



**Sérgio Miguel
Rodrigues Morgado**

**Resistência ao fogo de vigas com secções
retangulares ocas em aço inoxidável**



**Sérgio Miguel
Rodrigues Morgado**

**Resistência ao fogo de vigas com secções
retangulares ocas em aço inoxidável**

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 Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação 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	Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro
Vogal – Agente Principal	Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança
Vogal – Orientador	Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes Professor Associado, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Sendo este trabalho o culminar de um longo trajeto, gostaria de deixar aqui algumas palavras de agradecimento a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram ao longo do seu desenvolvimento.

Usando as palavras de muitos outros que vieram antes de mim e certamente muitos outros que não de vir, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Lopes, pelo apoio incrível que prestou ao longo de todo o processo, pela sua infinita disponibilidade, dedicação, paciência, partilha de conhecimentos, dicas e críticas construtivas sem os quais este trabalho não seria possível

Ao meu coorientador Prof. Doutor Vila Real pelo seu apoio, sugestões e pela sua disponibilidade manifestada na realização desta dissertação.

Gostaria também de agradecer à minha família e amigos que me ajudaram e motivaram não só no desenvolvimento deste trabalho, mas também ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos, um sincero obrigado.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, PTDC/ECl-EGC/30655/2017, suportado pelo orçamento do POCI Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

palavras-chave

Aço inoxidável, Vigas, Fogo, Eurocódigo 3, Flexão.

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, tratando-se de um material estrutural com diversas características desejáveis, dos quais se pode destacar a sua resistência à corrosão, é um material cada vez mais procurado na construção. Apesar do elevado investimento inicial que acarreta, este pode ser recuperado a longo-prazo devido à sua elevada durabilidade e fácil manutenção, sendo o seu melhor comportamento a altas temperaturas, que pode possibilitar a abdicação do uso de materiais de proteção térmica, também um fator benéfico na avaliação do custo.

Variados tipos de secção transversal podem ser utilizados em vigas em aço inoxidável, desde secções abertas a tubulares. Na resistência ao fogo deste tipo de elementos, a consideração da ocorrência de fenómenos de instabilidade como a encurvadura lateral e, no caso de secções esbeltas, a encurvadura local é muito importante, já que estes fenómenos são agravados na presença de temperaturas elevadas.

O principal objetivo desta dissertação foca-se na realização de um estudo numérico do comportamento ao fogo de vigas com secções transversais retangulares ocas de aço inoxidável quando submetidas a altas temperaturas e sujeitas a flexão simples.

Este estudo numérico é efetuado com recurso a elementos finitos de casca com o auxílio do programa de elementos finitos SAFIR com o objetivo de avaliar a influência da geometria fechada no elemento, da classe de secção e do tipo de material no comportamento à flexão destes perfis em aço inoxidável sujeitos a altas temperaturas, lateralmente restringidos e não restringidos.

Os resultados numéricos são comparados com a metodologia preconizada pelo Eurocódigo 3 atual, bem como pela incluída na nova geração do Eurocódigo 3, concluindo da necessidade de mais estudos que possam resultar no desenvolvimento de propostas de cálculo mais precisas e seguras.

keywords

Stainless steel, Beams, Fire, Eurocode 3, Bending.

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 being a structural material with several desirable characteristics, from which its resistance to corrosion can be emphasized, is a material more and more sought after in construction. Despite having a high initial cost, this can be off set long term thanks to its high durability and easy maintenance, being its better behaviour at high temperatures, which allows it to have less or none thermal protection material, also a beneficial factor in the evaluation of cost.

Different types of cross-sections can be used in stainless steel beams, from open sections to tubular. On the fire resistance of this type of elements, the occurrence of instability phenomena such as lateral buckling and, in the case of slender cross-sections, local buckling is very important, which are aggravated in the presence of high temperatures.

The main objective of this dissertation was focused on the creation of a numerical analysis of the behaviour of stainless steel beams with rectangular hollow sections subject to fire and simple bending stresses.

This numerical study is performed based on numerical investigation with Shell finite elements carried out with the software SAFIR with the objective of analysing the influence of the closed geometry of the element, the class of cross-section and the type of material in the bending behaviour of these stainless steel element subjected to high temperatures, laterally restricted and not restricted.

The numerical results are compared with the current Eurocode 3 advocated methodology as well as the one included in the new generation of the Eurocode 3, concluding with the necessity of more studies which may result in the development of calculation proposals more precise and safer.

Índice

Índice.....	xv
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Âmbito e objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. O aço inoxidável.....	4
2.1. Características gerais do material.....	4
2.2. Aplicações Estruturais.....	5
2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas.....	7
3. Regras de cálculo.....	12
3.1. Abordagem de cálculo.....	12
3.2. Classificação de secções transversais a altas temperaturas.....	12
3.3. Resistência à flexão de secções transversais a altas temperaturas.....	13
3.4. Resistência à encurvadura lateral de vigas a altas temperaturas.....	19
4. Modelos numéricos.....	23
4.1. Considerações gerais.....	23
4.2. Casos de estudo.....	24
4.3. Restrições, cargas, malha.....	25
4.4. Imperfeições.....	30
5. Resistência da secção transversal.....	32
5.1. Considerações gerais.....	32
5.2. Estudo paramétrico.....	35
5.2.1. Secções em aço inoxidável austenítico.....	35
5.2.2. Secções em aço inoxidável ferrítico.....	36
5.2.3. Secções em aço inoxidável austenítico-ferrítico.....	37
5.3. Análise estatística.....	37
6. Resistência à encurvadura lateral.....	42
6.1. Considerações gerais.....	42
6.2. Estudo paramétrico.....	44
6.2.1. Vigas em aço inoxidável austenítico.....	44
6.2.2. Vigas em aço inoxidável ferrítico.....	46
6.2.3. Vigas em aço inoxidável austenítico-ferrítico.....	47
6.3. Análise estatística.....	48
7. Considerações finais.....	54
8. Referências Bibliográficas.....	57

Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).....	4
Figura 2. Stainless Steel Rectangular (Pipe – Metline Industries, Mumbai)	6
Figura 3. Escadas “Genetic Stair” – Caliper Studio	6
Figura 4. Cobertura, Universidade Técnica Checa (CTU), Praga, 2019	7
Figura 5. Ponte “Helix Bridge”, COX – Marina Bay, Singapore, 2010	7
Figura 6. Variação do fator de redução k_E , θ com a temperatura	9
Figura 7. Variação do fator de redução k_y , θ com a temperatura.....	10
Figura 8. Variação do fator de redução $k_{0,2p}$, θ com a temperatura.....	10
Figura 9. Relação tensão-extensão para vários aços inoxidáveis a 600°C	11
Figura 10. Resistência à flexão vs Classificação para aço carbono e aço inoxidável de acordo com o EC3 atual.....	18
Figura 11. Resistência à flexão vs Classificação para aço carbono de acordo com o EC3 nova geração	18
Figura 12. Resistência à flexão vs Classificação para aço inoxidável de acordo com o EC3 nova geração	19
Figura 13. Variação do fator de redução χ_{LT} em função da esbelteza	22
Figura 14. Representação da secção transversal - Largura (b) x Altura (h) x Espessura (t)	24
Figura 15. Pormenor da malha dos topos.....	26
Figura 16. Restrições de apoios.....	27
Figura 17. Pormenores de restrições de apoios	27
Figura 18. Apoios de viga restringida lateralmente.....	28
Figura 19. Aplicação das cargas	29
Figura 20. Pormenor de aplicação das cargas	29
Figura 21. Encurvadura local	30
Figura 22. Encurvadura lateral	31
Figura 23. Pormenor de encurvadura local – Viga em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 com 3 m de comprimento e secção 150x150x5 a 500°C.....	34
Figura 24.	34
Figura 25. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4301	35
Figura 26. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4401	35
Figura 27. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 4 / não esbeltas e esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003	36
Figura 28. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4462	37
Figura 29. Comparação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4301	38
Figura 30. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 3 / esbeltas em aço austenítico 1.4401	38
Figura 31. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 4 / não esbeltas e esbeltas em aço ferrítico 1.4003	40
Figura 32. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 4 / esbeltas em aço austenítico-ferrítico 1.4462	41
Figura 33. Pormenor de encurvadura lateral – Viga em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 com 3 m de comprimento e secção 100x200x5 a 500°C.....	43
Figura 34. Gráfico de variação de momento em função do deslocamento vertical de um ponto a meio vão	43

Figura 35. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável austenítico 1.4301	44
Figura 36. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável austenítico 1.4401	45
Figura 37. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral para secções de classe 1 / não esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003.....	46
Figura 38. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral para secções de classe 4 / esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003	46
Figura 39. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável duplex 1.4462	48
Figura 40. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4301.....	49
Figura 41. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4401.....	50
Figura 42. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço ferrítico 1.4003.....	51
Figura 43. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço duplex 1.4462.....	53

Índice de Tabelas

Tabela 1. Relação Extensão-Tensão para as várias propostas do Eurocódigo 3	8
Tabela 2. Relação da resistência da secção com a sua classificação	14
Tabela 3. Determinação de ρ para elementos internos à compressão.....	16
Tabela 4. Determinação de ρ para elementos salientes à compressão.....	17
Tabela 5. Cálculo do fator de redução χ_{LT} , fi.....	20
Tabela 6. Cálculo do fator de redução χ_{LT} , fi, mod.....	22
Tabela 7. Classes de Secção para Aço Austenítico 1.4301	32
Tabela 8. Classes de Secção para Aço Austenítico 1.4401	33
Tabela 9. Classes de Secção para Aço Ferrítico 1.4003	33
Tabela 10. Classes de Secção para Aço Duplex 1.4462	33
Tabela 11. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4301	39
Tabela 12. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4401	39
Tabela 13. Avaliação estatística para secções transversais em aço ferrítico 1.4003	40
Tabela 14. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico-ferrítico 1.4462	41
Tabela 15. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4301	50
Tabela 16. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4401	51
Tabela 17. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço ferrítico 1.4003.....	52
Tabela 18. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço duplex 1.4462	53

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Quando se fala em aço inoxidável não se pode deixar de ser feita a comparação do mesmo com aço carbono. Apesar de o aço carbono ser predominante devido ao seu menor custo, à grande variedade de perfis e ao grande volume de informação existente relativa ao seu comportamento, ao longo dos anos a aplicação do aço inoxidável para fins estruturais tem vindo a aumentar. Algumas das razões para este aumento de utilização de aços inoxidáveis são o seu bom acabamento a nível estético, a fácil manutenção, a boa resistência à corrosão, a alta ductilidade, melhor resistência ao fogo e o seu custo de ciclo de vida, que permite que estes sejam competitivos economicamente com os aços carbono apesar do seu custo inicial mais elevado (Manuel, 2016, Euro Inox e SCI, 2006).

De entre os aços inoxidáveis podem-se distinguir 3 grupos mais utilizados na construção, os austeníticos, ferríticos e duplex (austeníticos-ferríticos). Cada um destes tipos possui vantagens e desvantagens relativamente aos restantes. Os aços austeníticos por exemplo, oferecem uma maior resistência à corrosão, sendo por isso indicados para locais com condições ambientais agressivas, como é o caso de locais com proximidade marítima. Por oposição os aços ferríticos, são aços mais económicos, não deixando de possuir boa resistência à corrosão e resistência estrutural. Finalmente os aços duplex possuem boa ductilidade, sendo por isso mais indicados para locais com probabilidade de ocorrência de sismos. Por estas e outras razões, a escolha destes aços deve ser adaptada às necessidades (Manuel, 2016).

Independentemente do grupo do aço inoxidável em causa, de um modo geral este tipo de aço apresenta melhor comportamento ao fogo do que os aços carbono, no entanto, tal como para os aços carbono, o aço inoxidável é bastante suscetível à influência do aumento de temperatura devido à sua elevada condutividade térmica e à redução das suas propriedades mecânicas com a temperatura.

Apesar de o incêndio ser considerado uma ação acidental, devido à sua probabilidade de ocorrência torna-se relevante conhecer o comportamento do aço com exatidão quando exposto a situações de incêndio (Lourenço, 2015).

Vigas com secções retangulares ocas (RHS) são comuns na construção, isto deve-se à aparência estética deste tipo de elementos como material de acabamento na arquitetura moderna, a sua

boa resistência à torção e conseqüentemente baixa suscetibilidade a fenómenos de instabilidade lateral.

O estudo deste tipo de secções em situação de incêndio é particularmente relevante uma vez que o seu comportamento ainda é pouco conhecido. Isto deve-se em parte ao facto de as formulações previstas no Eurocódigo 3 serem principalmente desenvolvidas para perfis com secções em I, tanto para a resistência de secções esbeltas como para a encurvadura lateral.

Na parte 1-4 do Eurocódigo 3 (EC3) (CEN, 2006a) são apresentadas propostas de cálculo de resistência de elementos em aço inoxidável e remete a resistência ao fogo dos mesmos elementos para a EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), que indica que as expressões a serem usadas devem ser as mesmas que para o aço carbono, apesar das leis constitutivas serem diferentes. Estas propostas têm vindo a ser revistas ao longo dos anos, tendo surgido novas propostas, tais como as incluídas nos documentos em desenvolvimento da nova geração do EN 1993-1-2 (SC3.T6, 2019).

Devido à importância que o aço inoxidável tem vindo a desempenhar na construção, para além destas propostas, existem muitas outras a serem constantemente desenvolvidas, sendo alguns exemplos, Lopes e Vila Real, 2014; Shenggang, et al., 2016; Lopes, et al., 2017; Lopes, et al., 2018, entre muitos outros.

O desenvolvimento deste tipo de propostas pode ser feito recorrendo à utilização de métodos numéricos aplicando programas de elementos finitos, como é o caso do programa SAFIR. Análises geometricamente e materialmente não lineares com imperfeições são utilizadas no estudo presente neste trabalho, com vista à melhor compreensão do comportamento ao fogo de vigas restringidas e não restringidas lateralmente com secções retangulares ocas em aço inoxidável.

1.2. Âmbito e objetivos

Devido ao aumento da utilização de aço inoxidável na construção, é cada vez mais importante conhecer o comportamento dos elementos estruturais compostos por este material de maneira a garantir a segurança pelo menor custo. Neste documento pretende-se estudar o comportamento de vigas com secções RHS com secção de diferentes classes (esbeltas e não esbeltas) quando sujeitas a momento fletor em condições de incêndio.

Para este tipo de secções é essencial o estudo de efeitos de encurvadura local e encurvadura lateral (modo de instabilidade global em vigas). Este estudo será feito de acordo com as propostas do Eurocódigo 3 atual e respetiva nova geração e posteriormente comparado aos valores retirados da análise numérica realizada no programa de cálculo SAFIR.

1.3.Estrutura da dissertação

No capítulo 1 pretende-se dar uma breve introdução aos objetivos do documento bem como a sua estrutura.

No capítulo 2 fala-se sobre os vários tipos de aços inoxidáveis, as suas aplicações e o seu comportamento mecânico a altas temperaturas.

No capítulo 3 faz-se a distinção das diversas classes de secção e apresentam-se várias propostas de cálculo de resistência à encurvadura local e à encurvadura lateral de vigas em aço inoxidável.

No capítulo 4 dá-se uma breve introdução ao programa de cálculo SAFIR e como ele pode ser usado para verificar as várias propostas de cálculo apresentadas anteriormente. Ao mesmo tempo são apresentados os casos de estudos bem como as suas condicionantes.

No capítulo 5 são apresentados os elementos restringidos lateralmente e são analisados os resultados obtidos para esses casos.

No capítulo 6 são apresentados os elementos não restringidos lateralmente e da mesma forma são analisados os resultados obtidos para esses casos.

No último capítulo apresentam-se considerações finais resultantes do desenvolvimento deste documento.

2. O AÇO INOXIDÁVEL

2.1. Características gerais do material

Os aços inoxidáveis podem ser distribuídos em 5 grupos: martensíticos, austeníticos, ferríticos, duplex e endurecidos por precipitação.

A principal distinção entre os vários tipos é feita através das percentagens de níquel e crómio presentes nos mesmos, de acordo com a Figura 1.

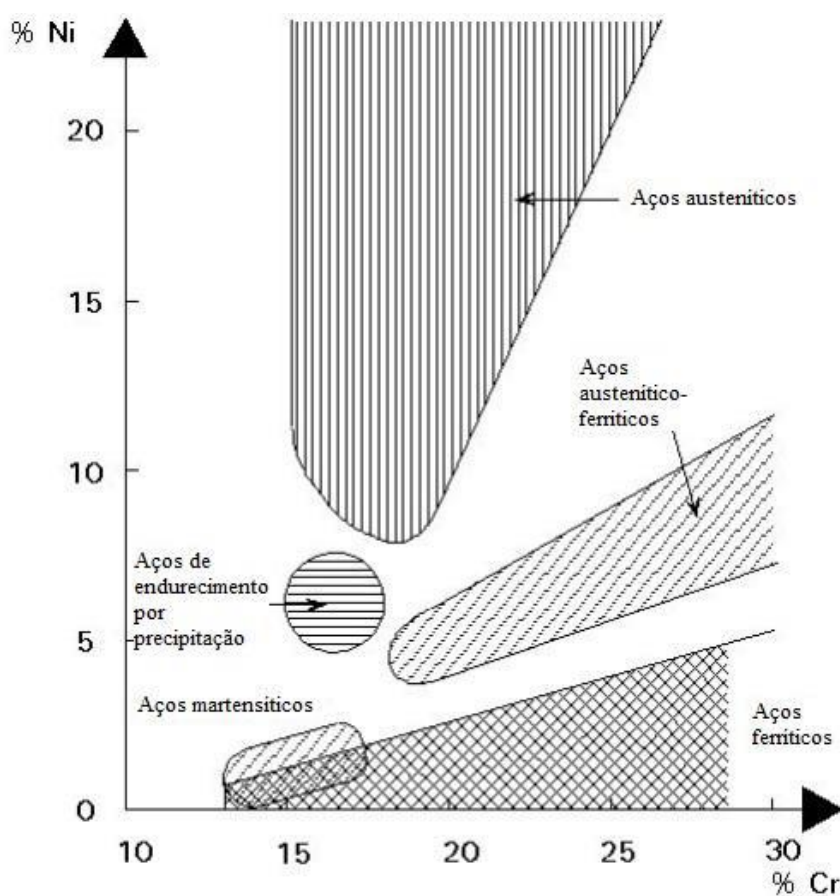


Figura 1. Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000)

O níquel é um elemento com bastante peso na escolha do aço inoxidável visto ser o principal fator no custo de fabrico do aço.

Dos 5 grupos mencionados acima os mais utilizados na construção são os austeníticos, ferríticos e duplex.

Os austeníticos, tal como pode ser visto na imagem da Figura 1, são os que têm maior percentagem de níquel e conseqüentemente mais caros. No entanto isto não os impede de ser

dos aços mais usados devido às suas diversas características, entre elas, possuem boa resistência a carregamento e possuem um óxido rico em crómio que, em contacto com o oxigénio do ar, reage e cria uma camada de proteção auto regenerativa, boa contra a corrosão.

Os ferríticos, por oposição apresentam a menor percentagem de níquel e por isso o menor custo, não deixando de ter boa resistência à corrosão e resistência estrutural.

Os aços duplex possuem boa ductilidade, resistência a carregamentos, corrosão e desgaste, como o nome indica trata-se de um aço com propriedades de ambos os austeníticos e ferríticos (Lourenço, 2015 e Rossi, 2010).

A relação de tensão-extensão é diferente do aço carbono para o aço inoxidável, tal como é mencionado na EN 1993-1-2 (CEN, 2005b). Até ao limite convencional de elasticidade o aço carbono tem comportamento aproximadamente linear. A partir deste limite este mesmo aço atinge o patamar de limite de elasticidade (ou patamar de cedência), o qual não existe no aço inoxidável, sendo por isso arbitrado o limite convencional de elasticidade para a mesma extensão de 0,2% à temperatura normal, a partir da qual o aço inoxidável apresenta endurecimento significativo, diferente do modelo bilinear do aço carbono (Manuel, 2016; Lopes e Vila Real, 2005).

As propriedades f_y , f_u e E_a necessárias ao cálculo da tensão-extensão são definidas para os vários tipos de aço inoxidável na EN 1993-1-4 (CEN, 2006a) e as suas respetivas reduções a altas temperaturas na EN1993-1-2 (CEN, 2005b).

2.2. Aplicações Estruturais

Na presente tese a que este relatório intermédio se refere, pretende-se estudar perfis com secções retangulares ocas fletidas quando sujeitas à ação do fogo de maneira a garantir a segurança das estruturas que as incluem.

Ao longo dos anos tem-se observado a aplicação de estruturas em aço inoxidável em diferentes tipologias de construções.

Uma das formas de usar o aço inoxidável, e aquela que se pretende estudar nesta tese, é em vigas, nomeadamente vigas retangulares ocas (RHS), exemplificada na Figura 2.



Figura 2. Stainless Steel Rectangular (Pipe – Metline Industries, Mumbai)

Na Figura 4 podem-se observar umas escadas desenvolvidas por Caliper Studio e intituladas de Genetic Stair. As escadas estão apoiadas em ambas as lajes e cobrem uma altura de 5 m. Toda a sua estrutura é feita de perfis tubulares em aço inoxidável. Estas escadas foram desenvolvidas para unir dois apartamentos existentes e criar um espaço que combina uma galeria de arte e espaço habitacional, realçando a sua importância estética.



Figura 3. Escadas “Genetic Stair” – Caliper Studio

Alternativamente pode-se observar na Figura 5 uma estrutura que combina vidro com aço inoxidável para criar uma cobertura não só resistente e duradoura, mas também agradável à vista. A estrutura é composta por uma série de perfis com secções tubulares circulares, retangulares e quadradas e demonstra algumas das inúmeras maneiras em que o aço inoxidável pode ser usado.



Figura 4. Cobertura, Universidade Técnica Checa (CTU), Praga, 2019

Outro exemplo de uma estrutura com perfis tubulares em aço inoxidável é a ponte “Helix Bridge” apresentada na Figura 6. A ponte cobre uma distância de 285m com uma estrutura de dupla espiral baseada no arranjo geométrico do ADN. A utilização de aço inoxidável duplex permitiu a criação de uma estrutura esbelta e elegante com tubos com apenas 273mm de diâmetro e lhe garantiram o prémio “Transport Architecture Award, World Architecture Festival Barcelona 2010”.



Figura 5. Ponte “Helix Bridge”, COX – Marina Bay, Singapore, 2010

2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas

Como já foi referido anteriormente, as leis constitutivas a temperaturas elevadas para o aço carbono e aço inoxidáveis são diferentes.

Atualmente encontram-se a ser propostas novas leis constitutivas para o aço inoxidável a altas temperaturas para futura consideração no EC3 em vez da lei atualmente presente na Parte 1.2

do EC3, tal como se apresenta na Tabela 1. Salienta-se que a presente dissertação foi realizada usando como base a lei constitutiva apresentada no Eurocódigo atual.

Tabela 1. Relação Extensão-Tensão para as várias propostas do Eurocódigo 3

Eurocódigo 3 atual	
Limites	Cálculo da tensão em função da extensão
$\varepsilon_{\theta} \leq \varepsilon_{c,\theta}$	$\sigma_{\theta} = \frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{\theta}}{1 + a \cdot \varepsilon^b}$
$\varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon_{\theta} \leq \varepsilon_{u,\theta}$	$\sigma_{\theta} = f_{0,2p,\theta} - e + (d/c) \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{\theta})^2}$
Eurocódigo 3 nova geração	
Limites	Cálculo da extensão em função da tensão
$\sigma_{\theta} \leq f_{p0,2,\theta}$	$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E_{a,\theta}} + 0,002 \left[\frac{\sigma_{\theta}}{f_{p0,2,\theta}} \right]^{n_{\theta}}$
$f_{p0,2,\theta} < \sigma_{\theta} \leq f_{u,\theta}$	$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta} - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta} - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right)^{m_{\theta}}$

O procedimento de cálculo da relação extensão-tensão de acordo com o EC3 nova geração, segue uma lei do tipo Ramber-Osgood, onde a lei é definida pela determinação da extensão em função da tensão. Nesse procedimento estão especificados $E_{p0,2,\theta}$ e ε_u que podem ser obtidos no Anexo C.2 do EN 1993-1-4 (CEN, 2006a).

$E_{p0,2,\theta}$ representa o módulo da tangente em $f_{p0,2,\theta}$, ou seja, a inclinação da curva quando a tensão tende para $f_{p0,2,\theta}$ e pode ser obtida através da seguinte equação, à semelhança do indicado no EN 1993-1-4, Anexo C.2 (CEN, 2006a)

$$E_{p0,2,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{1 + 0,002 \cdot n_{\theta} \cdot \frac{E_{a,\theta}}{f_{p0,2,\theta}}} \quad (2.1)$$

ε_u é necessário para delimitar $\varepsilon_{u,\theta}$ de acordo com a expressão $0,02 \leq \varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon_u$ e pode ser obtido apartir do EN 1993-1-4, Anexo C.2 (CEN, 2006a), através da seguinte equação:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad ; \quad \varepsilon_u \leq A \quad (2.2)$$

sendo A o alongamento após a fratura, definida na norma EN10088-2 (CEN, 2005c).

As propriedades mecânicas a altas temperaturas dependem dos vários fatores de redução k que variam com a temperatura de aço para aço. Nas figuras 8 a 10 apresentam-se as reduções do módulo de elasticidade, para a inclinação da reta que representa o domínio elástico, para a tensão de cedência efetiva e para a tensão limite de proporcionalidade, respetivamente.

De notar que os fatores $k_{0,2p,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ do EC3 atual passam a ser chamados respetivamente $k_{p0,2,\theta}$ e $k_{2,\theta}$. De igual forma $f_{0,2p,\theta}$ e $f_{y,\theta}$ passam a ser $f_{p0,2,\theta}$ e $f_{2,\theta}$, estando $f_{2,\theta}$ compreendido no intervalo $f_{p0,2,\theta} < f_{2,\theta} < f_{u,\theta}$. Por uma questão de consistência, optou-se por usar $f_{2\%,\theta}$ daqui em diante sempre que se esteja a referir a $f_{y,\theta}$ ou $f_{2,\theta}$.

Nas Figuras 8, 9 e 10 pretende-se mostrar não só as diferenças entre aços inoxidáveis para as várias propostas, mas também como estes se comparam com o aço carbono.

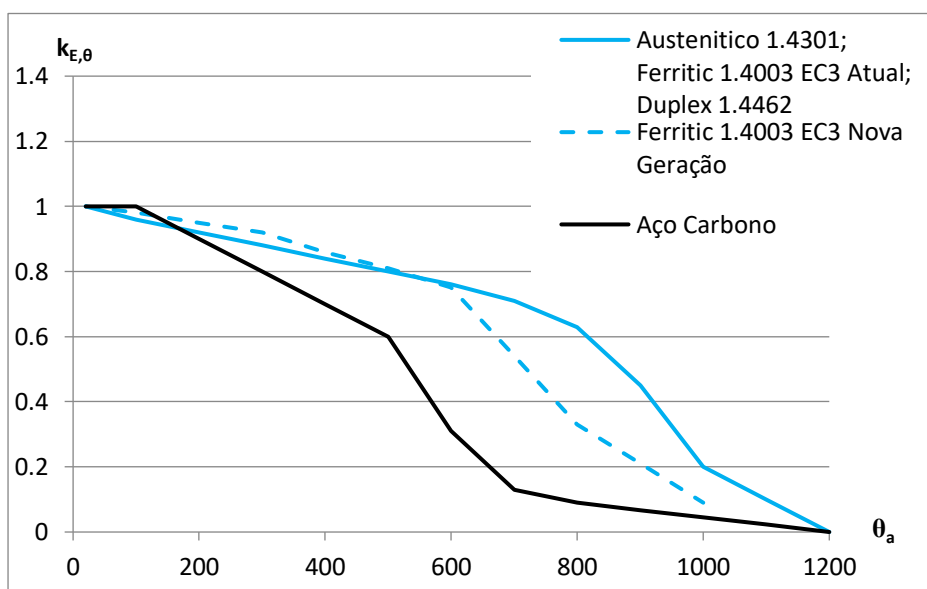


Figura 6. Variação do fator de redução $k_{E,\theta}$ com a temperatura

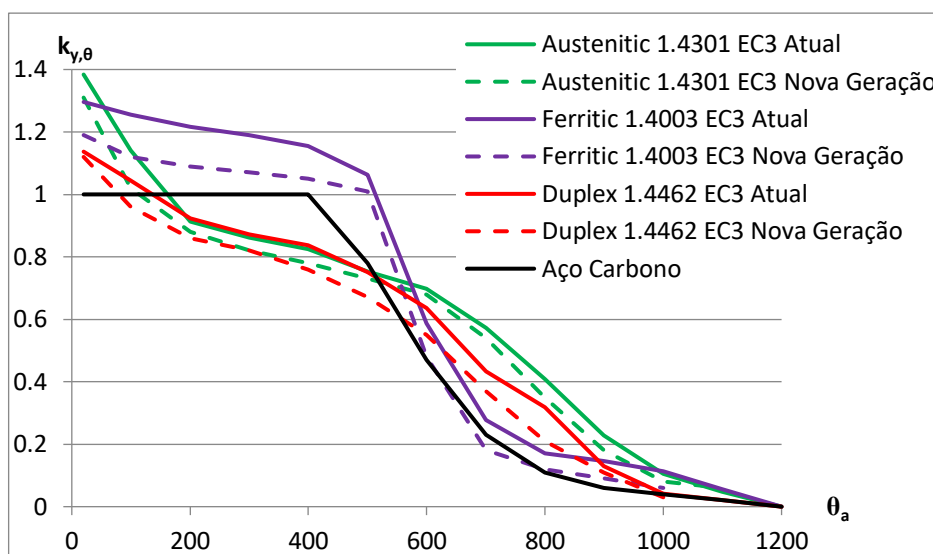


Figura 7. Variação do fator de redução $k_{y,\theta}$ com a temperatura

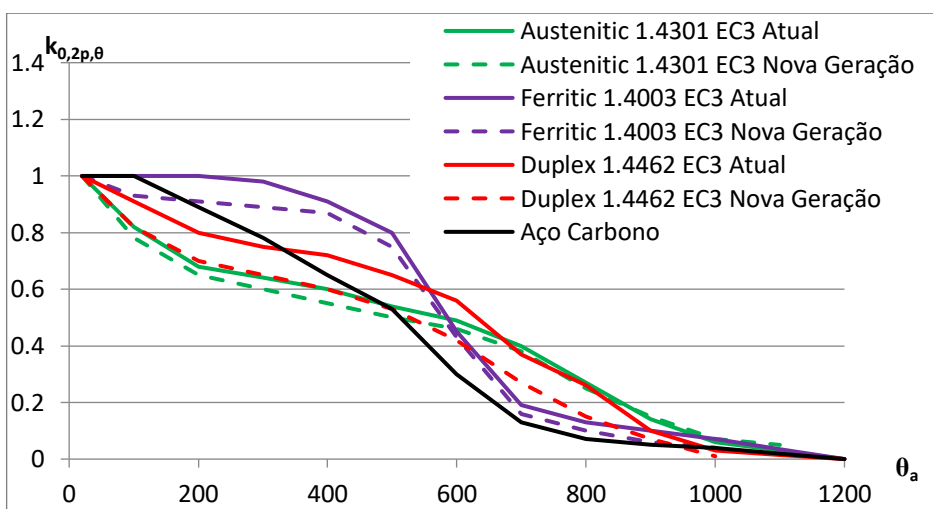


Figura 8. Variação do fator de redução $k_{0,2p,\theta}$ com a temperatura

Como se pode verificar nos gráficos, de uma forma geral o aço inoxidável apresenta melhor comportamento a altas temperaturas do que o aço carbono, independentemente do seu tipo.

Pode-se também constatar que na nova geração quase todos os valores dos fatores de redução são menores que os propostos no Eurocódigo 3 atual.

Após a análise destes valores consegue-se finalmente chegar à relação tensão-extensão como era pretendido, podendo-se observar um exemplo no gráfico da Figura 11 para uma temperatura de 600 °C.

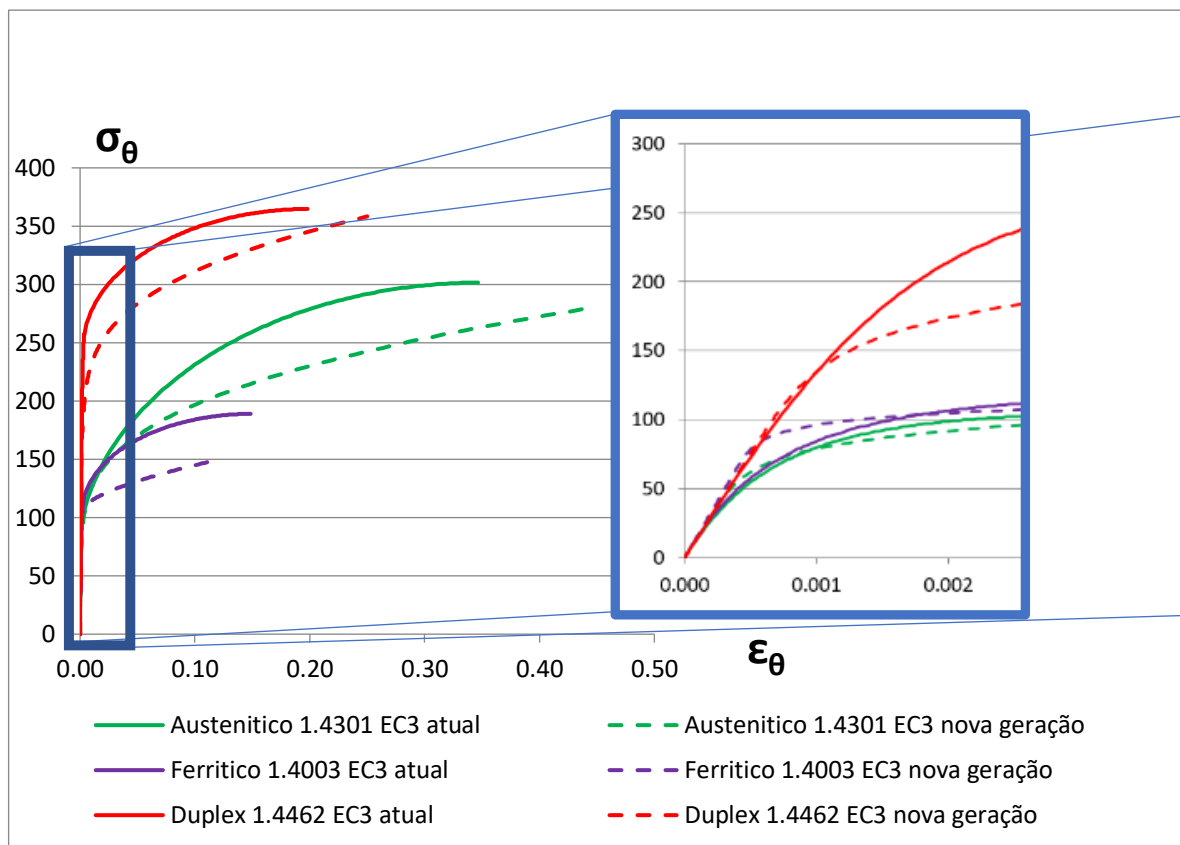


Figura 9. Relação tensão-extensão para vários aços inoxidáveis a 600°C

3. REGRAS DE CÁLCULO

3.1. Abordagem de cálculo

No presente capítulo pretende-se dar uma breve introdução às classificações de secções transversais para perfis em aço carbono e aço inoxidável, bem como ao cálculo da resistência à flexão de secções e ao cálculo da resistência à encurvadura lateral do elemento, seguindo a abordagem de cálculo desenvolvida no âmbito da normalização Europeia. O estudo que se pretende realizar no âmbito deste trabalho será feito de acordo com as propostas de cálculo da versão atual do EC3 e do documento de trabalho da futura versão do mesmo regulamento denominada por “Nova geração”.

3.2. Classificação de secções transversais a altas temperaturas

No Eurocódigo 3 atual tanto os perfis em aço carbono como em aço inoxidável podem ser classificados em 4 classes, tendo estas como objetivo identificar em que medida a sua resistência e capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

- Secções transversais classe 1 – é possível a formação de rótula plástica, com capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- Secções transversais classe 2 – conseguem atingir o momento resistente plástico, mas a sua capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- Secções transversais classe 3 – são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido;
- Secções transversais classe 4 – são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

Na nova geração do Eurocódigo 3, para os aços carbono, a atual distinção de classes continua a ser aplicada, não sofrendo qualquer alteração. Relativamente aos aços inoxidáveis, nesta futura versão apresenta-se uma divisão em apenas 2 classes de secções transversais, esbeltas e não esbeltas.

Fazendo um paralelismo com a classificação atual, as secções esbeltas são o equivalente a secções de classe 3 e 4 e as não esbeltas o equivalente a secções de classe 1 e 2, deixando de existir distinções intermédias.

O procedimento de cálculo para a determinação da classe de secção é diferente entre o EC3 atual e a EC3 nova geração, no entanto, como as classes são sequenciais, se as condições para uma determinada classe não forem aplicáveis a toda a secção, então deverá ser feita a verificação para a classe seguinte até que todas as condições sejam cumpridas.

No primeiro caso a verificação deverá ser feita da classe 1 para a classe 4 e no segundo caso da não esbelta para a esbelta.

- Cálculo de classes para aço carbono segundo o Eurocódigo 3 atual: EN 1993-1-1, 5.6 atual com adaptação a situação de incêndio (CEN, 2005a)
- Cálculo de classes para aço inoxidável segundo o Eurocódigo 3 atual: EN 1993-1-4, 5.2.2 com adaptação a situação de incêndio (CEN, 2006a)
- Cálculo de classes para aço carbono segundo o Eurocódigo 3 nova geração: EN 1993-1-1, 5.6 atual com adaptação a situação de incêndio (CEN, 2005a)
- Cálculo de classes para aço inoxidável segundo o Eurocódigo 3 nova geração: EN 1993-1-2, C.4.2.1 nova geração (SC3.T6, 2019)

Uma vez que o objetivo deste documento é estudar o comportamento do aço inoxidável em condições de incêndio, as devidas considerações serão feitas ao calcular a classe da secção.

De acordo com o Eurocódigo 3, o cálculo da classe da secção transversal em caso de incêndio deve ser feito da mesma forma que em condições normais (temperatura 20°C) com a correção do fator ϵ por $\epsilon_{fi} = 0,85\epsilon$, sendo o valor 0,85 uma simplificação de $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{Y,\theta}}$ que representa a influência das variações de temperatura na secção.

3.3. Resistência à flexão de secções transversais a altas temperaturas

No cálculo da resistência de secções transversais sujeitas a momentos fletores, tal como em qualquer outra situação, é necessário garantir que as ações atuantes sejam menores ou iguais às resistências fornecidas pelos elementos.

$$M_{fi,Ed} \leq M_{fi,\theta,Rd} \quad (3.1)$$

Desta forma, o objetivo deste ponto será o cálculo de $M_{fi,\theta,Rd}$ de acordo com diferentes propostas de cálculo, nomeadamente do Eurocódigo 3 atual e nova geração.

Independentemente da proposta apresentada, o momento resistente de uma secção transversal é definido pela seguinte equação:

$$M_{fi,\theta,Rd} = W \frac{f_{y,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.2)$$

O módulo de flexão W e a tensão resistente $f_{y,\theta}$ são dois fatores com abordagens de cálculo diferentes dependendo da proposta, do tipo de aço e do tipo de secção, de acordo com a tabela 2.

De notar que na Tabela 2 são mencionados vários $f_{y,\theta}$, referindo-se estes à tensão limite convencional de proporcionalidade $f_{0,2p,\theta}$ para Classe 4 e à tensão correspondente à extensão total de 2% $f_{2\%,\theta}$ tal como já foi mencionado no ponto 2.3.

No caso do cálculo da resistência da secção para aço carbono segundo a nova geração, pode também ser consultado Couto et al. (Couto, 2015) para classes de secção 1, 2 e 4.

Tabela 2. Relação da resistência da secção com a sua classificação

Eurocódigo 3 atual		Eurocódigo 3 nova geração			
Aço carbono e Aço inoxidável		Aço carbono		Aço inoxidável	
Classificação	Resistência da Secção	Classificação	Resistência da Secção	Classificação	Resistência da Secção
Classe 1 e 2	$W_{pl}f_{2\%,\theta}$	Classe 1 e 2	$W_{pl}f_{2\%,\theta}$	Não esbelta	$W_{pl}f_{2\%,\theta}$
Classe 3	$W_{el}f_{2\%,\theta}$	Classe 3	$W_{el}f_{2\%,\theta}$		Esbelta
Classe 4	$W_{eff}f_{0,2p,\theta}$	Classe 4	$W_{eff}f_{2\%,\theta}$		

Tal como se pode verificar na tabela, são utilizadas abordagens de cálculo semelhantes para aço carbono e aço inoxidável segundo o EC3 atual tal como para o aço carbono segundo o EC3 nova geração, baseando-se todas elas numa distribuição de secções transversais em 4 classes, de acordo com o EN 1993-1-1 5.5.2 (1) (CEN, 2005a).

No caso de secções de classe 4 ou esbeltas, como se trata de secções onde podem ocorrer efeitos de encurvadura local, que se traduzem numa perda parcial de área útil em zonas comprimidas, recorre-se a um módulo de flexão efetivo W_{eff} .

Como foi referido, o W_{eff} é calculado através da área efetiva, que depende de fatores de redução de área que representam efeitos de encurvadura local, e é calculado de forma diferente para cada uma das propostas.

- Cálculo de ρ para aço carbono segundo o Eurocódigo 3 atual: EN 1993-1-5, 4.4 (CEN, 2006b)
- Cálculo de ρ para aço inoxidável segundo o Eurocódigo 3 atual: EN 1993-1-4, 5.2.3 (CEN, 2006a)
- Cálculo de ρ para aço carbono segundo o Eurocódigo 3 nova geração: EN 1993-1-2, 7.3 nova geração (SC3.T6, 2019) ou Couto et al. (Couto, 2015)
- Cálculo de ρ para aço inoxidável segundo o Eurocódigo 3 nova geração: EN 1993-1-2, C.4.2.2 nova geração (SC3.T6, 2019)

Nota: deverá recorrer-se aos quadros 4.1 e 4.2 do EN 1993-1-5 (CEN, 2006b) como apoio ao cálculo de ρ independentemente do tipo de aço ou da proposta.

Nas Tabelas 3 e 4 é apresentado um resumo das várias propostas para aço carbono e aço inoxidável separados por elementos interno e salientes à compressão.

Tabela 3. Determinação de ρ para elementos internos à compressão

	Tipo de Aço	Elementos internos à compressão	
Eurocódigo 3 atual	Carbono	Se $\bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	
	Inoxidável	Elementos enformados a frio ou soldados $\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	
Eurocódigo 3 nova geração	Carbono (Couto et al.)	$\rho = \frac{(\bar{\lambda}_p + 0,9 - \frac{0,26}{\epsilon})^{1,5} - 0,055(3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_p + 0,9 - \frac{0,26}{\epsilon})^3} \leq 1$	
	Inoxidável	Austenítico Se $\bar{\lambda}_{p,\theta} \leq \bar{\lambda}_{p0,\theta}$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{0,54}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{0,75}} - \frac{0,015(3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{1,5}}$ Com $\bar{\lambda}_{p0,\theta} = (0,27 + \sqrt{0,0279 - 0,015\psi})^{1,33} \sqrt{\xi_\theta}$	Duplex e Ferrítico Se $\bar{\lambda}_{p,\theta} \leq \bar{\lambda}_{p0,\theta}$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{0,6}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{0,75}} - \frac{0,015(3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{1,5}}$ Com $\bar{\lambda}_{p0,\theta} = (0,3 + \sqrt{0,045 - 0,015\psi})^{1,33} \sqrt{\xi_\theta}$

Tabela 4. Determinação de ρ para elementos salientes à compressão

	Tipo de Aço	Elementos salientes à compressão	
Eurocódigo 3 atual	Carbono	Se $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	
	Inoxidável	Elementos enformados a frio $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	Elementos soldados $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$
Eurocódigo 3 nova geração	Carbono (Couto et al.)	$\rho = \frac{(\bar{\lambda}_p + 1,1 - \frac{0,52}{\varepsilon})^{1,2} - 0,188}{(\bar{\lambda}_p + 1,1 - \frac{0,52}{\varepsilon})^{2,4}} \leq 1$	
	Inoxidável	Austenítico Se $\bar{\lambda}_{p,\theta} \leq \bar{\lambda}_{p0,\theta}$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{0,6}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{0,6}} - \frac{0,075}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{1,2}}$ Com $\bar{\lambda}_{p0,\theta} = 0,237\sqrt{\xi_\theta}$	Duplex e Ferrítico Se $\bar{\lambda}_{p,\theta} \leq \bar{\lambda}_{p0,\theta}$ $\rho = 1,0$ Caso contrário, $\rho = \frac{0,67}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{0,6}} - \frac{0,075}{(\bar{\lambda}_{p,\theta}/\sqrt{\xi_\theta})^{1,2}}$ Com $\bar{\lambda}_{p0,\theta} = 0,344\sqrt{\xi_\theta}$

Após a definição de ρ é então possível calcular W_{eff} e chegar aos gráficos das figuras 12, 13 e 14:

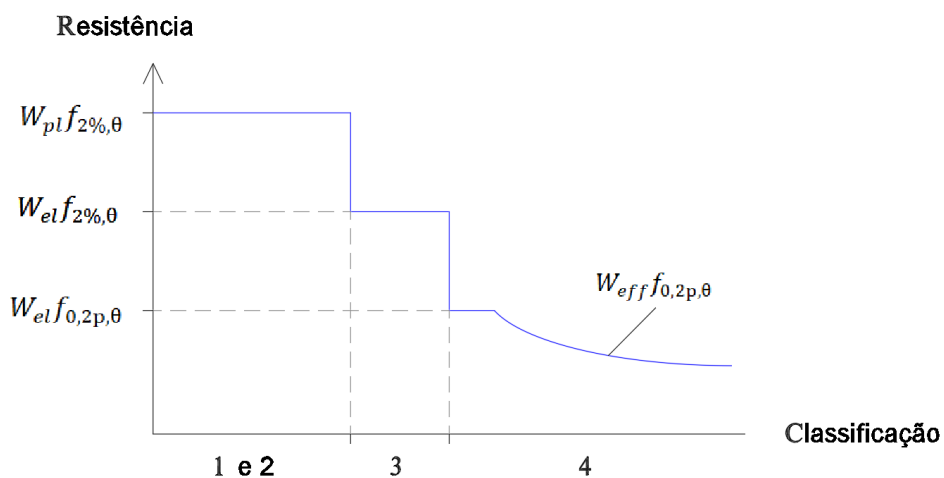


Figura 10. Resistência à flexão vs Classificação para aço carbono e aço inoxidável de acordo com o EC3 atual

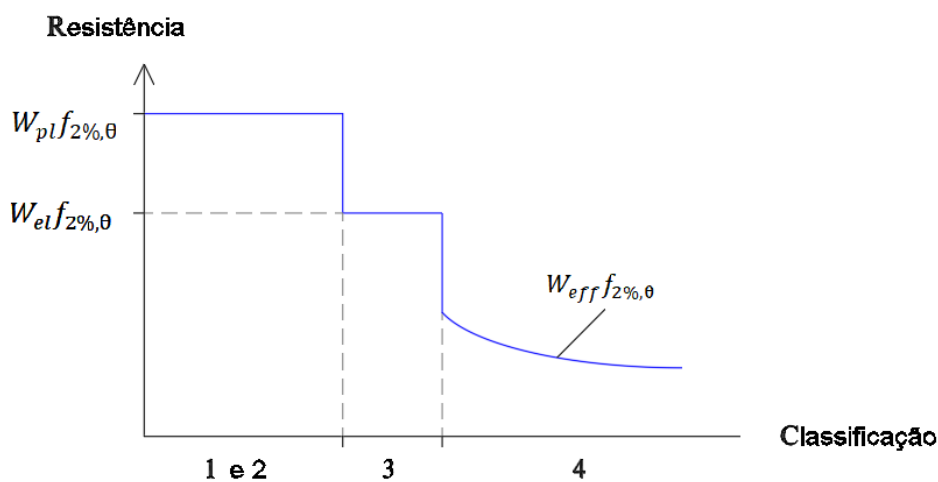


Figura 11. Resistência à flexão vs Classificação para aço carbono de acordo com o EC3 nova geração

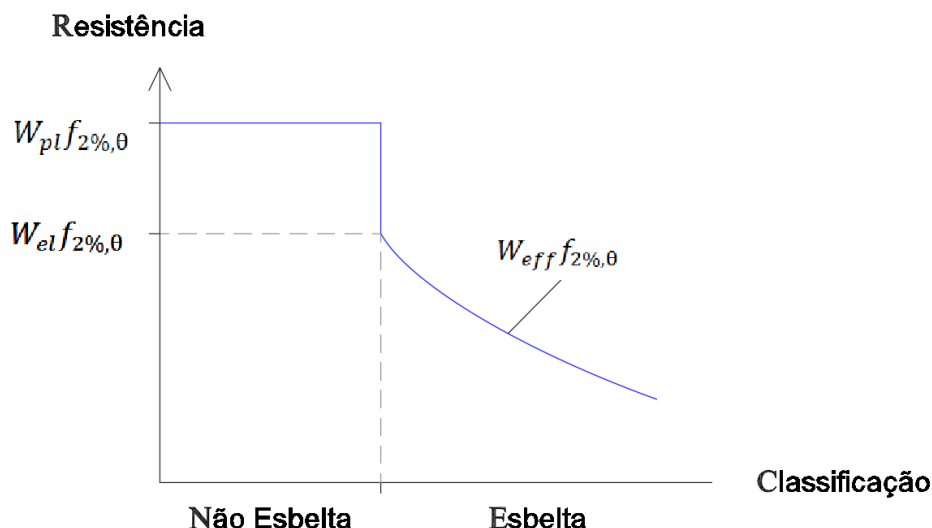


Figura 12. Resistência à flexão vs Classificação para aço inoxidável de acordo com o EC3 nova geração

A primeira situação em que há redução abrupta de resistência é quando se passa de classe 1 ou 2 para classe 3 ou de não esbelta para esbelta. Apesar de $f_{y\theta}$ não sofrer alteração em nenhuma das propostas, o módulo de flexão passa de plástico para elástico, dando-se o primeiro salto.

A segunda situação dá-se quando se dá passagem de classe 3 para classe 4 em ambos os aços, mas apenas para o Eurocódigo 3 atual, isto acontece não por haver qualquer alteração no módulo de flexão, mas por se passar a tensão resistente de $f_{2\%,\theta}$ para $f_{0,2p,\theta}$.

De notar que no Eurocódigo 3 nova geração o fator $f_{y\theta}$ mantém-se sempre igual a $f_{2\%,\theta}$ para ambos os aços, não dependendo dele as perdas de resistência representadas nos gráficos.

Para a proposta de cálculo da resistência de secções esbeltas na nova geração do EC3 a expressão utilizada para o cálculo da redução da área não fornece valores superiores a 1, não sendo assim necessário limitá-la superiormente e a trajetória da respetiva curva na figura 14 apresenta valores de redução sempre decrescentes para secções esbeltas.

3.4. Resistência à encurvadura lateral de vigas a altas temperaturas

Quando se faz a verificação da resistência do elemento, é necessário verificar a sua resistência à encurvadura global, que no caso de vigas o modo de instabilidade preponderante é o de encurvadura lateral. As seguintes verificações devem ser feitas independentemente da proposta ou do tipo de aço:

$$M_{fi,Ed} \leq M_{b,fi,\theta,Rd} \quad (3.3)$$

Com,

$$M_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W \frac{f_{y\theta}}{\gamma_{M,fi}} \tag{3.4}$$

Como se pode verificar, a expressão de $M_{b,fi,\theta,Rd}$ é idêntica à de $M_{fi,\theta,Rd}$ sendo apenas afectada de um factor de redução $\chi_{LT,fi}$, devendo este ser calculado de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 5. Cálculo do fator de redução $\chi_{LT,fi}$

Eurocódigo 3 atual		Eurocódigo 3 nova geração	
Aço Carbono	Aço Inoxidável	Aço Carbono	Aço Inoxidável
$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \leq 1$			
$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - \bar{\lambda}_{LT,0,\theta}) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right]$			
$\bar{\lambda}_{LT,0,\theta} = 0$		Classe 1,2 e 3 $\bar{\lambda}_{LT,0,\theta} = 0$ Classe 4 $\bar{\lambda}_{LT,0,\theta} = 0,2$	$\bar{\lambda}_{LT,0,\theta} = 0$
$\alpha_{LT} = 0,65 \sqrt{235/f_y}$		Classe 1,2 e 3 $\alpha_{LT} = 0,65 \sqrt{235/f_y}$ Classe 4 α_{LT} - Tabela 7.2 EN 1993-1-2 nova geração	$\alpha_{LT} = \frac{\alpha_{LT,0}}{[k_{2,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5}}$ $\alpha_{LT,0}$ - Tabela C.4 EN 1993-1-2 nova geração
Classe 1,2 e 3 $\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{2,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5}$ Classe 4 $\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{0,2p,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5}$		$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{2,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5}$	

As propostas de cálculo de $\chi_{LT,fi}$ podem ser encontradas no EN 1993-1-2 atual (CEN, 2005b) e no EN 1993-1-2 nova geração (SC3.T6) para ambos os aços respetivamente.

A esbelteza $\bar{\lambda}_{LT}$ pode ser obtida através da relação $[M_{rk}/M_{cr}]^{0,5}$ sendo M_{rk} o momento resistente da secção calculado de acordo com a Tabela 2, e M_{cr} o momento crítico que para vigas com secções RHS.

O momento crítico é determinado através da equação 3.9 (Saoula et al., 2016; Tran, 2016).

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_Z}{L^2} \left\{ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_T}{\pi^2 EI_Z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (3.9)$$

Nesta equação z_g é a posição vertical da aplicação da força relativa ao centro da peça, que para os casos em estudo é zero, e I_w a constante de empenamento, que para elementos com secções tubulares é aproximadamente zero (ASI, 2004). O C_1 e C_2 tomam o valor de 1 para os casos estudados nesta tese. Levando isto em consideração resulta a equação 3.5 para vigas com secções RHS (SCI et al., 2011).

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_Z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 GI_T}{\pi^2 EI_Z}} \quad (3.5)$$

$$I_T = \frac{4A_p^2 t}{p} + \frac{t^3 p}{3} \quad (3.6)$$

$$A_p = (b - t)(h - t) - R_c^2(4 - \pi) \quad (3.7)$$

$$p = 2[(b - t) + (h - t)] - 2R_c(4 - \pi) \quad (3.8)$$

Na figura 13 são apresentadas curvas representativas para a relação $\chi_{LT} - \bar{\lambda}_{LT}$ de acordo com as várias propostas. No caso do aço carbono, a nova geração do EC3 indica que para classe 4 existe um patamar para $\bar{\lambda}_{LT,\theta} < \bar{\lambda}_{LT,0,\theta}$, conhecido como comprimento patamar, no qual são desprezíveis efeitos de encurvadura global, sendo apenas necessário fazer a verificação da resistência à flexão da secção nessas situações (SC3.T6). Para os restantes casos apresentados na Tabela 5 o comprimento patamar não existe, logo todos eles podem ser apresentados na figura abaixo pela curva representativa a azul.

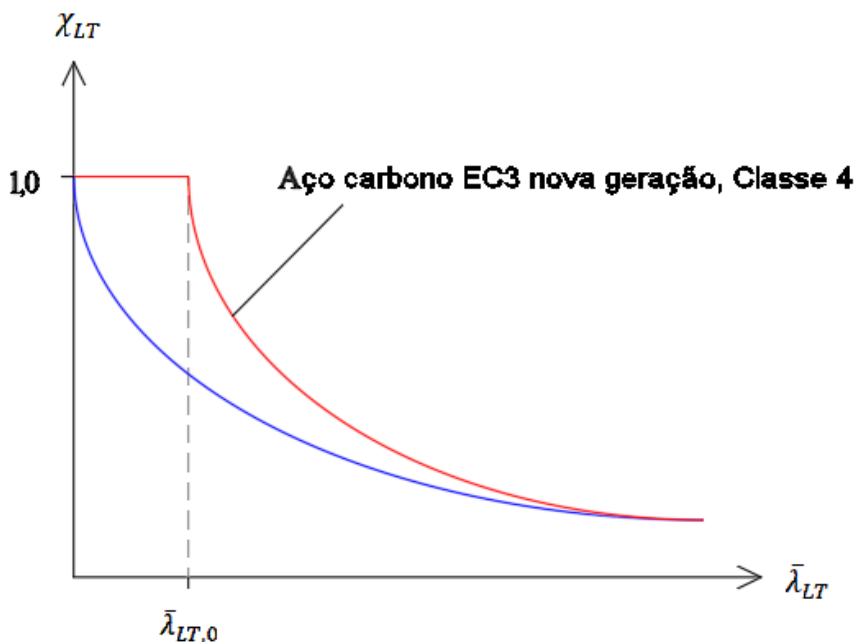


Figura 13. Variação do fator de redução χ_{LT} em função da esbelteza

De notar que na proposta da nova geração é adicionado um novo fator de correção $\chi_{LT,fi,mod}$ que depende do tipo de carregamento a que o elemento está sujeito, tal como é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo do fator de redução $\chi_{LT,fi,mod}$

Eurocódigo 3 nova geração	
Aço Carbono	Aço Inoxidável
$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f}$	
$\chi_{LT,fi,mod} \leq 1$	$\chi_{LT,fi,mod} \leq 1$ $\chi_{LT,fi,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}}$
Classe 1 e 2 $f = 1 - 0,5(1 - k_c)$	Austenítico $f = 1 - 0,83(1 - k_c) \geq 0,67$
Classe 3 Não se aplica ($f = 1$)	Duplex $f = 1 - 0,67(1 - k_c) \geq 0,73$
Classe 4 $f = 1 - 0,5(1 - k_c) \geq 0,80$	Ferrítico $f = 1 - 0,60(1 - k_c) \geq 0,76$
k_c – Tabela 7.1 EN1993-1-2 nova geração	k_c – Tabela 6.6 EN1993-1-1

4. MODELOS NUMÉRICOS

4.1. Considerações gerais

O cálculo de resistência ao fogo de elementos estruturais pode ser feito através de métodos de cálculo simplificado ou de cálculo avançado, ambos presentes no EC3.

Os métodos simplificados são úteis para os projetistas que não têm fácil acesso a ferramentas e conhecimento para aplicação dos métodos avançados, por regra mais precisos e próximos do real comportamento.

Um método de cálculo avançado utilizado em programas de cálculo é o método dos elementos finitos que permite obter soluções numéricas para problemas complexos com características materiais e geométricas não lineares.

É assim determinante que os referidos métodos simplificados sejam devidamente validados, para poderem fornecer aproximações da realidade seguras e económicas, o que pode ser realizado com os métodos avançados de cálculo. Um programa que faz uso deste tipo de metodologia avançada é o SAFIR que foi utilizado neste trabalho para comparar com as várias propostas do Eurocódigo 3 de maneira a verificar a sua fiabilidade.

Neste capítulo pretende-se não só dar uma breve introdução ao programa SAFIR, mas também definir os casos de estudo, bem como as devidas restrições e opções tomadas.

O programa SAFIR (Franssen e Gernay, 2017) é um programa de cálculo desenvolvido na Universidade de Liège com a finalidade de simular estruturas sujeitas a condições de incêndio. Para esse efeito recorre ao método dos elementos finitos, e devolve o comportamento térmico e mecânico de, por exemplo, elementos finitos de casca (elementos planos).

O programa SAFIR permite o uso de dois tipos de abordagem de cálculo, uma do ponto de vista da análise do comportamento térmico e outra do comportamento mecânico.

Como o objetivo do presente trabalho é comparar os valores obtidos através dos métodos simplificados de cálculo apresentados pelos Eurocódigos com os valores do SAFIR, então optou-se pela abordagem da análise do comportamento mecânico, ou seja, vão ser especificadas uma série de temperaturas para as quais pretendemos determinar o momento em que se dá a rotura, ou por outras palavras, qual a tensão limite a que o elemento resiste para uma determinada temperatura.

A definição da geometria da secção é feita em função do método dos elementos finitos de casca.

Nos modelos foram consideradas imperfeições geométricas locais e globais, com a forma obtida dos respetivos primeiros modos de instabilidade e a amplitude igual a 80 % das tolerâncias geométricas, tal como é descrito no capítulo 4.5.

Sendo definidos todos os parâmetros, o processo de cálculo é incremental, sendo possível obter os deslocamentos nos nós ou os esforços nos pontos de integração de cada elemento finito até ao colapso da estrutura.

Os momentos fletores últimos obtidos numericamente são então comparados com as resistências fornecidas pelas formulações do EC3 apresentadas nos capítulos anteriores.

4.2. Casos de estudo

Na presente dissertação pretendeu-se estudar o comportamento de vigas de aço inoxidável, restringidas e não restringidas lateralmente, quando sujeitas a altas temperaturas. Para isso foram definidas uma série de condicionantes de forma a delimitar os casos de estudo.

As vigas simplesmente apoiadas a serem estudadas têm secções retangulares ocas (RHS), com os comprimentos: 1 m; 3 m; 5 m; 7 m; 10 m; 15 m; 20 m; 25 m e 30 m.

Foram analisados perfis com as secções 100x150x5; 100x200x5; 150x150x5; 150x200x5, de acordo com a figura 14, para estudo da encurvadura local e encurvadura lateral das vigas.

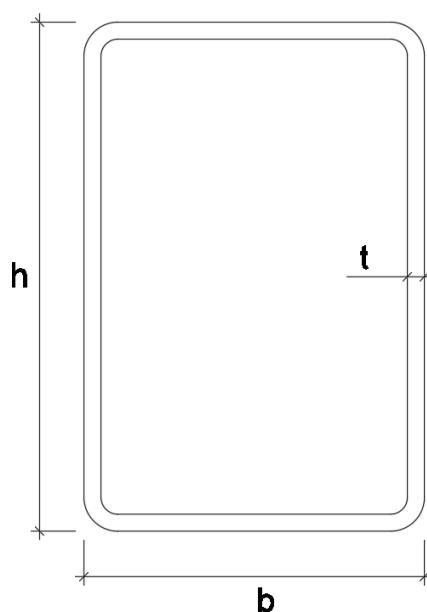


Figura 14. Representação da secção transversal - Largura (b) x Altura (h) x Espessura (t)

Os tipos de aço dos perfis são o austenítico 1.4301, austenítico 1.4401, o ferrítico 1.4003 e o duplex 1.4462.

O carregamento corresponde a um diagrama de momentos uniforme ao longo de toda a secção.

Finalmente, as vigas com todas estas condicionantes foram sujeitas a situações de incêndio, mais concretamente a temperaturas de 500°C e, para as vigas em aço Austenítico 1.4301 com secção 100x150x5 devido à sua predominância no mercado, foram também sujeitas a temperaturas de 600°C.

No caso específico das vigas com 1 m de comprimento restringidas lateralmente, foi feito um estudo mais extensivo, tendo como objetivo analisar a resistência da secção transversal a temperaturas de 350°, 500°, 600° e 700°C.

4.3. Restrições, cargas, malha

Tal como já foi referido no capítulo 4.2 o programa SAFIR recorre ao método dos elementos finitos.

O uso deste método é indicado para elementos estruturais com paredes finas e consiste em recriar a geometria da secção real através do uso de nós, cada um com seis graus de liberdade (três deslocamentos e três rotações), e de elementos de casca, resultantes da área retangular definida por cada quatro nós. Após a definição da geometria básica, recorre-se ao programa RUBY para a adição de imperfeições locais e/ou globais em função dos primeiros modos de instabilidade local e global.

A malha foi desenvolvida tendo por base a linha média da secção transversal, cuja definição foi feita usando por base um ficheiro de Excel que permitiu automatizar a criação do ficheiro de introdução de dados a ser usado pelo SAFIR, sendo possível definir não só as características geométricas do elemento, mas também o tipo de material, as restrições de apoio, intensidade do carregamento e se são ou não consideradas resistências de canto aumentadas.

As secções dos topos são compostas por 117 nós, tal como se pode observar na figura 15. Como o objetivo não é o estudo das condições de apoio, optou-se por usar uma espessura do material de 40 mm, para garantir desta forma que não existem problemas numéricos.

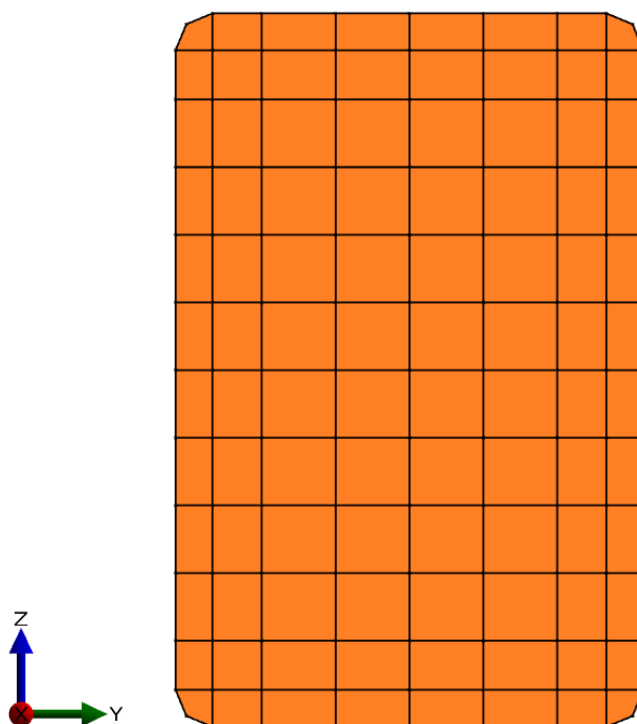


Figura 15. Pormenor da malha dos topos

A malha de contorno (secção transversal) é repetida ao longo do comprimento da viga.

Nos cantos, tendo em conta que a secção é definida pela união de nós, ou seja, por segmentos retos, utilizaram-se 3 nós em cada canto para simular o raio de curvatura.

Cada secção transversal é composta por 40 nós e no elemento todo, incluindo os topos, temos 2194 nós e 2192 elementos para vigas de 1 m e 4194 nós e 4192 elementos para os restantes comprimentos. O espaçamento entre secções transversais escolhido foi de 1% do comprimento total em todas as vigas exceto nas vigas de 1m devido ao espaçamento muito pequeno, definido um espaçamento mínimo de 2 cm, sendo usado 2% do comprimento total nesse caso.

A espessura do material usada foi 5 mm de acordo com os casos de estudo.

No caso de elementos não restringidos lateralmente foram adicionadas restrições de apoios a ambas as placas de extremidade tal como se pode observar na figura 16.

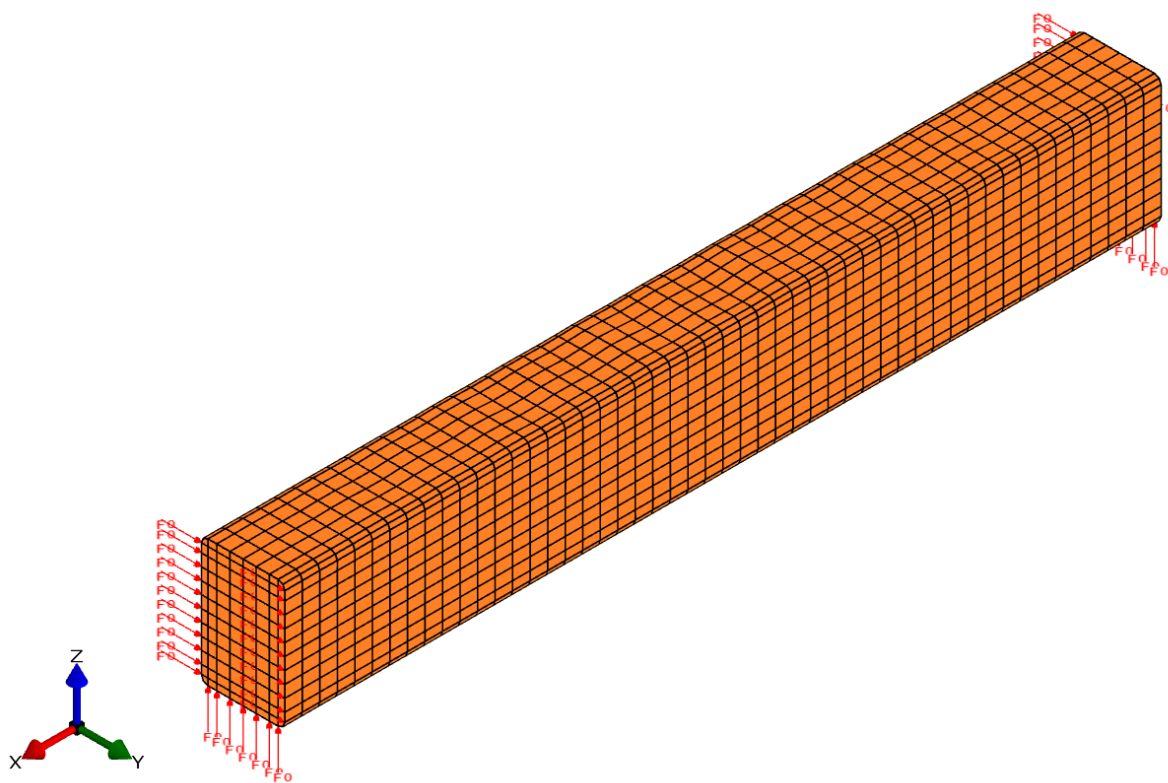


Figura 16. Restrições de apoios

Em cada placa de extremidade foram adicionadas restrições em 22 nós para prevenir movimentos ao longo do eixo dos YY, em 1 nó para movimentos em XX (em uma extremidade apenas) e em 7 nós para o eixo dos ZZ tal como se pode observar na figura 17.

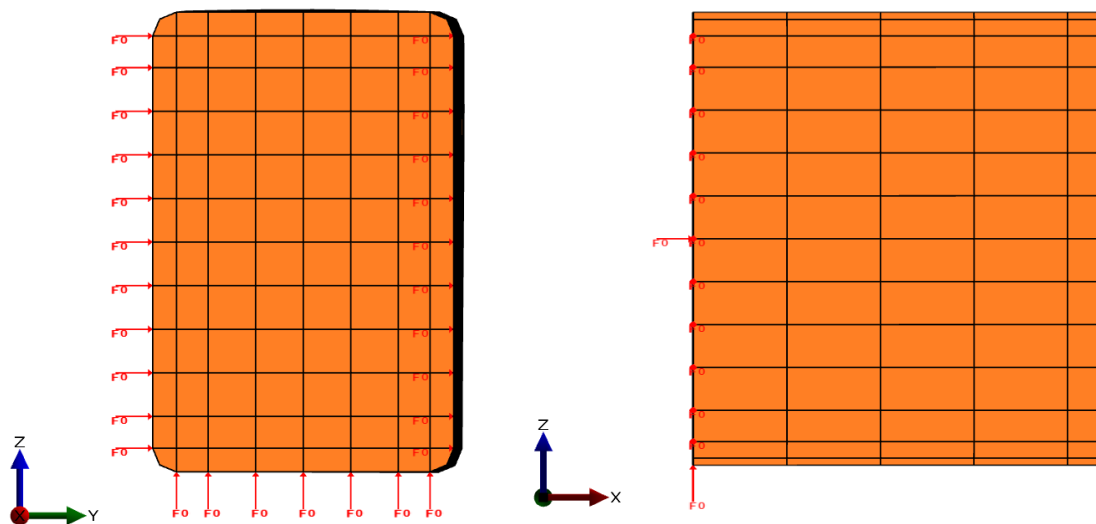


Figura 17. Pormenores de restrições de apoios

No caso de elementos restringidos lateralmente, para além das restrições de apoio em ambas as placas de extremidade referidas anteriormente, adicionaram-se restrições aos nós dos 4 cantos de cada secção transversal, impedindo que estes se movam ao longo do eixo dos YY, tal como é apresentado na figura 18.

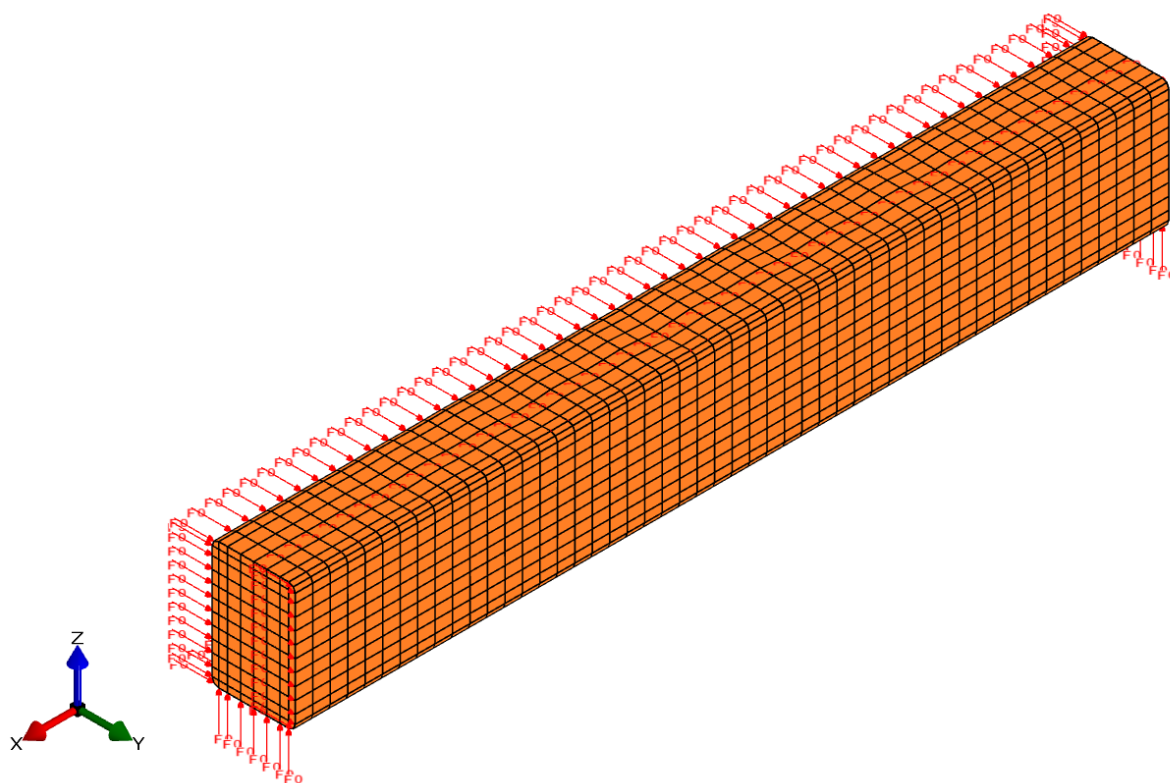


Figura 18. Apoios de viga restringida lateralmente

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento do elemento quando sujeito a um momento fletor uniforme ao longo de todo o seu comprimento, como tal, para simular este tipo de carregamento recorreu-se a cargas de compressão nos nós superiores das placas de extremidade e cargas de tração nos nós inferiores das mesmas, tal como se pode observar nas figuras 19 e 20.

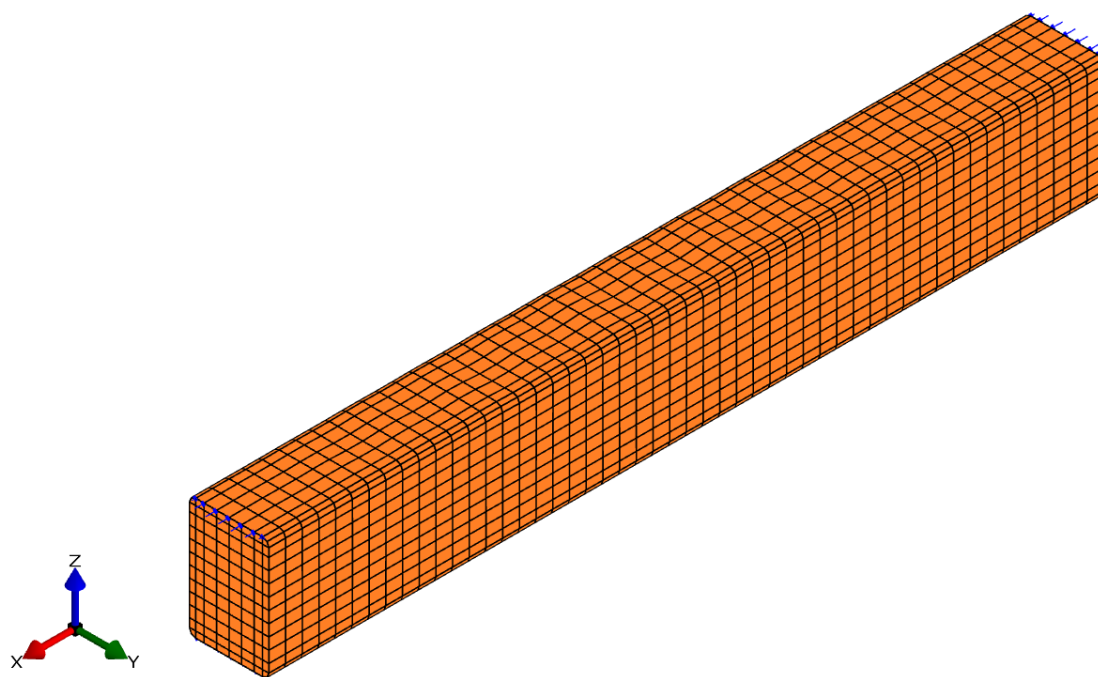


Figura 19. Aplicação das cargas

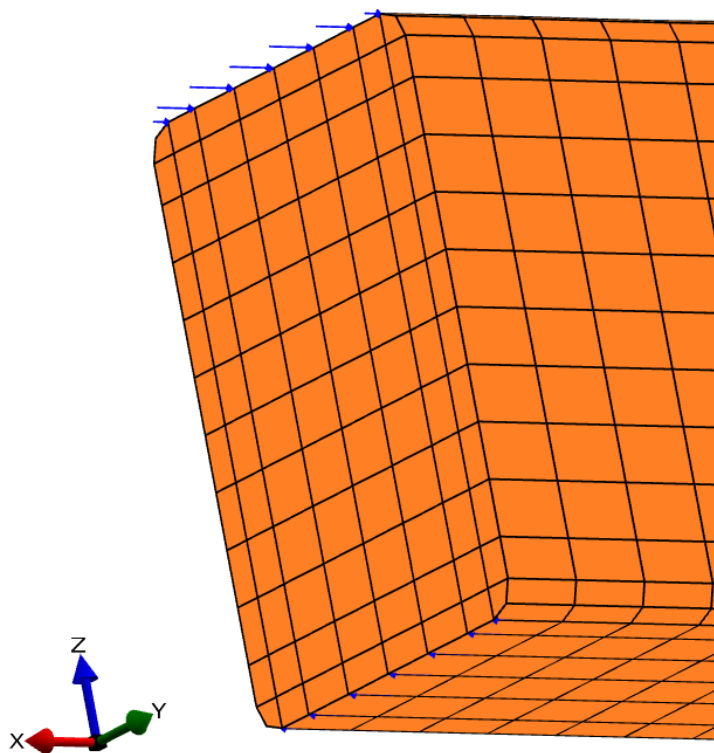


Figura 20. Pormenor de aplicação das cargas

Para vigas com comprimentos superiores a 10 m, devido ao facto de a instabilidade global ser a principal condicionante, a definição da malha foi feita de maneira diferente, sendo apenas consideradas imperfeições globais para estes comprimentos.

4.4. Imperfeições

Na produção de qualquer tipo de elementos estruturais não é realista esperar que estes sejam perfeitos, como tal, é importante definir limites para os vários tipos de imperfeições esperadas.

As imperfeições ligadas à geometria do elemento podem ser divididas em dois tipos, globais e locais, correspondendo respetivamente às imperfeições do elemento e da secção transversal.

A amplitude das imperfeições globais para RHS é dada por: $\delta = 0.8 \times \frac{L}{750}$ que representa 80% da tolerância de fabrico de acordo com a parte 1-5 do EC3 (CEN, 2006) recomendada pela EN 1090-2:2008+A1 (CEN, 2011).

Para as imperfeições locais a tolerância de desvio admitida na EN 10219-2 (CEN, 2006c) para RHS representa 0.8% da altura média da secção transversal, como tal: $\delta = 0.8 \times 0.008 \times h$.

Ambas as imperfeições foram adicionadas à malha inicial com o auxílio do programa RUBY (Couto et al, 2013), podendo ser observadas nas figuras 21 e 22.

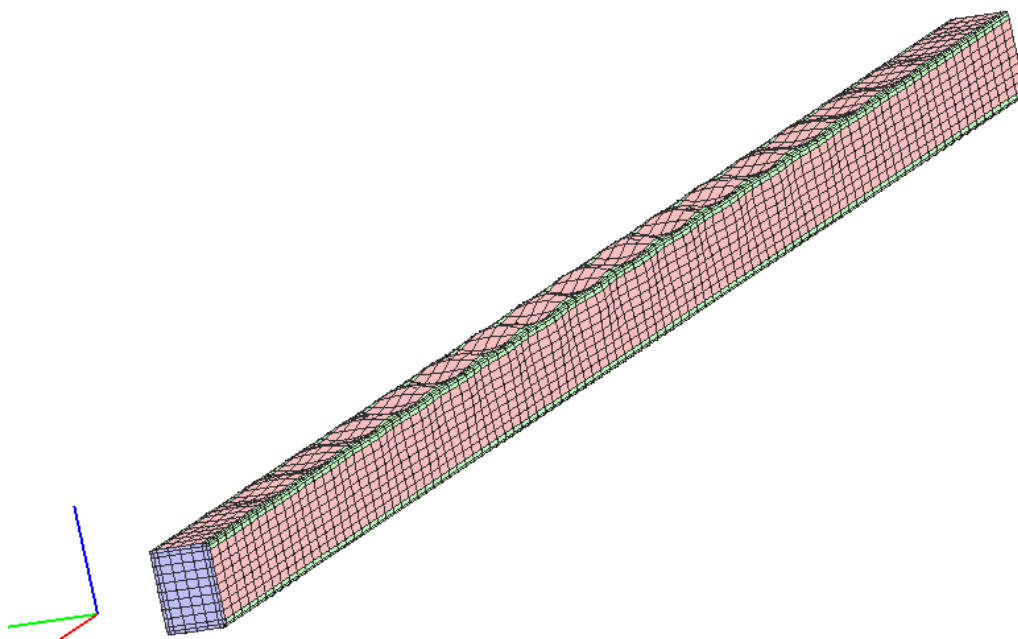


Figura 21. Encurvadura local

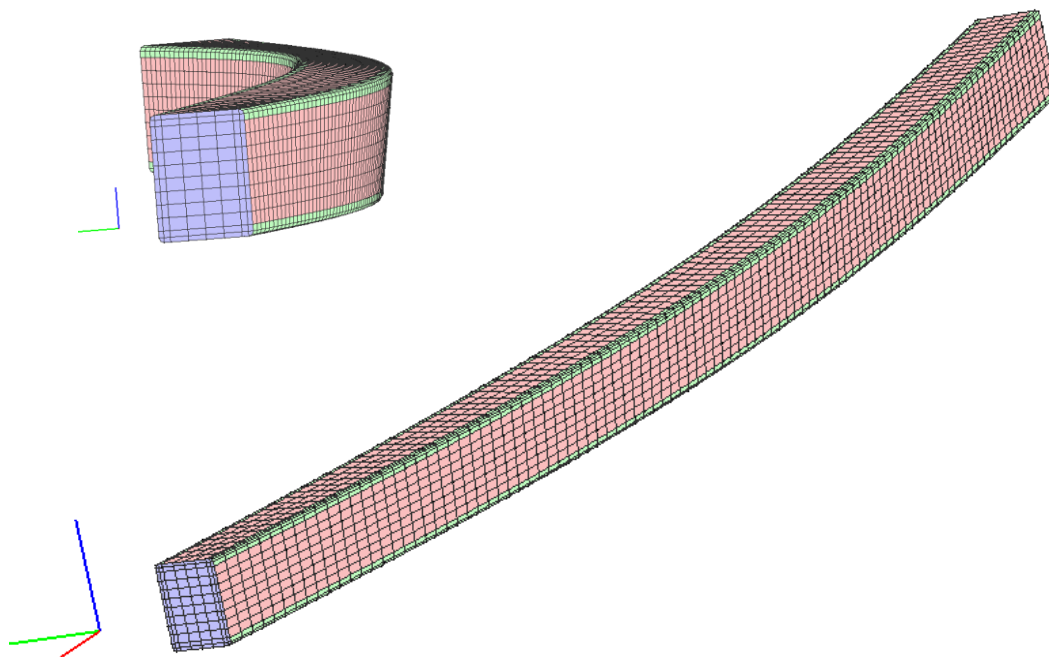


Figura 22. Encurvadura lateral

Outro motivo para existirem possíveis deformações axiais ou curvatura são as tensões residuais. As tensões residuais são tensões que surgem nos elementos essencialmente durante o processo de fabrico, tratando-se estas de tensões autoequilibradas. A influência das tensões residuais no comportamento dos elementos de secção quadrangular a altas temperaturas é visivelmente pequena para as várias classes de secção (Sousa, 2015), assim optou-se por não considerar este tipo de imperfeições nos modelos da presente dissertação.

Apesar dos elementos com secções retangulares ocas possuírem uma resistência aumentada nos cantos inerentes do processo de fabrico, uma vez que esta influência é menor a altas temperaturas, podendo até chegar a contrabalançar a própria influência, e tendo em conta que este aumento não é considerado nas fórmulas do Eurocódigo, tal aumento também não foi considerado nos cálculos.

5. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

5.1. Considerações gerais

Neste capítulo serão apresentados os resultados do estudo paramétrico efetuado, comparando os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR e os resultados obtidos utilizando a metodologia de dimensionamento prevista pelo Eurocódigo 3 atual e pela proposta do Eurocódigo 3 nova geração relativamente à análise da resistência da secção quando sujeita a momento fletor. A análise dos resultados terá em conta o tipo de material, classe da secção e temperatura, a partir dos quais será também feita uma avaliação estatística dos resultados.

Para a análise dos resultados recorreu-se a vários gráficos com ordenada $M/M_{fi,\theta,Rd}$ e abcissa $(h_w/t_w) \times (2t_f/b_f)$, que representa uma relação entre as dimensões da secção (Couto et al., 2015).

O cálculo da ordenada $M/M_{fi,\theta,Rd}$ é feita através da carga última obtida pelo SAFIR e o momento fletor máximo resistente da secção para a temperatura considerada.

O cálculo das classes das secções foi feito de acordo com a metodologia do Capítulo 3 e foram apresentadas nas tabelas 7 a 10 tendo em conta ambas as versões do Eurocódigo 3, o tipo de material, as dimensões da secção e a temperatura.

Tabela 7. Classes de Secção para Aço Austenítico 1.4301

Secção	EC3 atual	EC3 nova geração
100x150x5	1	Esbelta
100x200x5	1	Esbelta
150x150x5	3	Esbelta
150x200x5	3	Esbelta

Tabela 8. Classes de Secção para Aço Austenítico 1.4401

Secção	EC3 atual	EC3 nova geração
100x150x5	1	Esbelta
100x200x5	1	Esbelta
150x150x5	3	Esbelta
150x200x5	3	Esbelta

Tabela 9. Classes de Secção para Aço Ferrítico 1.4003

Secção	EC3 atual	EC3 nova geração
100x150x5	1	Não Esbelta
100x200x5	1	Não Esbelta
150x150x5	4	Esbelta
150x200x5	4	Esbelta

Tabela 10. Classes de Secção para Aço Duplex 1.4462

Secção	EC3 atual	EC3 nova geração
100x150x5	3	Esbelta
100x200x5	3	Esbelta
150x150x5	4	Esbelta
150x200x5	4	Esbelta

De seguida é apresentado na figura 23 um exemplo melhor representativo do colapso do elemento devido a fenómenos de encurvadura local. Adicionalmente, na figura 24 é apresentado o gráfico do momento vs deslocamento vertical de um ponto a meio vão até ao colapso da estrutura.

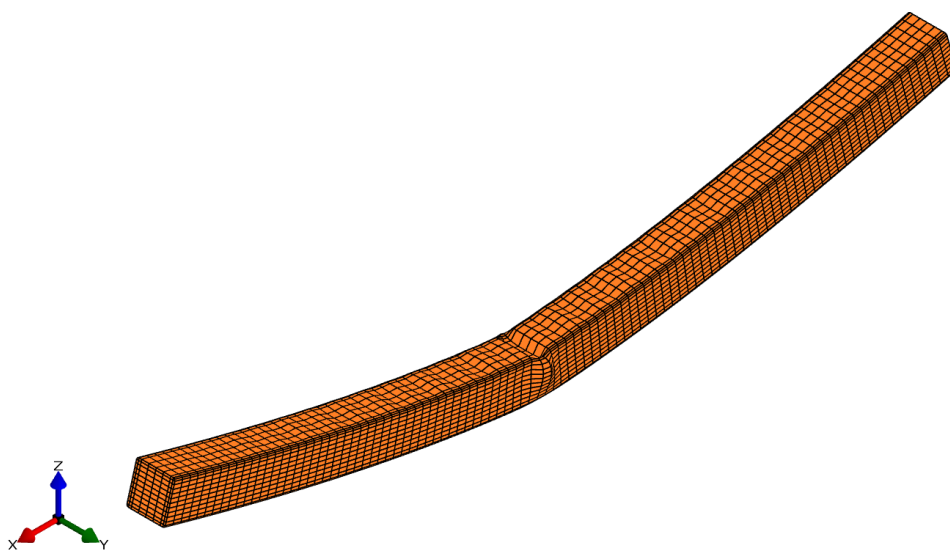


Figura 23. Pormenor de encurvadura local – Viga em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 com 3 m de comprimento e secção 150x150x5 a 500°C

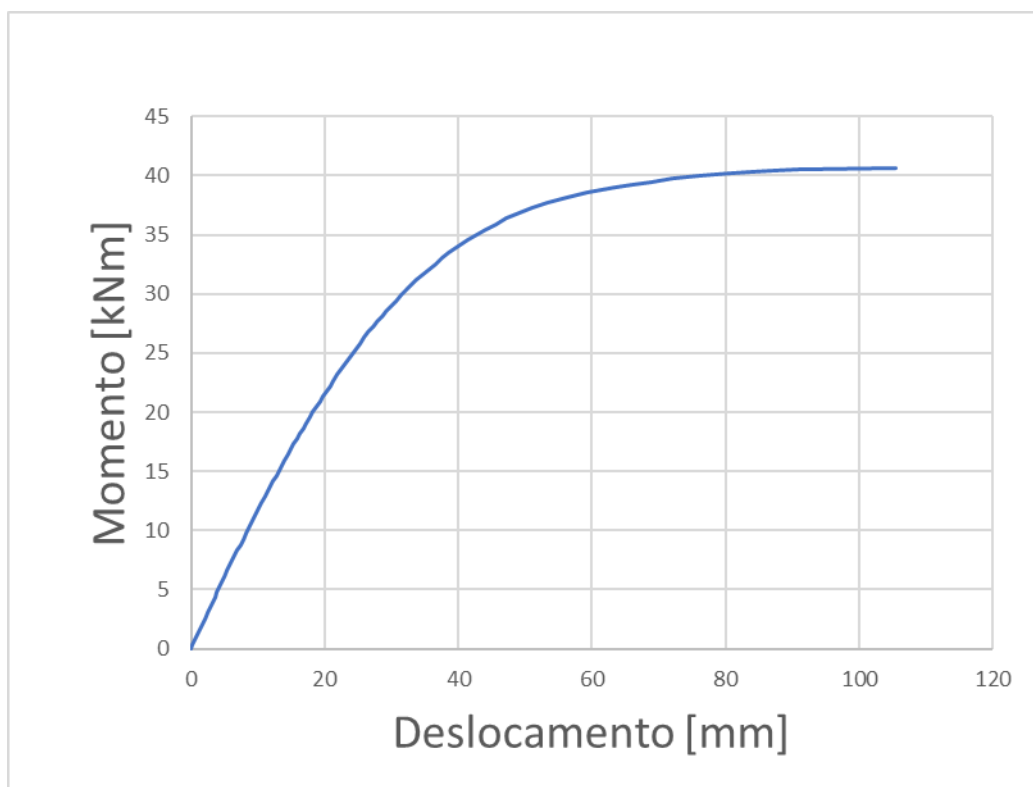


Figura 24.

5.2. Estudo paramétrico

5.2.1. Secções em aço inoxidável austenítico

Nas figuras 25 e 26 são apresentados os resultados obtidos no SAFIR para secções em aços inoxidáveis austeníticos 1.4301 e 1.4401 tendo em conta as classes das secções e a temperatura.

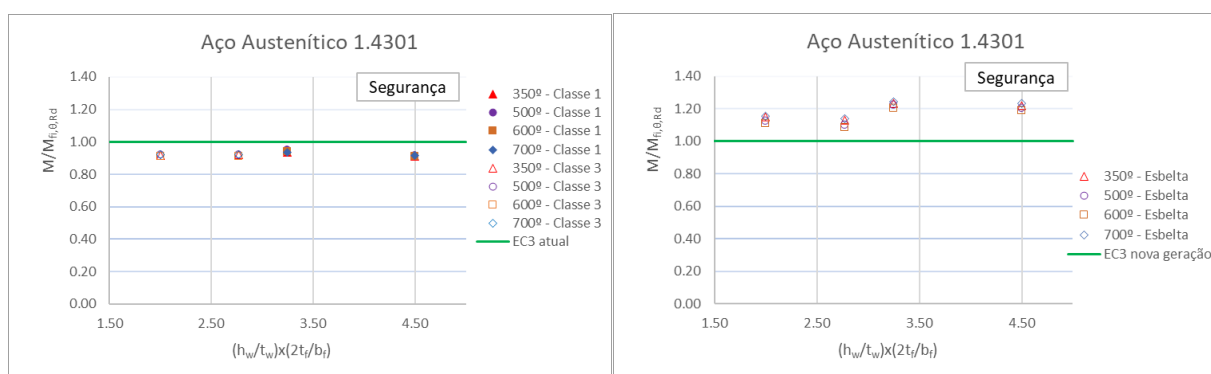


Figura 25. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4301

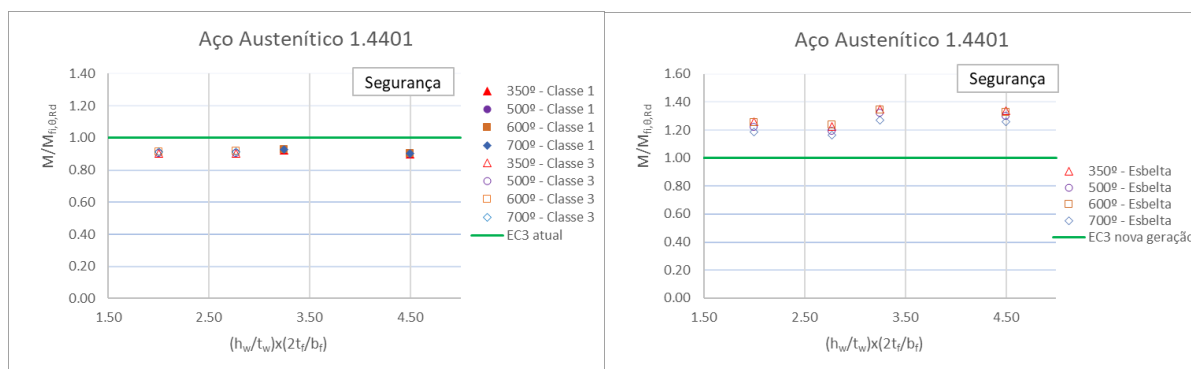


Figura 26. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4401

Os resultados são apresentados através da relação $M/M_{fi,\theta,Rd}$ a qual é dependente da abordagem em causa. Tal como se pode verificar nos vários gráficos, na abordagem adotada pelo Eurocódigo 3 atual o valor do momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ é superior ao momento resistente obtido na abordagem do Eurocódigo 3 nova geração.

A diferença que existe entre os valores dos dois momentos resistentes faz com que, para estes casos específicos de secções em aço austenítico 1.4301 e 1.4401, os resultados obtidos estejam fora de segurança quando comparados com a abordagem do Eurocódigo 3 atual e ao mesmo tempo estejam do lado da segurança de acordo com a abordagem do Eurocódigo 3 nova geração.

5.2.2. Secções em aço inoxidável ferrítico

À semelhança do ponto 5.2.1. na figura 27 é feita a análise dos resultados obtidos para secções em aço inoxidável ferrítico, sendo igualmente feita a comparação dos resultados obtidos com os valores previstos nas abordagens de ambas as versões do Eurocódigo 3.

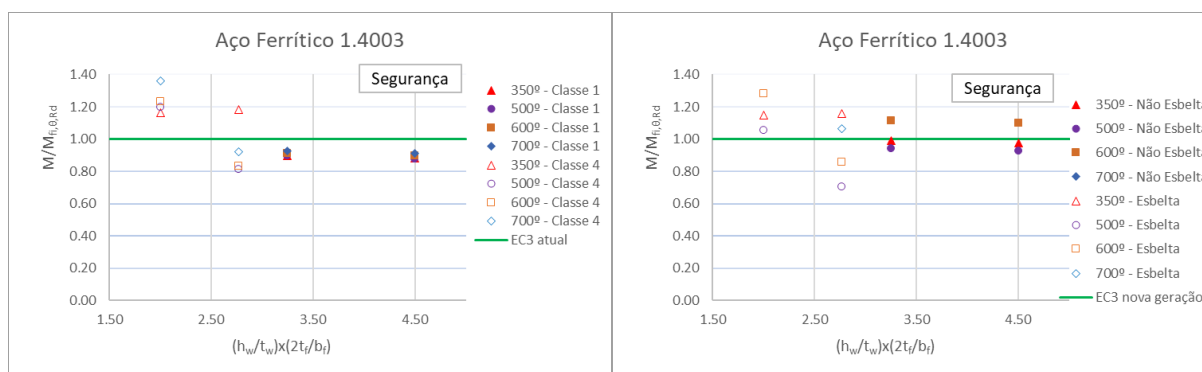


Figura 27. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 4 / não esbeltas e esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003

Ao contrário do observado para os aços inoxidáveis austeníticos, no aço inoxidável ferrítico não existe uma distinção clara entre os resultados obtidos quando comparados com ambas as versões do Eurocódigo 3.

Neste caso em concreto a versão do Eurocódigo, cuja variação nos valores dos momentos resistentes não tem influência suficiente para fazer com que hajam resultados fora de segurança numa versão e em segurança na outra. Em vez disso, a classe da secção acaba por ser um fator mais relevante para esta análise.

Tal como se pode observar, no caso das secções de classe 1 ou não esbeltas apesar de os valores estarem ligeiramente fora de segurança, estes apresentam uma boa consistência para as várias temperaturas. Por outro lado, os resultados das secções de classe 4 ou esbeltas apresentam uma maior dispersão, fazendo com que haja alguns valores fora de segurança e outros em segurança consoante a temperatura.

5.2.3. Secções em aço inoxidável austenítico-ferrítico

Tal como nos dois últimos pontos na figura 28 é feita a análise dos resultados obtidos para secções em aço inoxidável austenítico-ferrítico ou aço duplex 1.4462, comparando-os com os valores das abordagens de ambos os Eurocódigos 3.

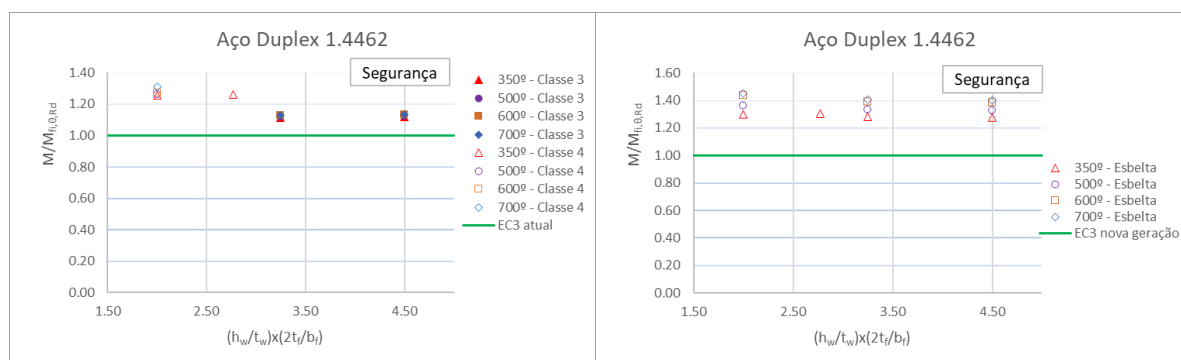


Figura 28. Resultados numéricos de secções de classe 1 e 3 / esbeltas em aço inoxidável austenítico 1.4462

Ao contrário dos aços inoxidáveis austeníticos e dos ferríticos, de um modo geral os valores propostos em ambas as versões do Eurocódigo 3 estão do lado da segurança.

No caso do Eurocódigo 3 atual, uma vez que existe a distinção entre as secções de classe 3 e classe 4, pode-se observar que os resultados das secções de classe 4 são ligeiramente superiores.

De notar que alguns dos resultados apresentaram problemas numéricos, sendo por esse motivo desconsiderados da análise.

5.3. Análise estatística

No presente capítulo pretendeu-se fazer a análise estatística dos resultados apresentados anteriormente de forma a conseguir-se uma melhor perceção dos mesmos. Para esse efeito foram criados gráficos e tabelas que comparam os valores obtidos no SAFIR com os valores das propostas do Eurocódigo 3 atual e nova geração respetivamente.

Na realização dos gráficos foi levado em consideração o tipo de aço, a classe da secção e a temperatura. Após a inserção dos dados são apresentadas nos gráficos três linhas, uma contínua e duas tracejadas. A linha contínua representa o limite de segurança entre a respetiva proposta do Eurocódigo 3 e os resultados numéricos e as linhas a tracejado representam os valores 10% acima e abaixo do limite de segurança.

Utilizando os valores dos gráficos foram então criadas tabelas nas quais são apresentados uma série de parâmetros com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados.

De notar que, devido à pequena quantidade de valores a serem analisados, não foi feita a separação das classes de secção em gráficos individuais (tal como no capítulo 5.2).

Nas figuras 29 e 30 são apresentados os resultados para secções compostas por aço inoxidável austenítico 1.4301 e 1.4401 respetivamente. A primeira observação que pode ser feita quando comparando os resultados de ambos os aços com a proposta do Eurocódigo 3 atual é o facto de todos os resultados estarem do lado da insegurança, mais especificamente sobre a linha tracejada correspondente aos valores 10% abaixo do limite da segurança. Por outro lado, quando comparando os resultados de ambos os aços com os valores da proposta do Eurocódigo 3 nova geração verifica-se que todos os valores se encontram do lado da segurança. Adicionalmente, é de notar que a grande maioria dos resultados se encontra pelo menos 10% acima da segurança.

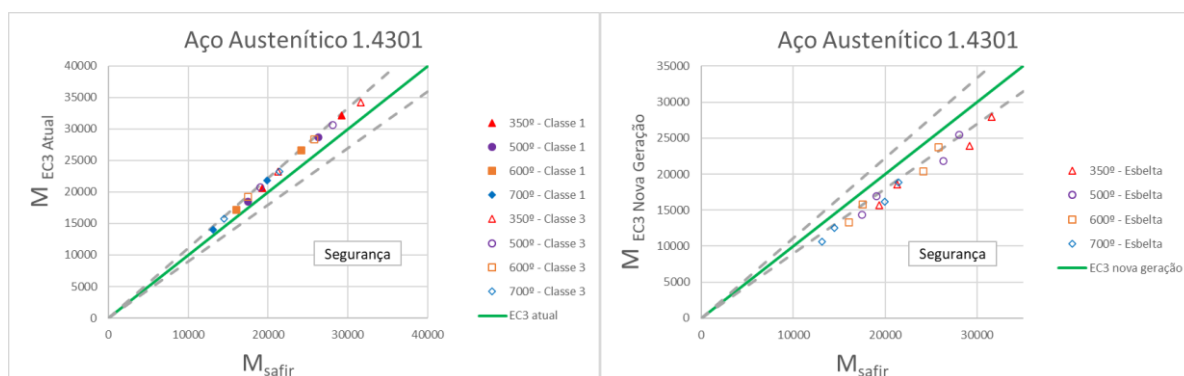


Figura 29. Comparação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4301

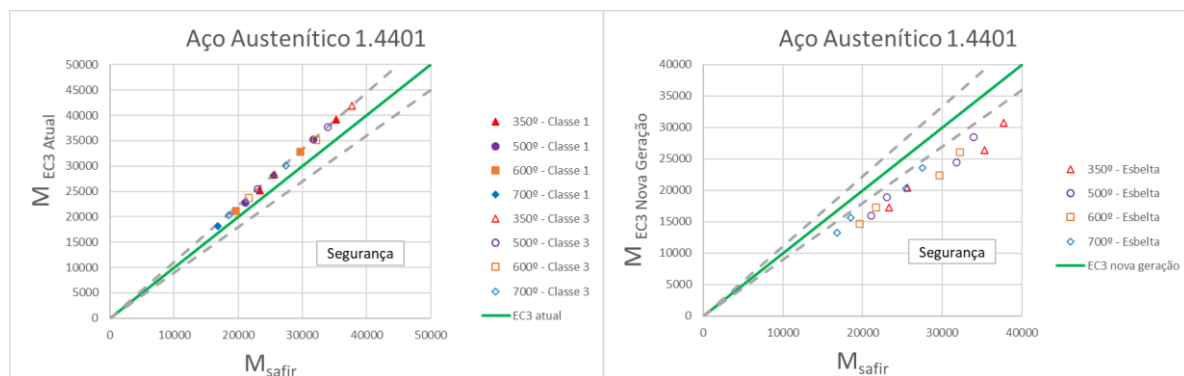


Figura 30. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 3 / esbeltas em aço austenítico 1.4401

As observações anteriores podem ser analisadas com mais precisão nas tabelas 11 e 12 nas quais são apresentadas as médias, o desvio padrão, a percentagem de valores inseguros e o valor máximo inseguro.

Tal como se pode observar nos gráficos, existe uma grande consistência nos resultados, obtendo-se valores baixos para o desvio padrão e ao mesmo tempo um valor máximo inseguro muito próximo da média.

Relativamente à percentagem dos resultados inseguros, tal como já se tinha constatado anteriormente, existe a clara distinção entre 100% dos resultados fora de segurança quando comparados com os valores da proposta do Eurocódigo 3 atual e 0% fora de segurança relativamente à proposta do Eurocódigo 3 nova geração.

Finalmente, ao analisar as médias dos valores de ambos os aços relativamente à proposta do Eurocódigo 3 nova geração verifica-se que em ambos os casos os valores da média são relativamente baixos, podendo a proposta ser demasiado conservativa.

Tabela 11. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4301

Austenítico 1.4301	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	1.09	0.86
desvio padrão	0.01	0.04
% result. Inseguros	100%	0%
valor máx. inseguro	1.10	0.92

Tabela 12. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico 1.4401

Austenítico 1.4401	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	1.10	0.79
desvio padrão	0.01	0.04
% result. Inseguros	100%	0%
valor máx. inseguro	1.11	0.86

Seguidamente foi feita a mesma análise para secções em aço inoxidável ferrítico 1.4003.

Ao contrário do observado para os aços austeníticos, na figura 31 não existe uma clara distinção entre os resultados quando comparados com ambas as propostas do Eurocódigo 3. De notar, no

entanto, que à semelhança do observado para o aço austenítico, os resultados das secções de classe 1 se encontram todos sobre a linha tracejada dos 10% do lado da insegurança.

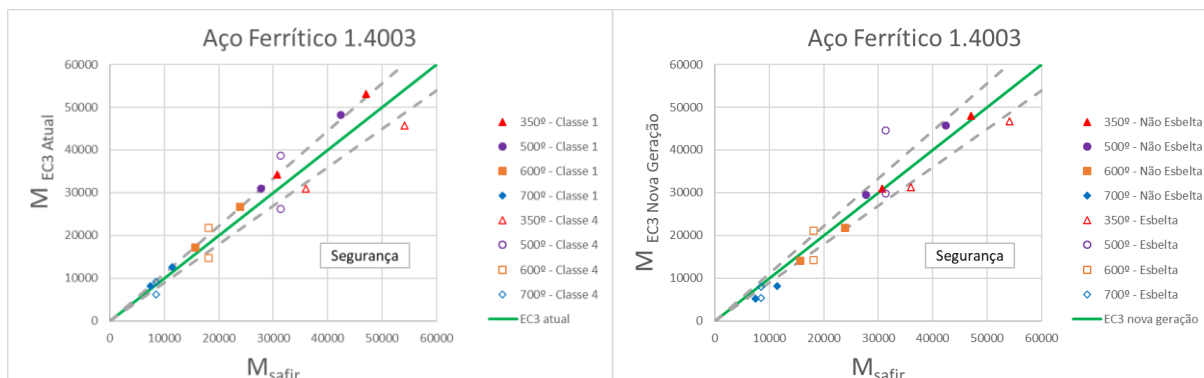


Figura 31. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 4 / não esbeltas e esbeltas em aço ferrítico 1.4003

Analisando a tabela 13 consegue-se chegar à conclusão de que efetivamente a proposta do Eurocódigo 3 nova geração apresenta menor quantidade de valores inseguros, tendo, no entanto, um desvio padrão maior.

Tabela 13. Avaliação estatística para secções transversais em aço ferrítico 1.4003

Ferrítico 1.4003	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	1.03	0.94
desvio padrão	0.16	0.20
% result. Inseguros	69%	38%
valor máx. inseguro	1.23	1.42

À semelhança dos aços anteriores, foi feita a análise para secções em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Na figura 32, ao contrário do que se passou nos aços anteriores, todos os valores se encontram do lado da segurança quando comparados com ambas as propostas do Eurocódigo 3. De notar também que os valores das secções de classe 3 se encontram mais próximos do limite da segurança quando comparados com os valores das secções de classe 4 e das secções esbeltas.

À semelhança do observado para os aços austeníticos, a proposta do Eurocódigo 3 nova geração apresenta valores muito do lado da segurança, aparentando ser demasiado conservativa.

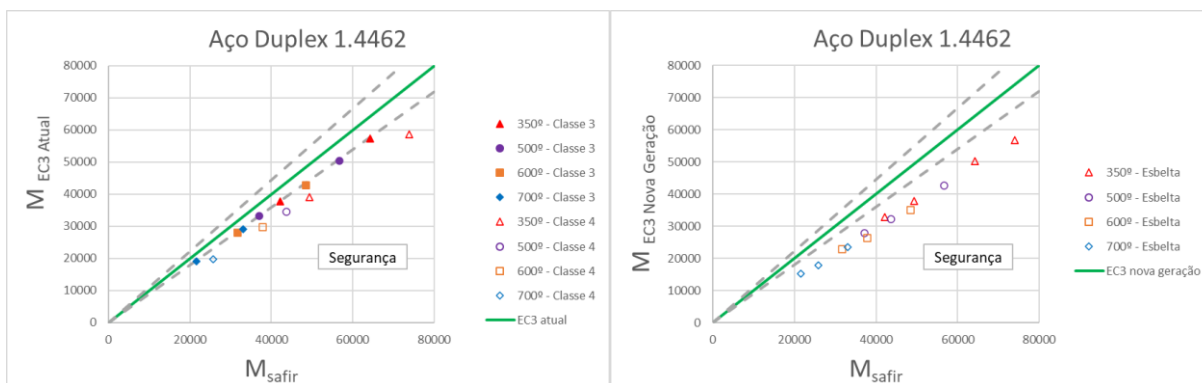


Figura 32. Comparação estatística para secções transversais de classe 1 e 4 / esbeltas em aço austenítico-ferrítico 1.4462

Na tabela 14, tal como foi observado nos gráficos, na proposta do Eurocódigo 3 nova geração, tanto a média como o valor máximo obtido são muito pequenos, sendo por isso possível refinar essa abordagem.

Tabela 14. Avaliação estatística para secções transversais em aço austenítico-ferrítico 1.4462

Duplex 1.4462	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	0.85	0.74
desvio padrão	0.05	0.03
% result. Inseguros	0%	0%
valor máx inseguro	0.90	0.78

6. RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL

6.1. Considerações gerais

Neste capítulo, à semelhança do Capítulo 5, serão apresentados os resultados do estudo paramétrico efetuado, comparando os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR e os resultados obtidos utilizando a metodologia de dimensionamento prevista pelo Eurocódigo 3 atual e pela proposta do Eurocódigo 3 nova geração relativamente à análise da resistência do elemento não restringido lateralmente quando sujeito a momento fletor. A análise dos resultados terá em conta o tipo de material, classe da secção, temperatura e comprimento do elemento, a partir dos quais será também feita uma avaliação estatística dos resultados.

Para a análise dos resultados recorreu-se a vários gráficos com ordenada $M/M_{fi,\theta,Rd}$ e abcissa a esbelteza do elemento à encurvadura lateral $\lambda_{LT,\theta}$.

O cálculo da ordenada $M/M_{fi,\theta,Rd}$ é feita através da carga última obtida pelo SAFIR e o momento fletor máximo resistente da secção para a temperatura considerada. No caso da representação das diferentes curvas, esta razão é calculada através das diferentes metodologias de cálculo apresentadas no Capítulo 3 tendo em conta a classe da secção e as duas propostas do Eurocódigo.

Da mesma forma a esbelteza $\lambda_{LT,\theta}$ foi calculada tendo em conta as abordagens expostas no capítulo 3.

As classes das secções são igualmente as referenciadas nas tabelas 7 a 10, apresentadas anteriormente.

De seguida é apresentado na figura 33 um exemplo melhor representativo do colapso do elemento devido a fenómenos de encurvadura lateral. Devido ao facto de se tratar de um elemento com secção tubular, a sua resistência à torção é bastante elevada, razão pela qual é difícil de observar este tipo de fenómeno. Adicionalmente, na figura 34 é apresentado o gráfico do momento vs deslocamento vertical de um ponto a meio vão até ao colapso da estrutura.

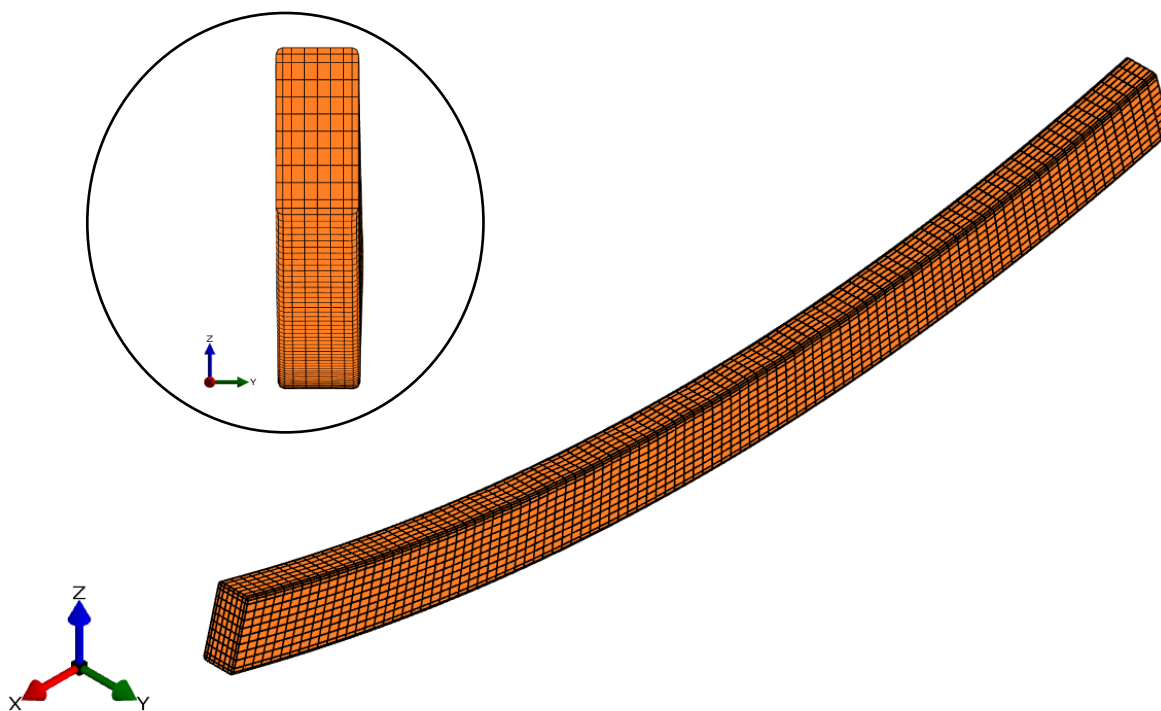


Figura 33. Pormenor de encurvadura lateral – Viga em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 com 3 m de comprimento e secção 100x200x5 a 500°C

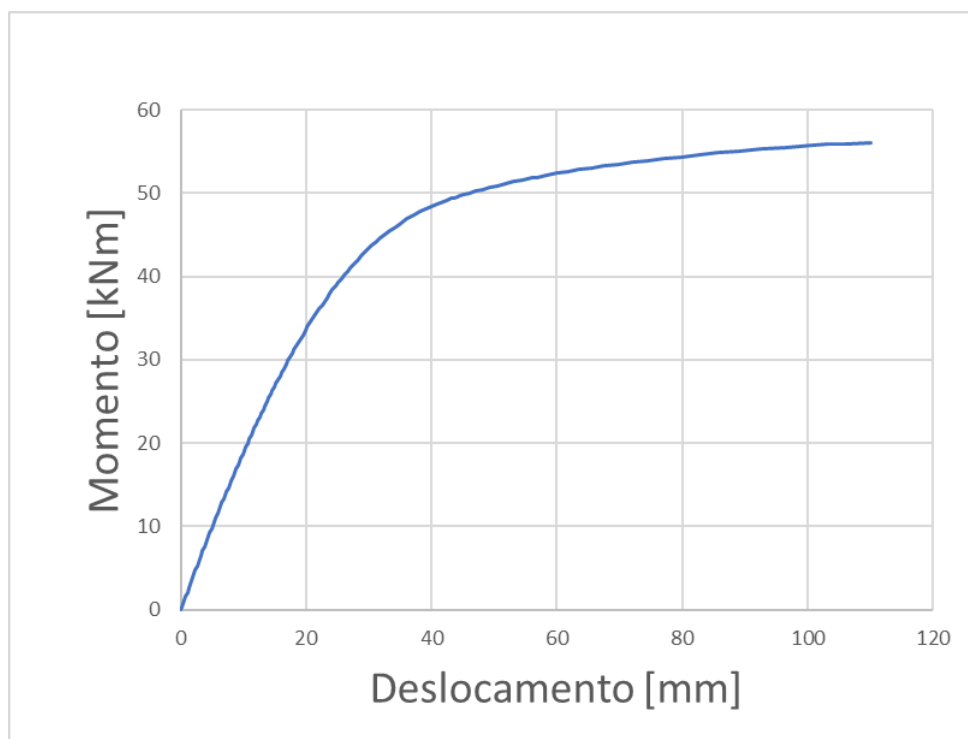


Figura 34. Gráfico de variação de momento em função do deslocamento vertical de um ponto a meio vão

6.2. Estudo paramétrico

6.2.1. Vigas em aço inoxidável austenítico

No presente ponto é feita a análise dos resultados do SAFIR para vigas em aço inoxidável austenítico 1.4301 e 1.4401. Para esta análise, ao contrário do que foi feito nas secções, optou-se por testar apenas a 500°C fazendo variar as secções e os comprimentos das vigas. Adicionalmente realizou-se desenvolveu-se o estudo de vigas com secções 100x150x5 em aço austenítico 1.4301 a 600°C.

Nas figuras 35 e 36 são apresentados os resultados obtidos para aço inoxidável austenítico 1.4301 e 1.4401 e comparados com os valores propostos pelas abordagens do Eurocódigo 3 atual e Eurocódigo 3 nova geração.

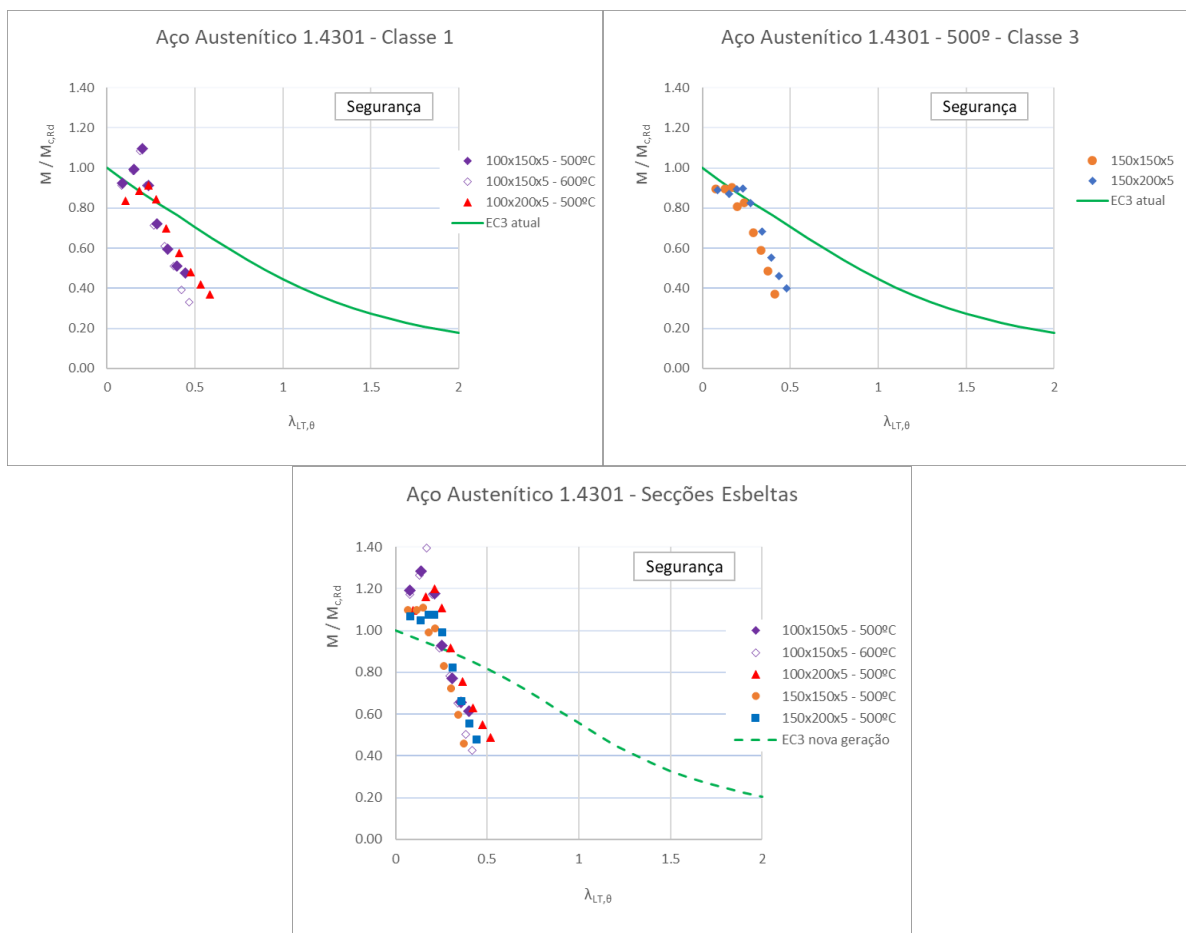


Figura 35. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável austenítico 1.4301

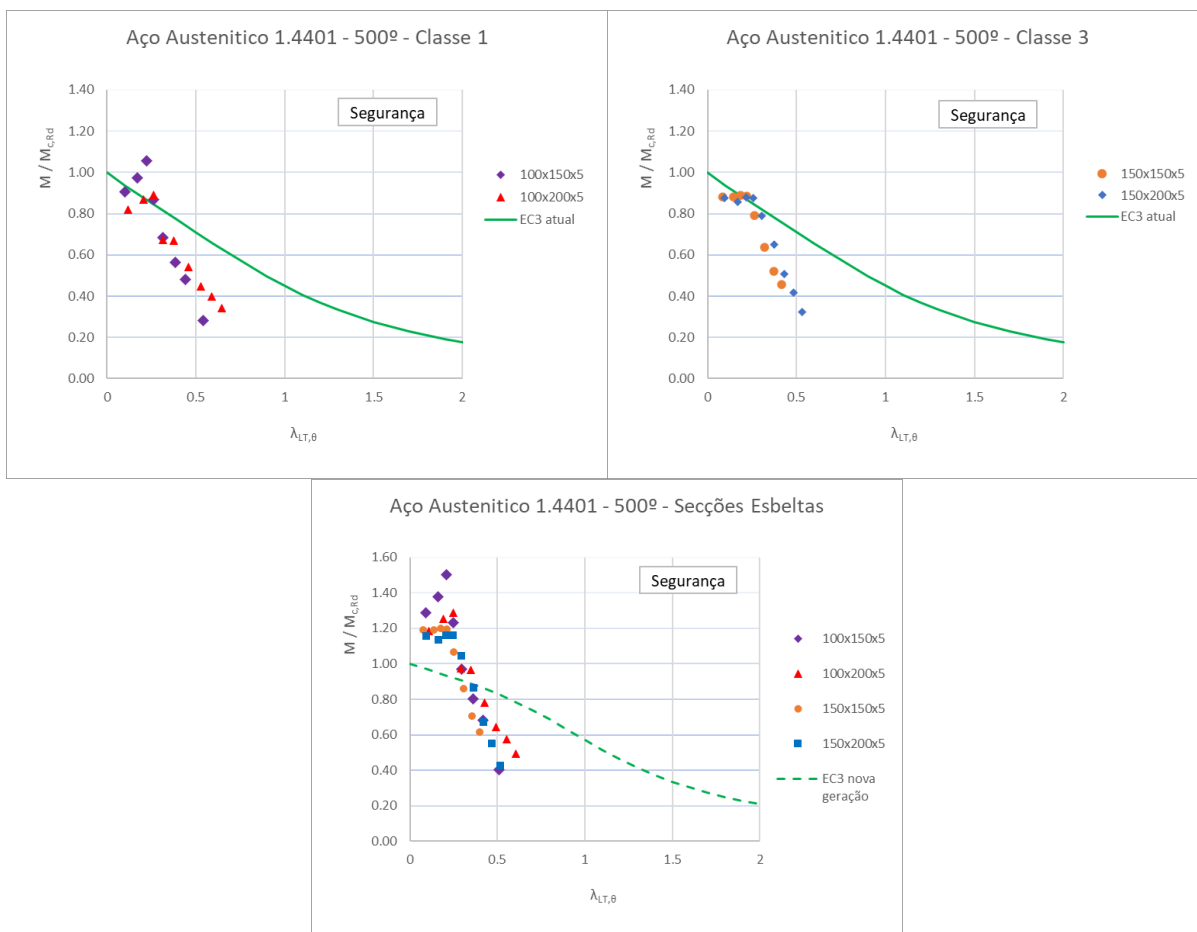


Figura 36. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável austenítico 1.4401

Observando os vários gráficos verifica-se que para valores de esbelteza mais elevados os resultados do SAFIR afastam-se das propostas do Eurocódigo. Estes resultados observam-se não só nos aços austeníticos, mas também nos restantes aços, o que põe em causa a validade do modelo utilizado.

Após uma análise mais detalhada da malha introduzida no programa SAFIR chegou-se à conclusão de que o espaçamento entre nós para elementos com comprimentos superiores a 10 m pode estar na origem destes resultados erróneos. Optou-se por limitar o espaçamento entre nós de secções adjacentes a 1% do comprimento total da viga, o que faz com que existam elementos com comprimentos até 30 cm, comprimentos para os quais o estudo de elementos finitos de casca deixa de fazer sentido, sendo recomendável o desenvolvimento de futuros trabalhos de investigação que analisem em mais detalhe a encurvadura lateral de vigas longas com RHS. Por este motivo, apesar de serem apresentados todos resultados para os vários aços, a análise estatística será realizada focando-se apenas nos valores obtidos para vigas até 10 m de comprimento.

Retomando às figuras 35 e 36 consegue-se observar que os resultados obtidos para cada aço são bastante semelhantes para a respetiva abordagem. Adicionalmente, na abordagem do Eurocódigo 3 atual, para esbeltezas baixas existem muitos valores fora da segurança ou perto do limite da segurança. Por oposição, na abordagem do Eurocódigo 3 nova geração, para as mesmas esbeltezas os valores encontram-se do lado da segurança.

6.2.2. Vigas em aço inoxidável ferrítico

Nas seguintes figuras 37 e 38 são apresentados os resultados obtidos para aço inoxidável ferrítico 1.4003 a partir dos quais é feita a análise e comparação com os valores previstos pelas abordagens do Eurocódigo 3 atual e nova geração.

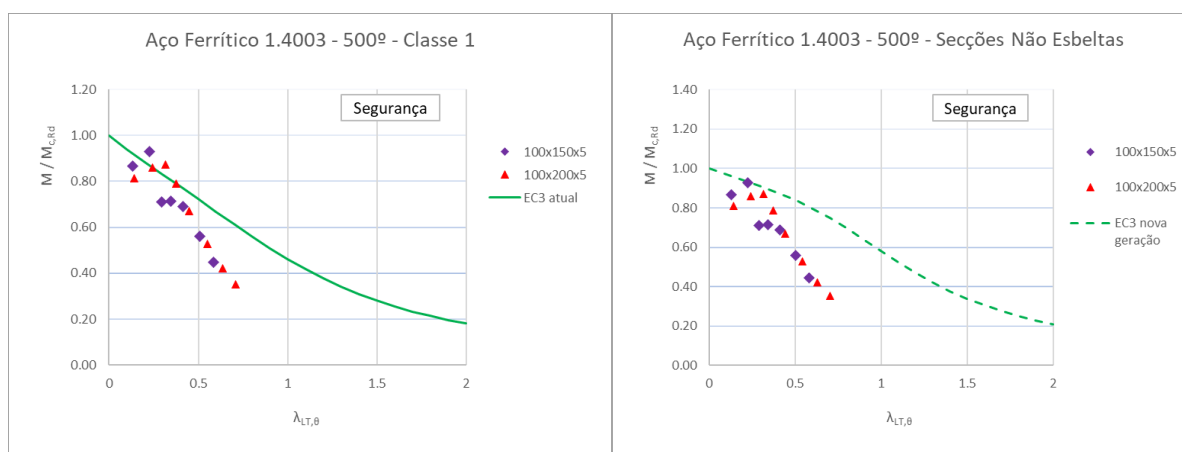


Figura 37. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral para secções de classe 1 / não esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003

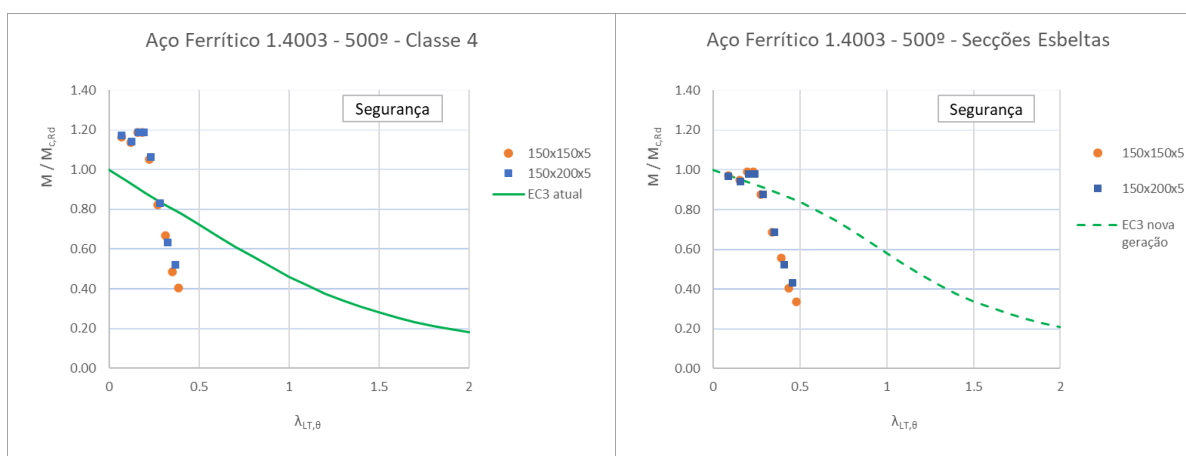


Figura 38. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral para secções de classe 4 / esbeltas em aço inoxidável ferrítico 1.4003

Fazendo a análise dos resultados levando em conta apenas esbeltezas pequenas, tal como especificado anteriormente, verifica-se que há uma clara distinção de valores não só em função da versão do Eurocódigo 3, mas também em função da classe da secção.

Observando a figura 37 relativa a elementos com secções de classe 1 ou não esbeltas, em ambos os gráficos a maior parte dos valores encontram-se fora de segurança, estando a abordagem do Eurocódigo 3 atual mais próxima da segurança.

Relativamente aos elementos com secções de classe 4 ou esbeltas apresentados na figura 38, apesar de a abordagem do Eurocódigo 3 atual estar do lado da segurança, a margem de segurança aparenta ser excessiva. Por oposição, na abordagem do Eurocódigo 3 nova geração, apesar de alguns valores se encontrarem fora de segurança, a curva de valores aproxima-se muito mais dos resultados obtidos.

6.2.3. Vigas em aço inoxidável austenítico-ferrítico

À semelhança do efetuado nos dois últimos pontos, na figura 39 são apresentados os resultados obtidos para vigas em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 e comparados com os valores das abordagens do Eurocódigo 3.

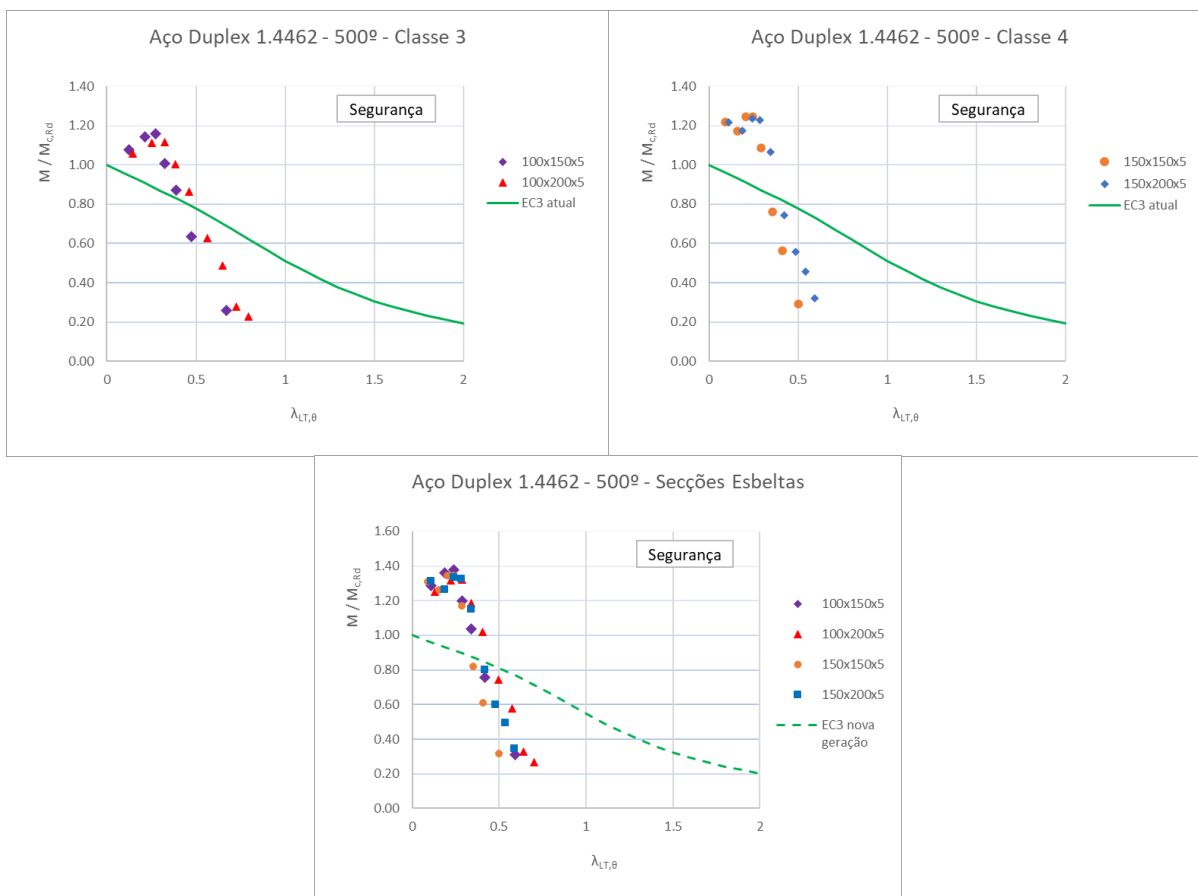


Figura 39. Resultados numéricos de elementos com encurvadura lateral em aço inoxidável duplex 1.4462

Ao analisar os vários gráficos pode-se observar que, desprezando novamente os resultados para esbeltezas elevadas, todos os restantes se encontram do lado da segurança para ambas as abordagens do Eurocódigo 3. Adicionalmente, apesar da distribuição de valores ser semelhante, a versão do Eurocódigo 3 atual aparenta ajustar-se melhor aos resultados, sendo a abordagem do Eurocódigo 3 nova geração demasiado conservativa.

6.3. Análise estatística

No presente capítulo, à semelhança do capítulo 5.3 pretendeu-se fazer a análise estatística dos resultados apresentados anteriormente de forma a conseguir-se uma melhor perceção dos mesmos. Para esse efeito foram criados gráficos e tabelas que comparam os valores obtidos no SAFIR com os valores das propostas do Eurocódigo 3 atual e nova geração respetivamente.

Na realização dos gráficos foi levado em consideração o tipo de aço, a classe da secção, o comprimento e a temperatura. A apresentação dos gráficos é feita no mesmo formato dos gráficos da análise estatística das secções transversais.

Utilizando os valores dos gráficos foram então criadas tabelas nas quais são apresentados uma série de parâmetros com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados.

Tal como foi especificado no capítulo 6.2, os resultados obtidos não foram validados para vigas com comprimentos superiores a 10 m. Por esse motivo, optou-se por desconsiderar esses valores na análise estatística dos resultados.

Nas figuras 40 e 41 são apresentados os resultados para vigas em aço inoxidável austenítico 1.4301 e 1.4401 respetivamente.

Ao comparar os resultados de ambas as classes com os valores da abordagem do Eurocódigo 3 atual verifica-se que apesar de alguns dos valores se encontrarem do lado da insegurança, de um modo geral, os resultados encontram-se dentro das linhas tracejadas. Por oposição, quando comparando com a abordagem do Eurocódigo 3 nova geração, todos os resultados se encontram do lado da segurança, no entanto uma grande parte deles encontra-se acima do limite 10% acima da segurança.

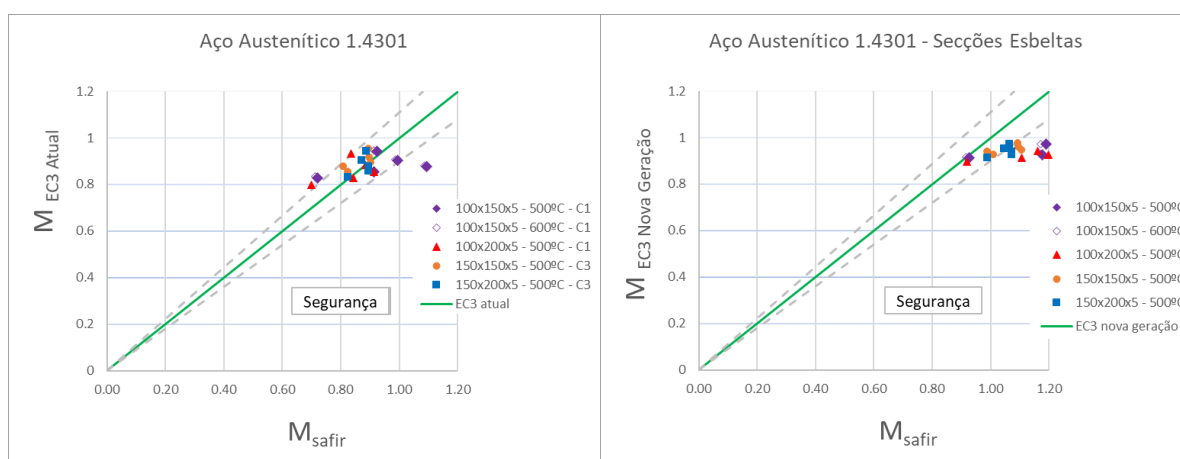


Figura 40. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4301

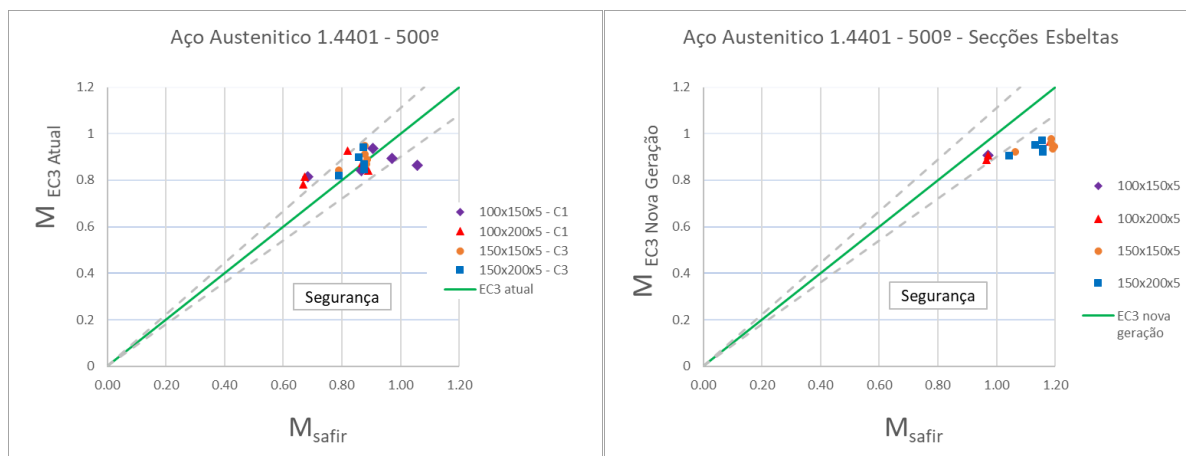


Figura 41. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4401

Nas tabelas 15 e 16 é feita uma análise dos resultados tendo em conta a versão do Eurocódigo 3 à qual os valores são comparados, as secções e as temperaturas. À semelhança do realizado no capítulo 5.3., os resultados são trabalhados e apresentados através dos mesmos padrões.

Ao analisar as tabelas, independentemente do aço, comprova-se que para a abordagem do Eurocódigo 3 atual, a percentagem dos resultados inseguros chega a ultrapassar os 50 %.

Relativamente à proposta do Eurocódigo 3 nova geração, apesar de os resultados estarem do lado da segurança, a média apresentada tem valor muito baixo, podendo por isso ser ajustada a proposta de cálculo.

Tabela 15. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4301

Austenítico 1.4301	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	1.00	0.85
desvio padrão	0.09	0.09
% result. Inseguros	65%	4%
valor máx inseguro	1.17	1.00

Tabela 16. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço austenítico 1.4401

Austenítico 1.4401	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	1.03	0.80
desvio padrão	0.09	0.08
% result. Inseguros	60%	0%
valor máx inseguro	1.21	0.93

De seguida é feita a análise de vigas em aço inoxidável ferrítico 1.4003, sendo os resultados apresentados na figura 42.

Ao contrário do que se observou nas vigas em aço inoxidável austenítico, quando comparados os resultados com as abordagens de ambas as versões do Eurocódigo 3, verifica-se que em ambos os casos existem valores fora da segurança, mais especificamente em vigas com secções de classe 1, segundo a versão atual, e em vigas com secção não esbelta segundo a nova geração.

Pode ser observado também que no caso da versão atual do Eurocódigo 3 existe uma grande diferença entre os valores de secções com classe 1 e 4, diferença esta que deixou de ser perceptível na proposta da nova geração do Eurocódigo 3.

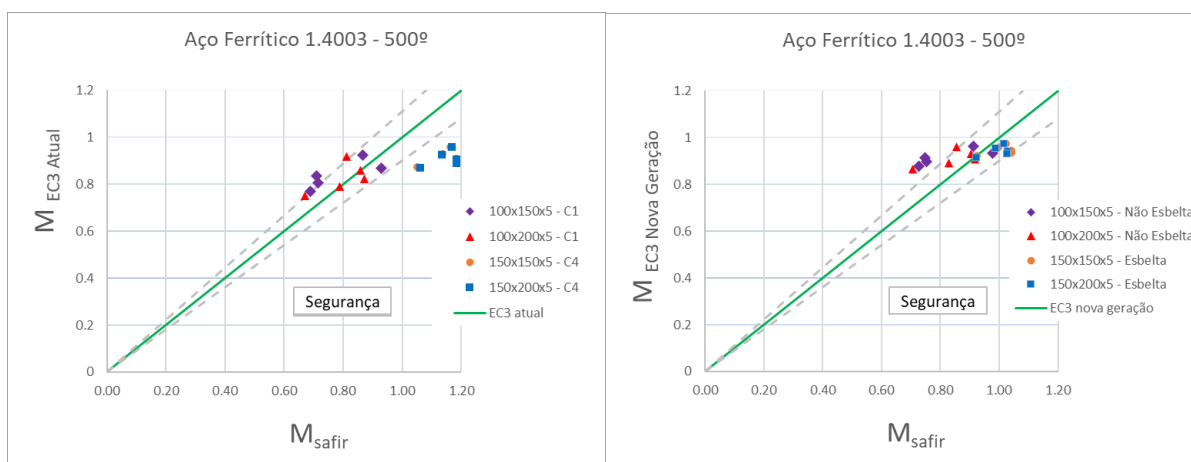


Figura 42. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço ferrítico 1.4003

Na tabela 17 consegue-se observar que efetivamente o número de resultados inseguros é igual para ambas as abordagens, os quais representam uma grande parte dos valores obtidos para

secções de classe 1 e secções não esbeltas. Esta informação é suficiente para mostrar a necessidade de analisar as propostas de cálculo de forma a chegar a aproximações mais seguras. No entanto, tal como foi observado nos gráficos da figura 42, o desvio padrão da proposta da nova geração do Eurocódigo 3 apresenta um valor mais baixo do que a versão atual, representando um melhor ajuste entre resultados de secções com classe diferente.

Tabela 17. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço ferrítico 1.4003

Ferrítico 1.4003	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	0.93	1.03
desvio padrão	0.15	0.11
% result. Inseguros	40%	40%
valor máx inseguro	1.17	1.22

Por fim, são apresentados na figura 43 os gráficos de análise de resultados relativos a vigas em aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462.

Ao contrário dos aços anteriores, no aço austenítico-ferrítico, independentemente da abordagem do Eurocódigo 3, todos os valores apresentados encontram-se do lado da segurança, mais especificamente, estão na sua grande maioria situados fora da linha tracejada representativa dos 10 % acima do limite de segurança.

Para além disso, é de notar a dispersão dos pontos, sendo esta muito mais compacta no caso da proposta da nova geração do Eurocódigo 3. Este efeito pode ter origem na definição das classes de secção uma vez que passamos de secções de classe 3 e 4 para apenas secções esbeltas na nova geração do Eurocódigo 3, passando estas a ter valores mais consistentes.

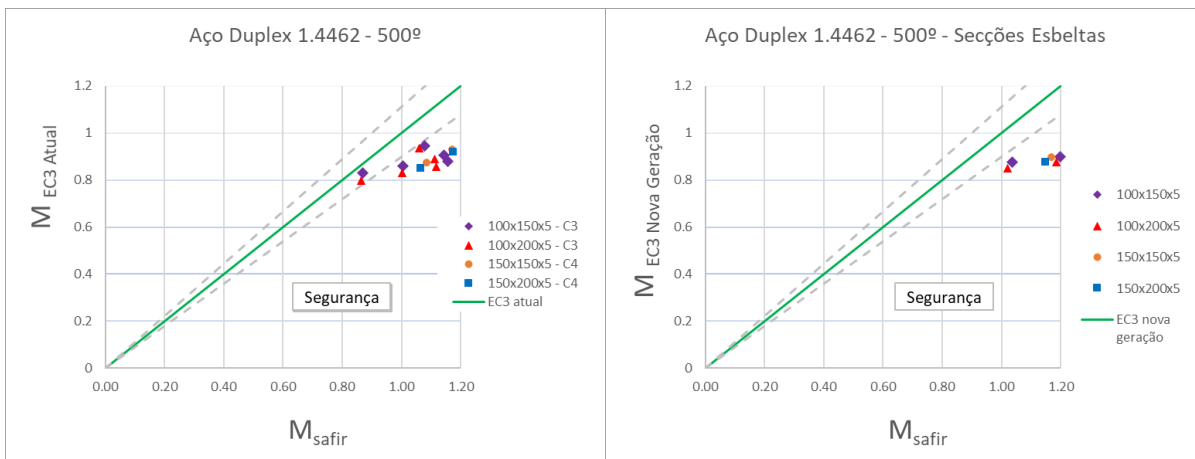


Figura 43. Comparação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço duplex 1.4462

Na tabela 18 são apresentados os resultados da figura anterior, não havendo diferença significativa entre ambas as versões. No entanto, é de realçar que, apesar de os valores da nova geração do Eurocódigo 3 serem mais compactos, estes possuem médias menores, afastando-se por isso mais da realidade.

Tabela 18. Avaliação estatística para vigas não bloqueadas lateralmente em aço duplex 1.4462

Duplex 1.4462	Eurocódigo 3 atual	Eurocódigo 3 nova geração
média	0.80	0.73
desvio padrão	0.07	0.05
% result. Inseguros	0%	0%
valor máx inseguro	0.95	0.85

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma breve análise do trabalho desenvolvido, mencionando não só as conclusões tiradas do mesmo, mas também alguns pontos que poderão ser relevantes para desenvolvimentos futuros na área da investigação.

O objetivo desta dissertação é a análise do comportamento de vigas de várias classes de aço inoxidável com secções retangulares ocas em situação de incêndio. Este estudo é relevante uma vez que, apesar de ser conhecido o comportamento do aço carbono nestas situações, os dois tipos de aços possuem comportamentos diferentes, sendo a informação relevante ao aço inoxidável muito mais limitada. Para isso foi utilizado o programa de elementos finitos SAFIR com o intuito de obter as cargas últimas a que a vigas conseguem resistir, valores estes que foram posteriormente comparados com as propostas de verificação de segurança apresentadas pela versão atual do Eurocódigo 3 e pela nova geração do mesmo.

De maneira a demonstrar a relevância do estudo, são apresentadas nos primeiros capítulos as propriedades do aço inoxidável de forma a acentuar a sua importância na construção, expondo as diferenças que existem não só entre este e o aço carbono, mas também nas diferentes propostas do Eurocódigo 3.

Posteriormente é feita a apresentação dos modelos numéricos, sendo brevemente apresentado o programa de cálculo de elementos finitos SAFIR, bem como os casos de estudo e todas as restrições impostas.

Para o estudo das vigas foi levado em conta fenómenos de encurvadura local e encurvadura lateral, sendo por isso subdivididos os casos de estudo em duas categorias. Os primeiros respetivos à análise de vigas restringidas lateralmente a várias temperaturas, de forma a analisar a encurvadura local, e os outros respetivos à análise de vigas não restringidas lateralmente a 500°C, para a encurvadura lateral. As fórmulas existentes no Eurocódigo 3, relativas aos dois fenómenos, foram desenvolvidas para perfis com secções em I, sendo necessários estudos e respetivas validações em elementos estruturais com secções retangulares ocas, também muito comuns na construção.

Os resultados obtidos em ambas as análises foram então comparados com as propostas do Eurocódigo 3 atual e Eurocódigo 3 nova geração, a partir dos quais é feita uma análise

estatística, onde se verifica que os principais parâmetros responsáveis pela variação nos resultados são o tipo de aço inoxidável e a classe da secção.

Para vigas em aço inoxidável austenítico, independentemente de serem de classe 1.4301 ou 1.4401, o Eurocódigo 3 nova geração apresenta valores mais seguros do que o Eurocódigo 3 atual, tanto no que diz respeito a vigas restringidas lateralmente, como também para vigas não restringidas lateralmente.

Relativamente às vigas em aço inoxidável ferrítico 1.4003 a distinção deixa de ser tão clara. Apesar do Eurocódigo 3 nova geração apresentar valores ligeiramente melhores, em ambos os casos o nível de insegurança ronda os 50%, razão pela qual é necessário desenvolver propostas mais seguras.

Quanto às vigas em aço austenítico-ferrítico 1.4462, ambas as propostas do Eurocódigo 3 apresentaram resultados bastante satisfatórios, encontrando-se todos eles do lado da segurança. No entanto, é de notar que, para o Eurocódigo 3 nova geração, de um modo geral os valores encontram-se muito acima do limite de segurança, o que pode resultar em secções demasiado conservativas ou ineficientes.

No que diz respeito à classe da secção transversal, cuja forma como estas são definidas entre as duas propostas do Eurocódigo 3 foi alterada, faz com que os valores do Eurocódigo 3 nova geração sejam bastante mais consistentes e compactos para as várias secções e aços. Apesar disso, e tal como já foi visto, nem todos os resultados se encontram do lado da segurança, podendo a classe da secção transversal estar na origem de alguns deles.

De um modo geral, a proposta do Eurocódigo 3 nova geração apresenta resultados mais prometedores, não só por possuir menor quantidade de valores inseguros, mas também por apresentar médias e desvios padrão menores. No entanto, em alguns casos, esta proposta chega a apresentar resultados demasiado conservativos.

O facto de, independentemente da abordagem do Eurocódigo 3, se ter obtido valores inseguros e valores demasiado conservativos, prova a necessidade de estudos mais aprofundados deste tipo de secções, os quais deverão ser comparados não só com simulações numéricas, mas também com testes experimentais, garantindo dessa forma uma melhor aproximação à realidade.

O estudo realizado nesta dissertação focou um número de casos limitado, o qual pode ser expandido em estudos futuros, em termos de tipos de secções, classes de aço, temperaturas e tipos de carregamentos.

Por fim, toda a validação de resultados foi baseada em estudos computacionais com base em métodos de elementos finitos, os quais poderão nem sempre ser os mais corretos, tal como se observou no capítulo 6.2. para vigas muito longas, reforçando a ideia da necessidade de testes experimentais, para validação dos comportamentos obtidos numericamente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTRALIAN STEEL INSTITUTE (2004). *“Design capacity tables for structural steel, Volume 2: Hollow Sections”*, Australia.
- CEA. (2015). CAST3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission. url: <http://www-cast3m.cea.fr/>.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (2005a). *“EN 1993–1–1, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings”*, Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (2005b). *“EN 1993–1–2, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design”*, Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (2005c). *“EN 10088-2, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes”*. Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (2006a). *“EN 1993–1–4, Eurocode 3: Design of steel Structures – Part 1–4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels”*, Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (2006b). *“EN 1993–1–5, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements”*, Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu De Normalização (SC3.T6, 2019). *“EN 1993–1–2, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General – Structural fire design”*, Bruxelas, Bélgica.
- COUTO, C.; VILA REAL, P.; LOPES, N. (2013). *“RUBY: an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M”*, University of Aveiro.
- COUTO, C.; VILA REAL, P. M. M.; LOPES, N.; ZHAO, B. (2014). *“Effective width method to account for the local buckling of steel thin plates at elevated temperatures”*. Thin Walled Structures Vol 84, p. 134-149.
- COUTO, C. (2015). *“Fire design of steel members with class 4 cross-section”*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- COUTO, C.; VILA REAL, P. M. M.; LOPES, N.; ZHAO, B. (2015). *“Resistance of steel cross-sections with local buckling at elevated temperatures”*. Journal of Constructional Steel Research Vol 109, p. 101-114.
- COUTO, C.; VILA REAL, P. M. M.; LOPES, N.; ZHAO, B. (2016). *“Numerical investigation of the lateral-torsional buckling of beams with slender cross sections for the case of fire”*. Engineering Structures Vol 106, p. 410-421.
- ESDEP (2000). *“Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero”*. Espanha: Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).
- EURO INOX; SCI, Steel Construction Institute (2006). *“Design Manual for Structural Stainless Steel”*, Euro Inox, 3rd edition.
- FRANSSEN, J. M. (2005). *“SAFIR, a thermal/structural program modelling structures under fire”*, Engineering Journal, Vol. 43(3), pp. 143–58.
- FRANSSEN, J.-M.; Gernay, T. (2017). *“Modelling structures in fire with SAFIR: theoretical background and capabilities”*, Journal of Structural Fire Engineering.

- GARDNER, L. (2004). “*Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components – A consistent Approach*”. Journal of Constructional Engineering, ASCE. P 1586–1601.
- GARDNER, L. (2005). “*The use of stainless steel in structures*”. Progress in Structural Engineering and Materials. Vol 7, nº 2, p. 45-55.
- GARDNER, L.; BADDOO, N. (2006). “*Fire testing and design of stainless steel structures*”, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 62, pp. 532–543.
- GARDNER, L.; CRUISE, R. B. (2009). “*Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections*”. Journal of Structural Engineering, 135(1), 42-53.
- LOPES, N.; VILA REAL, P. M. M. (2005). “*Modelação numérica da encurvadura lateral de vigas em aço inoxidável: comparação com o Eurocódigo 3*”, atas do Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Granada.
- LOPES, N. (2009). “*Behaviour of stainless steel structures in case of fire*”, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- LOPES, N.; VILA REAL, P. M. M. (2014). “*Class 4 stainless steel I beams subjected to fire*” Thin Walled Structures Vol 83, p. 137-146.
- LOPES, N.; MANUEL, M.; SOUSA, A. R.; VILA REAL, P. M. M. (2017). “*Parametric study on austenitic stainless steel beam-columns with hollow sections under fire*”, J ConstrSteel Res, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.018>
- LOPES, N.; COUTO, C.; AZEVEDO, J.; VILA REAL, P. M. M. (2018). “*Cross-section resistance of slender stainless steel I profiles in case of fire*”, FireSERT, Ulster University, Belfast, UK.
- LOURENÇO, A. (2015). “*Resistência ao fogo de pilares com secções em I de classe 4 em aço inoxidável*”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- MANUEL, M. (2016). “*Resistência ao fogo de vigas-colunas tubulares em aço inoxidável*”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- REIS, A.; LOPES, N.; VILA REAL, P.M.M. (2016). “*Stainless steel plate girders subjected to shear buckling at normal and elevated temperatures*” Fire Technology, DOI: 10.1007/s10694-016-0602-6.
- ROSSI, B. (2010). “*Mechanical behavior of ferritic grade 3Cr12 stainless steel – Part 1: Experimental investigations*”. Thin-Walled Structures. Vol 48, nº 7, p. 553-560.
- SAOULA, A.; MEFTAH, S. A.; MOHRI, F.; DAYA, E. M. (2016). “*Lateral buckling of box beam elements under combined axial and bending loads*”, Journal of Structural Engineering, 116, 141-155.
- SCI; TATA STEEL; BCSA (2011) “*P363 Steel Building Design: Design Data, In accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*” Silwood Park, Ascot, Berkshire, SL5 7QN.
- SHENGGANG F.; BINBIN H.; XINFENG X.; HEYANG G.; MEIJING L. (2016). “*Fire resistance of stainless steel beams with rectangular hollow section: Experimental investigation*”, Elsevier, Fire Safety Journal, Vol. 81, p. 17-31.
- TRAN, A. T. (2016). “*Lateral-torsional buckling resistance of cold-formed high strength steel rectangular hollow beams*”, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.