

Verificação da segurança de elementos estruturais em alumínio

Gonçalo Filipe Bernardino Marques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Pedro António Martins Mendes

Júri

Presidente: Prof. Luís Manuel Coelho Guerreiro

Orientador: Prof. Pedro António Martins Mendes

Vogal: Prof. Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Julho de 2016

Agradecimentos

Agradeço, como não poderia deixar de ser, ao Professor Pedro António Martins Mendes pela oportunidade que me concedeu para realizar este trabalho, assim como toda a disponibilidade e paciência demonstrada durante o período de desenvolvimento da dissertação.

Agradeço também aos meus amigos e futuros engenheiros pelo apoio mútuo e espírito de ajuda que vigorou não só durante o desenvolvimento deste trabalho mas também ao longo de todo o Mestrado.

À minha família, e em especial aos meus pais, agradeço pela oportunidade que me deram, por todo o apoio e motivação prestada ao longo dos últimos anos e que permitiu a elaboração deste documento.

Resumo e palavras-chave

A presente dissertação tem por objectivo o desenvolvimento de conhecimentos relativos à verificação da segurança de elementos estruturais constituídos por ligas de alumínio, com base nas regras de dimensionamento constantes do Eurocódigo 9.

Numa primeira fase, são apresentadas as ligas de alumínio existentes, com particular destaque para as que são mais apropriadas à utilização como material estrutural, enfatizando as suas características enquanto material estrutural. Adicionalmente, são apresentados os critérios actualmente aceites para a verificação da segurança de elementos estruturais, com particular destaque para as regras e princípios mais relevantes de entre os dispostos no Eurocódigo 9.

De seguida, a metodologia presente no Eurocódigo 9 é ilustrada com a verificação da segurança de alguns elementos e ligações numa estrutura reticulada.

Palavras-chave: estruturas; alumínio; dimensionamento; Eurocódigo 9

Abstract

This thesis aims at the development of knowledge concerning the design of structural components made of aluminium alloys, according with the design rules given in Eurocode 9: Design of Aluminium Structures.

The existing aluminium alloys are presented, especially those that are most appropriate for use as a structural material, emphasizing their features as a structural material. Additionally, the criteria currently accepted for the safety verification of structural elements, with particular emphasis on the most relevant rules and principles given in Eurocode 9, are presented.

Then, the methodology presented by Eurocode 9 is illustrated with the safety verification of some elements and connections in a defined framed structure.

Keywords: structures, aluminium, design, Eurocode 9

Índice

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Estrutura e organização	2
2.	O ALUMÍNIO ESTRUTURAL	3
2.1	História do alumínio	3
2.2	Propriedades do alumínio	3
2.2.1	Características gerais.....	4
2.2.2	Ligas de alumínio.....	6
2.2.3	Zonas afectadas pelo calor	11
2.2.4	Processo de fabrico.....	12
2.2.5	Ligações	12
2.2.6	Sustentabilidade ambiental	13
2.3	Campos de aplicação estrutural	14
3.	REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL.....	15
3.1	O Eurocódigo 9 (EN 1999): Projecto de estruturas de alumínio	15
3.2	O dimensionamento de acordo com a EN 1999.....	15
3.2.1	Verificação da segurança de vigas sujeitas a flexão simples	19
3.2.1.1	Classificação das secções	19
3.2.1.2	Zonas afectadas pelo calor	22
3.2.1.3	Resistência à flexão das secções transversais.....	23
3.2.1.4	Resistência ao esforço transversal de vigas de alma cheia	24
3.2.1.5	Verificação à encurvadura do banzo no plano da alma	27
3.2.1.6	Resistência da alma a cargas transversais aplicadas num banzo.....	27
3.2.1.7	Resistência à encurvadura lateral	29
3.2.1.8	Controlo dos deslocamentos	31
3.2.2	Verificação da segurança de colunas	31
3.2.2.1	Classificação das secções	31
3.2.2.2	Zonas afectadas pelo calor	31
3.2.2.3	Resistência à flexão	32
3.2.2.4	Resistência à compressão da secção transversal	32
3.2.2.5	Resistência à encurvadura de elementos em compressão uniforme	32
3.2.2.6	Verificação de elementos em flexão composta com compressão	35
3.2.2.6.1	Encurvadura por flexão.....	35
3.2.2.6.2	Encurvadura lateral.....	37
3.2.2.7	Controlo dos deslocamentos	37
3.2.3	Ligações	37

3.2.3.1	Soldadura longitudinal na alma de vigas.....	38
3.2.3.2	Ligação da base da coluna.....	39
4.	EXEMPLO PRÁTICO	40
4.1	Introdução	40
4.2	Materiais.....	40
4.3	Valores característicos das acções consideradas.....	41
4.4	Combinações de acções.....	42
4.5	Valores de cálculo dos efeitos das acções.....	44
4.5.1	Esforços e deslocamentos para os valores característicos das acções.....	44
4.5.2	Esforços e deslocamentos para verificações de Estados Limites	45
4.6	Verificação da segurança da coluna A	45
4.6.1	Pré-dimensionamento da secção transversal	45
4.6.2	Esforços no elemento	46
4.6.3	Classificação da secção transversal à flexão segundo y-y	46
4.6.3.1	Alma.....	46
4.6.3.2	Banzos.....	47
4.6.4	Classificação da secção transversal à flexão segundo z-z.....	48
4.6.5	Classificação da secção transversal à compressão axial	48
4.6.5.1	Alma.....	48
4.6.5.2	Banzos.....	49
4.6.6	Soldaduras.....	49
4.6.7	Resistência da secção à flexão segundo y-y	49
4.6.8	Resistência do elemento à compressão axial com flexão segundo y-y.....	50
4.6.9	Resistência do elemento à compressão axial com flexão segundo z-z.....	52
4.6.10	Resistência à encurvadura por flexão	52
4.6.11	Resistência à encurvadura por torção ou por flexão-torção	53
4.6.12	Verificação ao Estado Limite de Deformação	56
4.7	Verificação da segurança da viga D	57
4.7.1	Pré-dimensionamento da secção transversal	57
4.7.2	Esforços no elemento	57
4.7.3	Classificação da secção transversal	58
4.7.3.1	Alma.....	58
4.7.3.2	Banzos.....	59
4.7.3.3	Encurvadura do banzo comprimido no plano da alma	59
4.7.4	Soldaduras.....	60
4.7.5	Resistência da secção à flexão em torno de y-y.....	60
4.7.6	Resistência à flexão numa secção com furos	61
4.7.7	Resistência ao esforço transversal	63
4.7.8	Verificação do Estado Limite de Deformação	64
4.8	Verificação de segurança da viga F.....	64

4.8.1	Pré-dimensionamento da secção transversal	64
4.8.2	Esforços no elemento	65
4.8.3	Classificação da secção transversal	65
4.8.3.1	Alma.....	65
4.8.3.2	Banzos	66
4.8.3.3	Encurvadura induzida nos banzos	67
4.8.4	Soldaduras.....	67
4.8.5	Resistência à flexão	67
4.8.6	Resistência à flexão numa secção com furos	68
4.8.7	Resistência à encurvadura lateral	70
4.8.8	Resistência ao esforço transverso	71
4.8.9	Resistência a uma carga transversal aplicada sobre o banzo.....	72
4.8.10	Verificação do Estado Limite de Deformação	73
4.9	Ligações soldadas	74
4.9.1	Propriedades das ligações	74
4.9.2	Ligação longitudinal entre vigas	74
4.9.2.1	Dimensionamento do cordão de soldadura.....	74
4.9.2.2	Resistência na HAZ.....	75
4.9.3	Ligação da base da coluna B	75
4.9.3.1	Pré-dimensionamento da secção transversal	75
4.9.3.2	Esforços no elemento	75
4.9.3.3	Esforços na base da coluna	76
4.9.3.4	Dimensionamento dos cordões de soldadura	76
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	80
5.1	Conclusões	80
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	80
	Bibliografia	81
	Anexos.....	83

Índice de Tabelas

Tabela 1: Especificação dos tratamentos térmicos [17].....	8
Tabela 2: Especificação dos tratamentos por deformação plástica [17].....	8
Tabela 3: Grupos das ligas de alumínio (adaptado de [11])	9
Tabela 4: Ligas de Alumínio (adoptado de [3])	10
Tabela 5: Propriedades das ligas de alumínio de processamento mecânico (adaptado de [4])	16
Tabela 6: Ligas de alumínio vazadas para estruturas (adaptado de [4])	16
Tabela 7: Ligas de alumínio de processamento mecânico para estruturas (adaptado de [4])	17
Tabela 8: Factores parciais de segurança $\gamma M1$ e $\gamma M2$ (adaptado de [4])	18
Tabela 9: Factor parcial de segurança para ligações soldadas (adaptado de [4])	18
Tabela 10: Resistência de ligações soldadas – tensão característica f_w (adaptado de [4])	18
Tabela 11: Parâmetro de esbelteza – β (adaptado de [4])	20
Tabela 12: Classificação de uma secção transversal em função do parâmetro de esbelteza (adaptado de [4]).....	21
Tabela 13: Valores dos parâmetros de esbelteza $\beta_{1\varepsilon}$, $\beta_{2\varepsilon}$ e $\beta_{3\varepsilon}$ (adaptado de [4])	21
Tabela 14: Coeficientes $C1$ e $C2$ para a determinação de ρ_c (adaptado de [4]).....	22
Tabela 15: Valores do coeficiente de forma α (adaptado de [4]).....	24
Tabela 16: Coeficiente de encurvadura por corte – ρ_v (adaptado de [4])	26
Tabela 17: Valores de α_{LT} e $\lambda_{0,LT}$ (adaptado de [4])	30
Tabela 18: Valores de α e λ_0 (adaptado de [4]).....	33
Tabela 19: Coeficiente do comprimento de encurvadura k (adaptado de [4])	34
Tabela 20: Resistência das ligas de alumínio utilizadas	40
Tabela 21: Factores parciais de segurança	41
Tabela 22: Propriedades do alumínio	41
Tabela 23: Cargas permanentes	41
Tabela 24: Sobrecargas	41
Tabela 25: Acção do vento.....	42
Tabela 26: Coeficientes ψ_0 , ψ_1 e ψ_2	43
Tabela 27: Combinações de acções para verificações de ELU.....	43
Tabela 28: Combinações de acções para verificações de ELS.....	43
Tabela 29: Esforços e deslocamentos de cálculo	45
Tabela 30: Propriedades geométricas da secção transversal da coluna A	45
Tabela 31: Propriedades geométricas da secção transversal da viga D	57
Tabela 32: Propriedades geométricas da secção transversal da viga F	64
Tabela 33: Propriedades geométricas da secção transversal da coluna B	75

Tabela A1: Características das ligas de alumínio de processamento mecânico para elementos extrudidos (adaptado de [4])	83
Tabela B1: Características das ligas de alumínio de processamento mecânico para chapas, fitas e placas (adaptado de [4])	84
Tabela C1: Momentos flectores [kNm] para ELU da coluna A.....	85
Tabela C2: Esforços axiais [kN] para ELU da coluna A.....	85
Tabela C3: Deformações [m] para ELS da coluna A	85
Tabela C4: Momentos flectores [kNm] para ELU da coluna B.....	85
Tabela C5: Esforços axiais [kN] para ELU da coluna B.....	86
Tabela C6: Deformações [m] para ELS da coluna B	86
Tabela C7: Momentos flectores [kNm] para ELU da viga D	86
Tabela C8: Esforços transversos [kN] para ELU da viga D	86
Tabela C9: Deformações [m] para ELS da viga D	86
Tabela C10: Momentos flectores [kNm] para ELU da viga F	87
Tabela C11: Esforços transversos [kN] para ELU da viga F.....	87
Tabela C12: Deformações [m] para ELS da viga F	87

Índice de Figuras

Figura 1: Endurecimento da liga em função da percentagem do material adicionado [7]	7
Figura 2: Processos de tratamento das ligas de alumínio [3]	9
Figura 3: Redução da resistência do perfil devido às soldaduras [3]	11
Figura 4: Áreas de influência da zona afectada pelo calor [4]	11
Figura 5: Processo de produção do alumínio (adaptado de [15])	13
Figura 6: Convenção dos eixos baricêntricos da secção transversal	18
Figura 7: Definição do tipo de componentes constituintes da secção transversal [4]	20
Figura 8: Reforços transversais (1) e reforços longitudinais (2) na alma [4]	25
Figura 9: Comprimento de resistência a cargas transversais aplicadas [4].....	28
Figura 10: Comprimento de encurvadura l_c e definição de x_s (adaptado de [4])	36
Figura 11: Ligação longitudinal na alma de vigas	39
Figura 12: Estrutura em análise	40
Figura 13: Cargas aplicadas à estrutura (peso próprio, sobrecarga e vento).....	42
Figura 14: Secções nos elementos do modelo da estrutura.....	44
Figura 15: Secção transversal da coluna A.....	45
Figura 16: Secção efectiva da coluna A à flexão segundo y-y	50
Figura 17: Secção transversal da viga D	57
Figura 18: Soldadura da Viga D	60
Figura 19: Secção efectiva da viga D à flexão segundo y-y	61
Figura 20: Viga D com furos.....	62
Figura 21: Secção transversal da viga F.....	64
Figura 22: Secção efectiva da viga F à flexão segundo y-y.....	68
Figura 23: Viga F com furos	69
Figura 24: Ligação soldada na viga D	74
Figura 25: Secção transversal da coluna B.....	75
Figura 26: Base da coluna B	77
Figura 27: Cordões de soldadura na ligação da coluna B	78

Índice de gráficos

Gráfico 1: Variação de momento flector na coluna A.....	46
Gráfico 2: Variação de esforço axial na coluna A	46
Gráfico 3: Variação de momento flector na viga D	57
Gráfico 4: Variação de esforço transversal na viga D.....	57
Gráfico 5: Variação de momento flector na viga F	65
Gráfico 6: Variação de esforço transversal na viga F	65
Gráfico 7: Variação de momento flector na coluna B.....	76
Gráfico 8: Variação de esforço axial na coluna B	76

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

EN 1999 – Eurocódigo 9: Projecto de estruturas em alumínio

EN 1999-1-1 – Eurocódigo 9: Projecto de estruturas em alumínio – Parte 1-1: Regras Gerais

Siglas

IST – Instituto Superior Técnico

HAZ – *Heat Affected Zone* (zona afectada pelo calor)

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Utilização

Símbolos

a	espessura do cordão de soldadura distância entre reforços transversais
b	largura da parede da secção transversal
b_f	largura do banzo
b_{haz}	extensão da HAZ
b_w	altura da alma, excluindo raios de curvatura
c	parâmetro (na expressão de $V_{f,Rd}$)
f_0	valor característico da tensão de cedência (identificada com a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%)
f_{of}	= f_0
f_{ow}	= f_0
$f_{0,haz}$	valor característico da tensão de cedência na HAZ
f_u	valor característico da tensão de rotura à tracção
f_{uw}	= f_u
$f_{u,haz}$	valor característico da tensão de rotura à tracção na HAZ
$f_{v,haz}$	valor característico da tensão ao corte na HAZ
f_w	valor característico da tensão resistente da soldadura
h	altura do elemento a soldar
h_w	altura da alma, incluindo raios de curvatura
i	raio de giração
k	coeficiente de encurvadura que traduz a influência das condições de apoio factor para a encurvadura induzida nos banzos
k_F	factor de encurvadura para cargas transversais
l_c	comprimento de encurvadura
l_y	comprimento efectivamente carregado resistente a cargas transversais

m_1, m_2	parâmetros na expressão do comprimento efectivamente carregado
s_s	comprimento do banzo sobre o qual a carga é efectivamente distribuída
t	espessura da parede da secção transversal espessura do elemento a soldar
t_{eff}	espessura efectiva da parede da secção transversal
t_f	espessura do banzo
t_w	espessura da alma
$x - x$	eixo longitudinal de um elemento
x_s	distância da soldadura localizada ao apoio ou ponto de contra-flexão, para encurvadura elástica devida a esforço axial
$y - y$	eixo de uma secção transversal (maior inércia, paralelo aos banzos)
$z - z$	eixo de uma secção transversal (menor inércia, perpendicular aos banzos)
A_{eff}	área efectiva da secção transversal, considerando a encurvadura local como como a redução da HAZ, mas ignorando os furos
A_{fc}	área da secção transversal do banzo comprimido
A_{net}	área líquida da secção transversal, isto é, sem considerar a HAZ e os furos
A_w	área da secção transversal da alma
C_1 e C_2	constantes (para efeitos de classificação das secções transversais)
E	módulo de elasticidade
F_{Ed}	valor de cálculo da carga transversal aplicada força de corte que actua paralelamente ao eixo da viga
F_{Rd}	valor de cálculo da carga transversal resistente
G	módulo de distorção
I	inércia da secção transversal em torno do eixo de flexão
I_t	inércia de torção
I_w	constante de empenamento
I_z	inércia segundo o menor eixo (z-z)
L	distância entre pontos travados lateralmente na viga
L_{cr}	comprimento de encurvadura
L_{eff}	comprimento efectivamente resistente a cargas transversais
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente à encurvadura
M_{cr}	momento crítico elástico para encurvadura lateral
M_{Ed}	valor de cálculo do momento flector actuante
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente considerando apenas os banzos
$M_{o,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente à plastificação generalizada
M_{Rd}	valor de cálculo do momento flector resistente da secção em relação a um eixo principal
$M_{u,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente da secção útil na zona com furos
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura

N_{cr}	carga crítica elástica para o modo de encurvadura condicionante
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo da resistência à compressão para outras secções
$N_{u,Rd}$	valor de cálculo da resistência à compressão para secção com furos
S_z	momento de inércia do banzo
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal actuante
$V_{f,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente conferido pelos banzos
V_{Rd}	valor de cálculo do esforço transversal resistente
$V_{w,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente conferido pela alma
W_{eff}	módulo de flexão elástico da secção efectiva, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_c t$ para os componentes de classe 4
$W_{eff,haz}$	módulo de flexão elástico da secção efectiva, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_c t$ para secções de classe 4 ou para uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ, consoante o que for menor
W_{el}	módulo de flexão elástico da secção bruta
$W_{el,haz}$	módulo de flexão elástico efectivo da secção bruta, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ
W_{net}	módulo de flexão elástico da secção, tendo em conta os furos e a HAZ
W_{pl}	módulo de flexão plástico da secção bruta
$W_{pl,haz}$	módulo de flexão plástico efectivo da secção bruta, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ
α	coeficiente de expansão térmica linear
	factor de forma
	factor de imperfeição
$\alpha_{3,u}$	factor de forma para secções de classe 3 sem soldaduras
$\alpha_{3,w}$	factor de forma para secções de classe 3 com soldaduras
α_{LT}	factor de imperfeição
β	parâmetro de esbelteza
β_1, β_2 e β_3	limites dos parâmetros de esbelteza
χ	factor de redução devido à encurvadura
χ_F	factor de redução a encurvadura local devido a cargas transversais
χ_{LT}	factor de redução da resistência à encurvadura lateral
ε	$= \sqrt{250/f_0}$
η	factor do gradiente de tensão
	coeficiente de encurvadura ao corte no domínio plástico
η_c	expoente na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
γ_c	expoente na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
γ_{M1}	factor parcial para: (i) resistência de secções transversais de qualquer classe, (ii) resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura

γ_{M2}	factor parcial para a resistência à rotura de secções tracionadas considerando as zonas com furos de ligação
γ_{Mw}	factor parcial para a resistência de ligações soldadas
κ	factor que contabiliza os efeitos da soldadura longitudinal
λ_F	parâmetro de esbelteza à encurvadura local devido a cargas transversais
λ_{LT}	parâmetro de esbelteza à encurvadura lateral
λ_w	parâmetro de esbelteza para encurvadura ao corte
$\bar{\lambda}$	parâmetro de esbelteza relativa
$\bar{\lambda}_0$	limite do patamar horizontal da curva de encurvadura
$\bar{\lambda}_{0,LT}$	limite do patamar horizontal da curva da encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT}$	parâmetro de esbelteza relativa à encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_T$	parâmetro de esbelteza relativa para encurvadura à torção ou por flexão-torção
ω_0	parâmetro na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
ω_x	parâmetro na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
ω_{xLT}	parâmetro na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
ϕ	parâmetro na expressão do factor de redução χ
ϕ_{LT}	parâmetro na expressão do factor de redução χ_{LT}
ψ	razão entre as tensões nas extremidades da parede considerada, tomando como denominador a maior tensão de compressão
ρ	massa volúmica
$\rho_{0,haz}$	factor de redução da tensão de cedência na HAZ
ρ_c	factor de redução para a encurvadura local
$\rho_{u,haz}$	factor de redução da tensão última na HAZ
ρ_v	coeficiente de encurvadura ao corte
$\sigma_{\perp Ed}$	tensão axial actuante, perpendicular ao eixo da soldadura
τ_{Ed}	tensão de corte actuante na ligação, paralela ao eixo da viga
$\tau_{haz,Ed}$	tensão de corte actuante na HAZ, paralela ao eixo da viga
$\tau_{\perp Ed}$	tensão de corte actuante, perpendicular ao eixo da soldadura
$\tau_{\parallel Ed}$	tensão de corte actuante, paralela ao eixo da soldadura
ν	coeficiente de Poisson
ξ_{yc}	expoente na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector
ξ_{zc}	expoente na expressão da interacção entre esforço axial e momento flector

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O alumínio é o terceiro elemento químico mais abundante no nosso planeta, sendo o metal que existe em maior quantidade na crosta terrestre. No entanto, o alumínio possui uma história relativamente recente, na medida em que apenas foi descoberto no começo do século XIX. A dificuldade associada à sua obtenção sob a forma metálica, a mais utilizada actualmente, atrasou a entrada do alumínio no mercado. No entanto, o facto de possuir características únicas garante-lhe o segundo lugar nos metais mais procurados, figurando apenas atrás do aço [1].

As aplicações em alumínio são executadas, quase na sua totalidade, recorrendo a ligas de alumínio. As ligas de alumínio resultam da adição de outros elementos com as mais variadas características o que, consoante a adição, torna o metal bastante versátil. Como resultado, a utilização do alumínio é extremamente ampla, sendo utilizado em praticamente todos os tipos de meios de transporte (aéreos, marítimos e terrestres), na construção civil, em embalagens e utensílios de uso doméstico e, mais recentemente, em elementos estruturais [1, 2, 3].

Tem-se acentuado o crescimento no uso do alumínio como elemento estrutural, devido essencialmente ao facto de este apresentar uma apreciável relação peso-resistência. Sendo um material três vezes mais leve que o aço (no capítulo dois são referidas em detalhe várias características do alumínio), a sua atractividade aumenta substancialmente e, como consequência, a sua aplicação, nomeadamente em pontes móveis, coberturas, heliportos e estruturas *offshore* [2, 3]. Desta forma, o alumínio tem vindo a mostrar ao longo do tempo, através das suas características e propriedades, ser um material estrutural a considerar na Engenharia Civil, tal como o betão, o aço, a alvenaria ou a madeira.

A entrada do alumínio como material estrutural na Engenharia Civil não foi um processo simples, uma vez que o seu dimensionamento exige ao projectista um domínio de diversos conceitos específicos. Assim, sendo reconhecida a sua importância como material estrutural, tornou-se essencial a criação de um regulamento para o efeito. Em 2007 foi publicada a primeira parte do EC9 (EN1999-1-1:2007), a qual é constituída por um conjunto de regras únicas, completas e actualizadas, relativas ao dimensionamento de estruturas em alumínio [4]. A presente edição do EC9 conta com os mais recentes resultados alcançados no domínio das estruturas em ligas de alumínio, resultado da maior dedicação que tem sido dada nas últimas décadas ao tema [2].

Relativamente ao dimensionamento de estruturas em alumínio, o projectista deve procurar tirar o máximo partido das vantagens oferecidas por este material (assunto discutido ao detalhe no capítulo dois, como referido anteriormente) mitigando, tanto quanto possível, as suas desvantagens.

1.2 Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de conhecimentos relativos à verificação da segurança de elementos estruturais constituídos por ligas de alumínio, de acordo com as regras constantes do Eurocódigo 9: Projecto de Estruturas de Alumínio.

1.3 Estrutura e organização

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos.

Na sequência do primeiro capítulo, que tem um carácter introdutório, no segundo capítulo serão explanadas informações relativas às propriedades relevantes de diversas ligas de alumínio, com destaque para aquelas que são mais apropriadas para a utilização como material estrutural. Neste capítulo é feita uma contextualização do surgimento do alumínio na indústria da construção civil e são referenciados os seus campos de aplicação.

No terceiro capítulo apresenta-se a regulamentação básica aplicável ao projecto de estruturas em alumínio, nomeadamente o disposto no Eurocódigo 9 (EC9), sendo descritos os procedimentos a adoptar no dimensionamento e verificação da segurança.

O quarto capítulo contém o caso prático estudado na presente Dissertação, o qual corresponde a uma estrutura reticulada simples. Nesse contexto, será desenvolvida a verificação, numa perspectiva de projecto, de vigas e colunas, bem como de alguns tipos de ligações (nomeadamente (i) entre vigas e (ii) bases de coluna).

Por fim, no quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões finais e sugerem-se alguns estudos futuros.

2. O ALUMÍNIO ESTRUTURAL

2.1 História do alumínio

O alumínio é um elemento químico metálico (símbolo Al), apresentando-se no estado sólido à temperatura ambiente e provindo, maioritariamente, da bauxite. Foi descoberto há mais de duzentos anos, mais precisamente em 1807, por Humphry Davy. Dezassete anos depois, conseguiram produzir-se os primeiros pedaços de alumínio pelo dinamarquês Hans Christian Oersted. Dois anos depois, o alemão Friedrich Wohler conseguiu isolar pó de alumínio e, em 1845, determinou a sua densidade, verificando tratar-se de um elemento bastante leve [1].

A descoberta tardia do alumínio deveu-se, sobretudo, ao facto de não apresentar uma estrutura metálica isolada no seu estado natural, encontrando-se frequentemente combinado com o oxigénio e outros elementos em rochas, solos e vegetação. Para além disso, o facto de se apresentar como um elemento extremamente reactivo dificultou particularmente o seu processo de extracção [1, 6].

Curiosamente, até sensivelmente 1855, as dificuldades associadas à obtenção do alumínio em quantidades significativas colocaram o seu valor comercial acima do valor do ouro e até mesmo da platina, o que resultou, à data, na denominação de “o novo material precioso”. Só em 1886, quando o francês Paul Louis Toussaint Héroult e o norte-americano Charles Martin Hall desenvolveram o chamado “Método de Hall Héroult”, foi possível potenciar a produção do alumínio, resultando obviamente numa queda acentuada do seu valor de mercado. Posteriormente, sucessivos refinamentos deste mesmo método conduziram a incrementos da sua taxa de produção, potenciando drasticamente a sua aplicação nas mais variadas áreas. Assim, tornou-se um dos metais mais utilizados globalmente e nas mais diversas áreas, sendo apenas superado pelo aço [2].

As últimas décadas têm sido dedicadas sobretudo a analisar o comportamento estrutural de peças extrudidas e soldadas através de investigações não só teóricas mas também experimentais.

2.2 Propriedades do alumínio

O alumínio possui aplicações únicas no mundo dos metais, em resultado das suas singulares características mecânicas e químicas. Tratando-se de um material extremamente versátil, é amplamente utilizado em áreas tais como a aeronáutica, a aeroespacial, a automóvel e a construção civil, entre outras [2].

Contudo, o alumínio não é um material perfeito. No seu estado puro, a resistência mecânica do alumínio não é significativa. Com a introdução das ligas de alumínio, adicionando outros elementos, consegue-se aumentar a resistência das ligas até valores bastante semelhantes aos de algumas ligas de aço (assunto referido com maior detalhe no capítulo 2.2.2) [1, 7].

2.2.1 Características gerais

O sucesso das ligas de alumínio como material estrutural e a possibilidade de competirem com o aço estão directamente associados às suas características físicas, ao seu processo de produção e à tecnologia associada ao material. As ligas de alumínio podem ser particularmente competitivas do ponto de vista económico atendendo às seguintes propriedades [2, 3, 6]:

- 1) Elevada relação entre a resistência e o peso
 - Permite minimizar o peso próprio da estrutura;
 - Com a diminuição do peso próprio, o transporte de grandes peças pré-fabricadas é facilitado;
 - O manuseamento e transporte do material é optimizado, resultando na diminuição de recursos na fase de montagem bem como num menor risco de ocorrência de acidentes de trabalho.

- 2) Durabilidade e resistência à corrosão
 - As ligas de alumínio possuem elevada resistência à corrosão, bem como aos efeitos da radiação ultravioleta. Como consequência, apresentam um óptimo desempenho em ambientes mais agressivos;
 - Mesmo não sendo tratado, o alumínio não requer manutenção particular, o que se traduz numa vantagem económica a médio/longo prazo.

- 3) Flexibilidade
 - O facto de ser bastante flexível permite o seu emprego em soluções arquitectónicas inovadoras;
 - Os elementos em alumínio podem ser moldados das mais variadas formas: dobrados, colados, soldados, serrados, furados, rebitados ou aparafusados, quer em obra, quer em fábrica.

- 4) Funcionalidade estrutural
 - Através do seu processo de extrusão, é possível: (i) escolher as secções transversais que garantam a melhor relação entre o peso e a sua eficiência estrutural; (ii) obter as mais variadas formas e secções; (iii) evitar a utilização de ligações, devido à possibilidade de fabrico de praticamente qualquer geometria de secção.

- 5) Incombustível
 - O alumínio não é combustível, razão pela qual apresenta o mais alto índice de resistência à propagação da chama (de acordo com *British Standard BS 476*), impossibilitando a propagação da chama [9];
 - O ponto de fusão das ligas de alumínio situa-se por volta de 650 °C e sem que sejam libertados gases prejudiciais, sendo por isso largamente empregado em embalagens.

Por outro lado, o dimensionamento cuidado de estruturas em ligas de alumínio deve ter em consideração os aspectos menos positivos das características do material, nomeadamente:

- 1) Reduzido módulo de elasticidade
 - O facto de apresentar um reduzido módulo de elasticidade ($E \approx 70 \text{ GPa}$) obriga a que o dimensionamento seja mais cuidado e exigente, nomeadamente no controlo de deslocamentos e efeitos de segunda ordem.
- 2) Susceptibilidade a temperaturas elevadas
 - O facto de ser pouco resistente a temperaturas muito elevadas requer especial atenção nas zonas adjacentes a soldaduras, onde ocorrem diminuições consideráveis da sua resistência.
- 3) Maior custo por unidade de peso
 - O facto de apresentar um custo por unidade de peso superior ao do aço implica que o dimensionamento de todas as secções e elementos a utilizar seja o mais optimizado e funcional possível.

Existem ainda algumas propriedades físicas e químicas a destacar, entre as quais:

- 1) Densidade
 - Conforme foi mencionado anteriormente, o facto de apresentar uma densidade reduzida é uma das suas melhores características físicas: o alumínio possui uma massa volúmica igual a cerca de 2700 kg/m^3 (cerca de $1/3$ da densidade do aço), não obstante este valor variar de acordo com a liga utilizada.
- 2) Módulo de elasticidade
 - O módulo de elasticidade (E) do alumínio é sensivelmente igual a 70 GPa , variando também com a liga utilizada.
- 3) Módulo de distorção
 - O módulo de distorção (G) do alumínio é aproximadamente igual a 27 GPa .
- 4) Resistência à corrosão
 - Quando em contacto com o ar, o alumínio forma uma película protectora com cerca de $0,007 \text{ mm}$ de espessura na primeira oxidação, evitando, por isolamento, a oxidação seguinte quando exposto à generalidade dos ambientes. De realçar que a película de óxido que é formada na superfície do alumínio não origina ferrugem, como acontece, por exemplo, com o ferro. Acresce que é possível aplicar uma vasta variedade de acabamentos, tais como a anodização ou a pintura, aumentando ainda mais a sua resistência à corrosão.
- 5) Coeficiente de expansão térmica linear

- Apresenta um coeficiente de expansão térmica linear (α) igual a cerca de $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (próximo do dobro dos valores relativos ao aço e ao betão). O facto de este valor ser relativamente elevado revela-se importante nalguns casos, nomeadamente em estruturas em que seja conveniente não introduzir restrições às deformações térmicas, e impõe, em geral, que as deformações resultantes de variações de temperatura sejam cuidadosamente consideradas [19].

6) Resistividade elétrica

- Com um valor de resistência elétrica específica igual a $2,65 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, o alumínio é um ótimo condutor elétrico (cerca de 65% da resistência elétrica do cobre). Desta forma é bastante usual a sua utilização como material condutor, nomeadamente em torres de alta tensão, tirando também partido do seu custo reduzido e baixo peso.

7) Refletividade

- O alumínio é frequentemente utilizado em LEDS, por apresentar uma reflectividade aproximadamente igual a 71% sem ser polido, e de 96% quando polido, sendo por isso um dos materiais que apresenta reflectividade mais elevada.

8) Ductilidade e maleabilidade

- Conforme foi referido anteriormente, o alumínio apresenta uma ductilidade e maleabilidade bastante elevada, o que torna este material bastante versátil e permite a sua utilização nas mais diversas formas.

2.2.2 Ligas de alumínio

Apresentando valores da tensão limite de proporcionalidade iguais a cerca de 10 MPa e da tensão resistente à tração na ordem de 40 MPa, o alumínio no seu estado puro apresenta-se como um material com reduzida utilização em aplicações estruturais [7]. Pelo contrário, as ligas de alumínio, que se caracterizam pela adição de imperfeições na sua estrutura cristalina, podem atingir valores de resistência semelhantes aos de algumas ligas de aço. Actualmente, a forma mais eficaz de introduzir estas imperfeições na sua estrutura baseia-se na adição de novos elementos, tais como o magnésio, de que resulta alguma perda de ductilidade mas, sobretudo, um aumento considerável da resistência [1, 6].

Conforme é ilustrado na Figura 1, a relação entre o endurecimento da liga e a percentagem de material adicionado não é de todo linear. Verifica-se, adicionalmente, que o magnésio representa o aditivo que confere maior resistência à liga, razão pela qual, no passado, as ligas alumínio-magnésio eram as mais utilizadas a nível estrutural. Contudo, verificou-se mais tarde que estas ligas apresentavam problemas relacionados com a sua resistência à corrosão, situação que conduziu à utilização de ligas constituídas não só pelo magnésio mas também pelo manganês, onde se conseguiu aliar o défice da resistência mecânica ao aumento da resistência à corrosão [7].

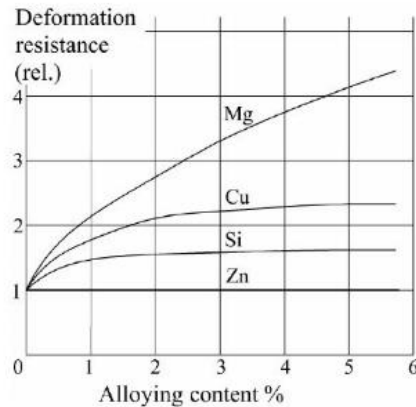


Figura 1: Endurecimento da liga em função da percentagem do material adicionado [7]

Como seria de esperar, a adição de diferentes elementos nas ligas de alumínio conduz a diferentes efeitos, em função do elemento adicionado. As características das ligas podem variar bastante, desde dúcteis a frágeis e com soldabilidade muito variável. Tirando partido do processo de produção do alumínio (já referido anteriormente e abordado com maior detalhe no capítulo 2.2.4), os projectistas têm a possibilidade de dimensionar a secção pretendida consoante a sua futura aplicação.

Desta feita, a escolha da liga metálica a ser utilizada deve ter em conta variados parâmetros, nomeadamente a capacidade resistente, o tipo de produto (em folha, placa ou secção extrudida), a resistência a elevadas temperaturas e o custo, entre outros. Torna-se assim indispensável ao projectista possuir sólidos conhecimentos em relação ao alumínio como material, dado o vasto leque de variáveis em jogo no dimensionamento, por forma a que seja retirado o máximo proveito do mesmo.

As ligas de alumínio encontram-se divididas em duas classes distintas [3, 8, 10]:

- Ligas de processamento mecânico (*wrought aluminium alloys*): destinam-se à fabricação de produtos semi-acabados, tais como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (barras e arames) e perfis extrudidos - correspondem a cerca de 85% da produção mundial.
 - Ligas com tratamento térmico (*heat-treated alloys*), cujas óptimas propriedades mecânicas são obtidas por meio de tratamento térmico (séries 2XXX, 6XXX e 7XXX). A este tipo de ligas estão associados diferentes estados de tratamento T (variam entre T1 e T9, como se ilustra na Tabela 1), sendo T3, T6 e T7 os estados mais importantes;
 - Ligas sem tratamento térmico (*non heat-treated alloys*), obtidas através de processos mecânicos a frio (séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX). A este tipo de ligas correspondem os estados de tratamento F, O e H. O estado F refere-se a ligas que

não sofreram qualquer tratamento após o seu fabrico; o estado O está associado a ligas que foram recozidas tendo o propósito de homogeneizar a sua estrutura e, desta forma, aliviar tensões; relativamente ao estado H, este é utilizado para ligas que sofrem trabalho mecânico a frio (tratamento por deformação plástica). Normalmente, a letra H é seguida por dois dígitos: o primeiro está relacionado com o tratamento que sofre, conforme é indicado na Tabela 2; o segundo está relacionado com a diminuição da espessura resultante da deformação a frio.

- Ligas de alumínio vazadas (*cast aluminium alloys*): destinam-se essencialmente à fabricação de componentes fundidos – correspondem à restante produção mundial (cerca de 15%).

Tabela 1: Especificação dos tratamentos térmicos [17]

Tipo	Especificação do 1º dígito
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial

Tabela 2: Especificação dos tratamentos por deformação plástica [17]

Tipo	Especificação do 1º dígito
H1x	Deformação a frio
H2x	Deformação a frio e recozimento parcial
H3x	Deformação a frio e estabilização

Dada a importância que as ligas de processamento mecânico representam para a Engenharia Civil, apenas essas serão abordadas neste trabalho. Na Figura 2 ilustram-se esquematicamente todos os tratamentos anteriormente referidos.

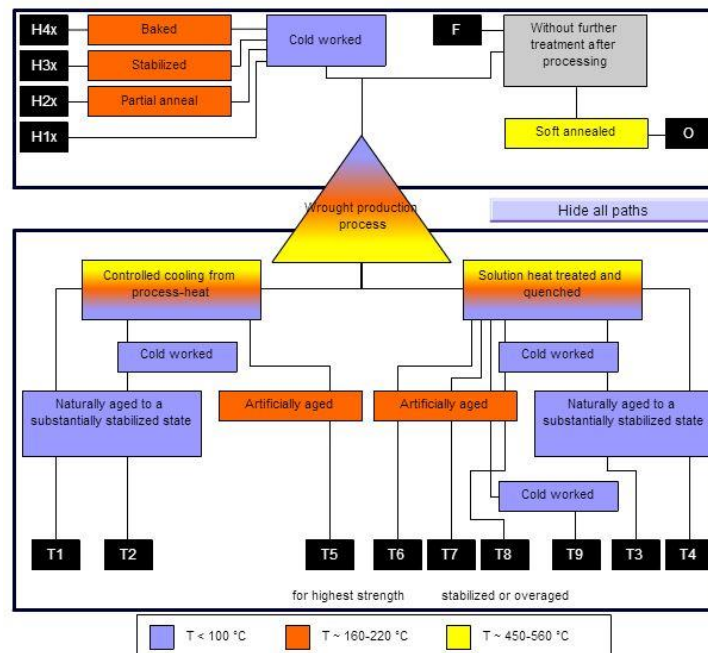


Figura 2: Processos de tratamento das ligas de alumínio [3]

Em face da profusão de tipos de ligas trabalhadas, tornou-se essencial a criação de um sistema de identificação e caracterização global, constituído por quatro dígitos (atribuídos pela *International Alloy Designation System*), que classifica os diferentes tipos de ligas [11]. O primeiro dígito do sistema refere-se ao elemento adicionado em maior percentagem, identificando desta forma o grupo ou família da liga, conforme é indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Grupos das ligas de alumínio (adaptado de [11])

Grupo	Principal elemento adicionado
1XXX	Alumínio com 99% de pureza mínima
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

O segundo dígito, quando diferente de zero, sugere uma modificação numa liga já existente. Relativamente ao terceiro e quarto dígitos, trata-se de uma sequência definida arbitrariamente e que serve para identificar uma liga específica na série (exemplo: numa liga 5183, o dígito 5 indica tratar-se da série de liga de magnésio, o dígito 1 indica tratar-se da primeira modificação da liga original - neste caso a 5083 - e a sequência 83 identifica a liga na série 5XXX), excepto no caso do grupo 1XXX onde estes dois últimos dígitos indicam a percentagem de alumínio, acima de 99%, que se encontra presente na liga (exemplo: uma liga 1050 apresenta uma percentagem de alumínio igual a 99.50%) [11].

Na Tabela 4 são sintetizadas algumas propriedades importantes de cada grupo, bem como o seu campo de aplicação.

Tabela 4: Ligas de Alumínio (adoptado de [3])

Grupo	Elemento Principal	Propriedades Gerais	Campo de Aplicação
1XXX	Alumínio (Al)	<ul style="list-style-type: none"> • Não são tratadas a quente • Ductilidade elevada • Fraca resistência • Boa resistência à corrosão 	Indústria química (tanques) e indústria elétrica (cabos)
2XXX	Cobre (AlCu)	<ul style="list-style-type: none"> • Tratadas a quente • Boa relação resistência-peso • Boa resistência à fadiga • Menor resistência à corrosão • Difíceis de soldar 	Aviação e para fins militares
3XXX	Manganês (AlMn)	<ul style="list-style-type: none"> • Não são tratadas a quente • Resistência média • Sem perda significativa de resistência à corrosão • Resistência a temperaturas elevadas 	Painéis em coberturas
4XXX	Silício (AlSi)	<ul style="list-style-type: none"> • Podem ser tratadas a quente ou não, dependendo dos materiais que se adicionam • Ponto de fusão mais reduzido 	Fios de soldadura ou como liga de enchimento, bem como aplicações arquitectónicas
5XXX	Magnésio (AlMg)	<ul style="list-style-type: none"> • Não são tratadas a quente • Elevada resistência • Resistência à corrosão também elevada, utilizada em ambientes agressivos • Elevada resistência à fadiga • Boa capacidade de soldadura para percentagens de Magnésio inferiores a 3% 	Indústria química, naval e automóvel, bem como em edifícios
6XXX	Magnésio e Silício (AlMgSi)	<ul style="list-style-type: none"> • Tratadas a quente • Elevada resistência • Elevada ductilidade • Resistência à corrosão elevada • Fáceis de deformar e anodizar 	Edifícios, transportes aéreos e marítimos
7XXX	Zinco (AlZn)	<ul style="list-style-type: none"> • Tratadas a quente • Resistência elevada, podendo ultrapassar a do aço • Dificuldade de fabricação por requerer tecnologia de produção bastante avançada 	Indústria aeronáutica e aeroespacial, desportos motorizados de alta competição
8XXX	Outros elementos	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades variam com os elementos adicionados 	Indústria aeroespacial e produção de energia nuclear

2.2.3 Zonas afectadas pelo calor

As zonas afectadas pelo calor, genericamente designadas por *Heat Affected Zones* (e referenciadas por HAZ), representam zonas onde ocorre uma diminuição da resistência da liga por acção do calor, resultante da aplicação de soldaduras [7].

Os perfis soldados dividem-se em dois grupos:

- Perfis de ligas não tratadas a quente, que em geral não são afectados de forma significativa pela realização de soldaduras;
- Perfis de ligas tratadas a quente, que registam decréscimos significativos na tensão limite convencional de proporcionalidade f_o (entre 40% e 50%).

Assim, a resistência à flexão dos perfis pode ser afectada pela aplicação de soldaduras, especialmente se estas se localizarem na ligação banzo-alma. Uma forma de contornar este problema passa por colocar as soldaduras suficientemente afastadas desta ligação de forma que os seus efeitos sejam reduzidos, como é ilustrado na Figura 3 [3].

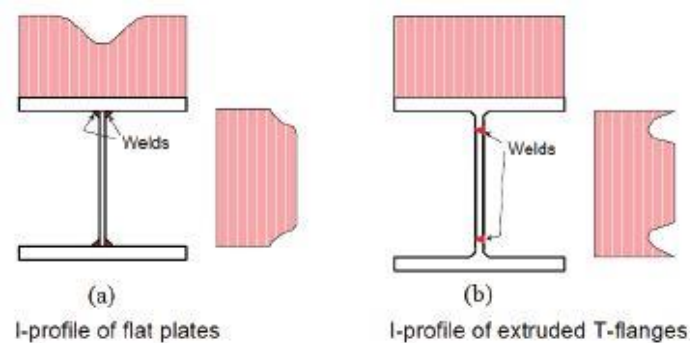


Figura 3: Redução da resistência do perfil devido às soldaduras [3]

Como se pode verificar na Figura 4, a HAZ desenvolve-se ao longo da secção.

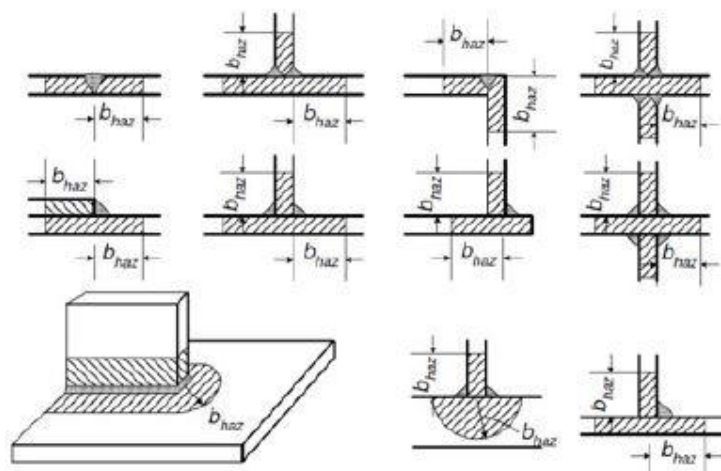


Figura 4: Áreas de influência da zona afectada pelo calor [4]

A distância ao longo da qual se estende a área afectada pelo calor, indicada por b_{haz} , depende do tipo de soldadura e é explanada no próximo capítulo.

2.2.4 Processo de fabrico

O processo de fabrico do alumínio começa com a extracção da matéria-prima bauxita, uma rocha geralmente encontrada poucos metros abaixo do solo, de onde é extraída a alumina (também conhecida por óxido de alumínio) através da dissolução da bauxita numa solução aquosa de soda cáustica e cal. De seguida, a solução é aquecida e filtrada até que a alumina remanescente seque e se transforme num pó branco (alumina pura). No passo seguinte, numa cuba com um circuito eléctrico instalado entre um polo negativo (cátodo) e um polo positivo (ânodo), ambos em carbono, o ânodo reage com o oxigénio da alumina formando dióxido de carbono (CO_2); deste processo resulta o alumínio líquido, que pode finalmente ser retirado da cuba [12].

De seguida, o alumínio líquido pode ser transformado em diferentes produtos através de várias técnicas [12]:

- Extrusão: técnica que permite uma panóplia quase ilimitada de formatos de aplicação, onde se força a passagem de um lingote de alumínio aquecido através de um molde. Tratando-se de um processo realizado por deformação plástica, apenas as ligas do grupo 6XXX e algumas dos grupos 5XXX e 7XXX podem ser utilizadas;
- Laminagem: tirando partido da flexibilidade deste material, é possível obter folhas, placas ou tiras de alumínio. Existem folhas de alumínio com espessuras na ordem de 0,006 mm (sem que ainda assim permitam a passagem de luz ou aromas);
- Ligas para fundição: as ligas de alumínio podem ser fundidas em diferentes formatos, com a sua composição a variar em função da sua futura aplicação.

2.2.5 Ligações

As estruturas em alumínio são compostas por vários componentes interligados entre si. Estas ligações podem ser realizadas através de diferentes técnicas, entre elas [3, 13]:

- Soldadura: Processo de fabrico mais utilizado, que consiste em fundir parcialmente os vários componentes. Por vezes é adicionado um material de enchimento que, após solidificar e arrefecer, aumenta a rigidez da junta. Os processos de soldadura mais usuais são do tipo TIG (*Tungsten Inert Gas*) e do tipo MIG (*Metal Inert Gas*), havendo ainda processos como a soldadura com arco, soldadura por fricção, soldadura a laser e a soldadura a plasma, entre outros. As soldaduras do tipo MIG, por ser o processo que apresenta melhor capacidade de penetração com maior velocidade e facilidade de execução, são as mais utilizadas. Este tipo de ligação apresenta várias vantagens comparativamente ao processo por aparafusamento, nomeadamente a poupança de material e de mão-de-obra, a ausência de perfuração, a impermeabilidade da ligação e a sua resistência à corrosão;

- **Aparafusamento:** Processo que consiste na junção de dois ou mais elementos através de parafusos (geralmente de alumínio ou aço) ou rebites. Apresenta algumas vantagens em relação ao anterior, entre as quais o facto de não alterar estruturalmente os componentes sujeitos à influência de aquecimento térmico ou permitir um vasto leque de aplicações para diferentes materiais, quer sejam metálicos, orgânicos ou não-orgânicos (plástico com alumínio, por exemplo);
- **Colagem:** Técnica baseada na ligação de peças recorrendo a um material adesivo que, reagindo quimicamente e fisicamente com as superfícies de ambas as peças, garante a ligação. Esta técnica permite evitar alterações, quer estruturais quer geométricas, dos elementos a unir. Mais uma vez, abrange um vasto leque de aplicações para diferentes materiais, sejam eles metálicos, orgânicos ou não-orgânicos. No entanto, é um processo que apresenta menor durabilidade e resistência do que os outros tipos de ligação.

Os projectistas têm a liberdade de escolher o método mais adequado a cada situação em particular, devendo garantir que é respeitado um conjunto de pré-requisitos estruturais, nomeadamente resistência, rigidez e ductilidade, bem como de pré-requisitos não estruturais, nomeadamente do ponto de vista económico, da estanquidade ou do aspecto visual. Desta forma, é possível montar e desmontar as mais variadas estruturas, sejam elas simples pórticos ou estruturas mais complexas, consoante as necessidades impostas.

2.2.6 Sustentabilidade ambiental

O alumínio é um material que apresenta uma reciclabilidade de 100%, pelo que é um material extremamente apelativo quando se procura uma construção sustentável, eficiente e ecológica. O alumínio é reciclado desde os dias em que começou a ser comercialmente produzido e, nos dias de hoje, mais de um terço do alumínio consumido em todo o mundo é reciclado. Como se pode observar na Figura 5, são necessárias cerca de quatro toneladas de matéria-prima para produzir uma tonelada de alumínio.

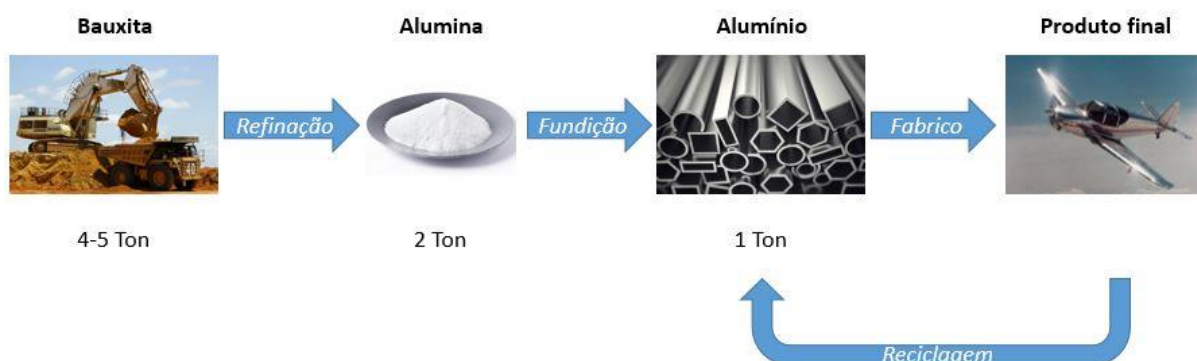


Figura 5: Processo de produção do alumínio (adaptado de [15])

A sustentabilidade é um factor preponderante a ser tido em consideração no mundo actual. Além de permitir um menor consumo de matérias-primas, a utilização do alumínio permite a recuperação de grande parte do investimento inicial, sendo apenas necessária cerca de 5% da energia utilizada na sua produção para o seu processo de reciclagem [3, 14, 15].

2.3 Campos de aplicação estrutural

A utilização de ligas de alumínio em aplicações estruturais tem crescido acentuadamente nas últimas décadas. O facto de apresentar um elevado rácio resistência-peso torna este material apropriado para praticamente toda a indústria. Na construção civil, em particular, este factor pode ser determinante na escolha deste material, a que acrescem razões de sustentabilidade ambiental [16].

De entre as possíveis aplicações no domínio da Engenharia de Estruturas, destacam-se as seguintes [2]:

- Coberturas com grandes vãos, onde o peso próprio da estrutura é muito relevante face ao valor das restantes cargas aplicadas (por exemplo, coberturas de piscinas ou de grandes edifícios públicos e auditórios);
- Estruturas com difícil acesso, onde factores como os custos associados ao transporte e montagem sejam extremamente importantes. Temos o exemplo das torres de alta tensão, que podem ser facilmente transportadas por um helicóptero tendo em conta o seu reduzido peso;
- Estruturas localizadas em ambientes húmidos e agressivos, tais como pontes, estruturas hidráulicas ou heliportos localizados em plataformas no mar (plataformas *offshore*);
- Estruturas com peças móveis, tais como pontes móveis (plataformas *onshore*), em que o reduzido peso próprio facilita as movimentações;
- Estruturas com carácter especial, nomeadamente postes de iluminação ou antenas, onde as operações de manutenção sejam particularmente difíceis e limitadas.

3. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL

3.1 O Eurocódigo 9 (EN 1999): Projecto de estruturas de alumínio

Inicialmente, a edição ENV da EN 1999 era constituída apenas por três documentos, os quais, no formato actual da NP EN 1999, correspondem aos seguintes:

- NP EN 1999-1-1: Regras Gerais
- NP EN 1999-1-2: Verificação da Resistência ao Fogo
- NP EN 1999-1-3: Estruturas sujeitas à Fadiga

Posteriormente, foram adicionados mais dois documentos à EN 1999 (para os quais ainda não existe Norma Portuguesa), nomeadamente os seguintes:

- EN 1999-1-4: *Cold-formed structural sheeting*
- EN 1999-1-5: *Shell structures*

Relativamente à sua metodologia, a EN 1999 segue o preconizado para o Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço.

3.2 O dimensionamento de acordo com a EN 1999

Neste capítulo serão apresentadas as regras contantes da EN 1999 para a verificação da segurança de vigas e colunas de alumínio. Será seguida a metodologia indicada pela EN 1999, nomeadamente na classificação das secções, na verificação da segurança à flexão e ao esforço transversal, na interacção entre o momento flector e o esforço transversal, na resistência da alma para cargas transversais e terminando na verificação à encurvadura lateral. A análise e o dimensionamento dos elementos foram realizados de acordo, também, com o disposto na EN 1990 (“Eurocódigo 0”): Bases para o projecto de estruturas” e na EN 1991 (Eurocódigo 1): “Acções em estruturas”.

A parte 1.1 da EN 1999 apresenta as regras para o dimensionamento de estruturas de alumínio cuja temperatura não exceda os 100 °C. Caso contrário, deve ser consultado o disposto na parte 1.2.

De acordo com a EN 1999, para todas as ligas de alumínio de processamento mecânico podem ser adoptados os valores indicados na Tabela 5 relativamente às propriedades mencionadas na mesma tabela.

Tabela 5: Propriedades das ligas de alumínio de processamento mecânico (adaptado de [4])

Propriedades das ligas de alumínio	
Módulo de elasticidade	$E = 70\,000\text{ N/mm}^2$
Módulo de distorção	$G = 27\,000\text{ N/mm}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Coefficiente de expansão térmica linear	$\alpha = 23 \times 10^6\text{ por }^\circ\text{C}$
Massa volúmica	$\rho = 2700\text{ kg/m}^3$

A EN 1999-1-1 faz referência explícita às ligas de alumínio que são indicadas nas Tabelas 6 e 7. Saliencia-se que, em geral, esta Norma não é aplicável a peças vazadas (isto é, só é aplicável a produtos fundidos sob determinadas condições especiais).

Em anexo, na Tabela A1, apresentam-se os valores característicos de f_0 (tensão de limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, designada mais abreviadamente por tensão de cedência), de f_u (tensão de rotura à tração, também designada por tensão última), de $f_{0,haz}$ (tensão de cedência nas áreas afectadas pelo calor), de $f_{u,haz}$ (tensão última nas áreas afectadas pelo calor) e da classe de encurvadura (a considerar na classificação das secções transversais) para ligas de perfis extrudidos. Na Tabela B1, em anexo, apresentam-se os valores referentes às mesmas grandezas mas para ligas de alumínio relativas a chapas, fitas e placas.

Tabela 6: Ligas de alumínio vazadas para estruturas (adaptado de [4])

Designação da liga		Durabilidade
Numérica	Símbolos Químicos	
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	B
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	B
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	B
EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg	B
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	B
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	A

Tabela 7: Ligas de alumínio de processamento mecânico para estruturas (adaptado de [4])

Designação da liga		Forma do produto	Durabilidade
Numérico	Símbolos químicos		
EN AW-3004	EN AW-AlMn1Mg1	Placa, Fita, Chapa	A
EN AW-3005	EN AW-AlMn1Mg0,5	Placa, Fita, Chapa	A
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	A
EN AW-5005/5005A	EN AW-AlMg1(B)/(C)	Placa, Fita, Chapa	A
EN AW-5049	EN AW-AlMg2Mn0,8	Placa, Fita, Chapa	A
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	A
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	A
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	A
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	A
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	B
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	B
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	B
EN AW-6005 A	EN AW-Al SiMg(A)	Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	B
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	B
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	Perfil Extrudido	B
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5Mg1	Placa, Fita, Chapa, Tubo Extrudido, Perfil Extrudido	C
EN AW-8011A	EN AW-AlFeSi	Placa, Fita, Chapa	B

O valor da tensão característica ao corte pode ser determinado de acordo com a expressão:

$$f_{v,haz} = \frac{f_{u,haz}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

Os valores indicados no Eurocódigo 9 para os factores parciais de segurança γ_{M1} e γ_{M2} são os indicados na Tabela 8:

Tabela 8: Factores parciais de segurança γ_{M1} e γ_{M2} (adaptado de [4])

γ_{M1}	1,10
γ_{M2}	1,25

Relativamente a ligações soldadas, os valores do factor parcial de segurança γ_{Mw} e da tensão resistente f_w são indicados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 9: Factor parcial de segurança para ligações soldadas (adaptado de [4])

γ_{Mw}	1,25
---------------	------

Tabela 10: Resistência de ligações soldadas – tensão característica f_w (adaptado de [4])

Resistência característica	Metal de adição	Liga de alumínio								
		3103	5052	5083	5454	6060	6005A	6061	6082	7020
f_w [N/mm ²]	5356	-	170	240	220	160	180	190	210	260
	4043A	95	-	-	-	150	160	170	190	210

Será estudada uma secção transversal em I, pelo que interessa explicitar que a convenção utilizada para os eixos é a representada na Figura 6 e descrita como:

x – x eixo segundo a direcção do elemento

y – y eixo baricêntrico na secção transversal do elemento, paralelo aos banzos

z – z eixo baricêntrico na secção transversal do elemento, perpendicular aos banzos

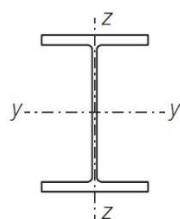


Figura 6: Convenção dos eixos baricêntricos da secção transversal

Em relação aos métodos de análise estrutural, é sempre possível realizar análises globais elásticas; a realização de análises globais plásticas também é possível, mas está sujeita à verificação de algumas condições (designadamente em termos da ductilidade disponível). As análises globais elásticas deverão basear-se na hipótese de a relação tensão-deformação do material ser linear para qualquer nível de tensões actuantes e os esforços obtidos poderão ser considerados para efeitos de verificação da segurança mesmo nos casos em que a resistência das secções transversais dos elementos é baseada na sua resistência plástica.

3.2.1 Verificação da segurança de vigas sujeitas a flexão simples

Para o presente caso de estudo, será verificada a segurança de duas vigas de alumínio sujeitas a flexão simples. Para este tipo de elementos, devem ser efectuadas as seguintes verificações:

- Resistência à flexão;
- Resistência ao esforço transversal;
- Resistência da alma para cargas transversais aplicadas;
- Resistência à encurvadura lateral.

3.2.1.1 Classificação das secções

De acordo com a EN 1999, as secções transversais de qualquer barra (coluna, viga ou viga-coluna) são classificadas em quatro classes, (à semelhança do que sucede com elementos de aço, de acordo com a EN 1993), de acordo com a sua sensibilidade aos efeitos da encurvadura local e em função da esbelteza dos seus elementos comprimidos:

- Classe 1 – Secções dúcteis: possibilitam a formação de uma rótula plástica com a capacidade de rotação necessária para a realização duma análise plástica sem qualquer redução da sua resistência;
- Classe 2 – Secções compactas: possibilitam o desenvolvimento de momento resistente plástico, mas a capacidade de rotação é limitada pelos efeitos da encurvadura local;
- Classe 3 – Secções semi-compactas: a tensão da fibra mais comprimida do elemento pode atingir f_0 mas a encurvadura local impede o desenvolvimento do momento plástico resistente;
- Classe 4 – Secções esbeltas: a encurvadura local ocorre antes de ser atingido o valor de f_0 numa ou mais partes da secção.

Para efeitos de classificação de uma secção, são considerados os seguintes componentes elementares (ilustrados na Figura 7):

- Componentes em consola simétricos;
- Componentes em consola não simétricos;
- Componentes internos.

Estes elementos podem, ou não, ser reforçados através de elementos transversais.

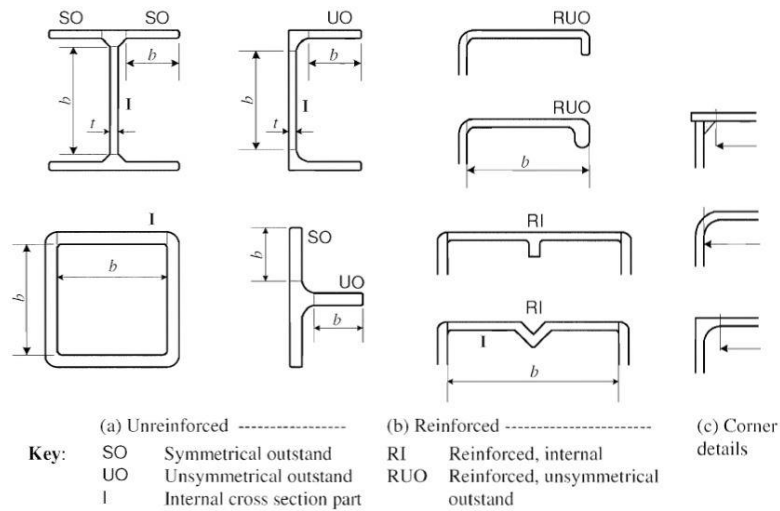


Figura 7: Definição do tipo de componentes constituintes da secção transversal [4]

A susceptibilidade à encurvadura local de uma parede plana sem reforço é traduzida pelo parâmetro de esbelteza β , que é definido conforme indicado na Tabela 11:

Tabela 11: Parâmetro de esbelteza – β (adaptado de [4])

	β
Componentes sem gradiente de tensão	b/t
Componentes internos sujeitos a um gradiente de tensões com linha neutra no seu centro	$0,40b/t$
Componentes com outros tipos de gradiente de tensões	$\eta b/t$

onde:

b largura da parede em causa da secção transversal

t espessura da parede em causa da secção transversal

η factor do gradiente de tensões, dado por:

$$\eta = 0,70 + 0,30\psi \quad (-1 \leq \psi \leq 1) \quad (3.2)$$

$$\eta = 0,80/(1 - \psi) \quad (\psi < -1) \quad (3.3)$$

em que:

ψ razão entre as tensões nas extremidades da parede considerada, tomando como denominador a maior tensão de compressão.

A linha neutra deverá, em geral, ser a elástica, mas quando se verifica que a secção é da classe 1 ou 2 poderá ser considerada a linha neutra plástica.

A classificação dos componentes das secções transversais é estabelecida em função do parâmetro de esbelteza conforme é disposto na Tabela 12:

Tabela 12: Classificação de uma secção transversal em função do parâmetro de esbelteza (adaptado de [4])

Condição	Classe da secção
$\beta \leq \beta_1$	Classe 1
$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$	Classe 2
$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$	Classe 3
$\beta > \beta_3$	Classe 4

Os valores de β_1 , β_2 e β_3 estão indicados na Tabela 13, para componentes internos e externos, sendo $\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$, com f_0 em N/mm².

Tabela 13: Valores dos parâmetros de esbelteza β_1/ε , β_2/ε e β_3/ε (adaptado de [4])

Classificação da classe de encurvadura de acordo com as Tabelas A1 e B1	Componente Interno			Componente Externo		
	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε
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	3,5	4

Para secções de classe 4 é necessário considerar explicitamente os efeitos da encurvadura local na redução da resistência da secção. Desta forma, substitui-se a distribuição de tensões não uniforme nos componentes em causa da secção por uma distribuição uniforme actuante na chamada secção efectiva. A secção efectiva é obtida através da consideração de um coeficiente de encurvadura local, ρ_c , o qual opera como factor de redução da espessura dos componentes para uma espessura efectiva t_{eff} .

O factor ρ_c é determinado pelas expressões seguintes:

$$\rho_c = 1,0 \quad \beta \leq \beta_3 \quad (3.4)$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \quad \beta > \beta_3 \quad (3.5)$$

onde os coeficientes C_1 e C_2 são indicados na Tabela 14.

Tabela 14: Coeficientes C_1 e C_2 para a determinação de ρ_c (adaptado de [4])

Classificação da classe de encurvadura de acordo com as Tabelas A1 e B1	Componente Interno		Componente Externo	
	C_1	C_2	C_1	C_2
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

Assim, a espessura efectiva, t_{eff} , é determinada através da seguinte expressão:

$$t_{eff} = \rho_c t \quad (3.6)$$

3.2.1.2 Zonas afectadas pelo calor

Conforme foi abordado anteriormente, no dimensionamento de elementos com ligações soldadas, devido às elevadas temperaturas que se desenvolvem durante o processo, ocorre uma redução de f_0 e f_u do material na zona em redor da soldadura (HAZ). Nestas zonas, aplicam-se os factores de redução $\rho_{0,haz}$ para f_0 e $\rho_{u,haz}$ para f_u , de acordo com as expressões seguintes:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} \quad (3.7)$$

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} \quad (3.8)$$

sendo $f_{0,haz}$ e $f_{u,haz}$ fornecidos na Tabela A1 e na Tabela B1. Esta redução de resistência do material na HAZ designa-se por amaciamento (HAZ *softening*, na nomenclatura anglo-saxónica).

Considera-se que a HAZ se prolonga por uma distância b_{haz} em qualquer direcção a partir duma soldadura, conforme é ilustrado na Figura 4. Em geral, para os casos mais comuns de soldadura (TIG e MIG) e para soldaduras de topo alinhadas (2 trajectórias do fluxo de calor válidas) ou soldaduras de ângulo (ligações em T, com 3 trajectórias do fluxo de calor válidas) em ligas das séries 6xxx ou 7xxx e em ligas das séries 3xxx e 5xxx endurecidas, a distância b_{haz} é obtida da seguinte forma:

- Para soldaduras do tipo MIG aplicadas sobre um material não aquecido e com um arrefecimento entre passagens não superior a 60 °C:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm}: \quad b_{\text{haz}} = 20 \text{ mm}$$

$$6 \text{ mm} < t \leq 12 \text{ mm}: \quad b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$$

$$12 \text{ mm} < t \leq 25 \text{ mm}: \quad b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$$

$$t > 25 \text{ mm}: \quad b_{\text{haz}} = 40 \text{ mm}$$

- Para soldaduras do tipo TIG:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm}: \quad b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$$

3.2.1.3 Resistência à flexão das secções transversais

A resistência à flexão numa secção transversal deve satisfazer a condição seguinte:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

em que:

M_{Ed} valor de cálculo do momento flector actuante

M_{Rd} valor de cálculo do momento flector resistente, dado pelo menor dos seguintes valores:

- Secções com furos:

$$M_{u,Rd} = \frac{W_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.10)$$

- Outras secções:

$$M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (3.11)$$

onde:

α factor de forma, determinado pelas expressões presentes na Tabela 15

W_{el} módulo de flexão elástico da secção bruta

W_{net} módulo de flexão elástico da secção útil, tendo em conta os furos e, se a secção tiver soldaduras, o amaciamento na HAZ

γ_{M1} factor parcial de segurança (vd. Tabela 8)

γ_{M2} factor parcial de segurança (vd. Tabela 8).

Tabela 15: Valores do coeficiente de forma α (adaptado de [4])

Classe da secção	Sem soldaduras	Com soldaduras longitudinais
1	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
2	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff}/W_{el}	$W_{eff,haz}/W_{el}$

em que:

- W_{pl} módulo de flexão plástico da secção bruta
- W_{eff} módulo de flexão elástico da secção efectiva, obtido considerando uma espessura efectiva $t_{eff} = \rho_c t$ para os componentes da classe 4
- $W_{el,haz}$ módulo de flexão elástico efectivo da secção bruta, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ
- $W_{pl,haz}$ módulo de flexão plástico efectivo da secção bruta, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ
- $W_{eff,haz}$ módulo de flexão elástico da secção efectiva, obtido considerando uma espessura reduzida dada por $\rho_c t$ para secções de classe 4 ou uma espessura reduzida dada por $\rho_{0,haz} t$ para o material na HAZ, consoante o que for menor
- $\alpha_{3,u}$ e $\alpha_{3,w}$ coeficientes determinados através das seguintes expressões, nas quais β é o parâmetro de esbelteza para o componente crítico da secção (a que corresponde o valor mais reduzido de β_2/β):

$$\alpha_{3,u} = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \times \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right] \quad (3.12)$$

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \times \left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}} \right) \right] \quad (3.13)$$

3.2.1.4 Resistência ao esforço transversal de vigas de alma cheia

O caso prático estudado neste trabalho envolve a utilização de vigas de alma cheia. Este tipo de vigas é caracterizado por incluir um banzo à tracção, uma alma em placa, e o outro banzo à compressão. A alma pode ser reforçada transversalmente, com reforços de apoio e intermédios, e pode também apresentar reforços longitudinais.

A verificação da segurança ao esforço transversal é expressa pela condição seguinte:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

onde:

V_{Ed} valor de cálculo do esforço transversal actuante

V_{Rd} valor de cálculo do esforço transversal resistente.

Para vigas de alma cheia com reforços de alma nos apoios e intermédios, conforme é ilustrado na Figura 8, V_{Rd} é determinado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd} \quad (3.15)$$

onde:

$V_{w,Rd}$ valor de cálculo do esforço transversal resistente conferido pela alma

$V_{f,Rd}$ incremento do esforço transversal resistente conferido pelos banzos.

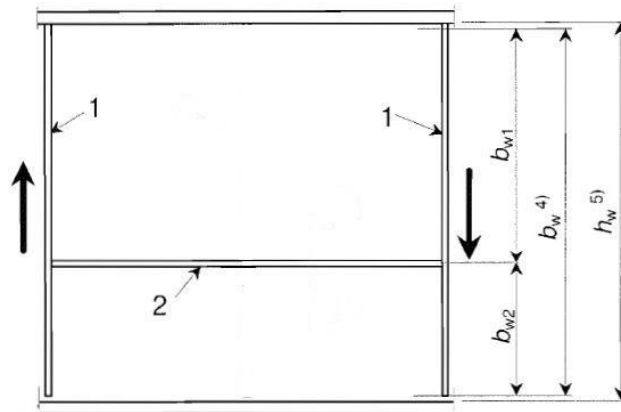


Figura 8: Reforços transversais (1) e reforços longitudinais (2) na alma [4]

A contribuição da alma para o valor de cálculo do esforço transversal resistente é calculada pela expressão:

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (3.16)$$

onde:

ρ_v coeficiente de encurvadura por corte, determinado de acordo com a Tabela 16

t_w espessura da alma

h_w altura da alma

Tabela 16: Coeficiente de encurvadura por corte – ρ_v (adaptado de [4])

Domínios de λ_w	Reforço de extremidade rígido	Reforço de extremidade não-rígido
$\lambda_w \leq 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta < \lambda_w < 0,937$	$0,83/\lambda_w$	$0,83/\lambda_w$
$\lambda_w \geq 0,937$	$2,3/(1,66 + \lambda_w)$	$0,83/\lambda_w$

em que:

λ_w parâmetro de esbelteza, dado pela expressão seguinte para placas com reforços transversais rígidos e com um afastamento entre reforços transversais (a) largamente superior a b_w (Notas: Em geral, esta expressão conduz a resultados conservativos. Para ter em conta a relação a/b_w , é definido um coeficiente adicional k_t : o factor 0.35 presente na expressão seguinte corresponde a $0.81 / \sqrt{k_t}$, com $k_t = 5.34$):

$$\lambda_w = 0.35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (3.17)$$

b_w altura da alma excluindo os raios de curvatura (ou seja, extensão recta da alma)

η coeficiente definido pela expressão:

$$\eta = 0.7 + 0.35 \frac{f_{uw}}{f_{ow}}, \text{ com } \eta \leq 1,2 \quad (3.18)$$

onde:

$$f_{uw} = f_u \text{ (tensão de rotura do material na alma)}$$

$$f_{ow} = f_o.$$

No caso de o momento flector actuante ser inferior à resistência conferida pelos banzos ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), a contribuição dos banzos para o valor de cálculo do esforço transversal resistente é dada pela expressão:

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c Y_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

onde:

b_f largura do banzo

t_f espessura do banzo

$M_{f,Rd}$ valor de cálculo do momento flector resistente considerando apenas os banzos

c coeficiente definido pela expressão:

$$c = a \left(0,08 + \frac{4,4b_f t_f^2 f_{of}}{t_w b_w^2 f_{ow}} \right) \quad (3.20)$$

onde:

a distância entre reforços transversais.

Caso o valor do momento flector actuante seja superior à resistência conferida pelos banzos ($M_{Ed} > M_{f,Rd}$), considera-se que os banzos não têm qualquer contribuição para o valor de cálculo do esforço transversal resistente, isto é:

$$V_{f,Rd} = 0 \quad (3.21)$$

3.2.1.5 Verificação à encurvadura do banzo no plano da alma

De modo a evitar a encurvadura do banzo comprimido no plano da alma, deve ser verificada a seguinte condição:

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{kE}{f_{of}} \times \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (3.22)$$

onde:

A_w área da secção transversal da alma

A_{fc} área da secção transversal do banzo comprimido

k coeficiente que toma os seguintes valores:

- no caso de se admitir rotação plástica: $k = 0,30$
- no caso de se considerar o momento resistente plástico: $k = 0,40$
- no caso de se considerar o momento resistente elástico: $k = 0,55$

$f_{of} = f_o$ valor característico da tensão de cedência do material do banzo.

3.2.1.6 Resistência da alma a cargas transversais aplicadas num banzo

A resistência à encurvadura local da alma numa viga constituída por perfis extrudidos, sujeita a cargas transversais aplicadas num banzo, pode ser determinada através de expressões fornecidas na EN 1999 desde que não sejam permitidos deslocamentos laterais nos banzos, o que pode ser conferido pela sua própria rigidez ou por travamentos laterais.

Assim, a verificação da segurança de uma alma a uma carga transversal aplicada sobre um banzo é expressa por:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.23)$$

onde:

F_{Ed} valor de cálculo da força transversal aplicada

F_{Rd} valor de cálculo da força transversal resistente.

O valor de cálculo da resistência da alma à encurvadura local para cargas transversais aplicadas é determinado pela expressão:

$$F_{Rd} = \frac{L_{eff} t_w f_{ow}}{\gamma_{M1}} \quad (3.24)$$

em que:

L_{eff} comprimento efectivo para a resistência a cargas transversais, que pode ser obtido através da expressão:

$$L_{eff} = \chi_F l_y \quad (3.25)$$

na qual:

l_y comprimento carregado efectivo

χ_F factor de redução devido a encurvadura local sob o efeito de cargas transversais.

Para o caso em estudo, será determinada a resistência apenas a cargas transversais aplicadas sobre um banzo e equilibradas pelo esforço transversal na alma da secção, conforme é indicado na Figura 9.

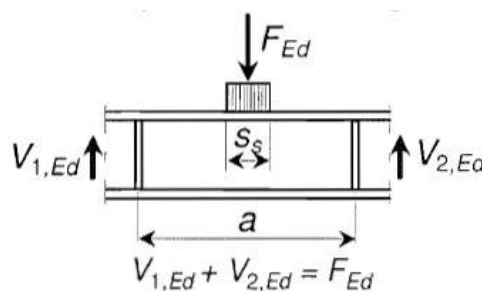


Figura 9: Comprimento de resistência a cargas transversais aplicadas [4]

O comprimento s_s indicado na Figura 9 corresponde à extensão no banzo ao longo da qual a carga é efectivamente distribuída. Este comprimento pode ser determinado admitindo uma dispersão da carga com inclinação 1:1, sujeito à restrição de não ser tomado um valor superior a b_w .

O comprimento l_y não deve ser superior à distância entre reforços transversais consecutivos (indicada por a na Figura 9) e é determinado pela expressão:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}), \text{ com } l_y \leq a \quad (3.26)$$

onde m_1 e m_2 são parâmetros adimensionais calculados através de:

$$m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} \quad (3.27)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \text{ se } \lambda_F > 0,5; \text{ nos restantes casos, } m_2 = 0 \quad (3.28)$$

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{ow}}{0,9 k_F E t_w^3}} \frac{1}{h_w} \quad (3.29)$$

onde:

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 \quad (3.30)$$

Relativamente ao factor de redução χ_F , pode ser determinado recorrendo à expressão:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F}, \text{ com } \chi_F \leq 1,0 \quad (3.31)$$

3.2.1.7 Resistência à encurvadura lateral

De acordo com EC9-1-1, a verificação da segurança à encurvadura lateral pode ser dispensada caso se verifique qualquer uma das seguintes hipóteses:

- A flexão ocorre em torno do eixo principal de menor inércia da secção transversal e a carga é aplicada com excentricidade em relação ao centro de corte da secção;
- Os deslocamentos laterais encontram-se impedidos ao longo de todo o elemento;
- A esbelteza normalizada ($\bar{\lambda}_{LT}$, a seguir definida), entre pontos efectivamente travados, é inferior a um determinado limite (a seguir indicado por $\bar{\lambda}_{0,LT}$).

Posto isto, para elementos sem travamento lateral contínuo e sujeitos a flexão segundo o eixo principal de maior inércia, a verificação da segurança à encurvadura lateral é expressa pela seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.32)$$

onde:

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

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (3.33)$$

onde:

χ_{LT} factor de redução para a resistência à encurvadura lateral, determinado pela expressão:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (3.34)$$

em que ϕ_{LT} é determinado pela expressão:

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (3.35)$$

onde:

α_{LT} factor de imperfeição

$\bar{\lambda}_{LT}$ esbelteza normalizada (para encurvadura lateral)

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ limite do patamar horizontal (para encurvadura lateral).

Os valores de α_{LT} e $\bar{\lambda}_{0,LT}$ tomam os valores indicados na Tabela 17:

Tabela 17: Valores de α_{LT} e $\bar{\lambda}_{0,LT}$ (adaptado de [4])

Secções transversais	α_{LT}	$\bar{\lambda}_{0,LT}$
Classe 1 ou 2	0,10	0,60
Classe 3 ou 4	0,20	0,40

A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ é determinada pela expressão:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}} \quad (3.36)$$

na qual:

M_{cr} momento crítico elástico de encurvadura lateral.

Para vigas com secção uniforme e simétrica em relação aos dois eixos principais de inércia, com condições de apoio padrão em cada extremidade e sujeitas, apenas, a um momento flector uniforme, o momento crítico M_{cr} é calculado pela expressão:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + \frac{I_w}{I_z}} \quad (3.37)$$

onde:

- G módulo de distorção
- I_t constante de torção de Saint-Venant
- I_w constante de empenamento
- I_z momento de inércia em relação ao eixo principal de menor inércia (z-z)
- L distância entre pontos travados lateralmente na viga.

De acordo com EC9-1-1, os efeitos da encurvadura lateral podem ser desprezados case se verifique $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$ ou $M_{Ed} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}^2 M_{cr}$.

3.2.1.8 Controlo dos deslocamentos

De acordo com a NP EN 1991-1-1 (em particular, o disposto no Anexo Nacional da Norma), os limites do deslocamento vertical indicados para vigas de pavimentos em geral (no caso de não serem acordados outros valores com o dono de obra) são dados por:

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0 = \frac{l}{250}$$

$$\delta_{2,max} = \frac{l}{300}$$

onde l corresponde ao vão da viga a ser analisada (no caso de vigas em consola, tomar o dobro do vão da consola), δ_1 é a variação da flecha devida às acções permanentes, δ_2 é a variação da flecha devida às acções variáveis intervenientes na combinação característica e δ_0 é a eventual contra-flecha inicial da viga.

3.2.2 Verificação da segurança de colunas

3.2.2.1 Classificação das secções

O procedimento de classificação das secções transversais de colunas é idêntico ao referido na secção 3.2.1.1 a propósito de vigas.

3.2.2.2 Zonas afectadas pelo calor

O procedimento de determinação dos efeitos da HAZ na secção transversal de colunas é idêntico ao referido na secção 3.2.1.2 a propósito de vigas.

3.2.2.3 Resistência à flexão

O procedimento de cálculo da resistência à flexão da secção transversal de colunas é idêntico ao referido na secção 3.2.1.3 a propósito de vigas.

3.2.2.4 Resistência à compressão da secção transversal

Ao nível das secções transversais, o valor de cálculo do esforço de compressão actuante N_{Ed} deve satisfazer a condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.38)$$

onde:

$N_{c,Rd}$ valor de cálculo da resistência à compressão uniforme, considerado igual ao menor dos valores $N_{u,Rd}$ e $N_{c,Rd}$, definidos através de:

- o para secções com furos não preenchidos

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.39)$$

- o para outras secções

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (3.40)$$

onde:

A_{net} área útil da secção, obtida deduzindo os furos não preenchidos e tendo em conta o efeito do amaciamento na HAZ

A_{eff} área efectiva, considerando a encurvadura local bem como a dedução para ter em conta o amaciamento na HAZ, mas sem considerar eventuais furos.

3.2.2.5 Resistência à encurvadura de elementos em compressão uniforme

A verificação à encurvadura de um elemento sujeito a compressão uniforme é expressa pela seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.41)$$

em que:

$N_{b,Rd}$ valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura do elemento, dado por:

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \chi A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (3.42)$$

onde:

χ factor de redução para o modo de encurvadura relevante

A_{eff} área efectiva, tendo em conta a encurvadura local no caso de secções de classe 4.

$A_{eff} = A$ para secções de classe 1, 2 ou 3.

O factor de redução para o modo de encurvadura, χ , é determinado através da expressão:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (3.43)$$

onde:

ϕ factor calculado pela expressão:

$$\phi = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.44)$$

$\bar{\lambda}$ esbelteza normalizada (para encurvadura em compressão uniforme), definida pela expressão:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_o}{N_{cr}}} \quad (3.45)$$

α factor de imperfeição

$\bar{\lambda}_0$ limite do patamar horizontal (para encurvadura em compressão uniforme)

N_{cr} carga crítica elástica (isto é, o valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica relevante, calculado com as propriedades da secção transversal bruta).

Os valores de α e $\bar{\lambda}_0$ são indicados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores de α e $\bar{\lambda}_0$ (adaptado de [4])

Classe de encurvadura do material	Encurvadura por flexão		Encurvadura por torção ou por flexão-torção	
	α	$\bar{\lambda}_0$	α	$\bar{\lambda}_0$
Classe A	0,20	0,10	0,35	0,40
Classe B	0,32	0,00	0,20	0,60

Em relação ao factor κ , este tem em conta os efeitos de enfraquecimento devidos à soldadura. No caso de não haver soldaduras, $\kappa = 1$. No caso de elementos com soldaduras longitudinais, $\kappa = 1$ para a encurvadura por torção ou por flexão-torção; para a encurvadura por flexão, tem-se:

- o Material da classe de encurvadura A (de acordo com as Tabelas A1 e B1)

$$\kappa = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0,05 + 0,1 \frac{A_1}{A}\right) \bar{\lambda}^{1,3(1-\bar{\lambda})} \quad (3.46)$$

com $A_1 = A - A_{haz}(1 - \rho_{o,haz})$, sendo A_{haz} a área da HAZ.

- o Material da classe de encurvadura B (de acordo com as Tabelas A1 e B1)

$$\begin{aligned} \kappa &= 1 + 0,04(4\bar{\lambda})^{0,5-\bar{\lambda}} - 0,22\bar{\lambda}^{1,4(1-\bar{\lambda})} \text{ se } \bar{\lambda} > 0,2 \\ \kappa &= 1 \text{ se } \bar{\lambda} \leq 0,2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

A carga crítica elástica de encurvadura por flexão é calculada pela expressão:







$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (3.48)$$

onde:

I momento de inércia da secção bruta em torno do eixo de flexão

L_{cr} comprimento de encurvadura, igual ao produto do comprimento do elemento entre pontos de apoio lateral (ou o próprio comprimento do elemento, no caso de consola) por um factor k que traduz a influência das condições de apoio, como se indica na Tabela 19.

Tabela 19: Coeficiente do comprimento de encurvadura k (adaptado de [4])

Condições nas extremidades		k
Contraventado e com rotação impedida em ambas as extremidades		0,70
Contraventado em ambas as extremidades e rotação impedida apenas numa extremidade		0,85
Contraventado mas sem rotação restringida em ambas as extremidades		1,00
Contraventado numa extremidade e com rotação impedida em ambas as extremidades		1,25
Contraventado e com rotação impedida numa extremidade, e com rotação parcialmente restringida mas translacção livre na outra extremidade		1,50
Contraventado e com rotação impedida numa extremidade, e translacção e rotação livres na outra extremidade		2,10

Desta forma, a esbelteza $\bar{\lambda}$ para a encurvadura por flexão pode ser expressa no seguinte formato:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_o}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A} \frac{f_o}{E}} \quad (3.49)$$

onde:

i raio de giração da secção transversal bruta.

Em relação à encurvadura por torção ou por flexão-torção, o Anexo I da EN 1999-1-1 apresenta informação relevante, designadamente quanto ao cálculo de N_{cr} ; no contexto do presente trabalho, importa salientar que, conforme é disposto na EN 1999-1-1, a possibilidade de ocorrência destes tipos de encurvadura pode ser desprezada nas seguintes situações:

- secção tubular;
- secção em I com dupla simetria;
- secção composta inteiramente por elementos salientes concorrentes num único ponto (p.ex., secção em T, em L ou cruciforme) e classificada como sendo da classe 1 ou 2.

3.2.2.6 Verificação de elementos em flexão composta com compressão

Para a verificação da estabilidade de elementos em flexão composta com compressão é feita uma distinção entre:

- Elementos que não são susceptíveis a deformar por torção, em particular secções tubulares circulares ou secções com as deformações por torção restringidas (apenas encurvadura por flexão);
- Elementos susceptíveis a deformar por torção, em particular elementos com secções de parede fina aberta e não restringidas à torção (encurvadura por flexão ou encurvadura lateral).

3.2.2.6.1 Encurvadura por flexão

Para um elemento com uma secção de parede fina aberta com dupla simetria, a flexão relativamente ao eixo principal de maior inércia (y-y) deve verificar a condição seguinte (tomando a secção condicionante da viga-coluna¹):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.50)$$

onde:

χ_y factor de redução para a encurvadura no plano z-x

¹ Em rigor, existe uma condição análoga em relação à flexão em torno do eixo de menor inércia e basta que seja verificado um dos critérios.

$N_{Rd} = Af_o/Y_{M1}$ para secções de classe inferior a 4 ou $N_{Rd} = A_{eff}f_o/Y_{M1}$ para secções de classe 4, no caso de elementos sem soldaduras. Para elementos com soldadura longitudinal, mas sem soldaduras localizadas, $N_{Rd} = \kappa Af_o/Y_{M1}$ ou $N_{Rd} = \kappa A_{eff}f_o/Y_{M1}$

$\xi_{yc} = 0,8$ ou, em alternativa, $\xi_{yc} = \xi_0 \times \chi_y$ (mas $\xi_{yc} \geq 0,80$)

$\xi_0 = 1,0$ ou, em alternativa, $\xi_0 = \alpha_y^2$ (mas $1,00 \leq \xi_0 \leq 1,56$)

$M_{y,Ed}$ valor de cálculo do momento flector actuante em relação ao eixo y.

Relativamente aos parâmetros ω_x e ω_0 , ambos devem tomar o valor de 1,0 para vigas-colunas sem soldaduras localizadas e com momentos de extremidade iguais. Caso contrário, se a HAZ ocorrer próximo das extremidades dos elementos ou próximo de pontos com momento nulo, ω_x e ω_0 são determinados através de:

$$\omega_x = \frac{\omega_0}{\chi + (1 - \chi) \sin\left(\frac{\pi x_s}{l_c}\right)} \quad (3.51)$$

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u Y_{M1}}{Y_{M2} f_o}, \text{ mas } \omega_0 \leq 1,0 \quad (3.52)$$

onde:

$\chi = \chi_y$ ou χ_z , dependendo do eixo de encurvadura

x_s distância entre a soldadura localizada e um apoio ou um ponto de inflexão na curvatura da deformada para o modo de encurvadura elástica associado ao esforço axial, conforme é ilustrado na Figura 10

l_c comprimento de encurvadura, conforme é ilustrado na Figura 10.

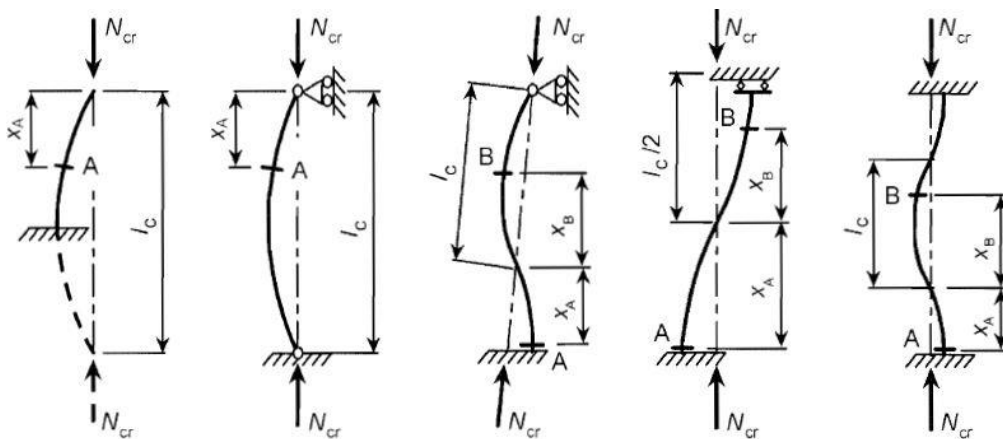


Figura 10: Comprimento de encurvadura l_c e definição de x_s (adaptado de [4])

3.2.2.6.2 Encurvadura lateral

Para uma secção de parede fina aberta, em geral, a seguinte condição deve ser verificada (na secção condicionante da viga-coluna):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y,Rd}}\right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}}\right)^{\xi_{zc}} \leq 1,0 \quad (3.53)$$

onde:

$$\eta_c = 0,8 \text{ ou, em alternativa, } \eta_c = \eta_0 \chi_z \text{ (mas } \eta_c \geq 0,8)$$

$$\eta_0 = \alpha_z^2 \alpha_y^2 \text{ (mas } 1,0 \leq \eta_0 \leq 2,0)$$

$$\gamma_c = \gamma_0$$

$$\gamma_0 = 1,0 \text{ ou, em alternativa, } \gamma_0 = \alpha_z^2 \text{ (mas } 1,0 \leq \gamma_0 \leq 1,56)$$

$$\xi_{zc} = 0,8 \text{ ou, em alternativa, } \xi_{zc} = \xi_0 \chi_z \text{ (mas } \xi_{zc} \geq 0,8)$$

$$\xi_0 = 1,0 \text{ ou, em alternativa, } \xi_0 = \alpha_y^2 \text{ (mas } 1,0 \leq \xi_0 \leq 1,56)$$

O parâmetro ω_{xLT} é calculado por uma expressão semelhante à utilizada para determinar ω_x , com a diferença de o coeficiente χ ser substituído por χ_{LT} :

$$\omega_{xLT} = \frac{\omega_0}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \sin\left(\frac{\pi \chi_s}{l_c}\right)} \quad (3.54)$$

3.2.2.7 Controlo dos deslocamentos

De acordo com a NP EN 1991-1-1 (em particular, o disposto no Anexo Nacional da Norma), os limites recomendados para o deslocamento horizontal no topo dos pilares em edifícios de vários pisos (no caso de não serem acordados outros valores com o dono de obra) são dados por:

$$\delta_{max} = \frac{h}{300} \text{ em cada piso}$$

$$\delta_{max} = \frac{h_0}{500} \text{ na estrutura globalmente}$$

sendo h a altura entre pisos e h_0 a altura total da estrutura.

3.2.3 Ligações

As ligações entre elementos estruturais em alumínio são tratadas de forma análoga às ligações entre elementos de aço. No entanto, existem alguns aspectos específicos em função das propriedades particulares do material, nomeadamente no que diz respeito à marcação e preparação das superfícies a serem ligadas bem como à adequação do material a ser utilizado na ligação.

No âmbito deste trabalho apenas irão ser abordadas as ligações do tipo soldadas. Assim sendo, a verificação da resistência deve ser feita não só em relação às soldaduras mas também à HAZ adjacente.

Relativamente ao material na HAZ, a sua resistência ao corte é dada pela expressão:

$$f_{v.haz} = \frac{f_{u.haz}}{\sqrt{3}} \quad (3.55)$$

Os valores característicos da resistência do metal utilizado na soldadura f_w para diferentes tipos de ligas de alumínio são apresentados na Tabela 10.

3.2.3.1 Soldadura longitudinal na alma de vigas

Para o dimensionamento de soldaduras longitudinais na alma de vigas (Figura 11), no caso de ligação dupla soldada com cordões de ângulo e solicitada paralelamente ao eixo da soldadura, a espessura mínima de cada cordão de soldadura é determinada pela expressão:

$$a \geq \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\tau_{Ed} t}{\frac{f_w}{\gamma_{Mw}}}} \quad (3.56)$$

onde:

τ_{Ed} tensão de corte actuante na ligação, paralela ao eixo da viga, que pode ser calculada através da expressão:

$$\tau_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{t_w h} \quad (3.57)$$

onde:

F_{Ed} força de corte que actua paralelamente ao eixo da viga

t_w espessura do elemento a soldar

h altura total do elemento a soldar.

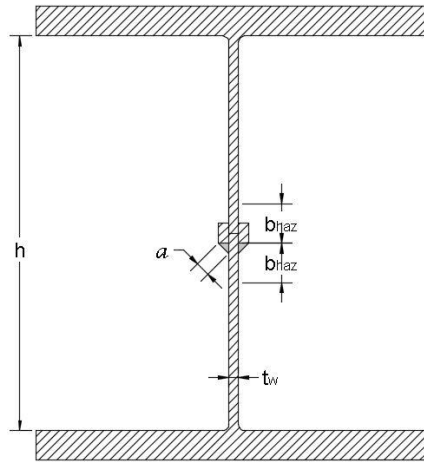


Figura 11: Ligação longitudinal na alma de vigas

Para que a ligação verifique a segurança na zona adjacente à HAZ, deve ser garantida a equação:

$$\tau_{haz,Ed} \leq \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad (3.58)$$

onde:

$\tau_{haz,Ed}$ valor de cálculo da tensão de corte actuante na HAZ, paralela ao eixo da soldadura

$f_{v,haz}$ valor característico da tensão resistente ao corte na HAZ, dado pela expressão (3.57)

γ_{Mw} factor parcial de segurança, indicado na Tabela 9.

3.2.3.2 Ligação da base da coluna

A resistência da ligação da base da coluna é verificada com base na condição aplicável, em geral, à verificação da resistência de cordões de ângulo, ou seja:

$$\sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3(\tau_{\perp Ed}^2 + \tau_{\parallel Ed}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (3.59)$$

onde:

$\sigma_{\perp Ed}$ tensão normal, correspondente ao esforço perpendicular à secção da garganta do cordão

$\tau_{\perp Ed}$ tensão tangencial actuante na secção da garganta, perpendicularmente ao eixo da soldadura

$\tau_{\parallel Ed}$ tensão tangencial actuante na secção da garganta, paralelamente ao eixo da soldadura.

4. EXEMPLO PRÁTICO

4.1 Introdução

O exemplo em estudo consiste num edifício industrial que contém uma zona “administrativa” (espaço para escritórios, salas de reunião, etc.) e uma zona dedicada à produção/fabrico. A estrutura principal do edifício é constituída por um conjunto de pórticos espaçados 6 metros entre si. O exemplo prático teve por base o documento “TALAT Lecture 2710: Static Design Example” [20].

Ilustra-se na Figura 12 um esquema dos pórticos da estrutura em estudo.

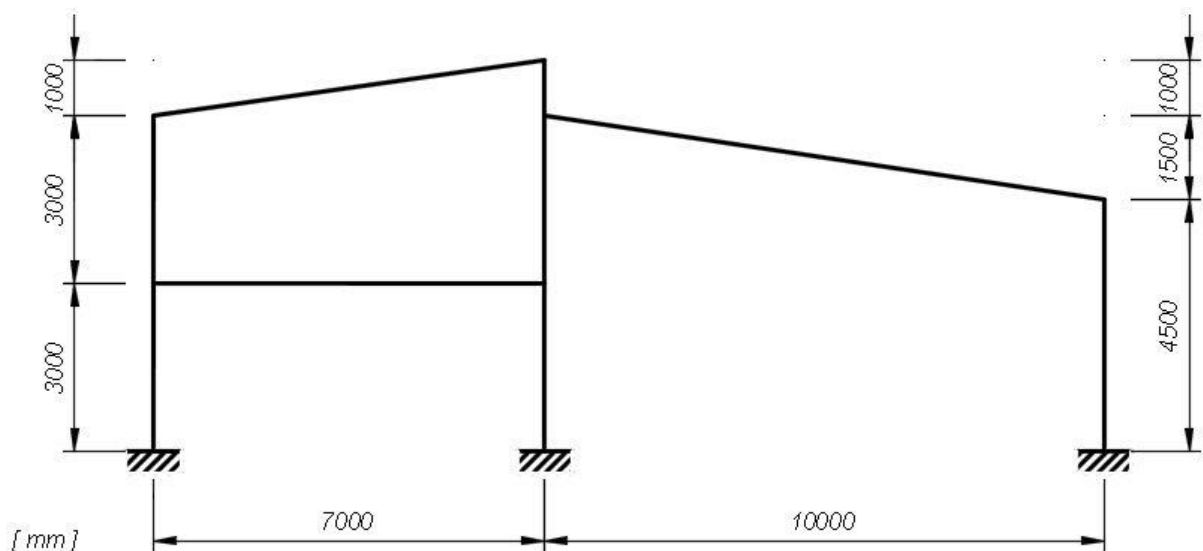


Figura 12: Estrutura em análise

4.2 Materiais

Para o exemplo prático em estudo serão utilizadas ligas de alumínio extrudidas do tipo *EN AW-6082* (temperamento *T6*) e chapas do tipo *EN AW-5083* (temperamento *H24*). Os valores das resistências encontram-se ilustrados na Tabela 20.

Tabela 20: Resistência das ligas de alumínio utilizadas

	f_o [MPa]	f_u [MPa]	Classe de encurvatura
EN AW-6082 T6 (5<t≤15)	260	310	A
EN AW-5083 H24	250	340	A

Os factores parciais de segurança adoptados são indicados na Tabela 21.

Tabela 21: Factores parciais de segurança

	γ_{M1}	γ_{M2}	γ_{Mw}
Elementos	1,10	1,25	-
Ligações soldadas	-	-	1,25

Por fim, indicam-se na Tabela 22 os valores considerados para as propriedades associadas ao alumínio.

Tabela 22: Propriedades do alumínio

Propriedades do alumínio	
Módulo de elasticidade	$E = 70\,000\text{ N/mm}^2$
Módulo de distorção	$G = 27\,000\text{ N/mm}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,33$
Coefficiente de expansão térmica linear	$\alpha = 23 \times 10^{-6}\text{ por }^\circ\text{C}$
Densidade	$\rho = 2700\text{ kg/m}^3$

4.3 Valores característicos das acções consideradas

Indicam-se na Tabela 23 os valores das acções permanentes.

Tabela 23: Cargas permanentes

Cobertura [kN.m⁻²]	0,50
Piso [kN.m⁻²]	1,00

De seguida, apresentam-se na Tabela 24 os valores das sobrecargas, correspondentes a pavimentos das categorias de utilização B (escritórios) e H (cobertura não acessível excepto para operações de limpeza e manutenção).

Tabela 24: Sobrecargas

Cobertura [kN.m⁻²]	0,40
Piso [kN.m⁻²]	3,00

Por fim, apresentam-se na Tabela 25 os valores correspondentes à acção do vento.

Tabela 25: Acção do vento

Pressão dinâmica de pico [kN.m^{-2}]	0,84
Coefficiente de pressão na parede de barlavento	0,75
Coefficiente de pressão na parede de sotavento	-0,40
Coefficiente de pressão na cobertura	-0,30
Pressão na parede de barlavento [kN.m^{-2}]	0,63
Pressão na parede de sotavento [kN.m^{-2}]	-0,34
Pressão na cobertura [kN.m^{-2}]	-0,25

Ilustra-se na Figura 13 o conjunto de cargas aplicadas à estrutura, nomeadamente o peso próprio, as sobrecargas e o vento actuante na cobertura.

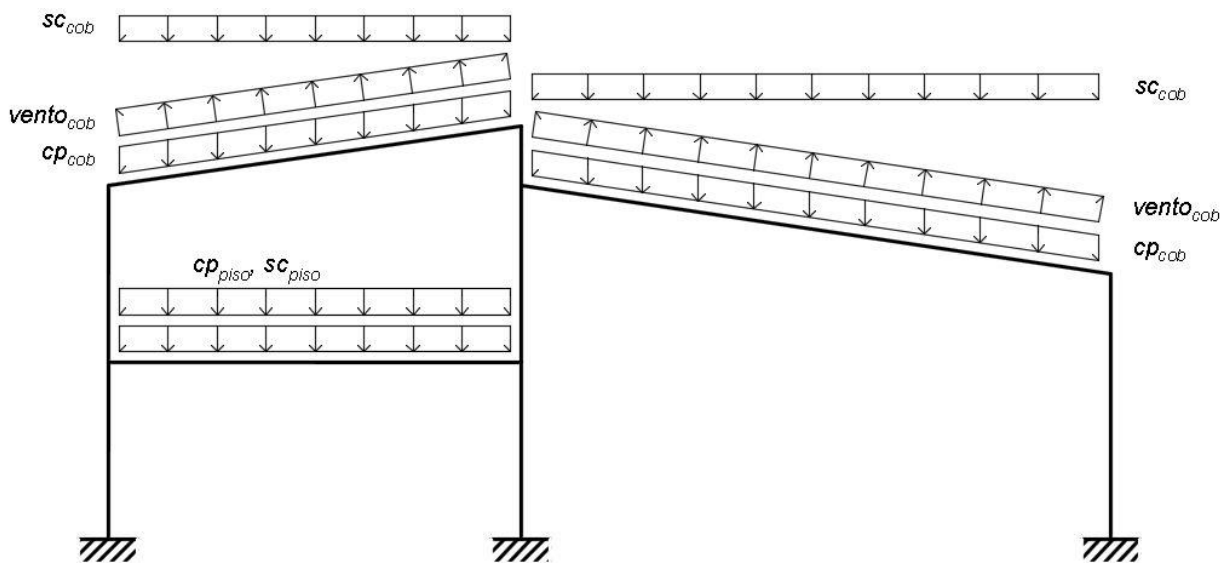


Figura 13: Cargas aplicadas à estrutura (peso próprio, sobrecarga e vento)

4.4 Combinações de acções

Apresentam-se na Tabela 26 os valores adoptados para os coeficientes ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , de acordo com o disposto no Eurocódigo 1.

Tabela 26: Coeficientes ψ_0 , ψ_1 e ψ_2

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas	0,70	0,50	0,30
Vento	0,60	0,20	0

Nas Tabelas 27 e 28 apresentam-se as combinações de acções consideradas para verificações de ELU e de ELS, respectivamente. Em relação à acção do vento, em particular, são considerados dois casos distintos consoante o lado da parede mais alta corresponda a barlavento (caso 1) ou a sotavento (caso 2).

Tabela 27: Combinações de acções para verificações de ELU

LC 1	$1.35 cp + 1.5(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5\psi_0 vento_1$
LC 2	$1.35 cp + 1.5(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5\psi_0 vento_2$
LC 3	$1.35 cp + 1.5\psi_0(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5 vento_1$
LC 4	$1.35 cp + 1.5\psi_0(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5 vento_2$
LC 5	$1.00 cp + \psi_0(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5 vento_1$
LC 6	$1.00 cp + \psi_0(sc_{piso} + sc_{cob}) + 1.5 vento_2$

Tabela 28: Combinações de acções para verificações de ELS

LC 1	$cp + \psi_1(sc_{piso} + sc_{cob}) + \psi_2 vento_1$
LC 2	$cp + \psi_1(sc_{piso} + sc_{cob}) + \psi_2 vento_2$
LC 3	$cp + \psi_2(sc_{piso} + sc_{cob}) + \psi_1 vento_1$
LC 4	$cp + \psi_2(sc_{piso} + sc_{cob}) + \psi_1 vento_2$

4.5 Valores de cálculo dos efeitos das acções

4.5.1 Esforços e deslocamentos para os valores característicos das acções

Na Figura 14 são referenciadas as colunas e vigas de cada pórtico, bem como as respectivas secções de controlo.

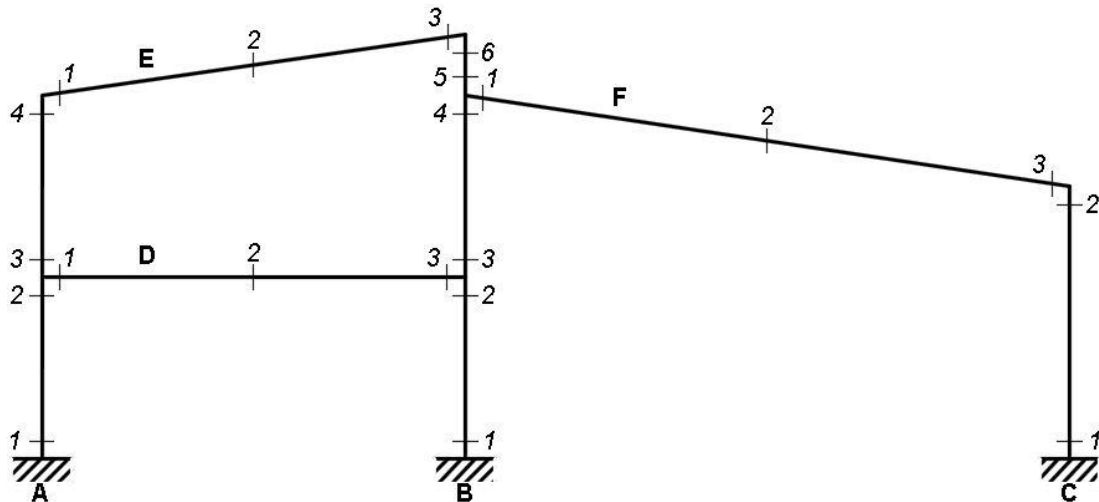


Figura 14: Secções nos elementos do modelo da estrutura

Apresentam-se, em seguida, os valores dos esforços e deslocamentos instalados nas secções de controlo das colunas A e B e das vigas D e F, em correspondência com os valores característicos das acções (resultados de cálculo elástico linear). Tais valores são apresentados em formato matricial, sendo que cada linha corresponde a uma acção distinta, nomeadamente: (1) peso próprio, (2) sobrecarga no piso, (3) sobrecarga na cobertura, (4) vento – caso 1 e (5) vento – caso 2.

Para as colunas apresentam-se matrizes de momentos flectores e esforços axiais, com 2 secções de controlo em cada barra (as extremidades) e vector de deslocamentos correspondentes ao topo da coluna; para as vigas apresentam-se matrizes de momentos flectores e esforços transversos, com 3 secções de controlo em cada barra (as extremidades e o meio-vão) e vector de deslocamentos correspondentes à secção de meio-vão da viga.

$$M_A = \begin{bmatrix} 8,6 & -13,5 & 6,9 & -4,1 \\ 15,9 & -30,5 & 24,6 & -6,9 \\ 2,3 & -2,2 & -1,1 & -1,5 \\ -19,8 & 9,9 & -6,2 & 5,4 \\ 12,7 & -5,8 & 7,8 & -5,6 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$N_A = \begin{bmatrix} -34,0 & -11,15 \\ -64,2 & -1,6 \\ -7,7 & -7,3 \\ 10,1 & 5,3 \\ -0,8 & 3,0 \end{bmatrix} [kN]$$

$$\delta_A = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 0,000 \\ 0,000 \\ 0,008 \\ -0,008 \end{bmatrix} [m]$$

$$M_B = \begin{bmatrix} -2,4 & 9,2 & -7,8 & -7,2 & 11,1 & 14,8 \\ -14,8 & 31,5 & -26,2 & 5,3 & -4,0 & 6,6 \\ 2,0 & -1,2 & 0,7 & -6,6 & 9,5 & 9,6 \\ -18,9 & 13,0 & -4,0 & 11,9 & -5,1 & -3,8 \\ 13,2 & -8,7 & 4,6 & -4,0 & -7,5 & -9,5 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$N_B = \begin{bmatrix} -52,2 & -30,2 & -12,8 \\ -60,8 & 2,6 & 1,6 \\ -21,5 & -22,0 & -9,5 \\ 9,7 & 14,4 & 5,2 \\ 18,1 & 14,3 & 7,5 \end{bmatrix} [kN]$$

$$\delta_B = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 0,000 \\ 0,000 \\ 0,008 \\ -0,008 \end{bmatrix} [m]$$

$$M_D = \begin{bmatrix} -20,4 & 19,3 & -17,1 \\ -55,2 & 53,9 & -57,6 \\ -1,2 & 0,4 & 1,9 \\ 16,1 & -0,4 & -17,0 \\ -13,6 & -0,1 & 13,4 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$V_D = \begin{bmatrix} 22,2 & -21,3 \\ 62,6 & -63,4 \\ 0,4 & 0,4 \\ -4,7 & -4,7 \\ 3,8 & 3,8 \end{bmatrix} [kN]$$

$$\delta_D = \begin{bmatrix} -0,005 \\ -0,013 \\ 0,000 \\ 0,000 \\ 0,000 \end{bmatrix} [m]$$

$$M_F = \begin{bmatrix} -18,4 & 26,7 & -10,7 \\ 9,2 & 4,3 & -0,7 \\ -16,0 & 18,1 & -7,8 \\ 17,0 & -12,3 & -3,3 \\ 3,5 & -12,0 & 10,9 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$V_F = \begin{bmatrix} 17,1 & -15,6 \\ -1,0 & -1,0 \\ 12,7 & -11,1 \\ -9,6 & 5,6 \\ -6,9 & 8,3 \end{bmatrix} [kN]$$

$$\delta_F = \begin{bmatrix} -0,008 \\ -0,002 \\ -0,005 \\ 0,004 \\ 0,003 \end{bmatrix} [m]$$

4.5.2 Esforços e deslocamentos para verificações de Estados Limites

Em Anexo (Tabela C1 à Tabela C12) são indicados os esforços correspondentes a todas as combinações de cálculo para a estrutura em estudo. Apresentam-se de seguida, na Tabela 29, os valores de cálculo dos esforços e deslocamentos para os elementos analisados.

Tabela 29: Esforços e deslocamentos de cálculo

Elemento	Momento flector [kNm]		Esforço axial [kN]		Esforço transversal [kN]		Deslocamento [m]
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo absoluto
Coluna A	49,3	-70,8	-4,2	-154,2	-	-	0,002
Coluna B	65,7	-51,1	-0,5	-188,2	-	-	0,002
Viga D	107,4	-120,2	-	-	126,9	-125,9	0,011
Viga F	62,4	-33,0	-	-	36,5	-35,7	0,009

4.6 Verificação da segurança da coluna A

4.6.1 Pré-dimensionamento da secção transversal

Todos os valores apresentados até este ponto relativos a esforços dos elementos da estrutura resultaram de um pré-dimensionamento que foi efectuado tanto para as colunas, como para as vigas da estrutura. Indicam-se as dimensões da coluna A na Tabela 30; complementarmente, ilustra-se na Figura 15 a sua secção transversal assim definida.

Tabela 30: Propriedades geométricas da secção transversal da coluna A

h [mm]	240
b [mm]	220
t_w [mm]	5
t_f [mm]	15
r [mm]	5
A_{secção} [mm²]	7650
I_{secção} [mm⁴]	87,5 × 10 ⁶

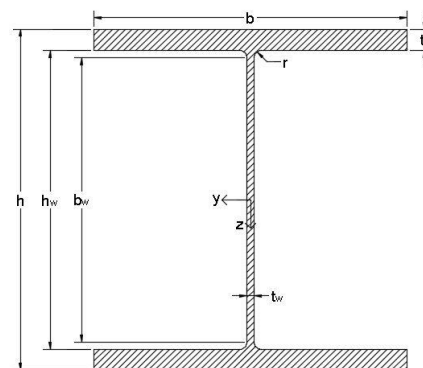


Figura 15: Secção transversal da coluna A

4.6.2 Esforços no elemento

Representam-se, de seguida, os valores de cálculo dos esforços (momento flector e esforço axial) na coluna A para as combinações 2, 4 e 6 (correspondentes ao caso 2 da acção do vento).

$$M_{LC2} = \begin{bmatrix} 46,5 \\ -70,8 \\ 49,3 \\ -21,6 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC4} = \begin{bmatrix} 41,7 \\ -48,2 \\ 38,3 \\ -18,7 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC6} = \begin{bmatrix} 38,7 \\ -43,5 \\ 35,8 \\ -17,3 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$N_{LC2} = \begin{bmatrix} -154,2 \\ -154,2 \\ -26,5 \\ -26,5 \end{bmatrix} [kN]$$

$$N_{LC4} = \begin{bmatrix} -92,0 \\ -92,0 \\ -11,6 \\ -11,6 \end{bmatrix} [kN]$$

$$N_{LC6} = \begin{bmatrix} -80,2 \\ -80,2 \\ -7,7 \\ -7,7 \end{bmatrix} [kN]$$

Nos Gráficos 1 e 2 apresenta-se a variação do momento flector e do esforço axial ao longo da coluna A para as 3 combinações de acções em causa.

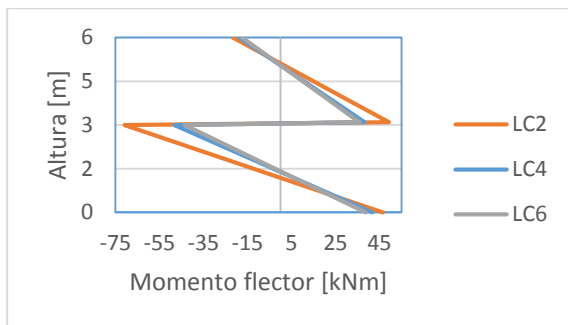


Gráfico 1: Variação de momento flector na coluna A

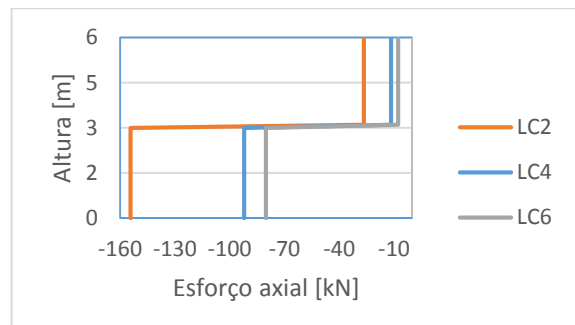


Gráfico 2: Variação de esforço axial na coluna A

Assim, conclui-se que os esforços condicionantes (momento flector na secção 1, momento flector na secção 2 e esforço axial) para a coluna A apresentam os seguintes valores:

$$M_{1.Ed} = 70,8 \text{ kN}$$

$$M_{2.Ed} = 46,5 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 154,2 \text{ kN}$$

4.6.3 Classificação da secção transversal à flexão segundo y-y

4.6.3.1 Alma

Para a flexão do perfil (que ocorre segundo o eixo y-y), existe um gradiente de tensões ao longo da alma com linha neutra no seu centro. Assim, é aplicada a seguinte expressão (vd. Tabela 11):

$$\beta_w = 0,40 \frac{b_w}{t} = 0,40 \frac{200}{5} = 16,0$$

sendo b_w a largura da alma, dada por:

$$b_w = h - 2t_f - 2r = 240 - 2 \times 15 - 2 \times 5 = 200 \text{ mm}$$

Recorrendo à Tabela 13, tratando-se a alma de um elemento interno, sem soldaduras, e sendo o material de classe A, obtêm-se os seguintes limites:

$$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 10,8$$

$$\beta_{2w} = 16\varepsilon = 15,7$$

$$\beta_{3w} = 22\varepsilon = 21,6$$

Atendendo a que $\beta_{2w} < \beta_w < \beta_{3w}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, conclui-se que na alma da coluna regista-se a condição própria duma secção de classe 3.

4.6.3.2 Banzos

Relativamente aos banzos, estes apresentam gradiente de tensão nulo, pelo que se aplica a seguinte expressão (vd. Tabela 11):

$$\beta_f = \frac{b_f}{t} = \frac{102,5}{15} = 6,8$$

sendo b_f a largura do banzo, dada por:

$$b_f = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{220 - 5 - 2 \times 5}{2} = 102,5 \text{ mm}$$

Mais uma vez, recorrendo à Tabela 13, tratando-se os banzos de componentes externos, sem soldaduras, e sendo o material de classe A, obtêm-se:

$$\beta_{1f} = 3\varepsilon = 2,9$$

$$\beta_{2f} = 4,5\varepsilon = 4,4$$

$$\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5,9$$

Atendendo a que $\beta_f > \beta_{3f}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, conclui-se que nos banzos da coluna regista-se a condição própria duma secção da classe 4.

Desta forma, sendo a classe da secção transversal à flexão definida como a maior das classes correspondentes aos seus componentes, a secção da coluna A para flexão segundo y-y é da classe 4.

Assim, é necessário contabilizar os efeitos da encurvadura local. O factor de redução para ter em conta os efeitos da encurvadura local, que permite obter o valor da espessura efectiva, é calculado através da expressão (3.5):

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = 0,941$$

em que os coeficientes C_1 e C_2 são determinados conforme é indicado na Tabela 14. Neste caso, tratando-se de componentes externos e com material de classe A sem soldaduras, obtém-se:

$$C_1 = 10$$

$$C_2 = 24$$

Por fim, o valor da espessura efectiva é determinado pela expressão (3.6):

$$t_{eff} = \rho_c t = 0,941 \times 15 = 14,1 \text{ mm}$$

4.6.4 Classificação da secção transversal à flexão segundo z-z

A coluna não está sujeita a flexão em torno do eixo z-z. Assim, sendo nulo o gradiente de tensões, a secção é classificada da classe 4 para este efeito, à semelhança da classificação para a flexão em torno do eixo y-y.

4.6.5 Classificação da secção transversal à compressão axial

4.6.5.1 Alma

Para uma situação de compressão simples, a alma não apresenta gradiente de tensões pelo que, conforme é indicado na Tabela 11, é válida a seguinte expressão:

$$\beta_w = \frac{b_w}{t} = \frac{200}{5} = 40,0$$

Recorrendo mais uma vez à Tabela 13, sendo o material de classe A e tratando-se a alma de um componente interno, sem soldaduras, obtêm-se os seguintes limites:

$$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 10,8$$

$$\beta_{2w} = 16\varepsilon = 15,7$$

$$\beta_{3w} = 22\varepsilon = 21,6$$

Atendendo a que $\beta_w > \beta_{3w}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, conclui-se que na alma da coluna regista-se a condição própria duma secção da classe 4.

O factor de redução para ter em conta os efeitos da encurvadura local, que permite obter o valor da espessura efectiva, é calculado através da expressão (3.5):

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = 0,652$$

em que os coeficientes C_1 e C_2 são determinados conforme é indicado na Tabela 14. Neste caso, tratando-se a alma de um componente interno e com material de classe A sem soldaduras, obtém-se:

$$C_1 = 32$$

$$C_2 = 220$$

Por fim, o valor da espessura efectiva é dado pela expressão (3.6):

$$t_{eff} = \rho_c t = 0,652 \times 5 = 3,3 \text{ mm}$$

4.6.5.2 Banzos

Relativamente aos banzos, estes também não apresentam gradiente de tensões para uma situação de compressão simples, pelo que o procedimento é em tudo igual ao adoptado para a flexão segundo y-y, em 4.6.3.2. Desta forma, a espessura efectiva toma o mesmo valor:

$$t_{eff} = 14,1 \text{ mm}$$

4.6.6 Soldaduras

Recorrendo às expressões (3.7) e (3.8) é possível determinar os factores de redução para f_0 e para f_u , respectivamente:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} = \frac{125}{260} = 0,5$$

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} = \frac{185}{310} = 0,6$$

Por forma a determinar a extensão da HAZ, de acordo com o indicado em 3.2.1.2, tem-se para as extremidades da alma:

$$12 \text{ mm} < t_f \leq 25 \text{ mm}: \quad b_{haz} = 35 \text{ mm}$$

4.6.7 Resistência da secção à flexão segundo y-y

Atendendo à expressão (3.9), a resistência da secção à flexão deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante M_{Ed} já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$M_{Ed} = 70,8 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.11):

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_0}{\gamma_{M1}}$$

O coeficiente de forma α é dado pela Tabela 15. Como tal, atendendo a que a secção transversal não tem soldaduras e é da classe 4 para flexão em torno do eixo y-y, o coeficiente de forma toma o valor dado pela expressão seguinte:

$$\alpha = \frac{W_{eff}}{W_{el}} = \frac{69,4 \times 10^4}{72,9 \times 10^4} = 0,952$$

O módulo de flexão elástico toma o valor:

$$W_{el} = \frac{I_y \times 2}{h} = \frac{87,5 \times 10^6 \times 2}{240} = 72,9 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Por outro lado, o módulo de flexão efectivo (obtido tendo em consideração a redução da espessura dos elementos de classe 4, conforme se ilustra na Figura 16) é dado por:

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{\frac{h}{2} + e_{eff}} = \frac{85,2 \times 10^6}{\frac{240}{2} + 2,7} = 69,4 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

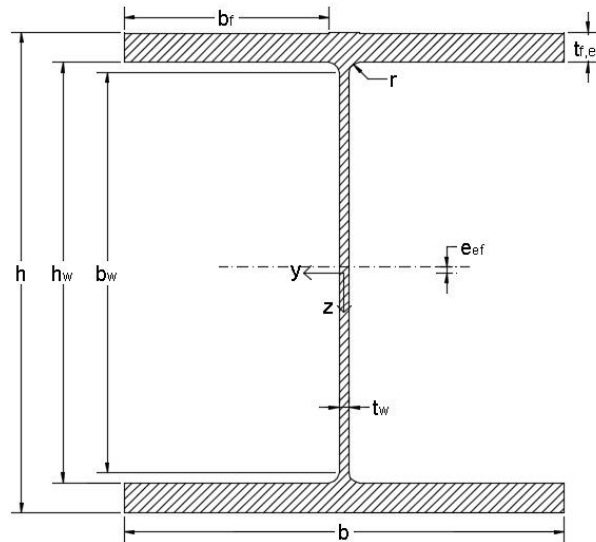


Figura 16: Secção efectiva da coluna A à flexão segundo y-y

Assim, o momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos, toma o valor:

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,952 \times 72,9 \times 10^4 \times 260}{1,10} = 164,1 \text{ kNm}$$

Recorrendo à expressão (3.9), a resistência da secção transversal à flexão segundo y-y encontra-se verificada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{70,8}{164,1} = 0,43 < 1,0$$

4.6.8 Resistência do elemento à compressão axial com flexão segundo y-y

O esforço axial actuante N_{Ed} toma o seguinte valor, como definido anteriormente:

$$N_{Ed} = 154,2 \text{ kN}$$

O coeficiente κ toma, de acordo com o que foi mencionado em 3.2.2.5, o valor:

$$\kappa = 1,0$$

O factor de redução devido à encurvadura χ_y é determinado pela expressão (3.43):

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,879 + \sqrt{0,879^2 - 0,787^2}} = 0,788$$

O coeficiente ϕ é dado pela expressão (3.44), tomando o valor:

$$\phi = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \times [1 + 0,2 \times (0,787 - 0,1) + 0,787^2] = 0,879$$

O factor de imperfeição α é retirado da Tabela 18, tomando para material de classe A o valor:

$$\alpha = 0,20$$

O coeficiente $\bar{\lambda}_y$ é determinado pela expressão (3.45), sendo o seu valor:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_o}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{7120 \times 260}{2985,7}} = 0,787$$

A área efectiva, A_{eff} , calculada tendo em conta a espessura efectiva, é dada por:

$$\begin{aligned} A_{eff} &= A_{secção} - 2b_f(t_f - t_{f,ef}) - b_w(t_w - t_{w,ef}) = 7650 - 2 \times 102,5(15 - 14,1) - 200(5 - 3,3) = \\ &= 7120 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Por outro lado, o valor da carga crítica elástica N_{cr} , de acordo com a expressão (3.48), é dada por:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 7,0 \times 10^4 \times 87,5 \times 10^6}{4,5^2} = 2985,7 \text{ kN}$$

sendo que o momento de inércia da secção em torno de y-y tem o seguinte valor:

$$I_y = 87,5 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

e o comprimento de encurvadura, de acordo com o indicado na Tabela 19, toma o valor:

$$L_{cr} = 1,50 \times 3,0 = 4,5 \text{ m}$$

Em relação ao coeficiente $\bar{\lambda}_0$, atendendo ao indicado na Tabela 18 e tratando-se de um material de classe A, tem-se que:

$$\bar{\lambda}_0 = 0,10$$

Assim, o valor do esforço axial resistente à encurvadura é dado pela expressão (3.42):

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \chi A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \times 0,788 \times 7120 \times 260}{1,10} = 1326,3 \text{ kN}$$

Por último, recorrendo à expressão (3.41), é possível verificar a condição de segurança da coluna submetida à compressão axial com flexão segundo y-y:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{154,2}{1326,3} = 0,12 < 1,0$$

4.6.9 Resistência do elemento à compressão axial com flexão segundo z-z

O esforço axial actuante N_{Ed} toma o mesmo valor definido anteriormente:

$$N_{Ed} = 154,2 \text{ kN}$$

Importa salientar que, neste caso, o comprimento de encurvadura corresponde à distância entre madres que toma o valor:

$$L_{cr} = 1,0 \text{ m}$$

O valor do esforço axial resistente à encurvadura é determinado pela expressão (3.42):

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \chi A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \times 0,954 \times 7120 \times 260}{1,10} = 1605,8 \text{ kN}$$

Assim, é possível concluir que a coluna verifica a condição de segurança à compressão axial com flexão segundo z-z:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{154,2}{1605,8} = 0,10 < 1,0$$

4.6.10 Resistência à encurvadura por flexão

Neste caso, por forma a verificar a resistência à encurvadura por flexão da viga-coluna, deve ser satisfeita a expressão (3.50):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

Conforme já foi referido, o valor de cálculo do esforço normal N_{Ed} é o seguinte:

$$N_{Ed} = 154,2 \text{ kN}$$

O factor de redução devido à encurvadura χ_y , de acordo com o calculado em 4.6.8, toma o seguinte valor:

$$\chi_y = 0,788$$

O coeficiente ω_x pode ser determinado recorrendo à expressão (3.51):

$$\omega_x = \frac{\omega_0}{\chi + (1 - \chi) \sin\left(\frac{\pi \chi_s}{l_c}\right)} = \frac{0,630}{0,788 + (1 - 0,788) \sin\left(\frac{\pi \times 2,25}{4,5}\right)} = 0,630$$

Por outro lado, o coeficiente ω_0 é dado pela expressão (3.52):

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u \gamma_{M1}}{\gamma_{M2} f_o} = \frac{0,6 \times 310}{1,25} \times \frac{1,10}{260} = 0,630 < 1,0$$

O comprimento de encurvadura l_c , de acordo com o indicado na Tabela 19, é calculado através de:

$$l_c = 1,5 \times 3,0 = 4,5 \text{ m}$$

Assim, de acordo com o indicado na Figura 10, a distância x_s corresponde a metade do comprimento de encurvadura da coluna:

$$x_s = \frac{4,5}{2} = 2,25 \text{ m}$$

O esforço axial resistente, de acordo com a expressão (3.40), corresponde a:

$$N_{Rd} = \frac{A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{7120 \times 260}{1,10} = 1682,9 \text{ kN}$$

O coeficiente ξ_{yc} deve tomar sempre um valor superior a 0,80 e pode ser determinado recorrendo à expressão:

$$\xi_{yc} = \xi_0 \times \chi_y = 1,00 \times 0,788 = 0,788 < 0,80 \rightarrow \xi_{yc} = 0,80$$

Por outro lado, o coeficiente ξ_0 deve tomar um valor compreendido entre 1,00 e 1,56 e é dado por:

$$\xi_0 = \alpha_y^2 = 0,952^2 = 0,906 < 1,0 \rightarrow \xi_0 = 1,00$$

O factor de forma, α_y , foi anteriormente determinado (em 4.6.7), tendo-se que:

$$\alpha_y = 0,952$$

O momento flector actuante em relação ao eixo y-y, $M_{y.Ed}$, tem o seguinte valor:

$$M_{y.Ed} = 70,8 \text{ kNm}$$

Em relação ao momento flector resistente, $M_{y.Rd}$, calculado anteriormente, toma o valor:

$$M_{y.Rd} = 164,1 \text{ kNm}$$

Recorrendo de novo à expressão (3.50) confirma-se que a coluna A verifica a condição de segurança relativa à encurvadura por flexão:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y.Ed}}{\omega_0 M_{y.Rd}} = \left(\frac{154,2}{0,788 \times 0,630 \times 1682,9} \right)^{0,8} + \frac{70,8}{0,630 \times 164,1} = 0,945 < 1,0$$

4.6.11 Resistência à encurvadura por torção ou por flexão-torção

Por forma a verificar a resistência da viga-coluna à encurvadura por torção, deve ser satisfeita a expressão (3.53):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y.Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z.Ed}}{\omega_0 M_{z.Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1,0$$

Conforme já foi referido, o esforço normal N_{Ed} tem o seguinte valor:

$$N_{Ed} = 154,2 \text{ kN}$$

e o momento flector actuante em relação ao eixo y-y, $M_{y,Ed}$, toma o valor:

$$M_{y,Ed} = 70,8 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector actuante em relação ao eixo z-z, $M_{z,Ed}$, regista-se que:

$$M_{z,Ed} = 0$$

O factor de redução devido à encurvadura χ_z , de acordo com o apresentado em 4.6.9, toma o valor:

$$\chi_z = 0,954$$

O factor de redução devido à encurvadura lateral por torção χ_{LT} é calculado de acordo com a expressão (3.34), com a restrição de não poder ser tomado um valor superior a 1,0:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,529 + \sqrt{0,529^2 - 0,284^2}} = 1,026 > 1,0 \rightarrow \chi_{LT} = 1,0$$

O coeficiente ϕ_{LT} , dado pela expressão (3.35), toma o valor:

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,2(0,284 - 0,4) + 0,284^2] = 0,529$$

O factor de imperfeição α_{LT} e o coeficiente $\bar{\lambda}_{0,LT}$, recorrendo à Tabela 17, para uma secção transversal de classe 3, são, respectivamente, iguais a:

$$\alpha_{LT} = 0,2$$

$$\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,4$$

O parâmetro de esbelteza relativa $\bar{\lambda}_{LT}$, de acordo com a expressão (3.36), toma o valor:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,952 \times 72,9 \times 10^4 \times 260}{2231,1}} = 0,284$$

Por outro lado, o momento crítico elástico M_{cr} , é determinado pela expressão (3.37):

$$M_{cr} = \frac{C_1 \pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + \frac{I_w}{I_z}} = \frac{1,048 \times \pi^2 \times 7,0 \times 10^4 \times 26,6 \times 10^{-3}}{1,0^2} \sqrt{\frac{1,0^2 \times 2,7 \times 10^4 \times 5,1 \times 10^5}{\pi^2 \times 7,0 \times 10^4 \times 26,6 \times 10^6} + \frac{33,7 \times 10^4}{26,6 \times 10^6}} = 2231,1 \text{ kNm}$$

O coeficiente ω_x , calculado para a posição $x_s = 0$, é igual a:

$$\omega_x = 0,630$$

O coeficiente $\omega_{x,LT}$, segundo a expressão (3.54), toma o seguinte valor:

$$\omega_{xLT} = \frac{\omega_0}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \sin\left(\frac{\pi \chi_s}{l_c}\right)} = \frac{0,630}{1,0 + (1 - 1,0) \times \sin\left(\frac{\pi \times 0}{1,0}\right)} = 0,630$$

O esforço axial resistente N_{Rd} , apresentado em 4.6.10, é igual a:

$$N_{Rd} = 1682,9 \text{ kN}$$

O momento flector resistente segundo o eixo y-y, $M_{y,Rd}$, também foi apresentado anteriormente (em 4.6.7), tendo o seguinte valor:

$$M_{y,Rd} = 164,1 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente da secção segundo o eixo z-z, $M_{z,Rd}$, para uma secção sem furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.11):

$$M_{z,Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{eff} f_o}{\gamma_{M1}}$$

O coeficiente de forma α é dado pela Tabela 15. Como tal, atendendo a que a secção transversal não tem soldaduras e é da classe 4 para flexão em torno do eixo z-z, o coeficiente de forma toma o valor dado pela expressão seguinte:

$$\alpha = \frac{W_{eff}}{W_{el}} = \frac{22,8 \times 10^4}{24,2 \times 10^4} = 0,941$$

Assim, o momento flector resistente da secção toma o valor:

$$M_{z,Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,941 \times 24,2 \times 10^4 \times 260}{1,10} = 53,8 \text{ kNm}$$

O expoente η_c é dado pela seguinte expressão:

$$\eta_c = \eta_0 \chi_z = 1,0 \times 0,954 = 0,954$$

O coeficiente η_0 deve tomar sempre um valor compreendido entre 1,0 e 2,0, de acordo com a expressão:

$$\eta_0 = \alpha_z^2 \alpha_y^2 = 1,0^2 \times 0,952^2 = 0,906 < 1,0 \rightarrow \eta_0 = 1,0$$

O coeficiente α_z , conforme indicado anteriormente, toma o valor:

$$\alpha_z = 0,941$$

O coeficiente α_y , determinados em 4.6.7, toma o seguinte valor:

$$\alpha_y = 0,952$$

O expoente γ_c é dado pela expressão:

$$\gamma_c = \gamma_0 = 1,0$$

O coeficiente γ_0 deve tomar sempre um valor compreendido entre 1,0 e 2,0, de acordo com a expressão:

$$\gamma_0 = \alpha_z^2 = 0,941^2 = 0,885 < 1,0 \rightarrow \gamma_0 = 1,0$$

Por fim, o expoente ξ_{zc} é calculado de acordo com a expressão:

$$\xi_{zc} = \xi_0 \chi_z = 1,0 \times 0,954 = 0,954$$

O coeficiente ξ_0 deve tomar um valor compreendido entre 1,0 e 1,56, sendo calculado de acordo com a expressão:

$$\xi_0 = \alpha_y^2 = 0,952^2 = 0,906 < 1,0 \rightarrow \xi_0 = 1,0$$

Desta forma, uma vez determinados todos os parâmetros incluídos na expressão (3.53), é possível verificar que se encontra garantida a resistência da viga-coluna à encurvadura lateral por torção:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y.Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z.Ed}}{\omega_0 M_{z.Rd}} \right)^{\xi_{zc}} = \\ & = \left(\frac{154,2}{0,954 \times 0,630 \times 1682,9} \right)^{0,954} + \left(\frac{70,8}{1,0 \times 0,630 \times 164,1} \right)^{1,0} + \left(\frac{0}{0,630 \times 53,8} \right)^{0,954} = 0,845 < 1,0 \end{aligned}$$

A expressão (3.53) foi verificada para todos os pontos ao longo da coluna A, sendo o valor indicado anteriormente o mais condicionante. Desta forma, encontra-se sempre garantida a segurança.

4.6.12 Verificação ao Estado Limite de Deformação

Conforme apresentado anteriormente em 4.5.2, o deslocamento horizontal máximo na coluna A ocorre na secção 4, tomando como valor:

$$\delta_A = 0,002 \text{ m}$$

O deslocamento horizontal máximo permitido, no topo dos pilares, para edifícios em vários pisos pode ser dado por:

$$\delta_{max} = \frac{h}{300} = \frac{3,0}{300} = 0,010 \text{ m}$$

$$\delta_{max} = \frac{h_0}{500} = \frac{7,0}{500} = 0,014 \text{ m}$$

Assim sendo, a condição relativa ao Estado Limite de Deformação é verificada:

$$0,002 \text{ m} < 0,010 \text{ m}$$

4.7 Verificação da segurança da viga D

4.7.1 Pré-dimensionamento da secção transversal

Em relação à viga D, indicam-se na Tabela 31 as suas dimensões e, complementarmente, ilustra-se na Figura 17 a sua secção transversal.

Tabela 31: Propriedades geométricas da secção transversal da viga D

h [mm]	400
b [mm]	200
t_w [mm]	5
t_f [mm]	15
r [mm]	3
A_{secção} [mm²]	7850
I_{secção} [mm⁴]	243,6 × 10 ⁶

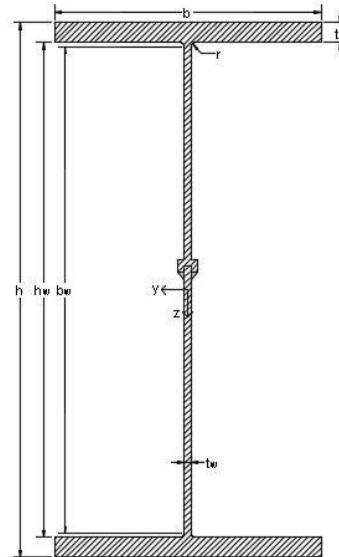


Figura 17: Secção transversal da viga D

4.7.2 Esforços no elemento

Representam-se, de seguida, os valores de cálculo dos esforços (momento flector e esforço transverso) na viga D para as combinações 1, 2 e 3 (conjunto que é suficiente para cobrir as situações condicionantes).

$$M_{LC1} = \begin{bmatrix} -102,4 \\ 107,2 \\ -116,8 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC2} = \begin{bmatrix} -120,2 \\ 107,4 \\ -98,5 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC3} = \begin{bmatrix} -42,0 \\ 63,1 \\ -88,9 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$V_{LC1} = \begin{bmatrix} 121,8 \\ - \\ -125,9 \end{bmatrix} [kN]$$

$$V_{LC2} = \begin{bmatrix} 126,9 \\ - \\ -120,7 \end{bmatrix} [kN]$$

$$V_{LC3} = \begin{bmatrix} 66,7 \\ - \\ -80,1 \end{bmatrix} [kN]$$

Nos Gráficos 3 e 4 apresentam-se as variações do momento flector e do esforço transverso ao longo da viga D para as 3 combinações de acções em causa.

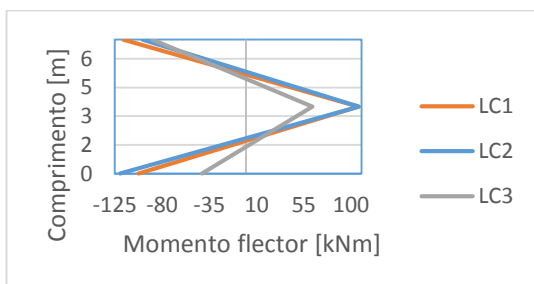


Gráfico 3: Variação de momento flector na viga D

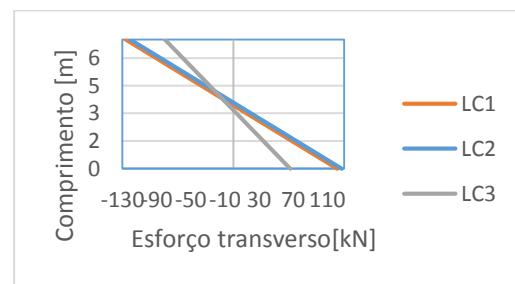


Gráfico 4: Variação de esforço transverso na viga D

Assim, conclui-se que os esforços condicionantes (momento flector na secção 2, momento flector na secção 3 e esforço transversal na secção 1) para a viga D apresentam os seguintes valores:

$$M_{2.Ed} = 107,4 \text{ kNm}$$

$$M_{3.Ed} = -116,8 \text{ kNm}$$

$$V_{1.Ed} = 126,9 \text{ kN}$$

4.7.3 Classificação da secção transversal

4.7.3.1 Alma

Para a flexão da viga, que ocorre em torno do eixo y-y da secção, existe um gradiente de tensões ao longo da alma com linha neutra no seu centro. Assim, é aplicada a seguinte expressão (vd. Tabela 11):

$$\beta_w = 0,40 \frac{b_w}{t} = 0,40 \frac{364}{5} = 29,1$$

sendo b_w a largura da alma, dada por:

$$b_w = h - 2t_f - 2r = 400 - 2 \times 15 - 2 \times 3 = 364 \text{ mm}$$

Recorrendo mais uma vez à Tabela 13, tratando-se a alma de um componente interno, com soldaduras, e sendo o material de classe A, obtêm-se os seguintes limites:

$$\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8,8$$

$$\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12,7$$

$$\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17,7$$

Assim, atendendo a que $\beta_w > \beta_{3w}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, na alma da viga regista-se a condição própria de secções da classe 4.

Mais uma vez, é necessário contabilizar os efeitos da encurvadura local. Determina-se, dessa forma, o factor de redução para ter em conta os efeitos da encurvadura local e que permite obter o valor da espessura efectiva, recorrendo para isso à expressão (3.5):

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = 0,752$$

em que os coeficientes C_1 e C_2 são determinados conforme é indicado na Tabela 14. Neste caso, tratando-se a alma de um componente interno, com soldaduras, e com material de classe A, obtêm-se:

$$C_1 = 29$$

$$C_2 = 198$$

Por fim, o valor da espessura efectiva é determinado pela expressão (3.6):

$$t_{eff} = \rho_c t = 0,752 \times 5 = 3,8 \text{ mm}$$

4.7.3.2 Banzos

Relativamente aos banzos, estes apresentam gradiente de tensão nulo. Assim, impõe-se a utilização da expressão indicada na Tabela 11:

$$\beta_f = \frac{b_f}{t} = \frac{94,5}{15} = 6,3$$

sendo b_f a largura do banzo, dada por:

$$b_f = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{200 - 5 - 2 \times 3}{2} = 94,5 \text{ mm}$$

Mais uma vez, recorrendo à Tabela 13, tratando-se os banzos de componentes salientes, sem soldaduras, e sendo o material de classe A, obtém-se:

$$\beta_{1f} = 3\varepsilon = 2,9$$

$$\beta_{2f} = 4,5\varepsilon = 4,4$$

$$\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5,9$$

Assim, atendendo a que $\beta_f > \beta_{3f}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, nos banzos da viga regista-se a condição própria de secções da classe 4.

Em face destes resultados, a secção transversal é considerada de classe 4.

O factor de redução para ter em conta os efeitos da encurvadura local é determinado através da expressão (3.5):

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = 0,975$$

em que os coeficientes C_1 e C_2 são determinados conforme é indicado na Tabela 14. Neste caso, tratando-se os banzos de componentes externos, sem soldaduras, e com material de classe A, obtém-se:

$$C_1 = 10$$

$$C_2 = 24$$

Por fim, o valor da espessura efectiva é obtido através da expressão (3.6):

$$t_{eff} = \rho_c t = 0,975 \times 15 = 14,6 \text{ mm}$$

4.7.3.3 Encurvadura do banzo comprimido no plano da alma

Por forma a evitar-se a encurvadura do banzo comprimido no plano da alma, a expressão (3.22) deve ser verificada. Esta condição é verificada no presente caso, tendo-se que:

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{364}{5} = 72,8 < \frac{kE}{f_{of}} \times \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = \frac{0,55 \times 70000}{260} \times \sqrt{\frac{370 \times 5}{200 \times 15}} = 116,3$$

4.7.4 Soldaduras

De acordo com as expressões (3.7) e (3.8) é possível determinar os factores de redução para f_0 e para f_u , respectivamente:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} = \frac{125}{260} = 0,5$$

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} = \frac{185}{310} = 0,6$$

Por forma a determinar a extensão da HAZ, tem-se:

$$t_w < 6 \text{ mm}: \quad b_{haz} = 20 \text{ mm}$$

Assim, a extensão da HAZ encontra-se representada na Figura 18.

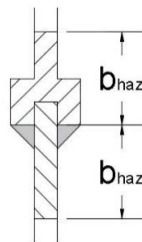


Figura 18: Soldadura da Viga D

4.7.5 Resistência da secção à flexão em torno de y-y

Conforme a expressão (3.9), a resistência da secção à flexão deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante, M_{Ed} , já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$M_{Ed} = 116,8 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.11):

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_0}{\gamma_{M1}}$$

O coeficiente de forma α é dado pela Tabela 15. Como tal, atendendo a que a secção transversal apresenta classe 4 para flexão em torno do eixo y-y com soldaduras, o coeficiente de forma toma o valor:

$$\alpha = \frac{W_{eff,HAZ}}{W_{el}} = \frac{11,7 \times 10^5}{12,2 \times 10^5} = 0,957$$

O módulo de flexão elástico tem o seguinte valor:

$$W_{el} = \frac{I_g \times 2}{h} = \frac{243,6 \times 10^6 \times 2}{400} = 12,2 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Por outro lado, o módulo de flexão elástico efectivo (obtido tendo em consideração a redução da espessura dos elementos de classe 4, conforme se ilustra na Figura 19), toma o valor:

$$W_{eff,HAZ} = \frac{I_{effe}}{\frac{h}{2} + e_{ef}} = \frac{238,4 \times 10^6}{\frac{400}{2} + 4,5} = 11,7 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

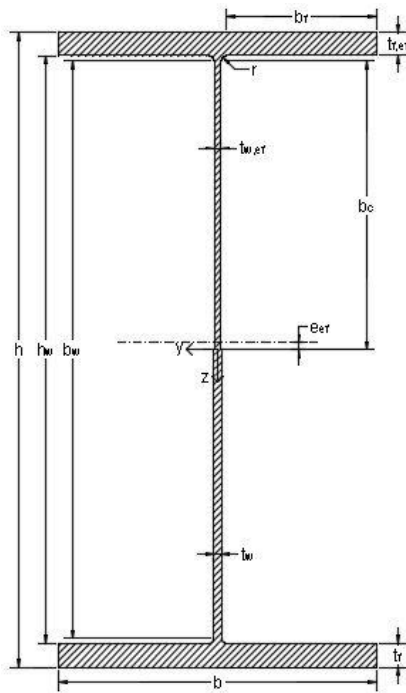


Figura 19: Secção efectiva da viga D à flexão segundo y-y

Assim, o momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos, toma o valor:

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,957 \times 12,2 \times 10^5 \times 260}{1,10} = 275,6 \text{ kNm}$$

4.7.6 Resistência à flexão numa secção com furos

Atendendo à expressão (3.9), a resistência à flexão deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante, M_{Ed} , já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$M_{Ed} = 116,8 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente, M_{Rd} , este apresenta duas expressões de cálculo consoante o tipo de secções adoptada. Assim, para uma secção com furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.10):

$$M_{Rd} = M_{u,Rd} = \frac{W_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

O módulo de flexão elástico, considerando furos em ambos os banzos para parafusos com diâmetro de 12 mm, como representado na Figura 20, toma o valor:

$$W_{net} = \frac{I_{net} \times 2}{h} = \frac{21,7 \times 10^7 \times 2}{400} = 10,8 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

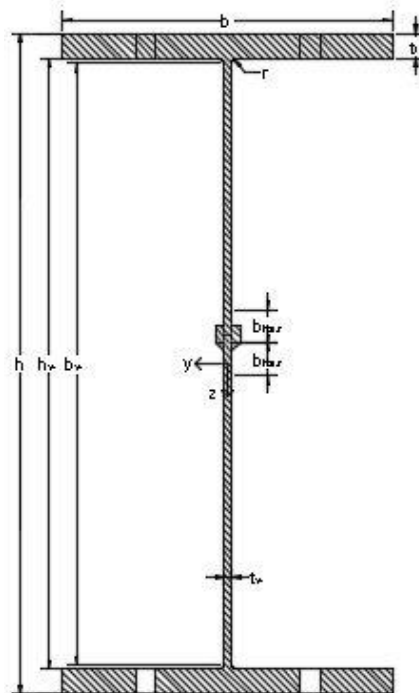


Figura 20: Viga D com furos

Assim, o momento flector resistente, M_{Rd} , para uma secção com furos, toma o valor:

$$M_{Rd} = M_{u,Rd} = \frac{W_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{10,8 \times 10^5 \times 310}{1,25} = 268,9 \text{ kNm}$$

Sabe-se que o valor do momento flector resistente é dado pelo menor dos valores anteriormente apresentados, isto é:

$$M_{Rd} = \min(M_{o,Rd}; M_{u,Rd}) = \min(275,6; 268,9) = 268,9 \text{ kNm}$$

Assim, recorrendo novamente à expressão (3.9), a resistência da secção transversal à flexão segundo y-y encontra-se verificada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{116,8}{268,9} = 0,43 < 1,0$$

4.7.7 Resistência ao esforço transversal

Atendendo à expressão (3.14), a resistência ao esforço transversal deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

O esforço transversal actuante já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$V_{Ed} = 126,9 \text{ kN}$$

O valor de cálculo da resistência ao esforço transversal é determinado pela expressão (3.15):

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd}$$

A contribuição das almas para a resistência ao esforço transversal é dada pela expressão (3.16):

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Por forma a determinar o valor do coeficiente de encurvadura ao corte ρ_v é necessário determinar o parâmetro de esbelteza, λ_w , bem como o coeficiente η :

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} = 0,35 \frac{364}{5} \sqrt{\frac{260}{70000}} = 1,553$$

$$\eta = 0,7 + 0,35 \frac{f_{uw}}{f_{ow}} = 0,7 + 0,35 \frac{310}{260} = 1,117$$

Recorrendo à Tabela 16, sendo $\lambda_w > 0,937$ e considerando as extremidades rígidas, o coeficiente ρ_v toma o valor:

$$\rho_v = \frac{2,3}{1,66 + \lambda_w} = \frac{2,3}{1,66 + 1,553} = 0,716$$

Assim, a contribuição das almas para a resistência ao esforço transversal é dada por:

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 0,716 \times 5 \times 370 \frac{260}{\sqrt{3} \times 1,10} = 180,7 \text{ kN}$$

O valor obtido para $V_{w,Rd}$ é suficiente para que seja verificada a segurança ao esforço transversal (conforme é indicado pela expressão 3.14):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{126,9}{180,7} = 0,70 < 1,0$$

Desta forma, não se revela necessário avaliar a contribuição dos banzos para a resistência ao esforço transversal.

4.7.8 Verificação do Estado Limite de Deformação

Conforme apresentado anteriormente em 4.5.2, o deslocamento vertical máximo na viga D ocorre na secção 2, tomando como valor:

$$\delta_D = 0,011 \text{ m}$$

Os limites do deslocamento vertical indicados para vigas de pavimentos em geral são dados por:

$$\delta_{max} = \frac{l}{250} = \frac{7}{250} = 0,028 \text{ m}$$

$$\delta_{2,max} = \frac{l}{300} = \frac{7}{300} = 0,023 \text{ m}$$

Assim sendo, a condição relativa ao Estado Limite de Deformação é verificada:

$$0,011 \text{ m} < 0,023 \text{ m}$$

4.8 Verificação de segurança da viga F

4.8.1 Pré-dimensionamento da secção transversal

Relativamente à viga F, indicam-se na Tabela 32 as suas dimensões e, complementarmente, ilustra-se na Figura 21 a sua secção transversal.

Tabela 32: Propriedades geométricas da secção transversal da viga F

h [mm]	500
b [mm]	200
t_w [mm]	6
t_f [mm]	18
r [mm]	5
A_{secção} [mm²]	9984
I_{secção} [mm⁴]	468,3 × 10 ⁶

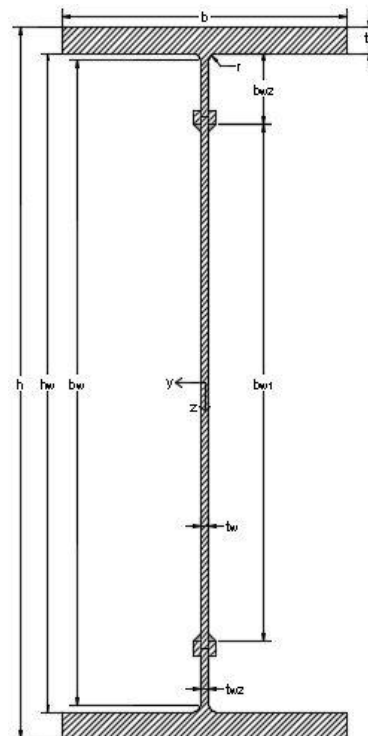


Figura 21: Secção transversal da viga F

4.8.2 Esforços no elemento

Representam-se, de seguida, os esforços (momento flector e esforço transversal) da viga F para todas as suas secções e para as combinações mais condicionantes.

$$M_{LC1} = \begin{bmatrix} -24,9 \\ 62,2 \\ -29,2 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC2} = \begin{bmatrix} -33,0 \\ 62,4 \\ -20,7 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$M_{LC3} = \begin{bmatrix} 7,1 \\ 20,5 \\ -19,9 \end{bmatrix} [kNm]$$

$$V_{LC1} = \begin{bmatrix} 34,9 \\ - \\ -35,7 \end{bmatrix} [kN]$$

$$V_{LC2} = \begin{bmatrix} 36,5 \\ - \\ -34,1 \end{bmatrix} [kN]$$

$$V_{LC3} = \begin{bmatrix} 8,0 \\ - \\ -13,3 \end{bmatrix} [kN]$$

Representando graficamente, é possível observar nos Gráficos 5 e 6 as variações do momento flector e do esforço transversal ao longo da viga F.

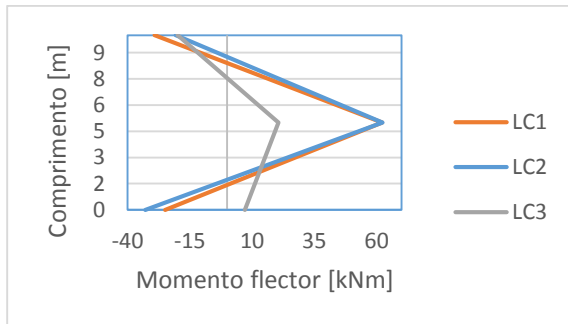


Gráfico 5: Variação de momento flector na viga F

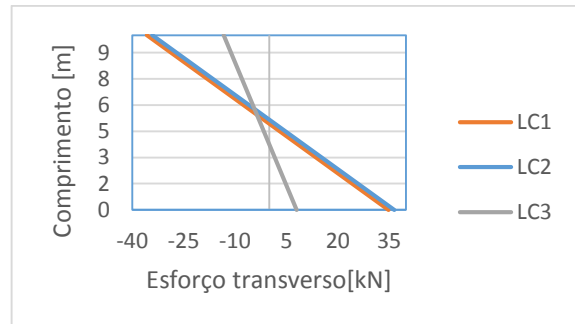


Gráfico 6: Variação de esforço transversal na viga F

Assim sendo, conclui-se que os esforços condicionantes (momento flector na secção 1, momento flector na secção 2 e esforço transversal na secção 1) para a viga F apresentam os seguintes valores:

$$M_{1.Ed} = -33,0 \text{ kNm}$$

$$M_{2.Ed} = 62,4 \text{ kNm}$$

$$V_{1.Ed} = 36,5 \text{ kN}$$

4.8.3 Classificação da secção transversal

4.8.3.1 Alma

Atendendo ao gradiente de tensões ao longo da alma com linha neutra no seu centro, aplica-se a seguinte expressão (vd. Tabela 11):

$$\beta_w = 0,40 \frac{b_w}{t} = 0,40 \frac{454}{6} = 30,3$$

sendo b_w a largura da alma, dada por:

$$b_w = h - 2t_f - 2r = 500 - 2 \times 18 - 2 \times 5 = 454 \text{ mm}$$

Recorrendo mais uma vez à Tabela 13, tratando-se a alma de um elemento interno e sendo o material de classe A com soldaduras, obtêm-se os seguintes limites:

$$\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8,8$$

$$\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12,7$$

$$\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17,7$$

Assim, atendendo a que $\beta_w > \beta_{3w}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, na alma da viga regista-se a condição própria de secções da classe 4.

Mais uma vez, é necessário contabilizar os efeitos da encurvadura local. Determina-se, dessa forma, o factor de redução para ter em conta os efeitos da encurvadura local e que permite obter o valor da espessura efectiva, recorrendo para isso à expressão (3.5):

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = 0,732$$

em que os coeficientes C_1 e C_2 são determinados conforme é indicado na Tabela 14. Neste caso, tratando-se a alma de um componente interno, com soldaduras, e com material de classe A, obtêm-se:

$$C_1 = 29$$

$$C_2 = 198$$

Por fim, o valor da espessura efectiva é determinado pela expressão (3.6):

$$t_{eff} = \rho_c t = 0,732 \times 6 = 4,4 \text{ mm}$$

4.8.3.2 Banzos

Relativamente aos banzos, estes apresentam gradiente de tensão nulo. Assim, impõe-se a utilização da expressão indicada na Tabela 11:

$$\beta_f = \frac{b_f}{t} = \frac{92}{18} = 5,1$$

sendo b_f a largura do banzo, dada por:

$$b_f = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{200 - 6 - 2 \times 5}{2} = 92 \text{ mm}$$

Mais uma vez, recorrendo à Tabela 13, tratando-se os banzos de elementos salientes, sem soldaduras, e sendo o material de classe A, obtêm-se:

$$\beta_{1f} = 3\varepsilon = 2,9$$

$$\beta_{2f} = 4,5\varepsilon = 4,4$$

$$\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5,9$$

Assim, atendendo a que $\beta_{2f} < \beta_f < \beta_{3f}$, e de acordo com a classificação apresentada na Tabela 12, nos banzos regista-se a condição própria de secções da classe 3.

4.8.3.3 Encurvadura induzida nos banzos

Por forma a evitar-se a encurvadura do banzo comprimido no plano da alma, a expressão (3.22) deve ser verificada. Esta condição é verificada no presente caso, tendo-se que:

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{454}{6} = 75,7 < \frac{kE}{f_{of}} \times \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = \frac{0,55 \times 70000}{260} \times \sqrt{\frac{454 \times 6}{200 \times 18}} = 128,8$$

4.8.4 Soldaduras

De acordo com as expressões (3.7) e (3.8) é possível determinar os factores de redução para f_0 e para f_u , respectivamente:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} = \frac{125}{260} = 0,5$$

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} = \frac{185}{310} = 0,6$$

Por forma a determinar a extensão da HAZ, tem-se:

$$t_w = 6 \text{ mm}; \quad b_{haz} = 20 \text{ mm}$$

4.8.5 Resistência à flexão

Atendendo à expressão (3.9), a resistência à flexão deve satisfazer a seguinte equação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante, M_{Ed} , já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$M_{Ed} = 62,4 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.11):

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_0}{\gamma_{M1}}$$

O coeficiente de forma α é dado pela Tabela 15. Como tal, atendendo a que a secção transversal apresenta classe 4 para flexão em torno do eixo y-y com soldaduras, o coeficiente de forma toma o valor:

$$\alpha = \frac{W_{effe}}{W_{el}} = \frac{18,2 \times 10^5}{18,7 \times 10^5} = 0,969$$

O módulo de flexão elástico tem o seguinte valor:

$$W_{el} = \frac{I_g \times 2}{h} = \frac{468,3 \times 10^6 \times 2}{500} = 18,7 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Por outro lado, o módulo de flexão elástico efectivo (obtido tendo em consideração a redução da espessura dos elementos de classe 4, conforme se ilustra na Figura 22) toma o valor:

$$W_{effe} = \frac{I_{effe}}{\frac{h}{2} + e_{ef}} = \frac{461,9 \times 10^6}{\frac{500}{2} + 4,31} = 18,2 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

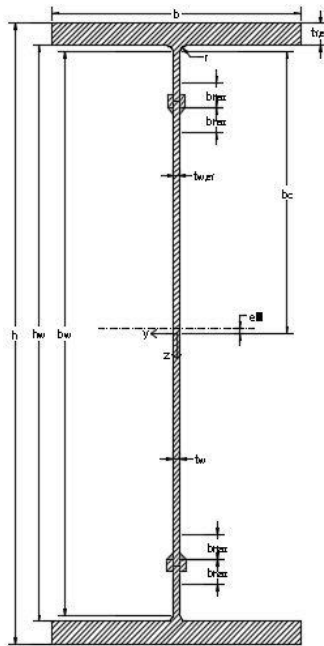


Figura 22: Secção efectiva da viga F à flexão segundo y-y

Assim, o momento flector resistente da secção, M_{Rd} , para uma secção sem furos, toma o valor:

$$M_{Rd} = M_{o,Rd} = \frac{\alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{0,969 \times 18,7 \times 10^5 \times 260}{1,10} = 429,3 \text{ kNm}$$

4.8.6 Resistência à flexão numa secção com furos

Atendendo à expressão (3.9), a resistência à flexão deve satisfazer a seguinte equação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante, M_{Ed} , já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$M_{Ed} = 62,4 \text{ kNm}$$

Quanto ao momento flector resistente, M_{Rd} , este apresenta duas expressões de cálculo consoante o tipo de secções adoptada. Assim, para uma secção com furos – como é o caso da secção em causa – é aplicável a expressão (3.10):

$$M_{Rd} = M_{u,Rd} = \frac{W_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

O módulo de flexão elástico, considerando furos em ambos os banzos para parafusos com diâmetro de 12 mm, conforme se encontra ilustrado na Figura 23, toma o valor:

$$W_{net} = \frac{I_{net} \times 2}{h} = \frac{417,1 \times 10^6 \times 2}{500} = 16,7 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

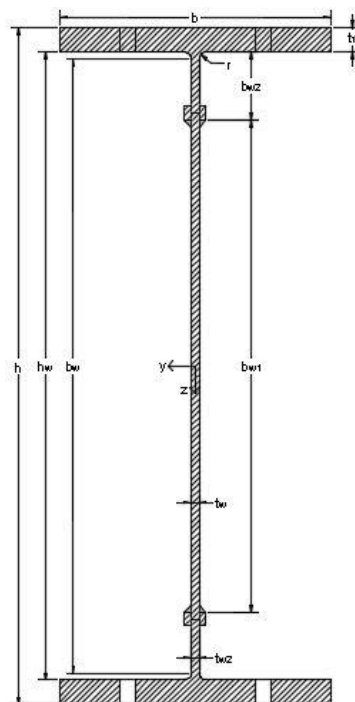


Figura 23: Viga F com furos

Assim, o momento flector resistente, M_{Rd} , para uma secção com furos, é dado por:

$$M_{Rd} = M_{u,Rd} = \frac{W_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{16,7 \times 10^5 \times 310}{1,25} = 413,7 \text{ kNm}$$

Sabe-se que o valor do momento flector resistente é dado pelo menor dos valores anteriormente apresentados, isto é:

$$M_{Rd} = \min(M_{o,Rd}; M_{u,Rd}) = \min(429,3; 413,7) = 413,7 \text{ kNm}$$

Assim, recorrendo novamente à expressão (3.9), a resistência da secção transversal à flexão segundo y-y encontra-se verificada

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{62,4}{413,7} = 0,15 < 1,0$$

4.8.7 Resistência à encurvadura lateral

Por forma a ser verificada a segurança à encurvadura lateral, a expressão (3.32) deve ser verificada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

O momento flector actuante, apresentado anteriormente, corresponde a:

$$M_{Ed} = 62,4 \text{ kNm}$$

O factor de redução da resistência à encurvadura lateral pode ser determinado recorrendo à expressão (3.34), devendo ser sempre inferior a 1,0:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,553 + \sqrt{0,553^2 - 0,342^2}} = 1,013 > 1,0 \rightarrow \chi_{LT} = 1,0$$

O coeficiente ϕ_{LT} é determinado pela expressão (3.35):

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5[1 + 0,2(0,342 - 0,4) + 0,342^2] = 0,553$$

Relativamente aos valores de α_{LT} e $\bar{\lambda}_{0,LT}$, ambos podem ser retirados da Tabela 17, tratando-se neste caso de uma secção transversal de classe 4:

$$\alpha_{LT} = 0,2$$

$$\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,4$$

Quanto à esbelteza relativa $\bar{\lambda}_{LT}$, de acordo com a expressão (3.36) tem-se que:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,969 \times 1873305 \times 260}{4042,8}} = 0,342$$

sendo o momento crítico elástico, M_{cr} , determinado pela expressão (3.37):

$$M_{cr} = \frac{C_1 \pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + \frac{I_w}{I_z}} =$$

$$= \frac{1,0 \times \pi^2 \times 7,0 \times 10^4 \times 240,1 \times 10^5}{1,0^2} \sqrt{\frac{1,0^2 \times 2,7 \times 10^4 \times 81,4 \times 10^4}{\pi^2 \times 7,0 \times 10^4 \times 26,6 \times 10^6} + \frac{139,4 \times 10^{10}}{240,1 \times 10^5}} = 4042,8 \text{ kNm}$$

De acordo com o EC9, os efeitos da encurvadura lateral podem ser desprezados caso a esbelteza relativa $\bar{\lambda}_{LT}$ apresente um valor inferior ao de $\bar{\lambda}_{0,LT}$, como é o presente caso:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,342 < \bar{\lambda}_{0,LT} = 0,4$$

Uma vez que os deslocamentos laterais não se encontram impedidos, o momento resistente à encurvadura, de acordo com a expressão (3.33) toma o valor:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \alpha W_{el,y} f_o}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \times 0,969 \times 1873305 \times 260}{1,10} = 429,3 \text{ kNm}$$

Assim, a resistência à encurvadura lateral encontra-se verificada, de acordo com a expressão (3.32):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{62,4}{429,3} = 0,15 < 1,0$$

4.8.8 Resistência ao esforço transversal

Atendendo à expressão (3.14), a resistência ao esforço transversal deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

O esforço transversal actuante já foi apresentado anteriormente, tomando o valor:

$$V_{Ed} = 36,5 \text{ kN}$$

A contribuição das almas para a resistência ao esforço transversal é dada pela expressão (3.16):

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Por forma a determinar o valor do coeficiente de encurvadura ao corte ρ_v é necessário determinar o parâmetro de esbelteza dado por λ_w bem como o coeficiente η :

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} = 0,35 \frac{454}{6} \sqrt{\frac{260}{70000}} = 1,614$$

$$\eta = 0,7 + 0,35 \frac{f_{uw}}{f_{ow}} = 0,7 + 0,35 \frac{310}{260} = 1,117$$

Recorrendo à Tabela 16, sendo $\lambda_w > 0,937$ e considerando a extremidade rígida, o coeficiente ρ_v toma o valor:

$$\rho_v = \frac{2,3}{1,66 + \lambda_w} = \frac{2,3}{1,66 + 1,614} = 0,702$$

Assim, a contribuição das almas para a resistência ao esforço transversal é dada por:

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 0,702 \times 6 \times 488 \frac{260}{\sqrt{3} \times 1,10} = 280,7 \text{ kN}$$

A contribuição dos banzos para a resistência ao esforço transversal é dada pela expressão (3.19):

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

O coeficiente c , de acordo com a expressão (3.20), é igual a:

$$c = a \left(0,08 + \frac{4,4b_f t_f^2 f_{of}}{t_w b_w^2 f_{ow}} \right) = 10000 \left(0,08 + \frac{4,4 \times 200 \times 18^2 \times 260}{6 \times 454^2 \times 260} \right) = 3105 \text{ mm}$$

O momento flector resistente conferido apenas pelos banzos é determinado pela expressão:

$$M_{f,Rd} = b t_f (h_w + t_f) \frac{f_o}{Y_{M1}} = 200 \times 18(488 + 18) \frac{260}{1,10} = 430,6 \text{ kNm}$$

Assim, a contribuição dos banzos para a resistência ao esforço transversal é dada por:

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c Y_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{200 \times 18^2 \times 260}{3105 \times 1,10} \left[1 - \left(\frac{41,4}{400} \right)^2 \right] = 4,9 \text{ kNm}$$

O valor de cálculo da resistência ao esforço transversal resulta da soma das contribuições dos banzos e da alma, conforme a expressão (3.15). Assim, obtém-se o seguinte resultado:

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd} = 280,7 + 4,9 = 285,6 \text{ kN}$$

Assim, encontra-se verificada a segurança ao esforço transversal, como indicado na expressão (3.14):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{36,5}{285,6} = 0,13 < 1,0$$

4.8.9 Resistência a uma carga transversal aplicada sobre o banzo

A resistência da alma a uma carga transversalmente aplicada sobre o banzo deve ser verificada de acordo com a expressão (3.23):

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0$$

O valor da carga transversalmente aplicada é dado pelo peso próprio da cobertura num metro de largura:

$$F_{Ed} = 3,0 \times 1,0 = 3,0 \text{ kN}$$

O valor do comprimento que efectivamente resiste a cargas transversais, L_{eff} , atendendo à expressão (3.25), é dado por:

$$L_{eff} = \chi_F l_y = 0,28 \times 335,5 = 94,9 \text{ m}$$

O coeficiente de redução χ_F é função do coeficiente λ_F , sendo ambos calculados de acordo com as expressões (3.31) e (3.29), respectivamente:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} = \frac{0,5}{1,77} = 0,28$$

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{ow}}{0,9 k_F E t_w^3}} = \sqrt{\frac{335,5 \times 6 \times 260}{0,9 \times 6,0 \times 70,0 \times 10^3 \times 6^3}} = 1,77$$

O coeficiente k_F , segundo a expressão (3.30), é dado por:

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 = 6 + 2 \left(\frac{488}{10000} \right)^2 = 6,0$$

Relativamente ao comprimento que efectivamente se encontra carregado, l_y , este pode ser calculado recorrendo à expressão(3.26):

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 50 + 2 \times 18(1 + \sqrt{33,3 + 14,7}) = 335,5 \text{ mm}$$

Os coeficiente m_1 e m_2 são determinados, respectivamente, pelas expressões (3.27) e (3.28):

$$m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} = \frac{260 \times 200}{260 \times 6} = 33,3$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 \left(\frac{488}{18} \right)^2 = 14,7$$

O valor da resistência da alma à encurvadura local para cargas transversais aplicadas corresponde, de acordo com a expressão (3.24), a:

$$F_{Rd} = \frac{L_{eff} t_w f_{ow}}{Y_{M1}} = \frac{94,9 \times 6 \times 260}{1,10} = 134,6 \text{ kN}$$

Assim, recorrendo à expressão (3.23), a resistência da alma a uma carga transversalmente aplicada encontra-se verificada:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{3,0}{134,6} = 0,02 < 1,0$$

Como seria de esperar, regista-se uma margem de segurança muito elevada em relação ao efeito em causa. Não obstante, a verificação de segurança é apresentada para efeitos de ilustração do procedimento a seguir.

4.8.10 Verificação do Estado Limite de Deformação

Conforme apresentado anteriormente em 4.5.2, o deslocamento vertical máximo na viga F ocorre na secção 2, tomando como valor:

$$\delta_F = 0,009 \text{ m}$$

Os limites do deslocamento vertical indicados para vigas de pavimentos em geral são dados por:

$$\delta_{max} = \frac{l}{250} = \frac{10,11}{250} = 0,040 \text{ m}$$

$$\delta_{2,max} = \frac{l}{300} = \frac{10,11}{300} = 0,034 \text{ m}$$

Assim sendo, a condição relativa ao Estado Limite de Deformação é verificada:

$$0,009 \text{ m} < 0,034 \text{ m}$$

4.9 Ligações soldadas

4.9.1 Propriedades das ligações

De acordo com a Tabela A1, o valor da tensão última característica na HAZ para um alumínio do tipo 6082 T6 ($5 < t < 15$) é igual a:

$$f_{u,haz} = 185 \text{ MPa}$$

A tensão característica ao corte é dada pela expressão (3.1):

$$f_{v,haz} = \frac{f_{u,haz}}{\sqrt{3}} = \frac{185}{\sqrt{3}} = 107 \text{ MPa}$$

Conforme indicado previamente na Tabela 9, o factor parcial de segurança para ligações soldadas corresponde a:

$$\gamma_{Mw} = 1,25$$

Finalmente, a tensão característica do cordão de soldadura em metal de adição do tipo 5356 para o alumínio do tipo 6082 T6 ($5 < t < 15$) toma o valor, de acordo com a Tabela 12:

$$f_w = 210 \text{ MPa}$$

4.9.2 Ligação longitudinal entre vigas

4.9.2.1 Dimensionamento do cordão de soldadura

Para juntas duplamente soldadas, com cargas aplicadas perpendicularmente ao plano da ligação, a espessura mínima que garante a segurança da ligação é dada pela expressão (3.58):

$$a \geq \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\tau_{Ed} t_w}{\frac{f_w}{\gamma_{Mw}}}}$$

O valor da tensão ao corte τ_{Ed} foi calculado de acordo com a expressão seguinte:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{t_w(h - t_f)} = \frac{126,9}{5(400 - 15)} = 65,9 \text{ MPa}$$

Adoptando cordões de soldadura com $a = 3,0 \text{ mm}$ garante-se a segurança da ligação à soldadura, como se ilustra na Figura 24.

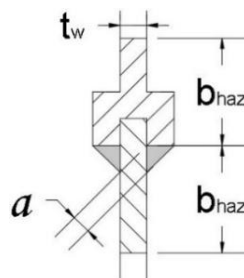


Figura 24: Ligação soldada na viga D

Assim, a espessura mínima que garante a segurança da ligação é dada por:

$$a \geq \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\tau_{Ed} t_w}{\frac{f_w}{\gamma_{Mw}}}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{65,9 \times 5}{\frac{210}{1,25}} = 1,6 \text{ mm}$$

4.9.2.2 Resistência na HAZ

Por forma a verificar a segurança na zona adjacente à HAZ, a regulamentação sugere a verificação da expressão (3.60). Desta forma, encontra-se garantida a segurança na HAZ:

$$\tau_{Ed} = 65,9 \text{ MPa} < \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} = \frac{107}{1,25} = 85,4 \text{ MPa}$$

4.9.3 Ligação da base da coluna B

4.9.3.1 Pré-dimensionamento da secção transversal

Relativamente à coluna B, resumam-se, na Tabela 33, as suas dimensões e, complementarmente, ilustra-se na Figura 25 a sua secção transversal.

Tabela 33: Propriedades geométricas da secção transversal da coluna B

h [mm]	250
b [mm]	200
t_w [mm]	8
t_f [mm]	18
r [mm]	5
A_{secção} [mm²]	8912
I_{secção} [mm⁴]	103,6 × 10 ⁶

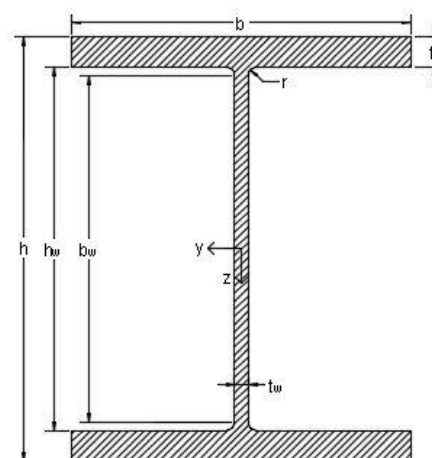


Figura 25: Secção transversal da coluna B

4.9.3.2 Esforços no elemento

Representam-se, de seguida, os valores de cálculo dos esforços (momento flector e esforço axial) da coluna B para as combinações 1, 3 e 5 (correspondentes ao caso 1 da acção do vento).

$$M_{LC1} = \begin{bmatrix} -33,7 \\ 65,7 \\ -51,1 \\ -4,6 \\ 20,3 \\ 42,0 \end{bmatrix} \text{ [kNm]} \quad M_{LC3} = \begin{bmatrix} -41,9 \\ 54,0 \\ -34,9 \\ 11,7 \\ 4,6 \\ 18,9 \end{bmatrix} \text{ [kNm]} \quad M_{LC5} = \begin{bmatrix} -41,1 \\ 50,7 \\ -32,2 \\ 14,2 \\ 0,7 \\ 13,7 \end{bmatrix} \text{ [kNm]}$$

$$N_{LC1} = \begin{bmatrix} -188,2 \\ -188,2 \\ -61,3 \\ -61,3 \\ -26,1 \\ -26,1 \end{bmatrix} [kN]$$

$$N_{LC3} = \begin{bmatrix} -98,5 \\ -98,5 \\ -17,4 \\ -17,4 \\ -8,4 \\ -8,4 \end{bmatrix} [kN]$$

$$N_{LC5} = \begin{bmatrix} -80,2 \\ -80,2 \\ -6,8 \\ -6,8 \\ -3,9 \\ -3,9 \end{bmatrix} [kN]$$

Nos Gráficos 7 e 8 apresentam-se as variações do momento flector e do esforço axial ao longo da coluna B para as 3 combinações de acções em causa.

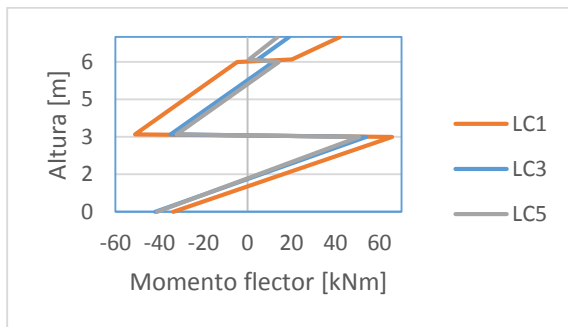


Gráfico 7: Variação de momento flector na coluna B

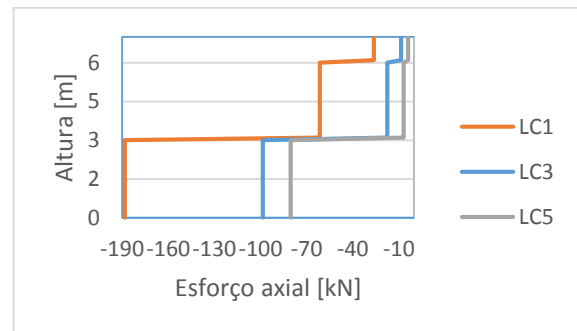


Gráfico 8: Variação de esforço axial na coluna B

Assim, conclui-se que os esforços condicionantes (momento flector na secção 1, momento flector na secção 2 e esforço axial) para a coluna B apresentam os seguintes valores:

$$M_{1.Ed} = 41,9 \text{ kNm}$$

$$M_{2.Ed} = 65,7 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 188,2 \text{ kN}$$

4.9.3.3 Esforços na base da coluna

O momento flector na base da coluna B é dado por:

$$M_{1.Ed} = 41,9 \text{ kNm}$$

O esforço axial na base da coluna B, N_{Ed} , toma o valor anteriormente referido:

$$N_{Ed} = 188,2 \text{ kN}$$

O valor do esforço transversal na base da coluna B pode ser determinado recorrendo aos valores do momento flector para a combinação LC1:

$$V_{Ed} = (M_{2,LC1} - M_{1,LC1}) \frac{1}{3,0} = (65,7 - (-33,7)) \frac{1}{3,0} = 33,1 \text{ kN}$$

4.9.3.4 Dimensionamento dos cordões de soldadura

Para garantir a segurança na ligação da base da coluna, a expressão (3.61) deve ser verificada:

$$\sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3(\tau_{\perp Ed}^2 + \tau_{\parallel Ed}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

A base da coluna B é representada na Figura 26.

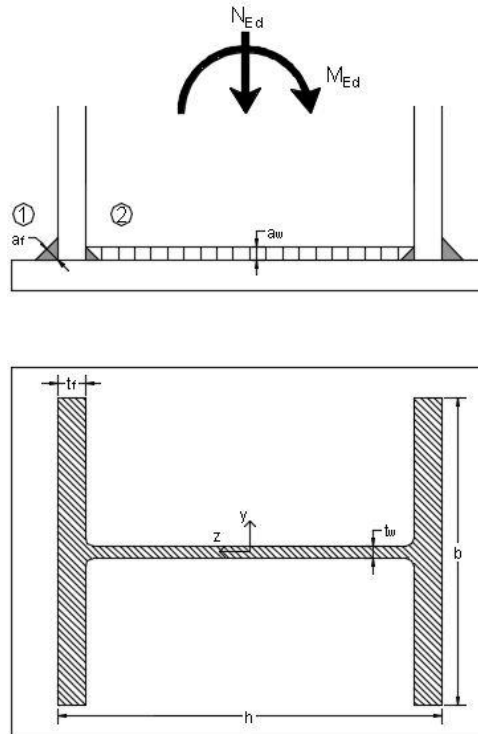


Figura 26: Base da coluna B

A base da coluna B encontra-se submetida aos seguintes esforços, indicados anteriormente, onde a primeira e a segunda linha dizem respeito às combinações de acções que provocam, respectivamente, o maior e o menor esforço axial de compressão:

$$N_{Ed} = \begin{bmatrix} -188,2 \\ -67,6 \end{bmatrix} [kN]$$

$$V_{Ed} = \begin{bmatrix} -33,1 \\ -3,7 \end{bmatrix} [kN]$$

$$M_{Ed} = \begin{bmatrix} 41,9 \\ 7,0 \end{bmatrix} [kNm]$$

As tensões normais nas fibras extremas do banço (σ_c no lado comprimido e σ_t no lado tracionado) foram determinadas através das seguintes expressões, conforme é ilustrado na Figura 27:

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \left(\frac{-h}{2} \right) \quad \sigma_c = \begin{bmatrix} -71,7 \\ -16,0 \end{bmatrix} [MPa]$$

$$\sigma_t = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \left(\frac{h}{2} \right) \quad \sigma_t = \begin{bmatrix} 29,5 \\ 0,8 \end{bmatrix} [MPa]$$

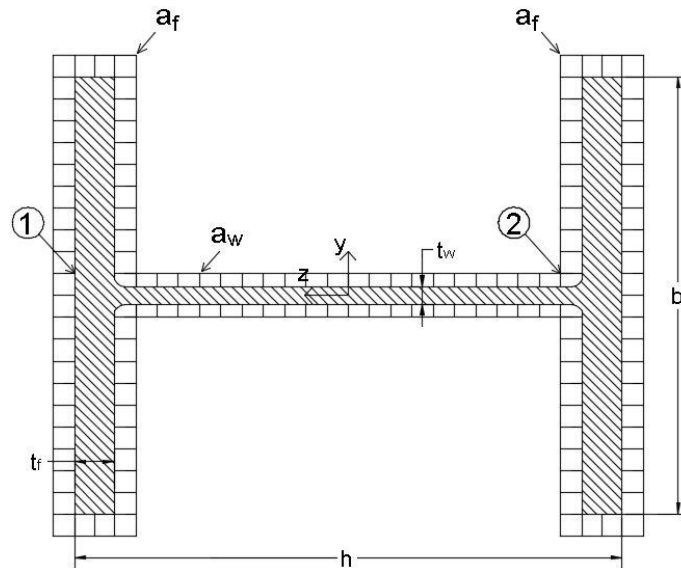


Figura 27: Cordões de soldadura na ligação da coluna B

Assim sendo, na fibra extrema tracionada do banzo (secção 1), a tensão normal máxima toma o valor:

$$\sigma_{t,1} = 29,5 \text{ MPa}$$

Adoptou-se um cordão de soldadura na zona dos banzos com largura $a_f = 10 \text{ mm}$.

A tensão normal $\sigma_{t,1}$ provoca na soldadura uma tensão normal σ_{\perp} e uma tensão de corte τ_{\perp} dada por:

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_{t,1} t_f}{2\sqrt{2} a_f} = \frac{29,5 \times 18}{2 \times \sqrt{2} \times 10} = 18,8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 18,8 \text{ MPa}$$

A tensão de corte τ_{\parallel} na alma pode ser, neste caso, desprezada.

Assim sendo, o valor de cálculo da tensão actuante na secção 1 da base da coluna B é dado por:

$$\sigma_{1,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3(\tau_{\perp Ed}^2 + \tau_{\parallel Ed}^2)} = \sqrt{18,8^2 + 3(18,8^2 + 0^2)} = 37,5 \text{ MPa}$$

Quanto à tensão resistente, esta toma o valor:

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = \frac{210}{1,25} = 168 \text{ MPa}$$

Desta forma, uma vez que o valor da tensão actuante é inferior ao valor da tensão resistente, encontra-se garantida a segurança da ligação na secção 1, de acordo com a expressão (3.61):

$$37,5 \text{ MPa} < 168 \text{ MPa}$$

Relativamente à zona da alma adjacente ao cordão de soldadura dos banzos (secção 2), a tensão normal, de acordo com a expressão seguinte, toma os seguintes valores:

$$\sigma_{t,2} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \left(\frac{h}{2} - t_f - a_f \sqrt{2} \right) \quad \sigma_t = \begin{bmatrix} 16,5 \\ -1,3 \end{bmatrix} [MPa]$$

Assim sendo, na fibra tracionada imediatamente adjacente ao cordão de soldadura do banzo (secção 2), a tensão normal máxima toma o valor:

$$\sigma_{t,2} = 16,5 \text{ MPa}$$

Para a zona da alma adoptou-se um cordão de soldadura com espessura $a_w = 6 \text{ mm}$.

Desta forma, a tensão normal $\sigma_{t,2}$ provoca na soldadura uma tensão normal σ_{\perp} e uma tensão de corte τ_{\perp} com os seguintes valores:

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_{t,2} t_w}{2\sqrt{2} a_w} = \frac{16,5 \times 8}{2 \times \sqrt{2} \times 6} = 7,8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 7,8 \text{ MPa}$$

A tensão de corte é determinada recorrendo à expressão seguinte:

$$\tau = \frac{V_{Ed,s} S_z}{t_w I_y} = \frac{33,1 \times 417,6 \times 10^3}{8 \times 103,6 \times 10^6} = 16,7 \text{ MPa}$$

O momento estático do banzo, S_z , é determinado da seguinte forma:

$$S_z = b t_f \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) = 200 \times 18 \times \left(\frac{250}{2} - \frac{18}{2} \right) = 417,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

A tensão de corte na alma obtém-se a partir da seguinte expressão:

$$\tau_{\parallel Ed} = \frac{\tau t_w}{2 a_w} = \frac{16,7 \times 8}{2 \times 6} = 11,1 \text{ MPa}$$

Assim sendo, na secção 2 da base da coluna B a tensão actuante é dada por:

$$\sigma_{2,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3(\tau_{\perp Ed}^2 + \tau_{\parallel Ed}^2)} = \sqrt{7,8^2 + 3(7,8^2 + 11,1^2)} = 24,7 \text{ MPa}$$

A tensão resistente toma o valor anteriormente apresentado:

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 168 \text{ MPa}$$

Desta forma, uma vez que o valor de cálculo da tensão actuante é inferior ao valor de cálculo da tensão resistente, também se encontra garantida a segurança da ligação na secção 2 (conforme expressão (3.61)):

$$24,7 \text{ MPa} < 168 \text{ MPa}$$

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O alumínio, ou mais precisamente as ligas de alumínio, vem ganhando significativo espaço no mercado das construções metálicas. Trata-se, sem dúvida, de um material com vantajosas aplicações estruturais, atendendo sobretudo à sua elevada resistência à corrosão, à sua leveza (três vezes mais leve que o aço) e à sua incombustibilidade, factores que rentabilizam bastante a sua utilização, quer do ponto de vista do custo da matéria-prima, quer da sua manutenção. Outro factor que torna o alumínio bastante competitivo face a outros materiais diz respeito à sua adaptabilidade, permitindo que seja utilizado no dimensionamento de qualquer tipo de geometria de secção, utilizando a liga mais adequada a cada propósito a partir de uma vasta gama de variedades.

É utilizado sobretudo em coberturas ou estruturas *offshore*, onde as suas propriedades são exploradas ao máximo. No entanto, o seu elevado custo quando comparado com outros materiais (aço, por exemplo) ainda limita, de forma importante, a sua aplicação em estruturas correntes.

Relativamente às ligações, em particular as soldadas, enquanto que em estruturas de aço o processo já está bastante difundido na indústria, no alumínio requer mão-de-obra ainda mais especializada, conduzindo a custos mais elevados.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Tratando-se de um material relativamente recente na indústria da construção civil, será de prever um crescimento na utilização do alumínio como material estrutural nos próximos anos, em virtude das suas características. Justifica-se, assim, um estudo continuado e mais aprofundado de sistemas estruturais com elementos em alumínio, com particular destaque para as ligações entre elementos.

Bibliografia

- [1] DAVYSON, S. *Aluminium by Sam Davyson*. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://sam.davyson.com/as/physics/aluminium/site/index.html>.
- [2] SOETENS, F. & SNIJDER, H. H. (2006). *New Challenges for Aluminium Structures: An Introduction*.
- [3] AluMatter. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=215&pageid=2144417089>.
- [4] CEN, European Committee for Standardization – Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part1-1: General structural rules.
- [5] MAZZOLANI, F. M., Design of Aluminium Structures. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: http://www.eurocodes.fi/1999/1999-1-1/background/Mazzolani_2008.pdf.
- [6] European Aluminium. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/history>.
- [7] GITTER, R. (2008). Design of Aluminium structures: Selection of Structural Alloys. Structural Design according to Eurocode 9: Essential Properties of Materials and Background Information. Disponível em: http://www.eurocodes.fi/1999/1999-1-1/background/Gitter_2008.pdf.
- [8] Ebah. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAUZkAF/aluminio-suas-ligas>
- [9] ELVAL. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://www.elval.gr/default.asp?pid=185&la=2>
- [10] Nascimento, Filipe Miguel Ferreira (2007). *Processamento por Fricção Linear: Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais. Instituto Superior Técnico. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455865/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>.
- [11] ESAB – Welding & Cutting. *Understanding the aluminium alloy designation system*. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://www.esab.ca/ca/en/education/blog/understanding-the-aluminum-alloy-designation-system.cfm>.
- [12] Hydro. *How it's made*. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: <http://www.hydro.com/en/About-aluminium/How-its-made>.
- [13] SOETENS, F. (2008). Design of connections. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/Soetens_2008.pdf.

- [14] EAA (2003). *Aluminium in the Building and Construction Industries – Recycling Aluminium Construction Materials*. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em:
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1859>.
- [15] ClimateTechWiki. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em:
<http://www.climatetechwiki.org/technology/alu>.
- [16] Aluminium Leader. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em:
<http://www.aluminiumleader.com/application/construction>.
- [17] Efunda. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em:
<http://www.efunda.com/materials/alloys/aluminum/temper.cfm>.
- [18] Pena, Guilherme Duarte (2012). *Análise e dimensionamento de colunas de alumínio segundo o Eurocódigo 9*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologias. Disponível em:
http://run.unl.pt/bitstream/10362/7498/1/Pena_2012.pdf.
- [19] Ribeiro, Pedro Miguel (2013). *Encurvadura lateral em vigas de alumínio*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Nova de Lisboa. Disponível em:
http://run.unl.pt/bitstream/10362/13205/1/Ribeiro_2013.pdf.
- [20] TALAT – Training in Aluminium Application Technologies. Consultado em Outubro de 2015. Disponível em:
<http://core.materials.ac.uk/search/detail.php?id=2100&view=list>.

Anexos

Tabela A1: Características das ligas de alumínio de processamento mecânico para elementos extrudidos (adaptado de [4])

Liga	Produto	Têmpera	Espessura [mm]	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0,haz}$ [MPa]	$f_{u,haz}$ [MPa]	Classe de Encurvadura
5083	ET, EP, ER/B	O/H111, F, H112	$t \leq 200$	110	270	110	270	B
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	135	270	B
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300			A
5454	ET, EP, ER/B	O/H111, F/ H112	$t \leq 25$	85	200	85	200	B
5754	ET, EP, ER/B	O/H111, F/ H112	$t \leq 25$	80	180	80	180	B
	DT	H14/H24/H34	$t \leq 10$	180	240	100	180	B
6060	ET, EP, ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	50	80	B
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140			B
	ET, EP, ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	60	100	A
	DT		$t \leq 20$	160	215			A
	ET, EP, ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	60	100	A
	EP		$t \leq 3$	160	215			A
		T66	$3 < t \leq 25$	150	195	65	110	A
6061	ET, EP, ER/B	T4	$t < 25$	110	180	95	150	B
	DT		$t \leq 20$	110	205			B
	ET, EP, ER/B	T6	$t < 25$	240	260	115	175	A
	DT		$t \leq 20$	240	290			A
6063	ET, EP, ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	60	100	B
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160			B
	ET, EP, ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	65	110	A
	DT		$t \leq 20$	190	220			A
	ET, EP, ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	75	130	A
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225			A
DT	$t \leq 20$	195	230	A				
6005A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	115	165	A
			$5 < t \leq 10$	215	260			A
			$10 < t \leq 25$	200	250			A
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	A		
			$5 < t \leq 10$	200	250	A		
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	95	160	A
6082	ET, EP, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	100	160	B
	EP	T5	$t \leq 5$	230	270	125	185	B
	EP, ET	T6	$t \leq 5$	250	290	125	185	A
			$5 < t \leq 15$	260	310			A
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	A		
			$20 < t \leq 150$	260	310	A		
DT	T6	$t \leq 5$	255	310	A			
		T6	$5 < t \leq 20$	240	310	A		
7020	ET, EP, ER/B	T6	$t \leq 15$	290	350	205	280	A
	ET, EP, ER/B	T6	$15 < t < 40$	275	350			A
	DT	T6	$t \leq 20$	280	350			A

Onde: EP - Perfil extrudido EP/O - Perfil aberto extrudido
 EP/H - Perfil extrudido ET - Tubo extrudido
 ER/B - Barra e/ou varão extrudido DT - Tubo estirado

Tabela B1: Características das ligas de alumínio de processamento mecânico para chapas, fitas e placas
(adaptado de [4])

Liga	Têmpera	Espessura [mm]	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	$f_{0.haz}$ [MPa]	$f_{u.haz}$ [MPa]	Classe de Encurvadura
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	75	155	B
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240			B
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	56	115	B
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195			B
3103	H14 H24	≤ 25 12,5	120 110	140	44	90	B
	H16 H26	≤ 4	145 135	160			B
5005/ 5005 A	O/H111	≤ 50	35	100	35	100	B
	H12 H22/H32	≤ 12,5	95 80	125	44	100	B
	H14 H24/H34	≤ 12,5	120 110	145			B
5052	H12 H22/H32	≤ 40	160 130	210	80	170	B
	H14 H24/H34	≤ 25	180 150	230			B
5049	O/H111	≤ 100	80	190	80	190	B
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	100	190	B
5454	O/H111	≤ 80	85	215	85	215	B
	H14 H24/H34	≤ 25	220 200	270	105	215	B
5754	O/H111	≤ 100	80	190	80	190	B
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	100	190	B
5083	O/H111	≤ 50	125	275	125	275	B
		50 < t ≤ 80	115	270	115	270	B
	H12 H22/H32	≤ 40	250 215	305	155	275	B
	H14 H24/H34	≤ 25	280 250	340			A
6061	T4/T451	≤ 12,5	110	205	95	150	B
	T6/T651	≤ 12,5	240	290	115	175	A
	T651	12,5 < t ≤ 80	240	290			
6082	T4/T451	≤ 12,5	110	205	100	160	B
	T61/T6151	≤ 12,5	205	280	125	185	A
	T6151	12,5 < t ≤ 100	200	275			
	T6/T651	≤ 6	260	310			
		6 < t ≤ 12,5	255	300			
	T651	12,5 < t ≤ 100	240	295			
7020	T6	≤ 12,5	280	350	205	280	A
	T651	≤ 40					
8011A	H14 H24	≤ 12,5	110 100	125	37	85	B
	H16 H26	≤ 4	120 120	145			

Tabela C1: Momentos flectores [kNm] para ELU da coluna A

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	27,0	46,5	-7,0	41,7	-10,0	38,7	46,5	-10,0
2	-61,5	-70,8	-24,8	-48,2	-20,0	-43,5	-20,0	-70,8
3	40,9	49,3	17,2	38,3	14,8	35,8	49,3	14,8
4	-15,0	-21,6	-2,2	-18,7	-0,8	-17,3	-0,8	-21,6

Tabela C2: Esforços axiais [kN] para ELU da coluna A

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1-2	-147,7	-154,2	-75,7	-92,0	-63,8	-80,2	-63,8	-154,2
3-4	-25,1	-26,5	-8,1	-11,6	-4,2	-7,7	-4,2	-26,5

Tabela C3: Deformações [m] para ELS da coluna A

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	Máximo absoluto
4	0,000	0,000	0,002	-0,001	0,002

Tabela C4: Momentos flectores [kNm] para ELU da coluna B

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	-33,7	-14,5	-41,9	6,1	-41,1	7,0	7,0	-41,9
2	65,7	52,7	54,0	21,4	50,7	18,2	65,7	18,2
3	-51,1	-45,9	-34,9	-21,9	-32,2	-19,2	-19,2	-51,1
4	-4,6	-14,1	11,7	-12,1	14,2	-9,6	14,2	-14,1
5	20,3	18,8	4,6	1,0	0,7	-2,9	20,3	-2,9
6	42,0	38,6	18,9	10,4	13,7	5,2	42,0	5,2

Tabela C5: Esforços axiais [kN] para ELU da coluna B

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1-2	-188,2	-183,1	-98,5	-85,9	-80,2	-67,6	-67,6	-188,2
3-4	-61,3	-61,4	-17,4	-17,6	-6,8	-7,1	-6,8	-61,4
5-6	-26,1	-24,7	-8,4	-4,9	-3,9	-0,5	-0,5	-26,1

Tabela C6: Deformações [m] para ELS da coluna B

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	Máximo absoluto
6	0,000	0,000	0,002	-0,001	0,002

Tabela C7: Momentos flectores [kNm] para ELU da viga D

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	-102,4	-120,2	-42,0	-86,5	-34,8	-79,3	-34,8	-120,2
2	107,2	107,4	63,1	63,6	56,3	56,9	107,4	56,3
3	-116,8	-98,5	-88,9	-43,3	-82,9	-37,7	-37,3	-116,8

Tabela C8: Esforços transversos [kN] para ELU da viga D

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	121,8	126,9	66,7	79,6	59,0	71,8	126,9	59,0
3	-125,9	-120,7	-80,1	-67,3	-72,7	-59,8	-59,8	-125,9

Tabela C9: Deformações [m] para ELS da viga D

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	Máximo absoluto
2	-0,011	-0,011	-0,009	-0,009	0,011

Tabela C10: Momentos flectores [kNm] para ELU da viga F

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	-24,9	-33,0	7,1	-13,1	13,5	-6,7	13,5	-33,0
2	62,2	62,4	20,5	21,1	11,2	11,7	62,4	11,2
3	-29,2	-20,7	-19,9	1,4	-16,2	5,1	5,1	-29,2

Tabela C11: Esforços transversos [kN] para ELU da viga F

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Máximo	Mínimo
1	34,9	36,5	8,0	12,1	2,0	6,1	36,5	2,0
3	-35,7	-34,1	-13,3	-9,2	-7,9	-3,8	-3,8	-35,7

Tabela C12: Deformações [m] para ELS da viga F

Secção	LC1	LC2	LC3	LC4	Máximo absoluto
2	-0,009	-0,009	-0,008	-0,008	0,009