



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Institute for Sustainability and
Innovation in Structural Engineering

Otimização de estruturas modulares em aço enformado a frio

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Ricardo André Simões Breda

Orientador

Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva

Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

ISISE, Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Finalizada esta tão importante fase da minha vida, é agora tempo de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o culminar do meu percurso académico.

Em primeiro lugar, deixo o meu sincero agradecimento aos meus orientadores, o Professor Doutor Luís Simões da Silva e a Professora Doutora Helena Gervásio, pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste percurso dissertativo, pela sua disponibilidade, paciência e dedicação, por todas as suas críticas construtivas e por todos os incentivos prestados.

A toda a minha família, nomeadamente aos meus pais e ao meu irmão, pelo esforço, sacrifício, apoio e confiança ao longo destes anos.

Em especial à minha namorada, pela forma incondicional como sempre me apoiou, por toda a sua ajuda e paciência.

Por último a todos os meus amigos por toda a ajuda, convivência e, claro, por tudo o que representam.

Ricardo André Simões Breda

RESUMO

Na indústria da construção, a sustentabilidade adquiriu um papel fundamental. O tema da dissertação surge no seguimento do projeto I&DT Cool Haven, que visa desenvolver um conceito inovador de construção, que consiste em conferir aos espaços uma sustentabilidade assente na eficiência estrutural e adaptabilidade das estruturas às várias exigências funcionais durante a vida útil da construção. Associado a este conceito surge a construção modular e a construção metálica de aço enformado a frio. A construção modular exhibe francas vantagens pelo facto dos trabalhos de execução serem maioritariamente desenvolvidos em fábrica, reduzindo assim o tempo de execução em obra e, simultaneamente a probabilidade de existirem erros e consequentes defeitos na estrutura. A construção metálica, por sua vez, exhibe vantagens óbvias pelo facto do aço ser um material totalmente reciclável e de grande eficiência estrutural.

A presente dissertação está relacionada com a necessidade de transformar este conceito de construção inovador, competitivo e atrativo a nível económico. O objetivo desta dissertação foi desenvolver uma ferramenta de suporte essencial na otimização de estruturas modulares de aço enformado a frio em termos de eficiência estrutural. Como tal, foi desenvolvida a ferramenta de cálculo computacional *Cold-Formed Design*, por forma a facilitar o dimensionamento e otimização de elementos de aço enformado a frio, a qual foi posteriormente utilizada na otimização das estruturas modulares de aço enformado a frio.

O documento começa por referir as principais características associadas aos elementos de aço enformado a frio, bem como as vantagens e desvantagens resultantes da sua utilização na construção. Posteriormente é apresentada, pormenorizadamente, o *Cold-Formed Design*. Numa fase final do documento são apresentadas a análise e otimização das estruturas modulares planas, sendo apresentadas as características das estruturas modulares otimizadas e a redução das quantidades de aço resultante da otimização estrutural.

Palavras-chave: Aço enformado a frio | Encurvadura local | Instabilidade distorcional | Encurvadura global | *Cold-Formed Design* | Otimização estrutural

ABSTRACT

In the construction industry the sustainability has acquired a key role. The dissertation topic is developed within the framework of the project I&DT Cool Haven, which aims to develop an innovative concept of construction, giving a sustainability based on structural efficiency and adaptability of the structures to the various functional requirements during the life of the building. Associated with this concept is the modular construction and metal construction of cold-formed steel. The modular construction displays serious advantages by the fact that the construction process are mostly developed in the factory, reducing the workload in site, the probability of issues and consequent problems with the structure. The metallic construction exhibits obvious advantages by the fact that steel is a totally recyclable material and because of the high structural efficiency.

This thesis is associated with the need to transform this concept of innovative, competitive and attractive building, economically. The main purpose of this dissertation is to develop a supporting tool for the optimizing of modular structures of cold-formed steel in terms of structural efficiency. Such as, a computational tool *Cold-Formed Design* was developed, in order to simplify the design and optimization of elements of cold-formed steel. The developed tool was then applied in the optimization of modular plane structures.

In the first part of document the main characteristics of the elements of cold-formed steel, as well as the advantages and disadvantages of their use in construction are described. Then, the *Cold-Formed Design* is explained in detail. At the end of this document, the analysis and the optimization of plane modular structures are introduced and the characteristics of modular structures optimized and reduced amounts of steel that results from the structural optimization are presented.

Keywords: Cold-formed steel | Local Buckling | Distortional Buckling | Global Buckling | *Cold-Formed Design* | Structural optimization

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações gerais.....	1
1.2	Objetivos e metodologia	2
1.3	Organização da dissertação.....	2
2	ELEMENTOS DE AÇO ENFORMADO A FRIO	4
2.1	Considerações gerais.....	4
2.2	Tipos de elementos de aço enformado a frio	4
2.3	Processo de fabrico	5
2.4	Características materiais	6
2.5	Comportamento estrutural	6
2.5.1	Fenómenos de instabilidade.....	6
2.5.2	Colapso da alma	11
2.5.3	Rigidez de torção	11
2.5.4	Ductilidade reduzida.....	11
2.6	Vantagens/desvantagens da utilização de elementos de aço enformado a frio.....	12
3	CONCEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO Do “COLD-FORMED DESIGN”	14
3.1	Considerações gerais.....	14
3.2	Processo de cálculo	15
3.2.1	Domínio de validade.....	15
3.2.2	Propriedades materiais.....	16
3.2.2.1	Limitações	17
3.2.2.2	Algoritmo de cálculo das propriedades materiais	17
3.2.3	Propriedades das secções transversais	18
3.2.3.1	Limitações	19
3.2.3.2	Pré-dimensionamento e modelação dos reforços de extremidade	20
3.2.3.3	Algoritmo de cálculo das propriedades das secções transversais	21
3.2.4	Capacidade resistente dos elementos estruturais	22
3.2.4.1	Classificação de secções transversais.....	22
3.2.4.1.1	Algoritmo da classificação das secções transversais.....	25
3.2.4.2	Propriedades efetivas.....	26
3.2.4.2.1	Secção efetiva para a encurvadura local – Larguras efetivas.....	28
3.2.4.2.2	Secção efetiva para a instabilidade distorcional – Espessuras reduzidas..	30
3.2.4.2.3	Algoritmo de cálculo das propriedades efetivas	33

3.2.4.3	Comprimento de encurvadura	35
3.2.4.4	Carga crítica elástica	35
3.2.4.5	Momento crítico de encurvadura.....	36
3.2.4.6	Resistência das secções transversais	38
3.2.4.6.1	Esforço axial de tração	38
3.2.4.6.2	Esforço axial de compressão	38
3.2.4.6.3	Momento fletor simples	39
3.2.4.6.4	Esforço transverso	39
3.2.4.6.5	Flexão desviada	41
3.2.4.6.6	Flexão desviada composta com esforços axial.....	41
3.2.4.6.7	Flexão desviada composta com esforço axial e esforço transverso	41
3.2.4.6.8	Algoritmo de cálculo da resistência das secções transversais.....	42
3.2.4.7	Resistência dos elementos à encurvadura global	43
3.2.4.7.1	Colunas uniformes comprimidas.....	43
3.2.4.7.2	Vigas uniformes em flexão	45
3.2.4.7.3	Vigas-coluna uniformes em flexão composta com compressão	46
3.2.4.7.4	Algoritmo de cálculo da capacidade resistente à encurvadura global dos elementos estruturais.....	47
3.2.5	Otimização estrutural.....	47
3.3	Base de dados.....	49
3.4	Definição da interface e implementação da “Cold-Formed Design”	49
4	ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS MODULARES PLANAS.....	58
4.1	Considerações gerais.....	58
4.2	Aspetos gerais de uma análise global de estruturas	60
4.2.1	Imperfeições	61
4.2.2	Estabilidade global de estruturas	62
4.2.3	Metodologia de análise considerando o comportamento não linear do material.....	63
4.3	Modelação e análise global das estruturas modulares planas	63
4.3.1	Quantificação e combinação de ações	63
4.3.1.1	Quantificação de ações.....	63
4.3.1.2	Combinações de ações	64
4.3.2	Modelação das estruturas modulares	65
4.3.3	Distribuição do carregamento nos modelos de cálculo	66
4.3.4	Análise global das estruturas	67
4.4	Otimização das estruturas modulares planas	67
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
5.1	Conclusões	72
5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ANEXO A	A-1
ANEXO B	B-1
B.1 Validação do cálculo das propriedades materiais	B-1
B.2 Validação da classificação das secções transversais.....	B-2
B.3 Validação do cálculo das propriedades efetivas	B-3
B.4 Validação da verificação da capacidade resistente à tração axial uniforme	B-8
B.5 Validação da verificação da capacidade resistente à compressão axial uniforme	B-9
B.6 Validação da verificação da segurança da secção transversal sujeita a flexão em torno do eixo $y - y$ e ao esforço transverso	B-10
B.7 Validação da verificação da segurança de uma secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transverso	B-11
B.8 Validação da verificação da segurança à encurvadura global de uma coluna sujeita a compressão axial.....	B-12
B.9 Validação da verificação da segurança à encurvadura lateral de uma viga sujeita a flexão em torno do eixo de maior inércia $y - y$	B-13
B.10 Validação da verificação da segurança à encurvadura global de uma viga-coluna sujeita a flexão composta com compressão	B-15

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipologias das secções transversais (adaptado da EN1993-1-3, 2006)	4
Figura 2.2 – Processo de fabrico por laminagem a frio (Silvestre e Camotim, 2006)	5
Figura 2.3 - Processo de fabrico por quinagem (Veríssimo, 2008).....	5
Figura 2.4 – Distribuição de tensões ao longo da linha média da secção (Veríssimo, 2008)	6
Figura 2.5 – Deformada da encurvadura global: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Dubina et al, 2012)	7
Figura 2.6 – Deformada do MLP: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Silvestre e Camotim, 2006).....	7
Figura 2.7 – Deformada do MD: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Silvestre e Camotim, 2006).....	8
Figura 2.8 – Placa simplesmente apoiados e rígidos (Dubina et al, 2012).....	9
Figura 2.9 – Evolução da distribuição de tensões normais numa placa comprimida suscetível a encurvadura local: (a) Estado pré-crítico; (b) Estado pós-crítico, imediatamente após ser atingida a carga crítica; (c) Estado último pós-crítico (Dubina et al, 2012).....	9
Figura 2.10 – Distribuição de tensões normais de uma placa comprimida: (a) Tensões reais; (b) Tensões equivalentes baseadas no <i>conceito de largura efetiva</i> (Dubina et al, 2012)	9
Figura 2.11 – Relação entre a tensão crítica e o comprimento de onda (Dubina et al, 2012) ..	10
Figura 2.12 – Deformação por torção (adaptado de Dubina et al, 2012)	11
Figura 2.13 – Processo de endurecimento do aço (Veríssimo, 2008)	12
Figura 3.1 –(a) Secção transversal e convenção dos eixos de referência; (b) Detalhe dos cantos arredondados.....	15
Figura 3.2 – Algoritmo de cálculo das propriedades materiais	17
Figura 3.3 – Definição das larguras: (a) nominais; (b) idealizadas	18
Figura 3.4 – Algoritmo de cálculo das propriedades geométricas da secção transversal.....	21
Figura 3.5 – Curvas momento-curvatura (Silvestre e Camotim, 2006).....	23
Figura 3.6 – Algoritmo da classificação das secções transversais	25
Figura 3.7 – Modelação da secção transversal: (a) considerando o reforço e sua rigidez; (b) desprezando o reforço e sua rigidez; (c) considerando o reforço como um elemento externo;27	
Figura 3.8 – Definição da forma de cálculo das propriedades efetivas	27
Figura 3.9 – Cálculo da rigidez equivalente do reforço (adaptado de CEN, 2006a).....	30
Figura 3.10 – Algoritmo de cálculo da secção efetiva do “reforço”	34
Figura 3.11 – Algoritmo de cálculo da secção efetiva	34
Figura 3.12 – Alma reforçada longitudinalmente (EN1993-1-3, 2006)	40

Figura 3.13 – Algoritmo de cálculo da resistência da secção transversal	42
Figura 3.14 – Algoritmo de cálculo da capacidade resistente à encurvadura global dos elementos estruturais	47
Figura 3.15 – Secção transversal tipo dos elementos de aço enformado a frio.....	48
Figura 3.16 – Geometria do elemento estrutural pré-dimensionado e condições de fronteira (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>)	50
Figura 3.17 – Coeficientes parciais de segurança (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>).....	50
Figura 3.18 – Propriedades materiais (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>)	51
Figura 3.19 – Verificação das proporções geométricas e da aplicabilidade do método de cálculo do <i>EC3-1-3</i> (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>).....	52
Figura 3.20 – Propriedades da secção bruta (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>)	53
Figura 3.21 – Esforços de cálculo e diagramas de esforços (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>)	54
Figura 3.22 – Efeitos da instabilidade local e global (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>).....	55
Figura 3.23 – Verificação da segurança do elemento estrutural.....	55
Figura 3.24 – Processo iterativo de convergência e aproximação à solução otimizada (Interface da <i>Cold-Formed Design</i>)	56
Figura 3.25 – Verificação da segurança do elemento estrutural.....	57
Figura 4.1 – Vista em alçado de uma estrutura modular (tipo)	58
Figura 4.2 – Geometria dos pilares-treliça (unidade de medida em cm).....	59
Figura 4.3 – Geometria das vigas-treliça (unidade de medida em cm)	59
Figura 4.4 – Pormenorização das ligações internas das subestruturas treliçadas.....	60
Figura 4.5 – Pormenorização das ligações das vigas-treliça aos pilares tubulares: (a) Vista lateral; (b) Vista superior	60
Figura 4.6 – “Imperfeição geométrica equivalente” (EN1993-1-1, 2010).....	62
Figura 4.7 – Modelação simplificada da secção transversal do conjunto	66
Figura 4.8 – Discretização do pilar-treliça para a generalidade das estruturas modulares.....	69
Figura 4.9 – Discretização da viga-treliça	69
Figura A.1 – Secção transversal idealizada	A-1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Rácios largura-espessura abrangidos no <i>EC3-1-3</i> (EN1993-1-3, 2006)	20
Quadro 3.2 – Componentes comprimidos internos (EN1993-1-1, 2010)	24
Quadro 3.3 – Componentes comprimidos externos (EN1993-1-1, 2010).....	25
Quadro 3.4 – Componentes internos comprimidos (EN1993-1-5, 2006)	29
Quadro 3.5 – Componentes externos comprimidos (EN1993-1-5, 2006).....	30
Quadro 3.6 – Condições de fronteira e coeficiente <i>K</i>	35
Quadro 3.7 – Coeficiente <i>C1</i> para as vigas com momentos de extremidade (Silvestre, 2012)	37
Quadro 3.8 – Tensão resistente ao esforço transversal dado em função da esbelteza.....	40
Quadro 3.9 – Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura (EN1993-1-1, 2010).....	44
Quadro 3.10 – Curvas de encurvadura em função da secção transversal (EN1993-1-3, 2006)	44
Quadro 3.11 – Coef.de momento uniforme equivalente (adaptado de EN1993-1-1, 2010)	46
Quadro 3.12 – Fatores de interação (adaptado de EN1993-1-1, 2010)	47
Quadro 4.1 – Características geométricas das estruturas modulares.....	58
Quadro 4.2 – Valor dos coeficientes ψ para edifícios (adaptado da EN1990, 2009).....	65
Quadro 4.3 – Secções transversais dos elementos de aço enformado a frio do dimensionamento inicial	68
Quadro 4.4 – Secções transversais dos perfis tubulares	68
Quadro 4.5 – Quantidades de aço das estruturas modulares inicialmente dimensionadas.....	68
Quadro 4.6 – Secções transversais otimizadas dos grupos dos pilares-treliça	70
Quadro 4.7 – Secções transversais otimizadas dos grupos das vigas-treliça	70
Quadro 4.8 – Quantidades de aço das estruturas modulares otimizadas	71
Quadro 4.9 – Percentagem de redução da quantidade de aço	71
Quadro B.1 – Dimensões geométricas da secção transversal.....	B-1
Quadro B.2 – Verificação da abrangência da espessura da chapa pela <i>EC3-1-3</i>	B-1
Quadro B.3 – Propriedades materiais	B-2
Quadro B.4 – Tensão de cedência média da secção transversal.....	B-2
Quadro B.5 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-2
Quadro B.6 – Classificação do banzo comprimido	B-3
Quadro B.7 – Classificação da alma comprimida	B-3
Quadro B.8 – Classificação do reforço comprimido	B-3
Quadro B.9 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-4

Quadro B.10 – Verificação das proporções geométricas e da aplicabilidade da metodologia de cálculo do EC3-1-3. E pré-dimensionamento dos reforços segundo a EC3-1-3	B-4
Quadro B.11 – Verificação da influência dos cantos arredondados.....	B-4
Quadro B.12 – Discretização da secção transversal e larguras idealizadas.....	B-5
Quadro B.13 – Propriedades geométricas da secção bruta.....	B-5
Quadro B.14 – Passo 1: Cálculo das larguras efetivas iniciais do “reforço”	B-5
Quadro B.15 – Passo 2: Cálculo das propriedades efetivas iniciais do “reforço”	B-6
Quadro B.16 – Passo 3: Redefinição das propriedades efetivas do “reforço”	B-6
Quadro B.17 – Propriedades efetivas da alma comprimida	B-6
Quadro B.18 – Propriedades efetivas	B-6
Quadro B.19 – Propriedades efetivas da alma comprimida	B-7
Quadro B.20 – Passo 1: Cálculo das larguras efetivas iniciais.....	B-7
Quadro B.21 – Passo 2: Cálculo das propriedades efetivas iniciais do “reforço”	B-7
Quadro B.22 – Passo 3: Redefinição das propriedades efetivas do “reforço”	B-8
Quadro B.23 – Propriedades efetivas	B-8
Quadro B.24 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-8
Quadro B.25 – Verificação da resistência da secção transversal à tração axial uniforme	B-8
Quadro B.26 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-9
Quadro B.27 – Propriedades da secção bruta e efetiva	B-9
Quadro B.28 – Verificação da segurança da secção transversal à compressão axial.....	B-9
Quadro B.29 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-10
Quadro B.30 – Verificação da segurança da secção transversal ao esforço transversal	B-10
Quadro B.31 – Propriedades efetivas	B-10
Quadro B.32 – Verificação da segurança da secção transversal à flexão.....	B-11
Quadro B.33 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-11
Quadro B.34 – Capacidade resistente à flexão da secção transversal	B-11
Quadro B.35 – Verificação da segurança da secção transversal ao esforço transversal	B-12
Quadro B.36 – Verificação da segurança da secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transversal	B-12
Quadro B.37 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-12
Quadro B.38 – Propriedades geométricas da secção bruta.....	B-13
Quadro B.39 – Carga crítica de encurvadura	B-13
Quadro B.40 – Capacidade resistente da coluna à encurvadura global.....	B-13
Quadro B.41 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-14
Quadro B.42 – Propriedades geométricas da secção bruta.....	B-14
Quadro B.43 – Momento crítico (cálculo simplificado)	B-14
Quadro B.44 – Capacidade resistente do elemento à encurvadura lateral.....	B-14
Quadro B.45 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais.....	B-15
Quadro B.46 – Propriedades geométricas da secção bruta.....	B-15

Quadro B.47 – Momento crítico (cálculo simplificado)	B-15
Quadro B.48 – Coeficiente de redução da resistência devido à encurvadura global.....	B-16
Quadro B.49 – Coeficientes de momento uniforme equivalente e os fatores de interação ..	B-16
Quadro B.50 – Coeficientes relativos à verificação da segurança de uma viga-coluna.....	B-16

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

Simbologia

Letras maiúsculas Latinas

A	Área bruta da secção transversal;
A_s	Área efetiva do “reforço”;
$A_{s,red}$	Área efetiva reduzida do “reforço”;
C_{mLT}	Coefficiente de momento uniforme equivalente, para a encurvadura lateral;
C_{my}	Coefficiente de momento uniforme equivalente, em relação ao eixo $y - y$;
C_{mz}	Coefficiente de momento uniforme equivalente, em relação ao eixo $z - z$;
C_θ	Rigidez rotacional conferida pela alma ao sistema real composto pelo banzo e “reforço”;
C_1	Coefficiente para ter em conta a distribuição de momentos;
E	Módulo de elasticidade;
G	Módulo de distorção;
G_k	Valor característico das ações permanentes;
I	Momento de inércia;
I_p	Momento de inércia polar relativa ao centro de corte
I_s	Momento de inércia do reforço relativa ao eixo $a - a$;
I_t	Constante de torção de St.Venant;
I_u	Momento de inércia em relação ao seu eixo principal de inércia $u - u$;
I_v	Momento de inércia em relação ao seu eixo principal de inércia $v - v$;
I_w	Constante de empenamento;
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo $y - y$;
I_{yz}	Produto de inércia de uma parede da secção transversal em torno y e z no centro de gravidade da secção transversal;
I_{yz0}	Produto de inércia de uma parede da secção transversal em torno y_0 e z_0 no centro de gravidade da secção transversal;
$I_{y\omega}$	Constante sectorial associada ao eixo $y - y$;
$I_{y\omega 0}$	Constante sectorial associada ao eixo $y_0 - y_0$;
I_{y0}	Momento de inércia em relação ao eixo $y_0 - y_0$;
I_z	Momento de inércia em relação ao eixo $z - z$;
$I_{z\omega}$	Constante sectorial associada ao eixo $z - z$;
$I_{z\omega 0}$	Constante sectorial associada ao eixo $z_0 - z_0$;
I_{z0}	Momento de inércia em relação ao eixo $z_0 - z_0$;
I_ω	Coordenada sectorial da secção transversal;
$I_{\omega\omega}$	Constante sectorial associada ao eixo y e z ;

$I_{\omega\omega 0}$	Constante sectorial associada ao eixo y_0 e z_0 ;
K	Coefficiente que considera as condições de fronteira;
K_s	Rigidez da mola equivalente do “reforço”;
L	Comprimento referência do elemento linear;
L_{cr}	Comprimento de encurvadura;
$L_{cr.F}$	Comprimento de encurvadura por flexão do seu eixo longitudinal;
$L_{cr.T}$	Comprimento de encurvadura por torção e/ou flexão-torção;
$L_{cr.y}$	Comprimento de encurvadura por flexão eixo longitudinal, em torno do eixo $y - y$;
$L_{cr.z}$	Comprimento de encurvadura por flexão eixo longitudinal, em torno do eixo $z - z$;
$M_{b.Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura;
M_{cr}	Momento crítico elástico de encurvadura lateral;
$M_{c.Rd}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal;
$M_{cr.u}$	Momento crítico simplificado;
$M_{cy.Rd}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal, em torno do eixo $y - y$;
$M_{cy.Rd.com}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal da secção da secção sujeita à máxima compressão, devida a flexão em torno do eixo $y - y$;
$M_{cy.Rd.ten}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal da secção da secção sujeita à máxima tensão, devida a flexão em torno do eixo $y - y$;
$M_{cz.Rd}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal, em torno do eixo $z - z$;
$M_{cz.Rd.com}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal da secção da secção sujeita à máxima compressão, devida a flexão em torno do eixo $z - z$;
$M_{cz.Rd.ten}$	Valor do momento fletor resistente da secção transversal da secção da secção sujeita à máxima tensão, devida a flexão em torno do eixo $z - z$;
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor atuante;
$M_{f.Ed.y}$	Valor do momento fletor plástico resistente de secção composta pelas partes efetivas dos banzos, em torno do eixo $y - y$;
$M_{f.Ed.z}$	Valor do momento fletor plástico resistente de secção composta pelas partes efetivas dos banzos, em torno do eixo $z - z$;
$M_{pl.Rd.y}$	Valor do momento fletor plástico resistente de secção composta pelas partes efetivas dos banzos e com alma totalmente efetivas, em torno do eixo $y - y$;
$M_{pl.Rd.z}$	Valor do momento fletor plástico resistente de secção composta pelas partes efetivas dos banzos e com alma totalmente efetivas, em torno do eixo $z - z$;
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente;
$M_{y.Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo $y - y$;
$M_{y.Rk}$	Valor característico do momento fletor resistente da secção transversal condicionante, em relação ao eixo $y - y$;
$M_{z.Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo $z - z$;
$M_{z.Rk}$	Valor característico do momento fletor resistente da secção transversal condicionante, em relação ao eixo $z - z$;
$N_{b.Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido;
N_c	Esforço axial de compressão;

N_{cr}	Valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástico considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta;
$N_{c.Rd}$	Valor do esforço normal resistente à compressão da secção transversal;
$N_{cr.F}$	Carga crítica elástica (ou carga crítica de Euler);
$N_{cr.FT}$	Valor crítico de esforço de encurvadura elástica por flexão-torção;
$N_{cr.T}$	Valor crítico de esforço de encurvadura elástica por torção;
$N_{cr.y}$	Carga crítica elástica de encurvadura em torno de $y - y$;
$N_{cr.z}$	Carga crítica elástica de encurvadura em torno de $z - z$;
N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço normal atuante;
N_{Rd}	Valor de cálculo do esforço normal resistente;
N_{Rk}	Valor característico do esforço normal resistente na secção condicionante;
$N_{t.Rd}$	Valor do esforço normal resistente à tração da secção transversal;
P	Valor da carga axial de compressão;
P_{cr}	Valor da carga crítica de encurvadura;
Q_k	Valor característico das ações variáveis;
S_{y0}	Momento estático em torno do eixo $y_0 - y_0$;
S_{z0}	Momento estático em torno do eixo $z_0 - z_0$;
$V_{b.Rd}; V_{w.Rd}$	Valor do esforço transversal resistente da secção transversal;
V_{Ed}	Valor de cálculo do esforço transversal;
$V_{y.Ed}$	Valor de cálculo do esforço transversal segundo a direção y ;
$V_{w.Rd.y}$	Valor do esforço transversal resistente da secção transversal segundo a direção y ;
$V_{w.Rd.z}$	Valor do esforço transversal resistente da secção transversal segundo a direção z ;
$V_{z.Ed}$	Valor de cálculo do esforço transversal segundo a direção z ;
W_{el}	Módulo de flexão elástico de uma secção transversal;
W_{pl}	Módulo de flexão plástico de uma secção transversal;
W_t	Módulo de torção;
W_w	Módulo de empenamento;

Letras minúsculas latinas

b	Largura do banzo dada pela distância entre os dois pontos externos na secção transversal;
b_c	Largura comprimida;
$b_{e.2}$	Largura efetiva da parte efetiva 2;
b_p	Largura do componente;
c	Largura do reforço de extremidade dada pela distância entre os dois pontos externos na secção transversal;
c_p	Largura do reforço de extremidade;
e_{Ny}	Excentricidade existente entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva e bruta, segundo o eixo $y - y$;

e_{Nz}	Excentricidade existente entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva e bruta, segundo o eixo $z - z$;
f_u	Tensão última;
f_{ya}	Tensão de cedência média;
f_{yb}	Tensão de cedência base;
f_{bv}	Tensão resistente ao esforço transversal;
g_r	Fator de correção do comprimento da linha média das paredes da secção transversal para o comprimento da linha média nominal;
h	Largura da alma dada pela distância entre os dois pontos externos na secção transversal; Altura das estruturas modulares;
$h_{viga-treliça}$	Altura das vigas-treliça das estruturas modulares;
h_w	Largura da alma;
i	Raio de giração relativo ao eixo considerando, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta;
i_y	Raio de giração relativo ao eixo $y - y$;
i_z	Raio de giração relativo ao eixo $z - z$;
i_0	Raio de giração polar da secção em relação ao centro de corte;
k	Fator de dependência do tipo de fabrico;
k_f	Fator que relaciona as áreas dos “reforços” dos banzos;
k_p	Fator de consideração a configuração do diagrama de tensões;
k_{yy}	Fator de interação;
k_{yz}	Fator de interação;
k_{zy}	Fator de interação;
k_{zz}	Fator de interação;
k_σ	Coeficiente de encurvadura em componentes externos comprimidos e intersectados pela linha neutra; Fator de encurvadura local;
k_τ	Coeficiente para a encurvadura local de placa para a instabilidade por esforço transversal ou corte;
l_k	Comprimento do vão das estruturas modulares;
m	Número de colunas num alinhamento;
n	Número de cantos arredondados da secção transversal;
r_i	Raio interno dos cantos arredondados da secção transversal;
s	Largura total da componente;
s_d	Largura total da componente resistente ao esforço transversal;
$s_p; s_w$	Largura parcial da componente resistente ao esforço transversal, subdividido por um reforço intermédio;
$t; t_{cor}$	Espessura base da chapa do elemento;
$t_{metallic\ coatings}$	Espessura de revestimento da chapa;
t_{nom}	Espessura nominal da chapa do elemento;
t_{red}	Espessura reduzida do “reforço”;
tol	Tolerâncias de produção;
u	Carga unitária; Coordenada em relação a $u - u$;
u_{cg}	Coordenada do centro geométrico em relação a $u - u$;
u_j	Fator de assimetria;

u_{sc}	Coordenada do centro de corte em relação a $u - u$;
v	Carga unitária; Coordenada em relação a $v - v$;
v_{cg}	Coordenada do centro geométrico em relação a $v - v$;
v_j	Fator de assimetria;
v_{sc}	Coordenada do centro de corte em relação a $v - v$;
y	Coordenada em relação a $y - y$;
y_{sc}	Coordenada do centro de corte em relação a $y - y$;
y_0	Coordenada em relação a $y_0 - y_0$;
$y_{0.cg}$	Coordenada do centro geométrico em relação a $y_0 - y_0$;
$y_{0.sc}$	Coordenada do centro de corte em relação a $y_0 - y_0$;
z	Coordenada em relação a $z - z$;
z_{sc}	Coordenada do centro de corte em relação a $z - z$;
z_0	Coordenada em relação a $z_0 - z_0$;
$z_{0.cg}$	Coordenada do centro geométrico em relação a $z_0 - z_0$;
$z_{0.sc}$	Coordenada do centro de corte em relação a $z_0 - z_0$;

Letras maiúsculas gregas

$\Delta M_{y.Ed}$	Momento devido à excentricidade do eixo baricêntrico $y - y$;
$\Delta M_{z.Ed}$	Momento devido à excentricidade do eixo baricêntrico $z - z$;
Δu	Distância entre as coordenadas $u - u$;
Δv	Distância entre as coordenadas $v - v$;
ϕ	Imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade; Ângulo reto formado pelas paredes da seção transversal; Parâmetro de cálculo do coeficiente de redução χ ;
ϕ_{LT}	Valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT} ;
ϕ_0	Valor de base da imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade;
Ψ	Relação entre as tensões normais nas fibras extremas do componente comprimido

Letras minúsculas gregas

α	Relação entre a largura do componente sujeito a compressão e a sua largura total; Fator de imperfeição associado ao modo de encurvadura considerado; Ângulo entre o sistema de eixos $y - z$ e o sistema de eixos principais de inércia $u - v$;
α_{cr}	Multiplicador crítico da estrutura, ou fator pelo qual as ações de cálculo teriam que ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global;
α_h	Coefficiente de redução para tomar em consideração a altura do pórtico;
α_{LT}	Fator de imperfeição para a encurvadura lateral;
α_m	Coefficiente de redução que considera o número de colunas num alinhamento;
α_T	Fator de imperfeição para a encurvadura por torção;

$\bar{\alpha}_y$	Fator de imperfeição para a encurvadura por flexão em torno do eixo $y - y$;
$\bar{\alpha}_z$	Fator de imperfeição para a encurvadura por flexão em torno do eixo $z - z$;
β	Parâmetro de assimetria;
θ	Rotação do sistema real composto pelo banzo e reforço, quando sujeito a uma carga unitária;
λ	Valor da esbelteza;
λ_1	Valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada;
$\bar{\lambda}$	Esbelteza normalizada associado ao modo de encurvadura considerado;
$\bar{\lambda}_d$	Esbelteza normalizada distorcional do “reforço”;
$\bar{\lambda}_e$	Valor da esbelteza local;
$\bar{\lambda}_{e0}$	Valor característico da esbelteza;
$\bar{\lambda}_F$	Esbelteza normalizada para encurvadura por flexão;
$\bar{\lambda}_{lim}$	Esbelteza normalizada local limite;
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza normalizada para encurvadura lateral;
$\bar{\lambda}_{LT.0}$	Comprimento do patamar das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas;
$\bar{\lambda}_p$	Esbelteza normalizada local;
$\bar{\lambda}_{p.red}$	Esbelteza normalizada local reduzida;
$\bar{\lambda}_T$	Esbelteza normalizada associada à encurvadura de colunas por torção ou flexão-torção;
$\bar{\lambda}_y$	Esbelteza normalizada para a encurvadura em relação ao eixo $y - y$;
$\bar{\lambda}_w$	Esbelteza normalizada para a instabilidade por esforço transversal;
$\bar{\lambda}_z$	Esbelteza normalizada para a encurvadura em relação ao eixo $z - z$;
ρ	Fator de redução local;
$\sigma_{com.Ed}$	Valor de cálculo da tensão normal atuante;
σ_{cr}	Tensão crítica;
$\sigma_{cr.d}$	Tensão crítica distorcional;
$\sigma_{cr.s}$	Tensão crítica global do banzo;
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima na fibra mais solicitada da secção transversal;
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima equivalente;
σ_{med}	Tensão média considerando a não linearidade da distribuição de tensões normais imposta pela encurvadura local;
τ_{cr}	Tensão tangencial crítica;
γ_{M0}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe;
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento;
γ_{M2}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação;
γ_s	Peso volúmico do aço;
δ	Fator de redução das propriedades da secção transversal; Deslocamento do conjunto composto pelo banzo e reforço quando sujeito a uma carga unitária aplicada no centro geométrico do “reforço” efetivo;
ε	Parâmetro dado em função da classe do aço e da sua tensão de cedência;

ν	Coeficiente de Poisson em regime elástico;
χ	Coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado;
χ_d	Fator de redução para a instabilidade distorcional “reforço”;
χ_{LT}	Coeficiente de redução para a encurvadura lateral;
χ_T	Coeficiente de redução para a encurvadura por torção;
χ_y	Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo $y - y$;
χ_z	Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo $z - z$;
ψ_0	Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;
ψ_1	Coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável;
ψ_2	Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável;
ω_{max}	Máxima coordenada sectorial em relação ao centro de corte;
ω_{mean}	Coordenada sectorial média da secção transversal;
ω_s	Coordenada sectorial em relação ao centro de corte;
ω	Coordenada sectorial de uma parede da secção transversal;

Notação

X_{SH}	Propriedade X relativas à secção idealizada;
X_n	Propriedade X relativas à secção nominal;
X_i	Grandeza X associada ao nó i ;
X_j	Grandeza X associada ao elemento j ;
X_k	Grandeza X associada aos diferentes modelos de estruturas modulares;
X_{eff}	Grandeza X associada à secção efetiva;
X^n	Grandeza X associada ao processo iterativo de cálculo das propriedades efetivas do reforço e ao número de iterações;

Abreviaturas

MLP	Modo local de placa
MD	Modo distorcional
MG	Modo global
MGF	Modo global de flexão
MGT	Modo global de torção
MGFT	Modo global de flexão-torção
Coluna	Elementos lineares axialmente comprimidos
Viga	Elementos lineares sujeitos a flexão
Viga-coluna	Elementos lineares sujeitos a flexão composta com compressão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A indústria da construção é responsável pelo consumo de cerca de 50% dos recursos naturais do planeta e pela produção de 25% dos resíduos sólidos, desempenhando fundamental no desenvolvimento sustentável (Maydl, 2004). No entanto, a indústria da construção tem mantido inalteradas as características e formas de utilização tradicionais dos materiais de construção, as quais condicionam fortemente a adaptabilidade dos espaços para acompanhar as constantes alterações das necessidades funcionais inerentes ao modo de vida das populações e à sua evolução socioeconómica, que frequentemente requer o crescimento/redução gradual da habitação. As próprias características dos materiais tradicionalmente utilizados na construção, betão e alvenaria de tijolo, para além de dificultarem a adaptabilidade dos espaços, são de difícil reutilização penalizando este tipo de construção tradicional em termos de análise do ciclo de vida e do seu respetivo custo.

O tema desta dissertação surge no seguimento do projeto I&DT Cool Haven, assente numa parceria desenvolvida entre a FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e a empresa Cool Haven – Habitações Modelares Eco-Sustentáveis, S.A.. Este projeto procura desenvolver um conceito inovador de construção em alternativa à construção tradicional, que consiste em conferir aos espaços uma sustentabilidade assente na eficiência e na adaptabilidade às várias exigências funcionais durante a vida útil da construção. Este tipo de construção inovador é concebido de forma a proporcionar, caso a legislação local assim o permita, a possibilidade de acrescentar/remover divisões com relativa facilidade a uma habitação existente, correspondendo assim às necessidades funcionais do proprietário. Associado ao conceito está a modularidade e a utilização de estruturas de aço enformado a frio, pelas suas características de leveza, resistência, versatilidade de formas e possibilidade de reutilização. Efetivamente, a construção modular exhibe vantagens óbvias pelo facto de os trabalhos de execução serem maioritariamente desenvolvidos em fábrica, geralmente por meios mecânicos. As principais vantagens são o reduzido tempo de execução em obra, bastante inferior ao da construção tradicional, e principalmente a reduzida probabilidade de existirem erros em obra e consequentes defeitos na construção. Enquanto a construção metálica é geralmente associada à construção sustentável, devido ao facto do aço se tratar de um material totalmente reciclável e de grande eficiência estrutural. Contudo, no atual contexto

socioeconómico é essencial transformar este tipo inovador de construção sustentável, competitivo e atrativo a nível económico.

1.2 Objetivos e metodologia

A presente dissertação visa otimizar estruturas modulares de aço enformado a frio em termos de eficiência estrutural. O dimensionamento de elementos de aço enformado a frio é um processo complexo e moroso, assim, esta dissertação tem, ainda, como objetivo desenvolver uma ferramenta de suporte essencial na otimização destas estruturas modulares de aço enformado a frio. Como tal, foi desenvolvida a ferramenta de cálculo computacional *Cold-Formed Design*, por forma a disponibilizar um *software* de cálculo que permita simplificar o dimensionamento e otimização de elementos de aço enformado a frio.

Embora as estruturas modulares planas, objeto desta dissertação, sejam compostas por dois pilares tubulares e por subestruturas treliçadas de aço enformado a frio, a otimização das estruturas modulares é baseada na otimização dos elementos de aço enformado a frio, desenvolvida com recurso à ferramenta de cálculo *Cold-Formed Design*. No que se refere aos pilares tubulares, estes são dimensionados com recurso ao *software* de cálculo estrutural “*Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012*” (Autodesk, 2012).

Os esforços de cálculo e as deformações globais das estruturas modulares são determinados com base numa modelação estrutural e análise global desenvolvidas no presente trabalho com recurso ao mesmo *software* de cálculo estrutural “*Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012*” (Autodesk, 2012).

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos e dois anexos, A e B:

- O capítulo 1 é uma introdução ao tema da dissertação, na qual é feita uma breve referência acerca das necessidades de desenvolver um novo tipo de construção inovador e sustentável. Este capítulo refere também de forma sucinta, os objetivos e a metodologia adotada na dissertação. É, ainda, apresentada a organização da mesma;
- No capítulo 2 são referidas as principais características associadas aos elementos de aço enformado a frio, nomeadamente: as suas características geométricas e materiais, os seus processos de fabrico, o seu comportamento estrutural e as vantagens e desvantagens resultantes da sua utilização na construção;

- No capítulo 3 é apresentada, pormenorizadamente, a ferramenta de cálculo *Cold-Formed Design*, sendo descrito detalhadamente todo o processo de cálculo, a definição da base de dados e da sua interface. É, ainda, explicado o funcionamento integral da *Cold-Formed Design* com recurso à implementação num exemplo aplicativo.
- No capítulo 4 são apresentadas a análise e otimização de estruturas modulares planas, sendo apresentadas as características das estruturas modulares planas, a sua modelação e análise global e, ainda, o processo de otimização das estruturas modulares planas, bem como, as características das estruturas otimizadas e os ganhos de eficiência com a otimização estrutural e a conseqüente redução da quantidade de aço;
- Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugeridos futuros trabalhos de investigação sobre este mesmo tema;
- No anexo A é apresentada a discretização da secção idealizada e as fórmulas de cálculo das suas propriedades;
- No anexo B é mostrado o processo de validação do *Cold-Formed Design*.

2 ELEMENTOS DE AÇO ENFORMADO A FRIO

2.1 Considerações gerais

Em estruturas metálicas o comportamento da estrutura é muito dependente do comportamento global e local dos seus elementos, do comportamento das ligações e da deformabilidade dos apoios. Como os elementos de aço enformado a frio são elementos estruturais muito peculiares, neste capítulo são apresentadas as suas principais características, nomeadamente: os tipos de elementos de aço enformado a frio; os processos de fabrico; as características materiais; as principais características do seu comportamento estrutural; e por fim as principais vantagens e desvantagens da sua utilização na construção.

2.2 Tipos de elementos de aço enformado a frio

Os elementos de aço enformado a frio são elementos de eixo reto e secção transversal uniforme, podendo assumir diferentes formas, geometrias e dimensões. Estes elementos podem ser definidos segundo duas tipologias:

- Elementos lineares (perfis);
- Painéis de chapa (ou chapa perfilada).

Um elemento linear pode distinguir-se de um painel de chapa porque num elemento linear uma das suas dimensões destaca-se claramente das restantes, enquanto os painéis de chapa, como são peças laminares têm duas das suas dimensões que se destacam claramente da restante. Os elementos lineares de aço enformado a frio correntemente utilizados na construção, como apresentado na Figura 2.1, assumem geometrias em C,U,Z, “Hat” e “Rack”, havendo porém uma enorme variedade de secções transversais.

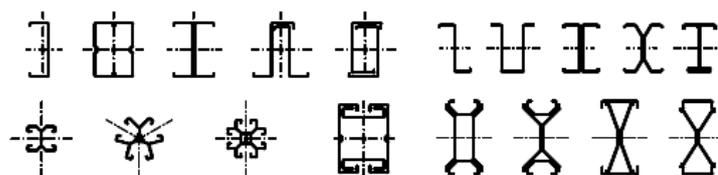


Figura 2.1 – Tipologias das secções transversais (adaptado da EN1993-1-3, 2006)

2.3 Processo de fabrico

Os elementos de aço enformado a frio são resultado de um trabalho mecânico de dobragem de chapas de espessura muito reduzida. Nos elementos lineares são, geralmente, usadas chapas com espessuras entre 1,22 e 6,35mm. Já nos painéis de chapa (ou chapa perfilada) são, vulgarmente, usadas chapas com espessura entre 0,457 e 1,91mm (Yu e LaBoube, 2010). Os processos de fabrico correntemente utilizados são, fundamentalmente, à base de duas tecnologias de fabrico:

- A laminagem a frio (“*Roll forming*”);
- A quinagem (“*Folding and press braking*”).

A laminagem a frio (apresentada na Figura 2.2) é o processo de fabrico mais corrente, principalmente quando o objetivo é atingir grandes quantidades de produção, bem como elementos de elevada complexidade. Tal, deve-se ao facto de este processo de fabrico ser responsável por uma produção normalizada, sistematizada e com uma elevada eficiência. A quinagem (apresentada na Figura 2.3), por sua vez, é um processo de fabrico menos industrializado, associado à produção de pequenas quantidades de elementos de 5 a 8 metros de comprimento com secções transversais relativamente simples.



Figura 2.2 – Processo de fabrico por laminagem a frio (Silvestre e Camotim, 2006)

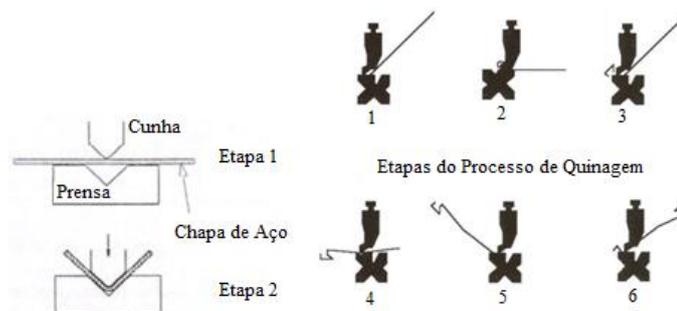


Figura 2.3 - Processo de fabrico por quinagem (Veríssimo, 2008)

2.4 Características materiais

Em geral, os elementos de aço enformado a frio correntemente utilizados são de aço galvanizado e apresentam uma tensão de cedência f_{yb} entre 250 MPa e 550 MPa (Dubina et al, 2012), uma tensão última f_u que pode variar entre 300 MPa e 720 MPa, uma relação entre a tensão última e a tensão de cedência (f_u/f_{yb}) que pode variar entre 1,1 e 1,9 e, uma extensão máxima que pode variar entre 10% e 25%. Porém, os aços de alta resistência podem, ainda, atingir uma tensão de cedência f_{yb} de 670 MPa (Silvestre e Camotim, 2006).

O processo de fabrico dos elementos de aço enformado a frio determina o endurecimento do aço junto dos bordos longitudinais na zona da dobragem da chapa, a que está inerente um aumento da tensão de cedência e, uma diminuição da ductilidade do aço. De facto, o processo de dobragem das chapas induz tensões residuais nas secções transversais que melhoram a sua capacidade resistente. A relação entre a tensão de cedência antes e após a dobragem f_{ya}/f_{yb} , como mostrado na Figura 2.4, pode atingir 1,40 nas zonas dos cantos arredondados e 1,05 a 1,10 em média ao longo de toda a linha média da secção, dependendo do número de cantos arredondados, do processo de fabrico e da espessura da chapa (Silvestre e Camotim, 2006).

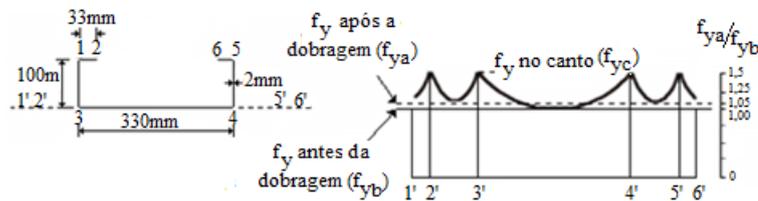


Figura 2.4 – Distribuição de tensões ao longo da linha média da secção (Veríssimo, 2008)

2.5 Comportamento estrutural

2.5.1 Fenómenos de instabilidade

Os elementos de aço enformado a frio são, como referido anteriormente, resultado de um processo de fabrico mecânico de dobragem de chapas de espessura reduzida, que conduz a paredes com elevadas esbeltezas e a elementos estruturais suscetíveis à ocorrência de inúmeros fenómenos de instabilidade de natureza geométrica não linear, nomeadamente: fenómenos de instabilidade global e local.

Os fenómenos de instabilidade global (ou encurvadura global) envolvem deformação, única e exclusivamente, do eixo longitudinal do elemento e uma conseqüente translação e/ou rotação

das suas secções transversais como corpos rígidos no seu plano, abrangendo o modo global por flexão (MGF), o modo global por torção (MGT), o modo global por flexão-torção (MGFT) e o modo global por flexão-torção (MGFT) (mostrados na Figura 2.5).

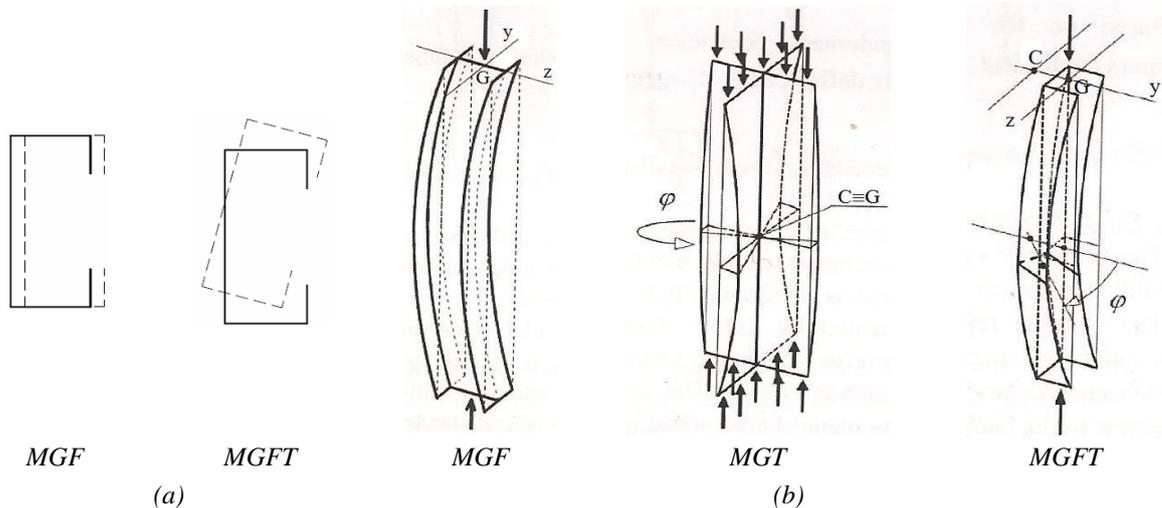


Figura 2.5 – Deformada da encurvadura global: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Dubina et al, 2012)

Os fenómenos de instabilidade local, por sua vez, são caracterizados pela deformação das paredes da secção transversal no seu plano e pela não deformação do eixo longitudinal do elemento. Alguns autores e particularmente o *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006), distinguem ainda entre os fenómenos de instabilidade local, a instabilidade associada a deslocamentos de flexão das paredes da secção transversal e a instabilidade associada a deslocamentos de translação e rotação simultânea dos bordos longitudinais das paredes da secção transversal, como modo local de placa ou encurvadura local (MLP) (apresentado na Figura 2.6) e modo distorcional (MD) (apresentado na Figura 2.7), respetivamente. O MLP, como apresentado na Figura 2.11, é caracterizado por uma deformada com um comprimento de onda reduzido, enquanto o comprimento de onda da deformada associada ao MD é intermédio entre o MLP e o MG.

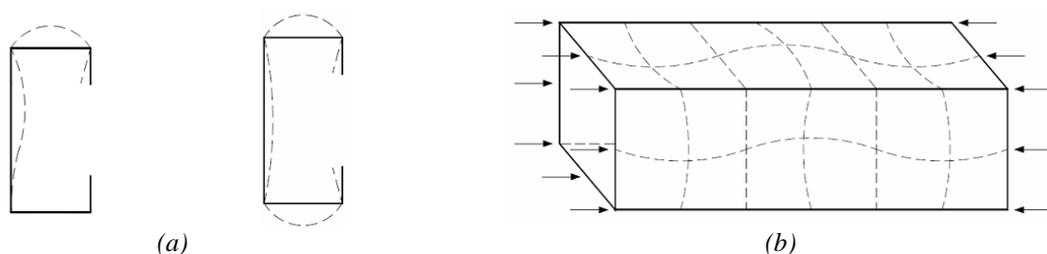


Figura 2.6 – Deformada do MLP: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Silvestre e Camotim, 2006)

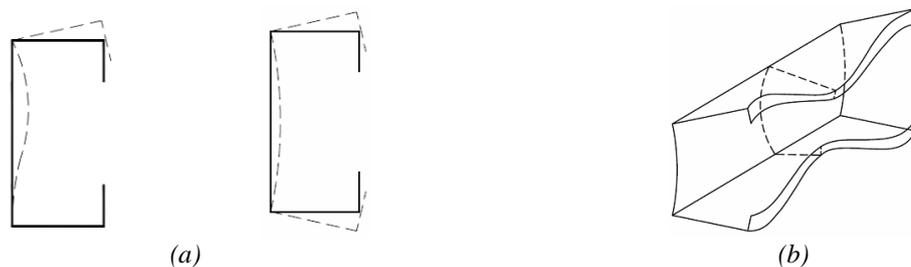


Figura 2.7 – Deformada do MD: (a) secção transversal comprimida; (b) coluna comprimida (adaptado de Silvestre e Camotim, 2006)

Os elementos de aço enformado a frio, como referido anteriormente, são resultado de uma dobragem de chapas de espessura muito reduzida, o que conduz a elementos particularmente suscetíveis à encurvadura local. O fenómeno da encurvadura local apenas foi investigado teoricamente em 1910, por Von Kármán, que deduziu as equações diferenciais que traduzem o equilíbrio pós-crítico de um elemento plano “ideal” comprimido, com base na teoria das grandes deformações (Yu e LaBoube, 2010). As equações diferenciais foram posteriormente corrigidas por Marguerre em 1936, por forma a considerar os efeitos das imperfeições geométricas, sendo o primeiro a produzir uma rigorosa análise elástica de componentes planos simplesmente apoiadas à compressão, relativamente ao seu comportamento de pós-encurvadura, dando um enorme contributo para a investigação teórica. Porém, somente em 1932, Von Kármán introduz o *conceito de largura efetiva*, posteriormente melhorado pelo trabalho de investigação desenvolvido por Winter, entre 1939 e 1944, para o AISI (American Iron and Steel Institute). Esta investigação desenvolvida por Winter na Universidade de Cornell, em 1946, resultou na publicação das primeiras disposições técnicas e regulamentares do AISI (American Iron and Steel Institute), relativas ao comportamento estrutural de elementos de aço enformado a frio (Veríssimo, 2008).

Atualmente, no cálculo das propriedades efetivas, o *EC3-1-3* ainda se baseia no *conceito de largura efetiva*, proposto por Von Kármán para calcular os efeitos da encurvadura local. O *conceito de largura efetiva*, como apresentado na Figura 2.8, pode ser explicado considerando a evolução da distribuição de tensões normais numa placa “ideal” sujeita a compressão uniaxial uniforme e com os bordos simplesmente apoiados e rígidos. Como apresentado na Figura 2.9, a evolução da distribuição de tensões normais instaladas nos bordos transversais assume um comportamento linear e uniforme até se atingir a tensão crítica de encurvadura, evoluindo para uma distribuição de tensões não linear na fase de pós-encurvadura, com uma configuração que é delimitada pelo valor mínimo na zona central da secção transversal e máximo junto aos bordos longitudinais da secção transversal.

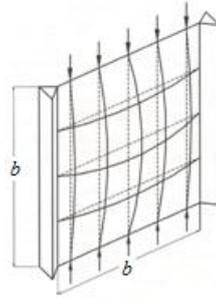


Figura 2.8 – Placa simplesmente apoiada e rígida (Dubina et al, 2012)

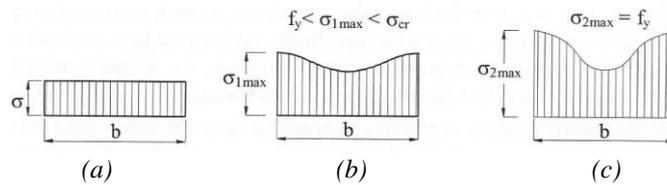


Figura 2.9 – Evolução da distribuição de tensões normais numa placa comprimida suscetível a encurvadura local: (a) Estado pré-crítico; (b) Estado pós-crítico, imediatamente após ser atingida a carga crítica; (c) Estado último pós-crítico (Dubina et al, 2012)

O conceito de largura efetiva, como mostrado na Figura 2.10, é uma aproximação que considera o facto do ponto de vista físico, a capacidade resistente da placa se concentrar em faixas adjacentes aos bordos com a largura calculada com base na seguinte expressão:

$$P = \sigma_{med} \cdot b \cdot t = \int_0^b \sigma_x(y) \cdot t \cdot dy = \sigma_{max} \cdot b_{eff} \cdot t \quad (2.1)$$

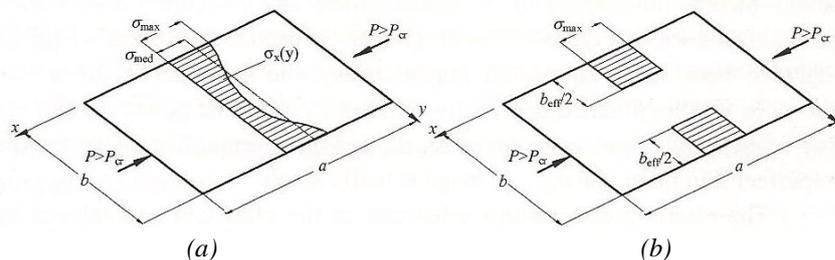


Figura 2.10 – Distribuição de tensões normais de uma placa comprimida: (a) Tensões reais; (b) Tensões equivalentes baseadas no conceito de largura efetiva (Dubina et al, 2012)

No entanto, a investigação relacionada com estas estruturas de aço enformado a frio tem procurado contrariar esta elevada suscetibilidade à encurvadura local, desenvolvendo novos

elementos estruturais mais eficientes com novas formas de secções transversais menos suscetíveis à encurvadura local, através da introdução de reforços intermédios ou de extremidade na composição das suas secções transversais. Os reforços são adotados para conferir uma maior rigidez às paredes da secção transversal, por forma a minimizar a sua deformabilidade e suscetibilidade aos efeitos da encurvadura local. A crescente utilização de aços de alta resistência em elementos de aço enformado a frio tem determinado a redução da espessura da chapa de aço, de forma a manter a mesma resistência. Esta redução da espessura da chapa de aço resulta num aumento da esbelteza e da deformabilidade das paredes da secção transversal, determinando a necessidade de recorrer a secções transversais mais complexas e com maior número de reforços na sua composição. Esta crescente presença de reforços nas secções transversais dos elementos de aço enformado a frio determinou um maior relevo ao MD no seu comportamento estrutural e potencia a ocorrência de interação entre modos de instabilidade e a encurvadura local. Assim, como apresentado na Figura 2.11 o comportamento não linear destes elementos estruturais é, agora, condicionado pela ocorrência simultânea ou quase simultânea de um ou mais modos de instabilidade.

A introdução de reforços na composição da secção transversal determinou, ainda, a introdução de um novo conceito no cálculo das propriedades efetivas, o *conceito de espessura reduzida*. O *conceito de espessura reduzida* pode ser explicado pelo facto da suscetibilidade do reforço ao MD condicionar o seu funcionamento e reduzir a sua capacidade de inibir a deformabilidade da parede da secção transversal. Este conceito é uma aproximação que considera o facto de os reforços serem peças curtas e do ponto de vista físico, a redução de capacidade ser praticamente homogénea ao longo de todo o reforço.

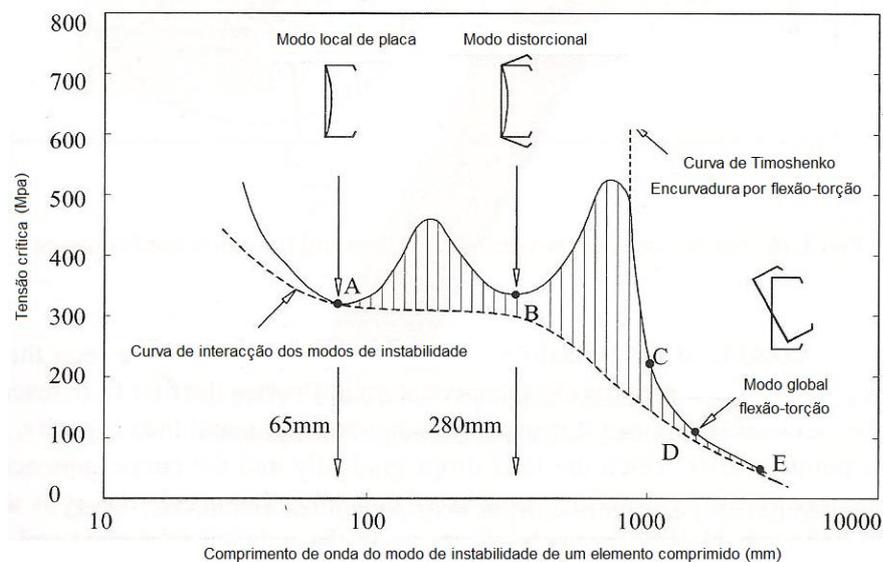


Figura 2.11 – Relação entre a tensão crítica e o comprimento de onda (Dubina et al, 2012)

2.5.2 Colapso da alma

Os elementos de aço enformado a frio são suscetíveis à ocorrência de colapso ou esmagamento da alma, devido à elevada esbelteza das paredes que constituem as almas das secções transversais onde são aplicadas forças concentradas ou nas zonas dos apoios. Por vezes, a configuração geométrica das almas é também condicionante, quando estas assumem uma configuração inclinada (não vertical) e/ou quando estas são compostas por paredes e reforços intermédios.

2.5.3 Rigidez de torção

Os elementos de aço enformado a frio têm uma elevada suscetibilidade aos efeitos da torção, determinada pelo facto destes elementos serem, geralmente, associados a secções transversais abertas de parede fina monossimétricas, possuindo uma reduzida rigidez de torção e o centro de corte não coincidente com o centro de gravidade (como apresentado na Figura 2.12). Estes elementos estruturais, vulgarmente são também suscetíveis à ocorrência de torção com empenamento, sendo a sua resistência a este tipo de fenómeno muito relacionada com as condições de fronteira do próprio elemento estrutural.

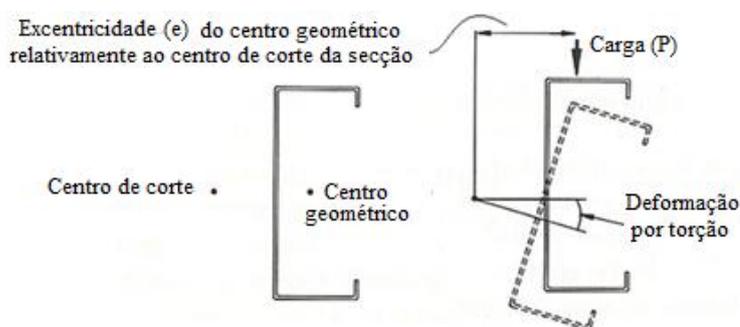


Figura 2.12 – Deformação por torção (adaptado de Dubina et al, 2012)

2.5.4 Ductilidade reduzida

O fabrico deste tipo de elementos determina o endurecimento do aço na zona da dobragem da chapa, aumentando o valor da tensão de cedência e diminuindo a ductilidade do aço nesses mesmos bordos, como mostrado na Figura 2.13. Adicionalmente, a elevada suscetibilidade deste tipo de elementos a fenómenos de instabilidade local e a conseqüente redução da sua rigidez conduz também a uma diminuição da sua ductilidade. É ainda de salientar que os elementos de aço enformado a frio podem ser usados em estruturas resistentes a sismos porque,

embora não possam dissipar a energia devido à sua reduzida ductilidade, o seu reduzido peso resulta em menores forças inerciais (forças horizontais devidas ao movimento da massa própria da estrutura), solicitando menos toda estrutura resistente.

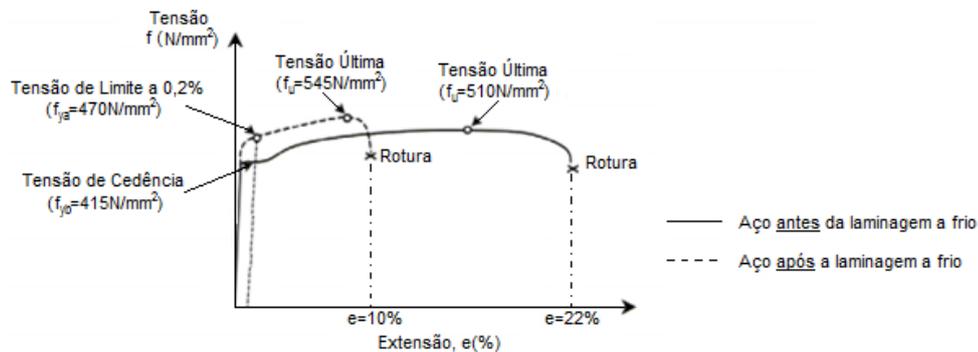


Figura 2.13 – Processo de endurecimento do aço (Veríssimo, 2008)

2.6 Vantagens/desvantagens da utilização de elementos de aço enformado a frio

As principais vantagens resultantes da utilização de elementos de aço enformado a frio na construção são de seguida inumeradas:

- Elevada eficiência estrutural, apresentando uma elevada resistência comparativamente com o seu reduzido peso;
- São versáteis, no que ao seu fabrico diz respeito, sendo possível obter variados tipos e geometrias para a sua secção transversal;
- São facilmente transportados e armazenados devido ao facto de as secções transversais poderem, normalmente, ser encaixadas sucessivamente, umas nas outras;
- A sua pré-fabricação pode ser em grande escala;
- Não é um material combustível;
- Rápida montagem;
- Elevada facilidade na sua manutenção;
- Não existe qualquer retração e/ou fluência quando expostas à temperatura ambiente;
- São imunes a ataques de fungos, xilófagos e térmitas;
- Apresentam uma qualidade uniforme;
- Elevada sustentabilidade, devido ao facto de o aço ser totalmente reciclável;
- O facto destes elementos estruturais poderem ser fabricados para suportarem cargas reduzidas, permitem uma adequada otimização do material empregue.

A combinação das vantagens acima mencionadas resulta numa construção mais industrializada e mais rigorosa, permitindo diminuir, substancialmente, o tempo de obra e eliminando erros subjacentes aos métodos tradicionais de construção, conferindo assim uma construção mais eficiente e segura.

As principais desvantagens da sua utilização na construção residem no facto de este tipo de material possuir um comportamento estrutural complexo que envolve diversos fenómenos de instabilidade, resultando num dimensionamento dos elementos estruturais mais complexo e moroso. Associado a este facto surge a forma como as normas europeias, nomeadamente a *EC3-1-3* apresentam as suas disposições regulamentares, nem sempre a mais evidente e direta e, ainda, a limitada cobertura de ensaios experimentais às vastas geometrias e formas de secções transversais disponíveis para os elementos de aço enformado a frio.

3 CONCEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO “COLD-FORMED DESIGN”

3.1 Considerações gerais

Em estruturas metálicas de aço enformado a frio, como os elementos de aço enformado a frio são suscetíveis a inúmeros fenómenos de natureza não linear, o cálculo da sua capacidade resistente é bastante complexo e moroso.

Em termos regulamentares, a elevada complexidade associada ao dimensionamento de elementos de aço enformado a frio levou à elaboração de um documento suplementar o *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006). Porém, a forma como os regulamentos europeus apresentam as disposições regulamentares nem sempre é a mais evidente e direta, conciliando as disposições regulamentares do documento base de estruturas metálicas, o *EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010), com o documento suplementar relativo a elementos de aço enformado a frio, o *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006), que, por sua vez, remete ainda para outro documento suplementar relativo a elementos placa, o *EC3-1-5* (EN1993-1-5, 2006).

Como tal, foi desenvolvida a ferramenta de cálculo computacional *Cold-Formed Design*, com base nas normas acima referidas, com objetivo de disponibilizar um *software* de cálculo que permita facilitar e simplificar o dimensionamento e otimização estrutural de elementos de aço enformado a frio.

Na conceção de um qualquer *software* de cálculo cujo objetivo é partilhar o mesmo com outros utilizadores, é fundamental a definição do processo de cálculo e de uma interface que permita a um qualquer utilizador manusear facilmente a ferramenta de cálculo. A conceção do *Cold-Formed Design* determinou, ainda, a definição de uma base de dados por forma a facilitar a caracterização de algumas propriedades dos elementos estruturais.

Finalizada a conceção do *Cold-Formed Design*, por forma a garantir um correto dimensionamento e otimização estrutural dos elementos de aço enformado a frio, esta foi submetida a um processo de validação apresentado no anexo B.

3.2 Processo de cálculo

3.2.1 Domínio de validade

Uma questão relevante do processo de cálculo é o seu domínio de validade, relacionado com as características geométricas dos elementos estruturais, com as condições de carga e de apoio e com as limitações do *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006).

Como o processo de cálculo é especificamente direcionado para os elementos de aço enformado a frio estudados, apenas é válido para elementos lineares isolados de secção transversal “C” (apresentada na Figura 3.1), com condições de fronteiras específicas e sujeitos à aplicação de cargas pontuais, aplicadas nos nós de extremidade, assumindo os diagramas de esforços uma variação linear ao longo do elemento estrutural. Estes elementos estruturais devem ainda satisfazer as limitações do *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006). O processo de otimização e o processo de cálculo relativo à encurvadura global é, ainda, somente aplicável a elementos estruturais com geometria monossimétrica, com eixo de simetria coincidente com o eixo $y - y$.

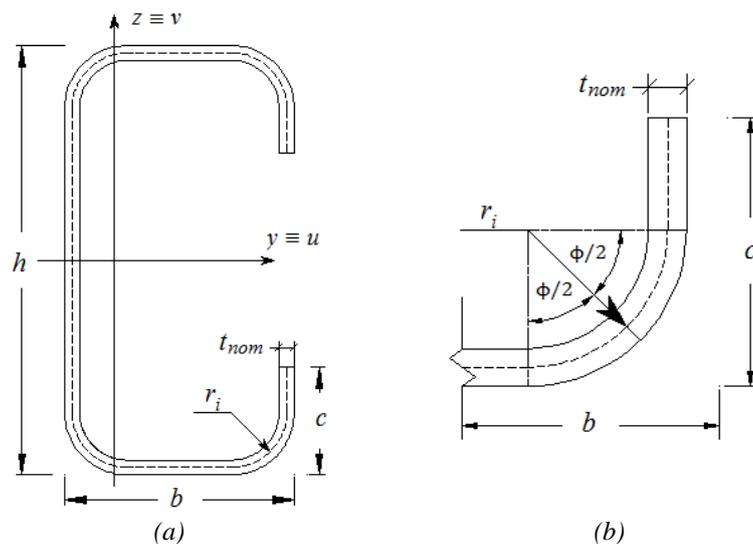


Figura 3.1 –(a) Secção transversal e convenção dos eixos de referência; (b) Detalhe dos cantos arredondados.

No processo de cálculo, por forma a garantir o domínio de validade foram definidas algumas características bases das secções transversais dos elementos estruturais, nomeadamente o ângulo reto formado pelas paredes da secção transversal ϕ (com $\phi/2 = 45^\circ$) e o número de cantos arredondados n , como 4 ou 2, respetivamente para secções transversais com reforços de extremidade simples e secções transversais sem reforços de extremidade. Foram, ainda,

definidas as condições de apoio como: rotulada-rotulada; rotulada-encastada; e encastada-encastada para o MGF e, ainda, restrição parcial à rotação por torção/empenamento; e restrição significativa à rotação por torção/empenamento para o MGT com empenamento.

3.2.2 Propriedades materiais

As propriedades do material são fundamentais na definição do comportamento dos elementos estruturais. As propriedades materiais mais importantes do ponto de vista estrutural são: a tensão de cedência f_{yb} ; a tensão última f_u ; o módulo de elasticidade E ; o módulo distorcional G ; a tenacidade; a resistência à fadiga; a soldabilidade; a ductilidade; a durabilidade; e a formabilidade. A *cláusula 3.2.6(1) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) define os valores das seguintes propriedades:

- Módulo de elasticidade $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$;
- Módulo distorcional $G \approx 81\,000\text{ N/mm}^2$;
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

Outras das propriedades materiais estão relacionadas com o tipo de aço estrutural e o processo de fabrico, nomeadamente as seguidamente apresentadas:

- Tensão de cedência base f_{yb} e média f_{ya} do aço;
- Tensão última f_u do aço;

Estas propriedades materiais são definidas com base nas características específicas dos aços *standards* estabelecidas na *tabela 3.1b da cláusula 3 do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006). Contudo, como o processo de fabrico dos elementos de aço enformado a frio conduz a um endurecimento do aço nas zonas de dobragem da chapa, resultando num aumento da tensão média da secção transversal, a *cláusula 3.3.2 do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) estabelece, ainda, que em elementos onde não ocorram fenómenos de instabilidade local possa ser aproveitado o incremento de rigidez no aço, utilizando uma tensão de cedência média f_{ya} dada em função do tipo de aço e do processo de fabrico pela seguinte expressão:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (3.1)$$

Em que, k é um fator que depende do tipo do processo de fabrico: $k = 7$ para a laminagem a frio (“Roll forming”); $k = 5$ para os restantes processos de fabrico.

3.2.2.1 Limitações

As características específicas dos aços *standards*, conforme o referido na *cláusula 3.2.4 do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) apenas podem ser consideradas em elementos com chapa de espessura base t_{cor} que satisfaça a seguinte condição:

$$0,45 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Onde, a espessura base da chapa t_{cor} é dada pela seguinte expressão:

$$t_{cor} = \begin{cases} (t_{nom} - t_{metallic \ coatings}) & \text{se } tol \leq 5 \% \\ (t_{nom} - t_{metallic \ coatings}) \frac{100 - tol}{95} & \text{se } tol > 5 \% \end{cases} \quad (3.3)$$

Resta referir que as propriedades dos aços estruturais não abrangidos pela *EC3-1-3* devem ser determinadas com base em resultados experimentais.

3.2.2.2 Algoritmo de cálculo das propriedades materiais

Em seguida na Figura 3.2 é apresentado o algoritmo de cálculo das propriedades materiais.

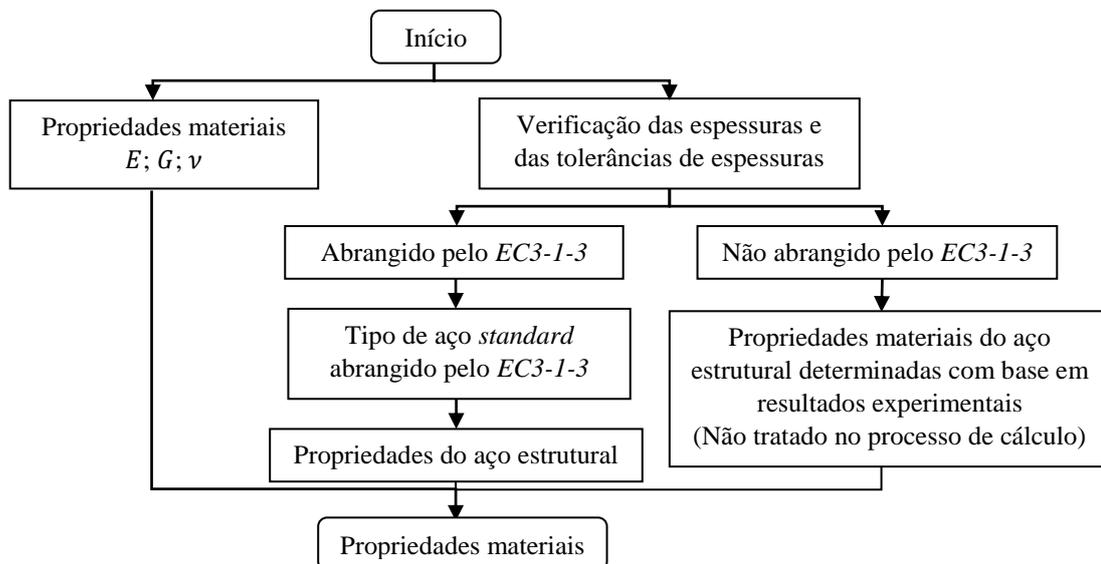


Figura 3.2 – Algoritmo de cálculo das propriedades materiais

3.2.3 Propriedades das secções transversais

O processo de fabrico de elementos de aço enformado a frio permite a conceção de secções transversais com as mais variadas geometrias, permitindo adequar a sua configuração geométrica aos esforços atuantes dos elementos estruturais. Porém a complexidade da geometria destas secções transversais, formadas simultaneamente por um conjunto de paredes e de cantos arredondados, correspondentes às zonas de dobragem das chapas, conferem também uma elevada complexidade ao cálculo exato das suas propriedades geométricas.

A *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) propõe um método de cálculo aproximado baseado no cálculo das propriedades de uma secção aproximada, formada exclusivamente por paredes planas, resultado da linearização por troços retos da linha média da secção “real”. Este método pode ser baseado numa secção aproximada calculada consoante as duas formas seguintes apresentadas na Figura 3.3:

- A secção nominal é composta por paredes planas, de largura (largura nominal) dada pela distância entre os pontos médios dos cantos “arredondados” adjacentes às paredes da secção transversal;
- A secção idealizada é igualmente formada por paredes planas, de largura (largura idealizada) dada pela distância entre os pontos de intersecção transversal das linhas médias das paredes da secção transversal.

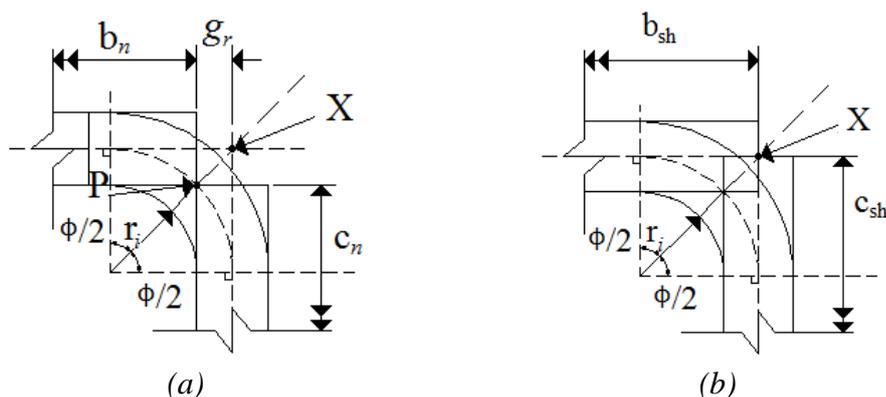


Figura 3.3 – Definição das larguras: (a) nominais; (b) idealizadas.

Contrariamente às larguras nominais, as larguras idealizadas não consideram a influência dos cantos arredondados no cálculo das propriedades da secção transversal. No entanto, em alguns casos é necessário proceder a uma redução posterior de algumas das propriedades da secção idealizada. De acordo com estabelecido na *cláusula 5.1(3) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) a

influência dos cantos arredondados pode ser desprezada, desde que sejam satisfeitas as seguintes condições:

$$r_i \leq 5t \quad (3.4a)$$

$$r_i \leq 0,10b_{p.i} \quad (3.4b)$$

Caso contrário, a influência dos cantos arredondados não pode ser desprezada, devendo proceder-se a uma redução de algumas das propriedades geométricas da secção idealizada, usando o fator de redução δ , consoante apresentado nas seguintes expressões:

$$A = A_{sh}(1 - \delta) \quad (3.5a)$$

$$I = I_{sh}(1 - 2\delta) \quad (3.5b)$$

$$I_W = I_{W.sh}(1 - 4\delta) \quad (3.5c)$$

Em que o fator de redução δ é dado pela seguinte expressão:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{i=1}^n r_i \frac{\phi_i}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p.i}} \quad (3.6)$$

No presente trabalho, o método aproximado é fundamentado no cálculo das propriedades de uma secção idealizada. A discretização da secção idealizada, bem como as expressões de cálculo das suas propriedades são pormenorizadamente apresentadas no anexo A.

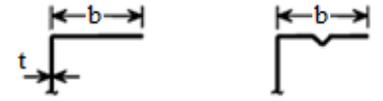
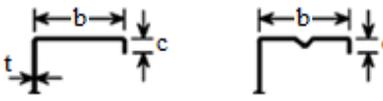
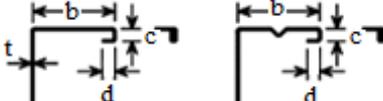
3.2.3.1 Limitações

Contudo, o método de cálculo aproximado apenas é suscetível a ser aplicado em elementos estruturais cujas dimensões das suas secções transversais sejam abrangidas pela *EC3-1-3*.

De acordo com a *cláusula 5.1(6) e a tabela 5.1 do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) apenas são abrangidas secções transversais compostas por cantos arredondados com raios de curvatura r_i em que se verifique a seguinte condição (3.7) e, por paredes cujos rácios largura-espessura sejam inferiores aos limites apresentados no Quadro 3.1.

$$r_i > 0,04t \frac{E}{f_{yb}} \quad (3.7)$$

Quadro 3.1 – Rácios largura-espessura abrangidos no *EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006)

Componentes da secção transversal	Valor máximo
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 50$ $c/t \leq 60$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $b/t \leq 500 \sin \phi$

3.2.3.2 Pré-dimensionamento e modelação dos reforços de extremidade

Os reforços de extremidade são componentes externos com características bastante particulares, com uma largura bastante menor que as restantes paredes da secção transversal e cuja função principal é acrescentar capacidade resistente à encurvadura local.

De acordo com a *cláusula 5.2(2) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) na modelação dos reforços e no cálculo da secção efetiva, os reforços e as suas rigidezes devem ser consideradas consoante o seu pré-dimensionamento. Assim, deve ser considerada a rigidez do reforço no cálculo da secção efetiva desde que os valores da relação largura do banzo-largura do reforço c/b pertença ao intervalo balizado pelos limites extremos dos rácios $0,2 \leq c/b \leq 0,6$.

No caso de $c/b \leq 0,2$ a presença do reforço e a sua rigidez devem ser ignoradas (assumindo-se $c = 0$) no cálculo da secção efetiva, pois o reforço não é eficaz na prevenção da encurvadura local do banzo. Contrariamente, caso $c/b \geq 0,6$ o reforço é demasiado largo, sendo ele próprio suscetível à ocorrência de encurvadura local, devendo o reforço ser analisado como um componente externo e não como um reforço de extremidade.

3.2.3.3 Algoritmo de cálculo das propriedades das secções transversais

Em seguida na Figura 3.4 é exibido o algoritmo de cálculo das propriedades geométricas da secção transversal.

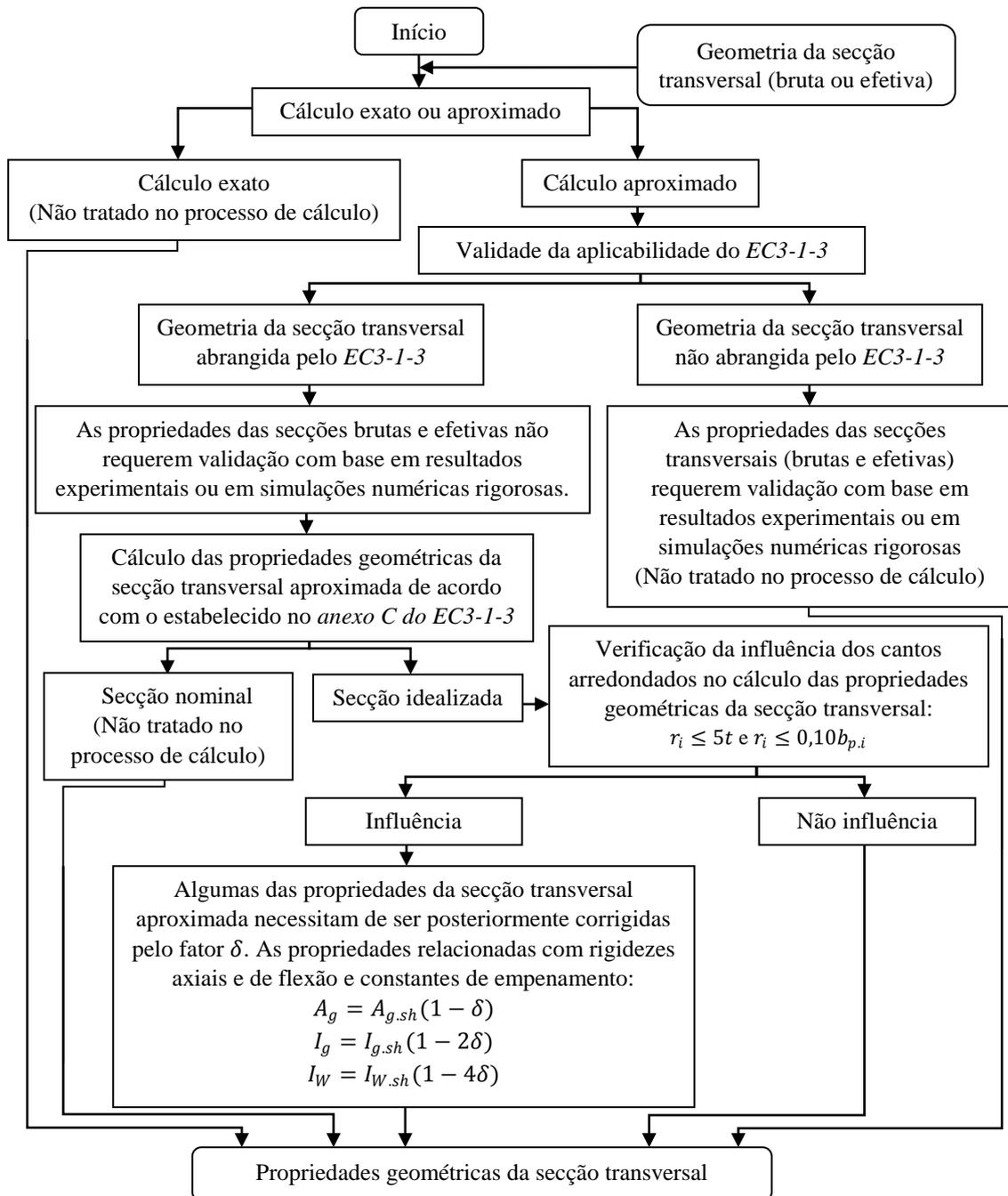


Figura 3.4 – Algoritmo de cálculo das propriedades geométricas da secção transversal

3.2.4 Capacidade resistente dos elementos estruturais

Em elementos estruturais não sujeitos à ocorrência de fenómenos de instabilidade local e global a capacidade resistente máxima seja definida pela resistência plástica da secção transversal mais condicionante. Porém, como os elementos de aço enformado a frio são, geralmente, suscetíveis à ocorrência de inúmeros fenómenos de instabilidade, é necessário proceder à redução da sua capacidade resistente, vulgarmente, efetuada ao nível do elemento e das suas secções transversais, devido aos efeitos dos fenómenos de instabilidade global e local, respetivamente.

Como os elementos estruturais correntemente utilizados na construção metálica suscetíveis a fenómenos de instabilidade local apenas são suscetíveis à encurvadura local, o documento base de dimensionamento de estruturas metálicas (*EC3-1-1*) classifica as secções transversais apenas com o objetivo de identificar a forma como a resistência e a capacidade de rotação é limitada pela ocorrência de encurvadura local. No que se refere à redução da capacidade resistente (*i*) ao nível das secções transversais é calculada a capacidade resistente reduzida com base no cálculo das propriedades efetivas e (*ii*) ao nível dos elementos estruturais a redução da capacidade resistente é calculada com base nos valores da carga crítica N_{cr} e do momento crítico de encurvadura M_{cr} , de acordo com a verificação à encurvadura global estabelecida no o documento base (*EC3-1-1*).

3.2.4.1 Classificação de secções transversais

A classificação das secções transversais dos elementos estruturais traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciadas por fenómenos de encurvadura local (Simões, 2007), consoante a *cláusula 5.5.2(1) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) as secções transversais podem ser classificadas segundo quatro classes (ver Figura 3.5):

- Classe 1: secção transversal na qual se pode formar rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- Classe 2: secção transversal na qual se pode atingir momento resistente plástico, com a capacidade de rotação limitada;
- Classe 3: secção transversal na qual a tensão na fibra extrema comprimida, determinada com base numa distribuição elástica de tensões pode atingir a tensão de cedência, sendo que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja alcançado;
- Classe 4: secção transversal na qual se regista a ocorrência de encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência na fibra comprimida mais solicitada;

externo) que não satisfaça os limites máximos da relação largura-espessura associados a uma determinada classe deve de imediato ser sujeito à verificação dos limites referentes à classe imediatamente a seguir. Caso não sejam satisfeitos os limites máximos da relação largura-espessura associados à classe 3, conclui-se de imediato que o componente pertence à classe 4.

Embora a cada uma das paredes esteja associada uma classificação, a secção transversal é classificada consoante a classe mais elevada associada às suas paredes comprimidas. Contudo, como os elementos de aço enformado a frio são, geralmente, suscetíveis à encurvadura local, no processo de cálculo apenas é realizada uma análise elástica, sendo a classificação dos componentes da secção transversal iniciada no patamar referente à classe 3, considerando todos os componentes com classe igual ou inferior a 3 (e.g. classe 1,2 ou 3) como de classe 3.

Quadro 3.2 – Componentes comprimidos internos (EN1993-1-1, 2010)

Componentes internos comprimidos						
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
Classe	Componente solicitada à flexão	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha-1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha-1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	quando $\Psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\Psi}$ quando $\Psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\varepsilon(1-\Psi)\sqrt{-\Psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\Psi \leq -1$ aplica-se tanto a tensões de compressão $\sigma < f_y$ como extensões $\varepsilon_y > f_y/E$

Quadro 3.3 – Componentes comprimidos externos (EN1993-1-1, 2010)

Componentes externos comprimidos						
Secções laminadas			Secções soldadas			
Classe	Componente solicitada à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$, para k_σ ver a EN1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

3.2.4.1.1 Algoritmo da classificação das secções transversais

Em seguida na Figura 3.6 é apresentado o algoritmo relativo à classificação das secções transversais.

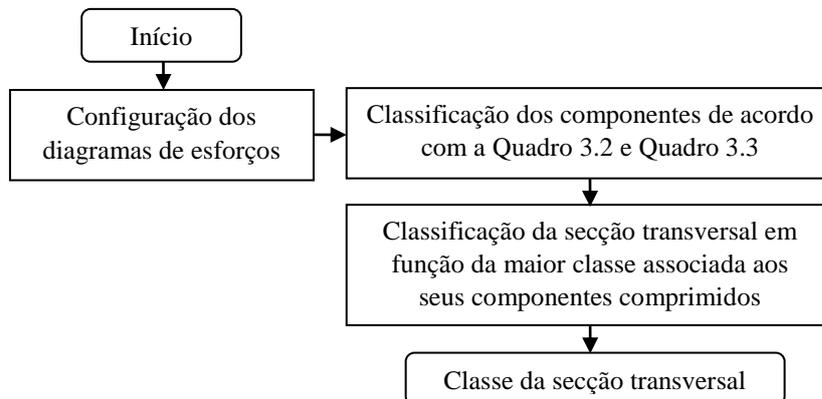


Figura 3.6 – Algoritmo da classificação das secções transversais

3.2.4.2 Propriedades efetivas

Os elementos de aço enformado a frio (elementos de classe 4) são, particularmente, suscetíveis à encurvadura local, que impede que seja atingida a tensão de cedência na fibra mais solicitada nas suas secções transversais mais condicionante ($\sigma_{m\acute{a}x} < f_y$). Porém, como a encurvadura local é caracterizada por um comportamento pós-encurvadura estável com uma elevada reserva de resistência pós-encurvadura, estes elementos estruturais suportam acréscimos de carga, mesmo após ocorrer encurvadura local. No entanto, apesar da encurvadura local não provocar a rotura dos elementos estruturais, reduz significativamente a sua rigidez.

Embora a generalidade dos elementos estruturais metálicos correntemente utilizados na construção suscetíveis a fenómenos de instabilidade local, apenas são suscetíveis a encurvadura local, os elementos de aço enformado a frio, com a introdução de “reforços” na composição das suas secções transversais são também suscetíveis a instabilidade distorcional. A encurvadura local e a instabilidade distorcional podem ainda interagir entre si e ocorrer em simultâneo. Porém como estes fenómenos de instabilidade são caracterizados por um comportamento pós-encurvadura estável, a redução da capacidade resistente e da rigidez dos elementos estruturais pode ser calculada individualmente para a encurvadura local e para a instabilidade distorcional.

Em termos regulamentares o cálculo da secção efetiva difere para a encurvadura local e para a instabilidade distorcional. Enquanto para a encurvadura local a secção efetiva é calculada de acordo com o *conceito de largura efetiva*, consoante o procedimento estabelecido no *EC3-1-5*, para instabilidade distorcional a secção efetiva é calculada de acordo com o *EC3-1-3*, com base na *redução da espessura do “reforço”*.

Relativamente ao cálculo da secção efetiva, conforme apresentado na *cláusula 5.3 do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) este pode ser baseado no cálculo individual da secção efetiva de cada uma das paredes da secção transversal, considerando a interação entre as paredes através da modelação das condições de apoio das paredes na secção transversal.

A modelação das paredes e das suas condições de apoio na secção transversal, como apresentado na Figura 3.7, está intrinsecamente relacionada com o pré-dimensionamento dos reforços de extremidade apresentado no ponto 3.2.3.2. A rigidez rotacional e translacional dos apoios nas extremidades de cada parede da secção transversal simula o acréscimo de rigidez conferida pelas paredes adjacentes e/ou pelos reforços de extremidade. É ainda de salientar que no caso particular dos reforços de extremidade, estes são considerados como parte integrante dos componentes adjacentes.

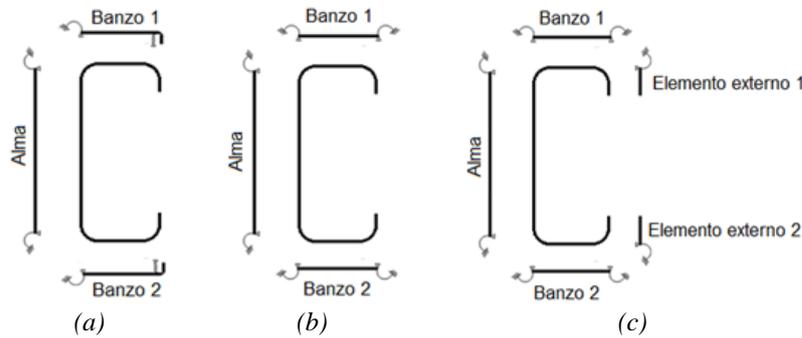


Figura 3.7 – Modelação da secção transversal: (a) considerando o reforço e sua rigidez; (b) desprezando o reforço e sua rigidez; (c) considerando o reforço como um elemento externo;

Embora o cálculo da secção efetiva possa ser baseado num processo iterativo ou num processo simples (não iterativo), as secções efetivas foram calculadas com base num processo simples (não iterativo). O processo simples envolve o cálculo das secções efetivas iniciais com base numa distribuição de tensões primárias das paredes, permitindo calcular as propriedades efetivas finais. No entanto, em alguns casos, a secção efetiva gera uma distribuição de tensões secundárias, a partir das quais se calcula uma nova secção efetiva e as propriedades efetivas finais. Este processo de cálculo requer, ainda, que as secções efetivas sejam calculadas com base nos diagramas de tensões individuais de compressão axial N_{Ed} e flexão M_{Ed} . Relativamente ao cálculo das secções efetivas para a compressão axial N_{Ed} , a secção efetiva da alma (Banzo*) e dos conjuntos bantos mais reforços (Banzos*) são calculadas com base numa distribuição de tensões primárias, permitindo calcular as propriedades efetivas finais. Contrariamente, no cálculo das secções efetivas para a flexão M_{Ed} , as secções efetivas das paredes da secção transversal paralelas ao eixo de flexão (Banzos*) são calculadas com base numa distribuição de tensões primárias sendo, posteriormente, gerada uma distribuição de tensões secundárias para uma secção composta pelas paredes efetivas paralelas ao eixo de flexão (Banzos*) e pelas paredes brutas perpendiculares ao eixo de flexão (Almas*), a partir da qual são calculadas as secções efetivas das paredes perpendiculares ao eixo de flexão (Almas*), permitindo calcular as propriedades efetivas finais (ver Figura 3.8).

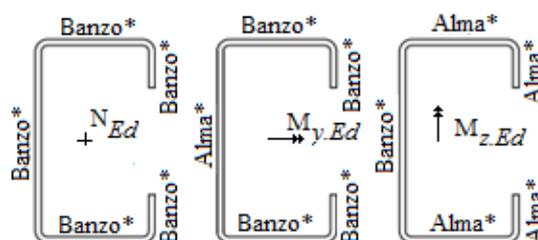


Figura 3.8 – Definição da forma de cálculo das propriedades efetivas

A verificação da segurança de elementos estruturais em que é necessário proceder à redução da capacidade resistente ao nível das secções transversais requer o cálculo de algumas propriedades efetivas, nomeadamente: a área efetiva A_{eff} ; a excentricidade e_N ; e o módulo de flexão efetivo W_{eff} . Os valores da área efetiva A_{eff} e das excentricidades e_N são calculadas com base numa secção efetiva exclusivamente resultante da compressão axial N_{Ed} e, os valores do módulo de flexão efetivo $W_{eff,y}$ e $W_{eff,z}$ são calculados com base numa secção efetiva exclusivamente resultante da flexão M_{Ed} em torno do respetivo eixo $y - y$ ou $z - z$.

3.2.4.2.1 Secção efetiva para a encurvadura local – Larguras efetivas

Em componentes comprimidos de classe 4, conforme apresentado na *cláusula 5.5.1(2) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) a secção efetiva é calculada de acordo com o *conceito de largura efetiva*, consoante o procedimento estabelecido no *EC3-1-5*. O procedimento de cálculo da largura efetiva b_{eff} estabelece que sejam cumpridas as seguintes etapas:

- i. Para determinar a largura efetiva é necessário calcular o fator de encurvadura local k_σ , determinado de acordo com a relação de tensões atuantes nas fibras extremas do componente Ψ e com base nas expressões do Quadro 3.4 e do Quadro 3.5, para componentes comprimidos internos e externos, respetivamente.
- ii. Após conhecido o fator de encurvadura local k_σ procede-se ao cálculo da esbelteza normalizada local do componente $\bar{\lambda}_p$ dada pela seguinte expressão:

$$\bar{\lambda}_{p,i} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,i}}} = \frac{b_{p,i}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (3.8a)$$

- iii. O fator de redução ρ , conforme referido na *cláusula 4.4 do EC3-1-5* (EN1993-1-5, 2006) pode ser calculado de duas formas distintas, em função do valor da tensão máxima na secção transversal $\sigma_{com.Ed}$:

- Caso $\sigma_{com.Ed,i} = f_{yb}/\gamma_{M0}$, o fator de redução ρ é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_i = 1 & \text{se } \bar{\lambda}_{p,i} \leq \bar{\lambda}_{lim} \\ \rho_i = \frac{\bar{\lambda}_{p,i} - k_p}{\bar{\lambda}_{p,i}^2} \leq 1 & \text{se } \bar{\lambda}_{p,i} > \bar{\lambda}_{lim} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

- Caso $\sigma_{com.Ed.i} < f_{yb}/\gamma_{M0}$, de acordo com *anexo E do EC3-1-5* (EN1993-1-5, 2006), o fator de redução ρ é dado por:

$$\rho_i = \frac{1 - k_p/\bar{\lambda}_{p.red.i}}{\bar{\lambda}_{p.red.i}} + 0,18 \frac{(\bar{\lambda}_{p.i} - \bar{\lambda}_{p.red.i})}{(\bar{\lambda}_{p.i} - 0,6)} \leq 1 \quad (3.10a)$$

Em que, $\bar{\lambda}_{lim} = 0,673$ e $k_p = 0,55 \cdot (3 + \Psi)$ para componentes internos comprimidos; $\bar{\lambda}_{lim} = 0,748$ e $k_p = 0,188$ para componentes externos comprimidos. E a esbelteza normalizada local reduzida $\bar{\lambda}_{p.red}$ dada pela expressão:

$$\bar{\lambda}_{p.red.i} = \bar{\lambda}_{p.i} \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed.i}}{f_{yb}/\gamma_{M0}}} \quad (3.10b)$$

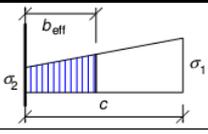
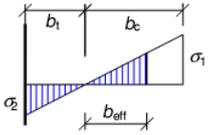
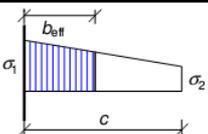
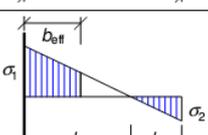
No entanto, este segundo caso em que $\sigma_{com.Ed.i} < f_{yb}/\gamma_{M0}$ remete para um processo iterativo de cálculo, que pressupõe o cálculo dos esforços internos de segunda ordem da secção efetiva relativa às iterações anteriores.

- iv. Posteriormente ao cálculo do fator de redução ρ , é calculada a largura efetiva b_{eff} dada em função do produto do fator de redução ρ e da largura comprimida b_c , de acordo com o Quadro 3.4 e o Quadro 3.5, respetivamente para componentes comprimidos internos e externos.

Quadro 3.4 – Componentes internos comprimidos (EN1993-1-5, 2006)

Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efetiva b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Quadro 3.5 – Componentes externos comprimidos (EN1993-1-5, 2006)

Distribuição de tensões (compressão positiva)		Largura efetiva b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

3.2.4.2.2 Secção efetiva para a instabilidade distorcional – Espessuras reduzidas

A cláusula 5.5.1(6) e (7) do EC3-1-3 (EN1993-1-3, 2006) estabelece que os efeitos da instabilidade distorcional podem ser calculados com base numa análise linear ou não-linear, usando um método numérico (método exato) ou um método aproximado, assumindo a tensão crítica distorcional $\sigma_{cr,d}$ igual à tensão crítica global do banzo $\sigma_{cr,s}$, modelado como uma coluna elasticamente restringida por uma mola de rigidez equivalente K_{δ} à alma e ao “reforço” (composto pela parte efetiva do reforço de extremidade e pela parte efetiva do banzo adjacente ao reforço de extremidade simples), como apresentado na Figura 3.9.

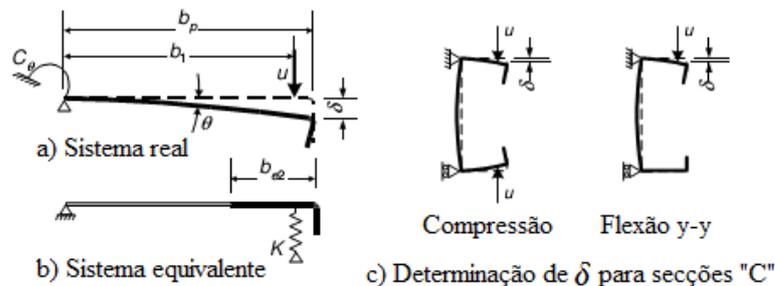


Figura 3.9 – Cálculo da rigidez equivalente do reforço (adaptado de CEN, 2006a)

No cálculo da secção efetiva dos banzos comprimidos com reforços de extremidade simples foi adotado o método de cálculo aproximado, de acordo com a *cláusula 5.5.3.2(1) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006). O método de cálculo aproximado apenas abrange situações em que o ângulo formado pela linha média do banzo e pela linha média do reforço de extremidade, esteja dentro do intervalo delimitado pelos 45° e 135° e, que satisfaça a seguinte condição dada pelo rácio largura- espessura do banzo:

$$b_p/t \leq 60 \quad (3.11)$$

Embora a secção efetiva para o MD possa ser calculada com base num processo iterativo ou num processo simples (não iterativo), foi adotado o processo de cálculo iterativo, que apesar de ser mais complexo é, também, menos conservador do que o processo simples.

O cálculo da secção efetiva para o MD tem algumas etapas em que o processo é análogo ao estabelecido para o cálculo da secção efetiva para encurvadura local. A principal diferença reside na forma como são analisados os reforços de extremidade simples. Em seguida é apresentado o procedimento de cálculo da secção efetiva dos banzos com reforços de extremidade simples:

- i. Numa primeira fase do cálculo das secções efetivas considera-se que o reforço de extremidade confere uma rigidez que impossibilita a ocorrência de instabilidade distorcional ($K_s = \infty$). Assim, procede-se ao cálculo das larguras efetivas do banzo e do reforço de extremidade com base num procedimento análogo ao estabelecido no cálculo da secção efetiva para a encurvadura local (ver ponto 4.2.4.2.1) e considerando uma distribuição de tensões primárias com $\sigma_{com.Ed.i} = f_{yb}/\gamma_{M0}$. Porém, no caso dos reforços de extremidade o fator de encurvadura local k_σ é calculado com base na relação largura do reforço de extremidade-largura do banzo ($c_{p.i}/b_{p.i}$) e na expressão (3.12). A largura efetiva do reforço de extremidade c_{eff} é dada pela expressão (3.13).

$$k_{\sigma.i} = \begin{cases} 0,5 & \text{se } c_{p.i}/b_{p.i} \leq 0,35 \\ 0,5 + 0,83 \sqrt[3]{\left(c_{p.i}/b_{p.i} - 0,35\right)^2} & \text{se } 0,35 < c_{p.i}/b_{p.i} \leq 0,6 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$c_{eff.i} = \rho_i \cdot b_{p.c.i} \quad (3.13)$$

- ii. Numa segunda fase procede-se ao cálculo da secção efetiva do “reforço”. O “reforço” é o conjunto composto pela largura efetiva do reforço de extremidade e pela parte efetiva

do banzo adjacente ao reforço de extremidade, com uma área $A_{s,i}$ dada pela seguinte expressão:

$$A_{s,i} = t \cdot (b_{e,2,i} + c_{eff,i}) \quad (3.14)$$

O banzo deve ser modelado como uma coluna elasticamente restringida por uma mola de rigidez equivalente K_s ao “reforço” e à alma. A *cláusula 5.5.3.1(5) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) estabelece que a rigidez da mola equivalente do “reforço” i $K_{s,i}$ pode ser calculada com base na seguinte expressão:

$$K_{s,i} = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^3)} \cdot \frac{1}{b_i^2 \cdot h_w + b_i^3 + 0,5 \cdot b_i \cdot b_{i+1} \cdot h_w \cdot k_{f,i}} \quad (3.15)$$

Em que $k_{f,i}$ é a relação dada pela área do “reforço” $i + 1$ -área do “reforço” i e de acordo com expressão (3.16), podendo assumir diferentes valores consoante os esforços atuantes da secção transversal.

$$k_{f,i} = \begin{cases} \text{flexão em torno de } y - y & 0 \\ \text{compressão axial/flexão em torno de } z - z & A_{s,i+1}/A_{s,i} \end{cases} \quad (3.16)$$

E o valor da tensão crítica do “reforço” i $\sigma_{cr,s,i}$ é dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{cr,s,i} = \frac{2 \cdot \sqrt{K_{s,i} \cdot E \cdot I_{s,i}}}{A_{s,i}} \quad (3.17)$$

- iii. Em seguida é determinado o valor da esbelteza normalizada distorcional do “reforço” i $\bar{\lambda}_{d,i}$, dado pela seguinte expressão:

$$\bar{\lambda}_{d,i} = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s,i}} \quad (3.18)$$

Posteriormente, procede-se ao cálculo do valor do fator de redução para a instabilidade distorcional “reforço” i $\chi_{d,i}$, baseado no valor da esbelteza normalizada distorcional $\bar{\lambda}_{d,i}$ de acordo com a seguinte expressão (3.19):

$$\chi_{d,i} = \begin{cases} 1 & \text{se } 0,65 \leq \bar{\lambda}_{d,i} \\ 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_{d,i} & \text{se } 0,65 < \bar{\lambda}_{d,i} \leq 1,38 \\ 0,66/\bar{\lambda}_{d,i} & \text{se } \bar{\lambda}_{d,i} \geq 1,38 \end{cases} \quad (3.19)$$

- iv. A cláusula 5.5.3.2(10) do EC3-1-3 (EN1993-1-3, 2006) define que o processo de cálculo iterativo da secção efetiva pode ser adotado sempre que o fator de redução para o MD do “reforço” i $\chi_{d,i} < 1$.

No processo iterativo as fases anteriormente descritas são repetidas iterativamente até serem atingidos os limites de convergência. No entanto, embora na iteração inicial a secção efetiva seja calculada com base numa distribuição de tensões primária com $\sigma_{com.Ed,i} = f_{yb}/\gamma_{M0}$, nas iterações posteriores a secção efetiva é calculada com base numa distribuição de tensões de segunda ordem em que $\sigma_{com.Ed,i} = \chi_{d,i} \cdot f_{yb}/\gamma_{M0} < f_{yb}/\gamma_{M0}$ e o valor do fator de redução ρ é calculado com base no valor da esbelteza normalizada local reduzida do “reforço” i numa iteração n $\bar{\lambda}_{p,red,i}^n$ dado pela seguinte expressão:

$$\bar{\lambda}_{p,red,i}^n = \bar{\lambda}_{p,i} \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed,i}^{n-1}}{f_{yb}/\gamma_{M0}}} = \bar{\lambda}_{p,i} \cdot \sqrt{\chi_{d,i}^{n-1}} \quad (3.20)$$

Os valores de cálculo da secção efetiva, após efetuadas algumas iterações atingem os limites de convergência e o processo iterativo termina. Estes limites de convergência são estabelecidos pelos dois seguintes critérios:

- 1º.Critério de convergência $\chi_{d,i}^n \approx \chi_{d,i}^{(n-1)}$;
 - 2º.Critério de convergência $\chi_{d,i}^n \leq \chi_{d,i}^{(n-1)}$.
- v. Finalmente procede-se ao cálculo dos valores da área efetiva do “reforço” i $A_{s,red,i}$ e da espessura reduzida $t_{red,i}$ dadas pelas seguintes expressões (3.21a) e (3.21b), respetivamente.

$$A_{s,red,i} = \chi_{d,i} \cdot A_{s,i} \cdot \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com.Ed,i}} \quad (3.21a)$$

$$t_{red,i} = t \cdot A_{s,red,i}/A_{s,i} \quad (3.21b)$$

3.2.4.2.3 Algoritmo de cálculo das propriedades efetivas

Por fim, é apresentado na Figura 3.10 o algoritmo de cálculo da secção efetiva do “reforço” e na Figura 3.11 o algoritmo que sintetiza o procedimento de cálculo da secção efetiva.

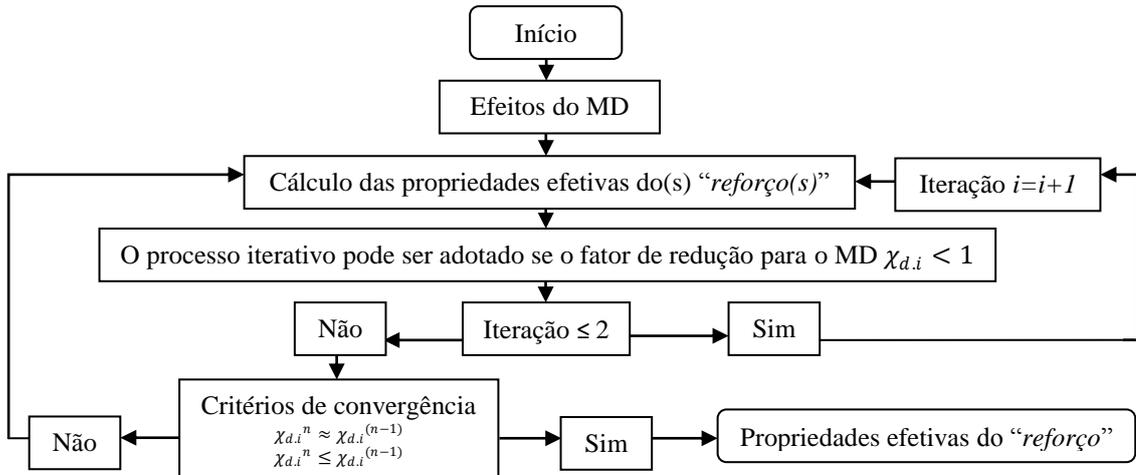


Figura 3.10 – Algoritmo de cálculo da secção efetiva do “reforço”

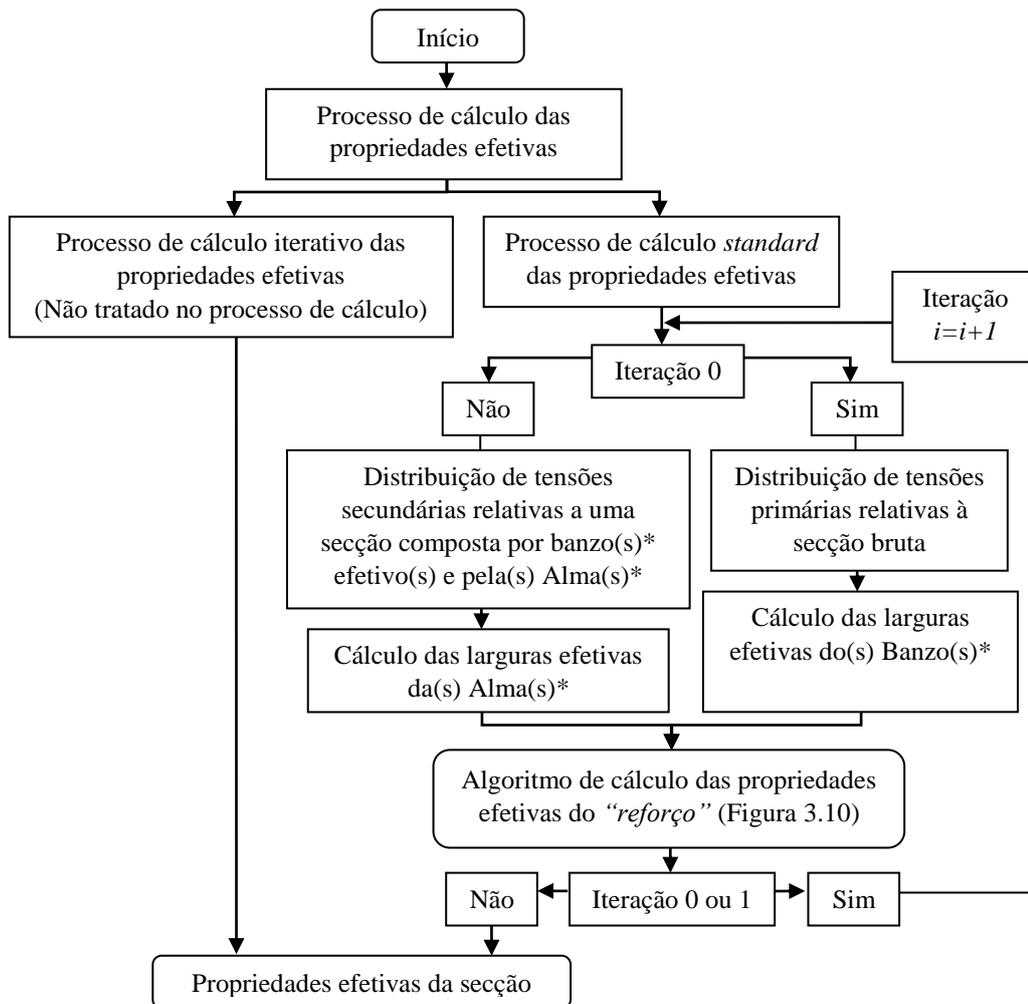


Figura 3.11 – Algoritmo de cálculo da secção efetiva

3.2.4.3 Comprimento de encurvadura

Em elementos isolados (ou que possam ser analisados como tal) são as condições de fronteira dos próprios elementos e seu próprio comprimento que definem o comprimento de encurvadura L_{cr} . Assim, de acordo com o Quadro 3.6, o comprimento de encurvadura L_{cr} é dado pela seguinte expressão:

$$L_{cr} = LK \quad (3.22)$$

Quadro 3.6 – Condições de fronteira e coeficiente K

Condições de fronteira do MGF	K_F	Condições de fronteira do MGT e empenamento	K_T
Rotulada- Rotulada	1	Restrição parcial à rotação por torção/empenamento	1
Rotulada-Encastrada	0,7		
Encastrada-Encastrada	0,5	Restrição significativa à rotação por torção/empenamento	0,7

3.2.4.4 Carga crítica elástica

Em colunas com secções transversais abertas de paredes finas podem ocorrer variados fenómenos de encurvadura global, nomeadamente a encurvadura por flexão, a encurvadura por torção e a encurvadura por flexão-torção. Porém, a encurvadura por flexão é a mais comum nos elementos metálicos correntemente utilizados. A sua carga crítica elástica $N_{cr.F}$ é o valor de carga em que o elemento passa a exibir deformações não exclusivamente axiais e é traduzida com base na teoria da estabilidade elástica pela seguinte expressão:

$$N_{cr.F} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr.F}^2} \quad (3.23)$$

A carga crítica de encurvadura por torção $N_{cr.T}$, por sua vez, conforme estabelecido na *cláusula 6.2.3(5) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) é dada pela seguinte expressão:

$$N_{cr.T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{cr.T}^2} \right) \quad (3.24a)$$

Em que,

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_{sc}^2 + z_{sc}^2 \quad (3.24b)$$

No que se refere à encurvadura por flexão-torção, esta apenas ocorre em elementos estruturais compostos por secções transversais monossimétricas, sendo a sua carga crítica calculada de acordo com um parâmetro de assimetria β . A cláusula 6.2.3(7) do EC3-1-3 (EN1993-1-3, 2006) estabelece que num elemento linear de secção transversal simétrica relativamente ao eixo $y - y$ ($y_{sc} \neq 0$ e $z_{sc} = 0$) (secções transversais estudadas no presente trabalho) a carga crítica $N_{cr,FT}$ é dada pela seguinte expressão:

$$N_{cr,FT} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 - 4\beta \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (3.25a)$$

Em que,

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_{sc}}{i_0}\right)^2 \quad (3.25b)$$

A geometria das secções transversais das colunas é determinante na definição da suscetibilidade da peça aos diferentes MG. Portanto, como os elementos de aço enformado a frio estudados são compostos por secções transversais monossimétricas, com o eixo de simetria coincidente com o eixo $y - y$ [$y_{sc} \neq 0$ e $z_{sc} = 0$], a carga crítica está associada ao menor dos valores do modo crítico que envolve flexão em torno de $z - z$ e flexão-torção $N_{cr} = \min\{N_{cr,z}; N_{cr,FT}\}$.

3.2.4.5 Momento crítico de encurvadura

A encurvadura lateral consiste na deformação lateral da parte comprimida de uma secção de um elemento sujeito a flexão em torno do eixo $y - y$ (eixo de maior inércia da secção). Nestas condições, a parte comprimida comporta-se como um elemento linear comprimido, continuamente restringido pela parte tracionada, que à partida não tem qualquer tendência para se deslocar lateralmente (Simões, 2007).

O momento crítico M_{cr} , tal como a carga crítica N_{cr} , também é definido consoante as condições de simetria das secções transversais das vigas. Nos elementos de aço enformado a frio só muito raramente as suas secções transversais são bissimétricas, complicando em muito as expressões analíticas em que se baseia o cálculo do momento crítico M_{cr} . De facto nem o EC3-1-3, nem o EC3-1-1, fornecem expressões para o cálculo do valor do momento crítico M_{cr} , sendo vulgarmente calculado com recurso a programas de cálculo computacional (e.g. o *cufsm* e o *gbtul*). No entanto, de forma simplificada o valor do momento crítico $M_{cr,u}$ pode ser calculado com base numa expressão adequada a secções transversais bissimétricas:

$$M_{cr.u} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr}^2} \sqrt{GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{cr}^2}} = i_0 \sqrt{N_{cr.z} \cdot N_{cr.T}} \quad (3.26a)$$

Embora o valor do momento crítico M_{cr} seja bastante conservativo, este valor pode ser utilizado com segurança e até melhorado considerando as condições de fronteira da viga e a configuração do diagrama de momento fletor, de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{cr} = C_1 M_{cr.u} = C_1 \cdot i_0 \sqrt{N_{cr.z} \cdot N_{cr.T}} \quad (3.26b)$$

Em que o valor do coeficiente C_1 é dado em função dos valores do Quadro 3.7, considerando as condições de fronteira da viga e a configuração do diagrama de momento fletor. É ainda de salientar que nos casos cujo valor da relação de tensões atuantes nas fibras extremas da viga Ψ é intermédio entre os valores definidos no Quadro 3.7, o valor do coeficiente C_1 é calculado com base numa interpolação linear definida pelos valores extremos definidos mais próximos.

Quadro 3.7 – Coeficiente C_1 para as vigas com momentos de extremidade (Silvestre, 2012)

Diagrama de momento fletor Ψ		Condições de apoio K	C_1
	$\Psi = 1$	1,0	1,000
		0,7	1,000
		0,5	1,000
		$\Psi = + 3/4$	1,0
		0,7	1,270
		0,5	1,305
		$\Psi = + 1/2$	1,0
		0,7	1,473
		0,5	1,514
		$\Psi = + 1/4$	1,0
		0,7	1,738
		0,5	1,788
		$\Psi = 0$	1,0
		0,7	2,082
		0,5	2,150
		$\Psi = - 1/4$	1,0
		0,7	2,538
		0,5	2,608
$\Psi = - 1/2$		1,0	2,704
	0,7	3,009	
	0,5	3,083	
	$\Psi = - 3/4$	1,0	2,927
	0,7	3,009	
	0,5	3,083	
	$\Psi = - 1$	1,0	2,752
	0,7	3,063	
	0,5	3,149	

3.2.4.6 Resistência das secções transversais

A cláusula 6.2 do EC3-1-1 (EN1993-1-1, 2010) refere que o valor de cálculo do efeito de uma ação em cada secção transversal não deve ser superior ao valor de cálculo da resistência correspondente e, no caso de vários efeitos de ações atuarem simultaneamente, o seu efeito combinado não deve exceder a resistência correspondente a essa combinação. Em seguida, são apresentadas as verificações de segurança relativas às secções transversais.

3.2.4.6.1 Esforço axial de tração

O valor de cálculo do esforço axial de tração N_{Ed} deve verificar a seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1 \quad (3.27)$$

Onde o valor do esforço axial resistente da secção transversal $N_{t.Rd}$ é dado por:

$$N_{t.Rd} = \frac{A \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \quad (3.28)$$

3.2.4.6.2 Esforço axial de compressão

O valor de cálculo do esforço axial de compressão N_{Ed} deve verificar a seguinte condição:

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{c.Rd}} \leq 1 \quad (3.29)$$

Em que o valor do esforço axial resistente da secção transversal $N_{c.Rd}$ é dado por:

$$N_{c.Rd} = \begin{cases} \frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} & \text{se } A_{eff} < A \\ \frac{A (f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb})4(1 - \bar{\lambda}_e/\bar{\lambda}_{e0}))}{\gamma_{M0}} \leq \frac{A \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} & \text{se } A_{eff} = A \end{cases} \quad (3.30a)$$

Onde,

$$\frac{\bar{\lambda}_e}{\bar{\lambda}_{e0}} = \max \begin{cases} \bar{\lambda}_p/0,673 & \text{para componentes planos} \\ \bar{\lambda}_p/0,65 & \text{para reforços} \end{cases} \quad (3.30b)$$

3.2.4.6.3 Momento fletor simples

O valor de cálculo do momento fletor simples M_{Ed} deve verificar a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} \leq 1 \quad (3.31)$$

Onde o valor do momento fletor resistente da secção transversal $M_{c.Rd}$ é dado por:

$$M_{c.Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad \text{com} \quad W_{eff} \leq W_{el} \quad (3.32a)$$

Nos casos em que a flexão é aplicada em torno do eixo de maior inércia e o módulo de flexão de uma secção efetiva é igual ao módulo de flexão elástico ($W_{eff} = W_{el}$), o ângulo entre a alma e os banzos é maior que 60° e o elemento não seja suscetível ao MG, o valor do momento fletor resistente da secção transversal $M_{c.Rd}$ é dado por:

$$M_{c.Rd} = \frac{f_{yb} \left(W_{el} + (W_{pl} - W_{el})4(1 - \bar{\lambda}/\bar{\lambda}_e) \right)}{\gamma_{M0}} \leq \frac{W_{pl} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.32b)$$

Onde,

$$\frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}_e} = \max \begin{cases} \frac{\bar{\lambda}_p}{0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \Psi)}} & \text{para componentes planos internos} \\ \bar{\lambda}_p/0,673 & \text{para componentes planos externos} \\ \bar{\lambda}_p/0,65 & \text{para reforços} \end{cases} \quad (3.32c)$$

3.2.4.6.4 Esforço transversal

A segurança ao corte é assegurada se o valor de cálculo V_{Ed} verificar a seguinte condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} \leq 1 \quad (3.33)$$

Com o valor do esforço transversal resistente da secção transversal $V_{b.Rd}$ dado por:

$$V_{b.Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} \cdot t \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.34)$$

E o valor da resistência ao esforço transversal f_{bv} é calculado com base no Quadro 3.8 em função da esbelteza normalizada para a instabilidade por esforço transversal $\bar{\lambda}_w$, dada pela expressão (3.35a), ou de forma simplificada, para almas sem reforços longitudinais e para almas com reforços longitudinais, dada pelas expressões (3.35b) e (3.35c), respetivamente.

Quadro 3.8 – Tensão resistente ao esforço transversal dado em função da esbelteza

	Sem reforço dos apoios	Com reforço dos apoios
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58f_{bv}$	$0,58f_{bv}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48f_{bv}/\bar{\lambda}_w$	$0,48f_{bv}/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67f_{bv}/\bar{\lambda}_w^2$	$0,48f_{bv}/\bar{\lambda}_w$

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_{yb}/\sqrt{3}}{\tau_{cr}}} = \frac{s_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot f_{yb} \cdot (1 - \nu^2)}{\sqrt{3} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot k_\tau}} \quad (3.35a)$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{f_{yb}/E} \quad (3.35b)$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34 f_{yb}}{k_\tau E}} \text{ mas com } \bar{\lambda}_w \geq 0,346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (3.35c)$$

Onde, o coeficiente para a encurvadura local de placa para a instabilidade por esforço transversal ou corte k_τ é dado pela seguinte expressão:

$$k_\tau = 5,34 + \frac{2,10}{t} \left(\frac{\sum I_s}{s_d} \right)^{1/3} \quad (3.35d)$$

Em que I_s é a inércia do reforço relativa ao eixo $a - a$ de acordo com a Figura 3.12:

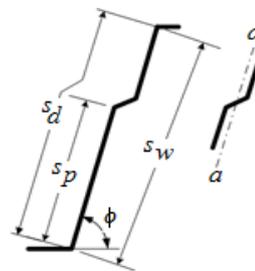


Figura 3.12 – Alma reforçada longitudinalmente (EN1993-1-3, 2006)

3.2.4.6.5 Flexão desviada

O valor de cálculo da flexão desviada da secção transversal deve verificar a seguinte condição:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd}} \leq 1 \quad (3.36)$$

3.2.4.6.6 Flexão desviada composta com esforços axial

O valor de cálculo da flexão desviada composta com esforço axial (tração ou compressão) da secção transversal deve verificar as seguintes condições:

- Flexão desviada composta com tração

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.ten}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.ten}} \leq 1 \quad (3.37a)$$

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.com}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.com}} - \frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1 \quad (3.37b)$$

Sendo $M_{cy.Rd.com} \leq M_{cy.Rd.ten}$ e $M_{cz.Rd.com} \leq M_{cz.Rd.ten}$.

- Flexão desviada composta com compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} + \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.com}} + \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.com}} \leq 1 \quad (3.38a)$$

$$\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.ten}} + \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.ten}} - \frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} \leq 1 \quad (3.38b)$$

Sendo $M_{cy.Rd.ten} \leq M_{cy.Rd.com}$ e $M_{cz.Rd.ten} \leq M_{cz.Rd.com}$.

3.2.4.6.7 Flexão desviada composta com esforço axial e esforço transversal

Numa secção transversal sujeita a flexão desviada composta com esforço axial (tração ou compressão) e esforço transversal, não é necessário considerar o esforço transversal na interação caso $V_{Ed} \leq 0,5V_{w.Rd}$. Caso contrário, devem ser verificadas as seguintes condições:

- Flexão desviada composta com tração e esforço transversor

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.ten}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.ten}} + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.y}}{M_{pl.Rd.y}}\right) \left(\frac{2V_{y.Ed}}{V_{w.Rd.y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.z}}{M_{pl.Rd.z}}\right) \left(\frac{2V_{z.Ed}}{V_{w.Rd.z}} - 1\right)^2 \leq 1 \quad (3.39a)$$

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.com}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.com}} - \frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.y}}{M_{pl.Rd.y}}\right) \left(\frac{2V_{y.Ed}}{V_{w.Rd.y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.z}}{M_{pl.Rd.z}}\right) \left(\frac{2V_{z.Ed}}{V_{w.Rd.z}} - 1\right)^2 \leq 1 \quad (3.39b)$$

- Flexão desviada composta com compressão e esforço transversor

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} + \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.com}} + \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.com}} + \left(1 - \frac{M_{f.Ed.y}}{M_{pl.Rd.y}}\right) \left(\frac{2V_{y.Ed}}{V_{w.Rd.y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.z}}{M_{pl.Rd.z}}\right) \left(\frac{2V_{z.Ed}}{V_{w.Rd.z}} - 1\right)^2 \leq 1 \quad (3.39c)$$

$$\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd.ten}} + \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{M_{cz.Rd.ten}} - \frac{N_{Ed}}{N_{c.Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f.Ed.y}}{M_{pl.Rd.y}}\right) \left(\frac{2V_{y.Ed}}{V_{w.Rd.y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{f.Rd.z}}{M_{pl.Rd.z}}\right) \left(\frac{2V_{z.Ed}}{V_{w.Rd.z}} - 1\right)^2 \leq 1 \quad (3.39d)$$

3.2.4.6.8 Algoritmo de cálculo da resistência das secções transversais

Em seguida na Figura 3.13 é apresentado o algoritmo que resume o procedimento de cálculo da resistência das secções transversais.

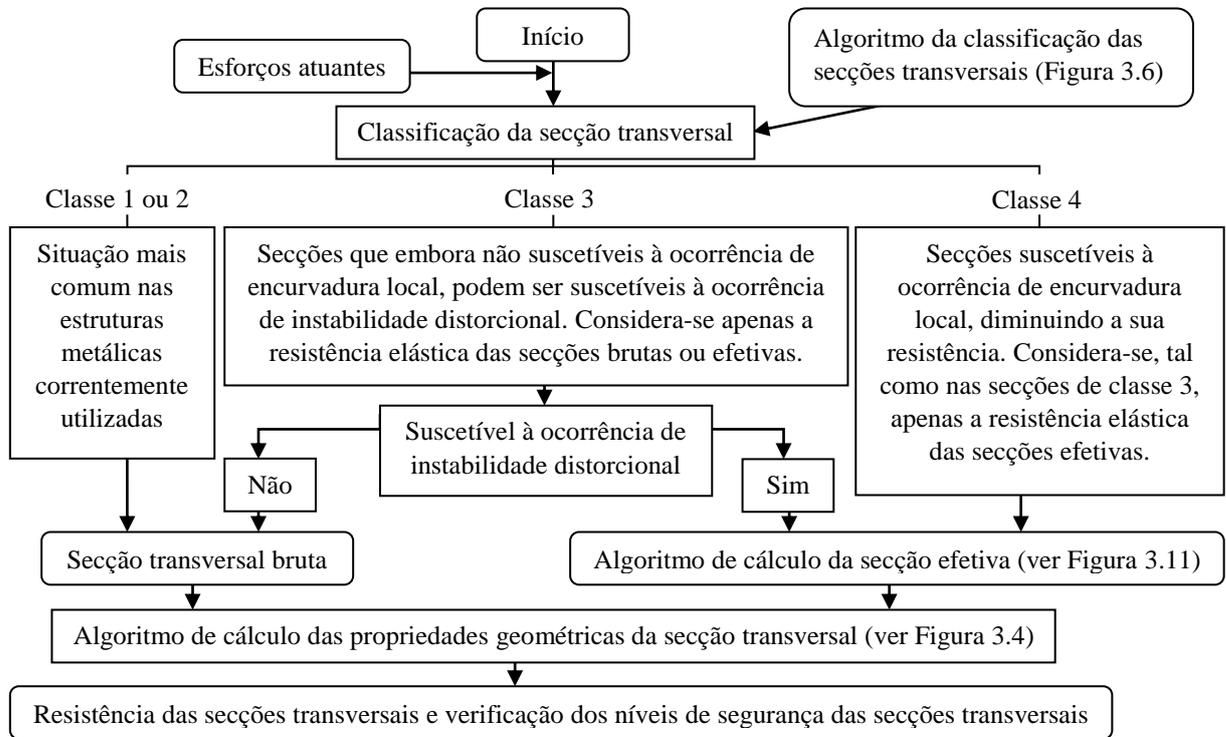


Figura 3.13 – Algoritmo de cálculo da resistência da secção transversal

3.2.4.7 Resistência dos elementos à encurvadura global

3.2.4.7.1 Colunas uniformes comprimidas

O valor de cálculo do esforço axial de compressão de uma coluna N_{Ed} , conforme apresentado na *cláusula 6.3.1.1 do EC3-1-3* (EN1993-1-1, 2010) deve verificar a seguinte condição:

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (3.40)$$

Em que o valor do esforço axial resistente à encurvadura $N_{b,Rd}$ é dado por:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad \text{com} \quad A_{eff} \leq A \quad (3.41)$$

E o fator de redução da resistência χ associado ao MG, de acordo com a *cláusula 6.3.1.2 do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) é dado pela seguinte expressão (3.42a), com base nas curvas de encurvadura.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{e} \quad \chi \leq 1 \quad (3.42a)$$

Onde, ϕ é um parâmetro adicional de cálculo do fator de redução da resistência χ dado pela seguinte expressão:

$$\phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.42b)$$

E $\bar{\lambda}$ é o valor da esbelteza normalizada associada ao MG dado pela seguinte expressão (3.42b), em que N_{cr} é a carga crítica associada ao MG sem deslocamentos laterais das secções transversais extremas da coluna. É ainda de referir que nos casos em que a esbelteza $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ou para $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0,04$, os efeitos do encurvadura global podem ser desprezados, sendo apenas necessário verificar a segurança das secções transversais.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr}}} \quad \text{com} \quad A_{eff} \leq A \quad (3.42c)$$

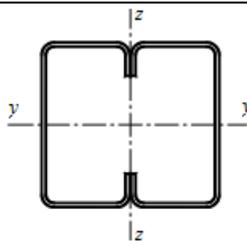
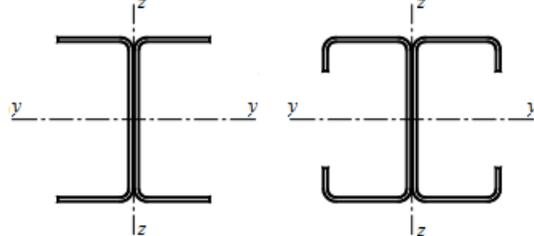
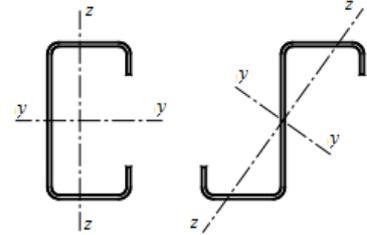
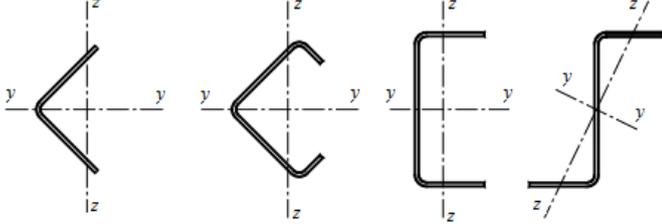
No que diz respeito ao fator de imperfeição α , este está intrinsecamente relacionado com as curvas de encurvadura propostas na *figura 6.4 e no quadro 6.1 do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) e com a geometria da secção transversal, de acordo com a *tabela 6.3 do EC3-1-3* (EN1993-1-

3, 2006). Portanto, como as colunas são compostas por secções transversais em “C” com reforços de extremidade, de acordo com o Quadro 3.9 e o Quadro 3.10 o fator de imperfeição α assume o valor de 0,34 (curva b), para a generalidade dos MG, exceto nos casos em que a influência dos reforços de extremidade é desprezável, em que o fator de imperfeição α assume o valor de 0,49 (curva c).

Quadro 3.9 – Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura (EN1993-1-1, 2010)

Curva de encurvadura	a_0	a	b	c	d
Fator de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Quadro 3.10 – Curvas de encurvadura em função da secção transversal (EN1993-1-3, 2006)

Secção transversal	Encurvadura em relação ao eixo	Curvas de encurvadura
 <p>Se for usado f_{yb}</p> <p>Se for usado $f_{ya}^{*)}$</p>	Qualquer	b
	y – y	a
	z – z	b
	Qualquer	b
	Qualquer	c

*) A tensão de cedência média f_{ya} somente deve ser usada se $A_{eff} = A$

3.2.4.7.2 Vigas uniformes em flexão

O valor de cálculo de uma viga sem travamento lateral solicitada à flexão em relação ao eixo principal de inércia $M_{y.Ed}$, conforme estabelecido na *cláusula 6.3.1.1 do EC3-1-3* (EN1993-1-1, 2010) deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{b.Rd}} \leq 1 \quad (3.43)$$

Onde, o valor do momento fletor resistente à encurvadura lateral da viga $M_{b.Rd}$ é dado por:

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{eff.y} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad \text{com} \quad W_{eff.y} \leq W_{el.y} \quad (3.44)$$

E o coeficiente de redução da resistência devido à encurvadura lateral χ_{LT} , segundo a *cláusula 6.3.2.2 do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) é traduzido pelo método geral por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{e} \quad \chi \leq 1 \quad (3.45a)$$

Onde, Φ_{LT} é um parâmetro adicional de cálculo do fator de redução da resistência devido à encurvadura lateral χ_{LT} dado pela seguinte expressão:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (3.45b)$$

E $\bar{\lambda}_{LT}$ é o valor da esbelteza normalizada associado à encurvadura lateral dado pela seguinte expressão (3.45c). É também de salientar que nos casos em que a esbelteza $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ ou para $M_{Ed}/M_{cr} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$, onde $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2$, de acordo com a *NA-63.2.3(1) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) os efeitos da encurvadura global podem também ser desprezados, sendo apenas necessário verificar a segurança das secções transversais.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff.y} \cdot f_{yb}}{M_{cr}}} \quad \text{com} \quad W_{eff.y} \leq W_{el.y} \quad (3.45c)$$

Relativamente ao fator de imperfeição α_{LT} , segundo a *cláusula 6.2.4(1) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006) este assume um valor igual a 0,34 para a generalidade das geometrias das secções transversais.

3.2.4.7.3 Vigas-coluna uniformes em flexão composta com compressão

A verificação da segurança à encurvadura global de uma viga-coluna sujeita a flexão composta com compressão, segundo a *cláusula 6.3.3 do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) deve satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{|N_{Ed}|}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (3.46a)$$

$$\frac{|N_{Ed}|}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (3.46b)$$

Em que, N_{Rk} e $M_{y.Rk}$ e $M_{z.Rk}$ são valores característicos de resistência à compressão e à flexão em torno do eixo $y - y$ e do $z - z$, respetivamente. Estes valores característicos da resistência são dados pelas seguintes expressões (3.47a), (3.47b) e (3.47c), respetivamente.

$$N_{Rk} = A_{eff} \cdot f_{yb} \quad \text{com} \quad A_{eff} \leq A \quad (3.47a)$$

$$M_{y.Rk} = W_{eff.y} \cdot f_{yb} \quad \text{com} \quad W_{eff.y} \leq W_{el.y} \quad (3.47b)$$

$$M_{z.Rk} = W_{eff.z} \cdot f_{yb} \quad \text{com} \quad W_{eff.z} \leq W_{el.z} \quad (3.47c)$$

Os k_{ij} são os valores dos fatores de interação para elementos suscetíveis à deformação por torção calculados com base no Método 2, de acordo com o *anexo B do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010). Este método estabelece que os valores dos fatores k_{ij} sejam calculados com base nos diagramas de momentos fletores, conforme os valores apresentados no Quadro 3.11 e no Quadro 3.12. Contudo, apenas são calculados os fatores de interação k_{ij} respetivos a diagramas de esforços com uma configuração linear, em conformidade com a configuração dos diagramas de esforços dos estudados.

Quadro 3.11 – Coef.de momento uniforme equivalente (adaptado de EN1993-1-1, 2010)

Diagrama de momentos	Domínio de aplicação	C_{my} e C_{mz} e C_{mLT} (Carga concentrada)
	$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\Psi \geq 0,4$
Coeficiente de momento		eixo de flexão
C_{my}		$y - y$
C_{mz}		$z - z$
C_{mLT}		$y - y$

Quadro 3.12 – Fatores de interação (adaptado de EN1993-1-1, 2010)

Fatores de interação	Propriedades elásticas das secções transversais de classe 3, classe 4
k_{yy}	$C_{my} \left(1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	k_{zz}
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right]$
k_{zz}	$C_{mz} \left(1 + 0,6\bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right) \leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right)$

3.2.4.7.4 Algoritmo de cálculo da capacidade resistente à encurvadura global dos elementos estruturais

Em seguida na Figura 3.14 é apresentado o algoritmo de cálculo da resistência à encurvadura global dos elementos estruturais.

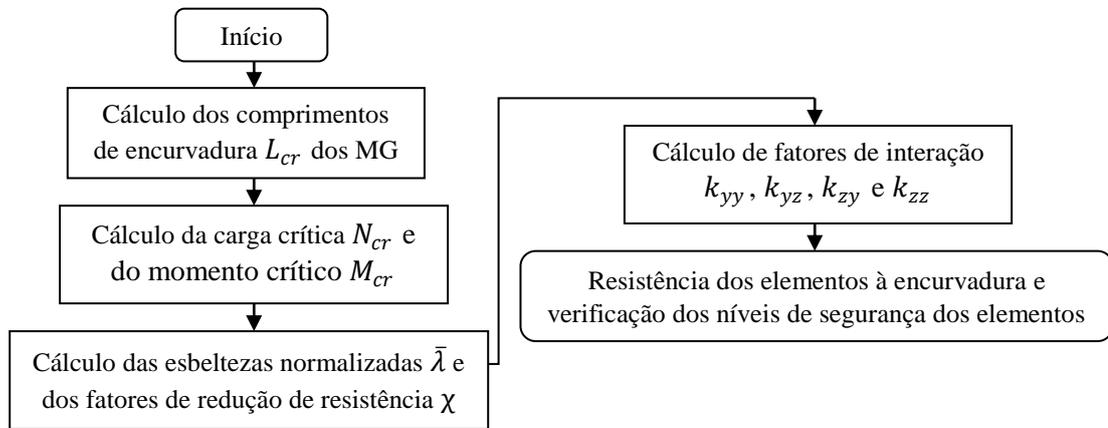


Figura 3.14 – Algoritmo de cálculo da capacidade resistente à encurvadura global dos elementos estruturais

3.2.5 Otimização estrutural

A otimização estrutural tem como objetivo aumentar a taxa de aproveitamento de elementos estruturais. A otimização estrutural é assente num processo iterativo de convergência e aproximação à solução ótima. Este processo iterativo é limitado a 10 iterações e é resultado de sucessivas variações das dimensões das secções transversais apresentadas na Figura 3.15. Uma

solução otimizada surge associada a um elemento estrutural que verifique à segurança e cuja secção transversal possua a menor área de entre amostra.

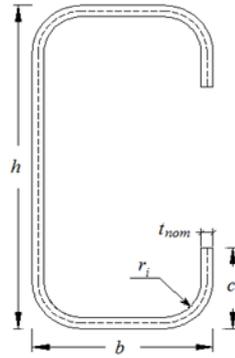


Figura 3.15 – Secção transversal tipo dos elementos de aço enformado a frio

No caso da otimização estrutural as áreas das secções transversais dos elementos estruturais são calculadas com base no método linear (método exato), considerando os cantos arredondados com base na seguinte expressão:

$$A = [(b_{SH} - r_m) + 2 \cdot (b_{SH} - 2 \cdot r_m) + 2 \cdot (c_{SH} - 2 \cdot r_m) + 2 \cdot \pi \cdot r_m] \cdot t_{nom} \quad (3.48a)$$

Onde,

$$r_m = r_i + t_{nom}/2 \quad (3.48b)$$

Posteriormente, na otimização estrutural é calculado o valor da quantidade de aço do elemento estrutural (Q. Aço) dado pela seguinte expressão:

$$Q. Aço = \gamma_s \cdot V = \gamma_s \cdot A \cdot L \quad (3.49)$$

Onde, γ_s é o peso volúmico do aço e segundo o *Quadro A.4 do ECI* (EN1991-1-1, 2009) assume o valor de $77,01 \text{ kN/m}^3$. Por fim, no processo de otimização é ainda determinada a redução da quantidade de aço conseguida com a otimização estrutural e dada pela seguinte expressão:

$$\frac{Q. Aço_{\text{secção do dimensionamento inicial}} - Q. Aço_{\text{secção otimizada}}}{Q. Aço_{\text{secção do dimensionamento inicial}}} = (\%) \text{ Redução da Q. A} \quad (3.50)$$

3.3 Base de dados

A conceção da *Cold-Formed Design* para além do desenvolvimento de todo um algoritmo de cálculo, determinou a definição de uma base de dados que permita facilitar a caracterização de algumas das propriedades dos elementos estruturais. Na base de dados para além das condições de fronteira e os seus respetivos coeficientes K apresentados no Quadro 3.6, foram ainda incluídos os tipos de aço *standard* e as suas características específicas (tensão de cedência base f_{yb} e tensão última f_u) e, também, os diferentes tipos de processo de fabrico e o seu respetivo fator k : (i) $k = 7$ para a laminagem a frio (“Roll forming”); (ii) $k = 5$ para os restantes processos de fabrico.

3.4 Definição da interface e implementação da “Cold-Formed Design”

Em seguida é apresentada a implementação da *Cold-Formed Design*, por forma a mostrar as principais características da interface e a forma como o utilizador deve proceder ao utilizar a ferramenta de cálculo. O exemplo aplicativo mostrado é referente ao elemento estrutural de cálculo do grupo 4 da viga-treliça do Modelo B (ver capítulo 4).

A definição da interface teve como objetivo facilitar a interação de qualquer utilizador com a *Cold-Formed Design*. Numa introdução simplificada da interface e do funcionamento integral da *Cold-Formed Design*, é de salientar que exceto no caso de quadros de valores, as células *input* são coloridas a branco, enquanto as células coloridas a azul claro remetem para uma escolha de valores presentes na base de dados da ferramenta de cálculo e as células a azul são células exclusivamente de *output*. Na interface da *Cold-Formed Design* são, ainda, apresentadas regularmente informações adicionais acerca do processo de cálculo e das suas limitações, bem como as disposições regulamentares na qual se baseiam as várias etapas do processo de cálculo.

O processo de dimensionamento e otimização do elemento estrutural é iniciado com a verificação da segurança de um elemento pré-dimensionado. O pré-dimensionamento apresentado na Figura 3.16, é uma fase *input/output* em que o utilizador deve ter alguma sensibilidade ao definir a geometria do elemento estrutural e as suas condições de fronteira. Nesta fase o utilizador deve inserir os valores associados às suas dimensões medidas pelo exterior $c; b; h$, a espessura t_{nom} , o raio interno dos cantos arredondados r_i da secção transversal e, ainda, o comprimento do elemento L e escolher as suas condições de fronteira dentro das possibilidades existentes na base de dados. As restantes dimensões geométricas da secção transversal, bem como a convenção dos eixos principais de referência, são automaticamente definidas pela *Cold-Formed Design*. No que se refere ao exemplo aplicativo como elemento estrutural é rotulado-rotulado em ambas as direções principais ($y - y$ e $z - z$)

e como a restrição à rotação não é significativa, no pré-dimensionamento para além do comprimento do próprio elemento e das condições de fronteira, foram ainda assumidas as dimensões geométricas da secção transversal apresentadas na seguinte Figura 3.16.

Posteriormente, numa fase exclusivamente *output* apresentada na Figura 3.17 são apresentados os valores dos fatores parciais de segurança γ_{Mi} assumidos no processo de cálculo, de acordo com a *cláusula 2(3) do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006).

DADOS GERAIS

Geometria da secção transversal

c_1 (mm)

b_1 (mm)

h (mm)

b_2 (mm)

c_2 (mm)

t_{nom} (mm)

r_f (mm)

n

$\phi/2$ (°)

Terminologia e convenção adotada
(Cláusula 1.5.4(1) da EN 1993-1-3)

O cálculo apenas abrange elementos estruturais com secções transversais em "C" monossimétricas e com os eixos (y-z)≡(u-v).

Informação adicional acerca do processo de cálculo e das suas limitações

Comprimento e condições de fronteira do elemento estrutural

L (mm)

K_y

K_z

K_w

K_T

Figura 3.16 – Geometria do elemento estrutural pré-dimensionado e condições de fronteira (Interface da *Cold-Formed Design*)

BASES DE DIMENSIONAMENTO

Fatores parciais de segurança (Cláusula 2(3) da EN 1993-1-3)

γ_{M0}

γ_{M1}

γ_{M2}

Figura 3.17 – Coeficientes parciais de segurança (Interface da *Cold-Formed Design*)

Em seguida, numa nova fase *input/output* apresentada na Figura 3.18, foram definidas as propriedades materiais. Nesta fase, cabe ao utilizador escolher o tipo de aço *standard* e o processo de fabrico dos elementos estruturais de entre as possibilidades presentes na base de dados. Compete também ao utilizador definir as tolerâncias de produção *tol* e a espessura de revestimento da chapa $t_{metallic\ coatings}$.

Após inseridos devidamente os valores, a ferramenta de cálculo define automaticamente as respetivas propriedades materiais e mostra se a espessura base da chapa t_{cor} é ou não abrangida pela *EC3-1-3*, como apresentado na Figura 3.18.

Quanto ao exemplo aplicativo, as propriedades materiais foram definidas considerando o aço *S320 GD+Z (EN10326)* e o processo de fabrico como laminagem a frio, com uma tolerância de produção *tol* de 5% e a espessura de revestimento da chapa $t_{metallic\ coatings}$ de 0,05mm.

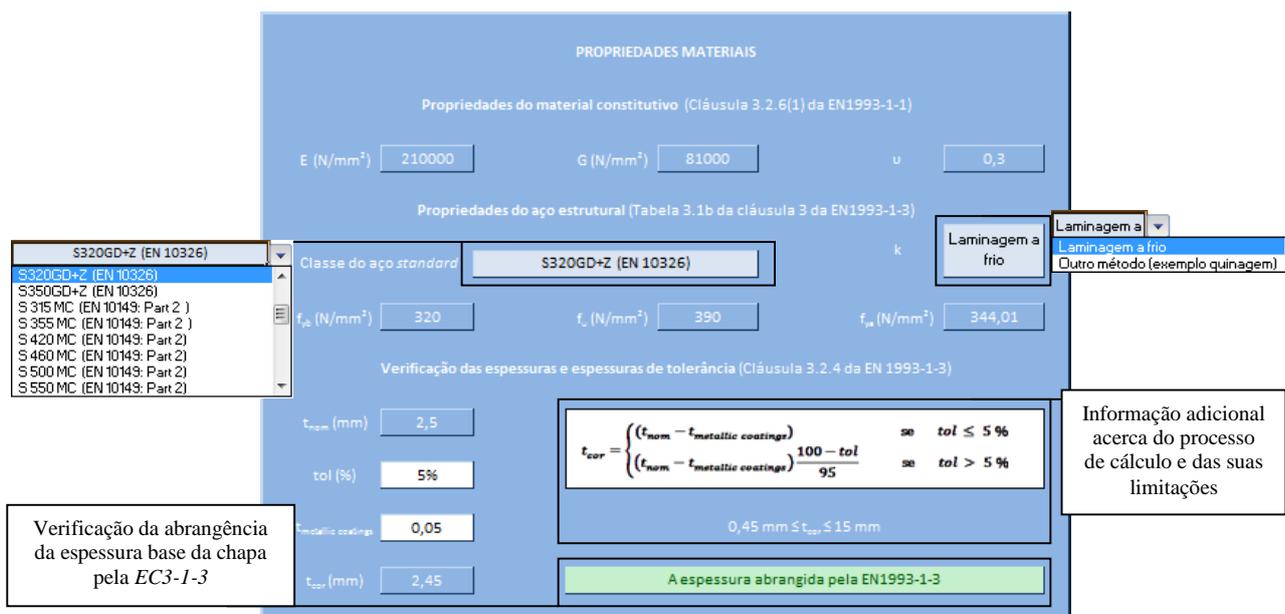


Figura 3.18 – Propriedades materiais (Interface da *Cold-Formed Design*)

Uma vez definida a geometria da secção transversal e as propriedades materiais do elemento estrutural, como a espessura da chapa t_{cor} é abrangida pela *EC3-1-3*, é apresentada na Figura 3.19 uma nova fase exclusivamente *output*, em que a ferramenta de cálculo procede automaticamente à verificação das proporções geométricas das secções transversais e da validade da aplicação do método de cálculo definido na *EC3-1-3*, definindo se os valores são ou não abrangidos pela *EC3-1-3* consoante os valores dos rácios largura-espessura dos diferentes componentes da secção transversal e do seu raio interno dos cantos arredondados r_i .

É, ainda, definida a forma como os reforços e as suas rigidezes devem ser considerados no cálculo da secção efetiva consoante o seu pré-dimensionamento e os valores da relação reforços-banzos. Relativamente ao exemplo aplicativo é de referir que, como mostrado na Figura 3.19, as proporções geométricas da secção transversal satisfazem as condições podendo ser aplicado o método de cálculo definido no *EC3-1-3*. No que se refere aos reforços e às suas rigidezes, estes devem ser considerados no cálculo da secção efetiva.

Verificação das proporções geométricas e da aplicabilidade da metodologia de cálculo da EN1993-1-3

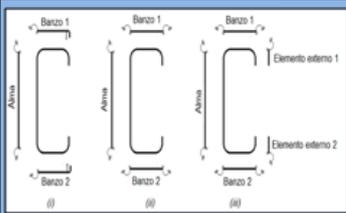
Rádios máximos largura-espessura (Quadro 5.1 da EN 1993-1-3)

$b/t \leq 60$	$c/t \leq 50$	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$	$h/t \leq 500 \sin \phi$
b_1/t_{nom} 16,33	c_1/t_{nom} 6,12		h/t_{nom} 40,82
b_2/t_{nom} 16,33	c_2/t_{nom} 6,12		

As proporções geométricas são abrangidas pelos limites de validade da aplicabilidade da EN 1993-1-3

Rigidez do reforço (Cláusula 5.2(2) da EN 1993-1-3)

A rigidez do reforço deve ser considerada se $0,2 \leq c/b \leq 0,6$, contrariamente, se $c/b \leq 0,2$ a rigidez do reforço não deve ser considerada ($c=0$). No caso de $c/b \geq 0,6$ o reforço deve ser analisado como um componente externo.



$b_{p,c1}/b_{p,z1}$ 0,38

Caso (i): Considera-se a rigidez do reforço

$b_{p,c2}/b_{p,z2}$ 0,38

Caso (i): Considera-se a rigidez do reforço

Verificação da necessidade de recorrer a resultados experimentais para determinar a resistência da secção transversal do perfil (Cláusula 5.1(6) da EN1993-1-3)

A resistência das suas secções transversais dos perfis deve ser determinada com base em resultados experimentais desde que os raios de curvatura dos cantos arredondados das secções transversais verifiquem a seguinte condição: $r_1 > 0,04t_{nom} E/f_{yk}$

Não é necessário realizar ensaios experimentais para determinar a resistência da secção transversal

Verificação da abrangência pela *EC3-1-3* dos rádios largura-espessura dos diferentes componentes da secção transversal

Informação adicional acerca do processo de cálculo e das suas limitações

Verificação da forma como o reforço e a sua rigidez devem ser consideradas no cálculo da secção efetiva, de acordo com o pré-dimensionamento

Verificação da abrangência pela *EC3-1-3* dos raios de curvatura dos cantos arredondados da secção transversal

Figura 3.19 – Verificação das proporções geométricas e da aplicabilidade do método de cálculo do *EC3-1-3* (Interface da *Cold-Formed Design*)

Como o método de cálculo definido no *EC3-1-3* pode ser implementada, de seguida na Figura 3.20, é apresentada uma nova fase exclusivamente *output*, em que a ferramenta de cálculo verifica automaticamente a influência dos cantos arredondados no cálculo das propriedades da secção idealizada, definindo se a sua influência é ou não desprezável e, a necessidade de corrigir ou não as suas propriedades, em função do valor do fator de redução δ . Nesta fase são também definidos os valores das larguras idealizadas da secção idealizada e as propriedades da secção transversal bruta (idealizada).

No que ao exemplo aplicativo diz respeito, como apresentado na Figura 3.20, a influência dos cantos arredondados pode ser desprezada no cálculo das propriedades da secção idealizada, sendo considerados os valores das propriedades da secção idealizada (bruta e efetiva) não corrigidos.

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL (Cálculo aproximado (Cláusula 5.1 da EN 1993-1-3))

Verificação da influência dos cantos arredondados (Cláusula 5.1(3) da EN1993-1-3)

A influência dos cantos arredondados pode ser desprezada, segundo a Cláusula 5.1(3) da EN 1993-1-3, desde que verificadas as seguintes condições: $r/t_{min} \leq 5$ e $r/b_{e1} \leq 0,10$

✓ 1,22 ≤ 5

✓ 0,08 ≤ 0,10

Pode ser considerada uma secção idealizada, desprezando a influência dos cantos arredondados

Factor de redução δ

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL APROXIMADA

Propriedades geométricas da secção transversal bruta (Segundo o anexo C da EN1993-1-3)

Espessura e Larguras idealizadas (Cláusula 5.1 e (5) da EN 1993-1-3)

b_{e1} (mm)	<input type="text" value="37,50"/>	b_{e2} (mm)	<input type="text" value="13,75"/>	h_x (mm)	<input type="text" value="97,50"/>
b_{e1} (mm)	<input type="text" value="37,50"/>	b_{e2} (mm)	<input type="text" value="13,75"/>	t (mm)	<input type="text" value="2,45"/>

A_{gr} (mm ²)	490,00	$I_{x,gr}$ (mm ⁴)	0,00	$I_{y,gr}$ (mm ⁴)	1324751,30
$Y_{0,gr,SH}$ (mm)	12,19	α_{SH} (°)	0,00	$Y_{1,SH}$ (mm)	-52,82
$Z_{0,gr,SH}$ (mm)	48,75	$I_{z,gr}$ (mm ⁴)	980,41	$Z_{1,SH}$ (mm)	0,00
$Y_{1,SH}$ (mm)	-31,02	$I_{yy,SH}$ (mm ⁴)	235056655	$W_{pl,y,min,SH}$ (mm ³)	14910,09
$Z_{1,SH}$ (mm)	0,00	$i_{y,SH}$ (mm)	39,00	$W_{pl,y,max,SH}$ (mm ³)	14910,09
$I_{1,SH}$ (mm ⁴)	745131,77	$i_{z,SH}$ (mm)	14,85	$W_{pl,z,min,SH}$ (mm ³)	8059,40
$I_{2,SH}$ (mm ⁴)	108096,68	$i_{0,SH}$ (mm)	52,00	$W_{pl,z,max,SH}$ (mm ³)	4073,36

Verificação da necessidade de considerar a influência dos cantos arredondados no cálculo das propriedades da secção transversal (bruta e efetiva)

Propriedades da secção idealizada (bruta) corrigida ou não corrigida consoante a necessidade ou não de considerar a influência dos cantos arredondados

Figura 3.20 –Propriedades da secção bruta (Interface da *Cold-Formed Design*)

Por fim, numa última fase do pré-dimensionamento do elemento estrutural apresentada na Figura 3.21, é mostrada uma nova fase *input/output*, em que cabe ao utilizador definir os esforços atuantes nas duas extremidades do elemento estrutural, segundo a convenção para os eixos referenciais e os respetivos sentidos positivos/negativos dos esforços mostrados na informação adicional exibida na interface apresentados na Figura 3.21. Após inseridos os valores, os diagramas de esforços lineares são automaticamente traçados pela *Cold-Formed Design* e apresentados na interface (ver Figura 3.21).

No exemplo aplicativo o elemento estrutural está sujeito a compressão axial uniforme e ainda a um esforço transversal residual.

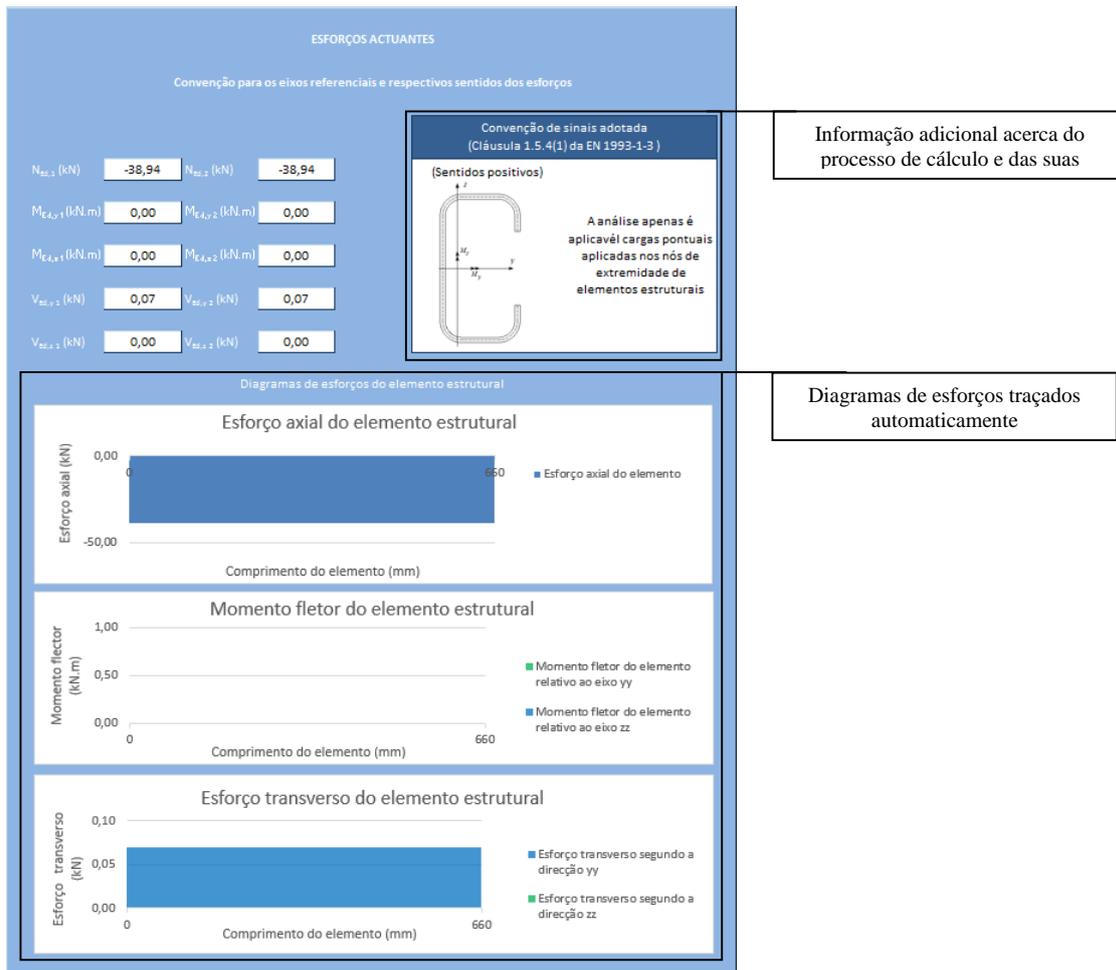


Figura 3.21 – Esforços de cálculo e diagramas de esforços (Interface da *Cold-Formed Design*)

Em seguida, numa nova fase exclusivamente *output* apresentada na Figura 3.22, é verificada a influência dos efeitos dos fenómenos de instabilidade local e global na capacidade resistente do elemento estrutural, sendo mostrada a classe e as propriedades efetivas da secção transversal, para além dos valores da carga crítica e do momento crítico de encurvadura. Relativamente ao exemplo aplicativo, a secção transversal mais condicionante do elemento estrutural é de classe 4, sendo mostrados os valores das propriedades efetivas, da carga crítica e do momento crítico de encurvadura.

Por fim, numa última fase *output* do dimensionamento mostrada na Figura 3.23 é apresentada a verificação da segurança do elemento estrutural pré-dimensionado, sendo mostrados os valores dos rácios das verificações de segurança e definido se o elemento estrutural pré-dimensionado satisfaz ou não as condições de segurança. Relativamente aos valores rácios obtidos no exemplo aplicativo, como apresentado na Figura 3.23, estes ditaram que o elemento estrutural satisfaz as condições de segurança.

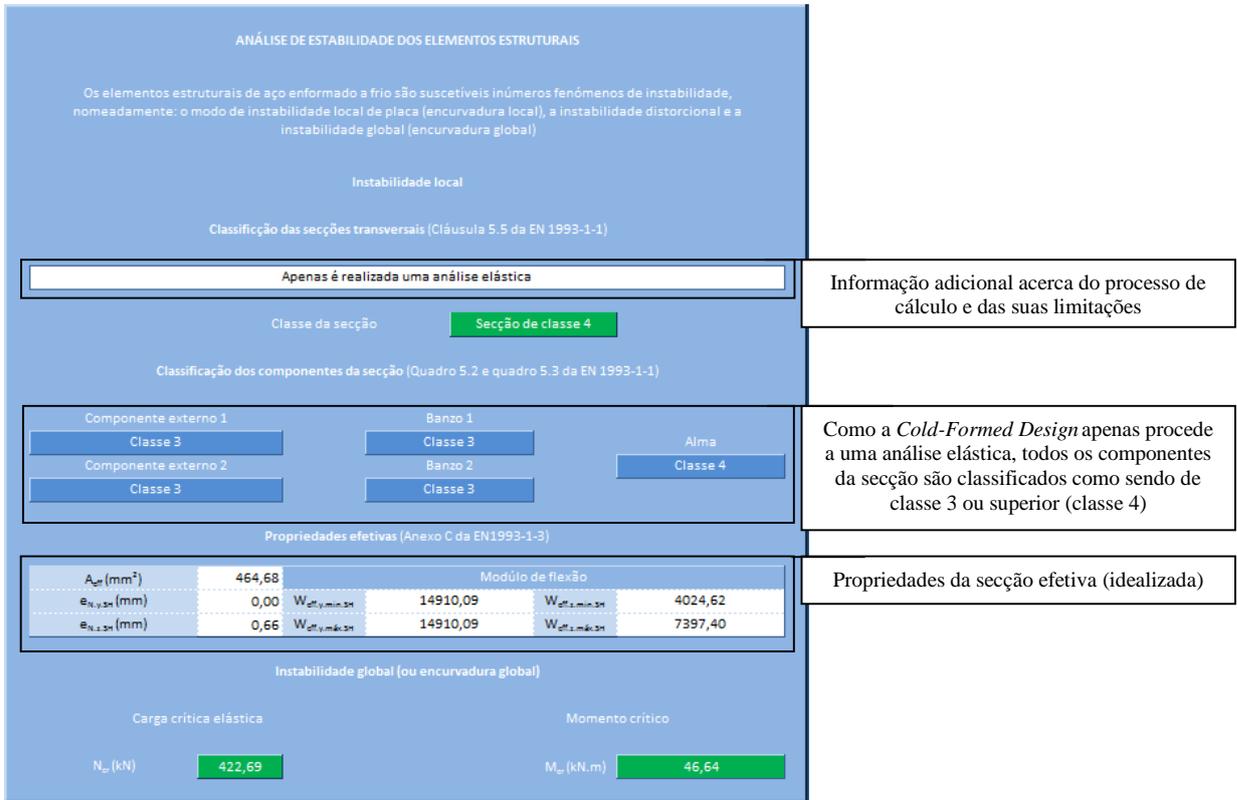


Figura 3.22 – Efeitos da instabilidade local e global (Interface da *Cold-Formed Design*)

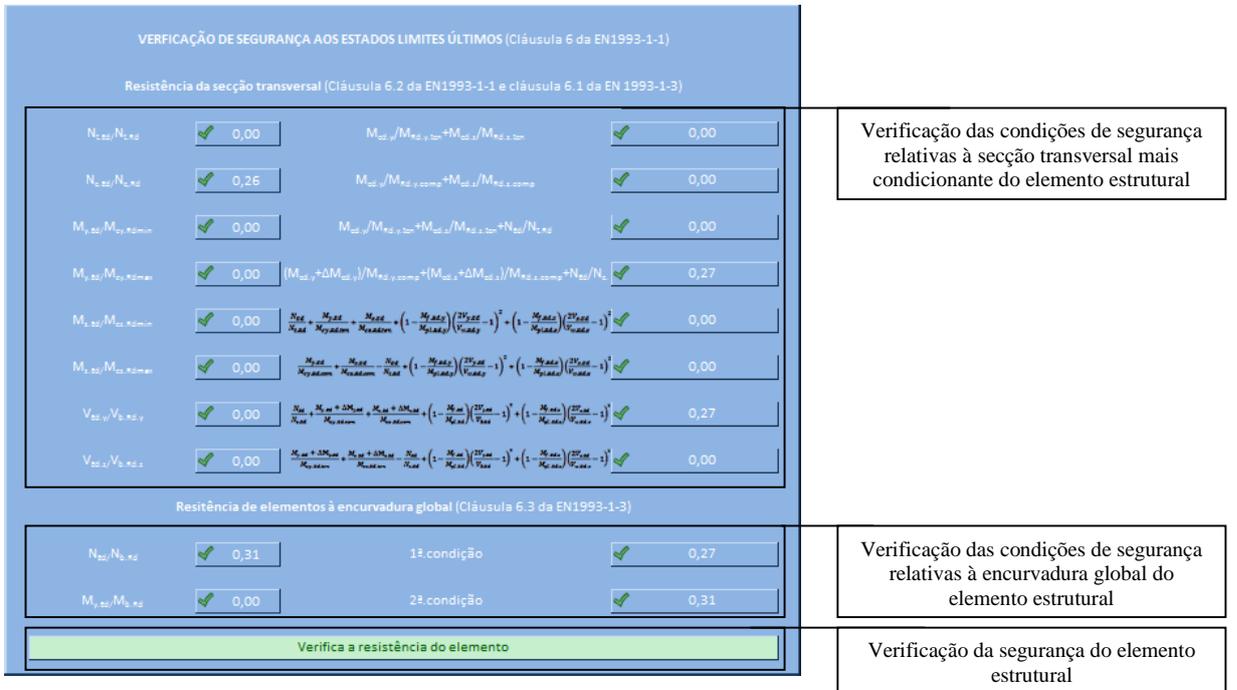


Figura 3.23 – Verificação da segurança do elemento estrutural (Interface da *Cold-Formed Design*)

Após verificar a segurança estrutural do elemento, pode ser iniciado o processo de otimização por forma a aumentar a sua eficiência estrutural. O processo de otimização estrutural apresentado na Figura 3.24 é uma fase *input/output*, em que cabe ao utilizador iniciar clicando no botão . Iniciado o processo de otimização, cabe ao utilizador alterar da forma mais conveniente as dimensões da secção transversal apresentadas na Figura 3.15, caso sejam satisfeitas as condições de segurança e o utilizador considere conveniente para a otimização, clicando no botão podem ser inseridas as novas secções transversais à amostra. Em casos particulares em que são inseridos valores das dimensões da secção transversal, que resultem numa secção menos otimizada e cujo valor da área da secção transversal não seja o menor de entre a amostra, o utilizador pode de imediato recuperar as dimensões e os valores de cálculo associados à secção transversal que tem a menor área de entre a amostra, clicando no botão . É também de referir, que sempre que o utilizador deseje limpar o gráfico para iniciar uma nova amostra deve clicar no botão . Na Figura 3.24 são ainda apresentados os valores relativos à amostra no gráfico que relaciona as áreas com as secções transversais da amostra. Na Figura 3.24 são também apresentadas num quadro de valores as características geométricas associadas da secção transversal mais eficiente, de entre a amostra e, ainda, a redução da quantidade de aço conseguida com o processo de otimização.

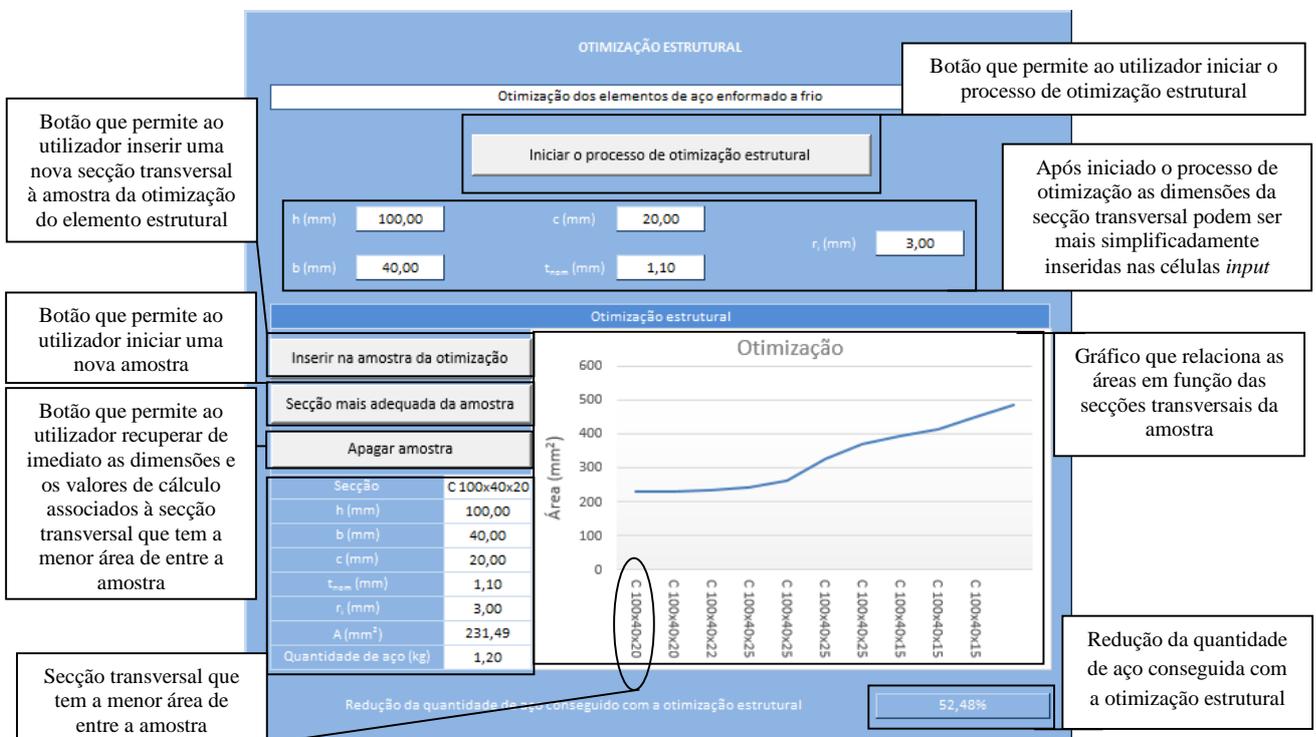


Figura 3.24 – Processo iterativo de convergência e aproximação à solução otimizada
(Interface da *Cold-Formed Design*)

Finalizado o processo de otimização apresentado na Figura 3.24, pode concluir-se que de entre a amostra a solução mais adequada para a secção transversal do elemento estrutural é um C 100x40x20 com uma chapa de espessura de 1,1 mm e um raio interno de curvatura dos cantos arredondados de 3mm. No entanto, como as etapas de cálculo são idênticas em cada iteração do processo de otimização, apenas são mostrados os valores característicos de dimensionamento para o elemento pré-dimensionado, exceto no caso dos valores relativos à verificação da segurança, em que também foram apresentados na Figura 3.25 os valores relativos ao elemento estrutural otimizado, onde se pode concluir que o processo de otimização resultou numa taxa de aproveitamento do elemento estrutural muito superior à inicialmente proposta no pré-dimensionamento (ver Figura 3.23).

VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (Cláusula 6 da EN1993-1-1)			
Resistência da secção transversal (Cláusula 6.2 da EN1993-1-1 e cláusula 6.1 da EN 1993-1-3)			
$N_{t,ed}/N_{t,rd}$	✓ 0,00	$M_{ed,y}/M_{pl,y,lim} + M_{ed,z}/M_{pl,z,lim}$	✓ 0,00
$N_{t,ed}/N_{t,rd}$	✓ 0,79	$M_{ed,y}/M_{pl,y,comp} + M_{ed,z}/M_{pl,z,comp}$	✓ 0,00
$M_{y,ed}/M_{y,rd,lim}$	✓ 0,00	$M_{ed,y}/M_{pl,y,lim} + M_{ed,z}/M_{pl,z,lim} + N_{t,ed}/N_{t,rd}$	✓ 0,00
$M_{y,ed}/M_{y,rd,lim}$	✓ 0,00	$(M_{ed,y} + \Delta M_{ed,y})/M_{pl,y,comp} + (M_{ed,z} + \Delta M_{ed,z})/M_{pl,z,comp} + N_{t,ed}/N_{t,rd}$	✓ 0,97
$M_{z,ed}/M_{z,rd,lim}$	✓ 0,00	$\frac{N_{t,ed}}{N_{t,rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,lim}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,lim}} + \left(1 - \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,lim}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,lim}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,z}} - 1\right)^2$	✓ 0,00
$M_{z,ed}/M_{z,rd,lim}$	✓ 0,00	$\frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,comp}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,comp}} + \frac{N_{t,ed}}{N_{t,rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,comp}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,comp}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,z}} - 1\right)^2$	✓ 0,00
$V_{ed,y}/V_{s,rd,y}$	✓ 0,01	$\frac{N_{t,ed}}{N_{t,rd}} + \frac{M_{y,ed} + \Delta M_{y,ed}}{M_{pl,y,lim}} + \frac{M_{z,ed} + \Delta M_{z,ed}}{M_{pl,z,lim}} + \left(1 - \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,lim}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,lim}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,z}} - 1\right)^2$	✓ 0,97
$V_{ed,y}/V_{s,rd,y}$	✓ 0,00	$\frac{M_{y,ed} + \Delta M_{y,ed}}{M_{pl,y,comp}} + \frac{M_{z,ed} + \Delta M_{z,ed}}{M_{pl,z,comp}} + \frac{N_{t,ed}}{N_{t,rd}} + \left(1 - \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,y,comp}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,y}} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,z,comp}}\right) \left(\frac{2N_{t,ed}}{V_{c,rd,z}} - 1\right)^2$	✓ 0,00
Resistência de elementos à encurvatura global (Cláusula 6.3 da EN1993-1-3)			
$N_{t,ed}/N_{t,rd}$	✓ 0,88	1ª condição	✓ 0,92
$M_{y,ed}/M_{y,rd}$	✓ 0,00	2ª condição	✓ 0,99
Verifica a resistência do elemento			

Figura 3.25 – Verificação da segurança do elemento estrutural

4 ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS MODULARES PLANAS

4.1 Considerações gerais

No presente capítulo é apresentada a análise e otimização das estruturas modulares de aço enformado a frio. As estruturas modulares consistem em estruturas porticadas-treçadas e são parte integrante de estruturas resistentes relativas a projetos de moradias residenciais com dois pisos. A estrutura base dos pórticos é composta por dois pilares com secção tubular e por subestruturas (pilares-treça e vigas-treça) de aço enformado a frio. Como apresentado na Figura 4.1 e no Quadro 4.1, a altura dos pilares tubulares e das estruturas modulares é dada em função da altura das vigas-treça e de uma altura livre de 2,4 m.

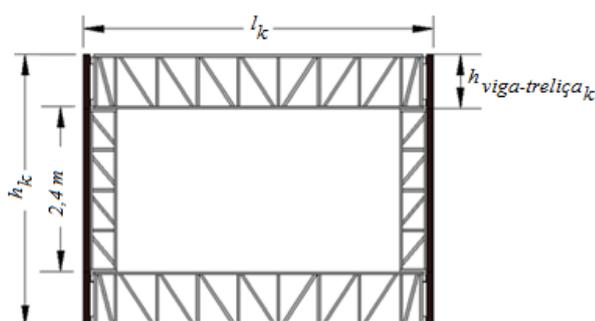


Figura 4.1 – Vista em alçado de uma estrutura modular (tipo)

Quadro 4.1 – Características geométricas das estruturas modulares

Referência do modelo (2D)	l_k (m)	h_k (m)	$h_{viga-treça k}$ (m)
Modelo A	3,4	3,6	0,6
Modelo B	4,0	3,8	0,7
Modelo C	5,2	4,0	0,8
Modelo D	6,4	4,2	0,9

A configuração geométrica dos pilares-treça de aço enformado a frio apresentada na Figura 4.2 é igual para a generalidade das estruturas modulares, enquanto no caso das vigas-treça de aço enformado a frio apresentadas na Figura 4.3, a sua configuração geométrica varia consoante a estrutura modular.

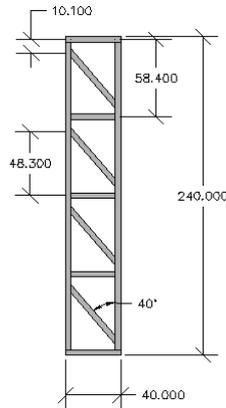


Figura 4.2 – Geometria dos pilares-treliça (unidade de medida em cm)

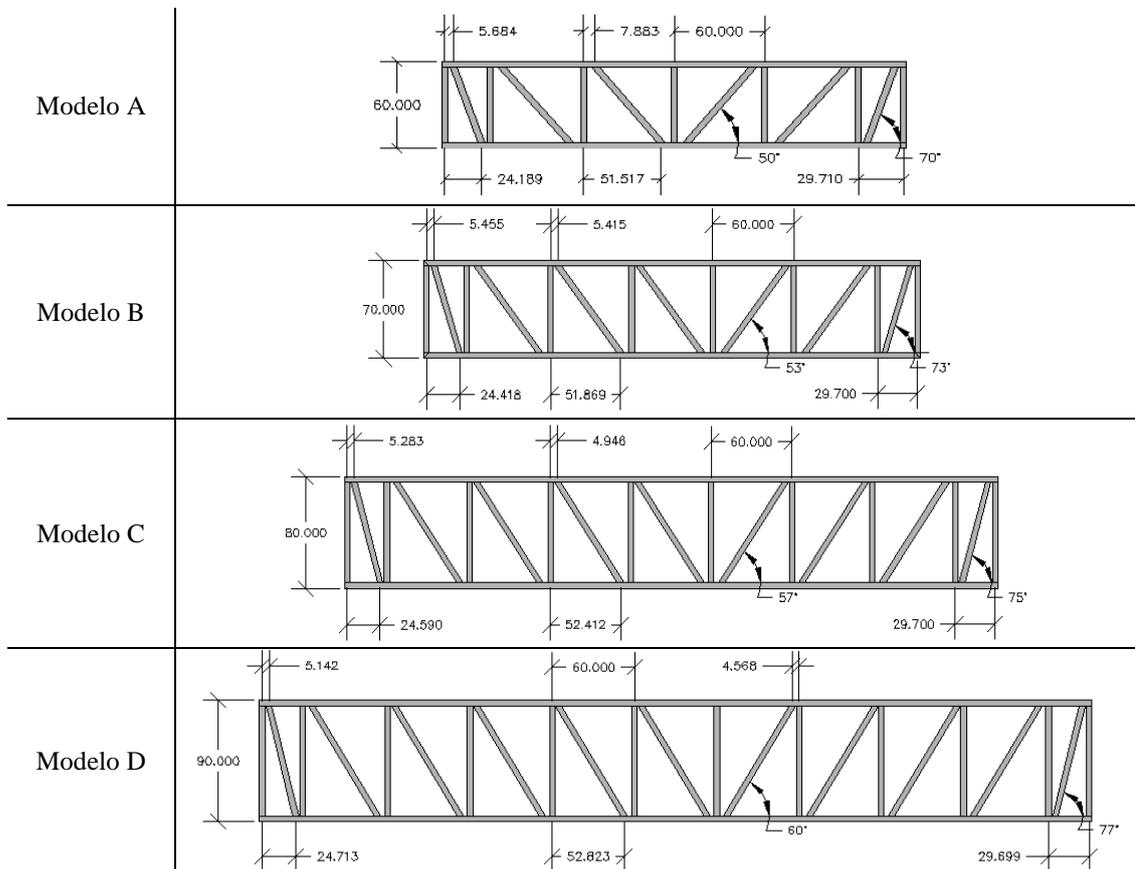


Figura 4.3 – Geometria das vigas-treliça (unidade de medida em cm)

As subestruturas são compostas por elementos de aço enformado a frio de aço S320 GD galvanizado (*EN10147*), com uma secção transversal em “C” com reforços de extremidade simples, enquanto os pilares com secção tubular são de aço S275 (*EN10219*) e têm uma secção transversal “RHS”. No que se refere às ligações da estrutura, as ligações internas das

subestruturas de aço enformado a frio, como apresentado na Figura 4.4, são ligações aparafusadas, não tendo capacidade de transmitir momento-fletor. Quanto às ligações das subestruturas de aço enformado a frio aos pilares tubulares, estas são caracterizadas pelas ligações dos pilares-treliça serem aparafusadas aos próprios pilares tubulares, enquanto as vigas-treliça como apresentado na Figura 4.5, são aparafusadas a uma peça previamente soldada aos pilares tubulares, por forma a facilitar o encaixe das vigas-treliça.



Figura 4.4 – Pormenorização das ligações internas das subestruturas treliçadas



Figura 4.5 – Pormenorização das ligações das vigas-treliça aos pilares tubulares: (a) Vista lateral; (b) Vista superior

4.2 Aspetos gerais de uma análise global de estruturas

Na verificação da segurança de uma estrutura é imperativo determinar, rigorosamente, os esforços de cálculo (esforços internos), as deformações globais e a capacidade resistente dos seus elementos estruturais. O objetivo de uma análise global é determinar, adequadamente, os esforços internos e as deformações globais de uma estrutura sujeita a um estado limite, determinado pela quantificação e combinação de ações de acordo com o *ECO*.

A análise global de esforços internos e deformações globais numa estrutura, e em particular numa estrutura metálica, depende fundamentalmente das suas características de deformabilidade e rigidez, mas também da estabilidade global e da estabilidade dos seus

elementos, do comportamento das secções transversais, do comportamento das ligações, das imperfeições e da deformabilidade dos apoios (Simões, 2007).

A análise global de esforços internos e deformações globais numa estrutura deve ser baseada em modelos de cálculo coerentes, que devem refletir adequadamente o comportamento da estrutura no estado limite considerado. Estes modelos de cálculo devem revelar o comportamento das ligações e os efeitos da interação estrutura-terreno. Numa modelação estrutural deve, ainda, ser considerado o eixo dos elementos adequado ao tipo de carregamento, os efeitos das excentricidades e nos casos de elementos sujeitos a instabilidade local pode, ainda, ser necessário considerar a redução da rigidez na modelação estrutural.

4.2.1 Imperfeições

Em geral, as estruturas metálicas contêm imperfeições, nomeadamente: tensões residuais, imperfeições geométricas, como a falta de verticalidade, de linearidade, de ajuste e de planura e, ainda, as excentricidades nas ligações, etc.. Estes diversos tipos de imperfeições introduzem esforços secundários adicionais, que devem ser considerados na análise global e no dimensionamento das estruturas.

Na análise global e no dimensionamento das estruturas metálicas devem ser consideradas (i) imperfeições locais dos elementos, e ainda, (ii) imperfeições globais em pórticos e sistemas de contraventamento. O *EC3-1-1* traduz os efeitos dos diversos tipos de imperfeições com base no conceito de “imperfeição geométrica equivalente”, exceto quando as imperfeições sejam incluídas nas expressões utilizadas na verificação da segurança dos elementos estruturais, como no caso das imperfeições dos elementos que, segundo a *cláusula 5.3.4(1) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) podem ser desprezadas na análise global, desde que sejam posteriormente dimensionados à encurvadura global de acordo com a *EC3-1-1*.

A *cláusula 5.3.2 do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) estabelece que em estruturas porticadas suscetíveis a instabilizar segundo um modo com deslocamentos laterais, as imperfeições globais devem ser consideradas com base no conceito de “imperfeição geométrica equivalente”, traduzida pela falta de verticalidade global da estrutura. A aplicação das cargas horizontais equivalentes deve ser feita de modo a criar o efeito mais desfavorável à estrutura. A falta de verticalidade global da estrutura apresentada na Figura 4.6 é definida pelo ângulo ϕ dado pela seguinte expressão:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (4.1a)$$

Em que,

$$\alpha_h = 2/\sqrt{h} \quad \text{com} \quad 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (4.1b)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot (1 + 1/m)} \quad (4.1c)$$



Figura 4.6 – “Imperfeição geométrica equivalente” (EN1993-1-1, 2010)

4.2.2 Estabilidade global de estruturas

Os fenómenos de instabilidade global da estrutura contrariamente aos restantes fenómenos de instabilidade (globais e locais dos elementos) que apenas envolvem perda de capacidade resistente (N_{Rd}, M_{Rd}) podem ainda influenciar os esforços atuantes (N_{Ed}, M_{Ed}), devido à suscetibilidade que a estrutura pode ter para a deformabilidade lateral. A análise global de esforços internos e deformações globais de uma estrutura, consoante os efeitos da configuração deformada da estrutura, pode ser de primeira ou segunda ordem.

- Numa análise global de primeira ordem os esforços internos são obtidos a partir da geometria inicial indeformada da estrutura;
- Numa análise global de segunda ordem os esforços internos são influenciados pela configuração deformada da estrutura.

Os esforços internos e as deformações globais de uma estrutura podem ser determinados com base numa análise de primeira ordem da estrutura, desde que a influência dos efeitos da configuração deformada (efeitos de segunda ordem) da estrutura seja pouco significativa e caso o valor do multiplicador crítico da estrutura α_{cr} satisfaça a seguinte condição (4.2), conforme estabelecido na *cláusula 5.2.1(3) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010).

$$\begin{cases} \alpha_{cr} \geq 10 & \text{se análise elástica} \\ \alpha_{cr} \geq 15 & \text{se análise plástica} \end{cases} \quad (4.2)$$

Em estruturas porticadas regulares (pórticos com cargas verticais e horizontais, com rigidezes semelhantes ao nível dos andares), onde o primeiro modo de instabilidade seja predominante (Simões, 2007), a *cláusula 5.2.1(3) do EC3-1-1* (EN1993-1-1, 2010) estabelece que a influência dos efeitos de segunda ordem associados às cargas verticais podem ser incorporadas de forma

simplificada no cálculo dos esforços internos, desde que o valor do multiplicador crítico da estrutura α_{cr} seja superior a 3 ($\alpha_{cr} > 3$). Este processo consiste em amplificar os efeitos de primeira ordem devidos às cargas horizontais, multiplicando-os por um fator dado pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{(1 - 1/\alpha_{cr})} \quad (4.3)$$

4.2.3 Metodologia de análise considerando o comportamento não linear do material

A análise global de uma estrutura pode ser baseada numa análise elástica ou numa análise plástica, considerando o comportamento não linear do material. A análise elástica fundamenta-se na hipótese de que a relação tensão-deformação do material é linear e no facto de a tensão atuante (ou a tensão equivalente) ser inferior à tensão de cedência, em qualquer zona da estrutura, qualquer que seja o nível de tensão atuante. Este tipo de análise pode ser usado na generalidade das estruturas, contrariamente, uma análise plástica que apenas é aplicável a estruturas hiperestáticas, em que os elementos estruturais têm uma capacidade de rotação suficiente para permitir as redistribuições de momentos fletores necessárias e em que seja possível assegurar a estabilidade dos elementos onde se formem as rótulas plásticas. A análise plástica, por sua vez, pressupõe a plastificação das secções transversais mais condicionantes, através da formação de rótulas plásticas (plastificação por flexão), e a redistribuição de esforços para zonas menos esforçadas. Este tipo de análise além do limite elástico depende ainda do comportamento reológico do material.

A definição da análise global (elástica ou plástica), para além da caracterização da estrutura como isostática ou hiperestática depende, ainda, da resistência e capacidade de rotação das secções transversais dos elementos e da rigidez das ligações.

4.3 Modelação e análise global das estruturas modulares planas

4.3.1 Quantificação e combinação de ações

4.3.1.1 Quantificação de ações

As ações em estruturas podem ser de carácter permanente G_k , variável Q_k ou acidental A_k . Em seguida são quantificadas as ações consideradas na modelação e análise global das estruturas.

Ações permanentes

Os pesos próprios considerados na análise global foram os seguintes:

- Peso próprio da estrutura modular (quantificadas e contabilizadas automaticamente pelo *software* utilizado na modelação estrutural);
- Peso próprio da laje (estimativa): $3,75 \text{ kg/m}^2$;
- Revestimento interior, incluindo equipamentos: $1,00 \text{ kN/m}^2$;
- Paredes divisórias: $0,50 \text{ kN/m}^2$;
- Revestimento exterior (cobertura): $1,50 \text{ kN/m}^2$.

Sobrecarga de utilização

Como o edifício tem um carácter habitacional, de acordo com o *Quadro 6.1 e Quadro NA-6.2 do EC1* (EN1991-1-1, 2009) é definido como de categoria A e a sobrecarga de utilização assume o valor de $2,00 \text{ kN/m}^2$.

Ação do vento

A ação do vento foi a única ação dinâmica considerada na modelação e análise global das estruturas. Tendo em conta o âmbito do trabalho, a não caracterização da localização do terreno de implantação e da sua morfologia envolvente, foi apenas considerada uma ação horizontal na direção do plano do pórtico, dada pela carga distribuída de valor $1,48 \text{ kN/m}^2$.

4.3.1.2 Combinações de ações

Estados Limites Últimos (ULS)

Nos estados limites últimos, os efeitos das ações de cálculo não devem exceder a resistência de cálculo da estrutura. Em conformidade com o *ECO* (EN1990, 2009), as combinações de ações relativas aos estados limites últimos podem ser fundamentais, sísmicas e acidentais. Porém na análise global apenas foram consideradas as combinações de ações fundamentais.

$$1,35 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5Q_k + \sum_{i > 1} 1,5\psi_{0,i}Q_i \quad (4.4)$$

Relativamente aos coeficientes de redução ψ , de acordo com o *Quadro A1.1 do EC0* (EN1990, 2009) estes devem assumir os valores mostrados no seguinte Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Valor dos coeficientes ψ para edifícios (adaptado da EN1990, 2009)

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de utilização (Categoria A)	0,7	0,5	0,3
Ação do vento em edifícios	0,6	0,2	0

4.3.2 Modelação das estruturas modulares

A modelação das estruturas modulares foi desenvolvida com recurso ao *software* de cálculo estrutural “Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012” (Autodesk, 2012). Na modelação estrutural dos elementos como a base de dados do *software* de cálculo estrutural não contém as configurações geométricas das secções transversais dos elementos de aço enformado a frio, estas tiveram de ser desenhadas e adicionadas à sua própria base de dados.

Algumas das particularidades da modelação estrutural estão relacionadas com o funcionamento das estruturas. Embora na caracterização das estruturas modulares, mais propriamente das suas subestruturas treliçadas, os pontos de intersecção dos seus elementos interiores diagonais e horizontais/verticais com os elementos exteriores verticais/horizontais não sejam exatamente coincidentes, por forma a possibilitar a ligação entre os elementos, nos modelos de cálculo estes pontos de intersecção foram considerados coincidentes, desprezando os efeitos das excentricidades. De facto, esta excentricidade entre os pontos de intersecção é um problema particular desta configuração de ligações, que e requer uma análise particular não abrangida no âmbito desta dissertação.

Outras das particularidades da modelação estrutural estão relacionadas com o funcionamento quase conjunto de alguns dos elementos estruturais, nomeadamente dos elementos de aço enformado a frio do pilar-treliça junto ao pilar tubular, que são aparafusados consecutivamente ao próprio pilar e, ainda, dos elementos de ligação entre os pilares-treliça e vigas-treliça, que são aparafusados entre si. Assim, por forma a simplificar a modelação, como apresentado na Figura 4.7, foi assumido um elemento de aço S275 com secção transversal única composta pela secção de aço enformado a frio e pela secção tubular e um elemento de secção única composta pelas secções transversais dos dois elementos de aço enformado a frio, respetivamente. Em ambos os casos o deslizamento residual existente entre as faces dos elementos estruturais foi desprezado, uma vez que este problema não está inserido no âmbito da dissertação.

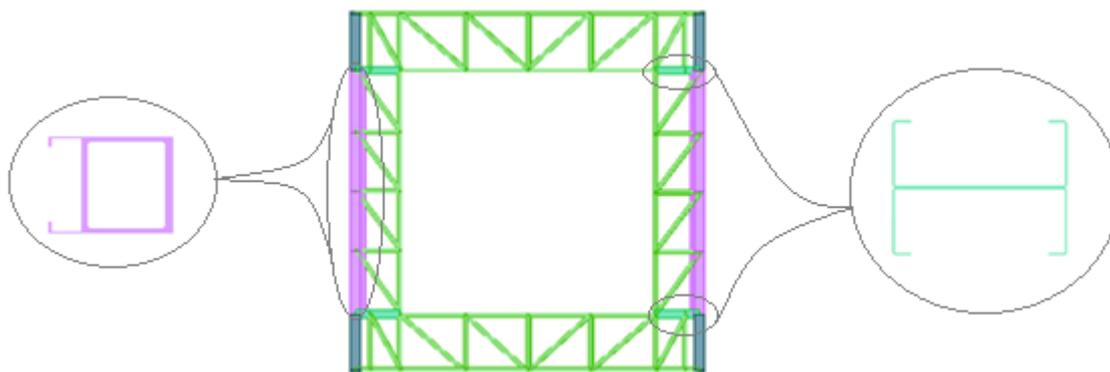


Figura 4.7 – Modelação simplificada da secção transversal do conjunto

Embora a rigidez rotacional das ligações das vigas-treliça aos pilares tubulares possa ser considerável (ligação semicontínua), como cálculo desta rigidez requer uma análise específica da ligação, o que mais uma vez remete para um âmbito não abrangido nesta dissertação, nos modelos de cálculo as ligações internas das subestruturas de aço enformado a frio e as ligações das vigas-treliça aos pilares tubulares foram modeladas como rotuladas (articuladas) e a sua rigidez rotacional foi desprezada. No entanto, é ainda de salientar que apesar das ligações das vigas-treliça aos pilares tubulares terem sido modeladas como rotuladas (articuladas), a rigidez rotacional das ligações na estrutura real resultará numa distribuição de momentos mais favorável do que a obtida nos modelos de cálculo. Resta referir que nos modelos de cálculo foram, ainda, desprezados da interação terreno-estrutura nos esforços de cálculo e os apoios foram modelados como encastrados.

4.3.3 Distribuição do carregamento nos modelos de cálculo

As cargas aplicadas nos modelos de cálculo foram definidas considerando a forma como os esforços são canalizados para as estruturas modulares. A laje de cada piso canaliza os esforços para as estruturas modulares sob a forma de cargas pontuais aplicadas nos elementos verticais das vigas-treliça. Relativamente às fachadas da estrutura foi assumido que os esforços são somente canalizados para as vigas-treliça e posteriormente canalizados para os pilares tubulares. Em ambos os casos, os valores das cargas pontuais foram definidas em função da quantificação de ações (apresentada no ponto 3.2) e da área de influência de cada um dos nós que suporta o pavimento e dos nós de ligação dos pilares tubulares às vigas-treliça. As áreas de influência foram calculadas considerando a largura de influência de cada um dos nós e um comprimento de influência igual ao comprimento do vão dos pórticos. Portanto, nos modelos de cálculo, além do peso próprio da estrutura considerado automaticamente pelo *software* de cálculo estrutural, foram ainda aplicadas cargas pontuais, relativas às restantes ações permanentes, à sobrecarga de utilização e à ação do vento.

4.3.4 Análise global das estruturas

Os esforços internos e as deformações globais são determinados de forma rigorosa desde que a análise global seja adequada e sejam consideradas as imperfeições. Na análise global desenvolvida foram consideradas as imperfeições globais da estrutura, contrariamente às imperfeições dos elementos que foram desprezadas na análise global e posteriormente consideradas no dimensionamento encurvadura global de acordo com a *EC3-1-1*.

Na análise global das estruturas modulares, como os valores do multiplicador crítico da estrutura α_{cr} , determinados com recurso ao *software* de cálculo estrutural, são bastante inferiores a 3 ($\alpha_{cr} < 3$) e como os elementos de aço enformado a frio são, particularmente, suscetíveis à encurvadura local, foi desenvolvida uma análise global elástica de segunda ordem considerando a influência dos efeitos da configuração deformada (efeitos de segunda ordem).

4.4 Otimização das estruturas modulares planas

A otimização das estruturas modulares visa aumentar a sua eficiência estrutural e foi desenvolvida com recurso à implementação da *Cold-Formed Design*, considerando os esforços internos e deformações globais dos modelos de cálculo determinados com base numa análise global elástica de segunda ordem. A otimização estrutural é especificamente direcionada aos elementos de aço enformado a frio. No seu dimensionamento e otimização houve a preocupação das dimensões das suas secções transversais serem coerentes, por forma a facilitar as ligações internas das subestruturas treliçadas, tendo sido adotada uma mesma largura da alma para a generalidade dos seus elementos de aço enformado a frio.

No processo de otimização das estruturas modulares os seus elementos estruturais foram inicialmente pré-dimensionados, adotando uma secção transversal para a generalidade dos elementos de aço enformado a frio e, evidentemente uma outra secção para os elementos tubulares.

No dimensionamento inicial a secção transversal associado ao elemento de aço enformado a frio mais condicionante foi adotada para os restantes elementos de aço enformado a frio e posteriormente foram dimensionados os pilares tubulares. Após verificada a estabilidade das estruturas as características das suas secções transversais dos elementos de aço enformado a frio e dos elementos tubulares obtidas para este dimensionamento inicial são apresentadas no Quadro 4.3 e no Quadro 4.4, respetivamente. No Quadro 4.5 são ainda apresentadas as quantidades de aço de cada uma das estruturas associadas a este dimensionamento “inicial”.

Quadro 4.3 – Secções transversais dos elementos de aço enformado a frio do dimensionamento inicial

Modelo	Secção transversal	Características das secções transversais					
		h (mm)	b (mm)	c (mm)	t (mm)	r _i (mm)	A (mm ²)
A	C 100x40x20	100	40	20	1,7	3	353,68
B	C 100x40x15	100	40	15	2,5	3	487,12
C	C 120x50x25	120	50	25	3	3	758,55
D	C 150x60x30	150	60	30	4	3	1235,40

Quadro 4.4 – Secções transversais dos perfis tubulares

Modelo	Secção transversal	Características das secções transversais		
		b (mm)	t (mm)	A (mm ²)
A	TCAR 100x3,2	100	3,2	1230,3
B	TCAR 100x4	100	4	1528,00
C	TCAR 120x6,3	120	6,3	2850,00
D	TCAR 150x8	150	8	4346,00

Quadro 4.5 – Quantidades de aço das estruturas modulares inicialmente dimensionadas

Modelo	Viga-treliça (kg)	Pilar-treliça (kg)	Aço enformado a frio (kg)	Perfis tubulares (kg)	Total da estrutura (kg)
A	40,46	20,87	122,66	69,56	192,22
B	70,60	28,74	198,68	86,39	285,08
C	152,95	44,76	395,41	178,60	574,01
D	327,08	72,90	799,96	286,68	1086,64

Posteriormente a este dimensionamento inicial dos elementos estruturais, os elementos de aço enformado a frio foram, ainda, agrupados consoante os esforços atuantes e os seus próprios comprimentos de encurvadura. E como em estruturas modulares os trabalhos de execução são maioritariamente desenvolvidos em fábrica por meios mecânicos, reduzindo muito significativamente a probabilidade de existirem eventuais erros, foi adotada uma discretização das estruturas bastante refinada. Os grupos de elementos de aço enformado definidos para os pilares-treliça e para as vigas-treliça são de seguida apresentados na Figura 4.8 e na Figura 4.9, respetivamente. É ainda de referir que nos casos particulares de elementos estruturais que têm um funcionamento quase conjunto, embora na modelação estrutural tenham sido modelados como um elemento único de secção composta pelas secções transversais dos dois elementos, na otimização os elementos de aço enformado a frio dos pilares-treliça junto ao pilares tubulares, foram assumidos com uma secção transversal igual à dos restantes elementos verticais dos pilares-treliça e, os elementos de ligação entre os pilares-treliça e as vigas-treliça, na parte da secção composta referente aos elementos das vigas-treliça foram assumidos como contínuos e de secção transversal igual aos respetivos elementos horizontais, enquanto, na parte da secção

composta relativa ao pilar-treliça, foi assumida uma secção igual às dos restantes elementos horizontais dos pilares-treliça.



Figura 4.8 – Discretização do pilar-treliça para a generalidade das estruturas modulares

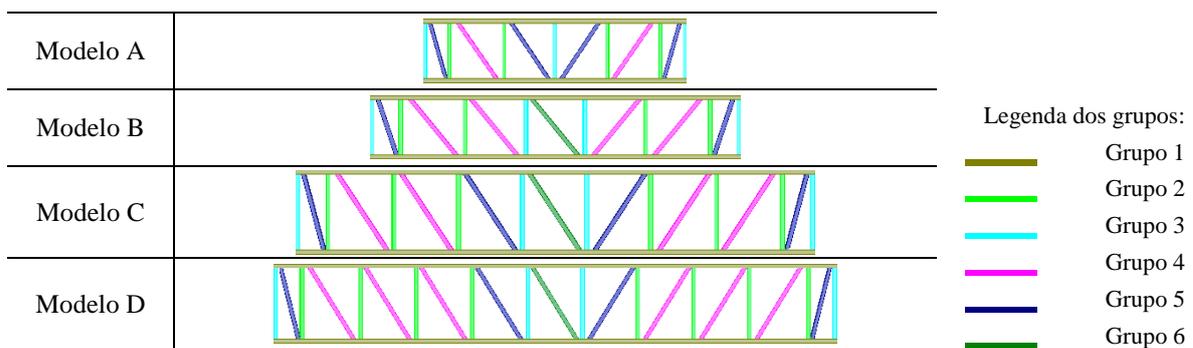


Figura 4.9 – Discretização da viga-treliça

Após definidos os grupos, os elementos de cálculo de cada grupo foram submetidos ao processo de otimização estrutural e as estruturas redefinidas, inserindo os elementos estruturais otimizados nos modelos de cálculo.

Posteriormente os esforços internos e as deformações globais das estruturas foram novamente calculados e de seguida os elementos de cálculo dos grupos foram novamente submetidos ao processo de otimização estrutural. Estes passos foram repetidos até ser atingida uma convergência de valores. Por fim, os elementos tubulares foram novamente dimensionados. No entanto como os valores associados à verificação da segurança não sofreram grandes alterações, as secções transversais dos elementos tubulares não foram alteradas. É ainda de referir que no caso da secção transversal dos elementos tubulares ser alterada, os esforços internos e as deformações globais das estruturas teriam de ser novamente calculados e os elementos de cálculo dos grupos submetidos ao processo de otimização. Uma vez acabada a otimização das

estruturas modulares, as características das secções transversais otimizadas associadas a cada um dos grupos de elementos são apresentadas no Quadro 4.6 e no Quadro 4.7, respetivamente.

Quadro 4.6 – Secções transversais otimizadas dos grupos dos pilares-treliça

Modelo	Grupo	Secção transversal	Características das secções transversais					
			h (mm)	b (mm)	c (mm)	t (mm)	r _i (mm)	A (mm ²)
A	1	C 100x40x20	100	40	20	1,5	3	313,27
	2	C 100x30x10	100	30	10	1	3	170,85
	3	C 100x30x10	100	30	10	1	3	170,85
B	1	C 100x40x20	100	40	20	2	3	413,70
	2	C 100x40x10	100	40	10	1,1	3	209,49
	3	C 100x40x10	100	40	10	1	3	190,85
C	1	C 120x50x15	120	50	15	3	3	698,55
	2	C 120x50x10	120	50	10	1,5	3	343,27
	3	C 120x50x10	120	50	10	1,5	3	343,27
D	1	C 150x60x15	150	60	15	4	3	1115,40
	2	C 150x45x10	150	45	10	2	3	493,70
	3	C 150x45x10	150	45	10	2	3	493,70

Quadro 4.7 – Secções transversais otimizadas dos grupos das vigas-treliça

Modelo	Grupo	Secção transversal	Características das secções transversais					
			h (mm)	b (mm)	c (mm)	t (mm)	r _i (mm)	A (mm ²)
A	1	C 100x40x20	100	40	20	2	3	413,70
	2	C 100x40x15	100	40	15	1,5	3	298,27
	3	C 100x40x10	100	40	10	1	3	190,85
	4	C 100x40x20	100	40	20	1	3	210,85
	5	C 100x30x10	100	30	10	1	3	170,85
B	1	C 100x40x20	100	40	20	2	3	413,70
	2	C 100x40x15	100	40	15	2	3	393,70
	3	C 100x40x10	100	40	10	1,1	3	209,49
	4	C 100x40x10	100	40	10	1,5	3	283,27
	5	C 100x30x10	100	30	10	1	3	170,85
	6	C 100x30x10	100	30	10	1	3	170,85
C	1	C 120x50x15	120	50	15	3	3	698,55
	2	C 120x50x25	120	50	25	2,5	3	637,12
	3	C 120x50x10	120	50	10	1,5	3	343,27
	4	C 120x50x20	120	50	20	2	3	493,70
	5	C 120x40x10	120	40	10	1	3	210,85
	6	C 120x40x10	120	40	10	1	3	210,85
D	1	C 150x60x20	150	60	20	4	3	1155,40
	2	C 150x60x35	150	60	35	3	3	968,55
	3	C 150x45x10	150	45	10	1,5	3	373,27
	4	C 150x45x10	150	45	10	3	3	728,55
	5	C 150x45x10	150	45	10	1,5	3	373,27
	6	C 150x45x10	150	45	10	1,5	3	373,27

A otimização estrutural determinou ganhos de eficiência bastante significativos, sendo as quantidades de aço das estruturas otimizadas, como apresentado no Quadro 4.8, bastante inferiores às quantidades das estruturas inicialmente dimensionadas (ver Quadro 4.5). De facto, a otimização estrutural, como apresentado no Quadro 4.9, resultou numa redução da quantidade de aço enformado a frio das estruturas próxima dos 30%.

Quadro 4.8 – Quantidades de aço das estruturas modulares otimizadas

Modelo	Viga-treliça (kg)	Pilar-treliça (kg)	Aço enformado a frio (kg)	Perfis tubulares (kg)	Total da estrutura (kg)
A	34,15	12,81	93,91	69,56	163,48
B	47,19	15,85	126,08	86,39	212,47
C	106,57	27,06	267,26	178,60	445,85
D	222,85	41,04	527,79	286,68	814,47

Quadro 4.9 – Percentagem de redução da quantidade de aço

Modelo	Viga-treliça (%)	Pilar-treliça (%)	Aço enformado a frio (%)	Total da estrutura (%)
A	15,60%	38,62%	23,44%	14,95%
B	33,15%	44,87%	36,54%	25,47%
C	30,32%	39,54%	32,41%	22,33%
D	31,87%	43,70%	34,02%	25,05%

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Embora a utilização de aço enformado a frio na construção seja sustentável a nível ambiental e muito competitiva a nível económico, revelando ainda inúmeras vantagens associadas à sua leveza, versatilidade e facilidade de aplicação, a forma como as normas europeias apresentam as suas disposições regulamentares (nem sempre evidente e direta), a limitada cobertura de ensaios experimentais às vastas secções transversais de elementos de aço enformado a frio disponíveis no mercado e, principalmente, a complexidade e morosidade inerente ao dimensionamento deste tipo de elementos estruturais têm afastado o interesse dos projetistas na sua utilização na construção.

Assim, um dos principais objetivos desta dissertação foi o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo *Cold-Formed Design*, a qual permite um dimensionamento simples e célere dos elementos de aço enformado a frio.

O presente trabalho permitiu ainda concluir que a liberdade normativa associada à geométrica das secções transversais dos elementos de aço enformado a frio pode conferir um parâmetro muito relevante, que com um estudo adequado de otimização pode ainda resultar em ganhos de eficiência muito significativos, nomeadamente em casos onde os elementos estruturais são solicitados a esforços pouco significativos, em que é permitido adotar secções transversais muito reduzidas, adequadas ao tipo de esforço.

Outra das conclusões deste trabalho é que nos elementos de aço enformado a frio os fenómenos de instabilidade local são, geralmente, condicionantes e a geometria da secção é determinante na definição dos modos de instabilidade. De facto, uma adequada geometria das secções transversais pode conferir um aproveitamento material expressivo. No caso específico das secções transversais analisadas, secções transversais em “C”, estas revelam uma elevada resistência ao esforço axial (tração ou compressão) e à flexão em torno do eixo de maior inércia da secção ($y - y$), enquanto à flexão em torno do eixo $z - z$ apresentam uma resistência muito reduzida. Nestas secções transversais em “C” comprimidas, o seu desempenho estrutural é muito condicionado pela elevada esbelteza das almas e suscetibilidade à ocorrência de encurvadura local.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Finalizado o trabalho são sugeridos alguns temas para potenciais trabalhos futuros que possam ser realizados como complemento ou continuação do tema desta dissertação:

- Relativamente à modelação estrutural e análise global, é sugerido desenvolver mais aprofundadamente os modelos de cálculo, calibrando-os com base em resultados de ensaios experimentais, com a introdução das rigidezes das ligações vigas-treliça aos pilares tubulares e, com a introdução da influência do deslizamento existente entre os elementos de aço enformado a frio dos pilares-treliça junto aos pilares tubulares e os elementos de ligação entre os pilares-treliça e as vigas-treliça de aço enformado a frio. É também sugerido incluir uma análise sísmica nos modelos de cálculo para averiguar a resistência à ação sísmica deste tipo de estruturas;
- Relativamente ao dimensionamento e otimização estrutural, para facilitar uma maior adequação da geometria das secções transversais ao tipo de esforço atuante e, melhorar a suscetibilidade à encurvadura local das paredes da secção transversal comprimidas, é sugerido complementar a ferramenta de cálculo *Cold-Formed Design*, por forma a ser passível de ser implementada numa mais vasta gama de secções transversais, inclusivamente secções transversais mais complexas com reforços intermédios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Autodesk (2012). "Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012", Student Version 2012.

CEN (2006). "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting". European Committee for standardization

CEN (2006). "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements". European Committee for standardization

CEN (2009). "Eurocódigo 0 - Bases para projecto de estruturas".Comité Europeu de Normalização

CEN (2009). "Eurocódigo 1 - Acções em estruturas - Part 1-1: Acções gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios,sobrecargas em edifícios ". Comité Europeu de Normalização

CEN (2010). "Eurocode 3 - Projecto de estruturas de aço - Part 1-1: Regras gerais e regras para edifícios". European Committee for standardization

CEN (2010). "Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Part 1-8: Projeto de ligações". Comité Europeu de Normalização

Dubina, D., Ungureanu, V., Landolfo, R. (2012). "Design of Cold-formed Steel Structures". ECCS-European Convention for Constructional Steelwork,1st Edition, ISBN: 978-92-9147-107-2

ECCS (2008). "Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3", ECCS technical working group TWG 7.5, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels.

Maydl, P. (2004). "Sustainable Engineering: State-of-the-art and Prospects". Structural Engineering International, Vol.14, 3, pp.176 – 180

Silvestre, N. (2012). "Dimensionamento de Perfis enformados a Frio, em Alumínio e Aço Inox". Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Silvestre, N., Camotim, D. (2006). "Análise e dimensionamento de estruturas de aço". Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Simões, R. (2007). "Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas". Associação Portuguesa de Construção Metálica Mista, 2ª.Edição, ISBN: 978-972-98376-9-2

Veríssimo, H. (2008). "Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3". Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa

Yu, WW, LaBoube, R.A. (2010). "Cold-Formed Steel Desing". John Wiley & Sons, Inc., Fourth Edition, ISBN: 978-0-470-46245-4

ANEXO A

O cálculo das propriedades geométricas das secções transversais (brutas e efetivas) é baseado num cálculo aproximado, estabelecido no *anexo C do EC3-1-3* (EN1993-1-3, 2006). Na Figura A.1 é apresentada a discretização da secção idealizada, em que j define os componentes, com $j = 1; \dots; n$ sendo $n = 5$ e i os nós que delimitam os componentes j , com $i = 1; \dots; m$ e $m = 13$. Posteriormente são também mostradas as fórmulas de cálculo das suas propriedades.

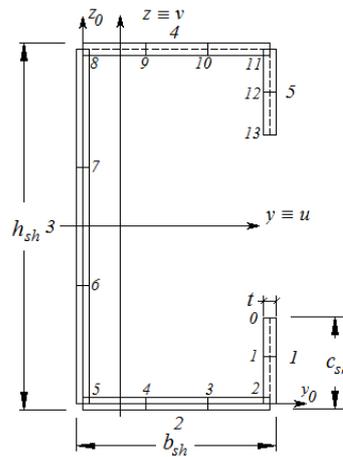


Figura A.1 – Secção transversal idealizada

- Coordenadas do centro de geométrico do elemento j em relação $y_0 - z_0$

$$\begin{cases} y_{0.cg,j} = (y_{0.i,j} + y_{0.i-1,j})/2 \\ z_{0.cg,j} = (z_{0.i,j} + z_{0.i-1,j})/2 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

- Comprimento do elemento j s_j

$$s_j = \sqrt{(y_{0.i,j} - y_{0.i-1,j})^2 + (z_{0.i,j} - z_{0.i-1,j})^2} \quad (\text{A.2})$$

- Área do elemento j dA_j

$$dA_j = t_j \cdot s_j \quad (\text{A.3})$$

- Área da secção transversal A

$$A = \sum_{j=1}^n dA_j \quad (\text{A.4})$$

- Momento estático em torno de y_0 e z_0 no ponto O

$$S_{y0} = \sum_{j=1}^n (z_{0,i,j} + z_{0,i-1,j}) \frac{dA_j}{2} \quad (\text{A.5a})$$

$$S_{z0} = \sum_{j=1}^n (y_{0,i,j} + y_{0,i-1,j}) \frac{dA_j}{2} \quad (\text{A.5b})$$

- Coordenadas do centro geométrico da secção transversal em relação a $y_0 - z_0$

$$\begin{cases} z_{0,cg} = S_{y0}/A \\ y_{0,cg} = S_{z0}/A \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

- Momento de inércia em relação a $y_0 - z_0$

$$I_{y0} = \sum_{j=1}^n [z_{0,i,j}^2 + z_{0,i-1,j}^2 + z_{0,i,j} \cdot z_{0,i-1,j}] \frac{dA_j}{3} \quad (\text{A.7a})$$

$$I_{z0} = \sum_{j=1}^n [y_{0,i,j}^2 + y_{0,i-1,j}^2 + y_{0,i,j} \cdot y_{0,i-1,j}] \frac{dA_j}{3} \quad (\text{A.7b})$$

$$I_{yz0} = \sum_{j=1}^n [2 \cdot y_{0,i-1,j} \cdot z_{0,i-1,j} + 2 \cdot y_{0,i,j} \cdot z_{0,i,j} + y_{0,i,j} \cdot z_{0,i-1,j} + y_{0,i-1,j} \cdot z_{0,i,j}] \frac{dA_j}{6} \quad (\text{A.7c})$$

- Momentos de inércia em relação a $y - z$

$$I_y = I_{y0} - A \cdot z_{0,cg}^2 \quad (\text{A.8a})$$

$$I_z = I_{z0} - A \cdot y_{0,cg}^2 \quad (\text{A.8b})$$

$$I_{yz} = I_{yz0} - \frac{S_{y0} \cdot S_{z0}}{A} \quad (\text{A.8b})$$

- Ângulo entre os eixos $y - z$ e os eixos principais de inércia $u - v$

$$\alpha_j = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } I_z - I_y > 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} = 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot I_{yz}}{I_z - I_y}\right) & \text{se } I_z - I_y > 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} > 0 \\ 1/2 \cdot 90^\circ = 45^\circ & \text{se } I_z - I_y = 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} > 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \left\{ \arctg\left(\frac{2 \cdot I_{yz}}{I_z - I_y}\right) - 180^\circ \right\} & \text{se } I_z - I_y < 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} > 0 \\ 0^\circ & \text{se } I_z - I_y < 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} = 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \left\{ \arctg\left(\frac{2 \cdot I_{yz}}{I_z - I_y}\right) + 180^\circ \right\} & \text{se } I_z - I_y < 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} < 0 \\ -1/2 \cdot 90^\circ = 45^\circ & \text{se } I_z - I_y = 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} < 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot I_{yz}}{I_z - I_y}\right) & \text{se } I_z - I_y > 0 \text{ e } 2 \cdot I_{yz} < 0 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

- Momentos de inércia em relação a $u - v$

$$I_u = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z + \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}^2} \right] \quad (\text{A.10a})$$

$$I_v = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z - \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}^2} \right] \quad (\text{A.10b})$$

- Coordenadas sectoriais do elemento j em relação a $y_0 - z_0$

$$\omega_{0j} = y_{i-1,j} \cdot z_{i,j} - y_{i,j} \cdot z_{i-1,j} \quad (\text{A.11a})$$

$$\omega_{i,j} = \omega_{i-1,j} + \omega_{0j} \quad (\text{A.11b})$$

$$\omega_{0_{i-1,j}} = \omega_{0_{i,j-1}} \quad (\text{A.11c})$$

$$\omega_{0_{i-1,j}|j=1} = \omega_{0_{i-1,1}} = \omega_0 = 0 \quad (\text{A.11d})$$

- Coordenadas sectoriais médias

$$I_\omega = \sum_{j=1}^n (\omega_{i-1,j} + \omega_{i,j}) \frac{dA_j}{2} \quad (\text{A.12})$$

$$\omega_{mean} = I_\omega / A \quad (\text{A.13})$$

- Constantes sectoriais do elemento j em relação a $y_0 - z_0$

$$I_{y\omega 0,j} = (2y_{0,i-1,j} \cdot \omega_{i-1,j} + 2y_{0,i,j} \cdot \omega_{i,j} + 2y_{0,i-1,j} \cdot \omega_{i,j} + 2y_{0,i,j} \cdot \omega_{i-1,j}) \frac{dA_j}{6} \quad (\text{A.14a})$$

$$I_{z\omega 0,j} = (2z_{0,i-1,j} \cdot \omega_{i-1,j} + 2z_{0,i,j} \cdot \omega_{i,j} + 2z_{0,i-1,j} \cdot \omega_{i,j} + 2z_{0,i,j} \cdot \omega_{i-1,j}) \frac{dA_j}{6} \quad (\text{A.14b})$$

$$I_{\omega\omega 0,j} = (\omega_{i-1,j}^2 + \omega_{i,j}^2 + \omega_{i,j} \cdot \omega_{i-1,j}) \frac{dA_j}{3} \quad (\text{A.14c})$$

- Constantes sectoriais em relação a $y_0 - z_0$

$$I_{y\omega 0} = \sum_{j=1}^n I_{y\omega 0,j} \quad (\text{A.15a})$$

$$I_{z\omega 0} = \sum_{j=1}^n I_{z\omega 0,j} \quad (\text{A.15b})$$

$$I_{\omega\omega 0} = \sum_{j=1}^n I_{\omega\omega 0,j} \quad (\text{A.15c})$$

- Constantes sectoriais em relação a $y - z$

$$I_{y\omega} = I_{y\omega 0} - \frac{I_{\omega} \cdot S_{z0}}{A} \quad (\text{A.16a})$$

$$I_{z\omega} = I_{z\omega 0} - \frac{I_{\omega} \cdot S_{y0}}{A} \quad (\text{A.16b})$$

$$I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega 0} - \frac{I_{\omega}^2}{A} \quad (\text{A.16c})$$

- Coordenadas do centro de corte da secção transversal em relação a $y_0 - z_0$

$$\begin{cases} y_{0.sc} = \frac{I_{z\omega} \cdot I_z - I_{y\omega} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \\ z_{0.sc} = \frac{-I_{y\omega} \cdot I_y + I_{z\omega} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

- Inércia de torção de Saint-Venant do elemento j $I_{t,j}$

$$I_{t,j} = \frac{A_j \cdot t_j^3}{3} \quad (\text{A.18})$$

- Inércia de torção de Saint-Venant I_t

$$I_t = \sum_{j=1}^n I_{t,j} \quad (\text{A.19})$$

- Módulo de torção W_t

$$W_t = \frac{I_t}{\min(t_j)} \quad (\text{A.20})$$

- Constante de empenamento I_w

$$I_w = I_{\omega\omega} - z_{0.sc} \cdot I_{y\omega} + y_{0.sc} \cdot I_{z\omega} \quad (\text{A.21})$$

- Coordenadas sectoriais em relação ao centro de corte

$$\omega_{s.i,j} = \omega_{i,j} - \omega_{mean} - z_{0.sc} \cdot (y_{0.i,j} - y_{0.cg}) - y_{0.sc} \cdot (z_{0.i,j} - z_{0.cg}) \quad (\text{A.22})$$

- Máxima coordenada sectorial e constante de empenamento

$$\omega_{max} = \max(\omega_{s.i,j}) \quad (\text{A.23})$$

$$W_W = \frac{I_w}{\omega_{max}} \quad (\text{A.24})$$

- Coordenadas do centro de corte da secção transversal em relação a $y - z$

$$\begin{cases} y_{sc} = y_{0.sc} - y_{0.cg} \\ z_{sc} = z_{0.sc} - z_{0.cg} \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

- Inércia polar relativa ao centro de corte I_p

$$I_p = I_y + I_z + A \cdot (y_{sc}^2 + z_{sc}^2) \quad (\text{A.26})$$

- Coordenadas do nó i do elemento j em relação $y - z$

$$\begin{cases} y_{i,j} = y_{0,i,j} - y_{0,cg,j} \\ z_{i,j} = z_{0,i,j} - z_{0,cg,j} \end{cases} \quad (\text{A.27})$$

- Coordenadas do nó i do elemento j em relação $u - v$

$$\begin{cases} u_{i,j} = y_{i,j} \cdot \cos(-\alpha) - z_{i,j} \cdot \sin(-\alpha) \\ v_{i,j} = y_{i,j} \cdot \sin(-\alpha) - z_{i,j} \cdot \cos(-\alpha) \end{cases} \quad (\text{A.28})$$

- Centro geométrico do elemento j em relação $u - v$

$$\begin{cases} u_{cg,j} = \frac{(u_{i,j} + u_{i-1,j})}{2} \\ v_{cg,j} = \frac{(v_{i,j} + v_{i-1,j})}{2} \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

- Distância em u e v das coordenadas das extremidades do elemento j

$$\begin{cases} \Delta u_j = u_{i,j} - u_{i-1,j} \\ \Delta v_j = v_{i,j} - v_{i-1,j} \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

- Fatores de assimetria u_i e v_i da secção transversal

$$\int_A (u^2 + v^2) \cdot u \cdot dA \approx \sum_{j=1}^n \left[(u_{cg,j})^3 + u_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j^2}{4} + v_{cg,j}^2 + \frac{\Delta v_j^2}{12} \right] + v_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j \cdot \Delta v_j}{6} \right] \right] \cdot dA_j \quad (\text{A.31a})$$

$$\int_A (u^2 + v^2) \cdot v \cdot dA \approx \sum_{j=1}^n \left[(v_{cg,j})^3 + v_{cg,j} \left[\frac{\Delta v_j^2}{4} + u_{cg,j}^2 + \frac{\Delta u_j^2}{12} \right] + u_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j \cdot \Delta v_j}{6} \right] \right] \cdot dA_j \quad (\text{A.31b})$$

$$u_j = u_{sc} - \frac{0,5}{I_u} \sum_{j=1}^n \left[(u_{cg,j})^3 + u_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j^2}{4} + v_{cg,j}^2 + \frac{\Delta v_j^2}{12} \right] + v_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j \cdot \Delta v_j}{6} \right] \right] \cdot dA_j \quad (\text{A.32a})$$

$$v_j = v_{sc} - \frac{0,5}{I_v} \sum_{j=1}^n \left[(v_{cg,j})^3 + v_{cg,j} \left[\frac{\Delta v_j^2}{4} + u_{cg,j}^2 + \frac{\Delta u_j^2}{12} \right] + u_{cg,j} \left[\frac{\Delta u_j \cdot \Delta v_j}{6} \right] \right] \cdot dA_j \quad (\text{A.32b})$$

ANEXO B

O processo de validação da ferramenta de cálculo *Cold-Formed Design* foi baseado no confronto e confirmação de resultados de exercícios aplicativos da publicação da *ECCS* (Dubina et al, 2012; ECCS, 2008) e dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012). De seguida são mostrados os exercícios aplicativos adotados na validação do *Cold-Formed Design*, sendo em cada exercício inicialmente mostrados os seus dados e posteriormente apresentados e comparados os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* e os valores definidos nas publicações da *ECCS* (Dubina et al, 2012; ECCS, 2008), ou nos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012).

B.1 Validação do cálculo das propriedades materiais

O cálculo das propriedades materiais foi validado pelo exercício aplicativo 2.1 da *ECCS* (Dubina et al, 2012) e os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* são idênticos aos definidos na publicação. No que se refere ao exercício aplicativo, este trata do cálculo das propriedades de uma secção transversal de geometria em “C”, resultado da dobragem de uma chapa de aço *S280GD+Z (EN10326)*, com o processo de fabrico de laminagem a frio ($k = 7$). No Quadro B.1 são mostradas as dimensões da secção transversal, enquanto no Quadro B.2 são mostradas as espessuras da chapa, em que, de acordo com o processo de cálculo da *Cold-Formed Design* se pode concluir que a espessura da chapa é abrangida pela *EC3-1-3*. Assim no Quadro B.3 são mostradas as propriedades materiais. Por fim, no Quadro B.4 são apresentados os valores obtidos para a área bruta da secção transversal e para a sua tensão de cedência média.

Quadro B.1 – Dimensões geométricas da secção transversal

h (mm)	120
b (mm)	40
c (mm)	15
t_{nom} (mm)	2
r_i (mm)	3

Quadro B.2 – Verificação da abrangência da espessura da chapa pela *EC3-1-3*

$t_{metallic\ coatings}$ (mm)	0,04
tol (%)	2
t_{cor} (mm)	1,96
Espessura abrangida pela <i>EC3-1-3</i>	

Quadro B.3 – Propriedades materiais

E (N/mm^2)	210000	f_{yb} (N/mm^2)	280
ν	0,3	f_u (N/mm^2)	360

Quadro B.4 – Tensão de cedência média da secção transversal

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A (mm^2)	435,12	435
f_{ya} (N/mm^2)	299,78	300

B.2 Validação da classificação das secções transversais

A classificação das secções transversais foi validada com base num exercício aplicativo dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012). Embora os resultados obtidos não sejam exatamente iguais, uma vez que nos apontamentos técnicos a classe da secção é calculada em função das larguras nominais das paredes da secção transversal, enquanto no processo de cálculo a classe da secção é calculada em função das suas larguras idealizadas, como os resultados são praticamente idênticos, este exercício permite validar o processo de cálculo da *Cold-Formed Design*. Relativamente ao exercício aplicativo, este remete para a classificação de uma secção transversal com geometria em “C” e sujeita a flexão em torno do eixo de maior inércia ($y - y$). As dimensões geométricas da secção transversal e as propriedades materiais são apresentadas no Quadro B.5. Enquanto, no Quadro B.6 e no Quadro B.7 são mostrados os valores obtidos para as características específicas da classificação e, a classe associada a cada uma das paredes comprimidas da secção transversal. Os valores obtidos para as características específicas relativas à classificação do reforço e a sua classe são, por sua vez, apresentados no Quadro B.8. No entanto, no caso particular do reforço é de salientar que, embora o reforço seja de classe 2, como mencionado anteriormente, no processo de cálculo todos os componentes com classe igual ou inferior a 3 são classificados como de classe 3. Por fim, resta referir que, com base na maior classe associada às paredes comprimidas da secção transversal, a secção transversal é de classe 4.

Quadro B.5 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	200	t_{nom} (mm)	1,55
b (mm)	70	$t_{metallic\ coatings}$ (mm)	0,05
c (mm)	16	Aço S235	
r_i (mm)	5	f_{yb} (N/mm^2)	235
tol (%)	5	ϵ	1

Quadro B.6 – Classificação do banzo comprimido

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
b/t	45,633	43,42
Ψ	1	1
$(b/t)_{lim}^{elas}$	42,000	42
	Banzo de classe 4	Banzo de classe 4

Quadro B.7 – Classificação da alma comprimida

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
h/t	132,300	130,1
Ψ	-1	-1
$(h/t)_{lim}^{elas}$	124,000	124
	Alma de classe 4	Banzo de classe 4

Quadro B.8 – Classificação do reforço comprimido

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
c/t	10,150	9,1
Ψ	0,847	(Aprox.)1
$(c/t)_{lim}^{elas}$	14,849	10
	Reforço de classe 3	Reforço de classe 2

B.3 Validação do cálculo das propriedades efetivas

O cálculo das propriedades efetivas foi validado pelo exercício aplicativo 3 da *ECCS* (Dubina et al, 2012), sendo os valores calculados pela *Cold-Formed Design* praticamente iguais aos definidos na publicação, exceto no caso relativo ao cálculo das propriedades efetivas dos “reforços”. De facto, embora os valores de cálculo das propriedades efetivas dos “reforços” relativos à primeira iteração sejam praticamente iguais aos definidos na publicação, após a primeira iteração existe uma ligeira discrepância entre os valores calculados pela *Cold-Formed Design* e os definidos pela publicação.

No entanto, noutra exercício aplicativo de uma publicação menos recente da *ECCS* (*ECCS*, 2008), em que as propriedades da secção transversal são calculadas com base numa secção nominal, comparando os valores obtidos pela *Cold-Formed Design*, estes são bastante próximos aos definidos na publicação, o que indicia que possivelmente após a primeira iteração os valores definidos na publicação mais recente da *ECCS* não sejam os mais corretos.

No que ao exercício aplicativo diz respeito, a secção transversal tem uma geometria em “C” bi-assimétrica e as suas dimensões geométricas, bem como as suas propriedades materiais são apresentadas no Quadro B.9. De facto, embora a *Cold-Formed Design* não possa ser implementada a elementos estruturais de secção transversal bi-assimétrica, devido à verificação da resistência à encurvadura global do elemento não ser aplicável a elementos com secção transversal com geometria bi-assimétrica, o cálculo das propriedades da secção efetiva é aplicável a esta geometria de secções transversais bi-assimétricas, podendo ser validado com este exercício.

Quadro B.9 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

b_1 (mm)	47	t_{nom} (mm)	1
h (mm)	150	t_{cor} (mm)	0,96
b_2 (mm)	41	E (N/mm ²)	210000
c (mm)	16	ν	0,3
r_i (mm)	3	f_{yb} (N/mm ²)	350

Os valores dos rácios apresentados no Quadro B.10 definem que as proporções geométricas da secção transversal são abrangidas pela *EC3-1-3* e, devem ser consideradas as rigidezes dos reforços no cálculo da secção efetiva.

De seguida, segundo os valores dos rácios apresentados no Quadro B.11, foram calculadas as propriedades da secção idealizada, desprezando a influência dos cantos arredondados. Os valores obtidos para as larguras idealizadas e para algumas das propriedades da secção bruta são, posteriormente, apresentados no Quadro B.12 e no Quadro B.13, respetivamente.

Quadro B.10 – Verificação das proporções geométricas e da aplicabilidade da metodologia de cálculo do *EC3-1-3*. E pré-dimensionamento dos reforços segundo a *EC3-1-3*

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
b_1/t_{nom}	48,96	48,96
c/t_{nom}	16,67	16,67
h/t_{nom}	156,25	156,25
c_1/b_1	0,34	0,34
c_2/b_2	0,39	0,39

Quadro B.11 – Verificação da influência dos cantos arredondados

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
r/t_{cor}	3,13	3,125
$r/b_{p,i}$	0,07	0,07

Quadro B.12 – Discretização da secção transversal e larguras idealizadas

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$b_{p.c1}$ (mm)	15,5	15,5
b_{p1} (mm)	46	46
h_p (mm)	149	149
b_{p2} (mm)	40	40
$b_{p.c2}$ (mm)	15,5	15,5

Quadro B.13 – Propriedades geométricas da secção bruta

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A_{SH} (mm ²)	255,36	255,36
$z_{0.cg,SH}$ (mm)	72,82	72,82

O cálculo das propriedades efetivas devido à flexão foi validado pelo exercício aplicativo 3.1 da ECCS (Dubina et al, 2012). Este cálculo das propriedades efetivas foi iniciado com o cálculo das larguras efetivas iniciais do banzo e do reforço de extremidade (Banzo*), sendo os respetivos valores apresentados no Quadro B.14. Posteriormente ao cálculo das larguras efetivas iniciais do “reforço”, foram calculadas as suas propriedades e apresentados os valores obtidos no Quadro B.15. Como o valor obtido para o fator de redução para o MD χ_d é inferior a 1 (ver Quadro B.15), as propriedades do “reforço” foram redefinidas com base num processo iterativo, sendo mostrados no Quadro B.16 os valores obtidos na última iteração para as larguras efetivas e para a espessura reduzida do “reforço”. Após o cálculo das propriedades efetivas do Banzo* foram, então, calculadas as larguras efetivas da alma (Alma*) com base numa distribuição secundária de tensões, sendo os valores obtidos mostrados no Quadro B.17. Por fim, são mostrados no Quadro B.18 os valores de algumas das propriedades efetivas.

Quadro B.14 – Passo 1: Cálculo das larguras efetivas iniciais do “reforço”

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
Ψ	1	1
$k_{\sigma.bp}$	4	4
$\lambda_{p.bp}$	1,030	1,03
ρ_{bp}	0,764	0,764
$b_{p,eff}$ (mm)	35,133	35,14
$b_{p.e1} = b_{p.e2}$ (mm)	17,566	17,57
$b_{p.c}/b_p$	0,337	0,337
$k_{\sigma.cp}$	0,5	0,5
$\lambda_{p.cp}$	0,981	0,981
ρ_{cp}	0,824	0,824
$b_{p.c,eff}$ (mm)	12,770	12,77

Quadro B.15 – Passo 2: Cálculo das propriedades efetivas iniciais do “reforço”

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A_s (mm^2)	29,123	29,126
I_{a-a} (mm^4)	457,318	457,32
K (N/mm^2)	0,161	0,161
$\sigma_{cr,s}$ (N/mm^2)	269,665	270,011
λ_d	1,139	1,139
χ_d	0,646	0,646

Quadro B.16 – Passo 3: Redefinição das propriedades efetivas do “reforço”

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$\chi_{d,n}$	0,683	0,614
$b_{p,e1,n}$ (mm)	20,039	20,736
$b_{p,c,eff,n}$ (mm)	14,680	12,77
$t_{s,red}$ (mm)	0,656	0,589

Quadro B.17 – Propriedades efetivas da alma comprimida

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$h_{p,c}$ (mm)	78,618	79,5
Ψ	-0,895	-0,874
$k_{\sigma,hp}$	21,279	20,76
$\lambda_{p,hp}$	1,446	1,464
ρ_{hp}	0,636	0,629
$h_{p,c,eff}$ (mm)	50,022	50
$h_{p,e1}$ (mm)	20,009	20
$h_{p,e2}$ (mm)	28,596	30

Quadro B.18 – Propriedades efetivas

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$z_{0,cg,eff}$ (mm)	84,453	85,75
$I_{y,eff,SH}$ (mm^4)	687646,191	668103
$W_{eff,y,c,SH}$ (mm^3)	8096,382	7791
$W_{eff,y,t,SH}$ (mm^3)	10574,703	10563

O cálculo das propriedades efetivas devido à compressão axial uniforme foi validado pelo exercício aplicativo 3.2 da ECCS (Dubina et al, 2012). O cálculo das propriedades efetivas foi iniciado com o cálculo das larguras efetivas iniciais da alma (Banzos*), dos banzos e dos reforços de extremidade (Banzos*), sendo os valores apresentados no Quadro B.19 e no Quadro

B.20, respetivamente. Posteriormente ao cálculo das larguras efetivas iniciais foram calculadas as propriedades do “reforço”, sendo exibidos os respetivos valores no Quadro B.21. Como os valores dos fatores de redução para o MD χ_d são inferiores a 1, as propriedades dos “reforços” foram redefinidas com base num processo iterativo, sendo mostrado no Quadro B.22 os valores obtidos na última iteração para as larguras efetivas e espessuras reduzidas dos “reforços”. Por fim, no Quadro B.23 são mostrados os valores de algumas das propriedades efetivas.

Quadro B.19 – Propriedades efetivas da alma comprimida

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
Ψ	1,000	1
$k_{\sigma.hp}$	4,000	4
$\lambda_{p.hp}$	3,335	3,335
ρ_{hp}	0,280	0,280
$h_{p.c.eff}$ (mm)	41,733	41,72
$h_{p.e1} = h_{p.e2}$ (mm)	20,867	20,86

Quadro B.20 – Passo 1: Cálculo das larguras efetivas iniciais

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação		Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
Ψ	1	1	Ψ	1	1
$k_{\sigma.bp}$	4	4	$k_{\sigma.bp}$	4	4
$\lambda_{p.bp}$	1,030	1,03	$\lambda_{p.bp}$	0,895	0,895
ρ_{bp}	0,764	0,764	ρ_{bp}	0,843	0,843
$b_{p.eff}$ (mm)	35,133	35,14	$b_{p.eff}$ (mm)	33,701	33,701
$b_{p.e1} = b_{p.e2}$ (mm)	17,566	17,57	$b_{p.e1} = b_{p.e2}$ (mm)	16,850	16,86
$b_{p.c}/b_p$	0,337	0,337	$b_{p.c}/b_p$	0,388	0,388
$k_{\sigma.cp}$	0,500	0,500	$k_{\sigma.cp}$	0,593	0,594
$\lambda_{p.cp}$	0,981	0,981	$\lambda_{p.cp}$	0,901	0,900
ρ_{cp}	0,824	0,824	ρ_{cp}	0,878	0,879
$b_{p.c.eff}$ (mm)	12,770	12,77	$b_{p.c.eff}$ (mm)	13,614	13,62

Quadro B.21 – Passo 2: Cálculo das propriedades efetivas iniciais do “reforço”

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação		Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A_s (mm ²)	29,123	29,13	A_s (mm ²)	29,245	29,26
I_{a-a} (mm ⁴)	457,318	457,32	I_{a-a} (mm ⁴)	538,022	538,02
K (N/mm ²)	0,120	0,12	K (N/mm ²)	0,151	0,151
$\sigma_{cr.s}$ (N/mm ²)	232,932	233,1	$\sigma_{cr.s}$ (N/mm ²)	282,693	282,33
λ_d	1,226	1,225	λ_d	1,113	1,113
χ_d	0,584	0,584	χ_d	0,666	0,665

Quadro B.22 – Passo 3: Redefinição das propriedades efetivas do “reforço”

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação		Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$\chi_{d,n}$	0,633	0,622	$\chi_{d,n}$	0,697	0,693
$b_{p.e1.n}$ (mm)	20,542	20,65	$b_{p.e2.n}$ (mm)	18,886	18,92
$b_{p.c.eff.n}$ (mm)	15,077	15,16	$b_{p.c.eff.n}$ (mm)	15,459	15,49
$t_{s.red}$ (mm)	0,607	0,597	$t_{s.red}$ (mm)	0,669	0,665

Quadro B.23 – Propriedades efetivas

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A_{eff} (mm ²)	117,710	117,37
$z_{0.cg.eff}$ (mm)	74,820	74,08

B.4 Validação da verificação da capacidade resistente à tração axial uniforme

A verificação da capacidade resistente à tração axial uniforme foi validada pelo exercício aplicativo 3.3 da ECCS (Dubina et al, 2012), sendo os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* idênticos aos da publicação. Relativamente ao exercício aplicativo, o elemento estrutural tem um comprimento de 3 m e uma secção transversal de geometria em “C”, sendo as suas dimensões geométricas e as propriedades materiais apresentadas no Quadro B.24. No Quadro B.25 são apresentados os valores obtidos para verificação da segurança à tração axial uniforme de um elemento estrutural sujeito a uma carga axial de tração N_{Ed} de 68,26 kN.

Quadro B.24 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	150	v	0,3
b (mm)	45	k	7
c (mm)	16	A (mm ²)	257,28
t_{nom} (mm)	1,0	S350GD+Z (EN10326)	
t_{cor} (mm)	0,96	f_{yb} (N/mm ²)	350
r_i (mm)	3	f_u (N/mm ²)	420
E (N/mm ²)	210000	f_{ya} (N/mm ²)	357,02

Quadro B.25 – Verificação da resistência da secção transversal à tração axial uniforme

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$N_{t.Rd}$ (kN)	91,85	91,75
$N_{Ed}/N_{t.Rd}$	0,74	0,744

B.5 Validação da verificação da capacidade resistente à compressão axial uniforme

A verificação da resistência de uma secção transversal sujeita a compressão axial uniforme foi validada pelo exercício aplicativo 3.4 da *ECCS* (Dubina et al, 2012). Contudo, neste caso, devido à discrepância dos valores de cálculo das propriedades efetivas, os resultados obtidos não foram exatamente iguais aos da publicação. Quanto ao exercício aplicativo, trata-se de uma secção transversal de geometria em “C”, com as dimensões geométricas e as propriedades materiais mostradas no Quadro B.26. Posteriormente, no Quadro B.27 são apresentados, ainda, os valores obtidos para algumas das propriedades da secção bruta e efetiva. Por fim, os valores obtidos na verificação da segurança à compressão axial uniforme da secção transversal são mostrados no Quadro B.28.

Quadro B.26 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	150	E (N/mm ²)	210000
b (mm)	45	ν	0,3
c (mm)	15	k	7
t_{cor} (mm)	0,96	f_{yb} (N/mm ²)	350
r_i (mm)	3	f_u (N/mm ²)	420

Quadro B.27 – Propriedades da secção bruta e efetiva

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
A_{SH} (mm ²)	255,36	255
$y_{0.cg,SH}$ (mm)	12,08	12,08
A_{eff} (mm ²)	115,55	115
$y_{0.cg,eff}$ (mm)	19,41	16,28
$e_{N,y,SH}$ (mm)	4,34	4,2
$W_{eff,z,SH}$ (mm ³)	1898,15	1561

Quadro B.28 – Verificação da segurança da secção transversal à compressão axial

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
N_{Ed} (kN)	30,11	30,11
$\Delta M_{z,Ed}$ (kN.m)	0,13	-
$N_{c,Rd}$ (kN)	40,44	-
$M_{cz,Rd.com}$ (kN.m)	0,78	-
$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd.com}}$	0,91	0,979

B.6 Validação da verificação da segurança da secção transversal sujeita a flexão em torno do eixo $y - y$ e ao esforço transverso

A verificação da segurança de uma secção transversal sujeita a flexão em torno do eixo $y - y$ e ao esforço transverso foi validada pelo exercício aplicativo 3.5 da ECCS (Dubina et al, 2012). No entanto, na verificação da segurança da secção transversal à flexão, mais uma vez, devido à discrepância dos valores de cálculo das propriedades efetivas, os resultados obtidos não foram exatamente iguais aos da publicação. No que se refere ao exercício aplicativo, trata-se de uma secção transversal com geometria em “C” bi-assimétrica, sujeita a flexão em torno do eixo $y - y$ $M_{y.Ed}$ de 11,12 kN.m e a esforço transverso $V_{Ed.z}$ de 80,85 kN. As dimensões da secção transversal e as suas propriedades materiais são apresentadas no Quadro B.29.

Os valores obtidos na verificação da segurança da secção transversal sujeita exclusivamente ao esforço transverso são apresentados no Quadro B.30. Os valores obtidos permitem concluir que como $V_{Ed} \leq 0,5V_{w.Rd}$ não é necessário considerar a interação do esforço transverso com a flexão. Assim, no Quadro B.31 são mostrados os valores obtidos para algumas propriedades efetivas. Por fim, no Quadro B.32 os valores obtidos na verificação da segurança da secção transversal sujeita exclusivamente à flexão.

Quadro B.29 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	200	c (mm)	20,8	r_i (mm)	3	k	7
b_1 (mm)	74	t_{nom} (mm)	2	E (N/mm ²)	210000	f_{yb} (N/mm ²)	350
b_2 (mm)	66	t_{cor} (mm)	1,96	ν	0,3	f_u (N/mm ²)	420

Quadro B.30 – Verificação da segurança da secção transversal ao esforço transverso

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$\lambda_{w,z}$	1,43	1,427
f_{bv} (N/mm ²)	115,17	117,73
$V_{b,Rd,z}$ (kN)	44,69	45,7
$V_{Ed,z}$ (kN)	8,085	8,085
$V_{Ed,z}/V_{b,Rd,z}$	0,18	0,177

Quadro B.31 – Propriedades efetivas

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$I_{y,eff.SH}$ (mm ⁴)	4148277,16	4139861
$W_{eff,y.c.SH}$ (mm ³)	40212,48	40463
$W_{eff,y.t.SH}$ (mm ³)	42853,64	43264

Quadro B.32 – Verificação da segurança da secção transversal à flexão

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados da Publicação
$M_{y.Ed}$ (kN.m)	11,12	11,12
$M_{c.Rd}$ (kN.m)	14,07	14,16
$M_{y.Ed}/M_{c.Rd}$	0,79	0,785

B.7 Validação da verificação da segurança de uma secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transversal

A verificação da segurança de uma secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transversal, em que é estritamente necessário considerar a sua interação, foi validada com base num exercício aplicativo dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012). Novamente, como nos apontamentos técnicos as propriedades da secção transversal são calculadas em função das larguras nominais das suas paredes e o processo de cálculo da *Cold-Formed Design* calcula as propriedades da secção transversal com base numa secção idealizada, os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* não são exatamente iguais aos dos apontamentos técnicos. Contudo, mais uma vez, como os resultados são praticamente iguais, este exercício permite validar a *Cold-Formed Design*. Quanto ao exercício aplicativo, este remete para uma secção transversal de geometria em “C” sujeita a flexão em torno do eixo $y - y$ $M_{y.Ed}$ de 11,12 kN.m e a esforço transversal $V_{Ed,z}$ de 80,85 kN na direção da alma (direção $z - z$). As dimensões geométricas da secção transversal e as suas propriedades materiais são mostradas no Quadro B.33. Quanto aos valores obtidos para a verificação da capacidade resistente da secção transversal à flexão e ao esforço transversal, estes são apresentados no Quadro B.34 e no Quadro B.35, respetivamente. Como $V_{Ed,z}/V_{b.Rd,z} Z > 0,5$ é, então, estritamente necessário proceder à verificação da segurança da secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transversal. Os valores obtidos são apresentados, posteriormente, no Quadro B.36.

Quadro B.33 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	200	t_{cor} (mm)	1,5
b (mm)	70	r_i (mm)	5
c (mm)	16	f_{yb} (N/mm ²)	235

Quadro B.34 – Capacidade resistente à flexão da secção transversal

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$W_{eff,y.SH}$ (mm ³)	28249,42	26650
$M_{c.Rd}$ (kN.m)	6,64	6,26

Quadro B.35 – Verificação da segurança da secção transversal ao esforço transversal

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$\lambda_{w,z}$	1,53	1,506
f_{bv} (N/mm ²)	67,11	69,42
$V_{b,Rd,z}$ (kN)	19,98	20,32
$V_{Ed,z}$ (kN)	13,5	13,5
$V_{Ed,z}/V_{b,Rd,z}$	0,68	0,664

Quadro B.36 – Verificação da segurança da secção transversal sujeita a flexão composta com esforço transversal

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$M_{y,Ed}$ (kN.m)	3,375	3,375
$M_{f,Rd}$ (kN.m)	4,79	4,52
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	8,27	7,88
$\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd,z}}{M_{pl,Rd,z}}\right) \left(\frac{2V_{z,Ed}}{V_{w,Rd,z}} - 1\right)^2$	0,54	0,585

B.8 Validação da verificação da segurança à encurvadura global de uma coluna sujeita a compressão axial

A verificação da segurança a encurvadura global de uma coluna sujeita a compressão axial foi também validada com base num exercício aplicativo dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012) e, os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* são de novo praticamente iguais aos definidos nos apontamentos técnicos.

Quanto ao exercício aplicativo, trata-se de uma coluna de 5 m e sujeita a compressão axial. A coluna tem uma secção transversal de geometria em “C”, com as dimensões e as propriedades materiais apresentadas no Quadro B.37. No Quadro B.38 são também mostrados os valores obtidos para algumas propriedades da sua secção transversal bruta. Seguidamente, no Quadro B.39 é apresentado o valor obtido para a carga crítica associada ao modo crítico que envolve flexão e flexão-torção. Por fim, no Quadro B.40 são mostrados os valores obtidos no cálculo da capacidade resistente da coluna à encurvadura global $N_{b,Rd}$.

Quadro B.37 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	200	r_i (mm)	5
b (mm)	70	t_{cor} (mm)	1,5
c (mm)	16	f_{yb} (N/mm ²)	235

Quadro B.38 – Propriedades geométricas da secção bruta

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
A (mm^2)	536,10	536,1
y_{sc} (mm)	-48,04	-48
z_{sc} (mm)	0,00	0
I_y (mm^4)	3227756,37	3227738
I_z (mm^4)	331275,29	331267
I_t (mm^4)	392,40	392,6
I_W (mm^6)	2421046452	2421,5 x 10 ⁶
i_y^2 (mm^2)	6020,81	6020,8
i_z^2 (mm^2)	617,94	617,9
i_0^2 (mm^2)	8946,78	8942,7

Quadro B.39 – Carga crítica de encurvadura

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos		Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$L_{cr,z}$ (m)	5	5	$L_{cr,T}$ (m)	5	5
$N_{cr,z}$ (kN)	27,46	27,5	$N_{cr,T}$ (kN)	25,99	26,0
$L_{cr,y}$ (m)	5	5	β	0,74	0,7424
$N_{cr,y}$ (kN)	267,60	267,6	$N_{cr,FT}$ (kN)	25,31	25,3

Quadro B.40 – Capacidade resistente da coluna à encurvadura global

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$\bar{\lambda}_T$	1,67	1,675
α	0,34	0,34
Φ	2,14	2,154
χ_T	0,29	0,285
$N_{b,Rd}$ (kN)	20,22	20,2

B.9 Validação da verificação da segurança à encurvadura lateral de uma viga sujeita a flexão em torno do eixo de maior inércia ($y - y$)

A verificação da segurança à encurvadura lateral de uma viga sujeita a flexão em torno do eixo de maior inércia ($y - y$) foi também validada com base num exercício aplicativo dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012) e, mais uma vez, os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* praticamente iguais aos definidos nos apontamentos técnicos. No que se refere ao exercício aplicativo, trata-se de uma viga com 2 m, sujeita à flexão em torno de $y - y$, com o diagrama de momento fletor a assumir uma configuração linear ao longo da viga, definida pelo valor nulo numa das suas extremidades e pelo valor de 3,5 kN.m na extremidade oposta.

A secção transversal da viga tem uma geometria em “C” e as suas dimensões e as propriedades materiais são mostradas no Quadro B.41. No Quadro B.42 são apresentados os valores obtidos para algumas das propriedades da secção transversal. Por fim, no Quadro B.43 e no Quadro B.44 são apresentados os valores obtidos no cálculo do momento crítico M_{cr} e da capacidade resistente do elemento à encurvadura lateral $M_{b,Rd}$, respetivamente.

Quadro B.41 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	152	r_i (mm)	3	tol (%)	5
b (mm)	61	t (mm)	2,00	f_{yb} (N/mm ²)	275

Quadro B.42 – Propriedades geométricas da secção bruta

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
A (mm ²)	539,80	540
y_{sc} (mm)	-34,49	-34,51
z_{sc} (mm)	0,00	0
I_y (mm ⁴)	1910475,71	1912580
I_z (mm ⁴)	191764,54	192100
I_t (mm ⁴)	719,73	720
I_W (mm ⁶)	1760913870	1762352940
i_y (mm)	59,49	59,51
i_z (mm)	18,85	18,86
i_0 (mm)	71,30	71,33

Quadro B.43 – Momento crítico (cálculo simplificado)

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$N_{cr,z}$ (kN)	99,36	99,538
$N_{cr,T}$ (kN)	89,01	89,066
$M_{cr,u}$ (kN.m)	6,71	6,716
C_1	1,88	1,879
M_{cr} (kN.m)	12,60	11,605

Quadro B.44 – Capacidade resistente do elemento à encurvadura lateral

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$W_{eff,y,SH}$ (mm ³)	18116,05	18306
$M_{y,Rk}$ (kN.m)	4,98	5,034
$\bar{\lambda}_{LT}$	0,63	0,659
Φ_{LT}	0,77	0,795
χ_{LT}	0,82	0,807
$M_{b,Rd}$ (kN.m)	4,10	4,062

B.10 Validação da verificação da segurança à encurvadura global de uma viga-coluna sujeita a flexão composta com compressão

A verificação da segurança à encurvadura global de uma viga-coluna sujeita a flexão composta com compressão foi também validada com base num exercício aplicativo dos apontamentos técnicos (Silvestre, 2012), sendo os valores obtidos pela *Cold-Formed Design* praticamente iguais aos definidos nos apontamentos técnicos. O exercício aplicativo trata uma viga-coluna com 2 m e sujeita a flexão composta com compressão. A configuração dos diagramas de esforços é linear ao longo do elemento, assumindo um valor de 10 kN (compressão) em ambas as extremidades do elemento e, no caso do diagrama de momento fletor, este assume um valor nulo numa das extremidades do elemento e um valor de 1,9 kN.m na extremidade oposta. Quanto à secção transversal da viga-coluna, esta tem uma geometria em “C”, com as dimensões e as propriedades materiais mostrados no Quadro B.45. No Quadro B.46 são também mostrados os valores obtidos para algumas das propriedades da secção transversal bruta e efetiva. Relativamente aos valores obtidos na verificação da segurança da viga-coluna, no Quadro B.47 são mostrados os valores associados ao momento crítico, enquanto no Quadro B.48 são mostrados os valores associados aos coeficientes de redução da resistência e no Quadro B.49 são exibidos os valores dos coeficientes de momento uniforme equivalente e os fatores de interação. Por fim, no Quadro B.50 são mostrados os valores obtidos na verificação da segurança da viga-coluna.

Quadro B.45 – Dimensões geométricas da secção transversal e propriedades materiais

h (mm)	152	t (mm)	2,00
b (mm)	61	Aço S275	
r_i (mm)	3	f_{yb} (N/mm ²)	275

Quadro B.46 – Propriedades geométricas da secção bruta

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
I_y (mm ⁴)	1910475,71	1912580
I_z (mm ⁴)	191764,54	192000
A_{eff} (mm ²)	300,53	298,8
$W_{eff.y.SH}$ (mm ³)	18116,05	18306

Quadro B.47 – Momento crítico (cálculo simplificado)

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
C_1	1,88	1,879
M_{cr} (kN.m)	12,60	11,605

Quadro B.48 – Coeficiente de redução da resistência devido à encurvadura global

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
N_{Rk} (kN)	82,65	82,17
$M_{y,Rk}$ (kN.m)	4,98	5,034
$N_{cr,y}$ (kN)	989,92	991
$\bar{\lambda}_y$	0,29	0,288
α_y	0,49	0,49
Φ_y	0,56	0,563
χ_y	0,95	0,955
$N_{cr,z}$ (kN)	99,36	99,538
$\bar{\lambda}_z$	0,91	0,909
α_z	0,49	0,49
Φ_z	1,09	1,087
χ_z	0,59	0,594
M_{cr} (kN.m)	12,60	11,605
$\bar{\lambda}_{LT}$	0,63	0,659
α_{LT}	0,34	0,34
Φ_{LT}	0,77	0,78
χ_{LT}	0,82	0,84

Quadro B.49 – Coeficientes de momento uniforme equivalente e os fatores de interação

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$C_{my}=C_{mz}=C_{mLT}$	0,6	0,6
k_{yy}	0,61	0,613
k_{yz}	0,67	-
k_{zy}	0,97	0,973
k_{zz}	0,67	-

Quadro B.50 – Coeficientes relativos à verificação da segurança de uma viga-coluna

	Resultados da <i>Cold-Formed Design</i>	Resultados dos apontamentos técnicos
$\frac{ N_{Ed} }{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$	0,43	0,414
$\frac{ N_{Ed} }{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$	0,67	0,66