



**Heliodoro Daniel  
Almeida Ribeiro**

**COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE  
FACHADAS EM ALUMÍNIO E EM AÇO INOXIDÁVEL**





**Heliodoro Daniel  
Almeida Ribeiro**

**COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE  
FACHADAS EM ALUMÍNIO E 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, coorientação do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Aos meus pais



## O júri

Presidente

Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues

Professora Auxiliar C/Agregação, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes

Professor Associado, Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

A realização desta dissertação marca o final do meu percurso académico e assinala a concretização de um sonho. Por esse motivo, gostaria de expressar aqui os meus maiores e sinceros agradecimentos a todos os que me acompanharam durante todo o processo e tornaram possível a sua realização.

Começo por agradecer ao meu orientador Professor Doutor Nuno Lopes, pela sua valiosa ajuda e partilha de conhecimentos, dedicação, orientação e disponibilidade prestada durante a realização desta dissertação.

Ao meu coorientador Professor Doutor Paulo Vila Real, pelas sugestões e disponibilidade que dispensou para me auxiliar.

Um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais e avós por todo o carinho, apoio e oportunidade de poder concretizar esta etapa na minha vida, sem eles nada disto seria possível.

Aos colegas da b-face, pela integração, paciência e por toda a partilha de conhecimento que disponibilizaram desde o primeiro dia, nomeadamente ao Pedro Rodrigues, Miguel Gomes, Hélder Fernandes, José Vasconcelos, Rafael Mendes, Pedro Costa, Sílvia Maravilha e Rafael Silva.

Aos meus amigos de curso, em especial ao Pedro, Henrique, Filipa, Gonçalo, Leonor e Rafaela, por todos os momentos partilhados ao longo destes anos. Assim como aos amigos Lousadenses, que igualmente marcaram o meu percurso académico e pessoal. Por último, mas não menos importante à minha namorada, Ana Esteves, por toda a paciência e confiança que depositou em mim durante a realização deste trabalho.

A todos, um obrigado.

Parte deste trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, PTDC/ECI-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 carbono, aço inoxidável, alumínio, resistência ao fogo, elementos estruturais, fachadas, projeto.

## **Resumo**

A presente dissertação desenvolveu-se com o propósito de aumentar o conhecimento sobre a concepção e resistência de elementos estruturais principalmente em aço inoxidável e alumínio, mas também em aço carbono. Apresenta-se um estudo no âmbito da resistência ao fogo de elementos estruturais em aço carbono e em aço inoxidável, realizado em paralelo com o estágio curricular na empresa b-face focado na concepção de fachadas de alumínio.

O estágio curricular teve como principal objetivo a participação em projetos de dimensionamento de fachadas de alumínio e possibilitou o contacto com a realidade do mundo profissional e empresarial, tornando possível aplicar os conceitos aprendidos academicamente. São descritas neste documento três das obras que foram objeto análise.

No estudo académico, que visou a análise de soluções estruturais alternativas às aplicadas no âmbito do estágio, foi estudada a aplicação estrutural do aço inoxidável em perfis com secções retangulares sólidas sujeitas à flexão a temperaturas elevadas, cujas características materiais podem ser benéficas. Para esse fim foram realizadas análises numéricas recorrendo ao programa de elementos finitos SAFIR, utilizando elementos finitos de casca, com o objetivo de estudar a resistência de diferentes secções em aço carbono e aço inoxidável a altas temperaturas. Por fim, esses resultados numéricos são comparados com a metodologia preconizada pelo Eurocódigo 3.



**Keywords**

carbon steel, stainless steel, aluminium, fire resistance, structural elements, facades, project.

**Abstract**

This dissertation was developed with the purpose of increasing the knowledge about the design and the resistance of structural elements mainly in stainless steel and aluminum, but also in carbon steel. It presents a study on the fire resistance of structural elements in carbon steel and stainless steel that was developed in parallel with the internship at b-face company, focused on the conceptual aluminum facades development.

The internship had as main goal the participation in projects of aluminum facades design and allowed contact with the reality of the professional and business environment, making it possible to apply the concepts learned academically. Three of the projects that were analyzed are described in this document.

In the academic study, which aimed to analyze alternative structural solutions to those applied during the internship, it was studied the structural application of stainless steel in profiles with rectangular solid sections exposed to bending at high temperatures, whose material characteristics can be beneficial. To accomplish that goal, numerical analyses were performed using the SAFIR finite element program, applying shell finite elements, to study the strength of different carbon steel and stainless steel sections at high temperatures. Finally, these numerical results are compared with the methodology recommended by Eurocode 3.



## **ÍNDICE GERAL**

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xxiii
NOMENCLATURA.....	xxv
1. INTRODUÇÃO .....	3
1.1 Considerações gerais .....	3
1.2 Apresentação da empresa .....	4
1.3 Objetivos .....	4
1.4 Organização da dissertação .....	5
2. MATERIAIS.....	9
2.1 Considerações gerais .....	9
2.2 Aço carbono .....	9
2.2.1 Características gerais .....	9
2.2.2 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3.....	10
2.2.3 Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas.....	11
2.3 Aço inoxidável .....	12
2.3.1 História.....	12
2.3.2 Vantagens e desvantagens do aço inoxidável.....	13
2.3.3 Casos de aplicação .....	14
2.3.4 Propriedades mecânicas do aço inoxidável .....	17
2.4 Alumínio.....	23
2.4.1 História.....	23
2.4.2 Vantagens e desvantagens do alumínio .....	23
2.4.3 Casos de aplicação .....	25
2.4.4 Propriedades mecânicas do alumínio .....	27
3 RESISTÊNCIA ESTRUTURAL À TEMPERATURA NORMAL .....	37
3.1 Considerações gerais .....	37
3.2 Metodologia de cálculo para elementos em aço carbono .....	37
3.2.1 Classificação da secção transversal .....	38

3.2.2	Resistência da secção transversal .....	40
3.2.3	Resistência do elemento .....	43
3.3	Metodologia de cálculo para elementos em aço inoxidável.....	50
3.3.1	Classificação da secção transversal.....	50
3.3.2	Resistência da secção transversal .....	51
3.3.3	Resistência do elemento .....	51
3.4	Metodologia de cálculo para elementos em alumínio.....	55
3.4.1	Classificação da secção transversal.....	55
3.4.2	Resistência da secção transversal .....	59
3.4.3	Resistência do elemento .....	61
4	RESISTÊNCIA ESTRUTURAL AO FOGO .....	69
4.1.	Considerações gerais .....	69
4.2	Aço carbono.....	69
4.2.1	Classificação da secção transversal.....	69
4.2.2	Resistência da secção transversal .....	70
4.2.3	Resistência do elemento a altas temperaturas.....	70
4.3	Aço inoxidável.....	72
4.3.1	Classificação da secção transversal.....	72
4.3.2	Resistência da secção transversal .....	73
4.3.3	Resistência do elemento a altas temperaturas.....	73
5	PROJETOS DE FACHADAS .....	77
5.1	Obras analisadas.....	77
5.2	Teatro do Jordão.....	79
5.2.1	Considerações gerais.....	79
5.2.2	Materiais.....	81
5.2.3	Ações .....	81
5.2.4	Combinações de ações .....	84
5.2.5	Modelação de pormenores construtivos .....	88
5.2.6	Detalhe e desenho .....	89



5.3	Novo estádio do Everton .....	90
5.3.1	Considerações gerais .....	90
5.3.2	Determinação da secção transversal e modelação da estrutura.....	90
5.4	<i>City Gate House</i> .....	94
5.4.1	Considerações gerais .....	94
5.4.2	Modelação .....	95
5.5	Considerações finais .....	95
6	ANÁLISES AVANÇADAS .....	99
6.1	Considerações gerais .....	99
6.2	Modelo numérico .....	99
6.2.1	Malha .....	101
6.2.2	Leis constitutivas .....	103
6.2.3	Condições de apoio e carregamento.....	103
6.2.4	Imperfeições .....	104
6.3	Viga restringida lateralmente .....	105
6.3.1	Aço carbono de classe S275 .....	106
6.3.2	Aço inoxidável e aço carbono de classe s235.....	107
6.4	Viga não restringida lateralmente .....	107
6.4.1	Aço carbono de classe S275 .....	108
6.4.2	Aço inoxidável e aço carbono de classe S235 .....	109
6.4.3	Curvas de encurvadura lateral.....	112
6.6	Considerações finais .....	113
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
7.1	Conclusões .....	117
7.2	Desenvolvimentos futuros.....	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
	ANEXO.....	131



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço carbono S235 à temperatura ambiente. ....	10
Figura 2 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do aço carbono.....	11
Figura 3 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço carbono de classe S235 a 600 °C. ....	12
Figura 4 - <i>Empire State Building</i> : a) enquadramento do edifício na cidade; b) colunas de aço inoxidável. ....	15
Figura 5 - Universidade de Lausanne. ....	16
Figura 6 - Edifício de escritórios em Hamburgo. ....	16
Figura 7 - Representação gráfica da curva constitutiva do aço inoxidável austenítico 1.4301. ....	20
Figura 8 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do aço inoxidável.....	22
Figura 9 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço inoxidável austenítico 1.4301 a 600 °C. ....	22
Figura 10 - <i>Ferrari World</i> . ....	26
Figura 11 - <i>Metropolitan Tower</i> . ....	26
Figura 12 - <i>Rocket Mortgage Fieldhouse</i> . ....	27
Figura 13 - Representação gráfica da curva constitutiva da liga 6060-T6. ....	32
Figura 14 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do alumínio.....	34
Figura 15 - Configuração da deformada de uma viga de secção retangular sólida sujeita à encurvadura lateral – editada de (Shellbuckling, 2021). ....	45
Figura 16 - Classificação das secções. ....	56
Figura 17 - Relação entre $\eta$ e $\psi$ .....	57
Figura 18 - Teatro do Jordão. ....	77
Figura 19 - Novo estádio do Everton. ....	78

Figura 20 - <i>City Gate House</i> . .....	79
Figura 21 - Pormenores construtivos usados no Teatro do Jordão. ....	79
Figura 22 - Casos mais gravosos: a) caso 1; b) caso 2. ....	80
Figura 23 - Distribuição das cargas resultantes da ação do vento para o caso 1: a) sucção; b) pressão. ....	82
Figura 24 - Distribuição das cargas resultantes da ação do vento para o caso 2: a) sucção; b) pressão. ....	83
Figura 25 - Carga de manutenção. ....	84
Figura 26 - Definições escolhidas no <i>Robot</i> : a) configuração da barra; b) configuração da análise. ....	86
Figura 27 - Rácios dos montantes do Teatro do Jordão. ....	86
Figura 28 - Deformada máxima em SLS do Teatro do Jordão .....	88
Figura 29 - Peça de amarração: a) modelação no programa Inventor; b) análise por elementos finitos. ....	89
Figura 30 - Modelação do piso 0 do Teatro do Jordão. ....	89
Figura 31 - Pormenores construtivos: a) ligação da peça de amarração; b) detalhe em planta. ....	90
Figura 32 - Secção bruta a usar na travessa e no montante observada através do <i>Autocad</i> . ....	91
Figura 33 - Características da secção transversal. ....	91
Figura 34 - Deformada obtida em SLS do novo Estádio do Everton. ....	92
Figura 35 - Secção efetiva. ....	93
Figura 36 - Esforços resultantes a partir do uso da secção efetiva. ....	93
Figura 37 - Transferência de esforços para os montantes e para as travessas de uma fachada “ <i>Curtain Wall</i> ”. ....	94
Figura 38 - Malha 40x40 mm usada na secção transversal 400x20 mm. ....	102
Figura 39 - Malha 15x40 mm usada na secção transversal 150x20 mm. ....	102
Figura 40 - Malha 30x40 mm usada na secção transversal 150x20 mm. ....	102
Figura 41 - Malha 30x40 mm usada na secção transversal 60x40 mm. ....	103
Figura 42 - Malha 12x40 mm usada na secção transversal 60x40 mm. ....	103
Figura 43 - Modelo numérico com cargas e restrições. ....	104

Figura 44 - Deformada a meio vão de uma viga restringida lateralmente. ....	106
Figura 45 - Resistência da secção restringida 150x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	107
Figura 46 - Resistência da secção restringida 150x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	107
Figura 47 - Deformada a meio vão de uma viga não restringida lateralmente. ....	108
Figura 48 - Resistência da secção não restringida 400x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	109
Figura 49 - Resistência da secção não restringida 150x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	109
Figura 50 - Resistência da secção não restringida 400x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	110
Figura 51 - Resistência da secção não restringida 150x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	111
Figura 52 - Resistência da secção não restringida 60x40 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C. ....	111
Figura 53 - Curva da encurvadura do aço carbono. ....	113
Figura 54 - Curva da encurvadura do aço inoxidável. ....	113



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características do aço carbono.....	10
Tabela 2 - Tipos de aço inoxidável.....	17
Tabela 3 - Características do aço inoxidável.....	19
Tabela 4 - Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas do aço inoxidável 1.4301.....	21
Tabela 5 - Ligas de alumínio.....	28
Tabela 6 - Características do alumínio.....	29
Tabela 7 - Módulo de elasticidade do alumínio a temperaturas elevadas e tensão de cedência para a liga 6060-T6.....	33
Tabela 8 - Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação (Vila Real, 2003).....	39
Tabela 9 - Fator de imperfeição.....	44
Tabela 10 - Fator de imperfeição $\alpha_{LT}$ .....	46
Tabela 11 - Curva de encurvadura.....	47
Tabela 12 - Valores dos fatores C1 para k igual a 1.0 e para perfis bi-simétricos utilizados no cálculo do momento crítico (Vila Real, 2021). ....	48
Tabela 13 - Valores de $NRk = f_y A_i$ , $M_i$ , $Rk = f_y W_i$ e $M_i, Ed$ .....	49
Tabela 14 - Determinação dos valores limite de $\beta_1$ , $\beta_2$ , $\beta_3$ . ....	58
Tabela 15 - Determinação dos coeficientes C1 e C2.....	59
Tabela 16 - Fator de imperfeição $\alpha$ e o $\lambda_0$ .....	63
Tabela 17 - Restrição dos apoios.....	80
Tabela 18 - Classes e as ligas usadas no Teatro do Jordão. ....	81
Tabela 19 - Cargas permanentes consideradas.....	81
Tabela 20 - Valores da carga do vento. ....	82
Tabela 21 - Coeficientes de segurança ( $\gamma$ ).....	84
Tabela 22 - Coeficientes parciais de segurança ( $\psi$ ).....	85
Tabela 23 - Combinações ULS.....	85
Tabela 24 - Coeficientes de segurança ( $\gamma$ ).....	87
Tabela 25 - Combinações SLS. ....	87

Tabela 26 - Secções transversais usadas nas análises avançadas.....100  
Tabela 27 - Condições de apoio do estudo numérico.....104



---

## NOMENCLATURA

Letras do alfabeto latino:

$A$	área
$A_{eff}$	área efetiva
$BL$	carga de barreira
$D$	cargas permanentes
$E$	módulo de elasticidade
$E_y$	módulo de elasticidade tangente da curva tensão-extensão
$f_p$	limite proporcional de elasticidade
$f_u$	tensão última
$f_y$	tensão de cedência
$f_0$	limite convencional de elasticidade
$f_{0,\theta}$	limite convencional de elasticidade de 0,2 % a temperaturas elevadas
$G$	módulo de elasticidade transversal
$I$	inércia
$I_t$	inércia de torção
$I_w$	inércia de empenamento
$K$	fator que permite os efeitos de enfraquecimento da soldadura
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico
$k_{0,\theta}$	fator de redução da resistência para uma extensão de 0,2 % a temperatura elevada
$k_{2,\theta}$	fator para a determinação da tensão de cedência
$k_{p,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade
$k_w$	empenamento da extremidade
$k_{y,\theta}$	fator de redução para a tensão de cedência
$L$	comprimento da barra
$L_{CR}$	comprimento de encurvadura

$M_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante $t$
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura
$M_{C,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente por compressão
$M_{CR}$	valor crítico do momento fletor relativo à encurvadura lateral
$M_{Ed}$	valor de cálculo do momento atuante
$M_{el,Rd}$	momento resistente é o momento elástico da secção
$M_{fi,Ed}$	valor de cálculo do momento atuante em situação de incêndio
$ML$	carga de manutenção
$M_{N,Rd}$	valor resistente do momento plástico reduzido pelo esforço axial $N_{Ed}$
$M_{pl,Rd}$	momento resistente plástico da secção
$M_{Rd}$	momento fletor resistente
$M_{y,Ed}$	valor de cálculo do momento atuante em $y$
$M_{z,Ed}$	valor de cálculo do momento atuante em $z$
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço de compressão resistente à encurvadura
$N_{C,Rd}$	valor de cálculo do esforço de compressão resistente
$N_{CR}$	valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica
$N_{Ed}$	valor de cálculo do esforço axial atuante
$N_{pL,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta
$W$	ação do vento
$w_{eff}$	módulo de flexão efetivo
$w_{el}$	módulo de flexão elástico
$w_{pl}$	módulo de flexão plástico
$\omega_0$	fator para a secção com soldadura localizada
$Z_a$	posição de aplicação da carga
$Z_g$	distância entre o centro de corte a posição da carga
$Z_s$	posição do centro de corte da secção

Carateres do alfabeto grego:

$\alpha$	fator de forma
$\beta$	parâmetro de esbelteza
$\varepsilon$	extensão
$\varepsilon_e$	extensão correspondente à tensão $f_e$
$\varepsilon_p$	extensão correspondente à tensão $f_p$
$\varepsilon_u$	extensão última
$\theta$	temperatura
$\gamma_{Mi}$	coeficiente parcial de segurança
$\psi$	relação de tensões atuantes
$\sigma$	tensão
$\chi$	fator de redução relevante para a encurvadura
$\chi_{LT}$	fator de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	fator de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio



# Capítulo 1

---

## Introdução

## **Introdução**

- 1.1 Considerações gerais
- 1.2 Apresentação da empresa
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Organização da dissertação

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

A presente dissertação pretende enquadrar o estágio curricular na empresa b-face, no âmbito do projeto de estruturas metálicas de fachadas, considerando perfilaria em alumínio e estrutura de suporte em aço, complementando com um estudo da aplicação do aço inoxidável nas mesmas estruturas e respectivas resistências ao fogo.

O estágio na empresa b-face teve uma duração de 9 meses. Embora a situação pandémica tenha dificultado, em alguns períodos, a sua atividade presencial, foi possível continuar em formato *online* o seu cumprimento. O seu principal objetivo foi desenvolver e preparar estruturas para fachadas, integrando uma equipa especializada e aplicando ferramentas dedicadas para a conceção de estruturas metálicas.

Inicialmente descrever-se-ão algumas considerações sobre os três materiais, aprofundando-se o aço inoxidável e o alumínio. No caso do aço carbono, apenas serão apresentadas as suas propriedades mecânicas. Relativamente ao aço inoxidável e ao alumínio, serão abordadas as suas histórias, assim como as vantagens e desvantagens da sua aplicação, mencionam-se alguns casos de aplicação fazendo-se, posteriormente, referência às suas propriedades mecânicas.

Em seguida, serão apresentadas as metodologias de cálculo à temperatura normal com as respetivas fórmulas aplicadas em casos de estudo realizados na b-face, sendo apenas enumeradas as fórmulas que *a posteriori* serão usadas.

Com base nas estruturas analisadas no âmbito do estágio, foram também estudadas diferentes soluções alternativas em aço inoxidável, considerando a obtenção de um melhor comportamento mecânico, nomeadamente à ação do fogo, através da aplicação das regras de cálculo da Parte 1-2 do Eurocódigo 3 (EC3) (CEN, 2005b) (Vila Real, 2021).

Recorrer-se-á, também, a análise geométrica e materialmente não lineares, aplicando o programa de elementos finitos SAFIR, incluindo elementos de várias formulações, tendo como base o comportamento tensão-extensão dos materiais (Franssen & Gernay, 2017). Utilizam-se elementos de casca em todas as vigas, com o objetivo de estudar a resistência à

encurvadura lateral do elemento estrutural. Estas análises serão comparadas com EC3, permitindo avaliar a resistência de várias secções transversais sujeitas a esforços de flexão.

## **1.2 Apresentação da empresa**

A b-face foi fundada em 2019 e está situada em Aveiro. Trata-se de uma empresa especializada em engenharia, *design* e consultadoria na área das fachadas, que combina uma base de conhecimento global para o desenvolvimento inovador de soluções inspiradoras, sempre adaptadas às necessidades dos clientes.

Foi fundada por três parceiros com uma vasta experiência em desenhar e entregar projetos de fachadas em todo o mundo.

O principal objetivo é fornecer alternativas de excelência perante os desafios mais complexos, focando na solução ideal em termos de custo, fabricação e instalação (b-face, 2020).

Embora seja uma empresa recente, já tem projetos em várias partes do mundo, de que são exemplo os seguintes países: Angola, República Dominicana, Irlanda do Norte e Inglaterra.

## **1.3 Objetivos**

Ao longo do estágio curricular pretendeu-se desenvolver as seguintes atividades do projeto de fachadas:

- Desenvolvimento e preparação em *TEKLA STRUCTURES* de base de dados de ligações metálicas/Alumínio tipo utilizadas na b-face;
- Preparação de desenhos 2D de fabrico e montagem de ligações metálicas;
- Pós-processamento de peças simples e/ou *assemblies* para interoperabilidade *TEKLA* e *INVENTOR* para análises FEM;
- Análise técnica e dimensionamento de fachadas de alumínio;
- Elaboração de desenhos de fachadas de alumínio para aprovação do cliente;
- Preparação e modelação de planos de fabrico de fachadas em alumínio;



- Produção de representações digitais dos trabalhos através de equipamentos de desenho assistido por computador.

O estudo acadêmico complementar ao estágio teve como objetivo estudar alternativas estruturais de fachadas. Foi estudada a aplicação do aço inoxidável para este tipo de estruturas, cujas características materiais podem ser benéficas para a respetiva exposição a ambiente exterior considerando as condições climáticas e de qualidade do ar. Usar-se-á como ferramenta o programa de cálculo SAFIR, obtendo assim simulações numéricas que serão comparadas com as prescrições de cálculo do Eurocódigo.

## **1.4 Organização da dissertação**

Esta dissertação divide-se em sete capítulos, sendo que o primeiro refere-se às considerações gerais, à apresentação da empresa e aos objetivos que se pretendia realizar no decorrer do estágio.

No segundo capítulo são apresentados os diferentes materiais estudados: o aço carbono, o aço inoxidável e o alumínio. Os dois primeiros serão estudados mais aprofundadamente, nomeadamente em relação ao seu comportamento em situação de incêndio.

O terceiro capítulo relaciona-se com a metodologia de cálculo usada para obter a resistência estrutural dos três materiais já evidenciados. No aço carbono será usado a Parte 1-1 do EC3, no aço inoxidável a Parte 1-4 do EC3 e, por fim, no alumínio a Parte 1-1 do Eurocódigo 9 (EC9).

No quarto capítulo, apresentam-se as regras de cálculo de resistência ao fogo relativamente ao aço carbono e ao aço inoxidável, dado que o estudo numérico a altas temperaturas, apresentado neste trabalho, se focou nos elementos estruturais de suporte neles realizados.

Relativamente ao quinto capítulo, são descritos alguns dos projetos concretizados na b-face, no âmbito da análise do comportamento de fachadas.

Já no sexto capítulo é apresentado o estudo complementar a elementos em aço carbono e aço inoxidável, avaliando o comportamento dos dois materiais ao fogo.

Por fim, no sétimo capítulo, encontram-se as considerações finais, descrevendo-se as principais conclusões obtidas com a execução deste estudo, sendo elencados possíveis desenvolvimentos futuros.

## **Capítulo 2**

---

## **Materiais**

## **Materiais**

- 2.1 Considerações gerais
- 2.2 Aço carbono
- 2.3 Aço inoxidável
- 2.4 Alumínio

## **2. MATERIAIS**

### **2.1 Considerações gerais**

O presente capítulo apresenta os três materiais que foram objeto de estudo nesta dissertação: o aço carbono, o aço inoxidável e o alumínio.

Quanto ao aço carbono, realçam-se as propriedades mecânicas do material, essenciais para a análise do seu comportamento à temperatura normal e ao fogo.

No que diz respeito ao aço inoxidável e alumínio, será apresentada uma descrição mais aprofundada das respectivas características.

### **2.2 Aço carbono**

#### **2.2.1 Características gerais**

Existem diferentes classes de aço carbono estrutural, em função das suas propriedades mecânicas, que podem ser obtidas através da Tabela 3.1 da Parte 1-1 do EC3. O aço carbono já é um material amplamente utilizado em engenharia civil para fins estruturais, dispondo de propriedades mecânicas necessárias para resistir a condições adversas. A Parte 1-1 do EC3 é dedicada ao dimensionamento de estruturas em aço carbono à temperatura normal e a Parte 1-2 do EC3 prescreve as regras para o seu dimensionamento ao fogo (CEN, 2005a, 2005b). As suas características estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do aço carbono.

	Aço carbono
Massa volúmica (100 kg/m <sup>3</sup> )	7.85
Módulo elástico (GPa)	190-210
Resistividade Elétrica (10 <sup>-9</sup> W m)	130-1250
Ponto de fusão (°C)	1426-1538
Coefficiente de Poisson	0.27-0.3
Calor específico (J/kg K)	450-2081
Tensão de rotura (MPa)	276-1882
Condutividade térmica (W/m K)	24.3-65.2
Expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /K)	11.0-16.6
Tensão de cedência (MPa)	186-758

### 2.2.2 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3

A curva tensão extensão à temperatura normal pode ser determinada através das fórmulas apresentadas na Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b). Como posteriormente será usado o programa SAFIR, decidiu-se usar esta parte do eurocódigo correspondente ao fogo, mas com as propriedades do material à temperatura normal. Obteve-se para um aço carbono de classe S235 a representação gráfica apresentada na Figura 1.

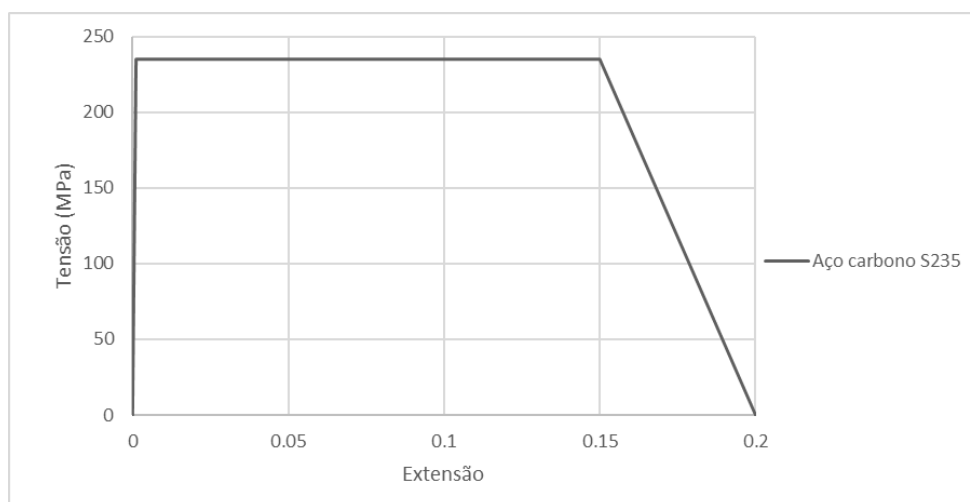


Figura 1 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço carbono S235 à temperatura ambiente.

### 2.2.3 Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas

A temperaturas elevadas o aço carbono sofre reduções significativas das suas propriedades mecânicas.

Para o cálculo em situação de incêndio, o valor da tensão de cedência do aço deverá ser considerado igual à tensão correspondente a uma extensão total de 2%, para classes de secção transversal até à classe 3, e o limite convencional de proporcionalidade 0.2% para classe 4.

Todas as classes de aço carbono possuem os mesmos valores de coeficiente de redução da tensão de cedência e da tensão limite de proporcionalidade em função da temperatura. Na Figura 2 apresenta-se o  $k_{E,\theta}$ ,  $k_{y,\theta}$ , e  $k_{p,\theta}$ .

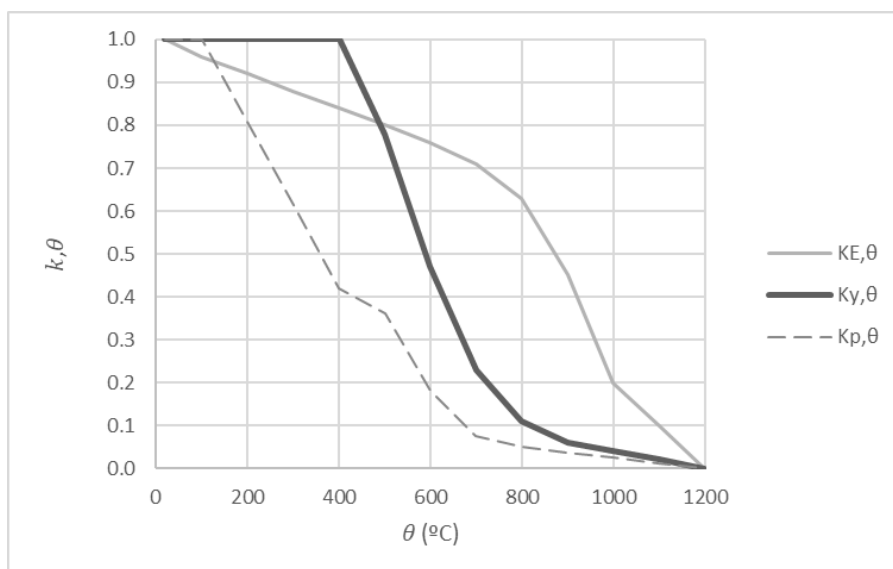


Figura 2 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do aço carbono.

A título de exemplo, a lei constitutiva do aço carbono de classe S235 a 600 °C é dado pela Figura 3.

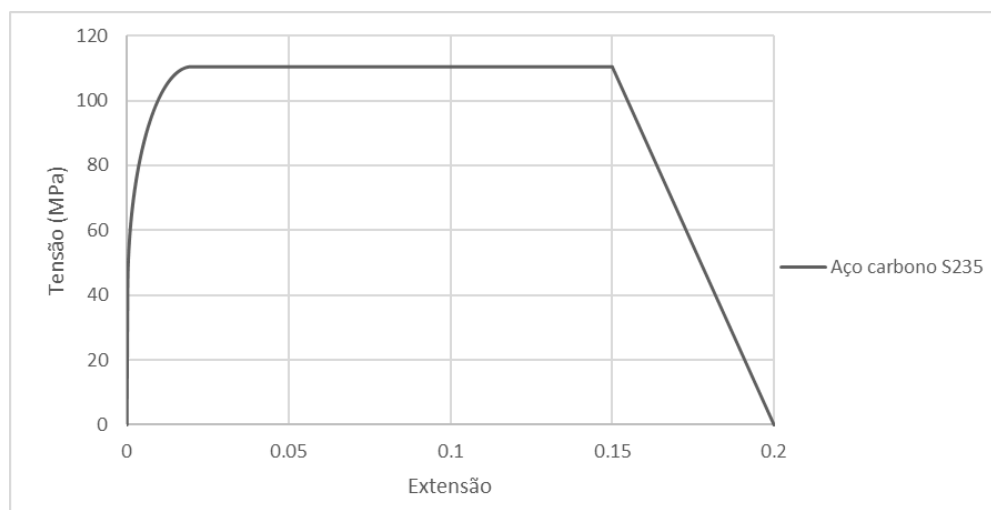


Figura 3 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço carbono de classe S235 a 600 °C.

O impacto da ação do fogo na capacidade dos elementos em aço é sabidamente prejudicial devido à perda de resistência e rigidez do aço com temperaturas elevadas (Vila Real, 2021). De facto, com o aumento da temperatura, verificam-se reduções da tensão de cedência e do módulo de elasticidade.

## 2.3 Aço inoxidável

### 2.3.1 História

O aço inoxidável surgiu no século XX, por desenvolvimento do inglês Harry Brearley. Inicialmente, o objetivo de Harry Brearley era criar um aço que seria usado em canos de armas para resistir a explosões internas de gases. Ao perceber que o aço por ele descoberto não respondia às expectativas exigidas para o pretendido, constatou que este possuía outras características que poderiam ser relevantes para outros usos. Assim, mudou o rumo da sua pesquisa e, após vários testes e estudos, chegou à combinação ideal de aço, com 12% de cromo, uma liga que possui uma melhor resistência à corrosão do que o aço carbono. Rapidamente se percebeu que o grande fator diferencial do aço inoxidável para o aço de carbono era a alta resistência à corrosão (Great Plains Stainless, 2018).

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro que possuem no mínimo 10.5% de cromo. Outros elementos posteriormente são adicionados melhorando as suas propriedades,



proporcionando que o aço inoxidável seja um dos melhores materiais para se aplicar na construção (Great Plains Stainless, 2018).

### 2.3.2 Vantagens e desvantagens do aço inoxidável

Começamos por apresentar as vantagens do aço inoxidável:

- **Alta resistência à corrosão**

Os aços inoxidáveis são geralmente muito resistentes à corrosão, podendo ser aplicados em estruturas localizadas em ambientes mais agressivos.

A resistência à corrosão depende muito dos elementos que o constituem, o que significa que cada classe tem uma resposta adequada ao ambiente corrosivo em que se encontra (Bhadeshia & Honeycombe, 2017).

- **Durabilidade**

O aço inoxidável tem uma durabilidade alta, é capaz de manter a sua resistência durante várias décadas através da sua camada protetora contra a corrosão. Esta camada garante que o clima não provoque uma corrosão do material levando à ferrugem (SCI, 2017).

- **Aparência estética**

O aço inoxidável tem vantagens estéticas únicas em comparação com outros materiais.

- **Baixo custo de manutenção**

Os aços inoxidáveis limpam-se facilmente e são ideais, sobretudo quando a sua manutenção e inspeção é difícil de efetuar.

- **Criatividade de aplicações**

As propriedades únicas que este material possui permitem uma considerável criatividade na aplicação do aço inoxidável, desde a fachada de edifícios modernos, a criações artísticas, e até mesmo em aplicações tão críticas como os reatores nucleares.

- **Reciclabilidade**

O metal é totalmente reciclável, facilitando o reaproveitamento. O aço inoxidável contém matérias primas valiosas como o cromo e níquel, tornando a reciclagem do aço inoxidável economicamente viável (ASSDA, 2020).

- **Resistência e Ductilidade**

As resistências mecânicas de algumas ligas de aço inoxidável podem ser substancialmente superiores à do aço carbono, dependendo do seu processo de fabrico. Além disso, o aço inoxidável possui uma ductilidade superior à do aço carbono, o que pode ser útil em aplicações com ações dinâmicas.

- **Comportamento a temperaturas elevadas**

O aço inoxidável apresenta um melhor comportamento ao fogo que o aço carbono, apresentando reduções inferiores da resistência e rigidez a temperaturas elevadas (CEN, 2006; Zhou *et al.*, 2020).

No entanto, o aço inoxidável apresenta também desvantagens como as que se apresentam de seguida.

- **Custo elevado do material**

Geralmente, o custo do material é tanto maior quanto o nível de resistência pretendido à corrosão (Sun *et al.*, 2020).

Para rentabilizar o preço elevado, é importante entender as características do aço inoxidável. Como todos os materiais de engenharia, deve ser corretamente especificado, projetado, fabricado, instalado e mantido.

- **Soldabilidade**

As ligas de aço inoxidável são consideradas soldáveis. Dependendo da liga de aço inoxidável, esta soldabilidade pode ser mais ou menos eficiente (SCI, 2017).

### **2.3.3 Casos de aplicação**

Apresentam-se, de seguida, alguns casos de aplicação do aço inoxidável em edifícios, listando-se aplicações não estruturais e em fachadas.

- **Empire State Building**

Um dos edifícios mais famosos do mundo com aplicação do aço inoxidável é o *Empire State Building*, em Nova York, representado na Figura 4. Foi construído há mais de 70 anos e demonstra muitas das características atraentes do aço inoxidável acima listadas (Nacheman, 2014).

Por mais de 40 anos, foi considerado o edifício mais alto. O *Empire State Building* tornou-se, ainda, o primeiro edifício a ter uma aplicação de parede externa de aço inoxidável e colunas de aço inoxidável adjacentes a cada janela que foram usadas como moldura e decoração. A única substituição do painel ocorreu como resultado da colisão de um bombardeiro de médio porte, da Força Aérea dos EUA, com o meio da lateral do prédio, durante uma forte neblina, em 1945, o que demonstra a durabilidade deste material.



a)

b)

Figura 4 - *Empire State Building*: a) enquadramento do edifício na cidade; b) colunas de aço inoxidável.

- **Edifício da Universidade de Lausanne, Suíça**

A Universidade de Lausanne apresenta uma fachada de vidro pré-fabricado e elementos de aço inoxidável. Todos os elementos da fachada foram totalmente produzidos na fábrica, transportados para o local e montados na estrutura principal, com a ajuda de fixações ajustáveis (Euro Inox, 2013).

Como observado na Figura 5, as folhas em aço inoxidável têm uma forma tridimensional, proporcionando, com a junção do vidro e do aço inoxidável, uma aparência apelativa com diversos reflexos.



*Figura 5 - Universidade de Lausanne.*

- **Edifício de escritórios em Hamburgo, Alemanha**

Na Figura 6 apresenta-se um edifício de escritórios em Hamburgo ligado a um edifício existente. O aço inoxidável tem grande formato de painéis, eles contrastam com o edifício existente e complementam-no ao mesmo tempo.

Mais uma vez, o contraste de aço inoxidável com o vidro provoca reflexões da luz solar conferindo à fachada uma grande elegância (Euro Inox, 2013).



*Figura 6 - Edifício de escritórios em Hamburgo.*

## 2.3.4 Propriedades mecânicas do aço inoxidável

### 2.3.4.1 Tipos de aço inoxidável

Os aços inoxidáveis são muitas vezes classificados segundo a sua microestrutura. A adição de elementos de liga modifica as suas propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão, sendo, assim, importante conhecer em detalhe o ambiente em que se pretende colocar o aço inoxidável, com vista à escolha mais adequada das classes de aço (SCI, 2017).

Na Tabela 2 é possível identificar os diferentes tipos de aço inoxidável, com as respetivas classificações de acordo com a norma EN 10088-1 (CEN, 2006b).

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados em aplicações estruturais. Porém, o aço inoxidável duplex possui uma maior resistência à corrosão.

Tabela 2 - Tipos de aço inoxidável.

Tipos de aço inoxidável	Classificação de acordo com a EN 10088
Ferríticos	1.4003, 1.4016, 1.4512
Austeníticos	1.4306, 1.4307, 1.4541, 1.4301, 1.4401, 1.4404, 1.4539, 1.4571, 1.4432, 1.4435, 1.4311, 1.4406, 1.4439, 1.4529, 1.4547, 1.4318
Austeníticos-ferríticos (duplex)	1.4362, 1.4462

Embora as famílias de aço inoxidável elencadas na tabela sejam as mais usadas, existem outras, os martensíticos e os endurecidos por precipitação, menos utilizados na construção (SCI, 2017).

Nos aços austeníticos, o cromo e o níquel são os principais elementos de liga. Apresentam uma boa resistência à corrosão e a sua resistência mecânica pode ser melhorada através da adição de azoto. A resistência mecânica está associada a uma elevada ductilidade, podendo suportar deformações maiores antes de ocorrer o colapso. Possui também uma excelente formabilidade e soldabilidade. Estas características fazem com que os aços austeníticos sejam os mais usados na construção civil.

Os aços inoxidáveis austenítico-ferríticos ou duplex, possuem aproximadamente a mesma quantidade de liga de austenite e ferrite. A austenite é responsável essencialmente pela boa resistência à corrosão e a ferrite pela melhor resistência mecânica. Quando comparado com o aço austenítico, o aço duplex possui uma resistência mecânica superior, uma soldabilidade equivalente e uma resistência à corrosão igual ou superior, apenas perde na formabilidade e ductilidade. Devido ao facto de possuir uma formabilidade inferior, torna-se mais difícil o seu manuseamento, daí necessitar de mais energia de fabrico e, por consequência, torna-se uma liga que pode custar até duas vezes mais do que o aço austenítico.

Nos aços ferríticos a percentagem de níquel é tão baixa que faz com que a sua estrutura atômica seja semelhante à do aço carbono, pelo que são uma solução mais barata com uma boa resistência mecânica, mas com uma resistência à corrosão inferior comparativamente com os aços austeníticos e duplex (Pinho, 2012). Além disso, são também menos dúcteis e têm menor soldabilidade. O problema da soldabilidade deve-se essencialmente ao facto de que quando ocorre a soldadura, a zona afetada pelo calor fica suscetível à corrosão intergranular e pode perder ductilidade. Devido a estes problemas, este tipo de aço não é normalmente usado para elementos estruturais.

Os aços martensíticos apesar de terem boas características de resistência mecânica, são menos dúcteis e mais suscetíveis a fendas do que os outros grupos de aço inoxidáveis descritos. A sua soldabilidade também é limitada e, por isso, são indicados para outros fins que não a construção civil.

Os aços endurecidos por precipitação são aços martensíticos sujeitos a um tratamento térmico que faz com que possuam alguma quantidade de níquel. Deste modo, têm melhor resistência à corrosão do que os aços martensíticos e são equivalentes aos austeníticos. Este tipo de aço é indicado para cabos, parafusos e até mesmo para a indústria aeroespacial.

Devido às características indicadas, os aços martensíticos e os endurecidos por precipitação não são normalmente usados na construção civil.

#### **2.3.4.2 Características gerais**

A utilização do aço inoxidável para fins estruturais tem vindo a aumentar por apresentar diversas vantagens relativamente ao aço carbono. Assim, o aço inoxidável pode tornar-se

uma solução competitiva e a Parte 1-4 do EC3 é a parte da norma europeia dedicada a este dimensionamento (CEN, 2006a). As suas características estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do aço inoxidável.

	Aços inoxidáveis
Massa volúmica (100 kg/m <sup>3</sup> )	7.75-8.10
Módulo elástico (GPa)	190-210
Resistividade Elétrica (10 <sup>-9</sup> W m)	75.7-1020.0
Ponto de fusão (°C)	1371-1454
Coefficiente de Poisson	0.27-0.30
Calor específico (J/kg K)	420-500
Tensão de rotura (MPa)	515-827
Condutividade térmica (W/m K)	11.3-36.7
Expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /K)	9.0-20.7
Tensão de cedência (MPa)	207-552

O aço inoxidável tem um comportamento sempre não-linear, sem a existência de um patamar de cedência, ao contrário do aço carbono que tem um comportamento elástico-linear até atingir o patamar de cedência.

A sua tensão de cedência é bastante apelativa para uso estrutural e o facto de ter um excelente comportamento à corrosão permite com que seja usado em ambientes mais agressivos (Sun *et al.*, 2020).

Como já referido, a resistência ao fogo também é superior a outros materiais, como por exemplo o aço de carbono ou o alumínio. Em fachadas, a resistência ao fogo também tem sido cada vez mais importante.

### 2.3.4.3 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 3

A curva tensão extensão à temperatura normal pode ser determinada através das seguintes fórmulas da parte 1-4 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a):

Quando:  $\sigma \leq f_y$

$$f = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^n \quad (1)$$

Quando:  $f_y < \sigma < f_u$

$$\varepsilon = 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left( \frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m \quad (2)$$

Em que,

$\sigma$ , tensão longitudinal;

$E_y$ , módulo de elasticidade tangente da curva tensão-extensão definida por:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0.002 n \frac{E}{f_y}}; \quad (3)$$

$n$ , coeficiente que pode ser determinado a partir da Tabela 4.1 da Parte 1-4 do EC3;

$\varepsilon_u$ , extensão em estado limite último, correspondente à tensão última  $f_u$ . Pode ser obtido através da aproximação:  $\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$ , mas  $\varepsilon_u \leq A$  quando  $A$ , é o alongamento após a fratura definida em EN10088-2 (CEN, 2005c);

$m$ , é o coeficiente determinado por:

$$m = 1 + 3.5 \frac{f_y}{f_u}. \quad (4)$$

Na Figura 7 é apresentada a lei constitutiva do aço inoxidável austenítico 1.4301 por ser o mais usual para construções estruturais.

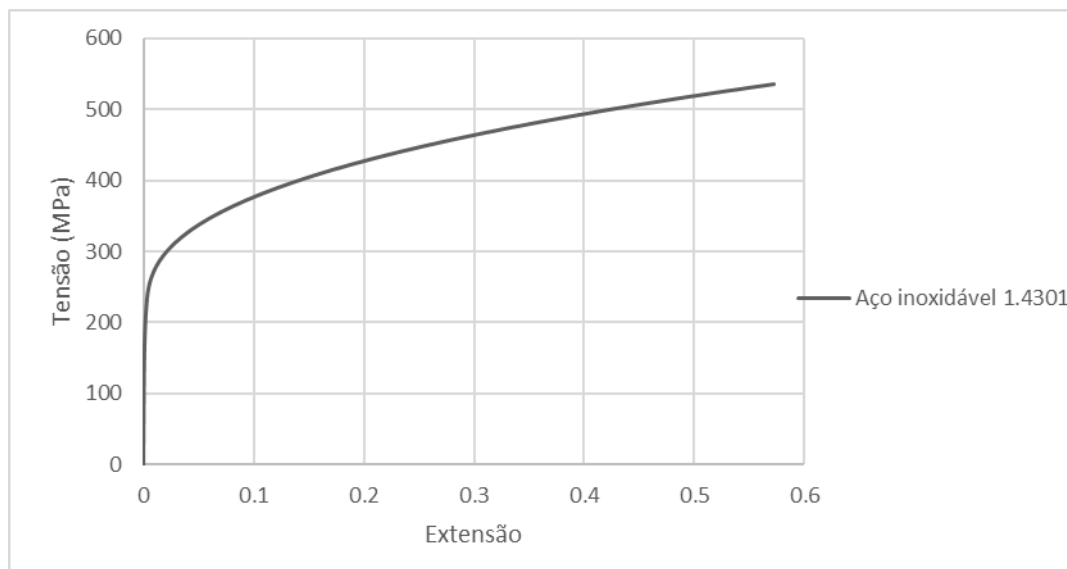


Figura 7 - Representação gráfica da curva constitutiva do aço inoxidável austenítico 1.4301.



O aço inoxidável possui um comportamento não linear sem que se verifique uma extensão de cedência bem definida. Esta é a principal diferença em relação ao aço carbono. O aço inoxidável, por sua vez, não possui uma tensão de cedência bem definida, por isso, utiliza-se o limite convencional de proporcionalidade de 0.2%. Como ocorre num comportamento não linear, a sua tensão de cedência ocorre enquanto está a acontecer o endurecimento por deformação (SCI, 2017).

#### 2.3.4.4 Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas

A temperaturas elevadas o aço inoxidável sofre reduções significativas das suas propriedades mecânicas, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas do aço inoxidável 1.4301.

Temperatura do aço	Fator para a determinação da tensão de cedência $f_{y,\theta}$	$f_{y,\theta}$
	$k_{2,\theta}$	
20.0	1.4	290.6
100.0	1.1	239.4
200.0	0.9	191.7
300.0	0.9	181.0
400.0	0.8	173.2
500.0	0.8	158.1
600.0	0.7	146.6
700.0	0.6	120.3
800.0	0.4	86.0
900.0	0.2	47.9
1000.0	0.1	22.1
1100.0	0.0	10.0
1200.0	0.0	0.0

Na Figura 8 apresenta-se o  $k_{E,\theta}$  que é a razão de  $\frac{f_{y,\theta}}{f_y}$  para as classes de aço inoxidável a temperaturas elevadas, assim como o  $k_{2,\theta}$ .

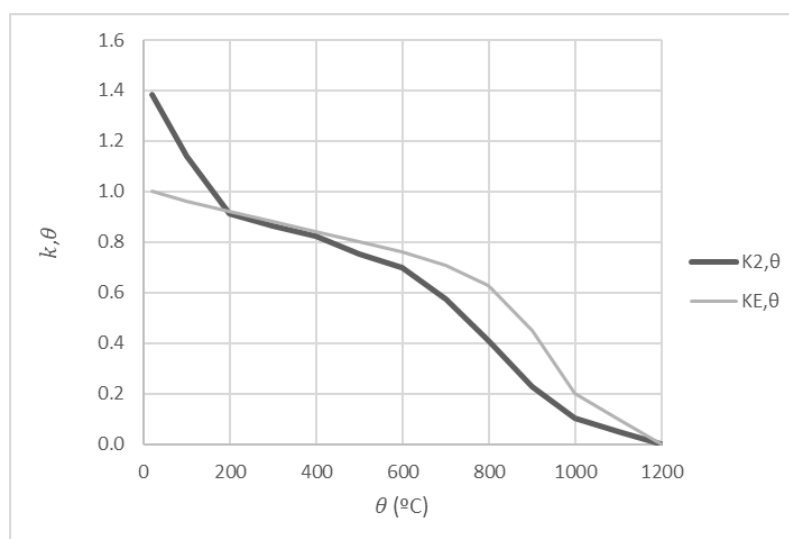


Figura 8 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do aço inoxidável.

Todas as classes de aço inoxidável possuem os mesmos valores de coeficiente de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura. A lei constitutiva a 600 °C do aço 1.4301 é apresentada pela Figura 9.

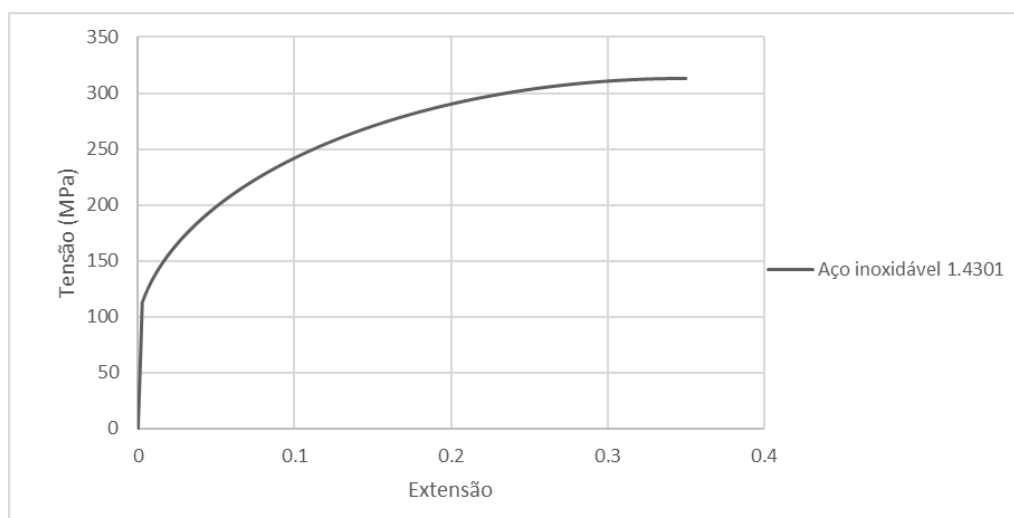


Figura 9 - Representação gráfica da lei constitutiva do aço inoxidável austenítico 1.4301 a 600 °C.

O aço inoxidável possui melhores propriedades térmicas e mecânicas quando comparado com o aço carbono. As maiores diferenças entre estes dois materiais são

evidenciadas nas propriedades mecânicas, quando o fator de redução do módulo de elasticidade a altas temperaturas é maior no aço inoxidável, sendo o módulo de elasticidade igual em algumas classes do aço inoxidável. A redução da tensão de cedência do aço inoxidável é menor do que a do aço carbono, o que o faz ter uma maior resistência ao fogo (Lopes, 2009).

## 2.4 Alumínio

### 2.4.1 História

O alumínio representa um dos metais não ferrosos mais abundantes do planeta Terra. Este tem sido utilizado desde o fim do século XIX até aos dias que decorrem (Associação Brasileira do Alumínio, 2019).

O alumínio, ao longo dos tempos, passou por uma evolução constante através da substituição de elementos químicos. Vários cientistas tiveram um contributo para o alumínio metálico que existe nos dias de hoje. Acredita-se que em 1825 o alumínio metálico foi descoberto por Hans Christian Ørsted. Inicialmente, foi desenvolvido através do aquecimento de cloreto de alumínio, com uma mistura de potássio, destilando-o com mercúrio. Posteriormente, houve várias evoluções até à atualidade (Aluminium Leader, 2020).

Hoje já não encontramos o alumínio apenas em caixilharias, o material também tem sido usado a nível estrutural como é o caso de estruturas secundárias ou estruturas temporárias de eventos (Associação Portuguesa do Alumínio, 2016; Pinto, 2013).

### 2.4.2 Vantagens e desvantagens do alumínio

O material de liga de alumínio possui propriedades interessantes que fazem com que seja cada vez mais utilizado no setor da construção, aliado ao facto de ser uma opção mais económica. As propriedades que o caracterizam são as seguintes:

- **Alta relação resistência-peso**

A excelente combinação entre leveza e resistência permite uma redução do peso estrutural total (Sillekens *et al.*, 2014).

- **Facilidade de fabricação**

É um material facilmente moldável, permitindo todo o tipo de fabricação, desde laminado, forjado, prensado, dobrado, serrado, furado, entre outros.

- **Alto grau de trabalhabilidade**

Outra das principais vantagens do alumínio é sua trabalhabilidade, podendo ser extrudado em formas ilimitadas para qualquer tipo de aplicação.

- **Considerável ductilidade**

Possuindo uma fase plástica, antes da rotura ainda possui uma deformação considerável (Palanivendhan *et al.*, 2020).

- **Excelente condutividade térmica**

O alumínio, devido à sua estrutura molecular, possui uma alta condutibilidade térmica, cerca de 4,5 vezes maior que a do aço (Chakrapani & Suryakumari, 2020).

- **Alta resistência à corrosão**

É um material extremamente reativo e, em contato com o ar, reage instantaneamente formando uma película de óxido sobre sua superfície. Apesar da sua reatividade, possui uma destacada resistência à corrosão, tornando-os adequados para aplicações em ambientes mais agressivos sem proteção de superfície (Vargel, 2020).

- **Aparência**

Possui uma aparência atraente, tornando-se uma tendência na arquitetura (Associação Portuguesa do Alumínio, 2016).

- **Versatilidade**

A facilidade de extrusão torna as ligas de alumínio um material estrutural versátil, permitindo a produção de perfis transversais complexos. Por vezes, é adequado para estruturas em que o aço e o betão não são uma solução ideal.

- **Facilidade de manuseamento**

O facto de ser um material leve permite que possa ser transportado com facilidade.

- **Baixo custo de manutenção**

O alumínio possui uma grande longevidade devido à resistência à corrosão, por consequência, o seu custo de manutenção também é baixo (Samal *et al.*, 2020).

Embora o alumínio tenha as características vantajosas acima mencionadas, pode admitir-se que a entrada do alumínio na Engenharia Estrutural não foi um processo fácil. É necessário estudar aspetos particulares que este material traz, como a significativa deformabilidade e consequente encurvadura, sensibilidade à fadiga, alongamentos de perfis devido à variação de temperatura e muitos outros (Wang *et al.*, 2021).

Há ainda características físicas e químicas que fazem com que este material tenha desvantagens a nível estrutural, comparativamente com os materiais em estruturas mais comuns:

- **Maior custo na relação por unidade de peso**

Esta característica torna necessário que o projetista escolha uma secção otimizada de forma a diminuir os desperdícios.

- **Modulo de elasticidade reduzido**

O modulo de elasticidade é cerca de 70 GPa, significativamente inferior à do aço, pelo que faz com que as peças de alumínio tenham uma rigidez inferior (Jiang *et al.*, 2018).

- **Menor resistência ao fogo**

Para ligas de alumínio, esta degradação permanente pode ser o resultado de temperaturas de superfície tão baixas quanto 200 °C durante eventos de incêndio (Jiang *et al.*, 2018).

Deve-se ter especial atenção nas soldaduras, pois a resistência na vizinhança da região soldada diminui drasticamente. Este fator não pode ser negligenciado durante o projeto.

### 2.4.3 Casos de aplicação

Neste ponto apresentam-se algumas aplicações de estruturas de alumínio, que englobam fachadas ou estruturas de coberturas.

- **Ferrari World, Abu Dhabi**

No centro do primeiro parque temático da Ferrari do mundo, localizado na Ilha Yas, em Abu Dhabi, está o icónico telhado vermelho do maior parque coberto do mundo, *Ferrari World*. Este é a maior cobertura em alumínio do mundo, como observado na Figura 10 (Aluminium Leader, 2020).



Figura 10 - Ferrari World.

- **Metropolitan Tower**

O *Metropolitan Tower* é um edifício de 67 andares, que contém a primeira fachada estrutural do tipo “*Curtain Wall*”, na cidade de Nova York. Em 1985, quando foi construído, era o edifício residencial mais alto da cidade e a sexta estrutura de betão mais alta no mundo (An *et al.*, 2020).

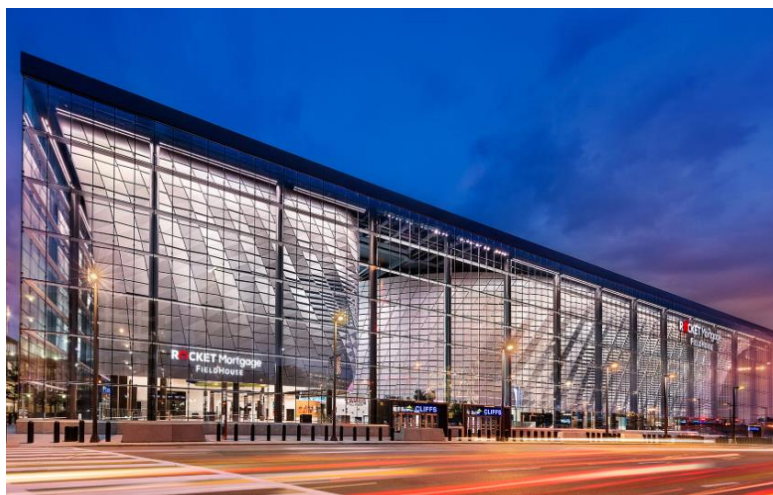
Possui 70.000 painéis de vidro isolante em esquadria de alumínio extrudado, cuja principal contrapartida eram as chuvas ácidas. Contudo, as juntas de silicone estrutural na fachada tipo cortina de vidro do *Metropolitan Tower* permanecem firmemente resistentes aos seus efeitos degradantes, como podemos observar na Figura 11.



Figura 11 - Metropolitan Tower.

- ***Rocket Mortgage Fieldhouse***

A Figura 12 mostra a fachada “*Curtain Wall*” em alumínio, com alguns elementos em aço que foi realizada para renovar a *Cleveland Cavaliers Arena*, situa-se em Cleveland, Ohio, nos EUA. O vidro envolve três lados do edifício, tem 267 m de comprimento no total e aproximadamente 24 m de altura. Através do *Novum Edge Clamped Glazing System*, foi possível aumentar a área da transparência (Novum, 2020).



*Figura 12 - Rocket Mortgage Fieldhouse.*

## **2.4.4 Propriedades mecânicas do alumínio**

### ***2.4.4.1 Identificação das ligas de alumínio***

O alumínio no estado puro não pode ser usado a nível estrutural, pois não possui resistência necessária para essa finalidade. A sua “ligação” a outros elementos provoca uma eficiente resistência mecânica para diversos usos. Assim, formam-se as ligas de alumínio que já possuem a resistência necessária para responderem ao que a estrutura necessita (Poojitha *et al.*, 2019).

Para que estas se distingam com facilidade, existe uma classificação universal das ligas de alumínio. As ligas de alumínio são divididas em dois grupos, as tratáveis termicamente e as que não são tratáveis termicamente. Para isso, existe uma agrupação através de um sistema numérico de 4 dígitos, em 8 séries.

Existem dois tipos de tratamentos têmpera: o térmico (HT) ou não térmico (NHT). Como descrito na Tabela 5, as ligas tratáveis termicamente são das séries 2XXX, 6XXX e

7XXX. Por outro lado, as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX são as não tratáveis termicamente.

As características das diferentes ligas de alumínio podem ser observadas na Tabela 5.

*Tabela 5 - Ligas de alumínio.*

<b>Designação</b>	<b>Constituintes</b>	<b>Tipo de têmpera</b>
<b>1XXX</b>	Alumínio com 99% de pureza mínima	NHT
<b>2XXX</b>	Cobre	HT
<b>3XXX</b>	Silício, Cobre e/ou Magnésio	NHT
<b>4XXX</b>	Silício	NHT
<b>5XXX</b>	Magnésio	NHT
<b>6XXX</b>	Magnésio e Silício	HT
<b>7XXX</b>	Zinco	HT
<b>8XXX</b>	Outros elementos	-

Algumas das aplicações comuns para estas ligas são as seguintes:

- Série 1XXX: Equipamentos de indústria química;
- Série 2XXX: Componentes com elevada relação resistência/peso, sujeitos a temperaturas inferiores a 130°C;
- Série 3XXX: Utensílios de cozinha;
- Série 4XXX: Uso em arquitetura e construção civil;
- Série 5XXX: Suportes para iluminação pública;
- Série 6XXX: Quadros de bicicletas;
- Série 7XXX: Componentes da indústria aeronáutica como estruturas, peças móveis e componentes de alta resistência.

#### **2.4.4.2 Características gerais**

O aparecimento do Eurocódigo 9 globalizou as normas para os projetistas, apresentando um conjunto de regras único e completo, tornando mais intuitivo o dimensionamento de estruturas em alumínio. Este foi, também, um fator importante para o uso do alumínio nas estruturas (CEN, 2007a).

Através da Tabela 6 apresentam-se as propriedades mecânicas do alumínio, sendo um material pouco denso, tem uma excelente combinação entre leveza e resistência.



Tabela 6 - Características do alumínio.

	<b>Alumínio</b>
<b>Massa volúmica (100 kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,6-2,8
<b>Módulo elástico (GPa)</b>	70
<b>Resistividade Elétrica (10<sup>-9</sup> W m)</b>	28,2
<b>Ponto de fusão (°C)</b>	660
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,33
<b>Calor específico (J/kg K)</b>	938
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	230-570
<b>Condutividade térmica (W/m K)</b>	150-180
<b>Expansão térmica (10<sup>-6</sup> /K)</b>	20,4-25
<b>Tensão de cedência (MPa)</b>	215-505

O alumínio tem um módulo de elasticidade de 70 GPa, com a adição de outros materiais pode chegar até 75 GPa. Esta propriedade fornece ao alumínio a capacidade de amortecer os esforços e reduz as tensões provocadas pela variação da temperatura (ABAL, 2013).

O alumínio possui um módulo de elasticidade relativamente pequeno comparativamente com o aço, o que torna este material menos rígido e permite rotações nos apoios. Além disso, por ter uma tensão de cedência baixa, é mais suscetível a deformações, encurvadura lateral e deslocamentos. Para contrariar estes efeitos, é necessário ter um dimensionamento mais rigoroso (Liu *et al.*, 2015).

O seu baixo ponto de fusão faz com que seja usado em diversas aplicações, especialmente na aeronáutica (Totten e MacKenzie, 2003).

No alumínio, as altas temperaturas provocam uma rápida redução das resistências mecânicas (Maljaars *et al.*, 2009).

#### **2.4.4.3 Lei constitutiva segundo o Eurocódigo 9**

A liga de alumínio que irá ser analisada nesta secção é a 6060-T6, que é uma das possibilidades para se usar em montantes de fachadas. Esta liga de alumínio possui uma tensão de cedência no limite convencional de elasticidade de 140 MPa e a sua tensão última é de 170 MPa. Esta liga é bastante usada, pois pode ser extrudada com alguma facilidade.

A Parte 1-1 do EC9 possibilita a utilização de diferentes modelos para a definição da lei constitutiva do alumínio, de que são exemplos os dois modelos que se apresentam de seguida (CEN, 2007a).

- **Modelo contínuo A na forma de  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$**

No modelo contínuo é assumido que  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , identificando três regiões distintas. A região 1 tem comportamento elástico, a região 2 tem comportamento inelástico, e a região 3 representa o endurecimento (CEN, 2007a).

Região 1 quando:  $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p$ , em que  $\varepsilon_p = 0.5\bar{\varepsilon}_e$  e  $\bar{\varepsilon}_e = f_e / E$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

Região 2 quando:  $\varepsilon_p \leq \varepsilon \leq 1.5\bar{\varepsilon}_e$

$$\sigma = f_e \left[ -0.2 + 1.85 \left( \frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e} \right)^2 + 0.2 \left( \frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Região 3 quando:  $1.5\bar{\varepsilon}_e < \varepsilon < \varepsilon_{max}$

$$\sigma = f_e \left[ \frac{f_{max}}{f_e} - 1.5 \left( \frac{f_{max}}{f_e} - 1 \right) \left( \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\varepsilon} \right) \right] \quad (7)$$

Em que,

$\sigma$ , tensão longitudinal;

$E$ , módulo de elasticidade;

$f_e$ , limite convencional de elasticidade =  $f_0$ ;

$f_{max}$ , tensão máxima =  $f_u$ , tensão última;

$\varepsilon_e$ , extensão correspondente à tensão  $f_e$ ;

- **Modelo contínuo B na forma de  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$**

O EC9 prevê também a utilização alternativa de uma lei Ramberg-Osgood, dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_0} \right)^n \quad (8)$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade na origem,  $n$  o fator de endurecimento, e  $f_0$  o limite convencional de elasticidade.

Na zona elástica,

$$n = \frac{\ln(0.000001 / 0.002)}{\ln(f_p / f_0)} \quad (9)$$

Em que,

$f_p$ , limite proporcional de elasticidade dado por:

Quando  $f_{0,2} > 160 \text{ N/mm}^2$ :

$$f_p = f_{0,2} - 2 \sqrt{10 * f_{0,2} (N / \text{mm}^2)} \quad (10)$$

Quando  $f_{0,2} \leq 160 \text{ N/mm}^2$ :

$$f_p = f_{0,2} / 2 \quad (11)$$

Na zona plástica,

$$n = \frac{\ln(0.002 / \varepsilon_u)}{\ln(f_0 / f_u)} \quad (12)$$

Em que,

$\varepsilon_u$ , extensão última, dada por:

Quando  $f_0 < 400 \text{ N/mm}^2$ :

$$\varepsilon_u = 0.30 - 0.22 * \frac{f_0 (N/\text{mm}^2)}{400} \quad (13)$$

Quando  $f_0 \geq 400 \text{ N/mm}^2$ :

$$\varepsilon_u = 0.08 \quad (14)$$

Na Figura 13 é possível observar a representação gráfica da curva constitutiva da liga de alumínio 6060-T6. Para a definição destas curvas foram adotados os dois modelos descritos anteriormente.

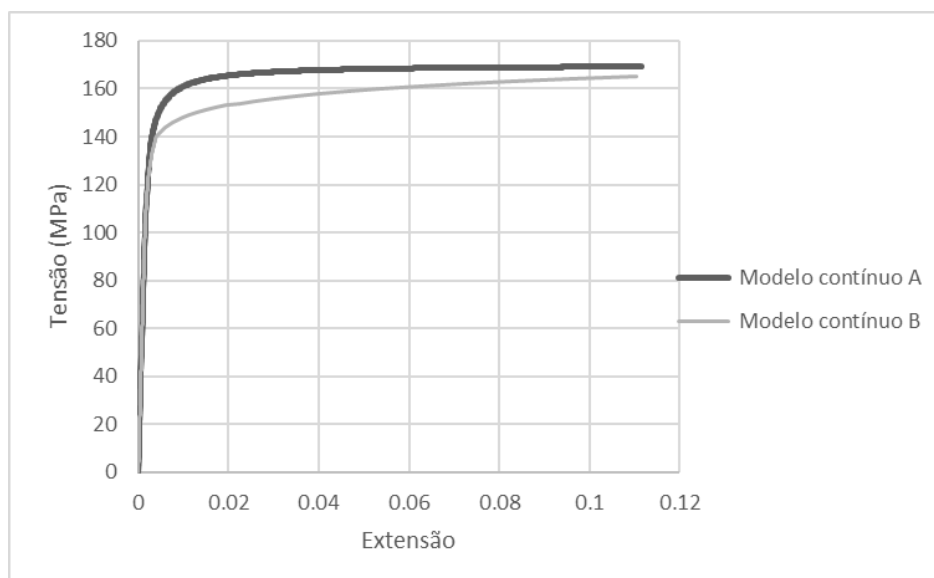


Figura 13 - Representação gráfica da curva constitutiva da liga 6060-T6.

Para a determinação da tensão de cedência considera-se o limite convencional de proporcionalidade a 0.2 %, normalmente designado por  $f_0$ , e a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.1% designa-se por  $f_p$  (CEN, 2007a).

O EC9 define o material conforme duas classes de encurvadura, podendo ser de classe A e a B. Um material pertence à classe A se  $f_p$  for próximo de  $f_0$ , por outro lado, o inverso indica que o material pertence à classe B.

Quando os materiais tiverem um valor de  $f_0$  menor ou igual a 230 MPa, são classificados de B, com exceção de algumas ligas da série 6XXX. Todas as outras ligas com uma tensão de cedência superior a 230 MPa, são consideradas como classe A.

O comportamento inicial do material é linear elástico e é definido como uma tensão relativamente baixa,  $f_{0,01}$ , que corresponde a uma deformação de 0,01%. Após este ponto, o material exhibe comportamento elástico não linear até à tensão de  $f_0$  (CEN, 2007a).

A partir de  $f_0$ , é possível verificar que ocorre um pequeno endurecimento por deformação até ocorrer a tensão última.

Fazendo um paralelismo com o aço de carbono, este, na parte elástica, comporta-se de forma semelhante ao alumínio. No entanto, como o módulo de elasticidade é maior, torna-se mais rígido.

A opção por diferentes tipos de ligas de alumínio para diferentes perspectivas, depende do modo como se pretende que a estrutura se comporte. Se, por um lado, temos o grau de alumínio 6082-T6 que traz uma ductilidade maior, por outro lado, apresenta uma tensão de cedência inferior, por exemplo ao 7108-T7, tendo uma ductilidade menor associada. Estes comportamentos exigem análise cuidadosa para a definição da liga a utilizar (Georgantzia *et al.*, 2021).

A ductilidade descrita é definida através do alongamento, ou seja, o alongamento é expresso em percentagem relativamente ao comprimento original. Quanto mais fina é a peça, menor é a ductilidade (ABAL, 2013).

#### 2.4.4.4 *Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas*

O alumínio praticamente não resiste a temperaturas elevadas. Com podemos observar na Tabela 7, verifica-se que com o aumento das temperaturas, o seu módulo de elasticidade reduz de forma abrupta, não apresentando rigidez a temperaturas comuns provocadas por incêndios (CEN, 2007b).

*Tabela 7 - Módulo de elasticidade do alumínio a temperaturas elevadas e tensão de cedência para a liga 6060-T6.*

Temperatura das ligas de alumínio (°C)	Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )	Limite convencional de elasticidade de 0.2 % a temperaturas elevadas $f_{0,0}$
20	70 000	140
50	69 300	-
100	67 900	127.4
150	65 100	117.6
200	60 200	99.4
250	54 600	53.2
300	47 600	26.6
350	37 800	12.6
400	28 000	-
550	0	0

Na Figura 14 apresenta-se  $E$  como razão de  $E_{al,\theta}/E_{al}$  para as ligas de alumínio 6XXX a temperaturas elevadas, assim como o fator de redução da resistência para uma extensão de 0.2 % a temperatura elevada  $k_{0,2}$ . O  $k_{0,2}$  usado corresponde a ligas de alumínio expostas ao fogo até duas horas e estes valores são obtidos pela Parte 1-2 do EC9 (CEN, 2007b).

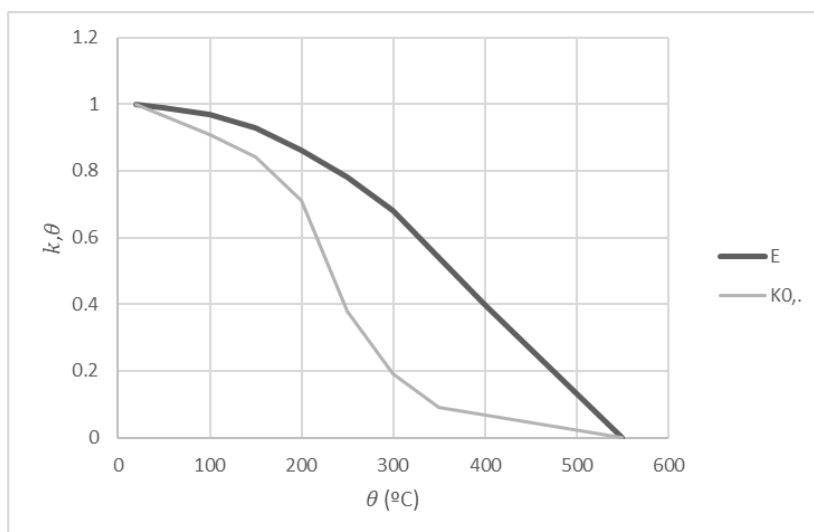


Figura 14 - Representação gráfica dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura do alumínio.

## **Capítulo 3**

---

# **Resistência estrutural à temperatura normal**

## **Resistência estrutural à temperatura normal**

- 3.1 Considerações gerais
- 3.2 Metodologia de cálculo para elementos em aço carbono
- 3.2 Metodologia de cálculo para elementos em aço inoxidável
- 3.3 Metodologia de cálculo para elementos em alumínio



## 3 RESISTÊNCIA ESTRUTURAL À TEMPERATURA NORMAL

### 3.1 Considerações gerais

Neste capítulo, pretende-se apresentar as metodologias de cálculo da resistência estrutural dos três materiais em estudo, aço carbono, aço inoxidável e alumínio.

Nas fachadas tradicionais, geralmente, o material responsável pela resistência estrutural é o aço da fachada. Embora a secção que suporta o vidro seja em alumínio, é o perfil de aço que dá rigidez ao montante, estando a secção de alumínio aparafusada à estrutura em aço.

Apresentam-se, ainda, as fórmulas do aço inoxidável e a aplicação deste material como alternativa ao aço carbono, avaliando o seu comportamento em situações em que este material possa ser uma opção interessante.

Para que o alumínio seja uma alternativa a nível estrutural, é necessário que os membros de liga de alumínio sejam convenientemente extrudados em diferentes perfis, para atender aos requisitos de construção, tal como acontece nas fachadas do tipo “*Curtain Wall*”.

### 3.2 Metodologia de cálculo para elementos em aço carbono

A metodologia de cálculo usada em estruturas de aço é feita de acordo com a Parte 1-1 do EC3. Este subcapítulo centrar-se-á na apresentação das regras de cálculo para a resistência da secção transversal e a resistência à encurvadura de elementos.

Em cada avaliação da resistência, as ações atuantes devem ser inferiores às ações resistentes, porque nenhum estado de limite pode ser excedido. Para isso, é necessário considerar todas as cargas aplicadas para um correto dimensionamento da estabilidade da estrutura e das deformações máximas admissíveis.

O primeiro passo será identificar a classe de secção transversal, definida de acordo com a resistência e a capacidade de rotação. A determinação da classe transversal é particularmente importante, pois essa escolha reflete-se nas expressões a usar para o dimensionamento de vigas-coluna (CEN, 2005a).

Os coeficientes parciais de segurança  $\gamma_{Mi}$  recomendados, são dados por:

$$\gamma_{M0} = 1.00;$$

$$\gamma_{M1} = 1.00;$$

$$\gamma_{M2} = 1.25.$$

### **3.2.1 Classificação da secção transversal**

Existem 4 classes de secção transversal de acordo com o EC3 e o EC9 (CEN, 2005a, 2007a). Estas classes são divididas da mesma forma para os três diferentes materiais em análise, sendo:

- **Classe 1**

Corresponde às secções que podem formar rótulas plásticas, com capacidade de rotação que permita assumir um comportamento plástico sem redução da resistência.

- **Classe 2**

Corresponde às secções que podem atingir o momento plástico resistente, mas com capacidade de rotação limitada.

- **Classe 3**

Corresponde às secções em que fibra extrema mais comprimida pode atingir a tensão de cedência. Contudo, o fenómeno de encurvadura local impede o desenvolvimento do momento resistente plástico, sem capacidade para atingir a plastificação.

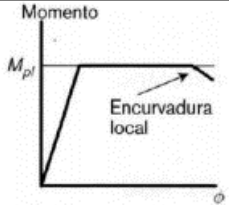
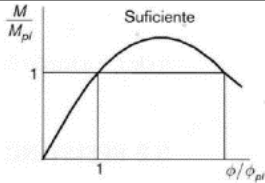
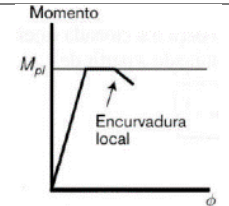
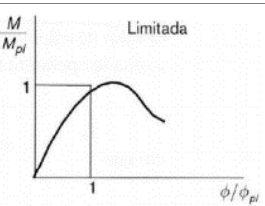
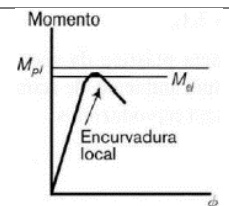
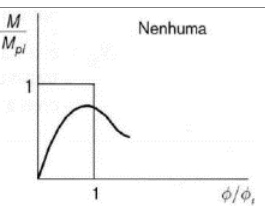
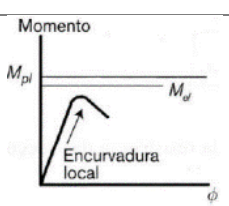
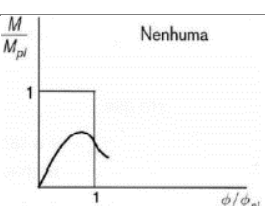
- **Classe 4**

Corresponde às secções em que o fenómeno de encurvadura local se dá antes de atingir a tensão de cedência, onde as fibras extremas se encontram em regime elástico antes da perda de capacidade resistente.

As classes são catalogadas segundo os valores limites para a esbelteza, ou seja, a relação de dimensões entre comprimento e espessura. Para o aço carbono, estas relações podem ser obtidas na Tabela 5.2 da Parte 1-1 do EC3 (CEN, 2005a).

Na Tabela 8 é apresentada a classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação.

Tabela 8 - Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação (Vila Real, 2003).

Modelo de Comportamento	Momento Resistente	Capacidade de Rotação	Classe
	Momento plástico na secção transversal	 <p>Suficiente</p>	1
	Momento plástico na secção transversal	 <p>Limitada</p>	2
	Momento plástico na secção transversal	 <p>Nenhuma</p>	3
	Momento plástico na secção transversal	 <p>Nenhuma</p>	4

### 3.2.2 Resistência da secção transversal

Apresenta-se o comportamento da resistência da secção quando esta está a ser submetida a esforço axial, momento fletor e flexão composta (N+My).

- **Compressão**

A secção transversal está sujeita a um esforço axial de compressão e a sua resistência é verificada quando:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{C,Rd}} \leq 1.0 \quad (15)$$

Em que,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do esforço axial atuante;

$N_{C,Rd}$ , valor de cálculo do esforço de compressão resistente.

Se o  $N_{C,Rd}$  for de classe 1,2,3 é usado a seguinte expressão:

$$N_{C,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

No caso de ser de classe 4, devido à possibilidade de encurvadura local é necessário usar uma área efetiva ( $A_{eff}$ ), obtendo:

$$N_{C,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (17)$$

- **Flexão simples**

A secção transversal também está sujeita a flexão simples segundo o eixo mais forte (My), a verificação é dada por:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{C,Rd}} \leq 1.0 \quad (18)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{C,Rd}$ , valor de cálculo do momento fletor resistente por compressão.

No caso de a secção pertencer às classes 1 ou 2, o momento resistente é o momento plástico da secção, considerando o módulo de flexão plástico ( $w_{pl}$ ), por isso:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{w_{pl} f_y}{\gamma_{M_0}} \quad (19)$$

Se a secção for de classe 3, o momento resistente é o momento elástico da secção, considerando o módulo de flexão elástico, obtendo:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{w_{el,min} f_y}{\gamma_{M_0}} \quad (20)$$

Por último, no caso de a secção pertencer à classe 4, para determinar o momento resistente da secção considera-se o módulo de flexão efetivo ( $w_{eff,min}$ ), obtendo:

$$M_{c,Rd} = \frac{w_{eff,min} f_y}{\gamma_{M_0}} \quad (21)$$

$w_{eff,min}$  é dado por:

$$w_{eff,min} = \min(w_{eff,sup}; w_{eff,inf}) \quad (22)$$

$$w_{eff,sup} = \frac{l_{eff,y}}{v_s} \quad (23)$$

$$w_{eff,inf} = \frac{l_{eff,y}}{v_i} \quad (24)$$

Através da secção efetiva é possível obter o coeficiente  $l_{eff,y}$ , correspondente à inércia efetiva segundo o eixo  $yy$ . O coeficiente  $v_s$  representa a distâncias desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo superior, enquanto  $v_i$  representa a distâncias desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo inferior.

- **Flexão composta**

Relativamente a perfis submetidos, a flexão composta com flexão no eixo forte (N+My), deve considerar as várias etapas que serão descritas em seguida.

Para as classes 1 e 2 da secção transversal, em secções retangulares sólidas o seguinte critério deve ser verificado:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (25)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{N,Rd}$ , valor resistente do momento plástico reduzido pelo esforço axial  $N_{Ed}$ , dado pela seguinte expressão:

$$M_{N,Rd} = M_{Pl,Rd} [1 - (N_{Ed} / N_{pL,Rd})^2] \quad (26)$$

$N_{pL,Rd}$ , valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta

Para a classe 3, a tensão longitudinal deve satisfazer o seguinte critério:

$$\sigma_{\kappa,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (27)$$

Por fim, para a classe 4, a tensão longitudinal deve satisfazer o seguinte critério:

$$\sigma_{\kappa,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (28)$$

Onde,

$\sigma_{\kappa,Ed}$ , tensão longitudinal local devido ao momento e ao esforço axial

Como alternativa à expressão 28, para a classe 4, o seguinte critério deve ser verificado

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{w_{eff,y,min} f_y} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{w_{eff,z,min} f_y} \leq 1 \quad (29)$$

Onde,

$e_N$ , afastamento entre os centros de gravidade da área efetiva ( $A_{eff}$ ) e da área bruta da secção transversal quando esta está sujeita apenas à compressão.

### 3.2.3 Resistência do elemento

Apresenta-se o comportamento da resistência do elemento quando este está a ser submetida a esforço axial, momento fletor e flexão composta (N+My).

- **Elemento à compressão**

Num elemento sujeito a esforço axial de compressão, a sua resistência à encurvadura pode ser obtida de acordo com a seguinte verificação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (30)$$

Em que,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do esforço axial de compressão;

$N_{b,Rd}$ , valor de cálculo do esforço de compressão resistente à encurvadura.

Se o  $N_{b,Rd}$  for de classe 1,2,3 é usado a seguinte expressão:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (31)$$

Se, por outro lado, for de classe 4, é necessário usar uma área efetiva ( $A_{eff}$ ) devido à possibilidade de encurvadura local, obtendo:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (32)$$

Em que,

$\chi$ , fator de redução relevante para a encurvadura.

Este fator de redução é considerado para prevenir vários fatores que alteram a resistência de um certo elemento, como por exemplo as tensões residuais. O fator de redução à compressão é dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}; \chi \leq 1.0 \quad (33)$$

Onde,

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (34)$$

E,

Para secções de classe 1,2,3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{CR}}} \quad (35)$$

Para secções de classe 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{CR}}} \quad (36)$$

Em que,

$\alpha$ , fator de imperfeição;

$N_{CR}$ , Valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica, dado por:

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 E I}{L_{CR}^2} \quad (37)$$

Sendo,

$L_{CR}$ , comprimento de encurvadura.

O fator de imperfeição é obtido através da Tabela 9.

Tabela 9 - Fator de imperfeição.

Curva de encurvadura	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Fator de imperfeição, $\alpha$	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

O EC3 (CEN, 2005) considera que, no caso de  $\bar{\lambda} \leq 0.2$  ou  $\frac{N_{Ed}}{N_{CR}} \leq 0.04$  é dispensada a verificação da resistência da barra à encurvadura lateral.

- **Elemento sujeito à flexão**

Quando ocorre encurvadura lateral, as vigas estão sujeitas a flexão plana, podendo encurvar lateralmente. Esta encurvadura é provocada pela presença de zonas da secção comprimidas, aquando da existência de flexão (Lopes, 2009). A Figura 15 ilustra a configuração da deformada de uma viga exemplo de secção retangular sujeita à encurvadura lateral.



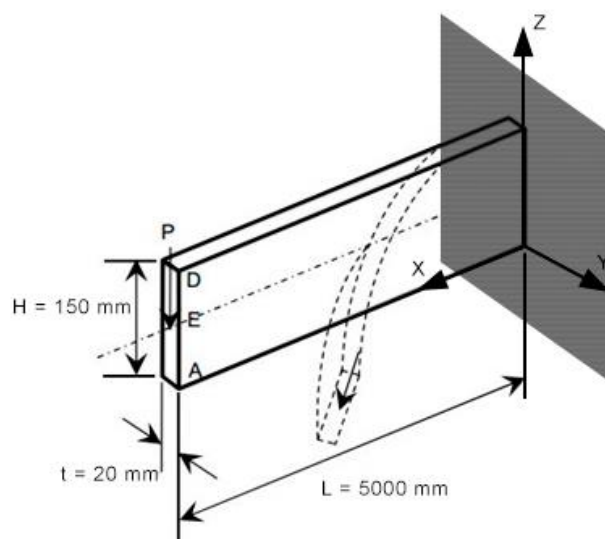


Figura 15 - Configuração da deformada de uma viga de seção retangular sólida sujeita à encurvadura lateral – editada de (Shellbuckling, 2021).

A resistência de uma barra é verificada à encurvadura lateral se:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (38)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{b,Rd}$ , valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura, dado por:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} w_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (39)$$

Em que,

$\chi_{LT}$ , fator de redução para a encurvadura lateral;

$w_y$ , módulo de flexão dependendo da classe da seção transversa. Definido deste modo:

$w_y = w_{pl,y}$ , classe 1 ou classe 2;

$w_y = w_{el,y}$ , classe 3;

$w_y = w_{eff,y}$ , classe 4.

Existem dois procedimentos possíveis definidos pelo EC3 para a determinação do fator de redução  $\chi_{LT}$ , o caso geral e outro para secções laminadas ou secções soldadas equivalentes.

De acordo com o caso geral, o cálculo do fator de redução para a encurvadura lateral é dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}; \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (40)$$

Onde,

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (41)$$

E  $\bar{\lambda}_{LT}$ , é dado por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_y f_y}{M_{CR}}} \quad (42)$$

Em que,

$\alpha_{LT}$  fator de imperfeição;

$M_{CR}$  Valor crítico do momento fletor relativo à encurvadura lateral.

O fator de imperfeição  $\alpha_{LT}$ , é obtido através da Tabela 10.

Tabela 10 - Fator de imperfeição  $\alpha_{LT}$ .

Curva de encurvadura	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Fator de imperfeição, $\alpha$	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Através da Tabela 11 é possível identificar a curva de encurvadura necessária para obter os valores correspondentes através da tabela anterior.

Tabela 11 - Curva de encurvadura.

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h / b \leq 2$	a
	$h / b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h / b \leq 2$	c
	$h / b > 2$	d
Outra secção transversal	-	d

O  $M_{CR}$  não se encontra na atual versão do EC3 (CEN,2005), podendo ser obtida através da bibliografia (Vila Real, 2021):

$$M_{CR} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_W}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 Z_g - C_3 Z_j)^2 - C_2 Z_g + C_3 Z_j \right] \quad (43)$$

A expressão 43 é determinada conforme vários fatores que dependem da situação em que se encontra a viga.

Os fatores de comprimento eficaz  $k$  e  $k_w$  variam entre 0,5 para fixação completa, 1.0 para nenhuma fixação e 0.7 para fixação numa extremidade da viga e livre na outra.

O  $k$  refere-se à rotação no plano e pode ser determinado da mesma maneira que o fator  $\alpha$  na determinação do comprimento de encurvadura aos elementos comprimidos.

O  $k_w$  refere ao empenamento da extremidade, a não ser eu haja algum condicionamento deverá ser considerado 1.0.

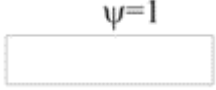
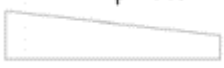




$I_t$  corresponde à inércia de torção e  $I_W$  a inércia de empenamento.

O módulo de elasticidade transversal  $G$  é dado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (44)$$

$C_1, C_2, C_3$  dependem do carregamento e das condições de apoio. Para  $k=1$  os valores de  $C_1$  podem ser obtidos através da Tabela 12.

Tabela 12 - Valores dos fatores  $C_1$  para  $k$  igual a 1.0 e para perfis bi-simétricos utilizados no cálculo do momento crítico (Vila Real, 2021).

Diagrama de momento fletor	$C_1$
	1.00
	1.31
	1.77
	2.60
	1.35
	1.12

$C_2$  e  $C_3$  podem ser obtidos através das tabelas da Norma francesa STA-CAL 1-02 (Galéa, 2002).

$Z_g$  representa a distância entre o centro de corte a posição da carga, dado pela seguinte expressão:

$$Z_g = Z_a - Z_s \quad (45)$$

Sendo,

$Z_a$ , posição de aplicação da carga;

$Z_s$ , posição do centro de corte da secção;

$Z_j$ , dado por:

$$Z_j = Z_s - 0.5 \int_A (y^2 + z^2) \frac{z}{I_y} dA \quad (46)$$

Esta metodologia de cálculo tem o mesmo objetivo da metodologia de secções laminadas ou secções soldadas equivalentes, em que se pretende dimensionar o perfil com precisão. Posteriormente, será usado o método geral, daí ser essa a metodologia descrita.

• **Elemento sujeito à flexão composta com compressão**

Os elementos solicitados à flexão composta com compressão deverão satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (47)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (48)$$

Em que,

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ , são valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respetivamente, em relação y-y e z-z;

$\Delta M_{y,Ed}$ ,  $\Delta M_{z,Ed}$ , momentos devidos ao deslocamento do eixo neutro, de acordo com a Tabela 13;

$\chi_y$  e  $\chi_z$ , fatores de redução devidos à encurvadura por flexão, segundo a expressão 33;

$\chi_{LT}$ , fator de redução devido à encurvadura lateral, segundo a expressão 40;

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$ , fatores de interação.

Tabela 13 - Valores de  $N_{Rk} = f_y A_i$ ,  $M_{i,Rk} = f_y W_i$  e  $M_{i,Ed}$ .

Classe	1	2	3	4
$A_i$	A	A	A	$A_{eff}$
$w_y$	$w_{pl,y}$	$w_{pl,y}$	$w_{el,y}$	$w_{eff,y}$
$w_z$	$w_{pl,z}$	$w_{pl,z}$	$w_{el,z}$	$w_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Os fatores de interação podem ser obtidos através de dois métodos, que se encontram em anexo no EC3-1-1, designados por Método 1 e Método 2. A principal diferença entre ambos é a determinação dos fatores de interação. Enquanto no Método 1 existe coeficientes específicos para os efeitos estruturais o Método 2 utiliza fatores de interação mais compactos (CEN,2005). Apesar das diferenças, os dois métodos partem do mesmo princípio, resistir à encurvadura com torção lateral.

### **3.3 Metodologia de cálculo para elementos em aço inoxidável**

A metodologia de cálculo de acordo com a Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a) de um elemento em aço inoxidável é muito idêntica à usada no aço carbono, mudando apenas as propriedades mecânicas do material.

Outra diferença em relação ao dimensionamento com aço carbono é a diferença dos valores característicos de resistência, pois os valores recomendados na Parte 1-4 do EC3 são mais conservativos do que os valores aplicados no aço carbono. Estes valores são mais conservativos devido à quantidade inferior de produção e um maior cuidado nos elementos a colocar. De facto, muitas vezes são colocados em aplicações estéticas e esses defeitos são mais facilmente detetados do que no aço carbono, que muitas vezes está oculto numa fachada.

Os fenómenos de instabilidade podem ser visíveis de forma global e local. Neste estudo, apenas será referido a instabilidade global, já que a barra usada vai ter um comportamento elástico devido à sua geometria (comprimento dos elementos, características da secção transversal, tipo de apoio).

Os coeficientes parciais de segurança  $\gamma_{Mi}$  recomendados, são dados por:

$$\gamma_{M0} = 1.1;$$

$$\gamma_{M1} = 1.1;$$

$$\gamma_{M2} = 1.25.$$

#### **3.3.1 Classificação da secção transversal**

A classificação da secção transversal do aço inoxidável, é feita segundo a Parte 1-4 do EC3.

Existem 4 classes de secção transversal divididas da mesma forma que as do aço carbono. Apenas difere na determinação dos valores da largura e da espessura dos elementos comprimidos, ou parcialmente comprimidos, sob o carregamento a que está sujeito. A sua classificação é determinada segundo a classe mais desfavorável desses mesmos elementos, como mostra na Tabela 5.2 da Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a).

### 3.3.2 Resistência da secção transversal

As ligas de aço inoxidável são caracterizadas pelas suas relações tensão-deformação não lineares com uma baixa tensão de proporcionalidade e uma extensa fase de endurecimento. A tensão de cedência não é bem definida por isso considera-se a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% (E. Real & Mirambell, 2005).

As expressões a usar para o aço inoxidável são as mesmas que foram usadas na secção 3.2.2, de acordo com a Parte 1-4 do EC3.

### 3.3.3 Resistência do elemento

Apresenta-se o comportamento da resistência do elemento quando este está a ser submetida a esforço axial, momento fletor e flexão composta (N+My).

- **Elemento à compressão**

O elemento está sujeito a um esforço axial de compressão e a sua resistência à encurvadura pode ser obtida de acordo com a seguinte verificação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (49)$$

Em que,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do esforço axial de compressão;

$N_{b,Rd}$ , valor de cálculo do esforço de compressão resistente à encurvadura.

Se o  $N_{b,Rd}$  for de classe 1,2,3 é usado a seguinte expressão:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (50)$$

Se, por outro lado, for de classe 4, é necessário usar uma área efetiva ( $A_{eff}$ ) devido à possibilidade de encurvadura local, obtendo:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (51)$$

Em que,

$\chi$ , fator de redução relevante para a encurvadura.

Neste fator de redução existe a primeira alteração do aço inoxidável relativamente ao aço carbono, dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}; \chi \leq 1.0 \quad (52)$$

Onde,

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] \quad (53)$$

E,

Para secções de classe 1,2,3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{CR}}} \quad (54)$$

Para secções de classe 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{CR}}} \quad (55)$$

Em que,

$\alpha$ , fator de imperfeição;

$N_{CR}$ , Valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica, dado por:

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 E I}{L_{CR}} \quad (56)$$

Sendo,

$L_{CR}$ , comprimento de encurvadura.

O fator de imperfeição  $\alpha$  e o  $\bar{\lambda}_0$  podem ser obtidos através da Tabela 5.3 da Parte 1-4 do EC3.



O EC3 (CEN,2006a) considera que, no caso de  $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$  ou  $\frac{N_{Ed}}{N_{CR}} \leq \bar{\lambda}_0^2$  é dispensada a verificação da resistência da barra à encurvadura lateral.

- **Elemento sujeito à flexão**

A resistência de uma barra é verificada à encurvadura lateral se:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (57)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{b,Rd}$ , valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura, dado por:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} w_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (58)$$

Em que,

$\chi_{LT}$ , fator de redução para a encurvadura lateral;

$w_y$ , módulo de flexão dependendo da classe da secção transversal. Definido deste modo:

$w_y = w_{pl,y}$ , classe 1 ou classe 2;

$w_y = w_{el,y}$ , classe 3;

$w_y = w_{eff,y}$ , classe 4.

O cálculo do fator de redução  $\chi_{LT}$  para a encurvadura lateral é dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}; \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (59)$$

Onde,

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.4) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (60)$$

E  $\bar{\lambda}_{LT}$ , é dado por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_y f_y}{M_{CR}}} \quad (61)$$

Em que,

$\alpha_{LT}$ , fator de imperfeição com valor de:

=0.34 para secções de enformados a frio e secções;

=0.76 para secções abertas soldadas e outras secções em que não há dados;

$M_{CR}$ , Valor crítico do momento fletor relativo à encurvadura lateral, dado pela expressão 43.

O EC3 (CEN, 2006a) considera que, no caso de  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.4$  ou  $\frac{M_{Ed}}{M_{CR}} \leq 0.16$  é dispensada a verificação da resistência da barra à encurvadura lateral, apenas é necessário avaliar a resistência da secção transversal.

- **Elemento sujeito à flexão composta com compressão**

Os elementos solicitados à flexão composta com compressão deverão satisfazer as duas seguintes condições.

Para prevenir a encurvadura segundo o eixo mais forte:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (62)$$

Para prevenir a encurvadura segundo o eixo mais fraco:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (63)$$

Em que,

$e_{Ny}$ , afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetivas e bruta segundo o eixo y-y;

$N_{Ed}, M_{y,Ed}$ , esforços atuantes de compressão e momentos segundo o eixo y-y e z-z ao longo dos membros, respetivamente;

$(N_{b,Rd})_{min}$ , é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  para os seguintes quatro modos de encurvadura: encurvadura lateral sobre o eixo y, encurvadura lateral sobre o eixo z, encurvadura lateral por torção, e encurvadura lateral por torção-flexão;

$(N_{b,Rd})_{min 1}$ , é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  para os seguintes três modos de encurvadura: encurvadura lateral sobre o eixo z, encurvadura lateral por torção, e encurvadura lateral por torção-flexão;

$W_{pl,y}$ , módulo de flexão plástico sobre o eixo y;

$k_y, k_{LT}$ , fatores de interação dados por:

$$k_y = 1.0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0.5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (64)$$

Mas,

$$1.2 \leq k_y \leq 1.2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (65)$$

$$k_{LT} = 1.$$

### 3.4 Metodologia de cálculo para elementos em alumínio

O presente subcapítulo apresenta as regras de dimensionamento utilizadas, tendo por base a metodologia da Parte 1-1 do EC9 (CEN, 2007).

O EC9 estabelece como coeficientes parciais de segurança para os estados ELU, relativos a ações em elementos estruturais de alumínio, dados por:

$$\gamma_{M1} = 1.1;$$

$$\gamma_{M2} = 1.25.$$

A metodologia de cálculo usada neste EC9 segue o preconizado no EC3, abordado ao longo do curso de Engenharia Civil, tendo algumas diferenças que são apresentadas em seguida.

#### 3.4.1 Classificação da secção transversal

As especificações atuais de projeto para ligas de alumínio, como o EC9, fornecem definições claras para a classificação da secção transversal. O EC9 define 4 classes de secções transversais, as mesmas do aço carbono e do aço inoxidável.

A classificação das secções depende do rácio entre a largura e a espessura. Estes elementos podem ser reforçados, ou não, através de elementos transversais, conforme se pode observar na Figura 16.

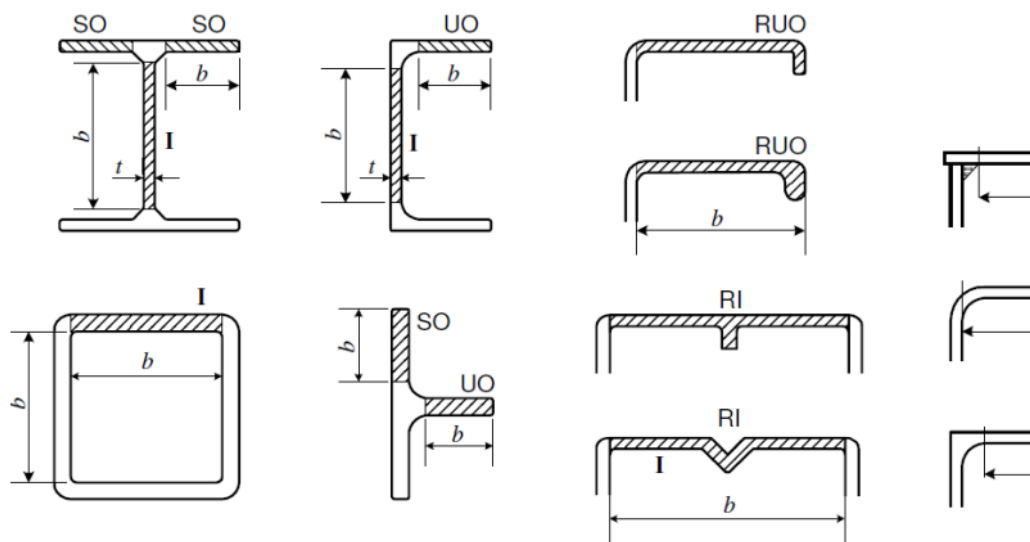


Figura 16 - Classificação das secções.

As paredes de uma secção transversal são classificadas conforme o parâmetro de esbelteza,  $\beta$ , de forma a caracterizar a secção relacionado à encurvadura local.

O valor de  $\beta$  é determinado em função do gradiente de tensões e apresenta os seguintes valores:

- **Elementos internos sem gradiente de tensão**

$$\beta = \frac{b}{t} \quad (66)$$

- **Elementos internos com gradiente de tensão em que a linha neutra se encontra no centro**

$$\beta = \frac{0.4b}{t} \quad (67)$$

- Elementos internos com gradiente de tensão ou salientes com pico da compressão na extremidade

$$\beta = \frac{\eta b}{t} \quad (68)$$

Em que,

b, largura da parede;

t, espessura da parede;

$\eta$ , coeficiente do gradiente de tensão, dado pela seguinte expressão:

$$\eta = 0.70 + 0.30\psi \quad (1 \geq \psi \geq -1) \quad (69)$$

$$\eta = 0.80 (1 - \psi) \quad (\psi < -1) \quad (70)$$

Sendo  $\psi$ , razão das tensões nos bordos superior e inferior da secção, relacionado com a maior tensão de compressão.

A relação entre  $\eta$  e  $\psi$  pode ser obtida através da observação da Figura 17.

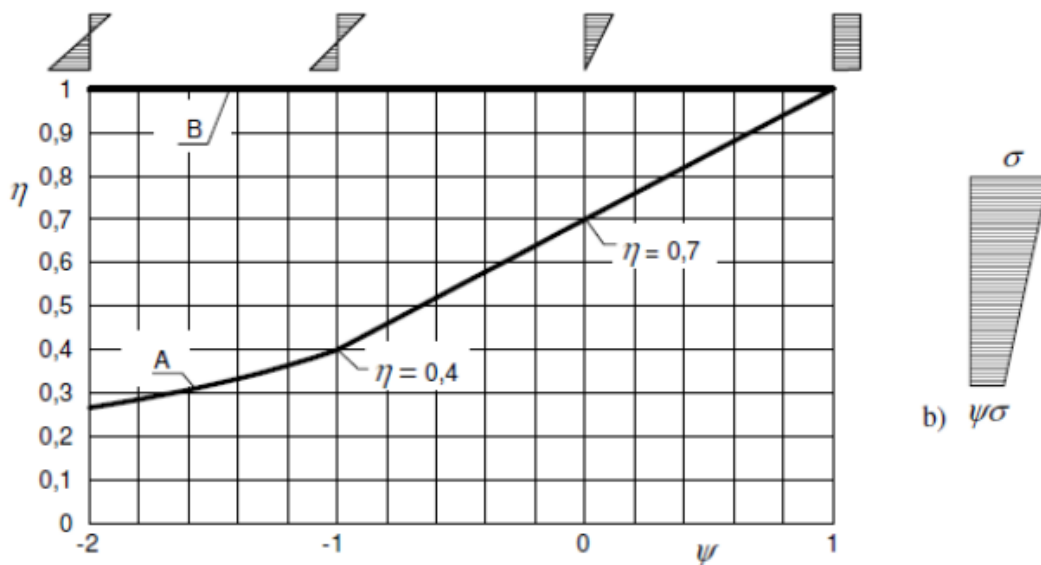


Figura 17 - Relação entre  $\eta$  e  $\psi$ .

A classificação da secção transversal é então determinada de acordo com os parâmetros de esbelteza  $\beta$ . Definido deste modo:

$\beta < \beta_1$ , classe 1;

$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$ , classe 2;

$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$ , classe 3;

$\beta_3 < \beta$ , classe 4.

Através da Tabela 14 é possível determinar os valores limite de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ .

Tabela 14 - Determinação dos valores limite de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ .

Classificação do material de acordo com a Tabela 3.2 EC9	Elementos internos			Elementos externos		
	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$
Classe A sem soldaduras	11	16	22	3	4.5	6
Classe A com soldaduras	9	13	18	2.5	4	5
Classe B sem soldaduras	13	16.5	18	3.5	4.5	5
Classe B com soldaduras	10	13.5	15	3	305	4

Onde,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} (f_0 \text{ em MPa}) \quad (71)$$

Como mostrado anteriormente,  $f_0$  corresponde ao limite convencional de proporcionalidade a 0.2%.

Na hipótese de a secção transversal ser de classe 4 com paredes sem reforços, é necessário considerar os efeitos da encurvadura local na redução da resistência da secção. Substitui-se a distribuição de tensões não uniforme para uma distribuição uniforme atuante na secção transversa. Assim, usa-se uma secção efetiva em vez da secção bruta anteriormente usada. A secção efetiva é obtida reduzindo a espessura ( $t_{eff}$ ) de cada parede através de um coeficiente de encurvadura local ( $p_c$ ).

O fator  $p_c$  é dado pelas seguintes expressões:

$$p_c = 1.0 (\beta \leq \beta_3) \quad (72)$$

$$p_c = \frac{c_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} (\beta > \beta_3) \quad (73)$$

Onde, os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  são obtidos através da Tabela 15.

Tabela 15 - Determinação dos coeficientes C1 e C2.

Classificação do material de acordo com a Tabela 3.2 EC9	Elementos internos		Elementos externos	
	C1	C2	C1	C2
Classe A sem soldaduras	32	220	10	24
Classe A com soldaduras	29	198	9	20
Classe B sem soldaduras	29	198	9	20
Classe B com soldaduras	25	150	8	16

### 3.4.2 Resistência da secção transversal

Apresenta-se o comportamento da resistência da secção quando esta está a ser submetida a flexão composta (N+My) nos montantes e a flexão desviada nas travessas (My+Mz).

- **Compressão**

A secção transversal está sujeita a um esforço axial de compressão e a sua resistência é verificada quando:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{C,Rd}} \leq 1.0 \quad (74)$$

Em que,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do esforço axial atuante;

$N_{C,Rd}$ , valor de cálculo do esforço de compressão resistente.

Se o  $N_{C,Rd}$  for de classe 1,2,3 é usado a seguinte expressão:

$$N_{C,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (75)$$

No caso de ser de classe 4, devido à possibilidade de encurvadura local é necessário usar uma área efetiva ( $A_{eff}$ ), obtendo:

$$N_{C,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (76)$$

- **Flexão simples**

A secção transversal também está sujeita a flexão simples segundo o eixo mais forte (My), a verificação é dada por:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad (77)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{Rd}$ , valor de cálculo do momento fletor resistente.

O momento fletor resistente para toda a secção transversal é dado por:

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha w_y f_0}{\gamma_{M1}} \quad (78)$$

Em que,

$\alpha$ , fator de forma dado na Tabela 6.4 da Parte 1.1 do EC9;

$w_y$ , módulo de flexão dependendo da classe da secção transversal. Definido deste modo:

$w_y = w_{pl,y}$ , classe 1 ou classe 2;

$w_y = w_{el,y}$ , classe 3;

$w_y = w_{eff,y}$ , classe 4.

- **Flexão composta**

Como o montante em alumínio está submetido à flexão composta, no eixo mais forte (N+My), deve-se considerar a seguinte fórmula de modo a verificar a flexão composta:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}}\right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}}\right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}}\right)^{1.7}\right]^{0.6} \leq 1.00 \quad (79)$$

Onde,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{y,Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante em y;

$M_{z,Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante em z;

$\psi=1.3$  para secções ocas e  $\psi=2$  para secções transversais sólidas;

$\omega_0$ , fator para a secção com soldadura localizada.



- **Flexão desviada**

Ocorre flexão desviada nas travessas de alumínio em duas direções, na direção y devido ao momento resultante da ação do vento e na direção z devido ao peso próprio da travessa vertical ( $M_y + M_z$ ).

É necessário realizar as verificações realizadas na flexão simples, mas desta vez segundo os dois eixos, seguindo a fórmula da expressão 77.

### 3.4.3 Resistência do elemento

Apresenta-se o comportamento da resistência do elemento quando este está a ser submetida a flexão composta ( $N + M_y$ ) nos montantes e a flexão desviada nas travessas ( $M_y + M_z$ ).

- **Elemento à compressão**

O elemento está sujeito a um esforço axial de compressão e a sua resistência à encurvadura pode ser obtida de acordo com a seguinte verificação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (80)$$

Em que,

$N_{Ed}$ , valor de cálculo do esforço axial de compressão;

$N_{b,Rd}$ , valor de cálculo do esforço de compressão resistente à encurvadura.

Se o  $N_{b,Rd}$  for de classe 1,2,3 é usado a seguinte expressão:

$$N_{b,Rd} = \frac{K \chi A f_0}{\gamma_{M1}} \quad (81)$$

Se, por outro lado, for de classe 4, é necessário usar uma área efetiva ( $A_{eff}$ ) devido à possibilidade de encurvadura local, obtendo:

$$N_{b,Rd} = \frac{K \chi A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}} \quad (82)$$

Em que,

$\chi$ , fator de redução relevante para a encurvadura;

$K$ , fator que permite os efeitos de enfraquecimento da soldadura. Para uma soldadura longitudinal  $K$  é dado pela Tabela 6.5 da Parte 1-1 do EC9 para encurvadura lateral.

Neste fator de redução existe a primeira alteração do aço inoxidável relativamente ao aço carbono, dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}; \chi \leq 1.0 \quad (83)$$

Onde,

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] \quad (84)$$

E,

Para secções de classe 1,2,3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{CR}}} \quad (85)$$

Para secções de classe 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{CR}}} \quad (86)$$

Em que,

$\alpha$ , fator de imperfeição;

$N_{CR}$ , Valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica, dado por:

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 E I}{L_{CR}} \quad (87)$$

Sendo,

$L_{CR}$ , comprimento de encurvadura.

O fator de imperfeição  $\alpha$  e o  $\bar{\lambda}_0$  podem ser obtidos através da Tabela 16.

Tabela 16 - Fator de imperfeição  $\alpha$  e o  $\bar{\lambda}_0$

Classe do material à encurvadura	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Classe A	0.20	0.10
Classe B	0.32	0.00

O EC9 (CEN, 2007a) considera que, no caso de  $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$  ou  $N_{Ed} \leq \bar{\lambda}_0^2 N_{cr}$  é dispensada a verificação da resistência da barra à encurvadura lateral.

- **Elemento sujeito à flexão**

A resistência de uma barra é verificada à encurvadura lateral se:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (88)$$

Onde,

$M_{Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante;

$M_{b,Rd}$ , valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura, dado por:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \alpha w_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (89)$$

Em que,

$\chi_{LT}$ , fator de redução para a encurvadura lateral;

$w_y$ , módulo de flexão dependendo da classe da secção transversa. Definido deste modo:

$w_y = w_{pl,y}$ , classe 1 ou classe 2;

$w_y = w_{el,y}$ , classe 3;

$w_y = w_{eff,y}$ , classe 4;

$\alpha$ , fator de forma dado na Tabela 6.4 da Parte 1.1 do EC9.

O cálculo do fator de redução  $\chi_{LT}$  para a encurvadura lateral é dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}; \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (90)$$

Onde,

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (91)$$

E,

$\bar{\lambda}_{LT}$ , é dado por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha w_{el,y} f_0}{M_{CR}}} \quad (92)$$

Em que,

$\alpha_{LT}$ , fator de imperfeição;

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ , limite do patamar para dispensa da verificação da encurvadura;

$M_{CR}$ , Valor crítico do momento fletor relativo à encurvadura lateral, dado pela expressão 43.

O  $\alpha_{LT}$  e o  $\bar{\lambda}_{0,LT}$  são dados por:

$\alpha_{LT} = 0.10$  e  $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0.6$  para classes 1 e 2 de secção transversal;

$\alpha_{LT} = 0.20$  e  $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0.4$  para classes 3 e 4 de secção transversal.

O EC3 (CEN, 2007a) considera que, no caso de  $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$  ou  $M_{Ed} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}^2 M_{CR}$  é dispensada a verificação da resistência da barra à encurvadura lateral, apenas é necessário avaliar a resistência da secção transversal.

- **Elemento sujeito à flexão composta com compressão**

Os elementos solicitados à flexão composta com compressão para secções tubulares deverão seguir o seguinte critério:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} W_x N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[ \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}\right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}\right)^{1.7} \right]^{0.6} \leq 1 \quad (93)$$

Onde,

$\omega_0$ , fator para a secção com soldadura localizada.

$\chi_{min}$ , mínimo valor de  $\chi_y$  e  $\chi_z$ ;

$\psi_c$ , depende da direção de encurvadura, dado por:

$$\psi_c = 1.3\chi; \psi_c \geq 0.8 \quad (94)$$

- **Flexão desviada**

É necessário realizar as verificações realizadas na flexão simples, mas desta vez segundo o eixo mais forte e mais fraco, seguindo a fórmula da expressão 88.



## **Capítulo 4**

---

# **Resistência estrutural ao fogo**

## **Resistência estrutural ao fogo**

- 4.1 Considerações gerais
- 4.2 Aço carbono
- 4.3 Aço inoxidável



## 4 RESISTÊNCIA ESTRUTURAL AO FOGO

### 4.1. Considerações gerais

Quando o aumento da temperatura começa a ocorrer, o aço, em geral, vai perdendo resistência. Devido a este comportamento, é essencial avaliar a resistência dos elementos metálicos quando sujeitos a temperaturas elevadas em situação de incêndio, com o objetivo de impedir o colapso da estrutura, durante o tempo requerido para assegurar a evacuação das pessoas.

Em comparação com o aço carbono, o aço inoxidável possui maior resistência mecânica a temperaturas elevadas e maior módulo de elasticidade para temperaturas superiores a 200 °C (CEN, 2005b).

Como a resistência do alumínio a partir dos 400 °C é demasiado baixa, a mesma não será aqui objeto de análise.

Ambos os materiais serão aqui apresentados para a flexão simples.

### 4.2 Aço carbono

A Parte 1-2 do EC3 propõe a utilização de fórmula de cálculo na determinação da resistência ao fogo de estruturas em aço. As temperaturas elevadas influenciam a classificação das secções, a resistência das secções e a resistência à encurvadura dos elementos, devido às já referidas reduções nas propriedades mecânicas dos aços a altas temperaturas (Vila Real, 2021).

#### 4.2.1 Classificação da secção transversal

Em situação de incêndio, a determinação da classificação da secção transversal é feita da mesma forma à temperatura normal, mas com um valor reduzido de  $\varepsilon$ , como o módulo de elasticidade  $E$  do aço carbono é 210000 MPa obtém-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= \sqrt{\frac{235}{f_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{E_\theta}{210000}} && \text{Como } f_y \text{ e } E \text{ em MPa.} && (95) \\
 &= \sqrt{\frac{235}{k_{y,\theta} f_y}} \sqrt{\frac{k_{y,\theta} E}{210000}} \\
 &= \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \sqrt{\frac{E}{210000}} \\
 &= \sqrt{\frac{K_{E,\theta}}{K_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \\
 &\approx 0,85 \left( \frac{235}{f_y} \right)^{0,5}
 \end{aligned}$$

#### 4.2.2 Resistência da secção transversal

A resistência ao fogo da secção transversal pode ser obtida através das expressões preconizadas para o projeto à temperatura normal com a redução das propriedades mecânicas devido às temperaturas elevadas.

#### 4.2.3 Resistência do elemento a altas temperaturas

- **Elemento sujeito à flexão**

Quando ocorre encurvadura lateral, as vigas estão sujeitas a flexão plana, podendo encurvar lateralmente, quando sujeitas ao fogo.

A resistência de uma barra é verificada à encurvadura lateral em situação de incêndio se:

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{b,fi,t,Rd}} \leq 1.0 \quad (96)$$

Onde,

$M_{fi,Ed}$ , valor de cálculo do momento atuante em situação de incêndio;

$M_{b,fi,t,Rd}$ , valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante  $t$ , dado por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} w_y k_{y,com} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (97)$$

Em que,

$\chi_{LT,fi}$ , fator de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio;

$w_y$ , módulo de flexão dependendo da classe da secção transversa. Definido deste modo:

$w_y = w_{pl,y}$ , classe 1 ou classe 2;

$w_y = w_{el,y}$ , classe 3;

$w_y = w_{eff,y}$ , classe 4;

$k_{y,com}$ , fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido  $\theta_{a,com}$  atingida no instante  $t$ .

De acordo com o caso geral, o cálculo do fator de redução para a encurvadura lateral é dado por:

Para a classe 1,2,3:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}}; \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (98)$$

Onde,

$$\phi_{LT,\theta,com} = 0.5 \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (99)$$

E,

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (100)$$

$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ , é dado por:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \left( \frac{K_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} \quad (101)$$

$\bar{\lambda}_{LT}$ , é obtido através de:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_y f_y}{M_{CR}}} \quad (102)$$

Em que,

$\alpha$ , fator de imperfeição;

$k_{E,\theta,com}$ , fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido  $\theta_{a,com}$  atingida no instante  $t$ ;

$M_{CR}$ , Valor crítico do momento fletor relativo à encurvadura lateral, definido na expressão 43.

Para a classe 4:

Para elementos de secção de classe 4 utiliza-se a o anexo E da Parte 1-2 do EC3, onde a principal distinção é o uso da tensão limite de proporcionalidade a 0.2% em vez da tensão de cedência calculada com a extensão total de 2% (CEN, 2005b).

### 4.3 Aço inoxidável


A Parte 1-2 do EC3 propõe a utilização para o aço inoxidável das mesmas fórmulas de cálculo na determinação da resistência ao fogo de estruturas em aço carbono. As temperaturas elevadas influenciam a classificação das secções, a resistência das secções e a resistência à encurvadura dos elementos, devido às já referidas reduções nas propriedades mecânicas dos aços a altas temperaturas (Vila Real, 2021).

#### 4.3.1 Classificação da secção transversal

Em situação de incêndio, a determinação da classificação da secção transversal é feita da mesma forma à temperatura normal, mas com um valor reduzido de  $\varepsilon$ . Obtendo a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \sqrt{\frac{235}{f_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{E_\theta}{210000}} && \text{Com } f_y \text{ e } E \text{ em MPa.} && (103) \\ &= \sqrt{\frac{235}{K_{y,\theta} f_y}} \sqrt{\frac{K_{y,\theta} E}{210000}}\end{aligned}$$

$$= \sqrt{\frac{K_{E,\theta}}{K_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \sqrt{\frac{E}{210000}}$$

$$\approx 0.85 \sqrt{\frac{E}{210000}} \left(\frac{235}{f_y}\right)^{0,5}$$


O EC sugere o uso de 0,85 também para o aço inoxidável na fração de  $\sqrt{\frac{K_{E,\theta}}{K_{y,\theta}}}$ , esta aproximação não é a melhor, pois para diferentes temperaturas este rácio nem sempre é 0.85.

### 4.3.2 Resistência da secção transversal

Independentemente da temperatura, as fórmulas a usar para a resistência da secção são as mesmas do aço inoxidável à temperatura normal, alterando os valores das propriedades mecânicas em conformidade com as suas reduções a temperaturas elevadas.

### 4.3.3 Resistência do elemento a altas temperaturas

A resistência do elemento de aço inoxidável a altas temperaturas é determinada pelas mesmas fórmulas do aço carbono apresentadas no subcapítulo 4.2.

No aço inoxidável é necessário considerar diferentes fatores de redução apresentado no Anexo C da Parte 1-2 do EC3.



## **Capítulo 5**

---

### **Projetos de fachadas**

## **Projetos de fachadas**

- 5.1 Obras analisadas
- 5.2 Teatro do Jordão
- 5.3 Novo estádio do Everton
- 5.4 City Gate House
- 5.5 Considerações finais



## 5 PROJETOS DE FACHADAS

### 5.1 Obras analisadas

Este capítulo será dedicado ao trabalho desenvolvido na empresa b-face no âmbito do estágio curricular. Foram acompanhados diferentes projetos no âmbito do cálculo e preparação de fachadas em aço carbono e em alumínio. São apresentadas apenas algumas das atividades realizadas, nas diferentes obras, com vista a servirem de exemplo dos trabalhos realizados durante o estágio.

- **Teatro do Jordão**

O Teatro Jordão começou a ser construído a 22 de fevereiro de 1937, no núcleo urbano, na Avenida Dom Afonso Henriques, em Guimarães. É um edifício histórico e já conta com mais de 80 anos de história (NVE, 2019).

O edifício que foi objeto de análise é totalmente novo e pretende complementar o edifício histórico, permitindo melhores condições de acesso e segurança interna.

O projeto tem como objetivo a preservação do património, ao mesmo tempo que se pretende que haja uma reconversão, por isso optou-se pela fachada demonstrada na Figura 18.

Têm sido usadas várias ferramentas no auxílio do desenvolvimento desta fachada.



Figura 18 - Teatro do Jordão.

- **Novo estádio do Everton**

O *Everton Football Club* joga em Goodison Park desde 1892. No entanto, desde 23 de fevereiro que a Câmara Municipal de Liverpool aprovou os planos para desenvolver um novo estádio em Bramley-Moore Dock, no norte de Liverpool. O novo estádio terá capacidade para 52 mil lugares com possibilidade de expansão e está representado na Figura 19 (EvertonFC, 2021).



*Figura 19 - Novo estádio do Everton.*

- **City Gate House**

O *City Gate House* é um edifício histórico de enorme prestígio em Londres que enfrenta uma significativa reabilitação. Originalmente, este edifício foi projetado em 1930 (b-face, 2021).

Na Figura 20 é apresentado o edifício que possui nove andares e ocupa uma posição de destaque com vista para a *Finsbury Square*, ficando a uma curta distância de Liverpool. Foi originalmente projetado por Frederick Gould e Giles Gilbert Scott, projetista da icônica cabine telefônica vermelha britânica e do arquiteto da Bankside Power Station, agora Tate Modern (Dave Rogers, 2019).



Figura 20 - City Gate House.

## 5.2 Teatro do Jordão

### 5.2.1 Considerações gerais

Os trabalhos desenvolvidos no teatro do Jordão são um bom exemplo dos trabalhos desenvolvidos no estúdio.

Na empresa b-face, optou-se por projetar os montantes em alumínio com elementos em aço carbono que têm a função de dar resistência a este sistema construtivo. Posteriormente, estudar-se-á a substituição deste perfil de aço carbono para aço inoxidável. Este perfil tem uma secção transversal retangular cheia de 20x150 mm.

Na Figura 21 é possível observarem-se os pormenores construtivos do sistema usado.

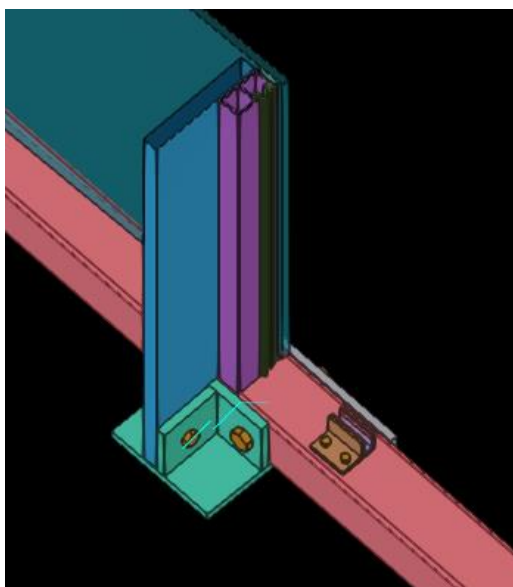


Figura 21 - Pormenores construtivos usados no Teatro do Jordão.

Na avaliação do comportamento desta estrutura de fachada foram considerados dois casos mais gravosos.

O caso 1 encontra-se entre o piso 0 e o piso 1, enquanto que o caso 2 está entre o piso 2 e o piso 3. Se no caso 1, existe uma maior altura de montantes, no caso 2 existe uma maior distância entre montantes.

Na Figura 22 encontram-se os dois casos enunciados anteriormente.

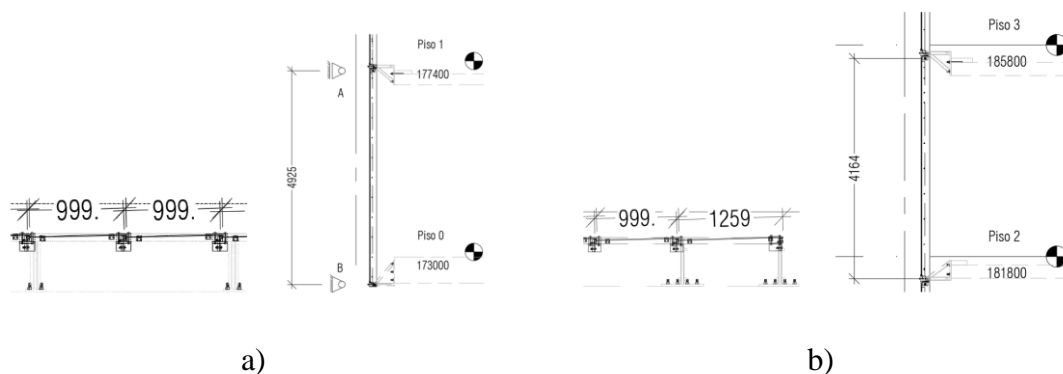



Figura 22 - Casos mais gravosos: a) caso 1; b) caso 2.

O montante possui dois suportes em cada extremo, um apoio duplo na base e um apoio simples no outro extremo, este apoio simples não é restringido em Z, permitindo que ele dilate na vertical. Na rotação apenas é restringido em Z e apenas num dos apoios, para que a barra não rode sobre si própria. Na Tabela 17 estão pormenorizados os dois apoios do montante.

Tabela 17 - Restrição dos apoios.

	Apoio	Eixo de referência	Libertações axiais / transversais			Libertações de rotação			Comentário
			U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	
			A	Global XYZ	x	x	-	-	
B	Global XYZ	x	x	x	-	-	-	Apoio inferior	

### 5.2.2 Materiais

Nas fachadas, o vidro é um material praticamente obrigatório devido ao seu desempenho a vários níveis. Efetivamente, o vidro proporciona uma distribuição harmoniosa da luz no interior do edifício, tem uma boa resistência perante a ação do vento e, dependendo do vidro usado, é possível garantir um conforto térmico adequado (Sayed & Fikry, 2019).

O alumínio, aço carbono e aço inoxidável são outros dos materiais que são muitas vezes considerados para a análise estrutural de uma fachada (Camposinhos, 2017).

No caso do Teatro do Jordão, para além do vidro, também é considerado o aço carbono e o alumínio.

Na Tabela 18 estão descritas as classes e as ligas usadas nesta obra.

Tabela 18 - Classes e as ligas usadas no Teatro do Jordão.

	<b>Alumínio</b>	<b>Aço carbono</b>
<b>Ligas</b>	6060 – T6	S275
<b>f0 (Mpa)</b>	140	275
<b>fu (Mpa)</b>	170	430
<b>E (Gpa)</b>	70	200

### 5.2.3 Ações

- **Cargas Permanentes (D)**

Na Tabela 19 encontram-se as cargas permanentes determinadas tendo em consideração o peso dos materiais.

Tabela 19 - Cargas permanentes consideradas.

<b>Material</b>	<b>Peso Próprio (kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Alumínio</b>	27.0
<b>Vidro</b>	25.0
<b>Aço</b>	78.0

- **Ação do vento (W)**

A ação do vento pode ser determinada segundo várias normas dependendo do país em causa.

O Teatro do Jordão encontra-se em Portugal, portanto, optou-se por usar a Parte 1-4 do Eurocódigo 1 (EC1) (CEN,2009b).

Através desse estudo, obtiveram-se os valores da carga do vento, como mostra a Tabela 20.

Tabela 20 - Valores da carga do vento.

	Caso 1	Caso 2
<b>Carga de vento</b>	-1.6 kPa	-1.3 kPa
<b>Sucção (Ws)</b>		
<b>Carga de vento</b>	1.3 kPa	1.3 kPa
<b>Pressão (Wp)</b>		

Na Figura 23 e na Figura 24 é possível observar a distribuição das cargas resultantes da ação do vento.

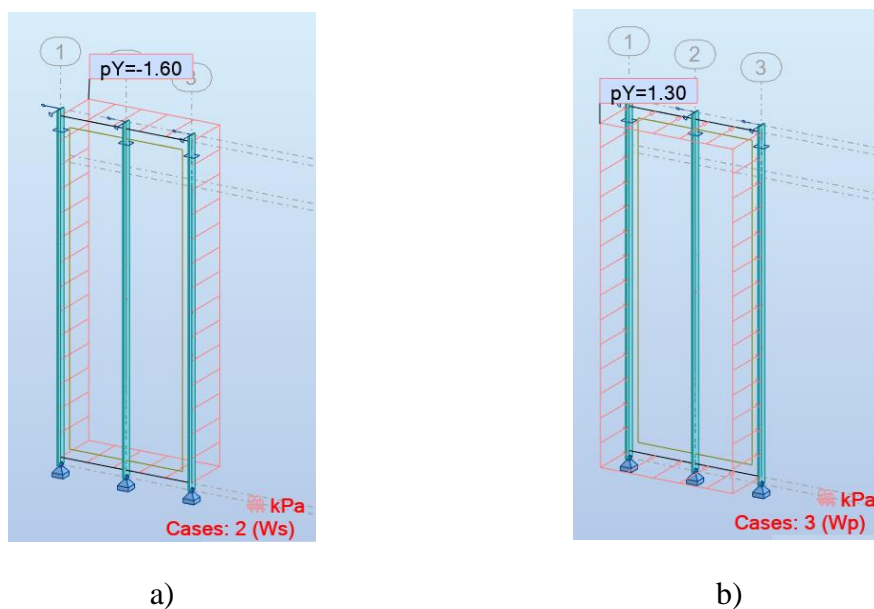


Figura 23 - Distribuição das cargas resultantes da ação do vento para o caso 1: a) sucção; b) pressão.

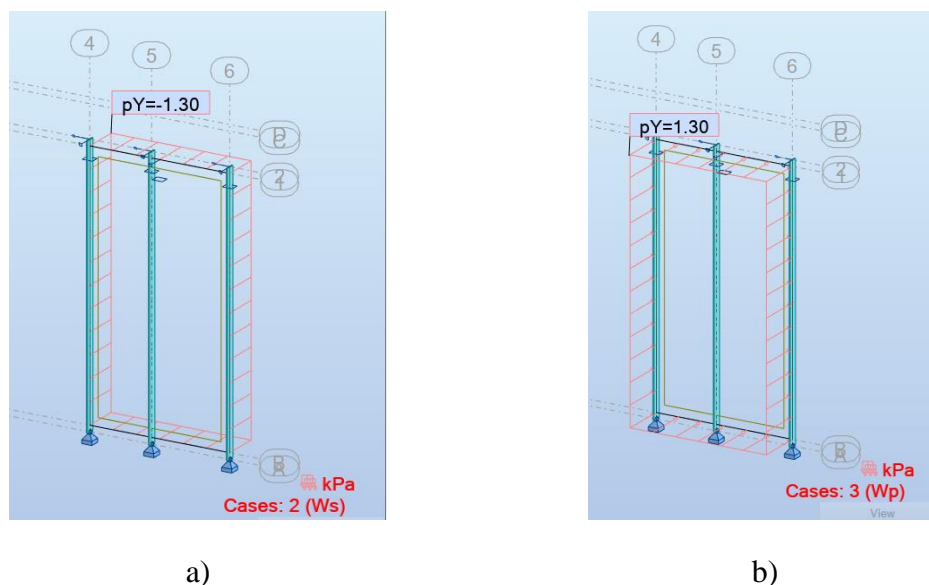


Figura 24 - Distribuição das cargas resultantes da ação do vento para o caso 2: a) sucção; b) pressão.

- **Carga de barreira (BL)**

A carga de barreira trata-se da análise da fachada do pano exterior e interior. Os valores podem ser obtidos através de *Barriers in and about buildings – Code of practice* (Standard, 1999).

No caso em estudo, não foi considerada qualquer carga de barreira devido ao facto do pano exterior e interior não estar acessível.

- **Carga de manutenção (ML)**

Na ausência da indicação do valor da carga de manutenção, opta-se pelo procedimento de cálculo definido em *Standard for Systemised Building Envelopes #2.3.3 – Live*.

As cargas de manutenção têm uma direção perpendicular à superfície do vidro e o seu sentido, geralmente, a partir do exterior do edifício.

No Teatro do Jordão, é considerado que a carga de manutenção não ocorre em simultâneo com a ação do vento e é indicado um valor de  $1.5 \text{ kN/m}^2$ , como mostra a Figura 25.

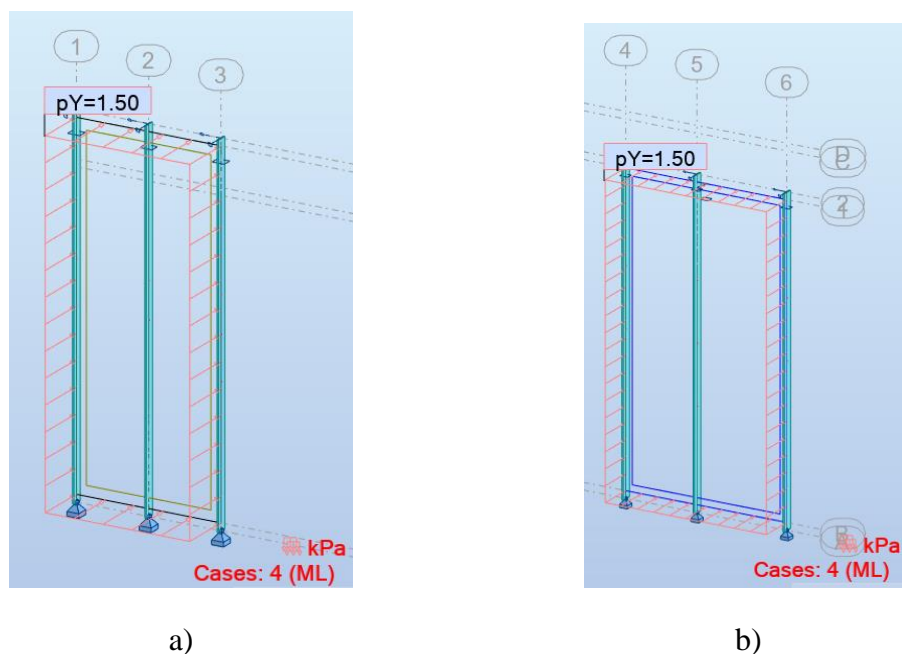


Figura 25 - Carga de manutenção.

## 5.2.4 Combinações de ações

As combinações de ações são feitas segundo o Eurocódigo 0 (EC0) (CEN, 2009a).

### 5.2.4.1 Verificação em Estado Limite Último

- Estados Limites Últimos

$$F_d = \gamma_G G + \gamma_Q Q_{k,1} + \gamma_Q \sum \psi_{0,i} + Q_{k,i} \quad (104)$$

Em que,

Os coeficientes de segurança ( $\gamma$ ) considerados são demonstrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Coeficientes de segurança ( $\gamma$ ).

	Favoráveis	Desfavoráveis
$\gamma_G$	1.0	1.35
$\gamma_Q$	0.0	1.50

Já os coeficientes parciais de segurança ( $\psi$ ) são determinados conforme o caso em estudo.

Neste caso esses valores estão identificados na Tabela 22.



Tabela 22 - Coeficientes parciais de segurança ( $\psi$ ).

Tipo de Ação	Descrição	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	Referência
<b>W</b>	Wind Load	0.6	1.0	0.2	EN 1990:2005
<b>ML</b>	Live load	0.7	0.5	0.3	EN 1990:2005

Obtiveram-se, assim, as seguintes combinações de ações em Estado Limite Último, como mostra a Tabela 23.

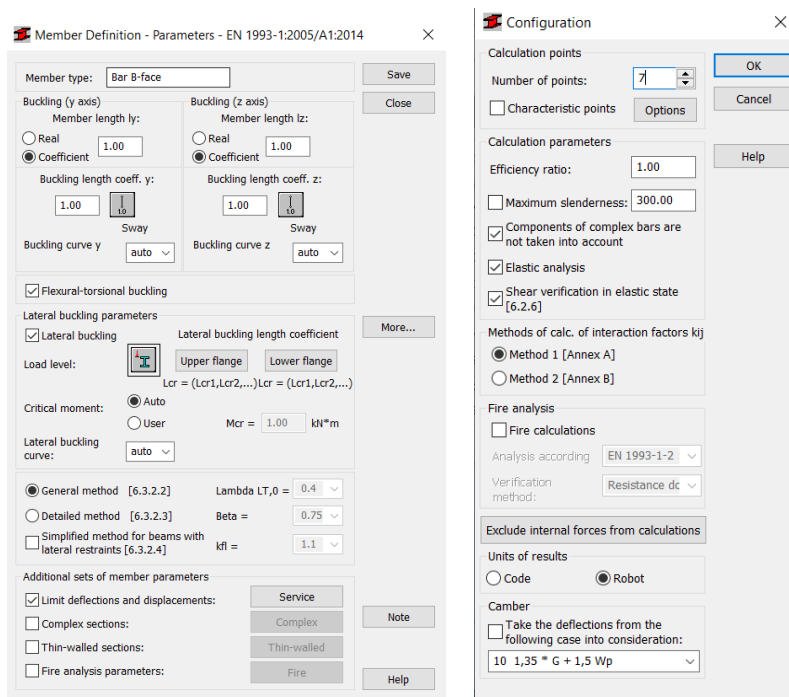
Tabela 23 - Combinações ULS.

<b>Combinação 10</b>	1.35 D	+	1.50 Ws
<b>Combinação 11</b>	1.35 D	+	1.50 Wp
<b>Combinação 12</b>	1.35 D	+	1.50 ML

A verificação do estado limite último é feita segundo o software de cálculo usado na b-face, neste caso o *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021*.

Na determinação deste resultado é necessário levar em consideração vários fatores, nomeadamente a configuração da barra, o comprimento de encurvadura e o tipo de análise a ser feita.

Na Figura 26, apresentam-se as definições escolhidas para este caso de estudo, foi feita a avaliação do montante numa análise elástica já que a secção é retangular sólida, portanto, sem paredes. dispensando assim a sua determinação da classificação da secção transversal de acordo com a secção 3.2.1.



a)

b)

Figura 26 - Definições escolhidas no Robot: a) configuração da barra; b) configuração da análise.

As fórmulas apresentadas na secção 3.2 são exatamente aquelas que seriam necessárias para este caso de estudo, pois trata-se de uma fachada tradicional em que o montante em causa está submetido a flexão composta com compressão. Por esse motivo, foram essas as condições apresentadas no subcapítulo 3.2. O programa de cálculo aplica as fórmulas dadas pela Parte 1-1 do EC3 e obtém-se a verificação apresentada no Anexo, correspondente à barra com maior rácio, como mostra na Figura 27.

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
1 Bar B-face_1	RECT_1	S 275	115.47	866.03	0.56	11 1.35D+1.5Ws
2 Bar B-face_2	RECT_1	S 275	115.47	866.03	0.93	11 1.35D+1.5Ws
3 Bar B-face_3	RECT_1	S 275	115.47	866.03	0.56	11 1.35D+1.5Ws
5 Bar B-face_5	RECT_1	S 275	100.92	756.91	0.38	12 1,35 * G + 1,5 M
6 Bar B-face_6	RECT_1	S 275	100.92	756.91	0.70	12 1,35 * G + 1,5 M
7 Bar B-face_7	RECT_1	S 275	100.92	756.91	0.45	12 1,35 * G + 1,5 M

Figura 27 - Rácios dos montantes do Teatro do Jordão.

### 5.2.4.2 Verificação em Estado Limite de Utilização

$$F_d = G + \psi_1 Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (105)$$

Em que,

Os coeficientes de segurança ( $\gamma$ ) considerados são demonstrados na Tabela 24.

Tabela 24 - Coeficientes de segurança ( $\gamma$ ).

	Favoráveis	Desfavoráveis
$\gamma_G$	1.0	1.0
$\gamma_Q$	1.0	1.0

Os coeficientes parciais de segurança ( $\psi$ ) são determinados através da Tabela 22.

Obtiveram-se, assim, as seguintes combinações de ações em Estado Limite de Utilização, como mostra a Tabela 25.

Tabela 25 - Combinações SLS.

<b>Combinação 20</b>	1.0 D	+	1.0 W <sub>s</sub>
<b>Combinação 21</b>	1.0 D	+	1.0 W <sub>p</sub>
<b>Combinação 22</b>	1.0 D	+	1.0 ML

Nos estados limites de utilização é necessário descobrir a deformada do montante, como mostra a Figura 28. Depois de descobrir a deformada, avalia-se o deslocamento máximo admissível, para depois averiguar a verificação em estado limite último.

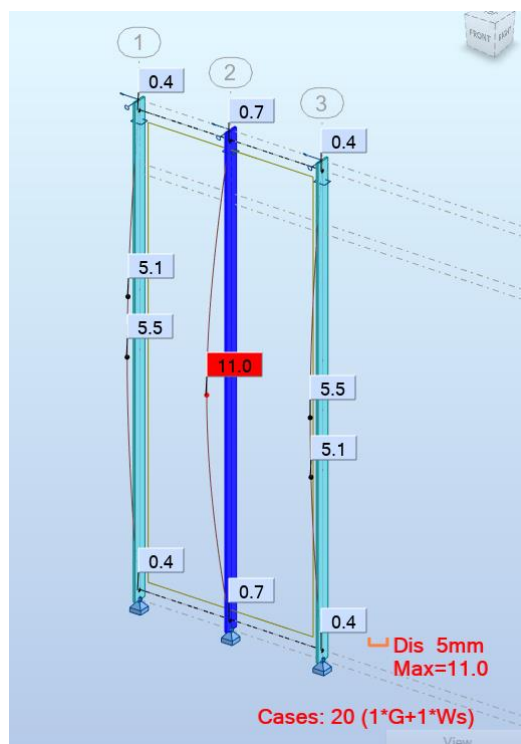


Figura 28 - Deformada máxima em SLS do Teatro do Jordão

A deformada máxima admissível em SLS é obtida através da expressão 106 (CEN, 2015).

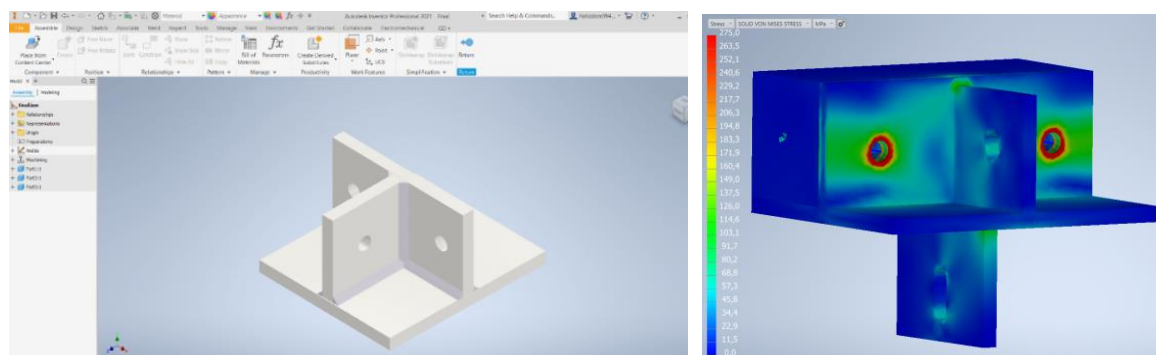
$$\begin{aligned} \delta_{adm} &= 5 + L/300 & (106) \\ &= 5 + 4922/300 = 21.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Como  $\delta_{adm} = 21.4 > 11$  mm, pode-se concluir que a secção verifica os estados limites de utilização.

### 5.2.5 Modelação de pormenores construtivos

Com vista à modelação das peças metálicas de apoio aplica-se o programa *Inventor*.

Como demonstrado na Figura 29, esta peça de amarração fica então modelada e o programa permite criar os desenhos necessários para o fabrico. Posteriormente, as peças são analisadas pelo *software* de elementos finitos *Inventor Nastran*. Este *software* permite avaliar as tensões máximas presentes na peça, assim como as deformações que ocorrem.



a)

b)

Figura 29 - Peça de amarração: a) modelação no programa Inventor; b) análise por elementos finitos.

Outra ferramenta que também é usada é o *TEKLA STRUCTURES*, através deste programa modela-se a estrutura da fachada para, assim, obter os desenhos de fabrico e montagem. Na Figura 30 está representado a modelação da fachada do Teatro do Jordão do piso 0.

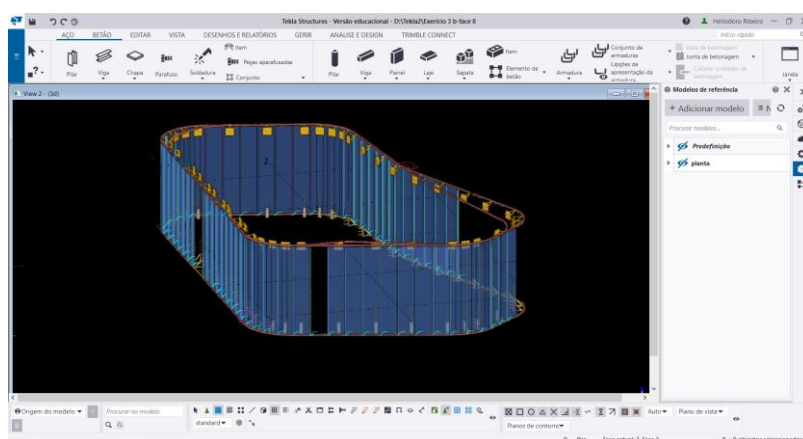


Figura 30 - Modelação do piso 0 do Teatro do Jordão.

### 5.2.6 Detalhe e desenho

O detalhe do desenho das peças é feito com recurso ao Software *TEKLA STRUCTURES*, que opera em diversos materiais, sendo mais comum para aço. No entanto, também possui a capacidade de ser usado para peças mais pormenorizadas, como é o caso dos montantes em alumínio, como está ilustrado na Figura 31.

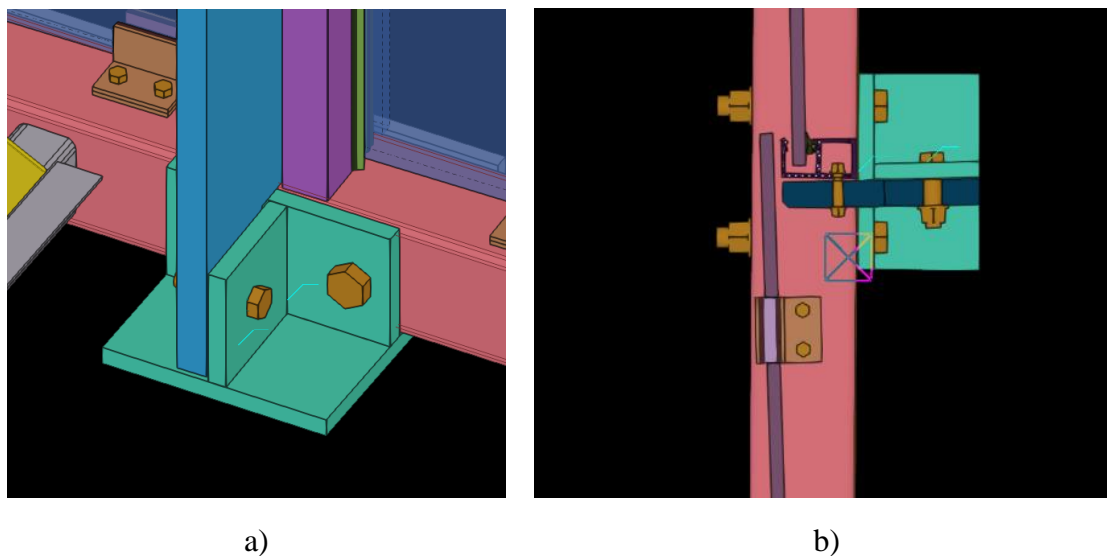


Figura 31 - Pormenores construtivos: a) ligação da peça de amarração; b) detalhe em planta.

## 5.3 Novo estádio do Everton

### 5.3.1 Considerações gerais

A b-face foi contratada para dimensionar vários pórticos da fachada do novo estádio do Everton. Como a obra ainda está em execução, apenas será mostrado o processo para avaliar a segurança destas fachadas.

### 5.3.2 Determinação da secção transversal e modelação da estrutura

A título de exemplo, aplicando as fórmulas apresentadas na secção 3.4.1, determina-se a classificação da secção transversal de um perfil de alumínio usado no novo estádio do Everton.

Para escolher uma secção transversal em alumínio, é necessário saber o comportamento que ela necessita de ter perante a estrutura de fachada em causa. Num pré dimensionamento é possível averiguar as inércias e a área necessária para que o comportamento seja adequado. Após a identificação do comportamento que a estrutura terá, é possível escolher uma secção com alguma lógica para o estudo em causa, como mostra a Figura 32.

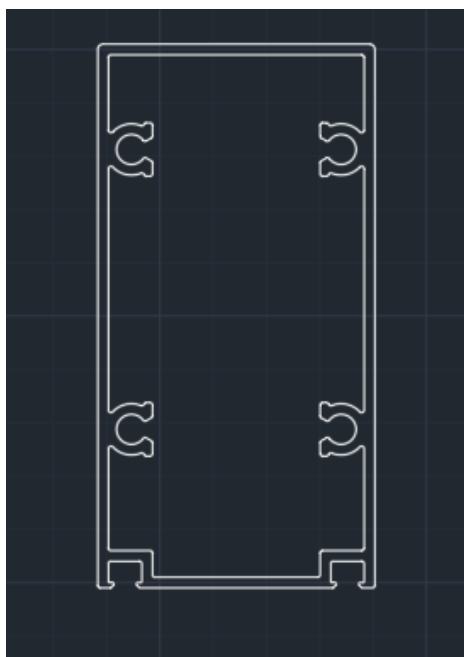


Figura 32 - Secção bruta a usar na travessa e no montante observada através do Autocad.

Escolhendo a secção transversal, avalia-se pormenorizadamente o seu comportamento no Autodesk Robot Analysis Professional 2021, evidenciado na Figura 33.

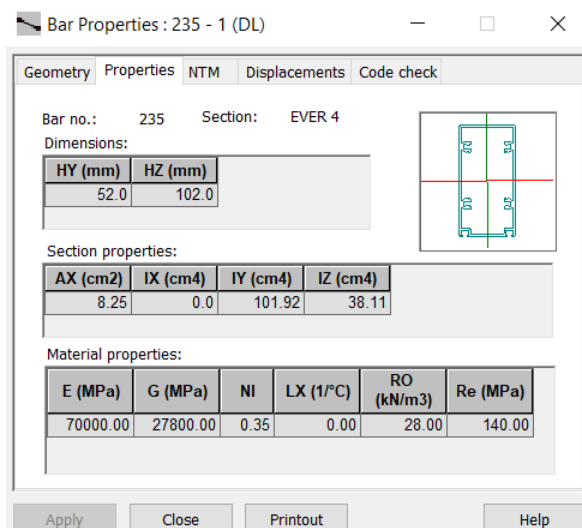
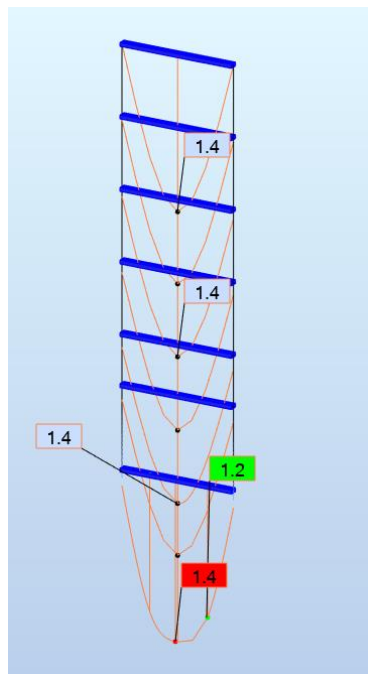


Figura 33 - Características da secção transversal.

Obtendo estes valores através do Autodesk Robot Analysis Professional 2021, coloca-se no modelo de cálculo estas mesmas secções nos montantes e nas travessas para averiguar as deformações em Estado Limite de Utilização. Caso as deformações não estejam dentro do recomendado, é necessário colocar reforços nessas secções transversais, ou até mesmo

mudar por completo a secção transversal. A Figura 34 mostra que esta deformação, no pior caso em estado limite de utilização, foi verificada, pois a travessa tem um comprimento de 1.62 m e, num pré cálculo, é necessário verificar uma deformação inferior a  $L/500$ .



*Figura 34 - Deformada obtida em SLS do novo Estádio do Everton.*

Como a deformada obtida em estado limite de utilização foi de 1.4 mm e a deformada admissível de 3.2 mm, conclui-se que a deformada verifica o critério de  $L/500$ .

O principal objetivo é sempre otimizar a secção transversal para ela corresponder com fiabilidade aos movimentos desta estrutura da fachada.

Em seguida, avalia-se a classificação da secção transversal através da designação feita na secção 3.4.1, obtendo as paredes horizontais de classe 3 e as verticais de classe 4. Como as paredes verticais são de classe 4, é necessário considerar a espessura efetiva obtida, neste caso de  $t_w=1.36$  mm. Na Figura 35 está representada a nova secção efetiva a usar.





Figura 35 - Secção efetiva.

A nova secção efetiva será modelada no *Autodesk Robot Analysis Professional 2021*, obtendo os diagramas de esforços resultantes para determinar as cargas atuantes na estrutura. Como exemplo, é mostrado o  $M_{y,Ed}$  na Figura 36.

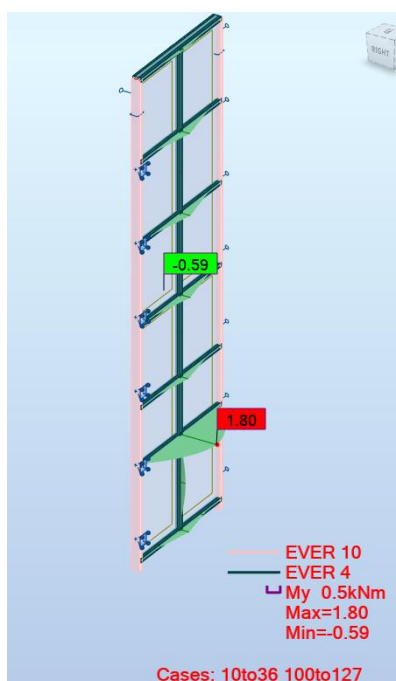


Figura 36 - Esforços resultantes a partir do uso da secção efetiva.

## 5.4 City Gate House

### 5.4.1 Considerações gerais

Para estudar a resistência estrutural do alumínio decidiu-se estudar uma parte da fachada de uma obra feita na b-face, o *City Gate House*.

A fachada desta obra é uma fachada “*Curtain Wall*” em alumínio. Contrariamente às fachadas tradicionais, como é o caso do Teatro do Jordão, as fachadas “*Curtain Wall*” adquirem resistência diretamente a partir dos montantes e das travessas em alumínio.

Estudar-se-á uma parcela estrutural da fachada, em que se fez as combinações de ações e, posteriormente, foi possível identificar o montante e a travessa com maior rácio.

A principal ação condicionante neste tipo de fachadas continua a ser o vento. Nas fachadas “*Curtain Wall*”, a ação do vento produz um carregamento horizontal nos painéis de vidro que por consequência transferem esses esforços para os montantes e para as travessas, como mostra a Figura 37 (Camposinhos, 2017). A definição oficial de CW ou “*Curtain Walling*”, está presente na Norma Europeia harmonizada EN 13830 “*Curtain walling – Product standard*”(CEN, 2015).

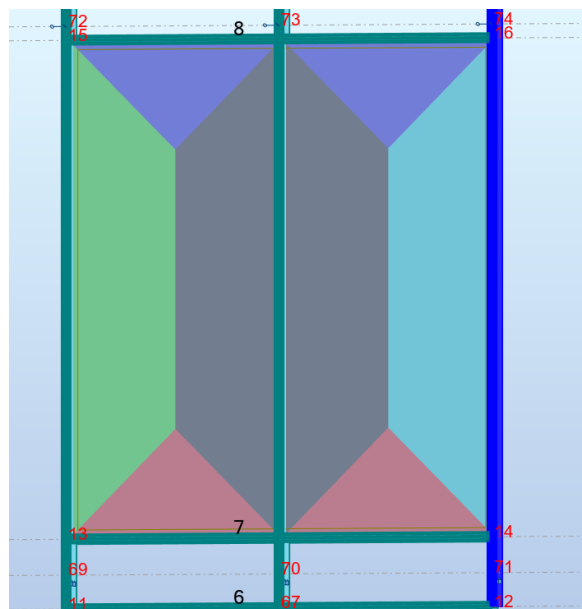


Figura 37 - Transferência de esforços para os montantes e para as travessas de uma fachada “*Curtain Wall*”.

Posteriormente, as travessas e os montantes transferem essa carga para a estrutura principal do edifício através de ligações desta subestrutura (Akbari *et al.*, 2020).

### 5.4.2 Modelação

Ocorre flexão composta nos montantes de alumínio devido ao esforço axial proveniente do peso próprio do alumínio e de uma percentagem do peso próprio do vidro. Existe, ainda, flexão no eixo mais forte devido à ação horizontal do vento.

Nas travessas ocorre flexão desviada por existir momento nos dois eixos, no eixo mais fraco devido ao peso próprio do vidro e da travessa, e no eixo mais forte devido à ação do vento.

Deste modo, as ações existentes, os elementos estruturais da fachada e os seus revestimentos têm de ser transferidos para a estrutura principal, através de apoios.

Para proceder a estes cálculos da resistência da secção transversal e da resistência do elemento, é necessário modelar a estrutura no *Autodesk Robot Analysis Professional 2021*, obtendo-se, assim, o diagrama de momento. Tendo o diagrama de momentos, sabe-se os esforços atuantes em cada montante e em cada travessa.

A partir dos esforços de cada montante e travessa usa-se especificamente as fórmulas apresentadas nas secções 3.4.2 e 3.4.3. Como exemplo, apresentar-se-á o rácio de um montante de alumínio sujeito à flexão composta, dado por:

- **Verificação da secção transversal**

Utilizando a expressão 79, obtém-se um valor resultante de  $0.37 \leq 1$ , logo verifica a secção transversal.

- **Verificação do elemento**

Para prevenir a encurvadura usa-se a expressão 93, obtendo um valor resultante de  $0.42 \leq 1$ , logo verifica a resistência do elemento.

## 5.5 Considerações finais

Através destes casos práticos foi possível verificar algumas das fases para um correto projeto de estruturas de fachadas.

As fachadas realizadas na b-face geralmente são de aço carbono e alumínio. Foram apresentadas fachadas nos dois materiais e mostrado o diferente comportamento que estas têm.

No capítulo 3, foram apresentadas as diferentes metodologias de cálculo usadas à temperatura normal, com o propósito de serem as fórmulas necessárias para os casos de estudo detalhando os resultados obtidos na b-face.

## **Capítulo 6**

---

# **Análises avançadas**

## **Análises avançadas**

- 6.1 Considerações gerais
- 6.2 Modelo numérico
- 6.3 Viga restringida lateralmente
- 6.4 Viga não restringida lateralmente
- 6.5 Considerações finais

## 6 ANÁLISES AVANÇADAS

### 6.1 Considerações gerais

Neste capítulo é realizado um estudo numérico sobre a resistência de elementos em aço carbono e em aço inoxidável a temperaturas elevadas. Pretende-se estudar o comportamento ao fogo de montantes-vigas das estruturas de fachadas sujeitas apenas a flexão simples, desprezando o peso próprio do material.

Para o auxílio destes estudos será usado o programa de elementos finitos SAFIR. Trata-se de um programa de elementos finitos que permite análises não lineares para modelação do comportamento de estruturas sujeitas ao fogo, possibilitando também o cálculo à temperatura normal.

Tendo em conta o aumento progressivo da temperatura, os elementos estruturais devem suportar as cargas atuantes em situação de acidente, durante o tempo de resistência ao fogo requerido. Os aumentos de temperatura nos elementos provocam alongamentos térmicos juntamente com reduções da resistência e rigidez. Com o aumento da temperatura devido a um incêndio, poderá ocorrer a plastificação da estrutura, tendo por consequência deformações irreversíveis.

As deformações são particularmente importantes nas fachadas envidraçadas devido ao facto de o vidro ser um material frágil. Para isso, são avaliados os deslocamentos em Z, na direção perpendicular ao plano da estrutura da fachada, e o momento resistente máximo para diferentes temperaturas e comprimentos do elemento.

O programa SAFIR tem vindo a ser aplicado com sucesso em vários casos de estudo, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com outros programas (Lopes, 2009).

### 6.2 Modelo numérico

Para a elaboração das seguintes análises, foram escolhidos diferentes casos de estudo, aplicando elementos finitos de casca. Cada elemento finito de casca tem quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó (3 translações e 3 rotações).

O cálculo é feito tendo como base um processo incremental, obtendo deslocamentos em cada nó e esforços nos pontos de integração de cada elemento até que se atinja o colapso da estrutura. Para este estudo, foram adotadas temperaturas a 20 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C.

Na Tabela 26 são apresentadas as secções transversais retangulares usadas no estudo dos montantes.

*Tabela 26 - Secções transversais usadas nas análises avançadas.*

<b>Perfil (mm)</b>	<b>Classe de aço</b>	<b>Comprimento</b>
<b>400x20</b>	S275	L=1 m; L=2 m; L=3 m; L=4
	S235	m; L=5 m; L=5,9 m
	1.4301	
<b>150x20</b>	S275	
	S235	
	1.4301	
<b>60x40</b>	S275	
	S235	
	1.4301	

Os montantes serão apenas estudados à flexão simples no eixo mais forte, simulando a ação do vento que ocorre no eixo mais forte.

A análise à deformada será limitada conforme a norma EN 1363-1 de ensaios experimentais à resistência ao fogo (CEN,2020). Como os elementos estão sujeitos à flexão usa-se as seguintes expressões:

Limitando a deformação:

$$D_{limit} = \frac{L^2}{400d} [mm] \quad (107)$$

Taxa da limitação da deformação:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} = \frac{L^2}{9000} [mm/min] \quad (108)$$

Em que,

$L$ , comprimento da barra;



$d$ , é a distância entre o extremo da fibra à zona de compressão com o extremo da fibra à zona de tração.

Segundo esta norma, a falha em suportar a carga de teste é considerada quando:

$$\text{Deformação medida} \geq 1.5 D_{limit} \quad (109)$$

Ou,

Quando  $D_{limit}$  e  $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit}$  são excedidos.

Neste trabalho apenas foi considerado o primeiro critério (expressão 109) para limitação da apresentação dos resultados. As análises são todas numéricas e o objetivo do estudo era a análise e compreensão do comportamento global dos elementos.

Através destas expressões é possível obter a deformação máxima medida para as três secções em estudo. Para a secção 400x20 mm resulta uma deformação máxima em testes ao fogo de 0.23 m, para uma secção de 150x20 mm de 0.63 m, e para uma secção de 60x40 mm de 1.56 m.

### 6.2.1 Malha

A malha adotada foi escolhida de forma a captar todos os modos de falha possíveis que podem ocorrer na barra. Foi feita uma análise de sensibilidade de modo a escolher a dimensão mais adequada da malha de elementos finitos.

- **Secção 400x20 mm**

Para a secção de 400x20 mm foi usado uma malha quadrada de 40x40 mm, como é apresentado em seguida na Figura 38.

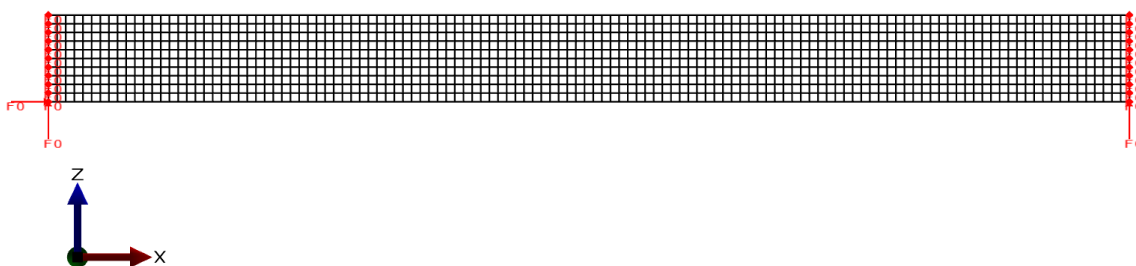


Figura 38 - Malha 40x40 mm usada na secção transversal 400x20 mm.

- **Secção 150x20 mm**

Na secção 150x20 mm não foi possível obter uma malha perfeitamente quadrada, então decidiu-se avaliar 2 modelos, o modelo de 15x40 mm e 30x40 mm. Estes estão representados, respetivamente, na Figura 39 e na Figura 40. Tendo-se obtido resultados semelhantes entre os dois testes, optou-se por usar a malha 30x40 mm.



Figura 39 - Malha 15x40 mm usada na secção transversal 150x20 mm.



Figura 40 - Malha 30x40 mm usada na secção transversal 150x20 mm.

- **Secção 60x40 mm**

Nesta secção também foram estudadas duas hipóteses, a primeira 30x40 mm, e a segunda 12x40 mm. O problema da malha 30x40 mm é o facto de o elemento apenas ter duas fiadas, como é apresentado na Figura 41. Por esse motivo, decidiu-se usar a malha 12x40 mm, como mostra a Figura 42.



Figura 41 - Malha 30x40 mm usada na secção transversal 60x40 mm.

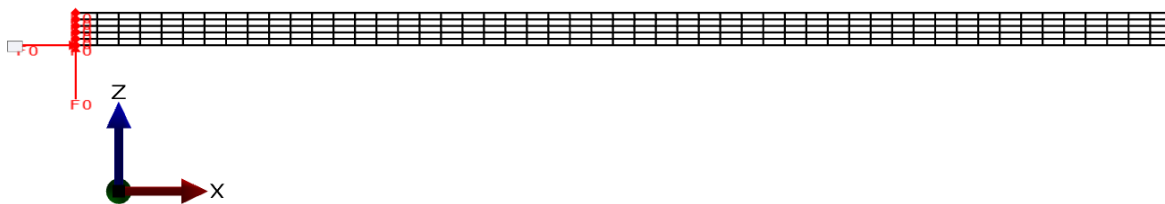


Figura 42 - Malha 12x40 mm usada na secção transversal 60x40 mm.


## 6.2.2 Leis constitutivas

As leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável já foram apresentadas, respetivamente, na secção 2.2.3 e secção 2.3.4.4.

## 6.2.3 Condições de apoio e carregamento

As restrições e as cargas aplicadas são as mesmas para qualquer uma das secções apresentadas anteriormente. Pretendeu-se simular um possível montante de uma fachada tradicional, as restrições da barra encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - Condições de apoio do estudo numérico.

	Apoio	Eixo de referência	Libertações axiais / transversais			Libertações de rotação			Comentário
			Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz	
			A	Global XYZ	x	x	-	-	
B	Global XYZ	x	x	x	-	-	-	Apoio inferior	

Na Figura 43, apresenta-se o modelo com as respectivas cargas e restrições. Considera-se uma carga uniforme de 32 N/m.

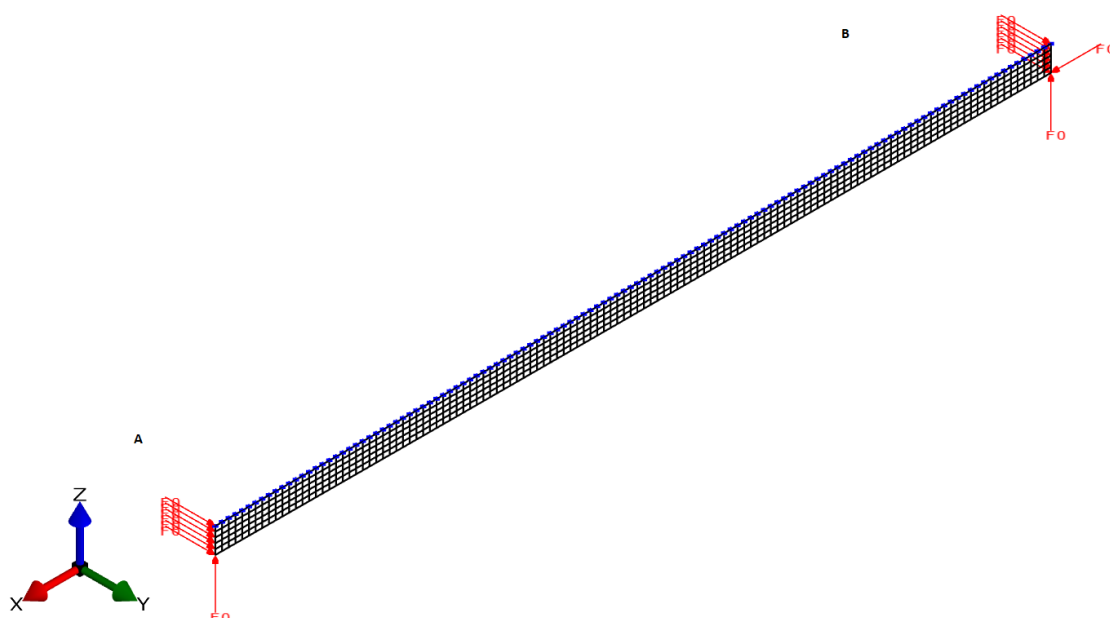


Figura 43 - Modelo numérico com cargas e restrições.

### 6.2.4 Imperfeições

Não existem peças estruturais em que a geometria teórica projetada seja exatamente igual à que foi concebida na prática. A existência destes desvios faz com que seja necessário considerar regulamentos para minimizar estas discordâncias, sendo a EN1090 a mais conhecida (Rocha & Gomes, 2014).

Na norma EN1090 – *Execução de estruturas de aço e de alumínio* são definidas várias tolerâncias dimensionais para o fabrico de elementos estruturas, ou fornecidas indicações onde estas tolerâncias podem ser encontradas (CEN, 2005d).

As imperfeições podem ocorrer devido a várias naturezas, tensões residuais resultantes do processo de fabrico, variação das propriedades mecânicas nas zonas afetadas pelo calor e até variações geométricas da secção transversal (Georgantzia *et al.*, 2021). É essencial considerar as imperfeições no dimensionamento de uma barra, devido aos esforços de compressão ou flexão a barra perde resistência à encurvadura.

As duas imperfeições mais importantes a considerar são as imperfeições geométricas globais e tensões residuais resultantes do fabrico. Neste caso não são consideradas imperfeições geométricas locais, por se ter concluído que a secção transversal não é suficientemente esbelta (Couto & Vila Real, 2019).

A imperfeição inicial global está definida norma EN1090, em que:

$$e_o \geq \frac{L}{1000} \quad (127)$$

Onde,

$e_o$ , imperfeição geométrica;

$L$ , comprimento da barra.

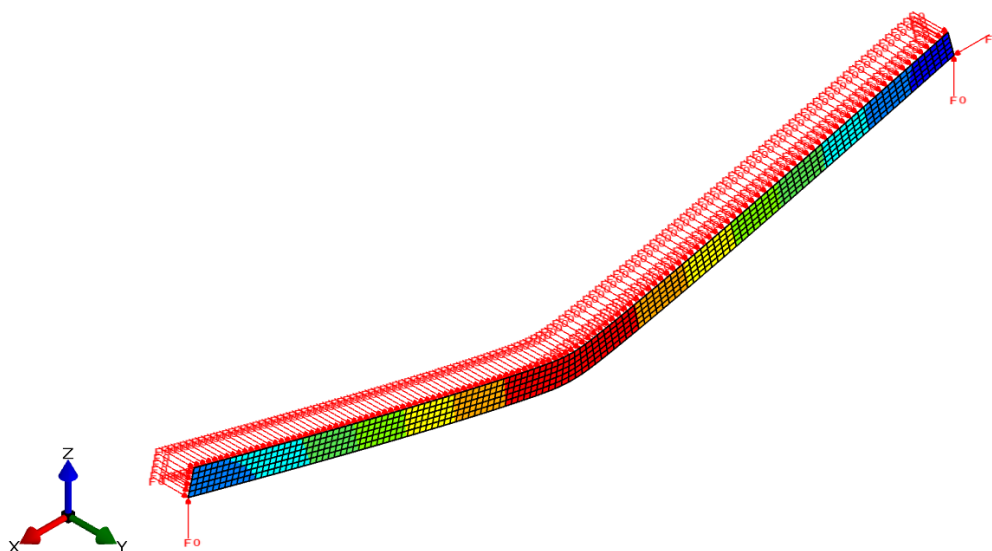
As tensões residuais podem ter várias direções, sendo a direção mais relevante a longitudinal (Cruise & Gardner, 2008). Neste caso de estudo não foram consideradas as tensões residuais, através da bibliografia concluiu-se que a sua influência não era significativa.

### 6.3 Viga restringida lateralmente

Num primeiro caso, as vigas são restringidas lateralmente para avaliar a resistência apenas da secção, ou seja, caso não ocorra encurvadura lateral, não haverá deformação no plano dos vidros (em Y).

Neste subcapítulo a barras estudadas têm um comprimento de 5 m a uma temperatura de 20 °C e 600 °C.

A avaliação será feita na deformação na direção do eixo mais forte. Sendo assim, a deformação em Z a meio vão é vertical, já que se trata de uma viga simplesmente apoiada e restringida, como mostra a Figura 44.

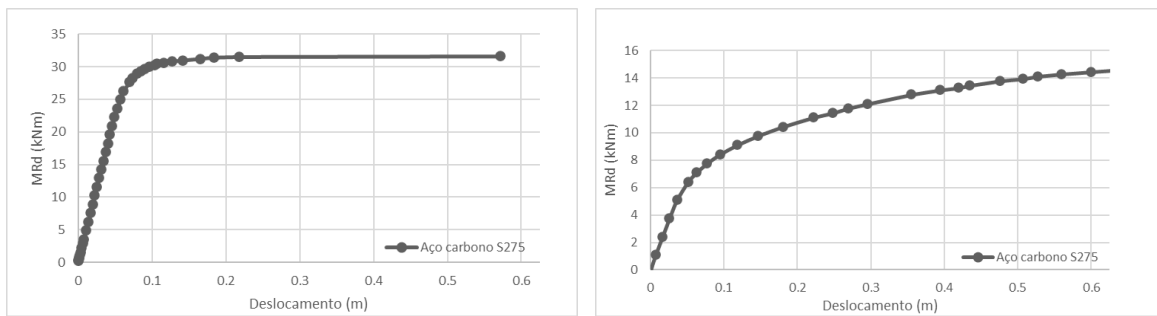


*Figura 44 - Deformada a meio vão de uma viga restringida lateralmente.*

### **6.3.1 Aço carbono de classe S275**

- **Secção 150x20 mm**

Na Figura 45 a 20 °C é possível observar que aço carbono está a entrar no patamar de cedência, apresentando o limite de escoamento bem definido. Já a 600 °C, o material apresenta um comportamento não linear.



a)

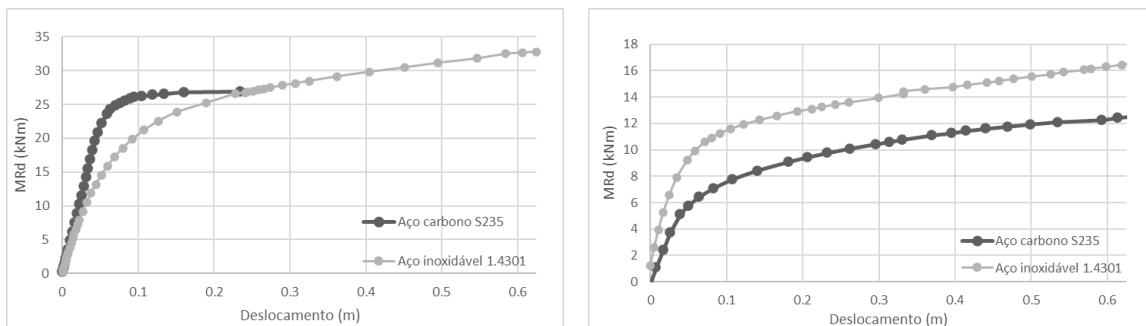
b)

Figura 45 - Resistência da secção restringida 150x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C.

### 6.3.2 Aço inoxidável e aço carbono de classe s235

- Secção 150x20 mm

Mudando a classe de aço carbono, é possível verificar que a diferente tensão de cedência influencia a resistência para esta secção retangular cheia quando se trata de uma barra restringida. Altas temperaturas tendem a promover o comportamento dúctil, pelo que o aço carbono não possui um patamar de escoamento, como é evidenciado na Figura 46.



a)

b)

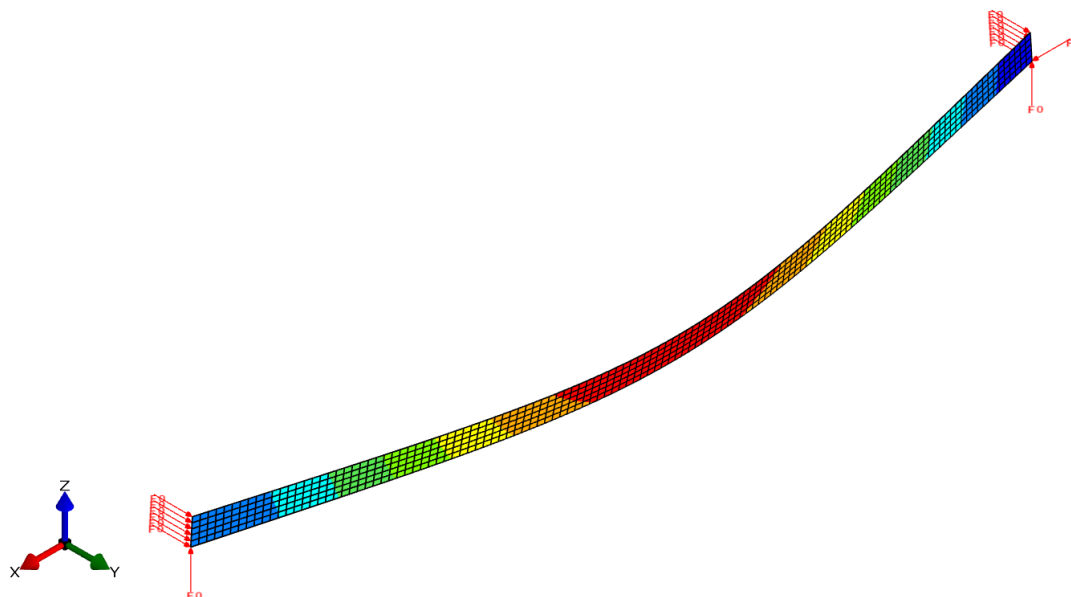
Figura 46 - Resistência da secção restringida 150x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C.

## 6.4 Viga não restringida lateralmente

Neste estudo, as vigas não são restringidas lateralmente, permitindo a ocorrência de encurvadura lateral, assim sendo, haverá deformação tanto no plano dos vidros (em Y) como na direção perpendicular ao plano da estrutura da fachada (em Z).

Neste subcapítulo, tal como no anterior, as barras estudadas têm um comprimento de 5m a uma temperatura de 20 °C e 600 °C.

A avaliação será feita na deformação, mais uma vez na direção do eixo mais forte. Sendo assim, a deformação em Z é estudada a meio vão, já que se trata de uma viga simplesmente apoiada, como mostra a Figura 47.



*Figura 47 - Deformada a meio vão de uma viga não restringida lateralmente.*

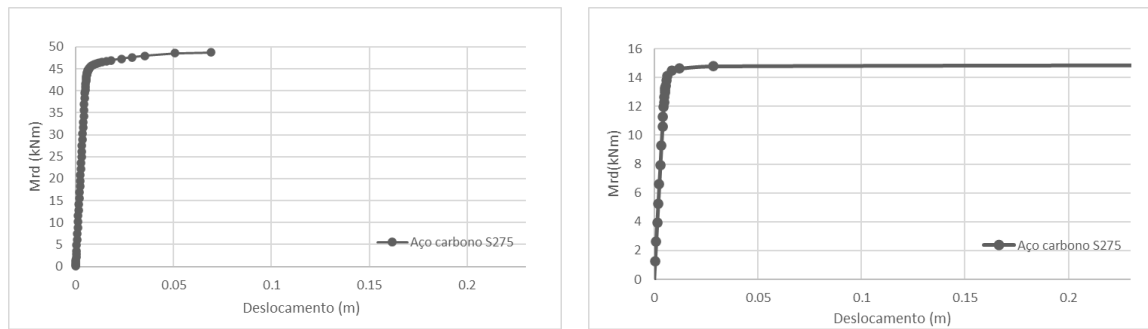
### **6.4.1 Aço carbono de classe S275**

Inicialmente, estudou-se o comportamento do aço carbono sendo de classe S275, devido ao facto desta classe ter sido usada no Teatro do Jordão.

- **Secção 400x20 mm**

Na Figura 48 observa-se a secção 400x20 mm à temperatura de 20 °C e de 600 °C. O material representado é um o aço carbono de classe S275.





a)

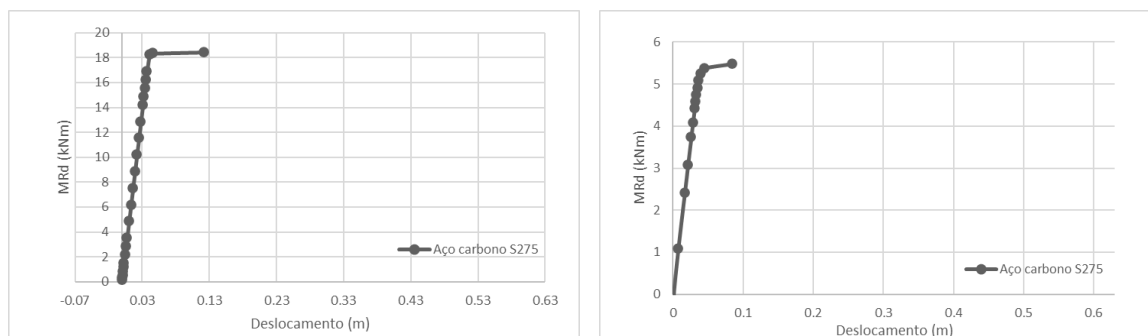
b)

Figura 48 - Resistência da secção não restringida 400x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C.

• **Secção 150x20 mm**

Outra secção estudada foi de 150x20 mm, a mesma que foi usada no montante do Teatro do Jordão. Efetivamente, esta análise é relevante para perceber o comportamento que o material teria ao fogo, como mostra a Figura 49.

Esta secção, comparativamente com a de 400x20 mm, resiste a um momento resistente inferior.



a)

b)

Figura 49 - Resistência da secção não restringida 150x20 mm do aço carbono S275: a) 20 °C; b) 600 °C.

**6.4.2 Aço inoxidável e aço carbono de classe S235**

Com o objetivo de comparar ambos os aços com mais eficiência, decidiu-se usar um aço carbono com uma tensão de cedência mais próxima do aço inoxidável 1.4301, nomeadamente o aço carbono de classe S235.

O aço carbono S235 será comparado ao aço inoxidável 1.4301, as tensões de cedência destes materiais são, respetivamente, 235 MPa e 210 MPa para um  $t \leq 75$  mm.

Neste subcapítulo a barras estudadas têm um comprimento de 5m e uma temperatura de 20 °C e 600 °C.

- **Secção 400x20 mm**

Através da análise gráfica feita na Figura 50, é possível concluir que se obtém um momento resistente aproximadamente igual àquele que foi o resultado no aço carbono de classe S235. A diferente tensão de cedência destas duas classes não provoca uma melhoria da resistência, como o módulo de elasticidade do aço carbono S235 é o mesmo do aço carbono S275, conclui-se que, para estas secções não restringidas, é o módulo de elasticidade que determina a melhoria da resistência.

A 600 °C verifica-se uma troca quanto ao material que resiste melhor, em comparação com a análise à temperatura normal, o comportamento mecânico do aço inoxidável passa a ser o melhor quando se trata de temperaturas elevadas, devido às já referidas reduções nas propriedades mecânicas dos aços a altas temperaturas.

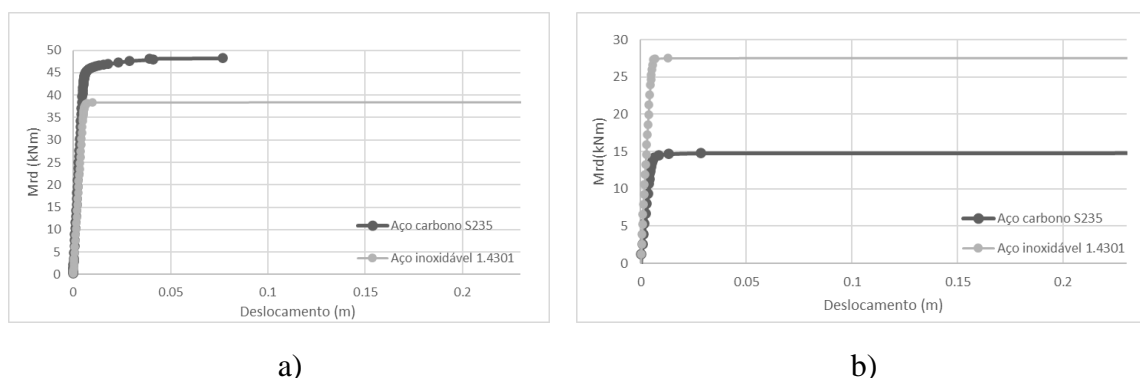


Figura 50 - Resistência da secção não restringida 400x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C.

- **Secção 150x20 mm**

Para além das conclusões tiradas nas secções anteriores, na Figura 51, distingue-se claramente o comportamento dos dois materiais. Mais uma vez, prova-se que para este tipo de secções retangulares sólidas, quando a viga não está restringida, o aumento da tensão de cedência devido às diferentes classes de aço carbono usados não é preponderante para uma melhoria significativa da sua resistência. Esta conclusão é relevante pois permite obter um

comportamento igualmente satisfatório, otimizando o material prevenindo gastos desnecessários em classes superiores.

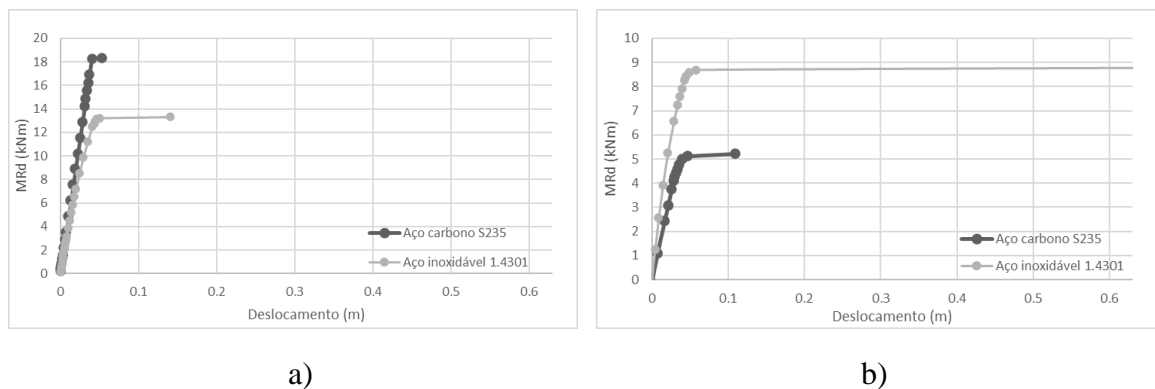


Figura 51 - Resistência da secção não restringida 150x20 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C.

• **Secção 60x40 mm**

Desta vez, pretende-se estudar uma secção em que o eixo mais fraco não tenha tanta discrepância com o eixo mais forte, por isso decidiu-se usar uma nova secção 60x40 mm.

Nesta secção verifica-se que a encurvadura lateral é muito baixa, praticamente inexistente, uma vez que a secção transversal possui inércias semelhantes em torno dos dois eixos.

Nestas análises há deformações no eixo em Z demasiado elevadas, chegando até 2 metros, dado que o programa reconhece esta barra como uma corda e não como uma viga. Esta análise não faz sentido e por esse motivo limita-se a deformação de acordo com a norma EN 1363-1, em conformidade com a expressão 109 obtêm-se um deslocamento de 1.576 m (CEN, 2020). Como mostra a Figura 52.

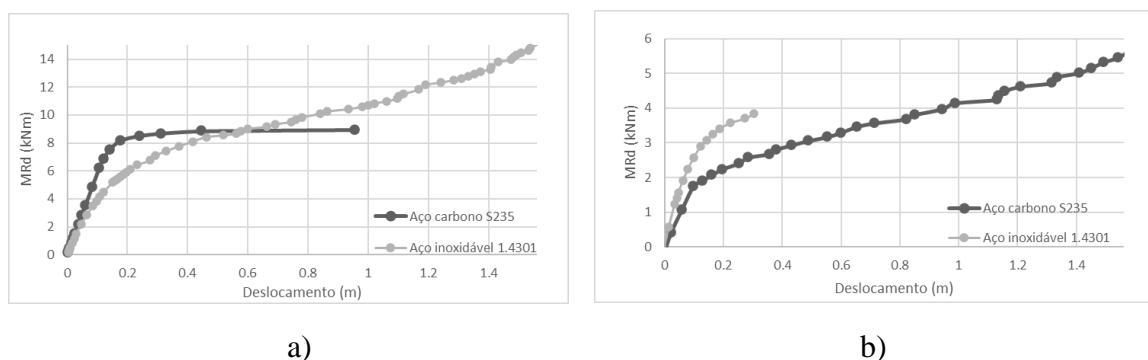


Figura 52 - Resistência da secção não restringida 60x40 mm do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301: a) 20 °C; b) 600 °C.

### **6.4.3 Curvas de encurvadura lateral**

Para a obtenção dos resultados obtidos na Figura 53 e na Figura 54 foram considerados os valores numéricos do SAFIR. Estes valores foram comparados com a curva de encurvadura lateral obtida através do uso das fórmulas apresentadas no capítulo 4 de acordo com a Parte 1-2 do EC3.

Foi usado aço carbono de classe S235 e aço inoxidável de classe 1.4301, ambos os elementos são sujeitos a uma carga uniformemente distribuída ao longo do perfil de secção retangular sólido (150x20 mm). Este carregamento faz com que seja estudada a flexão simples do elemento no programa SAFIR.

Foram usados diversos comprimentos, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, e 5.9 m. Além disso, estas barras foram sujeitas à temperatura de 500 °C, 600 °C e 700 °C.

É possível, também, observar que quanto maior é o comprimento do elemento, as curvas de interação vão baixando, assim como os resultados numéricos.

A metodologia de cálculo da Parte 1-4 do EC3 e a metodologia de cálculo da parte 1-2 do EC3, respetivamente representadas na Figura 53 e na Figura 54, encontram-se do lado da segurança em todos os comprimentos estudados exceto para o comprimento de 1 m. Para o comprimento de 1 m, ambos os casos ficam em baixo da curva de cálculo do EC3, eventualmente, devido a algum problema com o modelo de elementos finitos para comprimentos curtos ou até mesmo devido a outro fenómeno de instabilidade não estudado, estes resultados no futuro devem ser melhor analisados.

Apenas se estudou o elemento até ao comprimento de 5.9 m, visto que para comprimentos superiores, já começa a ser uma escolha de secção transversal irrealista dado a secção ser demasiado esbelta.

Para valores obtidos a temperaturas mais baixas observa-se que os valores são próximos, enquanto para temperaturas mais elevadas, os valores são mais dispersos. À medida que a esbelteza aumenta, os resultados também se vão aproximando.

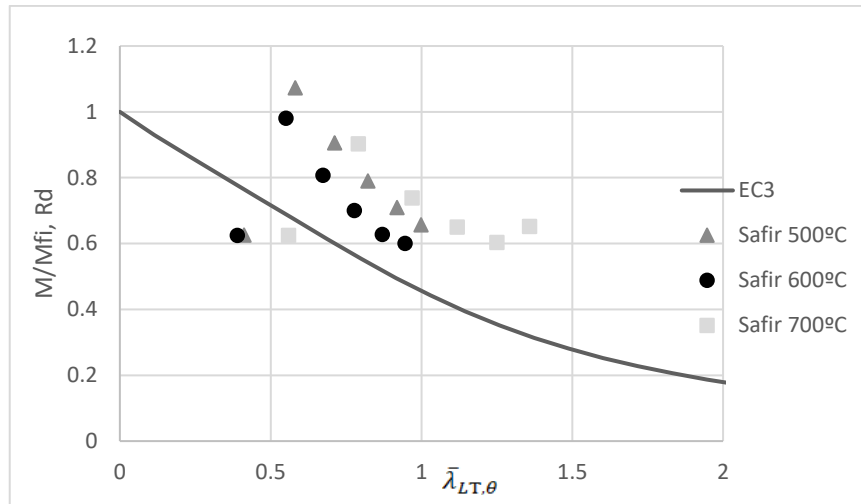


Figura 53 - Curva da encurvadura do aço carbono.

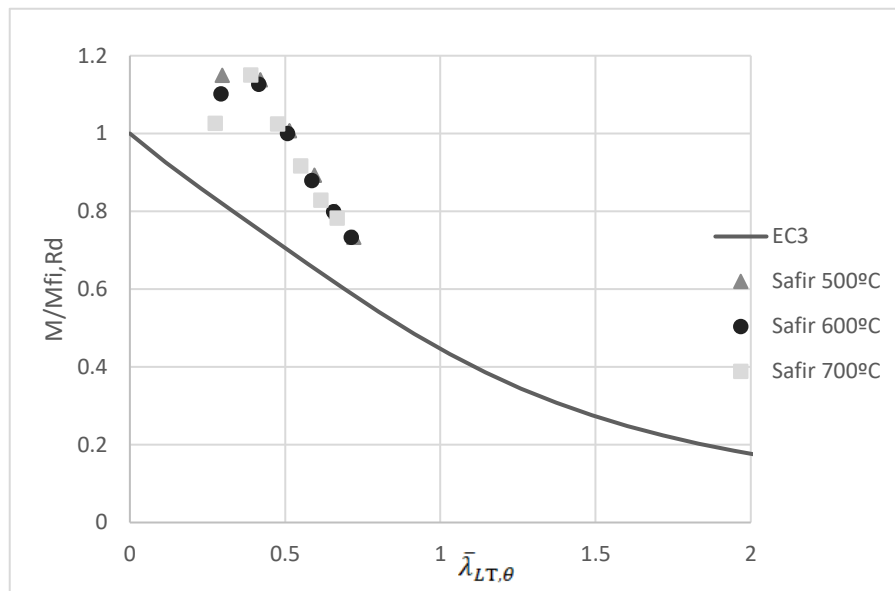


Figura 54 - Curva da encurvadura do aço inoxidável.

## 6.6 Considerações finais

Neste capítulo foram feitas análises numéricas, baseados na análise de elementos finitos, com o objetivo de melhor se compreender a resistência da secção transversal e do elemento de vigas em aço carbono e em aço inoxidável com secção retangular cheia.

Usaram-se diferentes perfis em aço carbono e aço inoxidável sujeitos a esforços de flexão, de forma a comparar a resistência obtida.

Os dois materiais têm comportamentos mecânicos distintos, tal como já foi evidenciado nos capítulos anteriores, esses comportamentos são demonstrados para diferentes temperaturas, 20 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C.

Foram realizadas análises para diferentes comprimentos dos elementos de modo que se pudesse verificar os efeitos que o fenómeno de encurvadura lateral pode causar, valores estes que foram comparados com a metodologia apresentada pelo EC3.

Os valores apresentados de acordo com o EC3 foram realizados segundo a metodologia apresentada no Capítulo 4. Foi possível, então, concluir que os valores obtidos pelo EC3 são mais conservativos quando comparados com os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR.

Conclui-se que o aço inoxidável se torna um material especialmente interessante para barras com comprimentos maiores, quando o comprimento da barra é pequeno, o comportamento mecânico ao fogo não será suficientemente interessante para a sua utilização.

## **Capítulo 7**

---

### **Considerações finais**

## **Considerações finais**

7.1 Conclusões

7.2 Desenvolvimentos futuros



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo analisar soluções para elementos estruturais de fachadas, principalmente em aço inoxidável e alumínio, mas também em aço carbono, no âmbito de um estágio curricular na empresa b-face.

Inicialmente, abordaram-se algumas considerações dos materiais, enumerando algumas aplicações e mencionando as principais características do material, salientando as vantagens da sua utilização bem como as desvantagens, fazendo também referência às suas propriedades mecânicas.

Posteriormente, descreveram-se as regras de cálculo à temperatura normal e ao fogo que foram tidas em conta ao longo desta dissertação, relativamente à classificação das secções, resistência da secção e resistência do elemento.

Para um estudo complementar, foram, também, analisados elementos estruturais em aço inoxidável, de forma a obter uma comparação entre a utilização de fachadas em aço carbono com aço inoxidável, ainda que na empresa b-face, o material mais usado seja o alumínio ou o aço carbono para elementos estruturais.

Relativamente ao estudo numérico, desenvolvido com o auxílio do programa SAFIR, foram analisados o aço carbono e o aço inoxidável, dado que o alumínio não apresenta resistência relevante a altas temperaturas.

Através da análise numérica foram obtidos gráficos comparativos dos dois materiais sujeitos às mesmas condições, o que permitiu complementar o estudo já descrito nos capítulos anteriores sobre os seus diferentes comportamentos mecânicos a altas temperaturas.

Os perfis em análise foram todos estudados para uma resistência à flexão simples em situação de incêndio, obtidos através da metodologia do EC3 e da aproximação da lei constitutiva proposta de cada material. Através da análise feita em alguns dos gráficos obtidos, é possível verificar o comportamento linear que ocorre no aço carbono na parte elástica e o comportamento não linear do aço inoxidável nesta mesma fase. O estudo

realizado é particularmente importante devido às características das secções transversais, já que, como as secções não têm paredes, considera-se que a secção é estudada na fase elástica.

Além de diferentes temperaturas estudadas, também foram usados diferentes comprimentos de vigas, permitindo avaliar diferentes curvas de interação neste estudo numérico.

Em resumo, a precisão das fórmulas de dimensionamento ao fogo dadas pelo Parte 1-2 do EC 3 e pela Parte 1-4 do EC3 para a resistência à encurvadura lateral produzem resultados que se situam do lado da segurança, sendo por vezes demasiado conservativos comparativamente com os resultados obtidos através do SAFIR para secções retangulares.

A realização do estágio em simultâneo com a concretização do estudo apresentado nesta dissertação teve os seus desafios. No entanto, considera-se que foi uma experiência definitivamente positiva e aconselhável. Esta escolha demonstrou ser uma oportunidade, através da qual se possibilitou o contacto com a realidade do mundo profissional e empresarial, tendo sido possível aplicar os conceitos aprendidos academicamente.

Em suma, o trabalho realizado em gabinete de projeto, desenvolvendo atividades inerentes às funções de um projetista, possibilitou, ainda, uma componente importante de inserção no ambiente de trabalho de uma empresa, com engenheiros dotados de uma vasta experiência, sendo certamente uma mais-valia, aquando do início da vida profissional.

## **7.2 Desenvolvimentos futuros**

Após a análise ao trabalho realizado na presente dissertação, alguns aspetos relevantes ficaram por mencionar.

No estudo numérico realizado foram usados o aço carbono e o aço inoxidável, pelo que seria interessante fazer essa mesma análise para o alumínio, estudando mais aprofundadamente este material a elevadas temperaturas.

Todos os resultados numéricos do aço inoxidável foram realizados apenas para uma classe 1.4301. Assim, seria pertinente ampliar este estudo para outras classes como por exemplo a classe 1.4003 ou 1.4462.

Neste trabalho, os elementos estavam apenas sujeitos à flexão, pelo que, numa futura linha de investigação, seria interessante simular casos de estudo de fachadas tradicionais combinando o momento fletor com o esforço axial (flexão composta).

De certa forma, também seria conveniente usar secções transversais mais esbeltas, sugerindo-se também a utilização de perfis tubulares.

Por fim, de forma a complementar os estudos numéricos realizados, devem ser desenvolvidos estudos experimentais, para uma melhor compreensão do comportamento real da estrutura, dando, assim, continuidade, também às comparações com a Parte 1-2 do EC 3 e a Parte 1-4 do EC3.



---

## **Referências bibliográficas**



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL. (2013). *"Fundamentos E Aplicações do Alumínio"*. Associação Brasileira Do Alumínio, 1(5511), 497–504.
- Akbari, M., Gunalan, S., Gilbert, B. P., Guan, H., & Baleshan, B. (2020). *"Experimental investigation on the bearing behaviour of aluminium sub-heads in façade systems"*. *Thin-Walled Structures*, 156(May), 106867. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106867>.
- Aluminium Leader. (2020). *"Aluminium history"*. ALUMINIUM HISTORY. [https://www.aluminiumleader.com/history/industry\\_history/](https://www.aluminiumleader.com/history/industry_history/)
- An, R. F. O. R. M., Ng, D. I., & Ut, S. O. L. (2020). *"Lasting innovation 50 years of structural silicone glazing success"*.
- ASSDA. (2020). *"Recycling"*. <https://www.assda.asn.au/technical-info/environment-health-and-safety/recycling>.
- Associação Brasileira do Alumínio. (2019). *"História do Alumínio"*. <https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>.
- Associação Portuguesa do Alumínio. (2016). *"O Alumínio na construção"*. <http://www.apal.pt/index.php/o-aluminio/o-aluminio-na-construcao>.
- b-face. (2021). *"City gate project"*. [https://b-face.pt/city\\_gate\\_house/](https://b-face.pt/city_gate_house/).
- b-face. (2020). *"A nossa história"*. <https://b-face.pt>.
- Bhadeshia & Honeycombe. (2017) *"Steels: Microstructure and Properties"*.
- Camposinhos, R. de S. (2017). *"Manual de Dimensionamento de Fachadas Envidraçadas"*. (A. Lamas (ed.)). Construção Metálica e Mista.
- CEN, European Committee for Standardisation (2005a). *"EN 1993-1-1, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings"*, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2005b). *"EN 1993-1-2, Eurocode 3 - Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design"*, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2005c). *"EN 10088-2, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting"*

- steels for general purposes*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2005d). “*EN 1090–2, Execution of Steel and aluminium Structures – Part 2: Technical Requirements for the execution of steel structures*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2006a). “*EN 1993-1-4, Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 1-4: General rules*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2006b). “*EN 10088–1, Stainless steels – Part 1: List of stainless steels*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2007a). “*EN 1999-1-1, Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-1: General Structural rules*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2007b). “*EN 1999-1-2, Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2009a). “*EN 1990, Eurocode 0 – Basics of structural design*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2009b). “*EN 1991-1-4, Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation (2015). “*EN 13830, Curtain walling - Product standard*”, Brussels, Belgium.
- Chakrapani, P., & Suryakumari, T. S. A. (2020). “*Mechanical properties of aluminium metal matrix composites*”. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.247>.
- Couto, C., & Vila Real, P. (2019). “*Numerical investigation on the influence of imperfections in the local buckling of thin-walled I-shaped sections. Thin-Walled Structures*”, 135(June 2018), 89–108. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.039>.
- Cruise, R. B., & Gardner, L. (2008). “*Residual stress analysis of structural stainless steel sections*”. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(3), 352–366. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.08.001>.
- Dave Rogers. (2019). “*Mace to revamp former Bloomberg office*”. *Building*. <https://www.building.co.uk/news/mace-to-revamp-former-bloomberg-office/5100591.article>.
- Euro Inox. (2013). “*Innovative Facades in Stainless Steel*”.



- [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image/files/PDF/Euro\\_Inox/Innovative\\_facades\\_EN.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image/files/PDF/Euro_Inox/Innovative_facades_EN.pdf).
- EvertonFC. (2021). "Everton stadium plans given green light". <https://www.evertonfc.com/news/2077930/everton-stadium-plans-given-green-light>.
- Franssen, J.-M.; Gernay, T. (2017) "Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities", Journal of Structural Fire Engineering.
- Galéa, Y. (2002). "Déversement élastique d'une poutre à section bi-symétrique soumise à des moments d'extrémité et une charge répartie ou concentrée". *Revue Construction Métallique N° 2, 1*.
- Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). "Aluminium alloys as structural material: A review of research". *Engineering Structures*, 227, 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>.
- Great Plains Stainless. (2018). "Aço inoxidável: uma história". <https://www.gpss.com/stainless-steel-history/>.
- Jiang, S., Xiong, Z., Guo, X., & He, Z. (2018). "Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions". *Thin-Walled Structures*, 124(1239), 523–537. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.035>.
- Liu, M., Zhang, L., Wang, P., & Chang, Y. (2015). "Experimental investigation on local buckling behaviors of stiffened closed-section thin-walled aluminum alloy columns under compression". *Thin-Walled Structures*, 94, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.04.012>.
- Lopes, N. (2009). "Behaviour of stainless steel structures in case of fire". Tese submetida à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- Maljaars, J., Twilt, L., & Soetens, F. (2009). "Flexural buckling of fire exposed aluminium columns". *Fire Safety Journal*, 44(5), 711–717. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.02.002>.
- Nacheman, R. (2014). "Façade Evaluation and Repair of an Engineering Landmark". The Empire State Building. <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/09/Empire-State-Building.pdf>.
- Novum. (2020). "Rocket Mortgage Fieldhouse". <https://novumstructures.com/project/rocket-mortgage-fieldhouse/>.

- NVE. (2019). "TEATRO JORDÃO - UMA OBRA PARA RESGATAR AS MEMÓRIAS". <http://www.nve.pt/pt/communication/teatro-jordao-uma-obra-para-resgatar-as-memorias.html>.
- Palanivendhan, M., Chandaradass, J., & Philip, J. (2020). "Materials Today : Proceedings Fabrication and mechanical properties of aluminium alloy / bagasse ash composite by stir casting method". *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.458>.
- Pinho, E. (2012). "Caracterização mecânica e análise da resistência à corrosão em diferentes solos, de aços inoxidáveis duplex". Dissertação submetida ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.
- Pinto, A. (2013). "Estruturas metálicas temporárias". Dissertação submetida à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- Poojitha, V., Raghu, T., & Pandurangadu, V. (2019). "Microstructure evolution and mechanical behaviour of pure aluminium and aluminium alloys processed through constrained groove pressing". *Materials Today: Proceedings*, 18, 2335–2344. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.017>.
- Real, E., & Mirambell, E. (2005). "Flexural behaviour of stainless steel beams". *Engineering Structures*, 27(10), 1465–1475. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.008>.
- Rocha, N., & Gomes, C. (2014). "Avaliação da contribuição das tensões residuais no comportamento estrutural de colunas e arcos tubulares Engenharia Civil".
- Samal, P., Vundavilli, P. R., Meher, A., & Mahapatra, M. M. (2020). "Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties". *Journal of Manufacturing Processes*, 59(September), 131–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.010>.
- Sayed, M. A. A. E. D. A., & Fikry, M. A. (2019). "Impact of glass facades on internal environment of buildings in hot arid zone". *Alexandria Engineering Journal*, 58(3), 1063–1075. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.09.009>.
- SCI, S. C. I. (2017). "Manual de Dimensionamento de Estruturas em Aço Inoxidável - Versão portuguesa da 4ª edição".
- Shellbuckling. (2021). "Lateral torsional buckling".

- [https://shellbuckling.com/presentations/thinWalledBeamColumns/pages/page\\_3.html](https://shellbuckling.com/presentations/thinWalledBeamColumns/pages/page_3.html).
- Sillekens, W.H., Jarvis, D.J., Vorozhtsov, A. et al. "The ExoMet Project: EU/ESA Research on High-Performance Light-Metal Alloys and Nanocomposites". *Metall Mater Trans A* 45, 3349–3361 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2321-27>.
- Standard, B. (1999). "Barriers in and about buildings  $\mathcal{D}$  Code of practice".
- Sun, Y., Liang, Y., & Zhao, O. (2020). "Local–flexural interactive buckling behaviour and resistances of high-chromium stainless steel slender welded I-section columns". *Engineering Structures*, 220(June), 111022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111022>.
- Totten, George E.; Mackenzie, D. Scott. (2003). "Handbook of Aluminium", USA.
- Vargel, C. (2020). "Corrosion of Aluminium: second edition".
- Vila Real, P. (2003). "Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural". Amadora: Edições Orion
- Vila Real, P, "Manual de dimensionamento ao fogo de estruturas metálicas", Edição CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, ISBN: 978-989-99251-8-2, abril de 2021.
- Wang, L., Hu, M., & Young, B. (2021). "Tests of aluminum alloy perforated built-up sections subjected to bending". *Thin-Walled Structures*, 158(August 2020), 107136. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107136>.
- Zhou, M., Cardoso, R. P. R., Bahai, H., & Usmani, A. (2020). "A thermo-mechanical analysis of stainless steel structures in fire". *Engineering Structures*, 210(February), 110091. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110091>.



---

**Anexo**



## ANEXO

## STEEL DESIGN

CODE: EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

ANALYSIS TYPE: Member Verification

## CODE GROUP:

MEMBER: 2 Bar B-face\_2  
= 0.02 m

POINT: 2

COORDINATE: x = 0.00 L

## LOADS:

Governing Load Case: 11 1.35D+1.5Ws 1\*1.35+2\*1.50

## MATERIAL:

S 275 ( S 275 )  $f_y = 275.00$  MPa



## SECTION PARAMETERS: RECT\_1

h=150.0 mm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=20.0 mm	Ay=30.00 cm <sup>2</sup>	Az=30.00 cm <sup>2</sup>	Ax=30.00 cm <sup>2</sup>
tw=10.0 mm	Iy=562.50 cm <sup>4</sup>	Iz=10.00 cm <sup>4</sup>	Ix=36.64 cm <sup>4</sup>
tf=10.0 mm	Wely=75.00 cm <sup>3</sup>	Welz=10.00 cm <sup>3</sup>	

## INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N,Ed = 1.55 kN	My,Ed = -0.10 kN*m		
Nc,Rd = 825.00 kN	My,Ed,max = -7.49 kN*m		
Nb,Rd = 7.91 kN	My,c,Rd = 20.62 kN*m	Vz,Ed = -5.76 kN	
		Tau,z,max,Ed = -2.88	
MPa			
	Mb,Rd = 8.71 kN*m		
			Class of section = 3



## LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

z = 1.00	Mcr = 17.29 kN*m	Curve,LT - d	XLT = 0.42
Lcr,low=5.00 m	Lam_LT = 1.09	fi,LT = 1.44	

## BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

Ly = 5.00 m	Lam_y = 1.33
Lcr,y = 5.00 m	Xy = 0.38
Lamy = 115.47	ky = 1.04



About z axis:

Lz = 5.00 m	Lam_z = 9.98
Lcr,z = 5.00 m	Xz = 0.01
Lamz = 866.03	kyz = 0.85

Torsional buckling:

Curve,T=c      alfa,T=0.49

Flexural-torsional buckling

Curve,TF=c      alfa,TF=0.49

Lt=5.00 m	fi,T=0.53	Ncr,y=466.34 kN	fi,TF=1.66
Ncr,T=15297.25 kN	X,T=0.98	Ncr,TF=466.34 kN	X,TF=0.38
Lam_T=0.23	Nb,T,Rd=811.47 kN	Lam_TF=1.33	Nb,TF,Rd=310.50 kN

---

-----  
**VERIFICATION FORMULAS:**

**Section strength check:**

$$M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.5.(1))$$

$$N_{y,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.1(7))$$

$$\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{z,max,Ed})^2} / (f_y / \gamma_{M0}) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$\tau_{z,max,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6.(4))$$

**Global stability check of member:**

$$\lambda_{y} = 115.47 < \lambda_{max} = 300.00 \quad \lambda_{z} = 866.03 > \lambda_{max} = 300.00$$

INSTABLE

$$N_{y,Ed} / \min(N_{b,Rd}, N_{t,Rd}, N_{b,TF,Rd}) = 0.20 < 1.00 \quad (6.3.1)$$

$$M_{y,Ed,max} / M_{b,Rd} = 0.86 < 1.00 \quad (6.3.2.1.(1))$$

$$N_{y,Ed} / (X_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed,max} / (X_{LT} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}) = 0.90 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{y,Ed} / (X_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed,max} / (X_{LT} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}) = 0.93 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

---

-----  
**Section OK !!!**