunas sujeitas a esforço axial, no entanto, o estudo pode ser alargado combinando com o esforço axial o momento (flexão composta) ou apenas analisando o comportamento quando sujeito à flexão juntando a isto a classe da secção transversal em falta nesta dissertação (classe 2) e outras temperaturas.

Às secções transversais em estudo poderá eventualmente juntar-se uma análise a secções transversais retangulares nas mesmas condições

Finalmente, esta dissertação é inteiramente baseada em estudos computacionais com base em métodos de elementos finitos que apesar de validados podem nem sempre reproduzir fielmente o comportamento da estrutura principalmente pela variabilidade de alguns fatores que influenciam o comportamento estrutural como é o caso das imperfeições e tensões

residuais. Assim, testes experimentais devem ser desenvolvidos de maneira a reduzir a distância entre o comportamento real da estrutura e o obtido através de simulações numéricas, comparando-os também com as metodologias do EC3 e restantes propostas.

Referências

Bibliográficas

Referências Bibliográficas

Ashraf, M.; Gardner, L.; Nethercot, D. (2005). “*Strength enhancement of the corner regions of stainless steel cross-sections*”. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 61 pp. 37–52.

Baptista, A. M. R. (2014). “*Verificação de segurança de perfis de aço enformado a frio com secção em C*”.

CEN, European Committee for Standardisation (2005a). “*EN 1993–1–1, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2005b). “*EN 1993–1–2, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2006). “*EN 10219–2, Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steel – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2006a). “*EN 1993–1–4, Eurocode 3: Design of steel Structures – Part 1–4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2006b). “*EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2007). “*NF EN 1993-1-2, Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Annexe Nationale à la NF EN 1993-1-2: Calcul du comportement au feu*”. Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardisation (2011). “*EN 1090-2:2008+A1: Execution of steel structures and aluminium structures - part 2: Technical requirements for steel structures*”. Brussels, Belgium.

Condesa. Consultado em: Outubro, 2014. Disponível em:

<[http://www.co<ndesa.com/inicio.html](http://www.condesa.com/inicio.html)>.

Couto, C.;Vila Real, P. M. M.; Lopes, N.; Zhao, B. (2013). “*Novas expressões para o cálculo da secção efetiva de secções transversais metálicas de Classe 4 a altas temperaturas*”. IX Congresso de Construção Metálica e Mista, Porto.

Couto, C. (2015). “*Fire design of steel members with class 4 cross-section*”. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Chen, J.; Young, B. (2006). “*Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures*”, Engineering Structures. Vol. 28, nº2, p. 229-239.

Cruise, R. (2007). “*The Influence of Production Routes on the Behaviour of Stainless Steel Structural Members*”. Thesis submitted to the University of London, United Kingdom, for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering

Cruise, R. B.; Gardner, L. (2008). “*Residual stress analysis of structural stainless steel sections*”. Journal of Constructional Steel Research,64(3), 352-366.

Euro Inox (2002).”*Villa Inox in Tuusula, Finland*” , ISBN 2-87997-044-X.

Euro Inox (2005). “*San Nicola Stadium, Bari, Italy*”, ISBN 2-87997-119-5.

Euro Inox, SCI, Steel Construction Institute (2006). “*Design Manual for Structural Stainless Steel*”, 3rd edition.

Ervedal, R. L. S. (2011). “*Resistência ao fogo de elementos estruturais metálicos de classe 4*”. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

ESDEP, European Steel Design Education Programme (2000). “*Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero*” (in Spanish). Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).

Ferpinta, (2014) “*Catálogo de tubos em aço*”.

Franssen, J.M.; Schleich, J.B.; Cajot, L.G.; Azpiazu, W.A. (1996). “*Simple Model for the Fire Resistance of Axially-loaded Members—Comparison with Experimental Results*”. Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, vol. 37, 175–204.

Frassen, J. M. (2005). “*SAFIR: A thermal/structural program for modelling structures under fire*”. Engineering Journal- American Institute of Steel Construction Inc. Vol 42, nº3.

Franssen, J.M. (2011). “*User’s manual for SAFIR 2011, a computer program for analysis of structures subjected to fire*”. Structural Engineering, ArGENCO, University of Liege, Belgium.

Gardner, L. (2005). “*The use of stainless steel in structures*”. Progress in Structural Engineering and Materials;7(2): 45-55.

Gardner, L.; Cruise, R. B. (2009). “*Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections*”. Journal of Structural Engineering, 135(1), 42-53.

Gardner, L.; Insausti, A.; Ng, K.; Ashraf, M. (2010). “*Elevated temperature material properties of stainless steel alloys*”. Journal of Constructional Steel Research. Vol 66, nº 5, p.634-647.

Gamelas, P. (2014). “*Vigas em aço inoxidável com secções em I de classe 4 ao fogo*”. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Jacinto, L.; Evangelista, L.; Pedro, P. (2013). “*Capítulo 3-Colunas*”. Apontamentos da unidade curricular Mecânica dos Sólidos II – Texto de apoio, Licenciatura Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Jandera, M.; Machacek, J. (2007). “*Residual stresses and strength of hollow stainless steel sections*”. Proc. 9th international conference modern building materials, structures and techniques, pp. 262-3.

Jandera, M.; Gardner, L.; Machacek, J. (2008). “*Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow sections*”. Journal of Constructional Steel Research, vol 64(11), 1255-1263.

Jandera, M.; Machacek, J. (2014). “*Residual stress influence on material properties and column behaviour of stainless steel SHS*”. Thin-Walled Structures, 83, 12-18.

Lopes, N. (2009) "*Behaviour of stainless steel structures in case of fire*". Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Lopes, N.; Vila Real, P.; Simões da Silva, L.; Franssen, JM.(2010). "*Axially loaded stainless steel columns in case of fire*", *Journal of Structural Fire Engineering*, Multi-Science Publishing Co. Ltd, ISSN 2040-2317, vol 1/1, 43-59.

Lopes, N.; Vila Real, P.M.M.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.M. (2012). "*Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire*". *Fire Safety Journal*, Vol 50, p.35-50.

Lopes, N.; Vila Real, P. M. M. (2013). "*Resistência ao fogo de colunas tubulares em aço inoxidável*". Atas do IX Congresso de Construção Metálica e Mista, I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto.

Lopes, N.; Vila Real, P. M. M.(2014). "*Fire resistance of stainless steel structural elements with class 4 square hollow sections subject to combined bending and axial compression*". Atas do 8th International Conference on Structures in Fire, SiF, Shanghai, China.

Miettinen, E. (2002). "*Sustainable Architecture with Stainless Steel*". Ata da conferência Creative Architecture with Stainless Steel, Barcelona, Espanha.

Ng, KT.; Gardner, L. (2007). "*Buckling of stainless steel columns and beams in fire*". *Engineering Structures*, vol 29(5), 717-730.

Online Metals. Consultado em: Outubro de 2014. Disponível em:

<<http://www.onlinemetals.com/>>.

Palacios, L.(2005). "*Shear Design of Stainless Plate Girders*". Universitat Politècnica de Catalunya. Dissertação de Doutoramento.

Piloto, P. A. G.; Mesquita, L. M. R., Vaz; M. A. P.; Vila Real, P. M. M. (2003). "*A influência das imperfeições geométricas na resistência de vigas à encurvadura lateral*".

Pinto, A. (2010). "*Estabilidade local de perfis de aço enformados a frio*". Tese de Mestrado, IST, Universidade Técnica de Lisboa.

Simões da Silva, L.; Gervásio, H. (2007). “*Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço*”. CMM- Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. ISBN: 978-972-98376-8-5.

Simões da Silva, Luis; Gervásio, Helena; Simões, Rui. (2010). “*Design of steel structures. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1 – General rules and rules for buildings*”. ECCS - European Convention for Constructional Steelwork. ISBN 978-92-9147-098-2.

Scifo A. (2013). “*Fire resistance of stainless steel hollow section columns*”. Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.

“*Steel construction products*” Consultado em: Novembro, 2014. Disponível em: <http://www.steelconstruction.info/Steel_construction_products>.

Stalatube. Consultado em: Outubro, 2014. Disponível em: <<http://www.stalatube.com/>>.

Theofanous, M.; Gardner, L. (2009). “*Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns*”. Engineering Structures, 31(12), 3047-3058.

Trahair, N. S.; Bradford, M. A.; Nethercot, D.; Gardner, L. (2007). “*The behaviour and design of steel structures to EC3*”. CRC Press.

Tubinox. (n.d). Consultado em: Outubro, 2014. Disponível em: <<http://www.tubinox.pt/>>.

Uppfeldt B.; Ala Outinen T.; Veljkovic M. (2008). “*A design model for stainless steel box columns in fire*”. Journal of Constructional Steel Research, vol 64(11).

Vila Real, P.M.M. (2003). “*Incêndio em Estruturas Metálicas: cálculo estrutural*” (in Portuguese). Edições Orion, Portugal.

Vila Real, P.M.M. (2010). “*Encurvadura de placas – Enfunamento*”. Apontamentos da unidade curricular Complementos de Construção Metálica e Mista - 5º Ano, Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2010.

Vila Real, P.M.M.; Nuno, L. (2013). “*Fire resistance of structural stainless steel members – new proposals*”. Evolution Group of 1993-1-4, Barcelona, Espanha.

Anexos

Anexos

A. Restantes resultados

São seguidamente apresentados todos os restantes resultados obtidos. Estes estão organizados segundo o tipo de aço começando pelos de classe 1.4301, seguidos pelos de classe 1.4003 e finalmente os de classe 1.4462. Para cada classe de aço são apresentados os resultados primeiramente das secções transversais quadrangulares seguidos aos obtidos para secções transversais circulares.

Resumidamente, os gráficos apresentados da Figura A.2 à Figura A.5 são representativos da classe de aço 1.4301 e secção transversal quadrangular. Da Figura A.6 à Figura A.10 representam para a mesma classe de aço os resultados obtidos para a secção circular. Os gráficos correspondentes à classe 1.4003 de aço inoxidável e secções transversais quadrangulares são representados pela Figura A.11, Figura A.12, Figura A.13, Figura A.14 e a Figura A.15 seguidos dos que representam as secções circulares para a mesma classe (da Figura A.16 à Figura A.20).

Finalmente e pela mesma ordem lógica são apresentados os resultados respeitantes à secção transversal quadrangular (da Figura A.21 à Figura A.25) e circular (da Figura A.26 à Figura A.30) de elementos de aço inoxidável de classe 1.4462.

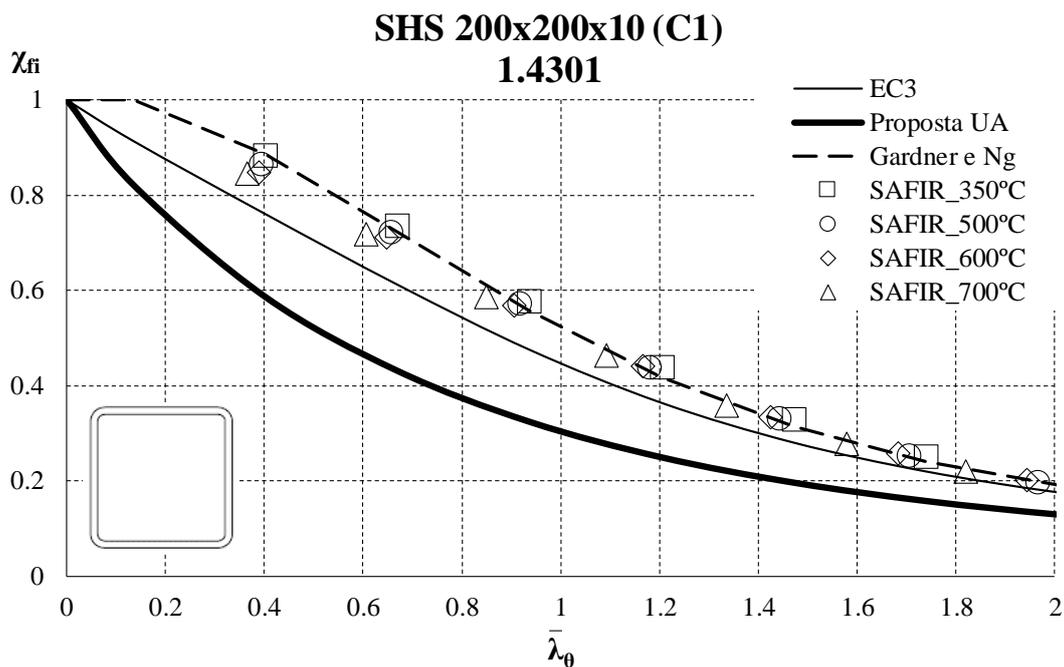


Figura A.1 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

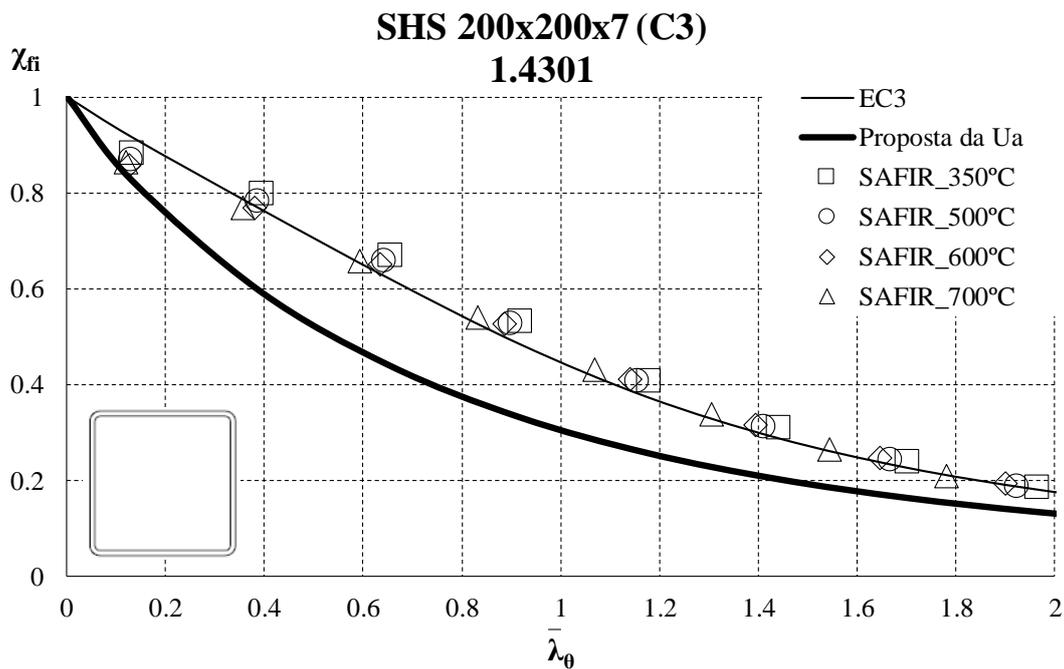


Figura A.2 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

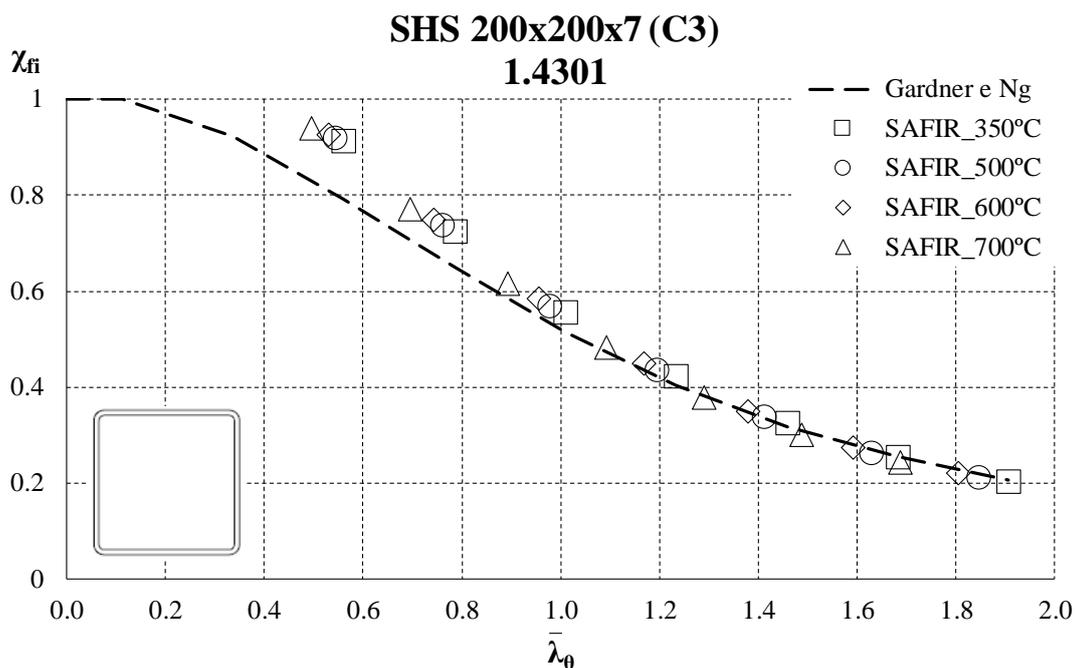


Figura A.3 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

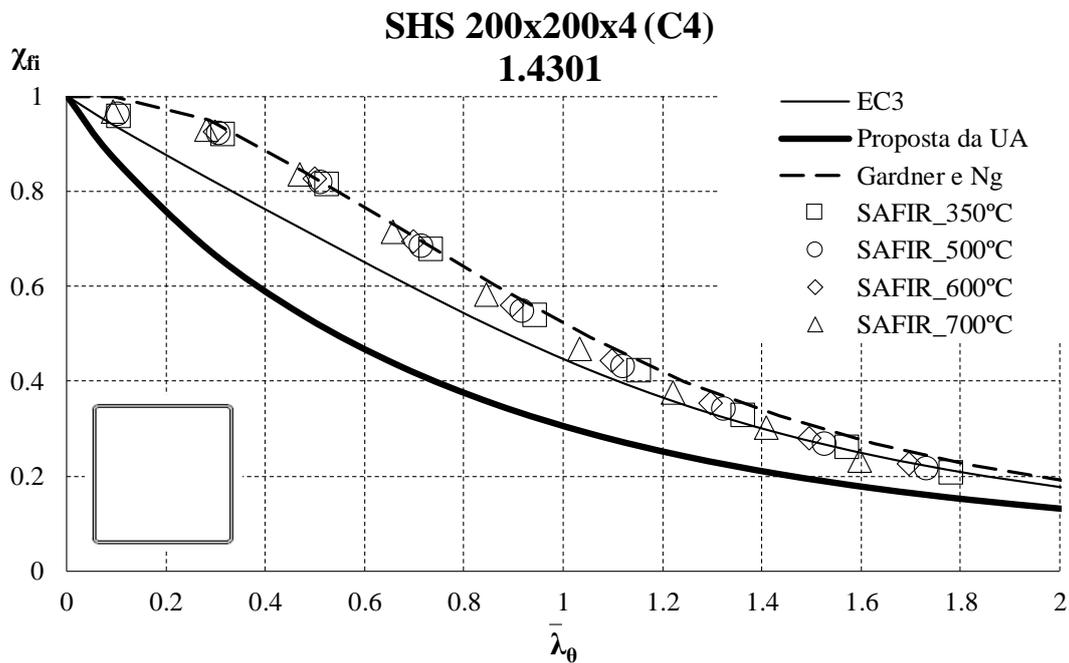


Figura A.4 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

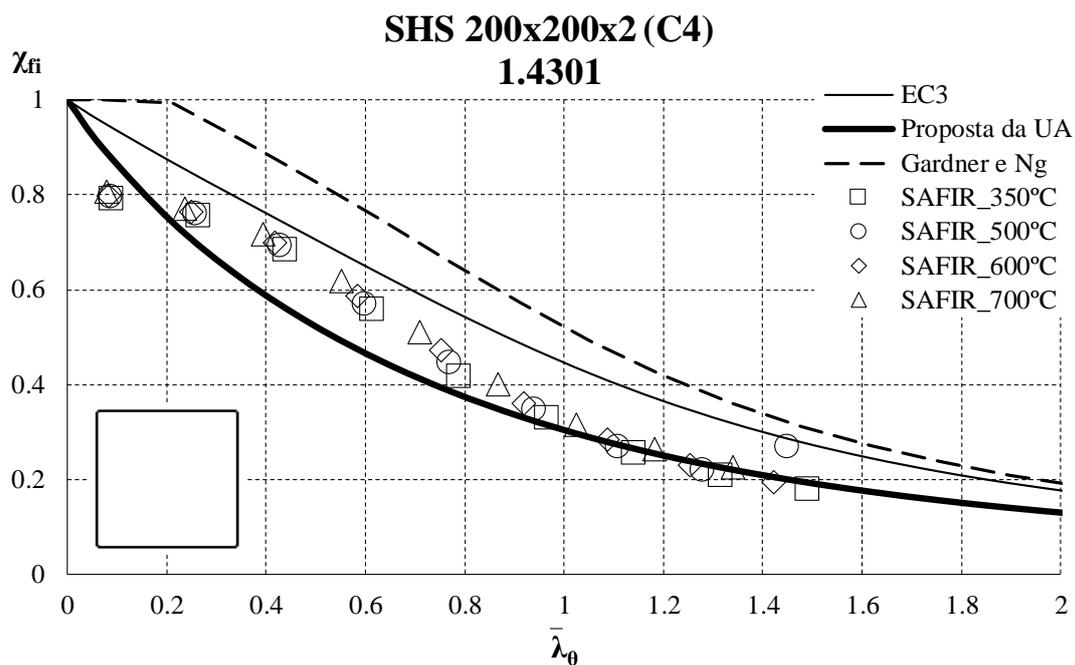


Figura A.5 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

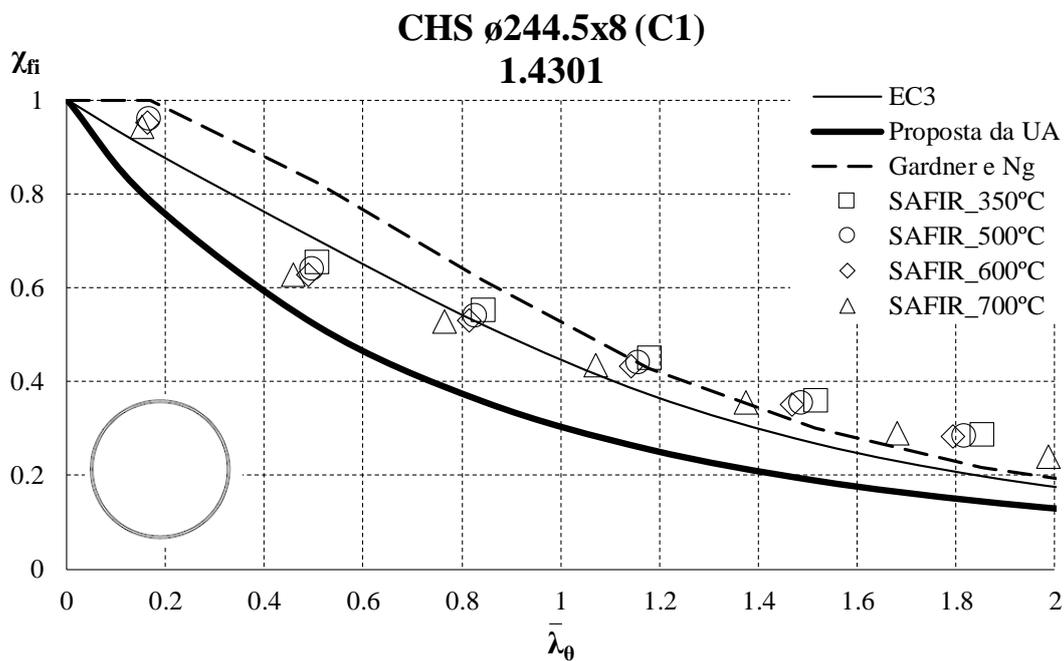


Figura A.6 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

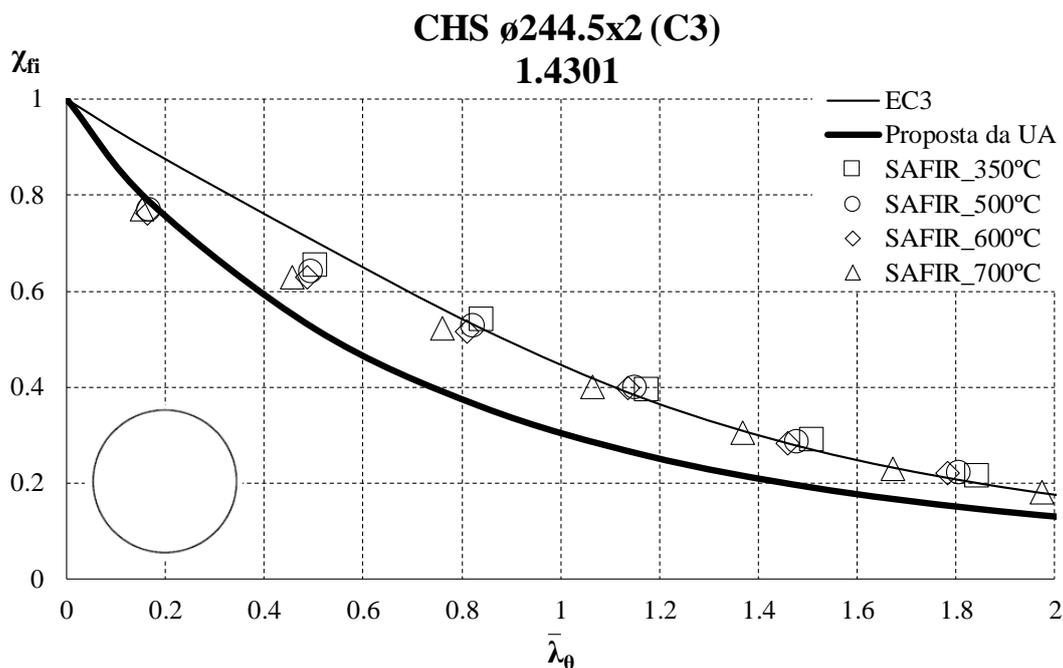


Figura A.7 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

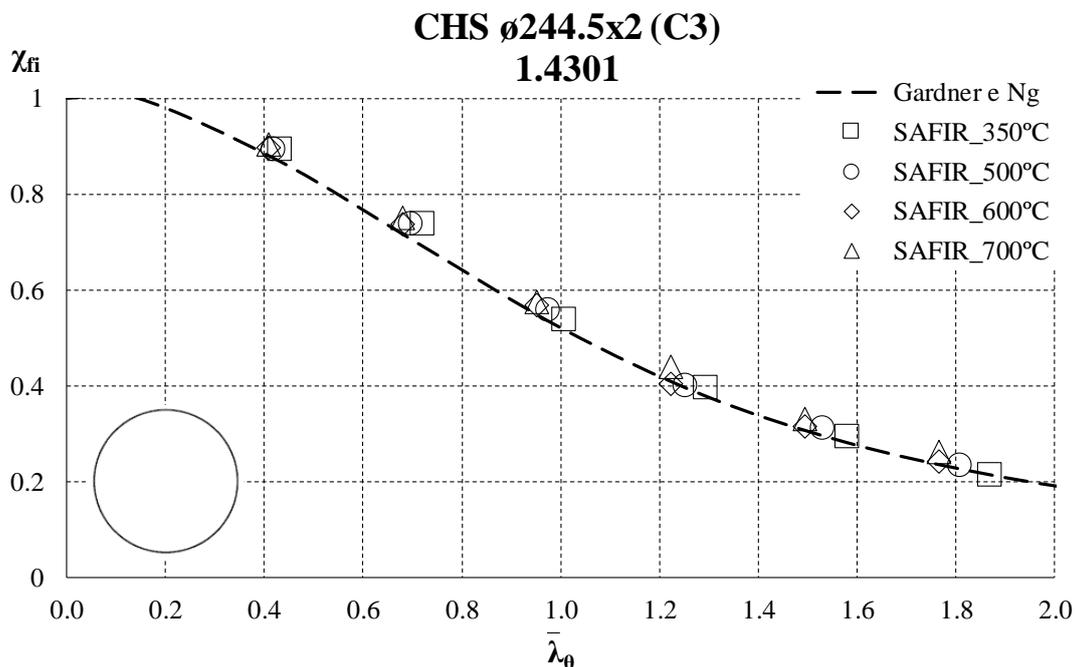


Figura A.8 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

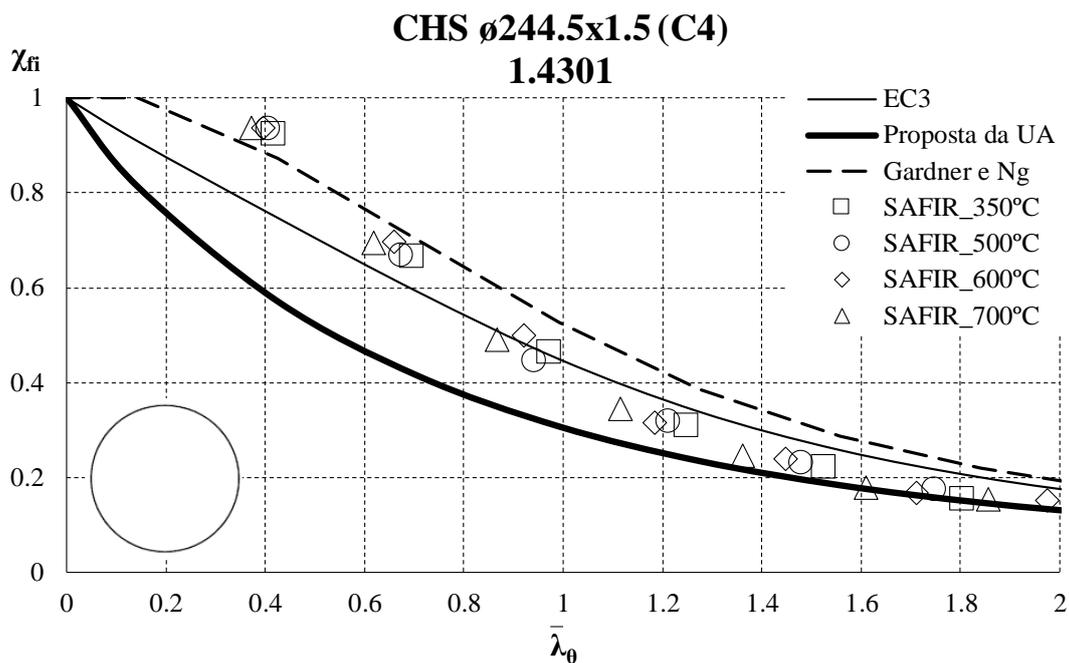


Figura A.9 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

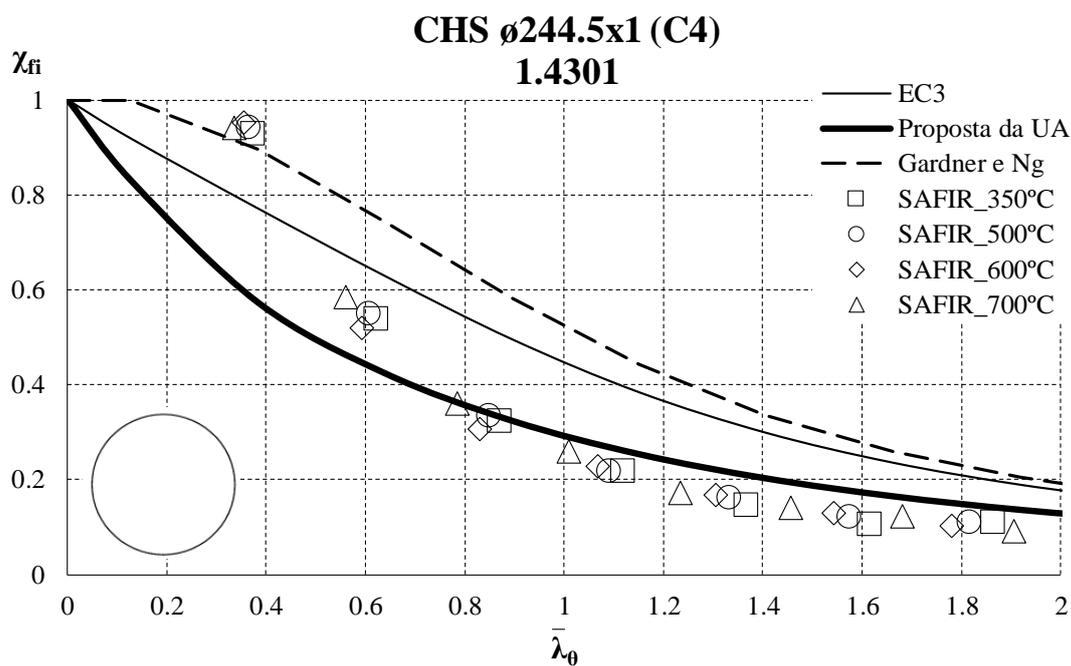


Figura A.10 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico (1.4301).

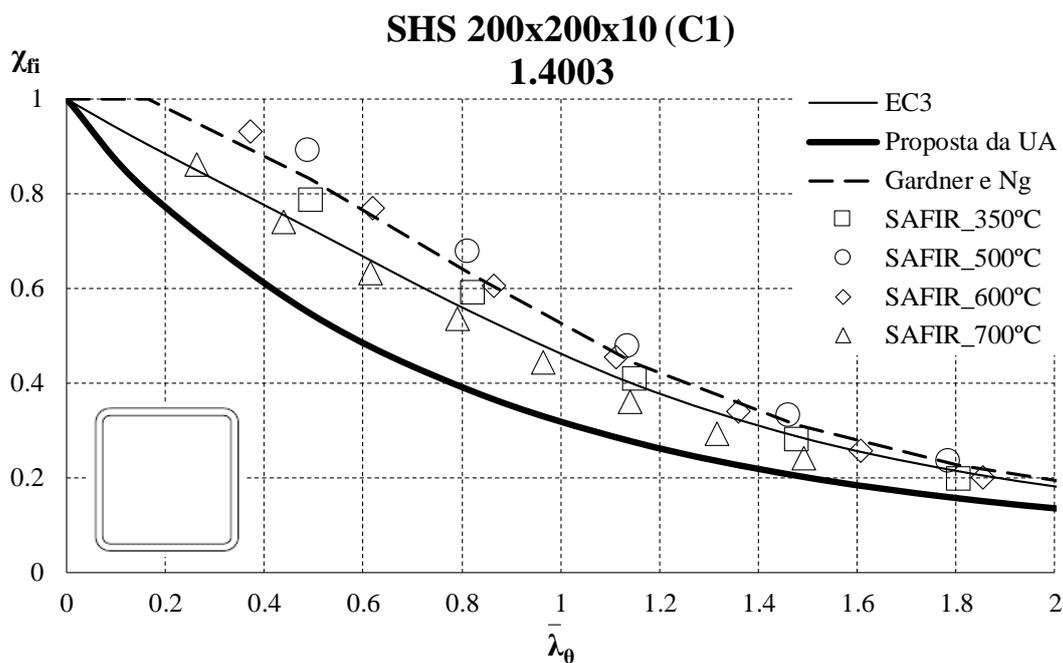


Figura A.11 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

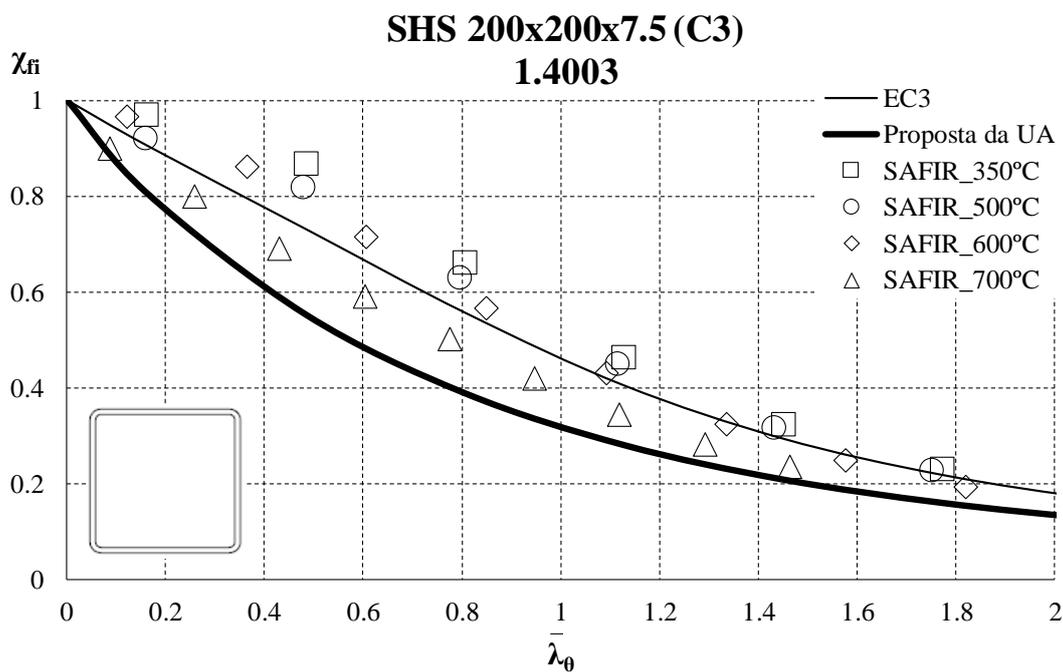


Figura A.12 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

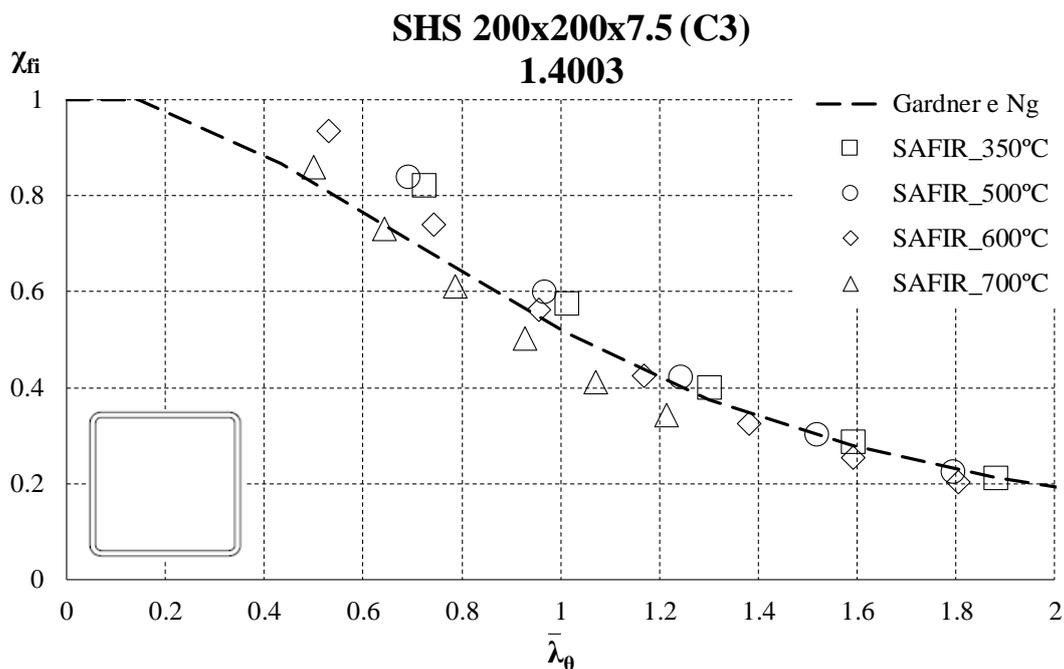


Figura A.13 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

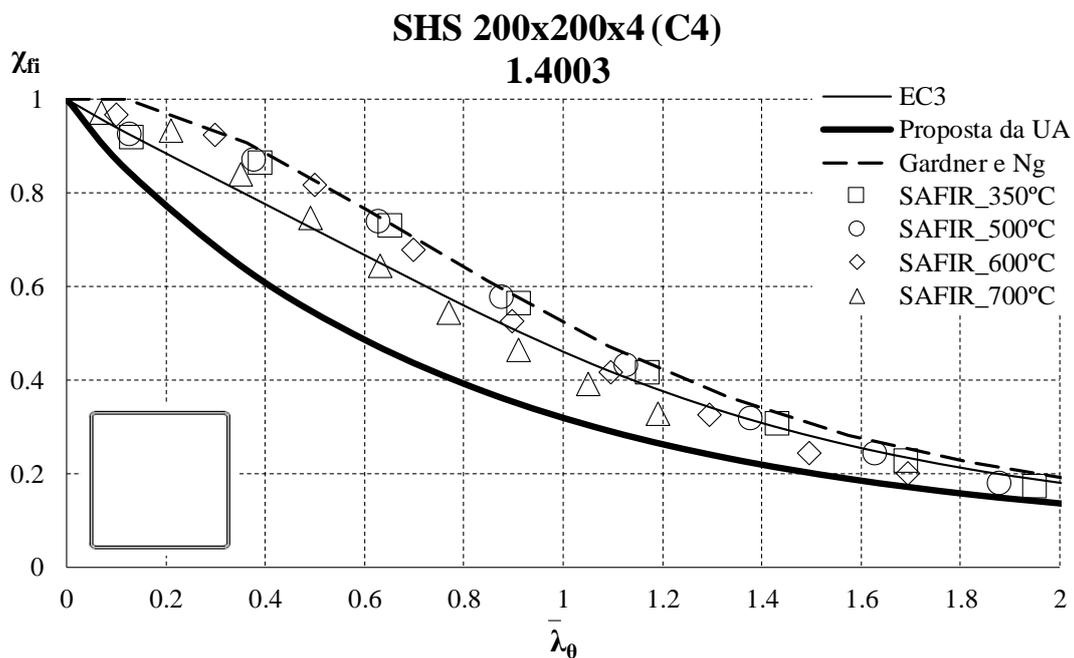


Figura A.14 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

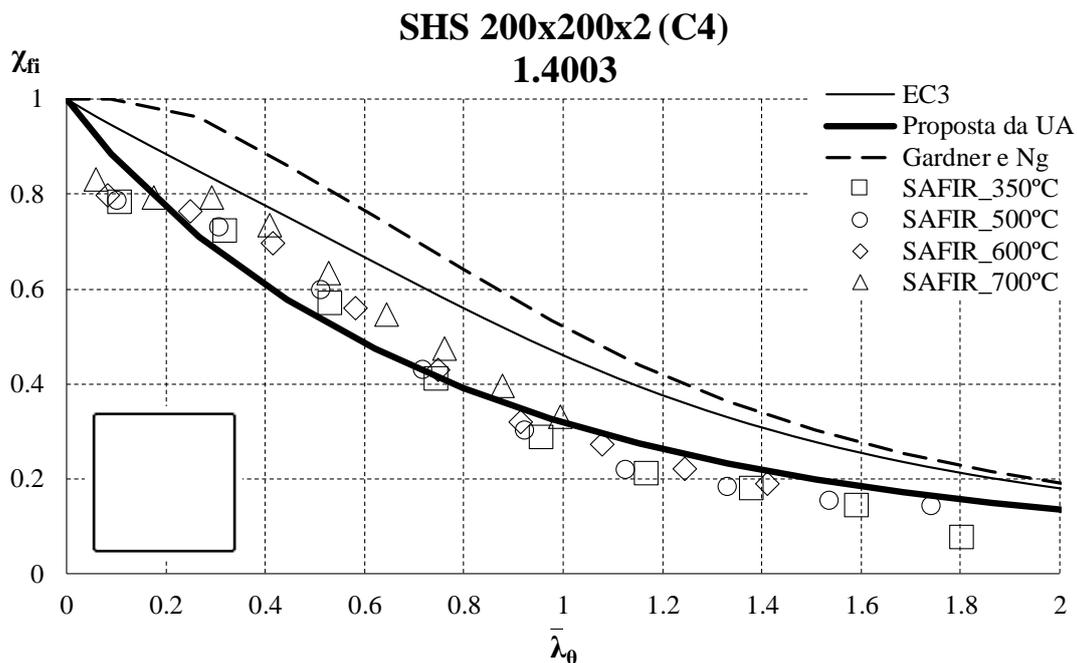


Figura A.15 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

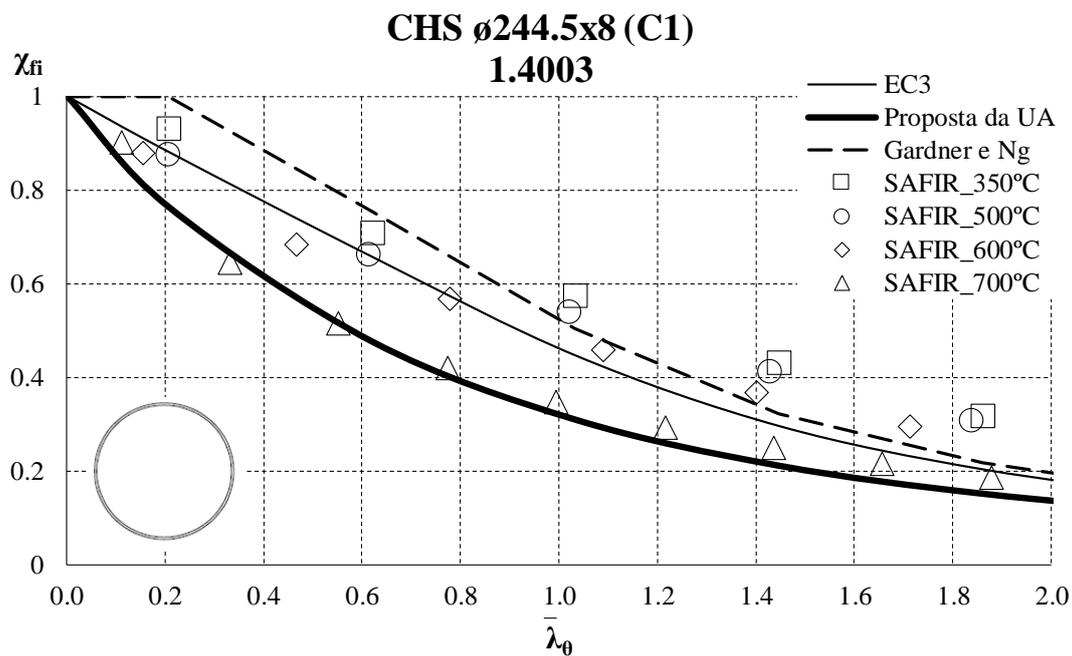


Figura A.16 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

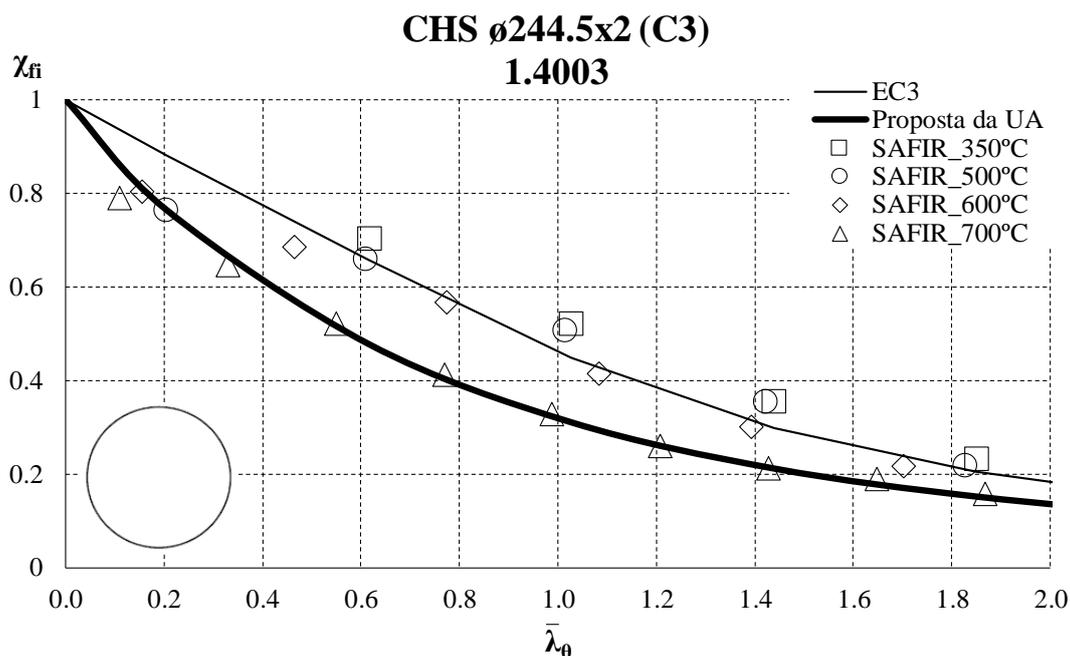


Figura A.17 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

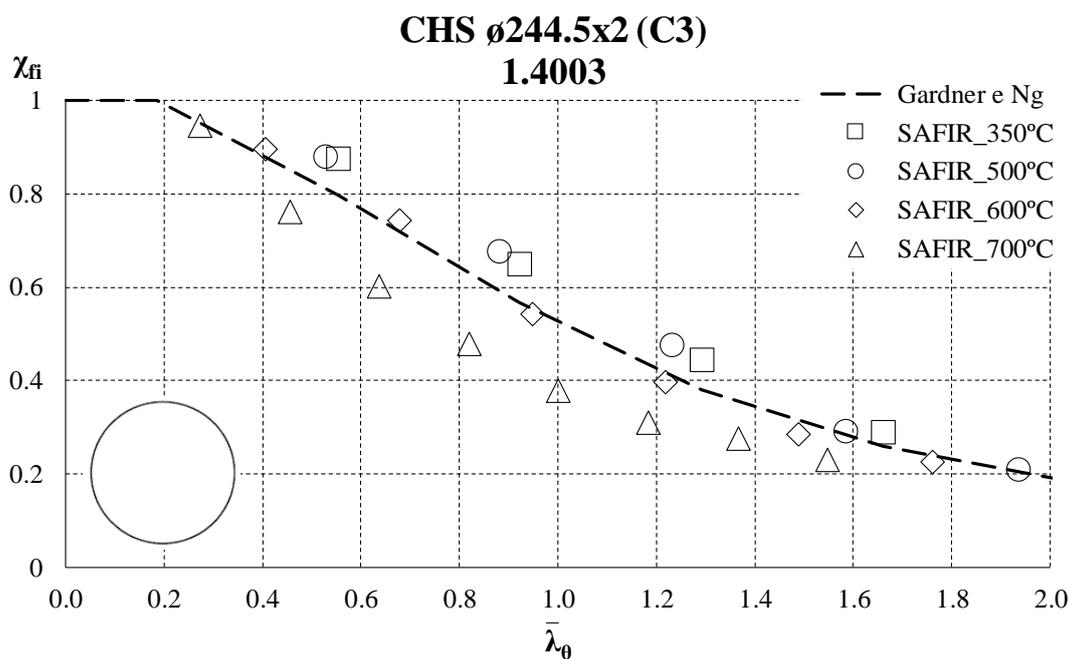


Figura A.18 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

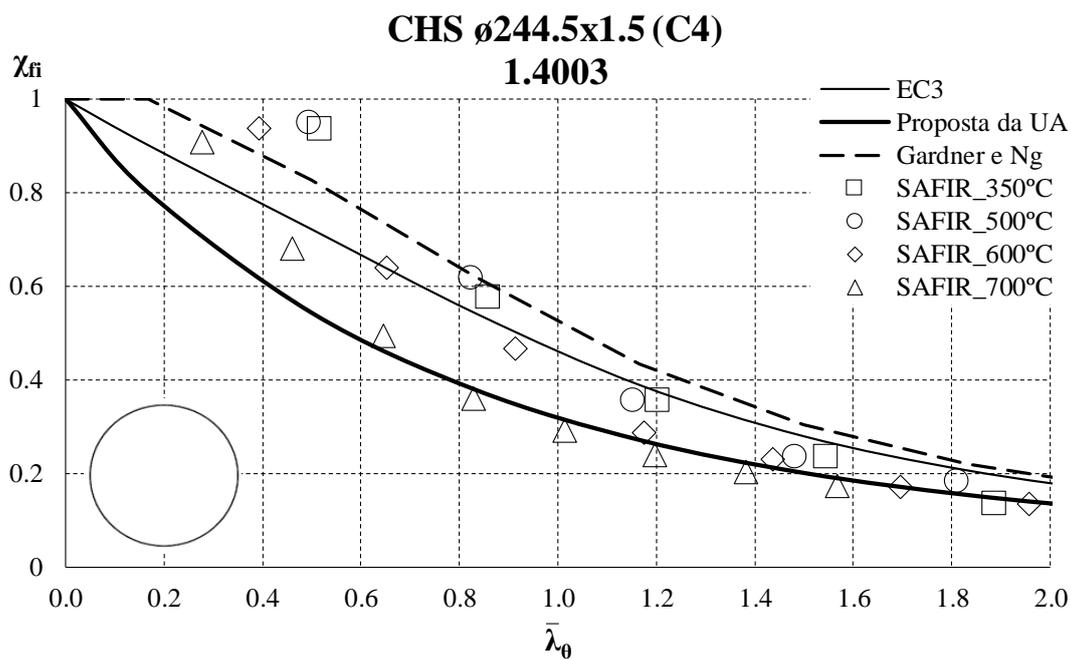


Figura A.19 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

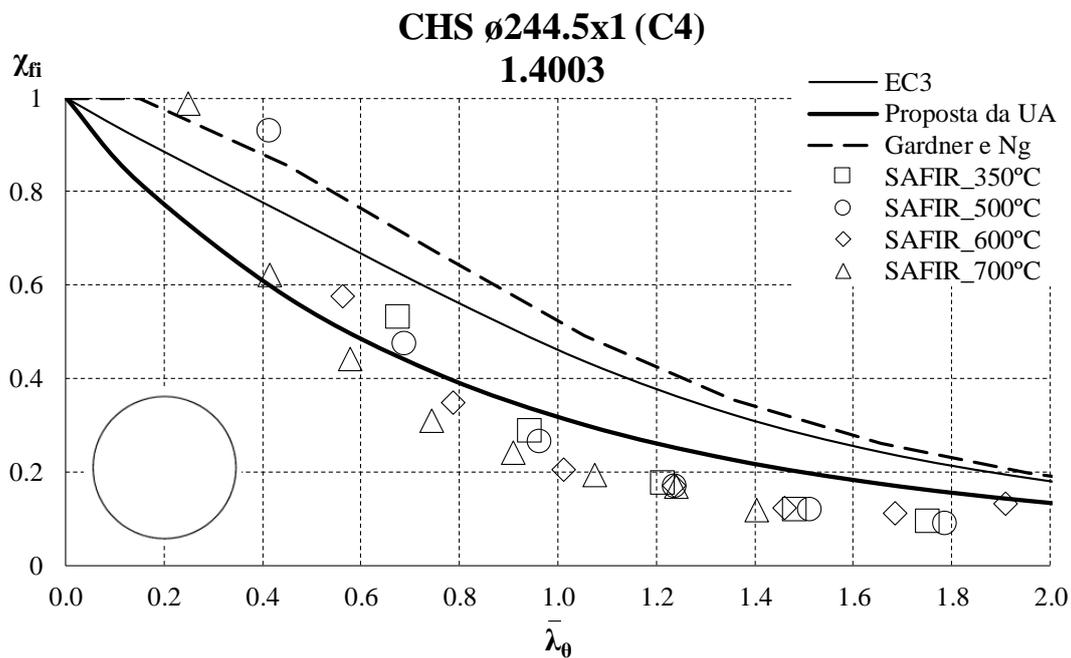


Figura A.20 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável ferrítico (1.4003).

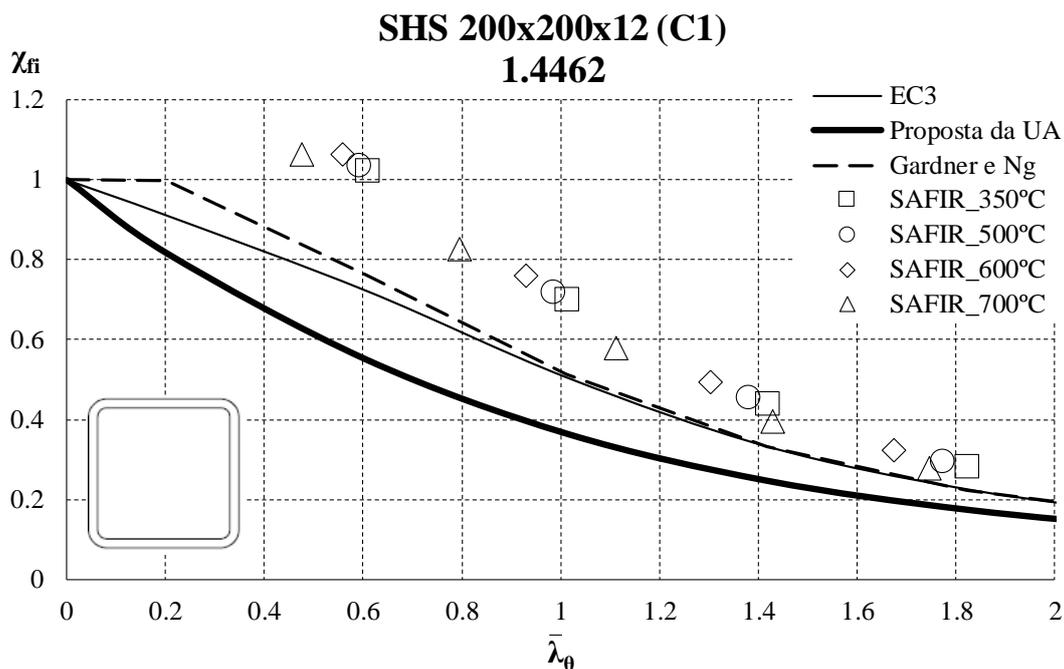


Figura A.21 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

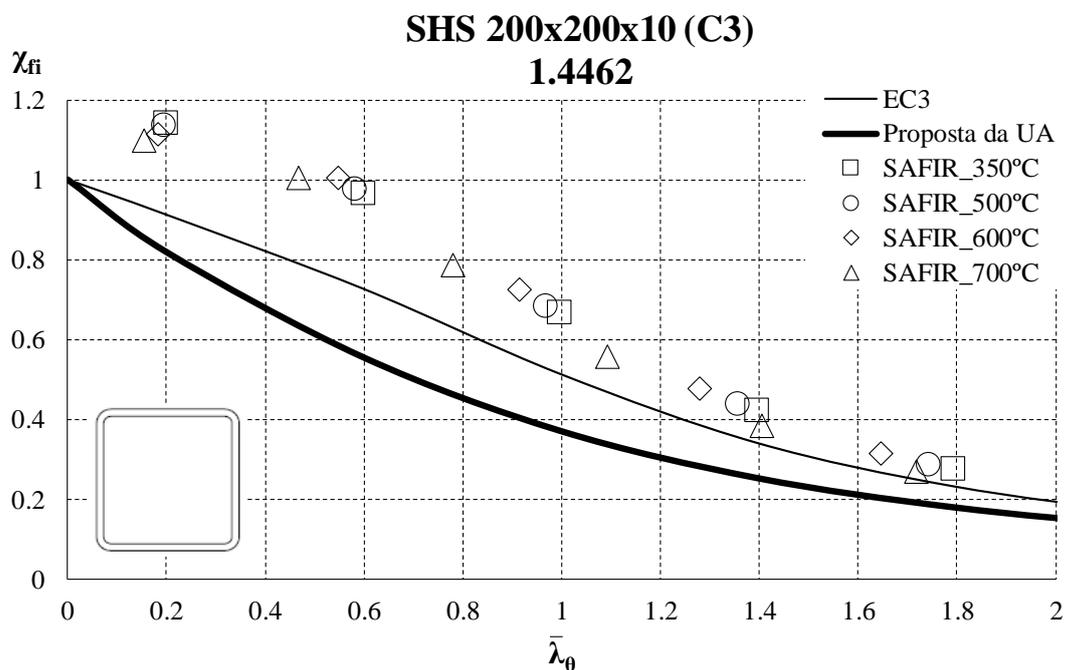


Figura A.22 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

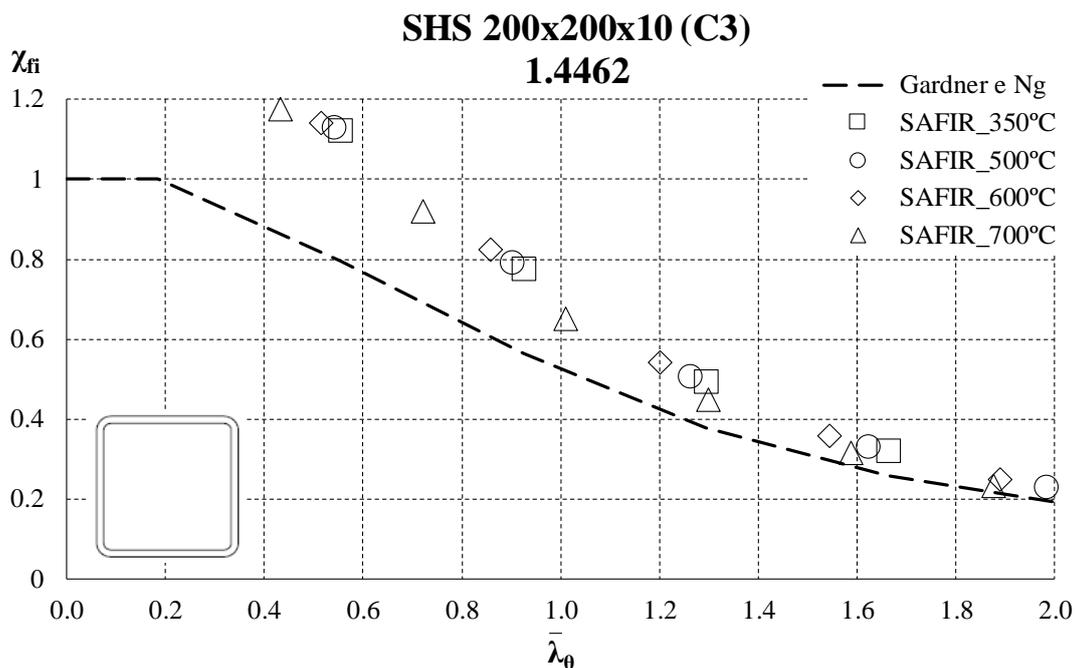


Figura A.23 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

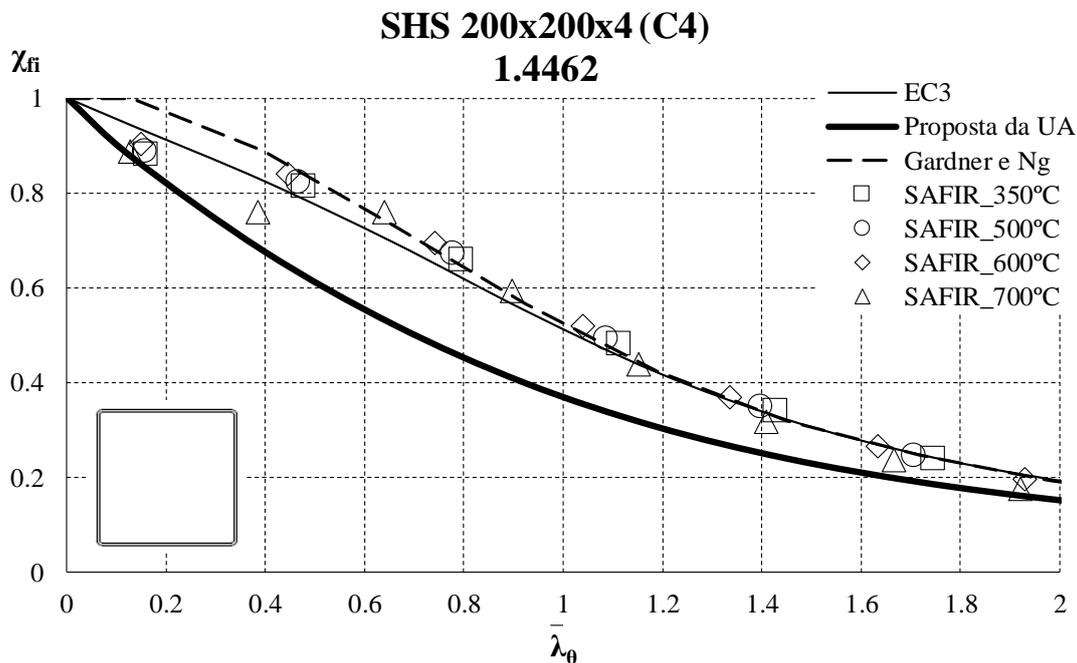


Figura A.24 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

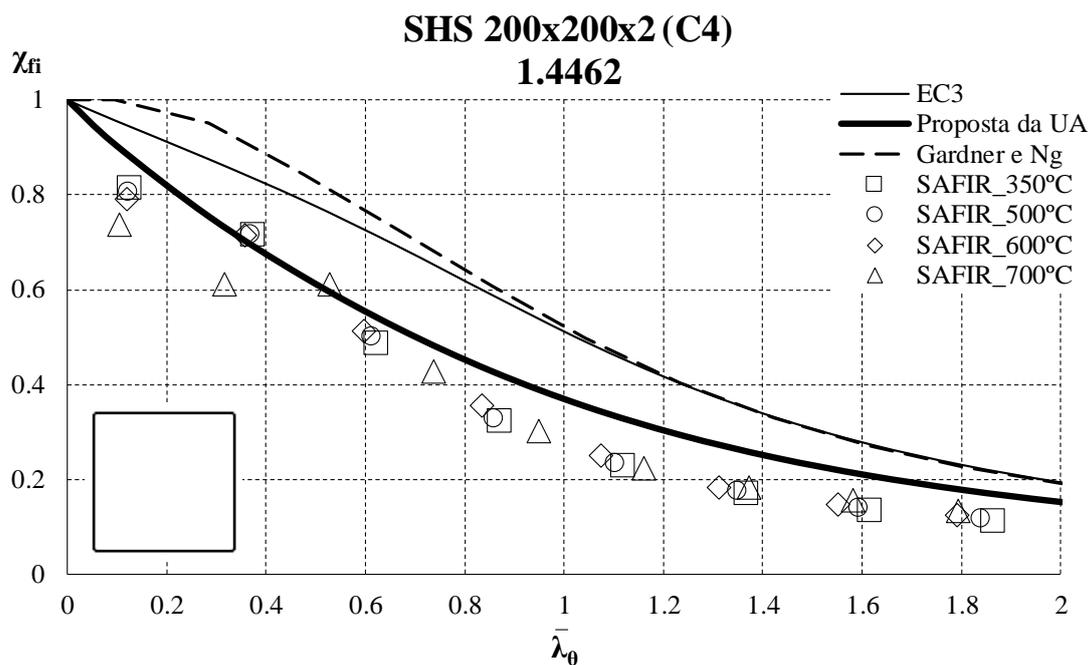


Figura A.25 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal quadrangular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

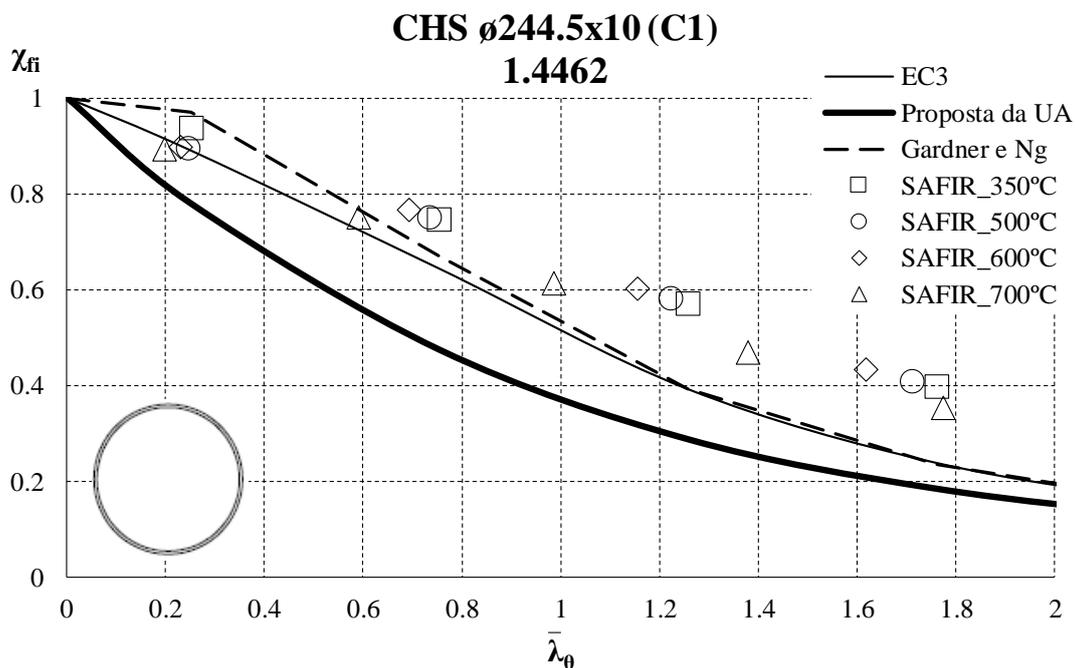


Figura A.26 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 1 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

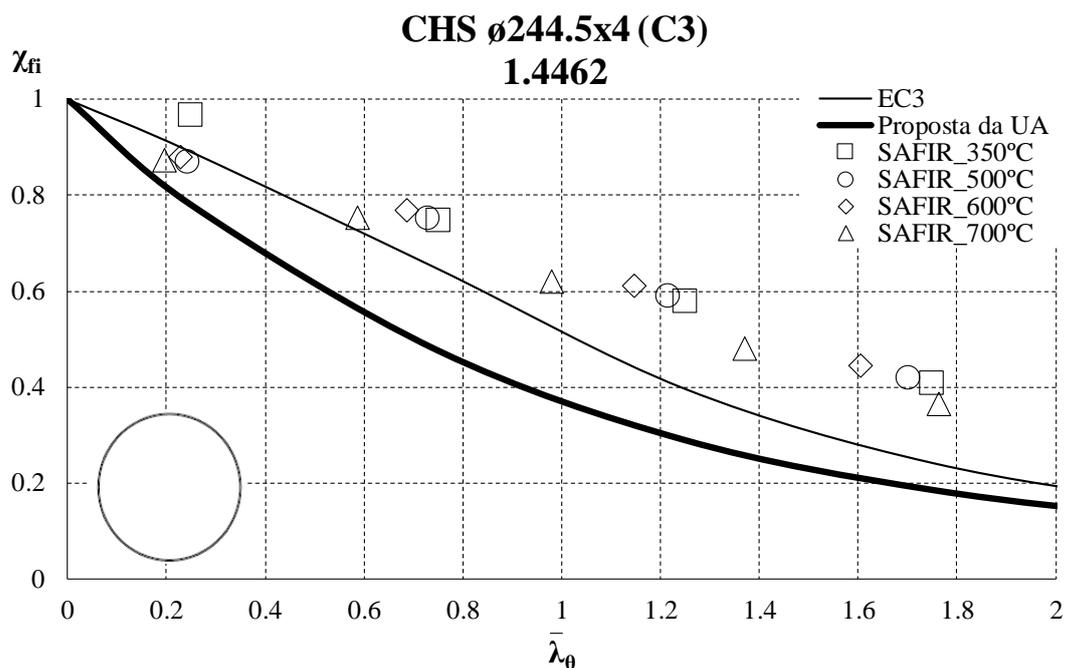


Figura A.27 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

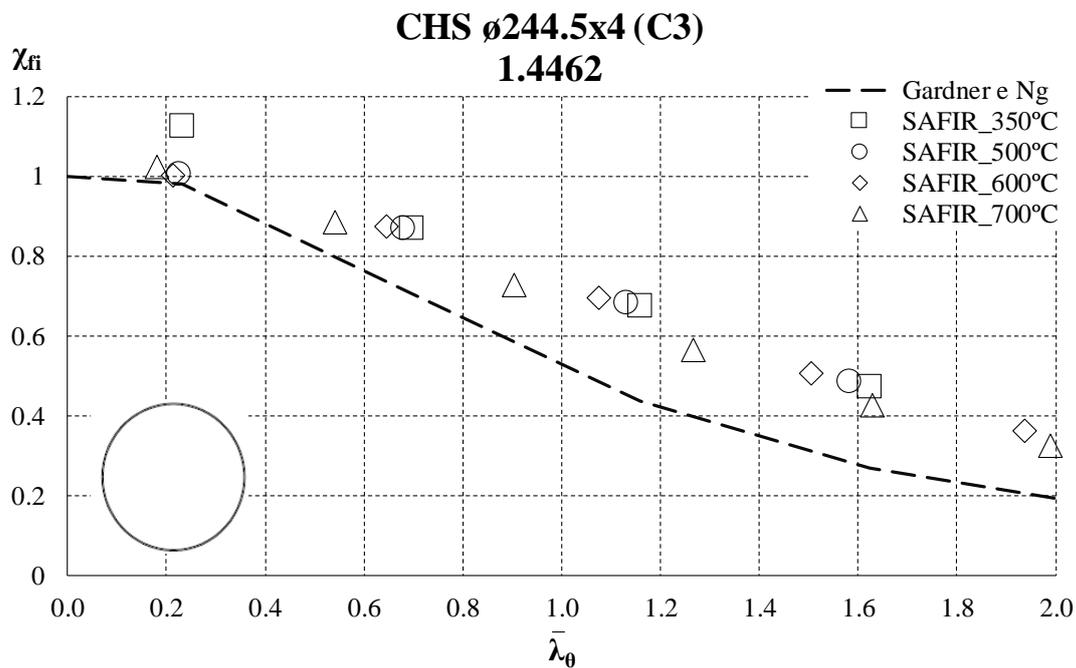


Figura A.28 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 3 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

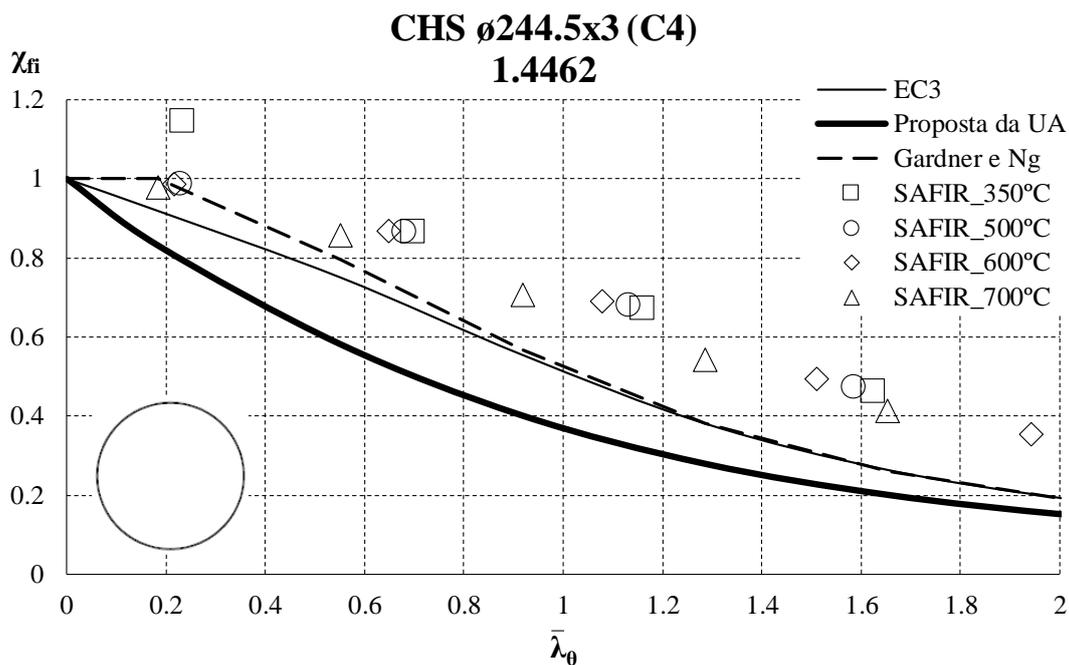


Figura A.29 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

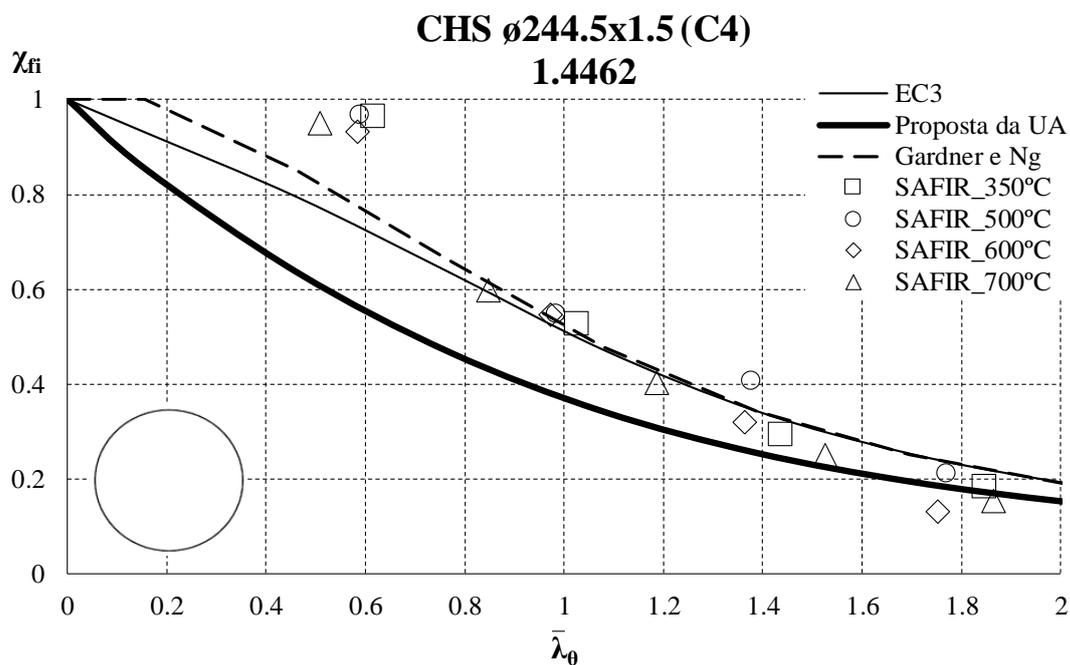


Figura A.30 - Resultados numéricos para elementos com secção transversal circular de classe 4 de aço inoxidável austenítico – ferrítico (1.4462).

%