



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

Otimização da Secção Transversal de Chapas Perfiladas e Madres Ómega de Aço Enformado a Frio

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

Autor

Gonçalo Daniel Teixeira Ferraz

Orientadores

Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues

Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago

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, 2014

AGRADECIMENTOS

À professora Aldina Santiago agradeço o sentido crítico, a acessibilidade e o inestimável empenho na minha orientação, tanto no que se refere a esta dissertação, como em todos os meus assuntos pessoais/académicos. Ao professor Rui Simões agradeço a co-condução do trabalho que a esta dissertação deu origem, a constante boa disposição, a sabedoria transmitida e sugestões sempre construtivas. Ao Eng. Hélder Gonçalves, da empresa WSTEEL, agradeço a acessibilidade, a energia e as longas conversas telefónicas. À ACIV agradeço o apoio financeiro recebido no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engenheiros Miguel Serra, Hugo Augusto, Trayana Tankova e demais investigadores do ISISE, agradeço a amizade, o interesse demonstrado e todas as conversas mantidas ao longo dos últimos meses. Ao Luís Gaspar e ao (Senhor) Ilídio Santos agradeço toda a boa disposição, companheirismo e sugestões sempre valiosas, no decorrer dos trabalhos laboratoriais.

Por fim, agradeço à minha família, à Beatriz, amigos e colegas de curso por todo o apoio dado durante estes anos em que frequentei o Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

RESUMO

A construção com elementos de aço enformado a frio tem vindo a conhecer um desenvolvimento exponencial nas últimas décadas por se tratar de uma solução leve, de fácil aplicação e, conseqüentemente, vantajosa do ponto de vista económico. A grande maioria dos estudos já realizados no domínio das estruturas em aço enformado a frio incide sobre o desempenho e otimização de elementos estruturais principais, nomeadamente pilares e vigas em estruturas de pequeno porte, e de madres para suporte de elementos de revestimento em estruturas de edifícios de múltiplos pisos ou em pavilhões industriais. Por outro lado, e apesar da crescente utilização de chapas de revestimento em aço enformado a frio, o estudo do desempenho e otimização destes elementos estruturais secundários é uma área ainda pouco desenvolvida. As chapas de revestimento em aço enformado a frio, apesar do reduzido peso próprio do material, muitas das vezes correspondem a uma parcela significativa do peso da estrutura, por cobrirem grandes vãos e, por conseguinte, a utilização de secções otimizadas poderá contribuir de forma decisiva para a redução do custo global da estrutura. A crescente popularidade do aço enformado a frio impulsionou o desenvolvimento de métodos para o cálculo da resistência dos elementos neste material e depressa surgiram normas de dimensionamento de elementos estruturais neste tipo de aço, normas que deverão ser tidas em consideração aquando do estudo do desempenho e otimização dos elementos. Neste contexto, a investigação realizada no âmbito desta dissertação pretende a otimização da forma da secção transversal de chapas perfiladas e da secção transversal de madres Ω , com base em estudos analíticos apoiados nas Partes 1-3 e 1-5 do Eurocódigo 3. Nos estudos desenvolvidos foram tidos em conta os parâmetros geométricos das secções, a classe do aço, a espessura da chapa e a possibilidade de introdução de reforços, em particular no que se refere às suas implicações na resistência à flexão dos elementos. Como resultado destes trabalhos de investigação, apresenta-se uma série de secções economicamente mais competitivas do que as atualmente disponíveis no mercado e, tanto quanto possível, otimizadas ao nível das propriedades de resistência à flexão.

PALAVRAS-CHAVE

Aço enformado a frio, chapa perfilada, madre ómega, Eurocódigo 3, classe 4.

ABSTRACT

In recent decades, the use of cold-formed steel (CFS) in structural members faced a significant growth due to their unique characteristics and wide range of structural applications. It allows the design of light structures, easy to build, resulting in economic solutions. Most of the available studies related to CFS structures focus on structural performance and optimization of main structural elements, such as beams and columns in small buildings, as well as purlins to support sheeting in multiple store and industrial buildings. On the other hand, and despite of the increasing use of steel sheeting, performance and optimization studies of these secondary elements is still an underdeveloped area. Sheeting profiles, in spite of the reduced weight of the material itself, often make up a significant portion of the structure's weight, as they withstand very large spans, and therefore the use of optimized sections may give a crucial contribute for the reduction of structure's overall cost. The growing popularity of CFS structures led to the development of calculation methods to predict the structural response of their members; consequently, some design standards for CFS structures have already been published and may be taken into account when studying the performance and optimizations of CFS elements. In this context, this research aims the optimization of CFS sheeting and CFS Ω purlins cross sections, based on analytical studies supported in Parts 1-3 and 1-5 of Eurocode 3. In these studies, the cross sections' geometric parameters were taken into account, as well as the steel class, the plate thickness and the possibility of introducing reinforcements, in particular their implications on the elements' flexural strength. As a result of this research, a series of cross sections more competitive than those currently available in the market and, as far as possible, with enhanced flexural strength, were presented.

KEY WORDS

Cold-formed steel, Sheeting profile, Omega purlin, Eurocode 3, class 4.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE GERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	xii
ABREVIATURAS	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Considerações gerais.....	4
2.2 Elementos estruturais	5
2.2.1 Tipos de elementos estruturais	5
2.2.2 Processos de fabrico	6
2.2.3 Comportamento estrutural	8
2.2.4 Enquadramento normativo	11
2.2.5 Investigação experimental e numérica	11
3 DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE AÇO ENFORMADO A FRIO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3.....	15
3.1 Considerações iniciais.....	15
3.2 Aspetos gerais	15
3.2.1 Bases de dimensionamento.....	15
3.2.2 Propriedades do material	15
3.2.3 Geometria e dimensões.....	16

3.2.4	Limitações e tolerâncias	16
3.3	Propriedades da secção bruta aproximada	17
3.4	Tipos de instabilidade	19
3.5	Classificação de Secções	20
3.5.1	Metodologia de classificação.....	20
3.5.2	Secções de classe 4	21
3.5.3	Secção efetiva para a instabilidade local (E. L. U.).....	22
3.5.4	Secção efetiva para a instabilidade distorcional (E.L.U.).....	23
4	APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE CHAPAS PERFILADAS	25
4.1	Considerações iniciais.....	25
4.2	Soluções desenvolvidas	25
4.3	Exemplo de estudo.....	27
4.3.1	Características geométricas e propriedades do material.....	27
4.3.2	Cálculo secção bruta.....	28
4.3.3	Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos positivos	30
4.3.4	Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos negativos	34
4.4	Condicionantes e diretivas na otimização das secções	38
5	APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE MADRES Ω	42
5.1	Considerações iniciais.....	42
5.2	Soluções desenvolvidas	42
5.3	Metodologia de Cálculo.....	45
5.3.1	Cálculo secção bruta.....	46
5.3.2	Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos positivos	47
5.4	Condicionantes e diretivas na otimização das secções	52
6	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL.....	57
6.1	Análise Experimental.....	57
7	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59
7.1	Conclusões	59
7.2	Desenvolvimentos futuros	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Utilizações de perfis de aço enformado a frio (a) na pré-fabricação e (b) na reabilitação de estruturas (Silvestre & Camotim, 2006).....	2
Figura 2.1- Facilidade e rapidez de montagem resultante do peso próprio reduzido (Veríssimo, 2008).....	5
Figura 2.2 - Perfis de aço enformado a frio (Yu, 2000).	6
Figura 2.3 - Chapas perfiladas de aço enformado a frio (Yu, 2000).	6
Figura 2.4 – Perfiladora (Espada, 2009).....	7
Figura 2.5 – Quinadora (Dubina et al., 2012).....	7
Figura 2.6 – Deformabilidade por instabilidade local, torção e empenamento (Veríssimo, 2008).....	8
Figura 2.7 - Modos de instabilidade de um perfil C à compressão: (a) local; (b) distorcional; (c) global por flexão; (d) global por torção; (e) global por flexão-torsão; (f) local e distorcional; (g) local e global por flexão; (h) distorcional e global por flexão; (i) local e global por flexão-torsão; (j) distorcional e global por flexão-torsão (Dubina et al., 2012).	8
Figura 2.8 - Curva de estabilidade para um perfil Ω enformado a frio.	9
Figura 2.9 - Influência das dobras na resistência de secções de aço enformado a frio (Silvestre & Camotim, 2006).....	10
Figura 2.10 - Influência da enformagem a frio nas propriedades mecânicas do aço (Ferrer, 2014).....	10
Figura 2.11- Utilizações de perfis MadreMax® em justaposição (Constálica, 2014).....	12
Figura 2.12- Dispositivo de carregamento utilizado (Nolasco, 2008).....	12
Figura 2.13 - Secção transversal da chapa de referência no estudo P4-0-272-30 [mm] (O Feliz, 2014).....	13
Figura 2.14 - Esquema dos reforços longitudinal com forma trapezoidal testados no banzo inferior (Martins et al., 2013).	13

Figura 3.1 - Secção bruta idealizada (EN 1993-1-3, 2006).....	17
Figura 3.2 – Fenómenos de instabilidade local (Pinto, 2010).	19
Figura 3.3 – Curvas momentos-curvaturas (Silvestre & Camotim, 2006).....	20
Figura 4.1 – Ilustração da chapa T5 – A.....	26
Figura 4.2 - Ilustração da chapa T7 – A.	26
Figura 4.3 - Ilustração da chapa T14 – A.	26
Figura 4.4 - Ilustração da chapa C13 – A.	27
Figura 4.5 – Propriedades geométricas referentes à chapa T7 – A.	28
Figura 4.6 – Nervura da secção.	28
Figura 4.7 – Largura efetiva de um elemento uniformemente comprimido [mm].....	31
Figura 4.8 – Largura efetiva de um elemento normal ao eixo de flexão [mm].	31
Figura 4.9 - Secção incluindo os cantos curvos e larguras efetivas planas dos banzos [mm].	32
Figura 4.10 - Esquema dos reforços longitudinais localizados no banzo inferior da chapa T7-A.	34
Figura 4.11 - Parâmetros necessários ao cálculo da espessura efetiva das zonas reforçadas..	36
Figura 5.1 - Secção transversal da madre $\Omega 100$	43
Figura 5.2 - Secção transversal da madre $\Omega 120$	43
Figura 5.3 - Secção transversal da madre $\Omega 140$	43
Figura 5.4 - Secção transversal da madre $\Omega 160$	44
Figura 5.5 - Propriedades geométricas referentes à secção Ω	45
Figura 5.6 - Reforços triangulares localizados no banzo superior das secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$.	47
Figura 5.7 – Discretização da secção.....	48
Figura 5.8 – (a) Alma com dois reforços intermédios (EN 1993-1-3:2006); (b) Larguras necessárias.	49
Figura 5.9 – Zona reforçada mais próxima do banzo comprimido.	50
Figura 5.10 – Tipologia da secção transversal Ω da empresa Utilperfil.	53
Figura 5.11 – Progressão na otimização da secção Ω	54

Figura 5.12 – (a) Banzo superior das secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$; (b) Banzo superior das secções $\Omega 140$ e $\Omega 160$	54
Figura 5.13 – Variação do parâmetro G.	55
Figura 6.1 – (a) Provete T5 – A; (b) Provete T14 – A.	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1- Soluções desenvolvidas e suas propriedades de resistência à flexão.	27
Quadro 4.2- Quantificação das propriedades geométricas referentes à chapa T7.	28
Quadro 4.3- Larguras nominais.	29
Quadro 4.4- Verificação das proporções geométricas.	29
Quadro 4.5- Influência dos cantos curvos.	30
Quadro 4.6- Classificação do banzo superior comprimido uniformemente.	30
Quadro 4.7- Determinação da largura efetiva do banzo superior comprimido.	30
Quadro 4.8- Determinação da largura efetiva do banzo inferior tracionado.	31
Quadro 4.9- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão.	31
Quadro 4.10- Cálculo da inércia da alma e cantos curvos.	32
Quadro 4.11- Linearização de todos os troços da secção.	32
Quadro 4.12- Cálculo da parte não efetiva da alma.	33
Quadro 4.13- Linearização de todos os troços da secção.	33
Quadro 4.14- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U..	33
Quadro 4.15- Classificação do banzo inferior comprimido uniformemente.	34
Quadro 4.16- Determinação da largura correspondente ao maior troço (22 mm).	34
Quadro 4.17- Determinação da largura efetiva do banzo superior tracionado.	35
Quadro 4.18- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão (distribuição elástica).	35
Quadro 4.19- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão (distribuição plástica).	35
Quadro 4.20- Linearização de todos os troços da secção.	36
Quadro 4.21- Linearização de todos os troços da secção.	36

Quadro 4.22- Caracterização da zona reforçada.....	36
Quadro 4.23- Linearização de todos os troços da zona reforçada.	37
Quadro 4.24- Cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$).....	37
Quadro 4.25- Espessura reduzida associada à zona reforçada.	37
Quadro 4.26- Linearização de todos os troços da secção.	38
Quadro 4.27- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.	38
Quadro 4.28- Chapas perfiladas analisadas no contexto da dissertação.....	39
Quadro 4.29- Fatores de comparação - secções desenvolvidas.....	40
Quadro 4.30- Comparação com chapas de referência.	40
Quadro 5.1- Madres Ω desenvolvidas e suas propriedades de resistência à flexão simples. ...	44
Quadro 5.2- Quantificação das propriedades geométricas referentes à secção Ω	45
Quadro 5.3- Larguras brutas idealizadas.	46
Quadro 5.4- Verificação das proporções geométricas.....	46
Quadro 5.5- Influência dos cantos curvos.	46
Quadro 5.6- Classificação do banzo inferior comprimido uniformemente.....	47
Quadro 5.7- Linearização de todos os troços da secção.	48
Quadro 5.8- Posição do eixo de flexão.....	48
Quadro 5.9- Quantificação das larguras $S_{eff,i}$	49
Quadro 5.10- Análise das larguras $S_{eff,i}$	49
Quadro 5.11- Parâmetros $s_{eff,i}$ corrigidos.....	50
Quadro 5.12- Caracterização da zona reforçada.....	50
Quadro 5.13- Caracterização da zona reforçada.....	51
Quadro 5.14- Linearização de todos os troços da zona reforçada.	51
Quadro 5.15- Cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$).....	51
Quadro 5.16- Cálculo da tensão crítica modificada ($\sigma_{cr,mod}$).	51
Quadro 5.17- Linearização de todos da secção.	52
Quadro 5.18- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.	52
Quadro 5.19- Propriedades de resistência à flexão apresentadas pelo fabricante.	53

Quadro 5.20- Comparação entre pesos das secções.	56
Quadro 5.21- Comparação entre pesos das secções.	56
Quadro 6.1- Comparação entre resultados experimentais e analíticos.....	58
Quadro 7.1- Proposta para elaboração de tabelas de dimensionamento de chapas perfiladas.	60

SIMBOLOGIA

A_{eff}	Área efetiva dos elementos da secção
A_g	Área da secção bruta
$A_{g,s}$	Área da secção idealizada
A_s	Área do reforço
A_{sa}	Área efetiva da alma para um reforço
$A_{sa,red}$	Área reduzida da alma com reforços
A_{sb}	Área efetiva da alma para o segundo reforço
$b_{eff,i}$	Largura efetiva de um elemento da secção
b_p	Largura dos elementos da secção nominal
b_r	Afastamento entre Nervuras
b_s	Largura do reforço medida ao longo de todo o perímetro do reforço
E	Módulo de elasticidade do aço utilizado
f_{bv}	Tensão resistente ao esforço transversal considerando a encurvadura por corte
f_u	Tensão última do material
f_{ya}	Tensão de cedência média do material
f_{yb}	Tensão de cedência base do material
G	Módulo de distorção do aço utilizado
g_r	Correção de comprimento da linha média das paredes da secção para as larguras normalizadas
h_p	Altura dos elementos da secção nominal
h_s	Altura dos elementos da secção idealizada
I_g	Momento de inércia da secção bruta
$I_{g,s}$	Momento de inércia da secção idealizada
I_s	Momento de inércia do reforço
k	é um coeficiente que depende do tipo de enformagem

k_w	Coeficiente relativo à restrição rotacional do banzo reforçado imposta pelas almas ou outros elementos adjacentes
k_σ	Coeficiente de encurvadura
M_{Rd}	Momento fletor resistente para os estados limites últimos
n	é o número de dobras a 90° com um raio interno de $r \leq 5t$ (frações de 90° devem ser contabilizadas como frações de n)
r	Raio interior de dobragem dos cantos curvos da secção
r_m	Raio médio de dobragem dos cantos curvos da secção
$s_{eff,i}$	Larguras efetivas da alma
s_s	Largura real do apoio
t	Espessura dos elementos
t_{nom}	Espessura nominal da chapa depois da enformagem;
tol	Tolerância em percentagem (%)
t_{red}	Espessura reduzida do reforço
t_{rev}	Espessura da camada de revestimento
$W_{eff,min}$	Módulo de flexão efetivo para flexão
W_{el}	Módulo de flexão da secção bruta elástica
W_{pl}	Módulo de flexão da secção bruta plástica
z	Distância entre o banzo e o eixo neutro
β	Fator de redução em estado limite de serviço
γ_{M0}	Coeficiente parcial de segurança de resistência de secções a esforços internos
γ_{M1}	Coeficiente parcial de segurança de resistência de barras à instabilidade
γ_{M2}	Coeficiente parcial de segurança de resistência de ligações
δ	Fator de correção de propriedades para ter em conta os cantos curvos
Δ	Variação
λ_d	Esbelteza distorcional
$\lambda_{rel,max}$	Esbelteza relativa máxima da secção $\bar{\lambda}_p$ Esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}_{p,red}$	Esbelteza normalizada reduzida
$\bar{\lambda}_{p,serv}$	Esbelteza normalizada em estado limite de serviço
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Fator de redução para a instabilidade local

σ_a	Tensão média nos banzos calculada com a secção bruta.
σ_b	Tensão de bifurcação
$\sigma_{\text{comp,Ed}}$	Tensão máxima de compressão no elemento
$\sigma_{\text{cr,mod}}$	Tensão crítica modificada para reforços nos banzos e nas almas
$\sigma_{\text{cr,s}}$	Tensão crítica dos reforços nos banzos
$\sigma_{\text{cr,sa}}$	Tensão crítica dos reforços nas almas
ϕ	Ângulo entre as paredes da secção com a horizontal
χ_d	Fator de redução para a instabilidade distorcional

ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
AS/NZS	Australia Standard/ New Zealand Standard
BS	British Standard
CFS	Aço enformado a frio
DEC	Departamento de Engenharia Civil
E.L.S.	Estados Limites de Serviço
E.L.U.	Estados Limites Últimos
EN	Norma Europeia
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
ISO	International Standard Organization
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com a evolução de técnicas e métodos construtivos, a construção em aço tornou-se essencial para o processo de industrialização e globalização da construção. A pré-fabricação em grande escala de elementos estruturais e subsequente montagem em obra, aliada à facilidade de transporte e manuseamento, garante soluções estruturais económicas. Além disso, a possibilidade de exportação aumenta a atratividade do mercado de construção em aço. Economias emergentes nomeadamente Brasil, Angola e China têm crescido a taxas incríveis e as ofertas no setor de construção são enormes. Consequentemente, estes mercados oferecem várias oportunidades para empresas que enfrentam reduções de procura interna (Ferraz, 2014).

No projeto de estruturas, têm-se verificado um crescimento na utilização de elementos estruturais de aço justificado pelas diversas vantagens oferecidas por estes elementos em comparação com outros materiais estruturais tais como o betão, a madeira e o vidro, entre as quais se destacam: i) a sua leveza, ii) a elevada resistência e rigidez, iii) a facilidade e rapidez de produção e de montagem aliadas à economia no transporte e no manuseamento (Simões da Silva et al., 2010), iv) a não suscetibilidade de sofrer retração e fluência à temperatura ambiente, v) a dispensa da utilização de cofragens, e vi) a sua reciclabilidade.

Na construção metálica existem três grandes grupos de elementos estruturais: elementos de aço laminado a quente, soldados e os de aço enformado a frio. Os elementos de aço enformado a frio são essencialmente utilizados em estruturas de médio porte (pavilhões industriais, coberturas) e pequeno porte (residências unifamiliares). A pré-fabricação em grande escala de estruturas e subestruturas em aço enformado a frio (ver Figura 1.1 (a)) e a sua utilização na reabilitação de edificado existente (ver Figura 1.1 (b)) são mercados em franca expansão e com grande potencial de desenvolvimento. Quando comparados com os conhecidos elementos estruturais de aço laminados a quente, os enformados a frio revelam-se uma solução mais competitiva quando há necessidade de vencer vãos curtos e/ou cargas reduzidas e destacam-se i) pela possibilidade de produção económica de secções transversais com as mais variadas formas, permitindo a obtenção de relações resistência-peso favoráveis e ii) pela facilidade de transporte e armazenamento fruto da sua leveza.



Figura 1.1- Utilizações de perfis de aço enformado a frio (a) na pré-fabricação e (b) na reabilitação de estruturas (Silvestre & Camotim, 2006).

Os elementos de aço enformado a frio mais frequentemente utilizados podem dividir-se em duas grandes categorias, nomeadamente: (i) perfis e (ii) chapas perfiladas. A grande parte dos estudos já efetuados tem incidido sobre o desempenho e otimização de elementos estruturais principais: pilares e vigas em estruturas de pequeno porte, ou mesmo madres para suporte de chapas de revestimento em estruturas de edifícios ou pavilhões industriais. No entanto deve referir-se que as chapas perfiladas de revestimento de fachadas e coberturas, por cobrirem grandes áreas, correspondem a uma parcela significativa do peso da estrutura; por conseguinte, a utilização de chapas perfiladas com secções otimizadas, poderá igualmente contribuir de forma significativa para a redução do custo global da estrutura. A crescente utilização do aço enformado a frio na indústria da construção impulsionou o desenvolvimento de métodos para o cálculo da resistência dos elementos neste material e não tardaram a surgir normas de dimensionamento de estruturas de aço enformado a frio.

Neste contexto, esta dissertação apresenta um estudo analítico baseado nas partes 1-3 e 1-5 do Eurocódigo 3 (EN 1993-1-3:2006 e EN 1993-1-5:2006), que pretende a otimização da forma da secção transversal para chapas perfiladas e um outro estudo similar para madres de secção Ω .

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação de mestrado, inserida numa prestação de serviços de engenharia requerida à Universidade de Coimbra, corresponde à avaliação analítica de chapas perfiladas de diferentes secções e, madres de secção Ω de aço enformado a frio.

Esta dissertação apresenta um estudo analítico baseado nas partes 1-3 e 1-5 do Eurocódigo 3, que pretendeu otimizar a forma da secção transversal de chapas perfiladas e um outro estudo similar para madres de secção Ω . Nestes dois estudos tiveram-se em conta os parâmetros geométricos das secções, classe do aço, espessura da chapa e a possibilidade de introdução de reforços, em particular no que se refere às suas implicações na resistência à flexão dos elementos de aço enformado a frio. Com base nestes estudos apresentam-se as secções mais competitivas a nível económico e, tanto quanto possível, otimizadas ao nível das propriedades de resistência à flexão.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos. No capítulo 1 é feita a introdução ao trabalho de investigação e apresenta-se a motivação e principais objetivos que lhe estão subjacentes. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica no âmbito dos elementos estruturais de aço enformado a frio. No capítulo 3 é resumem-se às disposições regulamentares existentes para chapas perfiladas e perfis de aço enformado a frio, segundo o Eurocódigo 3. Nos capítulos 4 e 5 são apresentados os estudos de otimização da secção transversal de chapas perfiladas e madres Ω , com a finalidade de criar soluções competitivas a nível comercial. No capítulo 6 comparam-se os resultados de um estudo experimental realizado no DEC da FCTUC, com os resultados do estudo analítico de chapas perfiladas apresentado no capítulo 4 desta dissertação. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho de investigação e propostos desenvolvimentos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

Os elementos estruturais de aço podem ser fabricados com aço laminado a quente, soldadura de chapas ou aço enformado a frio (Simões, 2007). Os elementos mais utilizados como elementos resistentes principais são os de aço laminado a quente ou, havendo necessidade de obter secções não comerciais ou peças de secção variável, por soldadura de placas. Os elementos de aço enformado a frio, muito utilizados como elementos secundários ou elementos principais em estruturas de pequeno porte, são produzidos a partir de chapas muito finas com espessura uniforme, o que permite a obtenção de secções com formas muito variadas, com boas propriedades mecânicas e reduzidos gastos de material. Aos elementos de aço enformado a frio é normalmente aplicada uma proteção anticorrosão, que consiste em revestir o perfil com uma camada protetora de outro metal, comumente o zinco e/ou alumínio, num processo denominado galvanização, que lhes confere maior durabilidade e menor necessidade de manutenção.

Com base em diversas referências bibliográficas (Dubina et al., 2012; Silvestre & Camotim, 2010; Yu, 2000), foram identificadas as principais vantagens da utilização de elementos estruturais de aço enformado a frio na construção:

- ✓ Possibilidade de pré-fabricação em larga escala;
- ✓ Eficiência e otimização estrutural pela possibilidade de fabrico de secções com espessuras e dimensões adequadas para cargas e vãos reduzidos;
- ✓ Rapidez, facilidade de transporte e montagem (ver Figura 2.1) resultante da leveza dos elementos;
- ✓ Economia no armazenamento e transporte pela possibilidade de determinadas secções encaixarem sucessivamente umas nas outras;
- ✓ Facilidade de manutenção;
- ✓ Reciclabilidade;
- ✓ Inexistência de retração e fluência à temperatura ambiente;



Figura 2.1- Facilidade e rapidez de montagem resultante do peso próprio reduzido (Veríssimo, 2008).

As principais desvantagens da utilização de elementos estruturais de aço enformado a frio são:

- ✓ Baixa rigidez de torção, devido à reduzida espessura dos elementos e ao facto de a maioria das secções serem abertas e monossimétricas;
- ✓ Cálculo da resistência das secções nos elementos de aço enformado a frio mais complexo que nos elementos de aço laminado a quente;
- ✓ As relações geométricas de perfis, cobertas por ensaios associados, incluem apenas secções relativamente tipificadas (C, Z e Σ);
- ✓ Comportamento estrutural que envolve vários fenómenos de instabilidade, alguns inexistentes ou pouco relevantes nos elementos de aço laminado a quente (Veríssimo, 2008), nomeadamente encurvadura local, distorcional e suas interações, devido à elevada esbelteza das secções transversais;
- ✓ Menor ductilidade dos elementos de aço enformado a frio, razão pela qual é de evitar a sua utilização em estruturas em que a fadiga seja predominante (Simões, 2007).

2.2 Elementos estruturais

2.2.1 Tipos de elementos estruturais

Na produção dos elementos de aço enformado a frio podem utilizar-se aços com tensão de cedência entre 220 e 550 N/mm², embora nas utilizações mais comuns sejam considerados aços das classes S280GD ($f_y = 280$ N/mm²), S320GD ($f_y = 320$ N/mm²) e S350GD ($f_y = 350$ N/mm²). Os elementos de aço enformado a frio podem ser classificados em dois grandes grupos: perfis e chapas perfiladas. Os perfis são peças lineares fabricadas a partir de chapas de

aço com espessuras que variam entre 1,2 e 6,4 mm. No que se refere à secção transversal, podem utilizar-se secções C, Z, Σ , Ω , tubulares, entre outras, com e sem reforços intermédios e de extremidade (Figura 2.2). A grande variedade de geometrias e dimensões que estes perfis apresentam confere uma grande flexibilidade ao seu dimensionamento.

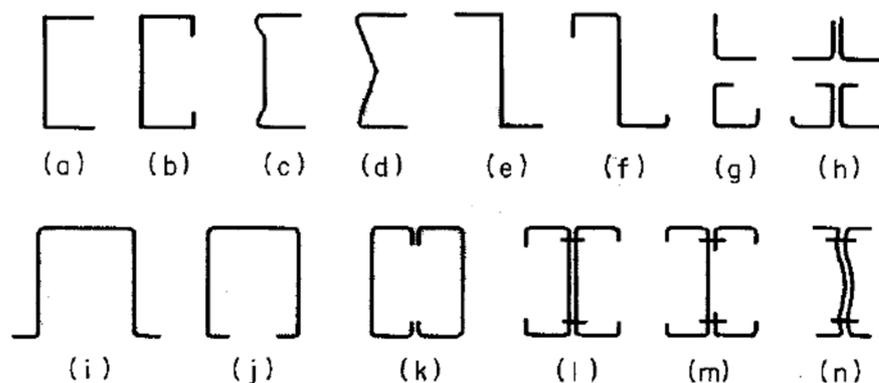


Figura 2.2 - Perfis de aço enformado a frio (Yu, 2000).

As chapas perfiladas (Figura 2.3) são peças laminares fabricadas a partir de chapas de aço com espessuras que variam entre 0,5 e 1,9 mm. As chapas são geralmente utilizadas em lajes mistas de aço-betão ou em estruturas de paredes, pavimentos e coberturas.



Figura 2.3 - Chapas perfiladas de aço enformado a frio (Yu, 2000).

2.2.2 Processos de fabrico

Os elementos de aço enformado a frio são fabricados por laminagem a frio ou por quinagem (Dubina et al., 2012).

A laminagem a frio (ou perfilagem) é o processo de fabrico mais utilizado, uma vez que conduz a uma produção sistematizada, extremamente eficiente para produção em grande escala e para obtenção de elementos com secções transversais de elevada complexidade. A máquina que realiza a operação de laminagem a frio, a perfiladora (Figura 2.4), possui uma série de rolos compressores que vão dobrando a chapa progressivamente até atingir a forma pretendida (Rodrigues & Martins, 2010).



Figura 2.4 – Perfiladora (Espada, 2009).

A quinagem é geralmente usada na produção de peças de comprimento curto e geometria simples, associado a pequenas quantidades de produção. Os custos iniciais de ferramentas são altos, mas o custo do trabalho subsequente é baixo. Neste processo, o comprimento da chapa é limitado ao comprimento da própria quinadora (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Quinadora (Dubina et al., 2012).

2.2.3 Comportamento estrutural

O comportamento estrutural dos elementos de aço enformado a frio é bastante complexo. A utilização de espessuras reduzidas e o processo de formação destes elementos resultam em diversos fenómenos que afetam o seu dimensionamento:

i) Grande deformabilidade à torção: está associada à baixa rigidez de torção das secções abertas de espessura reduzida e ao facto de, para um grande número de secções correntes, o centro de corte não coincidir com o centro de gravidade (Figura 2.6).

ii) Empenamento: O empenamento (deformações axiais da secção) é exibido por muitas secções de parede fina aberta submetidas a momento torsor. As condições de fronteira de uma barra, relativas a este modo de deformação, têm grande influência na sua resistência mecânica (Figura 2.6).

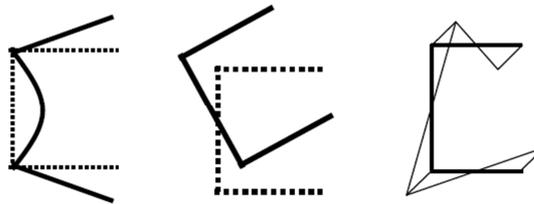


Figura 2.6 – Deformabilidade por instabilidade local, torção e empenamento (Veríssimo, 2008).

iii) Instabilidades de natureza local e/ou global: há elevada suscetibilidade a fenómenos de instabilidade local, distorcional e global e suas interações (Figura 2.7), devido à elevada esbelteza e à baixa rigidez de torção das secções transversais.

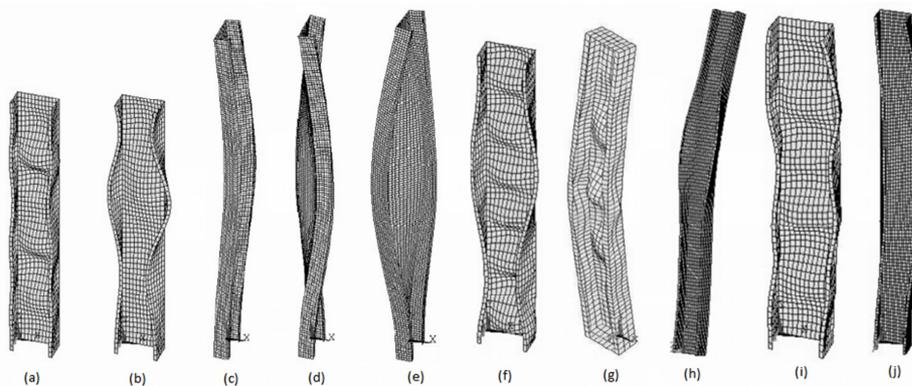


Figura 2.7 - Modos de instabilidade de um perfil C à compressão: (a) local; (b) distorcional; (c) global por flexão; (d) global por torção; (e) global por flexão-torsão; (f) local e distorcional; (g) local e global por flexão; (h) distorcional e global por flexão; (i) local e global por flexão-torsão; (j) distorcional e global por flexão-torsão (Dubina et al., 2012).

A título de exemplo, a Figura 2.8 apresenta os modos de encurvadura de um perfil Ω , associados a uma determinada carga crítica. Para obter a curva apresentada, recorreu-se a um *software* de faixas finitas, o CUFSM (Li & Shafer, 2010). Este *software* rege-se pelos princípios da norma americana AISI S100 – *North American Cold-Formed Steel Specification*; esta norma não foi objeto de estudo para este trabalho.

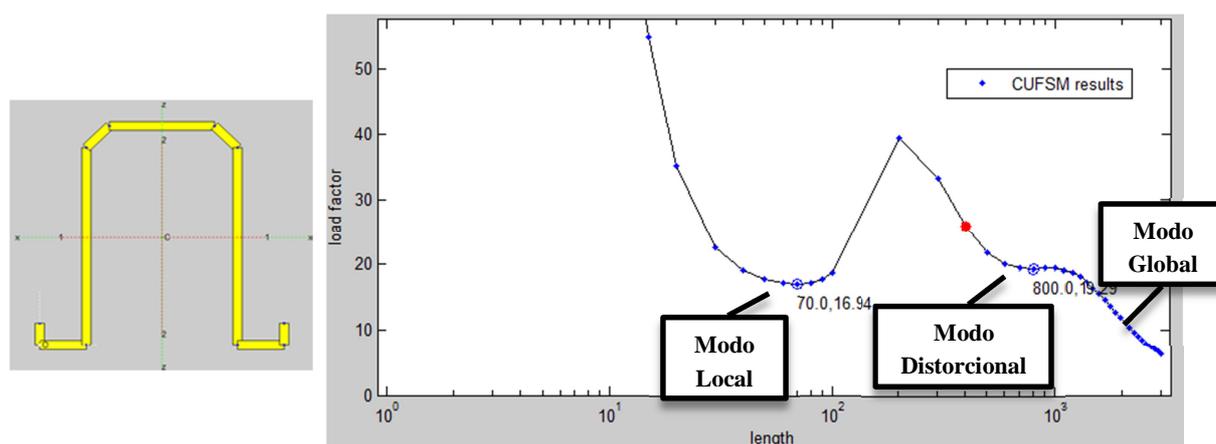


Figura 2.8 - Curva de estabilidade para um perfil Ω enformado a frio.

Na Figura 2.8 verifica-se a presença de dois mínimos locais, correspondendo o primeiro ao modo local e o segundo ao modo distorcional. Quando o modo global é crítico, implica que a instabilidade do global perfil precedeu todos os outros possíveis fenómenos de instabilidade da secção (barras longas).

De um modo geral, as chapas perfiladas não têm instabilidade global, pelo que a curva de estabilidade apenas possui dois pontos importantes relativos à instabilidade local e distorcional.

iv) Esmagamento da alma: este fenómeno verifica-se nas secções de aplicação de cargas concentradas e nas zonas dos apoios, e deve-se à elevada esbelteza da alma dos elementos de aço enformado a frio. Este comportamento pode ser evitado pela aplicação de reforços nessas zonas (Veríssimo, 2008).

v) Existência de Reforços: o comportamento estrutural destas secções pode ser melhorado com recurso a reforços de extremidade ou intermédios através da introdução de dobras na secção, reduzindo-se a sua suscetibilidade à deformação local (Figura 2.9). Os reforços asseguram pontos de apoio elástico dos troços da secção, diminuindo o comprimento livre

para elas fletirem, e simultaneamente aumentam o valor da tensão crítica de instabilidade local (Veríssimo, 2008).

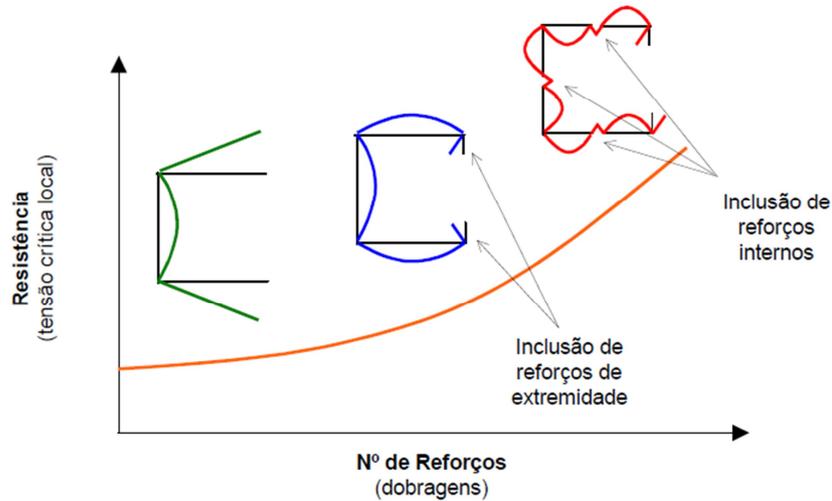


Figura 2.9 - Influência das dobras na resistência de secções de aço enformado a frio (Silvestre & Camotim, 2006).

vi) Endurecimento do aço: as dobras alteram significativamente as propriedades mecânicas do aço, aumentando as tensões de cedência e última e diminuindo a ductilidade. Na Figura 2.10 encontram-se representadas as curvas tensão-extensão do aço antes e após o processo de perfilagem, onde são visíveis os efeitos do endurecimento do aço nas suas propriedades mecânicas.

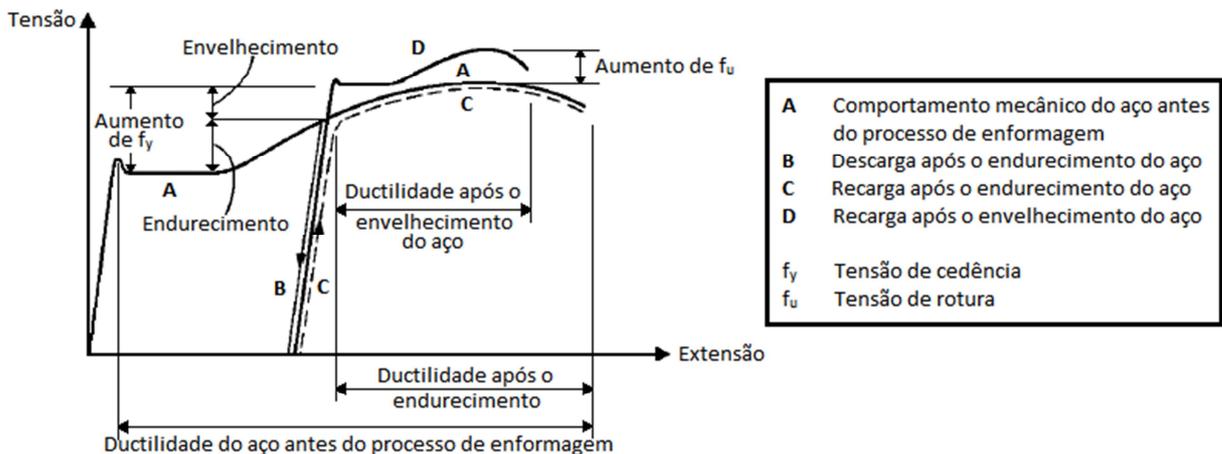


Figura 2.10 - Influência da enformagem a frio nas propriedades mecânicas do aço (Ferrer, 2014).

vii) Imperfeições: a falta de conhecimento acerca do estado inicial dos elementos de aço enformado a frio, nomeadamente as imperfeições geométricas e tensões residuais, é o principal impedimento ao sucesso das modelações numéricas para previsão do comportamento estrutural de elementos neste tipo de aço, uma vez que estas grandezas são fundamentais para retirar conclusões fiáveis dos resultados (Schafer & Peköz, 1998). As imperfeições são responsáveis pela introdução de tensões residuais e de deformações plásticas no material que influenciam a capacidade de carga e a resistência última dos elementos estruturais.

2.2.4 Enquadramento normativo

A utilização de elementos estruturais de aço enformado a frio na indústria da construção iniciou-se no final do século XIX nos Estados Unidos da América e no Reino Unido. No entanto, a popularização da sua aplicação em edifícios deu-se após 1940 (Silvestre & Camotim, 2010). Em 1946 o American Iron and Steel Institute (AISI) publicou as primeiras disposições regulamentares relativas ao comportamento estrutural deste tipo de elementos (Veríssimo, 2008). Desde então foram desenvolvidas diversas normas de dimensionamento aplicáveis a estruturas em aço enformado a frio. Nos Estados Unidos, Canadá e México encontra-se em vigor a AISI S100 – *North American Cold-Formed Steel Specification*, publicada em 2007 pelo AISI. Na Austrália e Nova Zelândia foi publicada, em 1996, a AS/NZS 4600 – *Cold-Formed Steel Structures*. No Reino Unido surgiu em 1987, pelo British Standards Institute, a BS 5950 – *Structural Use of Steelwork in Building, Part 5: Code of Practice for Design of Cold-formed Sections*. No Brasil encontra-se em vigor a NBR 14762 – *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Membros Formados a Frio*, publicada em 2001 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Na Europa, a especificação técnica que orienta o dimensionamento das estruturas em aço enformado a frio é o *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed steel members and sheeting*, publicado pelo European Committee for Standardisation em 2004.

2.2.5 Investigação experimental e numérica

Há registo de algumas investigações com o objetivo de desenvolver novos sistemas construtivos em aço enformado a frio. No entanto, nem sempre esses dados são do domínio público no sentido de se manter o segredo industrial. Como exemplo, serão aqui apresentados alguns estudos desenvolvidos em secções de madres e chapas perfiladas fabricadas em Portugal. A Figura 2.11 ilustra o sistema de madres perfuradas MadreMax®. Este sistema resultou de uma investigação realizada na Universidade de Aveiro (Amaral, 2008; Nolasco, 2008). Uma das vantagens deste sistema consiste na possibilidade de sobreposição e

acoplagem sucessiva dos perfis. O sistema de furacão permite ainda uma justaposição variável dos vários perfis bem como o cruzamento entre os mesmos.



Figura 2.11- Utilizações de perfis MadreMax® em justaposição (Constálica, 2014).

Em 2008, Nolasco apresentou um estudo experimental do comportamento de diversos perfis com secção MadreMax®, referindo o desenvolvimento de fenómenos de encurvadura nos banzos livres, assim como a transmissão de esforços em perfis em continuidade (Nolasco, 2008). De um modo geral, e analisando os ensaios realizados e os seus resultados, constataram-se dois tipos de colapso: por encurvadura distorcional e por encurvadura local. A verificação da segurança das madres relativamente ao fenómeno de encurvadura local foi automaticamente assegurada uma vez que as secções transversais são de classe 4, sendo a determinação do valor de cálculo dos esforços resistentes efetuada com base nas secções efetivas. Quanto ao colapso por encurvadura distorcional, deve referir-se que este fenómeno foi atenuado pela presença dos painéis de cobertura, conferindo um certo grau de contraventamento.



Figura 2.12- Dispositivo de carregamento utilizado (Nolasco, 2008).

Com o objetivo de verificar e validar a resistência mecânica dos perfis com secção MadreMax®, Amaral apresentou uma modelação numérica do seu comportamento, dando particular atenção à encurvadura dos seus banzos livres e ao comportamento dos reforços utilizados para aumentar a capacidade resistente das mesmas (Amaral, 2008). Na generalidade dos casos, as previsões numéricas foram concordantes com os resultados experimentais e analíticos.

Em 2013, e com base numa investigação levada a cabo na Universidade do Minho, Martins (Martins et al., 2013) apresentou um estudo de análise do comportamento de chapas perfiladas enformadas a frio com secção trapezoidal fornecidas pela empresa O Feliz, Metalomecânica, S.A., destinadas à utilização em coberturas e fachadas. Numa primeira fase, analisaram as características e a capacidade resistente de várias chapas trapezoidais, e realizaram uma análise paramétrica de forma a identificar quais os parâmetros geométricos mais relevantes no seu comportamento. Numa segunda fase, realizaram ensaios experimentais sobre provetes executados a partir de dois modelos de chapas trapezoidais e analisaram os resultados obtidos.



Figura 2.13 - Secção transversal da chapa de referência no estudo P4-0-272-30 [mm] (O Feliz, 2014).

No âmbito deste projeto, foi ainda desenvolvida uma ferramenta de cálculo das características mecânicas de chapas trapezoidais. Esta ferramenta permitiu a realização de um estudo paramétrico para avaliar a influência da espessura da chapa, da largura dos banzos e das dimensões dos reforços inserido nos banzos, na resistência à flexão das chapas de aço enformado a frio. A existência de reforço no banzo comprimido mostrou que, quanto maior for a largura do banzo comprimido, maior poderá ser a largura do reforço, desde que este se mantenha eficaz.



Figura 2.14 - Esquema dos reforços longitudinal com forma trapezoidal testados no banzo inferior (Martins et al., 2013).

A avaliação experimental da resistência à flexão de dois modelos de chapa trapezoidais, permitiu a observação e identificação de fenómenos de instabilidade local nos banzos e nas almas dos provetes, antes de estes mobilizarem a tensão de cedência do material nessas zonas. Durante os ensaios laboratoriais foi possível verificar, que nos ensaios em que o banzo inferior (Figura 2.14) estava tracionado, tanto os provetes com chapa de banzo reto como os provetes com reforços na chapa de banzo apresentaram um comportamento muito semelhante no que respeita à deformação e à capacidade de carga. Por outro lado, nos provetes ensaiados com o banzo inferior comprimido, observaram um ligeiro aumento na capacidade resistente à flexão quando estes não apresentavam reforço longitudinal, contrariando ao que seria esperado. Mesmo assim, a capacidade resistente obtida experimentalmente é superior à calculada analiticamente para provetes com reforço longitudinal.

A análise destes estudos foi importante para o trabalho realizado nesta dissertação. No caso de estudo de chapas perfiladas, foram utilizados reforços trapezoidais nos banzos comprimidos, à semelhança do verificado na investigação realizada na Universidade do Minho (Martins et al., 2013); no entanto utilizaram-se reforços duplos de menor dimensão, garantindo-se a eficácia dos mesmos.

3 DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE AÇO ENFORMADO A FRIO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é feita uma abordagem sintetizada às disposições regulamentares existentes para chapas perfiladas e perfis de aço enformado a frio. Apenas são abordados os aspetos relevantes para os casos de estudo apresentados nos capítulos 4 e 5 desta dissertação.

3.2 Aspetos gerais

3.2.1 Bases de dimensionamento

O dimensionamento de elementos estruturais de aço enformado a frio, quer estes sejam perfis ou chapas perfiladas, deve seguir as disposições regulamentares gerais apresentadas na EN 1993-1-3:2006. Os coeficientes parciais de segurança a adotar são apresentados na EN 1993-1-3:2006:

- ✓ Coeficientes parciais de segurança para os E.L.U.: (i) resistência de secções a esforços internos: (ii) $\gamma_{M0} = 1,00$; resistência de barras à instabilidade: $\gamma_{M1} = 1,00$ e (iii) Resistência de ligações: $\gamma_{M2} = 1,25$.
- ✓ O coeficiente parcial de segurança para os E.L.S.: $\gamma_{M, serv} = 1,00$.

3.2.2 Propriedades do material

A EN 1993-1-3:2006 define as propriedades do material utilizado em elementos estruturais de aço enformado a frio:

- ✓ Massa volúmica: $\rho = 7850 \text{ kg /m}$;
- ✓ Módulo de elasticidade: $E = 210000 \text{ N/mm}$ (ou 210 GPa);
- ✓ Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$;
- ✓ Módulo de distorção: $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81000 \text{ N/mm}$ (ou 81 GPa);

A capacidade resistente da secção transversal de chapas e perfis de aço enformado a frio, é afetada pelo processo de fabrico. Este pode fazer variar a tensão de cedência e a tensão

resistente última do material. Esta variação tem um efeito significativo nas zonas das dobragens, devido ao endurecimento do material, que se traduz no aumento da tensão de cedência média (f_{ya}), em relação à tensão de cedência base (f_{yb}) do material. De acordo com a cláusula 3.2.2 da EN 1993-1-3:2006 este aumento é dado por:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u + f_{yb}) \cdot \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A_g} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (3.1)$$

Onde: f_u é da tensão última do material; A_g é a área bruta da secção; k é um coeficiente que depende do tipo de enformagem: $k = 7$ para laminagem a frio; $k = 5$ para outros processos de fabrico; n é o número de dobras a 90° com um raio interno de $r \leq 5t$ (frações de 90° devem ser contabilizadas como frações de n) e t é a espessura das chapas antes da enformagem.

Contudo, a tensão de cedência média (f_{ya}) só deverá ser utilizada no cálculo da resistência de secções transversais totalmente efetivas. Nos restantes casos, recorre-se à tensão de cedência base (f_{yb}).

3.2.3 Geometria e dimensões

A secção transversal de um perfil ou chapa perfilada de aço enformado a frio é constituída por uma sequência de troços retos, interligadas nos cantos (geralmente zonas arredondadas por a dobragem das chapas). A geometria da secção transversal é muitas vezes condicionada por requisitos específicos exigidos para uma determinada aplicação, o que justifica a enorme variedade de secções transversais.

3.2.4 Limitações e tolerâncias

3.2.4.1 Espessura das chapas

Segunda a EN 1993-1-3:2006, pode ser usada a seguinte gama de espessuras no fabrico de elementos de aço enformado a frio:

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

A espessura utilizada no dimensionamento é calculada segundo as equações (3.3) e (3.4):

$$t = t_{nom} - t_{rev} \quad , \text{ se } tol \leq 5\% \quad (3.3)$$

$$t = (t_{nom} - t_{rev}) \cdot \frac{100 - tol}{95} \quad , \text{ se } tol > 5\% \quad (3.4)$$

Onde: tol é a tolerância em percentagem (%); t_{nom} é a espessura nominal da chapa depois da enformagem; t_{rev} é a espessura da camada de revestimento metálico utilizada.

A espessura t_{nom} pode ser utilizada em vez de t , se as áreas da secção antes e depois da enformagem não diferirem mais que 2%.

3.2.4.2 Relações geométricas

As formas e dimensões dos elementos de aço enformado a frio podem ser muito variadas, dentro das condições apresentadas pela EN 1993-1-3:2006. A satisfação dessas condições garante a possibilidade de utilização imediata das expressões para o dimensionamento e verificação de segurança de elementos estruturais de acordo com o Eurocódigo 3. Contudo, é ainda possível utilizar relações geométricas que não estejam contidas nestes limites, desde que o seu dimensionamento e verificação da segurança se baseiem em: (i) ensaios experimentais e/ou (ii) análises numéricas que contemplem todos os fenómenos não lineares da secção.

3.3 Propriedades da secção bruta aproximada

A secção bruta corresponde à secção sem qualquer redução da dimensão de cada um dos seus troços. Esta redução só deverá ser tida em conta quando se consideram os fenómenos de instabilidade local e/ou distorcional (método das secções efetivas). As propriedades da secção bruta aproximada são obtidas a partir de uma linearização por troços da linha média da secção. A cláusula 5.1 do EN 1993-1-3:2006 possibilita a utilização de dois métodos para o cálculo das propriedades das secções brutas:

i) **Secção bruta idealizada** (*idealized gross cross-section*): é obtida pela intersecção das linhas médias dos troços retos que constituem a secção, sendo a largura de cada um dada pela distância entre dois pontos X de intersecção consecutivos (Figura 3.1), e X é a intersecção do eixo médio de cada um dos troços; P é o ponto médio do canto curvo; t é a espessura do troço; b_p é a largura plana dos troços; $g_r = r_m \left(\tan \left(\frac{\phi}{2} \right) - \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \right)$; e $r_m = r + t / 2$.

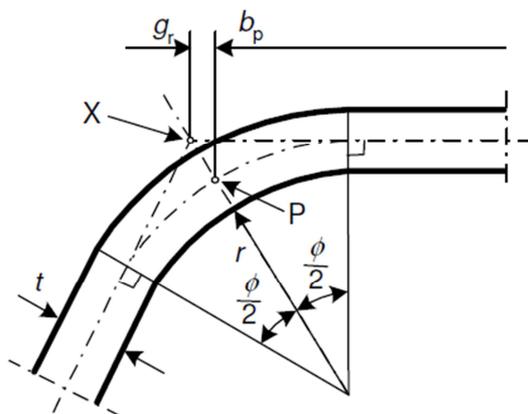


Figura 3.1 - Secção bruta idealizada (EN 1993-1-3, 2006).

A validade da utilização do método da secção bruta idealizada implica a verificação das condições impostas pelo mesmo regulamento:

$$r \leq 5. t \quad (3.5)$$

$$r \leq 0,10. b_p \quad (3.6)$$

Estas condições representam a influência dos cantos curvos na análise da secção transversal. Assim, se estas condições forem satisfeitas, os cantos curvos podem ser desprezados, sendo possível a utilização das larguras idealizadas, como refere a cláusula 5.1(3) da EN 1993-1-3:2006. No caso destas condições não serem verificadas, as propriedades da secção (área, momentos de inércia e constante de empenamento) tendo em consideração os cantos curvos, pode ainda ser estimadas através da secção bruta idealizada (cláusula 5.1(4)):

$$A_g \approx A_{g,s}(1 - \delta) \quad (3.7)$$

$$I_g \approx I_{g,s}(1 - 2\delta) \quad (3.8)$$

$$I_w \approx I_{w,s}(1 - 4\delta) \quad (3.9)$$

Onde: A_g é a área da secção real (com cantos curvos); $A_{g,s}$ é a área da secção idealizada (com cantos retos); I_g é o momento de inércia da secção real (com cantos curvos); $I_{g,s}$ é o momento de inércia da secção idealizada (com cantos retos); I_w é a constante de empenamento da secção real (com cantos curvos) e $I_{w,s}$ é a constante de empenamento da secção idealizada (com cantos retos).

O fator pelo qual devem ser afetadas as propriedades é dado por:

$$\delta = 0,43. \frac{\sum_j r_j \cdot \frac{\phi_j}{90}}{\sum_i b_{p,i}} \quad (3.10)$$

Onde: r_j é o raio interno do elemento curvo j ; ϕ_j é o ângulo entre elementos planos i e $b_{p,i}$ é a largura do troço i para uma secção idealizada.

ii) Secção bruta nominal (*nominal gross cross-section*): as larguras dos troços são obtidas pela distância entre pontos P (pontos médios) de cantos adjacentes (Figura 3.1). Deste modo, os cantos curvos podem ser considerados no cálculo das propriedades das secções, além dos troços planos. Por outro lado, a secção bruta nominal pode ser sempre utilizada e o cálculo das suas propriedades não exige nenhum fator corretivo. É conveniente salientar que a EN 1993-1-3:2006 não é totalmente explícito na abordagem das larguras idealizadas e nominais. A verificação da condição (3.6), que permite a utilização das larguras idealizadas para

posterior dimensionamento da secção, implica o cálculo das larguras nominais (b_p), tornando esta verificação muito extensa.

3.4 Tipos de instabilidade

O comportamento estrutural e a resistência última de secções abertas de espessura reduzida são fortemente afetados pela presença de fenómenos de instabilidade, os quais se descrevem em seguida:

i) Instabilidade global – é um fenómeno caracterizado pela ocorrência de deformação do eixo elemento estrutural, cuja secção transversal sofre unicamente deslocamentos de corpo rígido no seu próprio plano. De um modo geral, as chapas perfiladas não possuem este tipo de instabilidade, mas a existência de uma componente de compressão do carregamento (por exemplo, quando estas são utilizadas em coberturas inclinadas), faz com que a chapa perfilada passe a funcionar de modo semelhante ao de uma viga-coluna. Deste modo existe a possibilidade da chapa perfilada instabilizar globalmente, embora remotamente, dado que a componente axial do carregamento é geralmente desprezável.

ii) Instabilidade local – é um fenómeno que envolve essencialmente deformações dos troços da secção, permanecendo o seu eixo na configuração indeformada. É importante distinguir dois tipos de instabilidade local:

- a) deslocamentos dos troços internos exclusivamente por flexão; os bordos internos sofrem rotações apenas, pelo que não têm qualquer movimento de translação (Figura 3.2 (a) e (b));
- b) distorções e predominantemente deformações de corpo rígido; os bordos internos sofrem rotações e translações. Este tipo de instabilidade é também designado por instabilidade distorcional (Figura 3.2 (c) e (d));

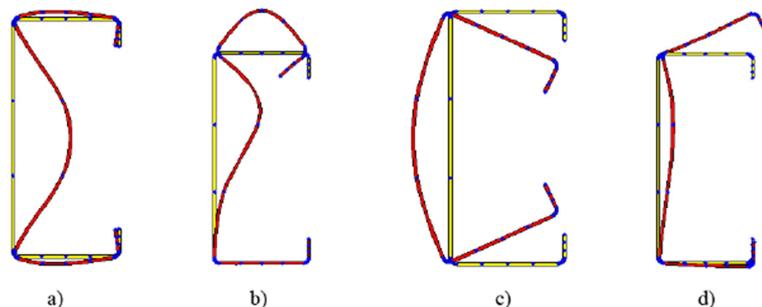


Figura 3.2 – Fenómenos de instabilidade local (Pinto, 2010).

Estes fenómenos de instabilidade podem não ocorrer independentemente, podendo mesmo ocorrer modos mistos de instabilidade. A diferença entre os tipos de instabilidade depende dos comprimentos de onda, da forma e dimensões da secção transversal, e das condições de fronteira.

3.5 Classificação de Secções

3.5.1 Metodologia de classificação

A classificação das secções transversais dos elementos estruturais está relacionada com a sua resistência e capacidade de rotação (isto é, a capacidade de formação de uma rótula plástica) quando existe a possibilidade de ocorrerem fenómenos de encurvadura local. Estes fenómenos podem ocorrer em secções esbeltas, como em elementos de aço enformado a frio, dado que as zonas comprimidas podem não plastificar totalmente (Simões, 2007).

A cláusula 5.5 da EN 1993-1-1:2005 diferencia quatro classes de secções de acordo com as suas capacidades de rotação e de formação de uma rótula plástica:

- ✓ **Classe 1** – secções em que se pode formar uma rótula plástica com capacidade de rotação superior à mínima exigida para a utilização de métodos plásticos de análise;
- ✓ **Classe 2** – secções em que é possível atingir a resistência plástica mas que possuem uma capacidade de rotação limitada;
- ✓ **Classe 3** – secções em que a tensão na fibra extrema (mais solicitada) pode atingir a resistência elástica, mas a resistência plástica poderá não ser atingida devido a fenómenos de instabilidade local;
- ✓ **Classe 4** – secções em que a resistência elástica não é atingida devido à ocorrência de fenómenos de instabilidade local.

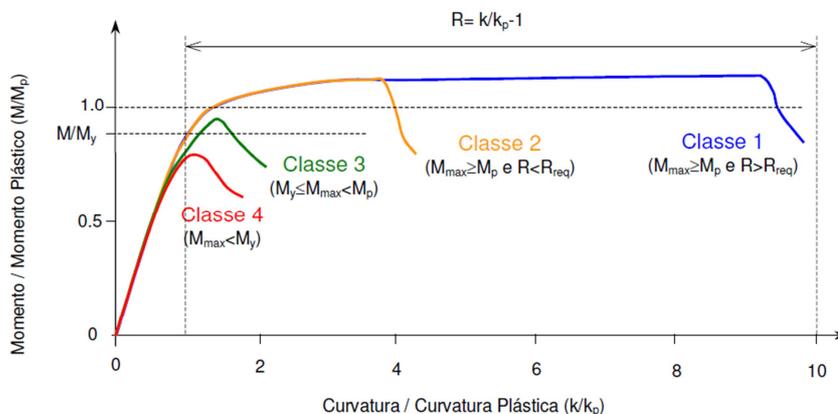


Figura 3.3 – Curvas momentos-curvaturas (Silvestre & Camotim, 2006).

A distinção entre as classes de secções é apresentada na Figura 3.3, na qual é possível verificar que as secções de classe 4 (que é onde normalmente se inserem os enformados a frio), não atingem a resistência plástica total (ou mesmo elástica) devido a fenómenos de instabilidade local.

A classificação de secções baseia-se na relação geométrica entre o comprimento e a espessura (c/t) dos troços comprimidos (alma e banzos). De notar que estes podem estar total ou parcialmente comprimidos, em função dos esforços que atuam na secção (esforço normal e momento fletor). Os valores limite das relações c/t dos troços são apresentadas nas tabelas 5.2 da EN 1993-1-1:2005 e, dependem do parâmetro ε ($\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$) que define a classe do aço utilizado a partir da sua tensão de cedência (f_y). Para um troço cuja relação entre o comprimento e a espessura (c/t) não verifique os limites de determinada classe, deve ser feita a verificação da mesma condição para a classe seguinte.

Os vários troços comprimidos de uma secção podem ter classes diferentes, e nesse caso, a classe da secção é dada pela maior classe (mais desfavorável) dos troços comprimidos que a constituem. No caso das secções de classe 4, os fenómenos de instabilidade local não permitem sequer que a secção atinja a resistência elástica.

Por fim, é importante apresentar dois comentários sobre chapas perfiladas. Como tem sido referido, as chapas perfiladas são elementos estruturais de reduzida espessura, conduzindo, frequentemente, a secções de classe 3 ou 4. Embora as chapas perfiladas sejam estruturas contínuas, é possível realizar a análise e dimensionamento das mesmas considerando apenas uma única nervura. Por esta razão, os troços comprimidos que constituem a secção de uma chapa perfilada são todos troços interiores, ou seja, estão todos apoiados em dois pontos da secção.

3.5.2 Secções de classe 4

As secções de classe 4 são frequentes em elementos de aço enformado a frio, ou seja, a presença de fenómenos de instabilidade local impede que a resistência elástica seja atingida na fibra mais extrema. Para evitar a consideração explícita destes fenómenos, a EN 1993-1-1:2005 preconiza que a avaliação da resistência seja efetuada com base no conceito de secção efetiva, reduzindo as zonas da secção suscetíveis de instabilizar localmente, ou seja, substitui-se a secção bruta, cuja tensão máxima na fibra mais solicitada não atinge a tensão de cedência, por uma secção reduzida.

No caso de instabilidade local, a metodologia de cálculo para a determinação da secção efetiva baseia-se nos procedimentos presentes na EN 1993-1-5:2006. Note-se que este tipo de

instabilidade ocorre precisamente pelo facto de os troços que constituem a secção, não serem reforçados. No entanto, a introdução de reforços permite reduzir, ou mesmo eliminar, a suscetibilidade à instabilidade local, mas pode desencadear outro tipo de instabilidade, designada instabilidade distorcional. Em termos de metodologia para o cálculo da secção efetiva existem diferenças entre os dois tipos de instabilidade. No caso da instabilidade distorcional, em vez da EN 1993-1-5:2006 teríamos de recorrer às regras impostas pela EN 1993-1-3:2006.

Em relação ao cálculo da secção efetiva é importante diferenciar que, para o modo local, este se baseia no conceito de larguras efetivas, ou seja, a redução é feita nas larguras dos troços. O cálculo para o modo distorcional baseia-se no conceito de espessuras reduzidas, onde a redução é efetuada nas espessuras dos troços.

3.5.3 Secção efetiva para a instabilidade local (E. L. U.)

Na análise de um elemento de espessura reduzida, considera-se que a sua secção é formada por um conjunto de troços simplesmente apoiadas nos bordos longitudinais, de tal forma que, o comportamento individual de cada um destes define o comportamento global da secção.

O cálculo de larguras efetivas, deve-se basear no procedimento apresentado no subcapítulo 4.4 da EN 1993-1-5:2006:

i) Determinação dos valores de ψ nos troços paralelos ao eixo de flexão, a partir dos valores dos esforços atuantes devidos ao momento fletor e das propriedades da secção bruta;

ii) Determinação dos valores e da localização das larguras efetivas nos troços paralelos ao eixo de flexão. Após a determinação de ψ , é possível obter o coeficiente de encurvadura k_σ ; Com base no valor de k_σ , calcula-se a esbelteza normalizada do troço, $\bar{\lambda}_{b,k}$, dada por:

$$\bar{\lambda}_{b,k} = \frac{\bar{b}_{p,k}/t_k}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (3.11)$$

A partir do valor da esbelteza normalizada, determina-se o valor do fator de redução de largura efetiva do troço k (ρ_k). Após o cálculo deste fator, determina-se a largura efetiva ($b_{\text{eff},k}$) da parte do troço k que está à compressão. Se o troço apenas estiver sujeito a compressão, a largura efetiva é dada por $b_{\text{eff},k} = \rho \bar{b}_k$, sendo \bar{b}_k a largura do troço k . Para troços interiores, é ainda necessário fazer a subdivisão da largura efetiva ($b_{\text{eff},k}$) em $b_{e1,k}$ e $b_{e2,k}$.

iii) Determinação dos valores de ψ nos troços normais ao eixo de flexão com base nas propriedades de uma secção constituída pelas áreas brutas dos troços normais ao eixo de flexão e pelas áreas efetivas dos troços paralelos ao eixo de flexão;

iv) Determinação dos valores e da localização das larguras efetivas nos troços comprimidos normais ao eixo de flexão;

Após o cálculo das larguras efetivas e posições associadas, obtém-se a secção efetiva para a instabilidade local, e determina-se as propriedades efetivas da secção.

3.5.4 Secção efetiva para a instabilidade distorcional (E.L.U.)

A determinação da secção efetiva para a instabilidade distorcional tem por base o cálculo da tensão crítica. O processo para a determinação das espessuras reduzidas baseia-se nas seguintes etapas:

i) Determinação da secção efetiva para a instabilidade local, ou seja, cálculo das larguras efetivas de cada um dos elementos da secção com base nas disposições apresentadas em 3.5.3.

ii) A partir das larguras efetivas, determinam-se as secções reforçadas para o cálculo de A_s e I_s relativas aos banzos e/ou almas;

iii) Com base nestas secções, procede-se ao cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$) e/ou na alma ($\sigma_{cr,sa}$). No caso de existirem reforços nos banzos e nas almas, a cláusula 5.5.3.4.4 da EN 1993-1-3:2006 define uma tensão crítica modificada ($\sigma_{cr,mod}$) para os dois tipos de reforços, de modo a contemplar a interação entre a encurvadura distorcional nos banzos e nas almas.

iv) Após o cálculo da tensão crítica do reforço, é possível obter a esbelteza distorcional, dada por:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,k}}} \quad (3.12)$$

v) Com base no valor de $\bar{\lambda}_d$ é possível determinar o valor do fator de redução para a instabilidade distorcional χ_d , a partir de:

$$1,00 \quad , \text{ para } \bar{\lambda}_p \leq 0,65 \quad (3.13)$$

$$1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d \quad , \text{ para } 0,65 < \bar{\lambda}_p \leq 1,38 \quad (3.14)$$

$$0,66/\bar{\lambda}_d \quad , \text{ para } \bar{\lambda}_p > 1,38 \quad (3.15)$$

vi) Uma vez determinado o valor de χ_d , calcula-se a espessura reduzida associada ao reforço i :

$$t_{red} = \chi_d \cdot t_i \quad (3.16)$$

Após o cálculo das larguras efetivas e das espessuras reduzidas, obtém-se a secção efetiva para a instabilidade local e distorcional. Repare-se que esta metodologia pode ser considerada como mista local-distorcional, dado que é necessária a determinação das larguras efetivas para poder calcular as espessuras reduzidas. Finalmente, é possível determinar as propriedades efetivas relevantes da secção.

4 APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE CHAPAS PERFILADAS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado um estudo relacionado com a otimização da secção transversal de chapas perfiladas. Este estudo resultou na definição de quatro tipologias de chapa muito competitivas a nível comercial. Neste contexto, desenvolveram-se ferramentas de cálculo, em ambiente Excel®, para a determinação das características mecânicas das chapas perfiladas. Estas ferramentas permitiram a realização de estudos paramétricos direcionados para a avaliação da influência de diversos parâmetros geométricas (largura dos banzos e alma, espessura da chapa e dimensões dos reforços) na resistência à flexão das chapas de aço enformado a frio, para os estados limites últimos. Com base nestes estudos as soluções desenvolvidas são equiparáveis a nível da resistência à flexão, às existentes no mercado, mas, mais competitivas a nível económico.

Este capítulo inicia-se com a apresentação das soluções desenvolvidas, seguindo-se um exemplo de aplicação direta dos conceitos mencionados no capítulo 3, que serviram de base à ferramenta de cálculo automatizado. Por fim, as soluções desenvolvidas serão analisadas e comparadas com as existentes no mercado nacional.

4.2 Soluções desenvolvidas

As quatro secções para chapas perfiladas foram denominadas de T5, T7, T14, C13. Estas chapas poderão ser solicitadas por cargas descendentes ou ascendentes. No caso de cargas descendentes, admite-se a posição “A” conforme apresentado na Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4. Quando solicitadas por cargas ascendentes, admite-se a posição inversa “B”. Importa salientar que as dimensões apresentadas nas figuras correspondem a larguras medidas segundo a linha média das secções.

Na Figura 4.1 é apresentada a chapa perfilada T5 - A. Esta é uma chapa multifuncional, podendo ser usada no revestimento de fachadas ou coberturas. No entanto, é a solução ideal para coberturas devido à elevada altura da secção (30 mm) e largura do banzo inferior (170 mm). Desta forma, garante-se um fácil escoamento da água, reduzindo-se a possibilidade de

infiltração nas zonas de sobreposição da chapa perfilada. Esta chapa apresenta um desenvolvimento total de chapa igual a 1150 mm.

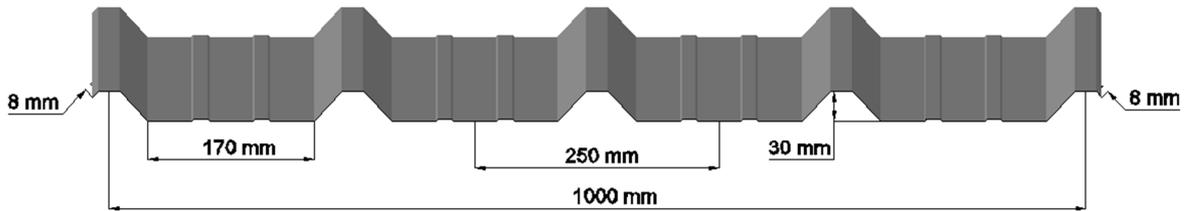


Figura 4.1 – Ilustração da chapa T5 – A.

Na Figura 4.2 apresenta-se a solução T7 – A. Esta é também uma chapa multifuncional, com maior resistência à flexão que a chapa anterior. Esta chapa poderá ser solicitada por maiores carregamentos ou vencer maiores vãos que a chapa T5 – A. Esta solução apresenta um desenvolvimento total de chapa igual a 1250 mm.

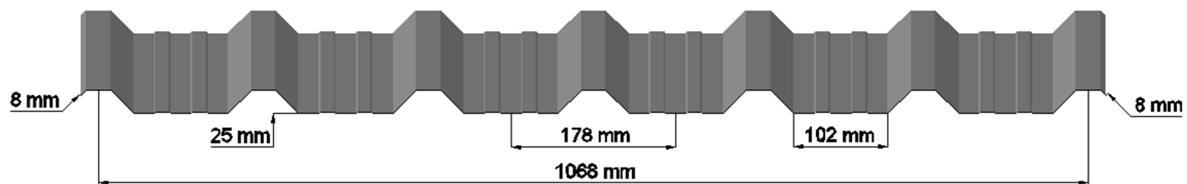


Figura 4.2 - Ilustração da chapa T7 – A.

Na Figura 4.3 é apresentada a solução T14 – A. Esta solução corresponde à chapa menos resistente, mas mais económica. Esta tipologia de chapa destina-se à cobertura de fachadas, pequenas vedações e portões. Não deverá vencer vãos superiores a 75 cm. A solução referida apresenta um desenvolvimento total de chapa igual a 1250 mm.

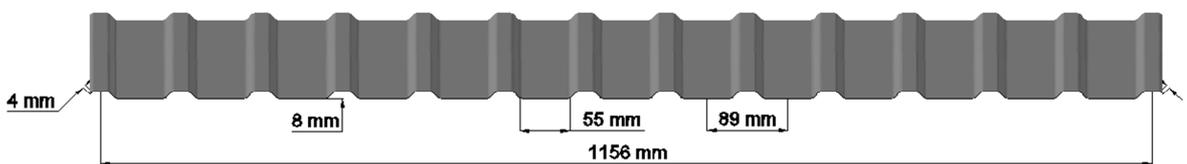


Figura 4.3 - Ilustração da chapa T14 – A.

Finalmente, a Figura 4.4 apresenta a solução C13 – A. Esta é uma chapa ondulada destinada a revestimento de fachadas podendo, no entanto ser também usada em coberturas. A sua

simetria poderá ser um fator importante. A solução referida apresenta um desenvolvimento total de chapa igual a 1150 mm.

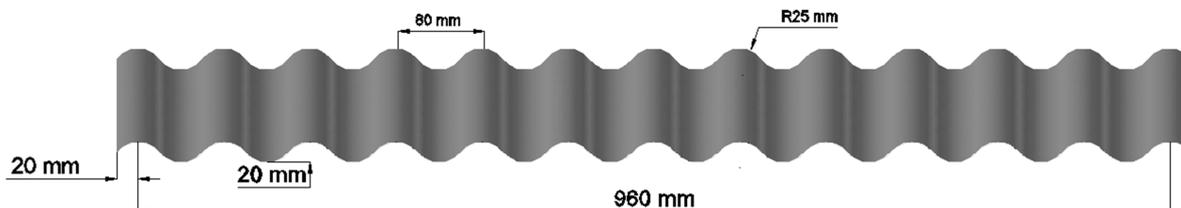


Figura 4.4 - Ilustração da chapa C13 – A.

No Quadro 4.1 são apresentadas as propriedades de resistência à flexão das chapas desenvolvidas. Estas são calculadas para o estado limite último de resistência. A classe do aço é S280GD+Z.

Quadro 4.1- Soluções desenvolvidas e suas propriedades de resistência à flexão.

Chapa	Espessura Nominal [mm]	Banzo Superior em Compressão (Momentos Positivos)			Banzo Inferior em Compressão (Momentos Negativos)		
		Momento Resistente [kN.m/m]	Momento de Inércia [cm ⁴ /m]	Módulo de Flexão [cm ³ /m]	Momento Resistente [kN.m/m]	Momento de Inércia [cm ⁴ /m]	Módulo de Flexão [cm ³ /m]
T5 - A	0,50	0,55	4,75	1,95	0,73	3,47	2,62
T7 - A	0,50	0,66	4,25	2,35	0,90	3,53	3,31
T14 - A	0,50	0,26	0,51	0,91	0,28	0,77	0,99
C13 - A	0,50	0,78	2,78	2,78	0,78	2,78	2,78

4.3 Exemplo de estudo

4.3.1 Características geométricas e propriedades do material

A chapa perfilada adotada para este exemplo é a chapa T7 – A (Figura 4.2). A sua secção tem uma geometria trapezoidal com reforços nos banzos inferiores. A classe do aço é S280GD+Z ($f_y = 280 \text{ N/mm}^2$ e $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$) com possibilidade de acabamento por galvanização ou galvanização/pré-lacagem. Este tipo de aço está de acordo com Tabela 3.1b apresentada na EN 1993-1-5:2006. Na Figura 4.5 são identificados os parâmetros necessários à caracterização geométrica da chapa. Note-se que todas as dimensões apresentadas correspondem à linha média da secção.

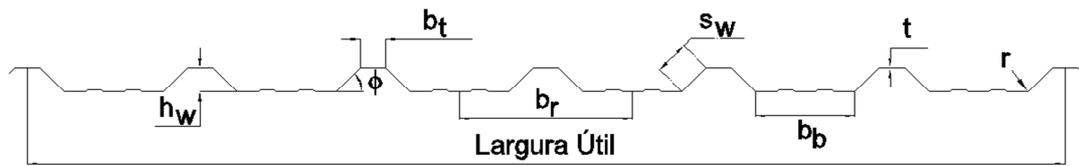


Figura 4.5 – Propriedades geométricas referentes à chapa T7 – A.

No Quadro 4.2 são quantificados os parâmetros identificados anteriormente. A espessura de cálculo, t , é calculada tendo em conta uma espessura da camada de revestimento em zinco igual a 0,04 mm, de acordo com a cláusula 3.2.4 (3) da EN 1993-1-3:2006

Quadro 4.2- Quantificação das propriedades geométricas referentes à chapa T7.

Largura útil	1068,00	mm
h_w	25,00	mm
s_w	35,35	mm
b_b	102,00	mm
b_t	26,00	mm
b_r	178,00	mm
ϕ	45,00	$^\circ$
r_m	5,00	mm
r_{int}	4,77	mm
t_{nom}	0,50	mm
t	0,46	mm

4.3.2 Cálculo secção bruta

A análise de uma chapa perfilada pode resumir-se unicamente à análise da secção transversal de uma das suas nervuras. A nervura da secção é o conjunto de todos os troços compreendidos entre a largura b_r (Figura 4.6). Nesta análise, todos os troços constituintes da secção simplificada são considerados interiores (na classificação e cálculo da secção efetiva) uma vez que, a chapa é tratada como um elemento contínuo.

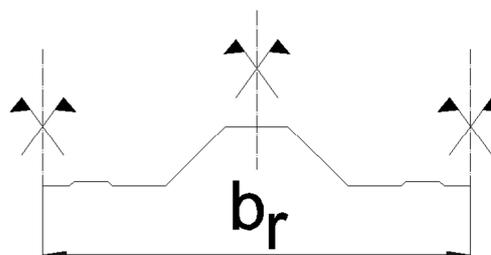


Figura 4.6 – Nervura da secção.

i) Secção bruta

No caso do estudo de chapas perfiladas, optou-se por analisar a secção bruta nominal em detrimento de uma secção idealizada. Recorde-se que, no caso da secção nominal, as larguras dos troços retos são obtidas pela distância entre pontos médios de cantos adjacentes (ver Figura 3.1); no caso da secção idealizada, as larguras são obtidas pela distância entre pontos X (Figura 3.1).

A análise de uma secção idealizada composta apenas por troços retos é, em norma, um procedimento mais simplificado. No entanto, as propriedades desta secção devem ser afetadas pelo parâmetro δ , relativo à influência dos cantos curvos. Sendo a chapa perfilada T7 - A um elemento com raio de curvatura elevado ($r_m = 5,00$ mm), a utilização deste parâmetro pode conduzir a resultados mais conservativos (e não tão otimizados), pelo que se optou por analisar uma secção bruta nominal. Os troços curvos foram incluídos no cálculo das propriedades resistentes da secção.

No Quadro 4.3 são apresentadas as larguras brutas nominais de acordo com o ponto 3.3 (ii) da presente dissertação.

Quadro 4.3- Larguras nominais.

g_r	0,16	mm
$b_{t,p}$	25,68	mm
$b_{b,p}$	101,68	mm
$s_{w,p}$	35,04	mm

ii) Verificação das proporções geométricas (cláusula 5.2 da EN 1993-1-3:2006)

A satisfação das condições apresentadas no Quadro 4.4 garante a possibilidade de utilização das expressões para o dimensionamento de elementos estruturais, de acordo com a EN 1993-1-3:2006.

Quadro 4.4- Verificação das proporções geométricas.

$b_{t,p} / t \leq 500$	56,52	Verifica
$b_{b,p} / t \leq 500$	221,74	Verifica
$b_{s,p} / t \leq 500$	76,86	Verifica
$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$	45,00	Verifica
$h_w / t \leq 500 \sin \phi$	54,35	Verifica

iii) Influência dos cantos curvos (cláusula 5.1 da EN 1993-1-3:2006)

Tal como especificado no ponto 3.3 i), o efeito dos cantos curvos pode, ou não, ser desprezado mediante a verificação das condições apresentadas no Quadro 4.5. Neste caso, o

efeito dos cantos curvos não pôde ser desprezado, pelo que foram incluídos na análise da secção efetiva.

Quadro 4.5- Influência dos cantos curvos.

$r / t \leq 5,00$	10,37	Não verifica
$r / b_{t,p} \leq 0,10$	0,02	Verifica
$r / b_{b,p} \leq 0,10$	0,00	Verifica
$r / s_{w,p} \leq 0,10$	0,01	Verifica

4.3.3 Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos positivos

i) Classificação da secção e respetiva secção efetiva para os E.L.U.

A classificação dos troços que constituem uma secção deve ser realizada de acordo com o Quadro 5.2 da EN 1993-1-1:2005. Note-se que todos os troços que constituem a secção da chapa perfilada são troços interiores. Para momentos positivos, o banzo superior encontra-se à compressão uniforme e o banzo inferior à tração, não sendo necessário proceder à classificação para este último troço. Com base no Quadro 4.6, e de acordo com o ponto 3.5.1, concluiu-se que o banzo superior é de classe 4, havendo redução da sua largura.

Quadro 4.6- Classificação do banzo superior comprimido uniformemente.

c	25,68	mm
t	0,46	mm
ε	0,92	
$c/t \leq 42 \varepsilon$	Não verifica	

A largura efetiva do banzo superior, representada na Figura 4.7 por b_{e1} e b_{e2} , foi calculada segundo a cláusula 5.5.2 da EN 1993-1-5:2006. Estes parâmetros dependem da esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}_p$, e os seus valores são apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7- Determinação da largura efetiva do banzo superior comprimido.

$\bar{\lambda}_p$	1,07	
ρ	0,74	
$b_{e1} = b_{e2}$	9,51	mm
f_r	2,07	mm
$b_{e1,c} = b_{e2,c}$	7,44	mm

Posteriormente subtraiu-se o parâmetro $f_r (= r_m \cdot \tan(\phi/2))$ às larguras efetivas b_{e1} e b_{e2} (ver Figura 4.7), obtendo-se as larguras planas efetivas denominadas $b_{e1,c}$ e $b_{e2,c}$.

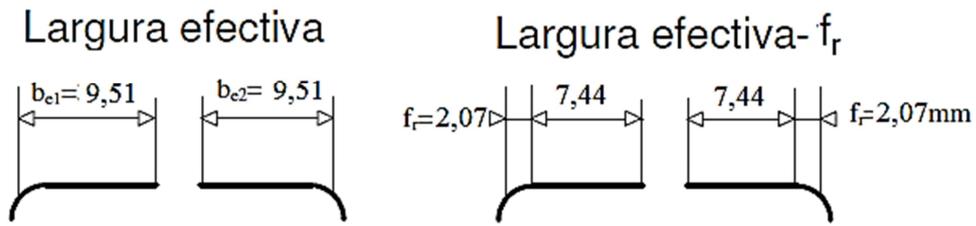


Figura 4.7 – Largura efectiva de um elemento uniformemente comprimido [mm].

Estando banzo inferior à tração, não há redução da largura do troço. Os parâmetros $b_{e1,c}$ e $b_{e2,c}$ para este troço são apresentados na Quadro 4.8.

Quadro 4.8- Determinação da largura efectiva do banzo inferior tracionado.

$b_{e1} = b_{e2}$	50,84	mm
$b_{e1,c} = b_{e2,c}$	48,77	mm

Finalmente classifica-se a alma desta secção. Essa classificação é feita com base na distribuição de tensões elástica da secção. Esta secção inclui a largura bruta da alma (normal ao eixo de flexão) e as larguras efectivas dos troços paralelos ao eixo de flexão, como demonstrado na Figura 4.8.

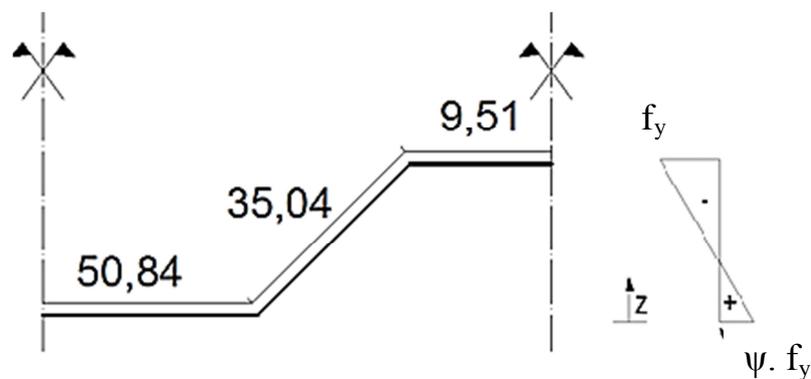


Figura 4.8 – Largura efectiva de um elemento normal ao eixo de flexão [mm].

Estando a alma da secção solicitada à flexão e à compressão, o Quadro 4.9 mostra que este troço é de classe 4 e será necessária a redução da sua largura.

Quadro 4.9- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão.

Z_g	7,69	mm
Ψ	-0,44	
$c/t \leq [42 \varepsilon / (0,67 + 0,33 \psi)]$	Não verifica	

Os cantos curvos foram considerados no cálculo da largura efetiva da alma e consequente secção efetiva final. Na Figura 4.9 é apresentada a secção incluindo os cantos curvos e larguras efetivas planas dos banzos e, os parâmetros necessários ao cálculo da largura efetiva da alma.

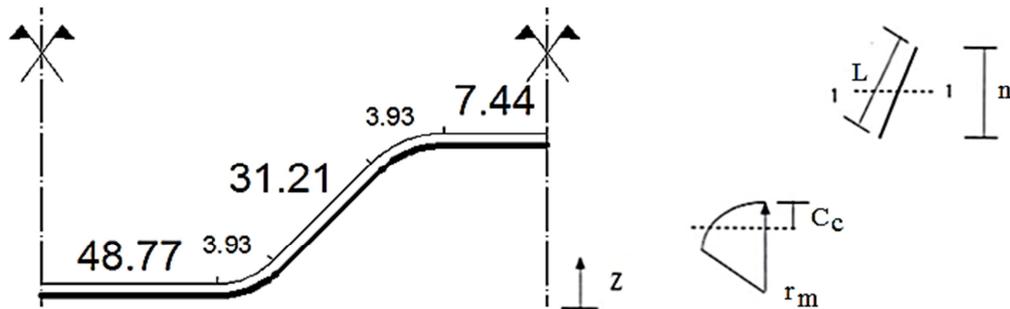


Figura 4.9 - Secção incluindo os cantos curvos e larguras efetivas planas dos banzos [mm].

Com base nos parâmetros C_c e n (Figura 4.9) foram calculados os momentos de inércia da alma e cantos curvos. Os valores são apresentados no Quadro 4.10 em função da espessura da secção com vista à aplicação do Método Linear. O Método Linear assume que todo o material está concentrado na linha média da secção e todos os troços (planos e curvos) passam a ser unidimensionais (sem dimensão perpendicularmente à linha média, i.e., $t=0$) em vez de elementos de área ($t \neq 0$). A linearização de todos os troços da secção é apresentada no Quadro 4.11.

Quadro 4.10- Cálculo da inércia da alma e cantos curvos.

n	22,07	mm
C_c	0,50	mm
I_{canto}/t	0,76	mm ⁴ /mm
I_{alma}/t	1267,08	mm ⁴ /mm

Quadro 4.11- Linearização de todos os troços da secção.

L [mm]	z [mm]	L.z [mm²]
48,77	0,00	0,00
3,93	0,50	1,96
31,21	12,50	390,17
3,93	24,50	96,22
7,44	25,00	186,08
$\Sigma = 95,28$		$\Sigma = 674,42$

O Quadro 4.12 apresenta os dados necessários ao cálculo da parte não efetiva da alma, Δ , e sua posição, z_{Δ} , de acordo com a cláusula 5.5.3.4.3 da EN 1993-1-5:2006.

Quadro 4.12- Cálculo da parte não efetiva da alma.

e_c	17,92	mm
s_n	25,35	mm
$s_{eff,1}$	9,57	mm
$s_{fl,el,w}$	7,66	mm
$s_{eff,n}$	14,36	mm
Δ	1,41	mm
z_Δ	17,73	mm

ii) Cálculo das propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.

O cálculo das propriedades de resistência à flexão foi feito recorrendo, mais uma vez, à linearização de todos os troços constituintes da secção em estudo. O Quadro 4.13 mostra a informação do Quadro 4.11 e adiciona-lhe duas novas colunas correspondentes as parcelas $L.z^2$ e $I_{troço}$. Estas parcelas serão utilizadas no conhecido Teorema de Steiner (em função da espessura), necessário ao cálculo do momento de inércia da secção efetiva em relação ao eixo de rotação que passa pelo seu centro de gravidade.

Quadro 4.13- Linearização de todos os troços da secção.

L[mm]	z [mm]	L.z [mm²]	L.z² [mm²]	I_{troço} [mm⁴/mm]
48,77	0,00	0,00	0,00	-
3,93	0,50	1,96	0,98	0,76
31,21	12,50	390,17	4877,06	1267,08
-1,41	17,73	-25,00	-443,25	-0,08
3,93	24,50	96,22	2357,48	0,76
7,44	25,00	186,08	4652,12	-
$\Sigma = 93,87$		$\Sigma = 649,43$	$\Sigma = 11444,39$	$\Sigma = 1268,68$

No Quadro 4.14 são apresentadas as propriedades de resistência à flexão para os E.L.U. da secção efetiva solicitada por momentos positivos.

Quadro 4.14- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U..

z	6,92	mm
$I_{y,meianervura}/t$	8220,20	mm ⁴ /mm
$I_{y,nervura}$	7561,81	mm ⁴
I_y	4,25	cm ⁴ /m
W_{eff}	2,35	mm ³ /mm
M_{Rd}	657,91	Nmm/mm
M_{Rd}	0,66	kNm/m

4.3.4 Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos negativos

i) Classificação da secção e respetiva secção efetiva para os E.L.U.

Para momentos negativos, o banzo inferior encontra-se à compressão uniforme e o banzo superior à tração, não sendo necessário proceder à classificação para este último troço. Nesta situação, o reforço existente no banzo inferior (Figura 4.10) torna-se eficiente, contrariamente ao sucedido para momentos positivos (4.3.3).

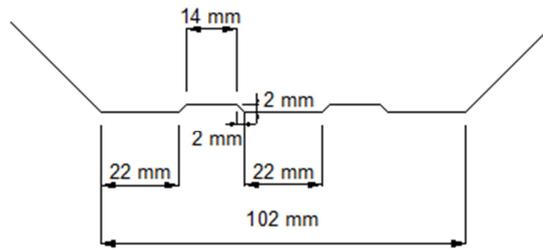


Figura 4.10 - Esquema dos reforços longitudinais localizados no banzo inferior da chapa T7-A.

À semelhança do procedimento anterior, classificam-se os troços comprimidos, que constituem o banzo inferior. Com base no Quadro 4.15 conclui-se que os troços maiores (22 mm) são de classe 4 pelo que foram reduzidos. Os troços menores (14 mm), que constituem os reforços introduzidos, são de classe 2 pelo que a sua largura não se altera. A largura efetiva correspondente ao maior troço (22 mm) é calculada no Quadro 4.16.

Quadro 4.15- Classificação do banzo inferior comprimido uniformemente.

c	22,00	mm
t	0,46	mm
ε	0,92	
$c/t \leq 42 \varepsilon$	Não verifica	
c	14,00	mm
t	0,46	mm
ε	0,92	
$c/t \leq 38 \varepsilon$	Verifica	

Quadro 4.16- Determinação da largura correspondente ao maior troço (22 mm).

$\bar{\lambda}_p$	0,92	
ρ	0,83	
$b_{e1} = b_{e2}$	9,10	mm
$b_{e1,c} = b_{e2,c}$	7,03	mm

Estando o banzo superior à tração, não é necessário a sua classificação e consequentemente não há redução da sua largura. Os parâmetros $b_{e1,c}$ e $b_{e2,c}$ para este troço são apresentados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17- Determinação da largura efetiva do banzo superior tracionado.

$b_{e1} = b_{e2}$	12,84	mm
$b_{e1,c} = b_{e2,c}$	10,77	mm

Finalmente classifica-se a alma da secção. Com base nos parâmetros apresentados no Quadro 4.18, verifica-se que este troço é de classe 3 ou inferior.

Quadro 4.18- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão (distribuição elástica).

C	35,04	mm
T	0,46	mm
Z_g	17,24	mm
Ψ	-2,22	
$c/t \leq [62 \cdot \varepsilon (1 - \Psi) \cdot \sqrt{-\Psi}]$	Verifica	

De modo a verificar se a alma é de classe 2, é admitida uma distribuição plástica de tensões, como indicado nas tabelas 5.2 da EN 1993-1-1:2005. Com base no Quadro 4.19 verifica-se que a alma é de classe 3 para momentos negativos.

Quadro 4.19- Classificação da alma solicitada à flexão e à compressão (distribuição plástica).

α	0,83
$c/t \leq [456\varepsilon/(13\alpha - 1)]$	Não verifica

Com o objetivo de verificar a existência de fenómenos de instabilidade local na alma, aplicaram-se os princípios de cálculo já apresentados no ponto 4.3.3, relativos à largura efetiva deste troço. O Quadro 4.20 e o Quadro 4.21 fornecem os dados necessários ao cálculo da parte não efetiva da alma, Δ , e sua posição, z_{Δ} , de acordo com a cláusula 5.5.3.4.3 da EN 1993-1-5:2006. O valor Δ é negativo uma vez que a alma é de classe 3. Assim não há redução da largura da alma.

Quadro 4.20- Linearização de todos os troços da secção.

L [mm]	z [mm]	L.z [mm ²]
7,03	0,00	0,00
3,93	0,50	1,96
31,21	12,50	390,17
3,93	24,50	96,22
10,77	25,00	269,28
$\Sigma = 56,87$		$\Sigma = 757,62$

Quadro 4.21- Linearização de todos os troços da secção.

e_c	11,68	mm
s_n	16,52	mm
$s_{eff,1}$	9,57	mm
$s_{fl,el,w}$	7,66	mm
$s_{eff,n}$	14,36	mm
Δ	-7,42	mm

A existência de reforços no banzo comprimido contribuiu para um aumento de eficácia do mesmo. Nesse sentido foi considerada a existência de uma zona reforçada (Figura 4.11 (b)). A introdução de reforços permite reduzir a suscetibilidade à instabilidade local, mas pode desencadear instabilidade distorcional. Assim é necessário determinar da espessura efetiva para a instabilidade distorcional que tem por base o cálculo da tensão crítica (ponto 3.5.4 desta dissertação).

Na Figura 4.11 são apresentados os parâmetros necessários ao cálculo da espessura efetiva das zonas reforçadas, de acordo com a cláusula 5.5.3.4.2 da EN 1993-1-3:2006. Os seus valores são apresentados no Quadro 4.22.

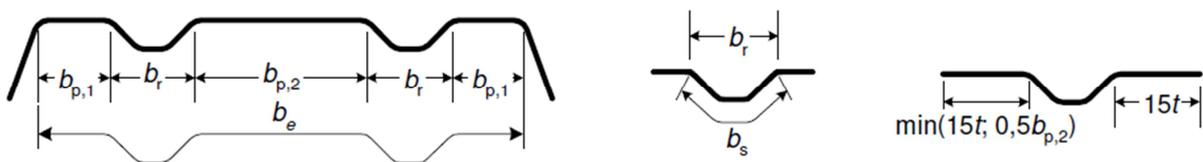


Figura 4.11 - Parâmetros necessários ao cálculo da espessura efetiva das zonas reforçadas.

Quadro 4.22- Caracterização da zona reforçada.

b_r	18,00	mm
$15.t$	6,90	mm
$0,5.b_{p,2}$	11,00	mm

Após a definição da zona reforçada, procede-se ao cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$) de acordo com os procedimentos apresentados no Quadro 4.23 e Quadro 4.24.

Quadro 4.23- Linearização de todos os troços da zona reforçada.

L[mm]	z [mm]	L.z [mm ²]	L.z ² [mm ²]	I _{troço} [mm ⁴ /mm]
13,80	0,00	0,00	0,00	-
5,66	1,00	5,66	5,66	1,89
14,00	2,00	28,00	56,00	-
$\Sigma = 33,46$		$\Sigma = 33,66$	$\Sigma = 61,66$	$\Sigma = 1,89$

Quadro 4.24- Cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$).

z	1,01	mm
A _s /t	43,52	mm
I _s /t	29,68	mm ³
l _b	196,07	mm
s _w	35,04	mm
l _b /s _w	5,60	
K _w = k _{w0}	1,98	
$\sigma_{cr,s}$	106,80	N/mm ²

Uma vez determinado o valor da tensão crítica, é possível calcular a espessura reduzida associada aos troços constituintes da zona reforçada. Os resultados do cálculo são apresentados no Quadro 4.25.

Quadro 4.25- Espessura reduzida associada à zona reforçada.

$\bar{\lambda}_p$	1,62
χ_d	0,41
t _{red} /t	0,41

iii) Cálculo das propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.

O cálculo das propriedades de resistência à flexão foi feito recorrendo, mais uma vez, à linearização de todos os troços constituintes da secção em estudo. Para a situação de momentos positivo, o Quadro 4.26 apresenta a nova componente t_{red}/t, calculada no Quadro 4.25, introduzindo-se assim a espessura reduzida, associada à instabilidade distorcional da zona reforçada, na linearização da secção.

Quadro 4.26- Linearização de todos os troços da secção.

L [mm]	t_{red}/t	L [mm]	z [mm]	L.z [mm ²]	L.z ² [mm ²]	Itroço [mm ⁴ /mm]
13,80	0,41	5,63	0,00	0,00	0,00	0,00
5,66	0,41	2,31	1,00	2,31	2,31	0,77
14,00	0,41	5,71	2,00	11,41	22,83	0,00
7,03	1,00	7,03	0,00	0,00	0,00	-
3,93	1,00	3,93	0,50	1,96	0,98	0,76
31,21	1,00	31,21	12,50	390,17	4877,06	1267,08
3,93	1,00	3,93	24,50	96,22	2357,48	0,76
10,77	1,00	10,77	25,00	269,28	6732,05	-
		$\Sigma = 70,51$		$\Sigma = 771,34$	$\Sigma = 13992,70$	$\Sigma = 1269,37$

No Quadro 4.27 são apresentadas as propriedades de resistência à flexão para os E.L.U. da secção efetiva solicitada por momentos negativos.

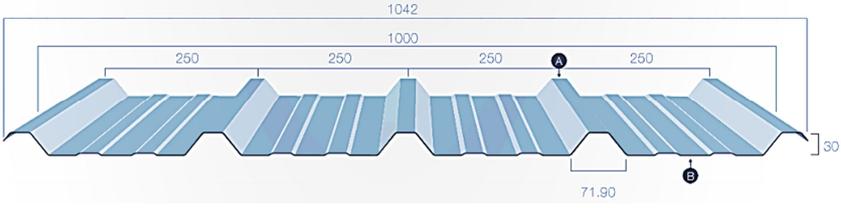
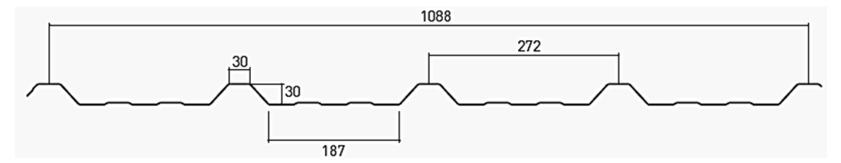
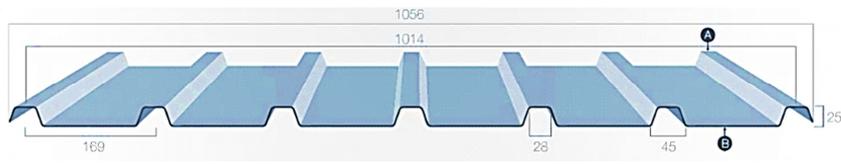
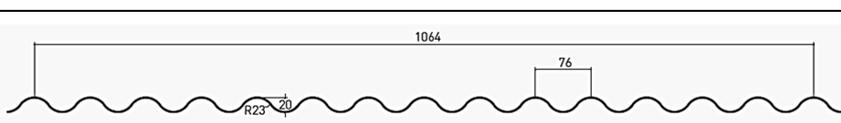
Quadro 4.27- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.

z	10,94	mm
$I_{y,meianervura}/t$	6823,82	mm ⁴ /mm
$I_{y,nervura}$	6277,92	mm ⁴
I_y	3,53	cm ⁴ /m
W_{eff}	3,22	mm ³ /mm
M_{Rd}	902,71	Nmm/mm
M_{Rd}	0,90	kNm/m

4.4 Condicionantes e diretivas na otimização das secções

O conjunto de chapas estudadas nesta dissertação (três chapas trapezoidais e uma ondulada) foi pensado como uma solução global, capaz de satisfazer a maior parte das necessidades de revestimento, no sector da construção metálica. Numa primeira fase do trabalho foram identificadas as secções mais comercializadas no panorama nacional, para possível orientação na definição das secções aqui apresentadas, assim como nos valores resistentes esperados. O Quadro 4.28 mostra quais as secções que serviram de referência a cada uma das chapas estudadas.

Quadro 4.28- Chapas perfiladas analisadas no contexto da dissertação.

Chapa	Chapa Analisada	Secção Transversal [mm]
T5 - A	“4-250-30” <i>Alaço</i>	
	“P2-272-30” <i>O Feliz</i>	
T7 - A	“6-169-25” <i>Alaço</i>	
T14 - A	“14-82-08” <i>Alaço</i>	
C13 - A	“P4-76-20” <i>O Feliz</i>	

Um dos requisitos da empresa cliente deste trabalho era a otimização da produção das chapas. Este requisito foi satisfeito com base na uniformização das dimensões das bobinas de chapa, necessária para perfilagem. Assim, i) fixaram-se duas larguras de bobine: 1150 e 1250 mm e ii) desenvolveram-se duas secções com desenvolvimento igual para cada uma das larguras. Deste modo garantiu-se a otimização da produção, aquisição e armazenamento de material.

Com base nas ferramentas de cálculo desenvolvidas, foi possível calcular as propriedades de resistência à flexão (E.L.U.) de várias tipologias de chapas. Note-se que a verificação de estado limite último de resistência deverá incluir a quantificação da resistência à flexão simples, resistência a esforço transversal, resistência a forças localizadas e interação entre forças localizadas e momento fletor quando estes dois efeitos ocorrem simultaneamente na mesma secção. No entanto, a otimização das chapas perfiladas teve em conta apenas os

parâmetros de resistência à flexão, uma vez que estes são os parâmetros mais condicionantes e os apresentados pela generalidade dos fabricantes.

No sentido de se avaliar as soluções desenvolvidas, calcularam-se os rácios entre a largura útil revestida pelas chapas e o largura das bobines que lhes dão origem. Estes rácios são apresentados no Quadro 4.29. No Quadro 4.30 esses rácios são comparados com os obtidos para as chapas perfiladas de referência.

Quadro 4.29- Fatores de comparação - secções desenvolvidas.

Chapa Desenvolvida	Módulo de Flexão [cm ³ /m]		Espessura Nominal [mm]	Peso [kg/m]	Largura Bobina [mm]	Largura Útil [mm]	Rácio [%]
	Posição A	Posição B					
T5	1,95	2,62	0,50	4,51	1150,00	1000,00	86,96
T7	2,35	3,31	0,50	4,91	1250,00	1068,00	85,44
T14	0,91	0,99	0,50	4,91	1250,00	1156,00	92,48
C13	2,78	2,78	0,50	4,51	1150,00	960,00	83,48

Quadro 4.30- Comparação com chapas de referência.

Chapa de Referência	Módulo de Flexão [cm ³ /m]		Largura Bobina [mm]	Largura Útil [mm]	Rácio [%]	Chapas Desenvolvidas	
	Posição A	Posição B				Chapa	Rácio [%]
“4-250-30”	1,82	2,46	1250,00	1000,00	80,00	T5	86,96
“P2-272-30”	1,86	2,18	1265,00	1088,00	86,01		
“6-169-25”	2,16	1,84	1250,00	1014,00	81,12	T7	85,44
“14-82-08”	1,06	1,74	1250,00	1148,00	91,84	T14	92,48
“P4-76-20”	2,68	2,68	1275,00	1064,00	83,45	C13	83,48

Com base na análise das tabelas anteriores, pode constatar-se que os rácios de utilização nas secções desenvolvidas são superiores aos das secções de referência. A otimização destes rácios constitui um processo iterativo. Como referido anteriormente, a maior condicionante prendeu-se com a largura de bobine para cada chapa perfilada. Outra condicionante considerada neste processo foi a altura das chapas. Estas alturas estão relacionadas com a aplicação pretendida para cada chapa (como mostrado anteriormente) pelo que, se definiram

valores iguais às chapas de referência. Assim fixaram-se alturas 30, 25, 8, 20 mm para as chapas T5 – A, T7 - A, T14 - A, C13 -A respetivamente.

Nestas secções optaram-se por inclinações das almas muito próximas dos 45° . Este é o limite mínimo para aplicação das disposições regulamentares propostas pela EN 1993-1-3:2006. Este valor permitiu otimizar a largura útil coberta por qualquer troço não paralelo ao eixo de flexão (as almas da secção). No que se refere ao raio de dobragem, considerou-se um valor elevado (5 mm) no sentido de se otimizar a quantidade de material usada em concordâncias; a sua incorporação nas chapas perfiladas e, respetiva influência nas propriedades de resistência a flexão, foi analisada na metodologia de cálculo apresentada no subcapítulo 4.3.2 (i).

No que diz respeito às secções T5 - A e T7 - A, introduziram-se reforços nos banzos inferiores das chapas. A existência destas nervuras de rigidez contribuiu para um aumento de eficácia dos banzos comprimidos. Neste domínio tentou-se otimizar a tensão crítica dos reforços introduzidos nos banzo ($\sigma_{cr,s}$); na Figura 4.10 é possível verificar a introdução de 2 reforços trapezoidais, com largura plana de 14 mm. A utilização deste reforço contribuiu significativamente para o aumento da resistência a momentos negativos. Essa contribuição é muito notória na chapa T5 – A.

Relativamente à chapa perfilada C13, a possibilidade de otimização foi mais reduzida visto que há menor variedade de parâmetros geométricos: fixou-se uma largura total de chapa igual a 1150 mm, uma altura igual a 20 mm. Respeitando estas limitações, foi possível desenvolver uma secção com semicírculos de maior raio e maior afastamento, relativamente à chapa de referência. Desta forma obteve-se uma secção de rácio equivalente mas, com propriedades de resistência a flexão mais elevadas.

5 APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE MADRES Ω

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado um estudo de otimização de madres com secção transversal Ω . Este estudo resultou na definição de quatro secções transversais muito competitivas a nível comercial. À semelhança do processo referido no capítulo 4 para as chapas, também para as madres de secção Ω se desenvolveu uma ferramenta de cálculo, em ambiente Excel®, para a determinação das suas características mecânicas. Foi avaliada a influência de diversos parâmetros geométricos (largura dos banzos e alma, espessura da chapa e dimensões dos reforços intermédios e de extremidade) na resistência à flexão simples das madres, em estados limites últimos. Com base nestes estudos as soluções desenvolvidas são equiparáveis a nível da resistência à flexão às existentes no mercado, mas, mais competitivas a nível económico.

Este capítulo inicia-se com a apresentação das soluções desenvolvidas, seguindo-se um exemplo de aplicação direta dos conceitos mencionados no capítulo 3, que serviram de base à ferramenta de cálculo automatizado. Por fim, as soluções desenvolvidas serão justificadas e comparadas com as existentes no mercado nacional.

5.2 Soluções desenvolvidas

No contexto deste trabalho desenvolveram-se 4 secções para madres Ω denominadas $\Omega 100$, $\Omega 120$, $\Omega 140$ e $\Omega 160$. Estas secções caracterizam-se pela presença de reforços de extremidade nos banzos inferiores e, dois reforços intermédios nas almas e banzo superior. Cada uma das secções poderá ser produzida numa gama de 3 valores de espessura: $t = 1$ mm, $t = 1,3$ mm e $t = 1,6$ mm. As secções desenvolvidas são apresentadas na Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 respetivamente. Note-se que as dimensões indicadas correspondem a larguras medidas pelo exterior da secção.

No Quadro 5.1 são apresentadas as propriedades de resistência à flexão para momentos positivos em estados limites últimos, relativas ao eixo de maior inércia das secções.

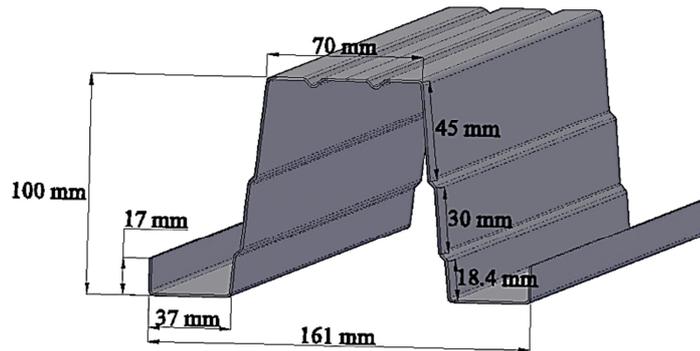


Figura 5.1 - Secção transversal da madre $\Omega 100$.

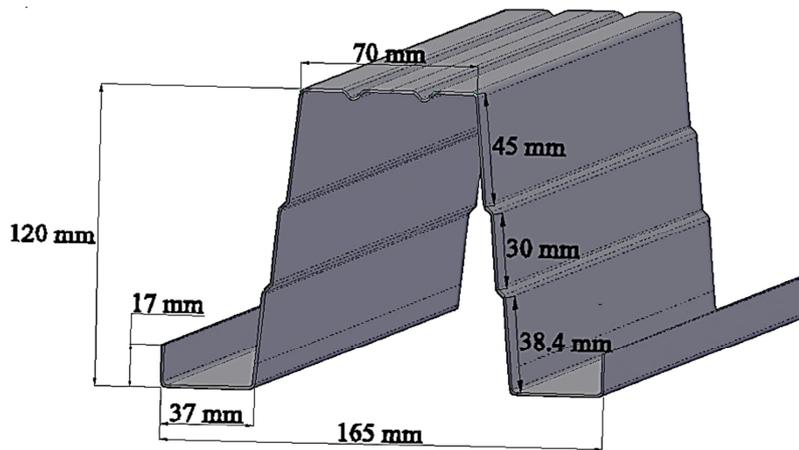


Figura 5.2 - Secção transversal da madre $\Omega 120$.

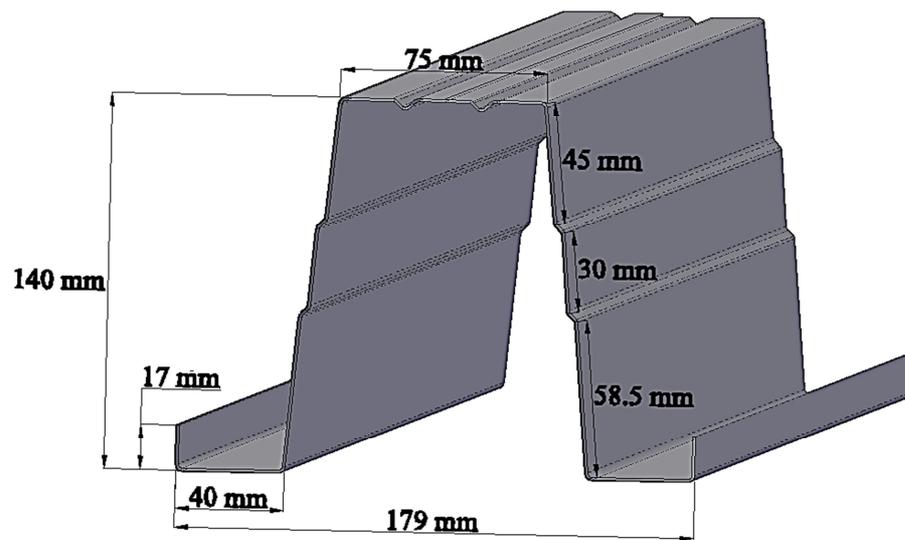


Figura 5.3 - Secção transversal da madre $\Omega 140$.

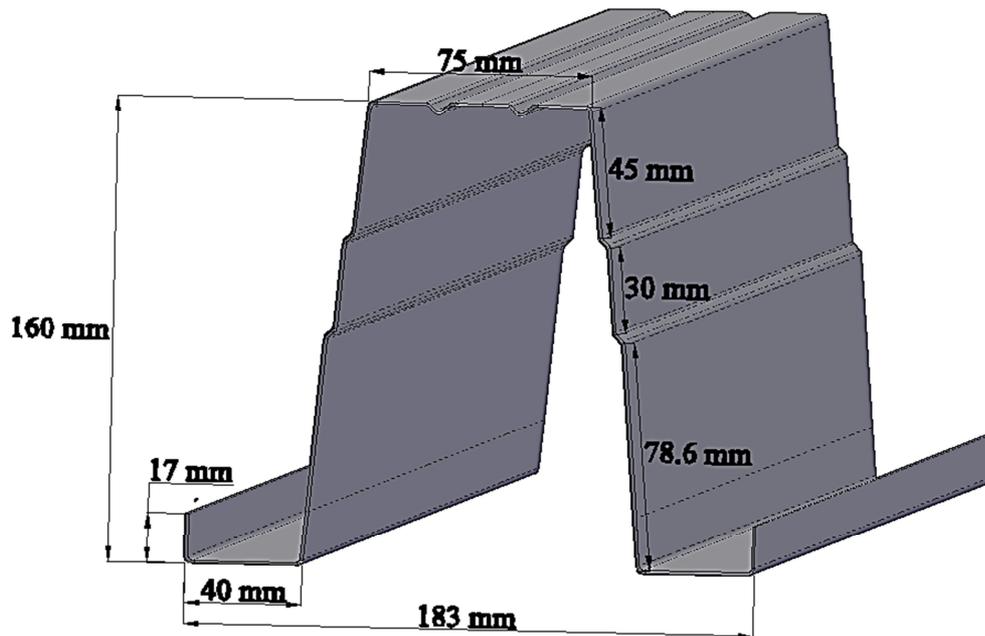


Figura 5.4 - Secção transversal da mãe $\Omega 160$.

Quadro 5.1- Madres Ω desenvolvidas e suas propriedades de resistência à flexão simples.

Dimensões		Peso [kg/m]	Banzo Superior em Compressão (Momentos Positivos)	
t_{nom} [mm]	H [mm]		Momento de Inércia [cm ⁴]	Módulo de Flexão [cm ³]
1,00	100	3,02	48,37	8,48
1,30	100	3,90	65,16	11,70
1,60	100	4,78	82,47	15,15
1,00	120	3,33	73,81	10,82
1,30	120	4,31	100,40	15,14
1,60	120	5,29	127,31	19,63
1,00	140	3,73	109,46	13,75
1,30	140	4,84	147,65	18,94
1,60	140	5,93	188,06	24,66
1,00	160	4,05	151,22	16,73
1,30	160	5,25	204,27	23,07
1,60	160	6,43	260,00	29,99

5.3 Metodologia de Cálculo

A secção Ω adotada para este exemplo é a $\Omega 120$. A classe do aço é S280GD+Z ($f_y = 280$ N/mm² e $f_u = 360$ N/mm²) com possibilidade de acabamento por galvanização ou galvanização/pré-lacagem. Na Figura 5.5 são identificados todos os parâmetros necessários à caracterização geométrica da secção; no Quadro 5.2 se quantificam esses parâmetros. A geometria relativa aos reforços intermédios no banzo superior e nas almas será apresentada posteriormente. A espessura de cálculo, t , é calculada tendo em conta uma espessura da camada de revestimento em zinco igual a 0,04 mm.

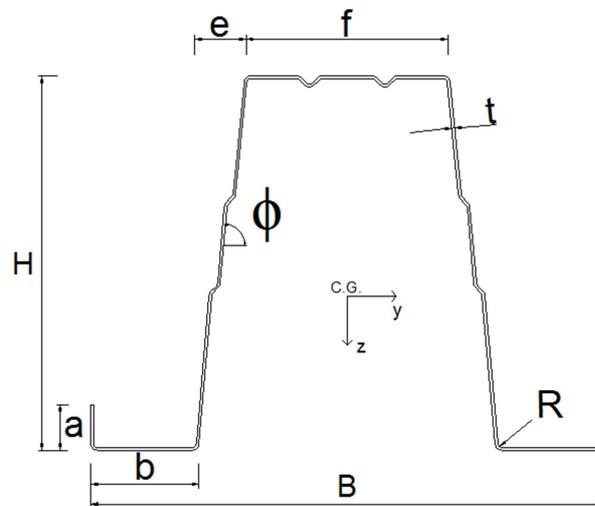


Figura 5.5 - Propriedades geométricas referentes à secção Ω .

Quadro 5.2- Quantificação das propriedades geométricas referentes à secção Ω .

H	120,00	mm
a	17,00	mm
b	37,00	mm
f	70,00	mm
e	10,41	mm
B	164,82	mm
t_{nom}	1,00	mm
t	0,96	mm
r_{int}	1,50	mm
r_m	1,98	mm
ϕ	85,00	^o

5.3.1 Cálculo secção bruta

i) Secção bruta

No caso de estudo de secções Ω , optou-se por analisar uma secção bruta idealizada onde as larguras dos troços são obtidas pela distância entre pontos X (Figura 3.1). A influência dos cantos curvos foi verificada posteriormente.

No Quadro 5.3 apresentam-se as larguras brutas idealizadas de acordo com o ponto 3.3 (ii) da presente dissertação. As larguras brutas são medidas pela linha média da secção.

Quadro 5.3- Larguras brutas idealizadas.

a_c	16,50	mm
b_c	36,00	mm
H_c	119,00	mm
e_c	10,41	mm
f_c	69,00	mm

ii) Verificação das proporções geométricas (cláusula 5.2 da EN 1993-1-3:2006)

A satisfação das condições apresentadas no Quadro 5.4 garante a possibilidade de utilização das expressões para o dimensionamento de elementos estruturais, de acordo com a EN 1993-1-3:2006.

Quadro 5.4- Verificação das proporções geométricas.

$b_{\min} / t \leq 500$	17,19	Verifica
$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$	85,00	Verifica
$0,20 \leq a_c/H_c \leq 0,60$	0,30	Verifica
$0,10 \leq b_c/H_c \leq 0,30$	0,14	Verifica

iii) Influência dos cantos curvos (cláusula 5.1 da EN 1993-1-3:2006)

Tal como especificado no ponto 3.3 i), o efeito dos cantos curvos pode, ou não, ser desprezado mediante a verificação das condições apresentadas no Quadro 5.5. Neste caso, o efeito dos cantos curvos pôde ser desprezado.

Quadro 5.5- Influência dos cantos curvos.

$r / t \leq 5$	1,56	Verifica
$r / b_{\min} \leq 0.10$	0,09	Verifica

5.3.2 Cálculo das propriedades de resistência à flexão para momentos positivos

O anexo C da EN 1993-1-3:2006 apresenta métodos simplificados para o cálculo das propriedades resistentes em madres de secção Σ ; enquanto que no anexo E são apresentados os métodos simplificados para o dimensionamento de madres C, Z e Σ . No entanto, este regulamento não apresenta nenhuma formulação específica para o cálculo das propriedades resistentes de madres Ω . Sendo esta a secção, da mesma tipologia que as chapas perfiladas trapezoidais, optou-se por analisar a influência dos reforços intermédios do banzo superior e das almas, de acordo com as cláusulas 5.5.3.4.2, 5.5.3.4.3 e 5.5.3.4.4 da EN 1993-1-3:2006. Uma vez que apenas foi estudada a resistência à flexão para momentos positivos, relativa ao eixo y, não foi necessária analisar a influência dos reforços de extremidade, localizados nos banzos inferiores que se encontram tracionados.

i) Secção efetiva para os E.L.U.

Para momentos positivos, o banzo superior encontra-se à compressão uniforme sendo necessária a verificação dos fenómenos de instabilidade local de distorcional. Na Figura 5.6 é apresentado o pormenor dos reforços usados no banzo superior das secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$.

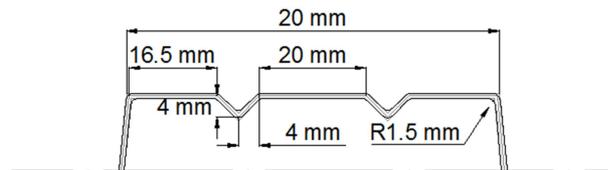


Figura 5.6 - Reforços triangulares localizados no banzo superior das secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$.

Com base no Figura 5.6 conclui-se que o maior de troços (20 mm) é de classe 1 pelo que não é necessário reduzir a largura de qualquer troço do banzo superior. Está assim garantida a inexistência de instabilidade local. Os banzos inferiores encontram-se tracionados, não sendo necessário classifica-los e proceder à redução das suas larguras.

Quadro 5.6- Classificação do banzo inferior comprimido uniformemente.

c	20,00	mm
t	0,96	mm
ε	0,92	
$c / t \leq 33 \varepsilon$	Verifica	

Com o objetivo de verificar a existência de fenómenos de instabilidade local na alma, aplicaram-se os princípios de cálculo da cláusula 5.5.3.4.3 da EN 1993-1-3:2006. Nesse sentido é necessária conhecer a posição do eixo de flexão. Sendo as larguras dos banzos

efetivas, usa-se a secção bruta idealizada neste cálculo. Na Figura 5.7 são discretizados todos os troços da secção. Os números 1,2,3,4,5,6 e 7 da secção referem-se às larguras dos troços planos da secção; os números i, ii, iii e iv referem-se às larguras dos reforços da secção.

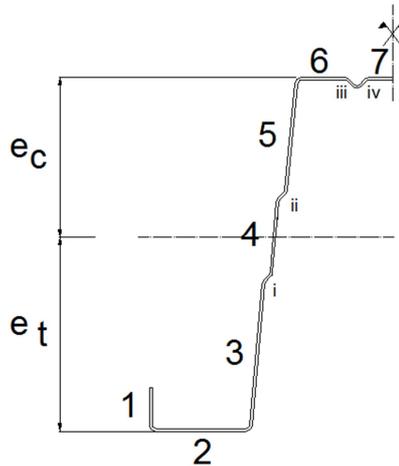


Figura 5.7 – Discretização da secção.

No Quadro 5.7 são linearizados e quantificados todos os troços da secção discretizada. Com base nessa linearização, define-se a posição do eixo de flexão através nos parâmetros e_c e e_t , apresentados no Quadro 5.8.

Quadro 5.7- Linearização de todos os troços da secção.

Troços	L [mm]	z [mm]	L.z [mm ²]
1	16,50	8,25	136,13
2	36,00	0,00	0,00
3	38,43	19,14	735,69
4	30,00	56,23	1686,85
5	45,00	96,59	4346,35
6	16,50	119,00	1963,50
7	10,00	119,00	1190,00
i	4,24	39,79	168,80
ii	4,24	72,67	308,32
iii	5,66	117,50	664,68
iv	5,66	117,50	664,68
$\Sigma = 212,23$			$\Sigma = 11864,99$

Quadro 5.8- Posição do eixo de flexão.

e_t	55,91	mm
e_c	63,09	mm

Na Figura 5.8 (a) são apresentados todos os parâmetros necessários à aplicação da EN 1993-1-3:2006. Na Figura 5.8 (b) são apresentadas as larguras necessárias à sua quantificação.

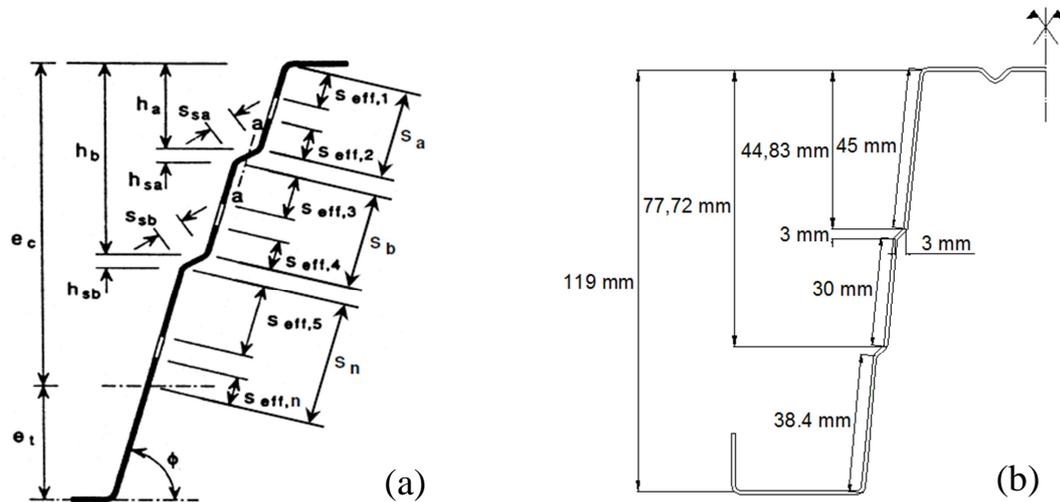


Figura 5.8 – (a) Alma com dois reforços intermédios (EN 1993-1-3:2006); (b) Larguras necessárias.

De acordo com da cláusula 5.5.3.4.3 da EN 1993-1-3:2006, calcularam-se as larguras efetivas $S_{eff,i}$, apresentadas no Quadro 5.9.

Quadro 5.9- Quantificação das larguras $S_{eff,i}$.

$S_{eff,0}$	19,84	mm
$S_{eff,1}$	19,84	mm
$S_{eff,2}$	26,88	mm
$S_{eff,3}$	27,36	mm
$S_{eff,4}$	32,05	mm
$S_{eff,5}$	32,53	mm
$S_{eff,n}$	29,76	mm

Analisando as larguras $S_{eff,i}$, conclui-se que todos os troços da alma são eficazes relativamente aos fenómenos de instabilidade local pelo que, não foi necessário reduzir a sua largura. Essa análise baseia-se nas condições apresentadas no Quadro 5.10.

Quadro 5.10- Análise das larguras $S_{eff,i}$.

$S_{eff,n} + S_{eff,5} \geq S_n$	Troço Eficaz
$S_{eff,4} + S_{eff,3} \geq S_b$	Troço Eficaz
$S_{eff,4} + S_{eff,3} \geq S_b$	Troço Eficaz

A EN 1993-1-3:2006 propõe ainda a revisão dos parâmetros $s_{eff,i}$. As larguras corrigidas serão importantes no cálculo das propriedades de resistência à flexão.

Quadro 5.11- Parâmetros $s_{eff,i}$ corrigidos.

$s_{eff,1}$	19,11	mm
$s_{eff,2}$	25,89	mm
$s_{eff,3}$	13,81	mm
$s_{eff,4}$	16,19	mm

A existência de reforços no banzo e almas da secção contribuiu para um aumento de efetividade da mesma. No entanto é necessário ter em conta os fenómenos de instabilidade distorcional. Nesse sentido calculou-se a tensão crítica associada aos respetivos reforços.

No que se refere aos reforços existentes na alma, a tensão crítica da zona reforçada mais próxima do banzo comprimido é calculada de acordo com a cláusula 5.5.3.4.3 (7) da EN 1993-1-3:2006. A zona comprimida referida está representada na Figura 5.9, enquanto os parâmetros relativos ao cálculo da tensão crítica são apresentados no Quadro 5.12.



Figura 5.9 – Zona reforçada mais próxima do banzo comprimido.

Quadro 5.12- Caracterização da zona reforçada.

A_{sa}/t	43,95	mm
I_{s1}/t	88,48	mm ³
s_1	106,94	mm
s_2	59,81	mm
k_f	1,00	
$\sigma_{cr,s}$	166,22	N/mm ²

Na Figura 4.11, ilustrada no ponto 4.3.4, foram apresentados os parâmetros necessários ao cálculo da tensão crítica das zonas reforçadas localizadas no banzo comprimido da secção. A quantificação destes parâmetros para a secção em estudo é apresentada no Quadro 5.13.

Quadro 5.13- Caracterização da zona reforçada.

b_s	11,31	mm
$15.t$	14,40	mm
$0,5.b_{p,2}$	10,00	mm

Após a definição da zona reforçada, procede-se ao cálculo da tensão crítica associada ($\sigma_{cr,s}$) de acordo com os procedimentos apresentados no Quadro 5.14 e Quadro 5.15.

Quadro 5.14- Linearização de todos os troços da zona reforçada.

L[mm]	z [mm]	L.z [mm2]	L.z² [mm2]	H [mm]	I_{troço} [mm⁴/mm]
24,40	0,00	0,00	0,00	0,96	1,87
11,31	2,00	22,63	45,25	4,00	15,08
$\Sigma = 35,71$		$\Sigma = 22,63$	$\Sigma = 45,25$		$\Sigma = 16,96$

Quadro 5.15- Cálculo da tensão crítica do reforço no banzo ($\sigma_{cr,s}$).

z	0,63	mm
A_s/t	35,71	mm
I_s/t	47,88	mm ³
l_b	127,99	mm
s_w	119,45	mm
l_b/s_w	1,07	
k_w	1,00	kw0
$\sigma_{cr,s}$	235,49	N/mm ²

Uma vez que esta secção apresenta reforços nos banzos e nas almas, a cláusula 5.5.3.4.4 da EN-1993-1-3:2006 define uma tensão crítica modificada ($\sigma_{cr,mod}$) para os dois tipos de reforços, de modo a contemplar a interação entre a encurvadura distorcional nos banzos e nas almas. No Quadro 5.16 são apresentados os parâmetros relativos ao cálculo da $\sigma_{cr,mod}$, bem como a espessura reduzida relativa, t_{red}/t .

Quadro 5.16- Cálculo da tensão crítica modificada ($\sigma_{cr,mod}$).

β_s	0,26	
$\sigma_{cr,mod}$	234,33	N/mm ²
$\bar{\lambda}_p$	1,10	
χ_d	0,67	
t_{red}/t	0,67	

ii) Cálculo das propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.

O cálculo das propriedades de resistência à flexão foi feito recorrendo, mais uma vez, à linearização de todos os troços constituintes da secção em estudo. Esta linearização é apresentada no Quadro 5.17, e as propriedades de resistência à flexão são apresentadas no Quadro 4.19.

Quadro 5.17- Linearização de todos da secção.

Troços	L [mm]	t_{red}/t	L [mm]	z [mm]	L.z [mm ²]	L.z ² [mm ²]	I _{troço} [mm ⁴ /mm]
1	16,50	1,00	16,50	8,25	136,13	1123,03	374,34
2	36,00	1,00	36,00	0,00	0,00	0,00	2,76
3	38,43	1,00	38,43	19,14	735,69	14083,00	4694,33
4	16,19	1,00	16,19	56,23	910,12	51174,68	350,70
4*	13,81	0,67	9,31	78,81	733,70	57821,58	66,73
5	45	0,67	30,33	103,89	3150,89	327357,36	2306,95
6	2,10	1,00	2,10	119,00	249,90	29738,10	0,16
6*	14,40	0,67	9,70	119,00	1154,89	137431,88	0,75
7	10	0,67	6,74	119,00	802,01	95438,81	0,52
i	4,24	1,00	4,24	39,79	168,80	6715,58	3,18
ii	4,24	0,67	2,86	72,67	207,79	15100,54	3,18
iii	5,67	0,67	3,81	117,50	447,96	52635,87	2,31
iv	5,67	0,67	3,81	117,50	447,96	52635,87	2,31
			$\Sigma = 180,03$		$\Sigma = 9145,83$	$\Sigma = 841256,30$	$\Sigma = 7805,93$

Quadro 5.18- Propriedades de resistência à flexão para os E.L.U.

z	50,80	mm
I _y /t	384430,97	mm ³
I _{ytotal}	73,81	cm ⁴
W _{eff,y}	10,82	cm ³

5.4 Condicionantes e diretivas na otimização das secções

O conjunto de madres Ω estudadas neste trabalho foi pensado como uma solução otimizada, no que diz respeito às propriedades de resistência à flexão e ao seu processo de fabrico. Recorde-se que foram desenvolvidos 4 secções Ω com uma gama de 3 valores de espessura: $t = 1$ mm, $t = 1,3$ mm e $t = 1,6$ mm. Na primeira fase do trabalho foram identificadas várias secções comercializadas, para possível orientação na definição das novas secções, assim como nos valores resistentes esperados. Nesse sentido foram analisadas as secções Ω oferecidas pelas empresas Barreiro Perfil, Perfil Norte, Mundiperfil, Constálica, Utilperfil e Arval. No entanto verificou-se que nenhuma destas empresas disponibiliza as propriedades relativas à

secção efetiva das secções que comercializam. Este facto demonstra a dificuldade inerente ao cálculo destas propriedades. Por outro lado, estudos recentes demonstram que a EN 1993-1-3:2006 sobredimensiona os esforços de flexão atuantes no banzo comprimido (sendo em alguns casos bastante conservativos), podendo os perfis e as chapas de revestimento ser vistos como um conjunto (Chaves, 2014). Neste contexto, decidiu-se calcular as propriedades efetivas das novas secções e os respetivos valores resistentes, mas o estudo comparativo com as outras secções existentes no mercado é feito em função dos valores resistentes brutos..

No que respeita ao mercado interno, identificou-se o Perfil Ω oferecido pela Utilperfil como um dos mais comercializados. A sua secção transversal e propriedades resistentes à flexão simples são apresentadas na Figura 5.10 e no Quadro 4.19, respetivamente. As outras secções indicadas anteriormente, nomeadamente a secção Ω produzida pela Arval, serviram de referência à definição da geometria.

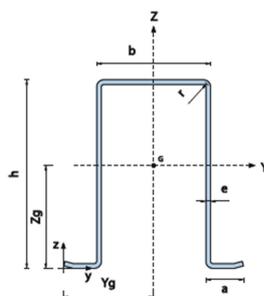


Figura 5.10 – Tipologia da secção transversal Ω da empresa Utilperfil.

Quadro 5.19- Propriedades de resistência à flexão apresentadas pelo fabricante.

t [mm]	H [mm]	A [cm ²]	Peso [kg/m]	I _{y+} [cm ⁴]	W _{y+} [cm ³]
1,50	100	4,37	3,43	57,63	10,79
2,00		5,77	4,53	74,93	14
2,50		7,13	5,60	91,32	17,07
1,50	120	4,97	3,90	90,54	14,24
2,00		6,57	5,16	118,07	18,54
2,50		8,13	6,38	144,32	22,66
1,50	140	5,63	4,42	136,55	18,71
2,00		7,45	5,85	178,54	24,46
2,50		9,23	7,25	218,8	29,93
1,50	160	6,23	4,89	191,48	23,04
2,00		8,25	6,48	250,79	30,18
2,50		10,23	8,03	307,9	37,01

Note-se que as dimensões apresentadas pela secção de referência correspondem a larguras medidas pelo exterior da secção. Esta foi a primeira diretiva seguida no processo de otimização destas secções. Assim, as larguras medidas pela linha média da secção diminuem para espessuras maiores.

Com base nas ferramentas de cálculo desenvolvidas, foi possível calcular as propriedades de resistência à flexão (E.L.U.) de as várias secções Ω . Recorde-se que a otimização das secções teve em conta apenas os parâmetros de resistência à flexão simples, uma vez que estes são os parâmetros mais condicionantes para as madres, e os apresentados pela generalidade dos fabricantes. A Figura 5.11 ilustradas a evolução na otimização das secções Ω ; o balanço entre os seus pesos e as suas propriedades resistentes, assim como o método de produção foram os principais condicionantes deste processo.

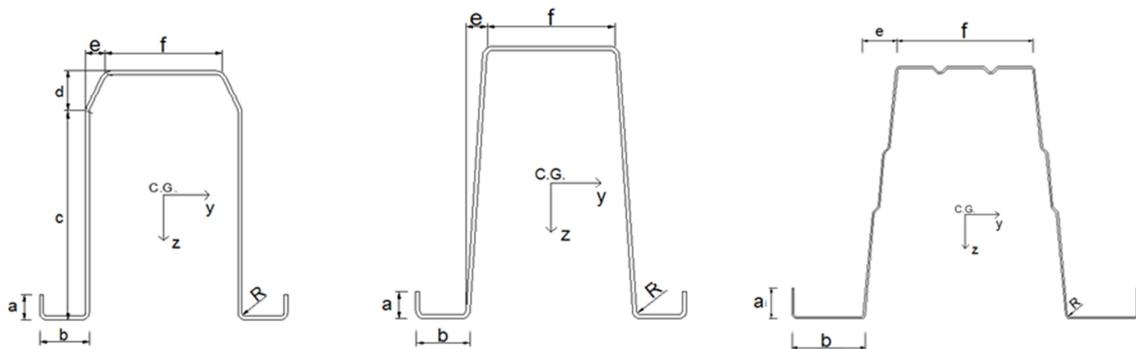


Figura 5.11 – Progressão na otimização da secção Ω .

Relativamente aos métodos de produção, a otimização baseou-se na uniformização de vários pormenores geométricos entre o conjunto das secções Ω desenvolvidas. De seguida descreve-se essa uniformização:

i) Fixação de larguras dos banzos superiores e reforços introduzidos: as secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$ apresentam banzos superiores iguais (Figura 5.12 (a)); o mesmo se verifica para as secções $\Omega 140$ e $\Omega 160$ (Figura 5.12(b)).



Figura 5.12 – (a) Banzo superior das secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$; (b) Banzo superior das secções $\Omega 140$ e $\Omega 160$

ii) Fixação de larguras, ângulos e reforços introduzidos nas almas da secção: as almas das secções $\Omega 100$, $\Omega 120$, $\Omega 140$ e $\Omega 160$ estão divididas em três troços, sendo os dois primeiros iguais em todas as secções desenvolvidas. Esta uniformização é ilustrada na Figura 5.13, pelo parâmetro G. Esse parâmetro é variável em função da altura pretendida para a secção Ω .

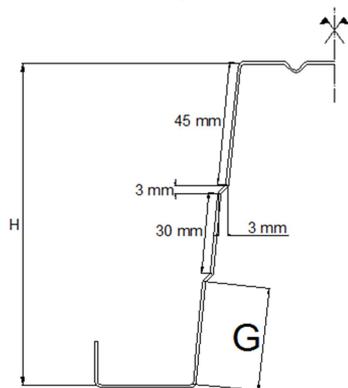


Figura 5.13 – Variação do parâmetro G.

iii) Fixação de larguras dos banzos inferiores e reforços de extremidade introduzidos: as secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$ apresentam larguras dos banzos inferiores iguais e, o mesmo se sucede para as secções $\Omega 140$ e $\Omega 160$. Os reforços de extremidade são iguais em todas as secções desenvolvidas.

Como resultado da uniformização descrita, os diversos perfis poderão ser produzidos recorrendo a uma única perfiladora de rolos ajustáveis. Foi também garantida a uma solução competitiva ao nível do armazenamento e transporte pela possibilidade das diversas secções encaixarem sucessivamente umas nas outras.

A uniformização acima descrita foi controlada pelos parâmetros resistentes de referência. Repare-se que, por essa razão, as larguras dos banzos e reforços subjacentes não são iguais para todas as secções. Note-se ainda a presença do reforço mais inferior da alma: este é eficaz apenas para as secções $\Omega 140$ e $\Omega 160$; no entanto, foi mantido nas secções $\Omega 100$ e $\Omega 120$.

Finalmente, o Quadro 5.20 compara-se a secção desenvolvida com o conjunto de secções de referência. Note-se que se conseguiram secções equivalentes em propriedades de resistência brutas, mas para gamas de espessuras diferentes. No que diz respeito às propriedades de resistência efetivas, é interessante notar a elevada eficiência dos reforços introduzidos. Sendo o conjunto de soluções apresentada de menor espessura, a presença destes reforços é essencial na resistência aos fenómenos de instabilidade local. O Quadro 4.21 apresenta os significantes ganhos em peso do conjunto de secções estudadas. Conseguiu-se assim um ganho mínimo de

12,06 % para secção $\Omega 100$ de menor espessura ($t = 1,00$), podendo ir até 19,90 % para a secção $\Omega 160$ de maior espessura ($t = 1,60$ mm).

Quadro 5.20- Comparação entre pesos das secções.

Solução Utilperfil				Solução Desenvolvida					
Dimensões		Secção Bruta		Dimensões		Secção Bruta		Secção Efetiva	
t [mm]	H [mm]	I_{y+} [cm ⁴]	W_{y+} [cm ³]	t [mm]	H [mm]	I_{y+} [cm ⁴]	W_{y+} [cm ³]	I_{y+} [cm ⁴]	W_{y+} [cm ³]
1,50	100	57,63	10,79	1,00	100	57,56	10,90	48,37	8,48
2,00		74,93	14	1,30		74,00	14,06	65,16	11,70
2,50		91,32	17,07	1,60		90,06	17,18	82,47	15,15
1,50	120	90,54	14,24	1,00	120	88,40	14,01	73,81	10,82
2,00		118,07	18,54	1,30		113,78	18,09	100,40	15,14
2,50		144,32	22,66	1,60		138,64	22,13	127,31	19,63
1,50	140	136,55	18,71	1,00	140	132,99	18,13	109,46	13,75
2,00		178,54	24,46	1,30		171,37	23,43	147,65	18,94
2,50		218,8	29,93	1,60		209,05	28,67	188,06	24,66
1,50	160	191,48	23,04	1,00	160	183,23	21,93	151,22	16,73
2,00		250,79	30,18	1,30		236,27	28,35	204,27	23,07
2,50		307,9	37,01	1,60		288,43	34,71	260,00	29,99

Quadro 5.21- Comparação entre pesos das secções.

Solução Utilperfil			Solução Desenvolvida			Δ Peso [%]
t [mm]	H [mm]	Peso [kg/m]	t [mm]	H [mm]	Peso [kg/m]	
1,50	100	3,43	1,00	100	3,02	-12,06
2,00		4,53	1,30		3,90	-13,82
2,50		5,60	1,60		4,78	-14,57
1,50	120	3,90	1,00	120	3,33	-14,60
2,00		5,16	1,30		4,31	-16,37
2,50		6,38	1,60		5,29	-17,17
1,50	140	4,42	1,00	140	3,73	-15,52
2,00		5,85	1,30		4,84	-17,32
2,50		7,25	1,60		5,93	-18,18
1,50	160	4,89	1,00	160	4,05	-17,21
2,00		6,48	1,30		5,25	-19,01
2,50		8,03	1,60		6,43	-19,90

6 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os resultados de um estudo experimental realizado no DEC da FCTUC, com a finalidade de verificar o estudo analítico de chapas perfiladas apresentado no capítulo 4 desta dissertação. Este estudo experimental será alvo de uma análise exaustiva no âmbito de uma outra dissertação de mestrado.

6.1 Análise Experimental

O trabalho experimental realizado até ao momento consiste em cinco ensaios experimentais de chapas perfiladas: três ensaios em chapas de secção do tipo T5 e dois ensaios em chapas de secção do tipo T14. Todas as chapas são em aço de classe S280GD+Z, com espessura nominal 0,50 mm. As chapas foram ensaiadas na posição “A”. Estes provetes foram fabricados pelo processo de quinagem, pelo apresentaram algumas imperfeições que foram desprezadas no contexto deste estudo.



(a)



(b)

Figura 6.1 – (a) Provete T5 – A; (b) Provete T14 – A.

Todos os provetes foram submetidos um ensaio de flexão, por meio de um carregamento uniforme, simulado através do peso de uma camada água uniformemente distribuída. No caso das chapas perfiladas T5 – A, ensaiaram-se provetes com um vão de 2 m enquanto, no caso das chapas perfiladas T14 – A, ensaiaram-se provetes com um vão de 1 m. A preparação do ensaio, nomeadamente a disposição de todos os elementos necessários à sua realização, seguiu os pressupostos definidos no Anexo A da EN 1993-1-3:2006.

Os resultados dos ensaios são comparados, no Quadro 6.1, com resultados analíticos obtidos através da utilização da ferramenta de cálculo desenvolvida nesta dissertação.

Quadro 6.1- Comparação entre resultados experimentais e analíticos.

	Ensaio	Valor Analítico	Valor Experimental	Δ [%]
		M_{Rd} [kNm/m]	M_{max} [kNm/m]	
T5 - A	1	0,55	0,67	+ 22,15
T5 - A	2	0,55	0,67	+ 23,16
T5 - A	3	0,55	0,66	+ 21,37
T14 - A	1	0,26	0,38	+ 48,74
T14 - A	2	0,26	0,37	+ 46,60

A avaliação experimental da resistência à flexão dos dois ensaiados permitiu a observação e identificação de fenómenos de instabilidade local. A verificação da segurança das chapas relativamente a este fenómeno está assegurada uma vez que, a determinação do valor de cálculo dos esforços resistentes foi efetuada com base no princípio das secções efetivas.

Concluiu-se que as chapa perfiladas T5 e T14, ensaiada na posição “A” apresentaram comportamento mecânico em conformidade com as previsões analíticas, uma vez que os momentos máximos experimentais superam largamente os momentos resistentes elásticos de cálculo. No entanto, ainda existe uma larga margem para a otimização dos procedimentos de cálculo adotados.

7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Esta dissertação apresenta um estudo analítico baseado nas partes 1-3 e 1-5 do Eurocódigo 3, para a otimização da forma da secção transversal de chapas perfiladas e um outro estudo similar para madres de secção Ω . Com base nestes estudos apresentaram-se secções mais competitivas a nível económico e, tanto quanto possível, otimizadas ao nível das propriedades de resistência à flexão dos elementos de aço enformado a frio.

Estes estudos de otimização revelaram-se desafiantes. As principais condicionantes e diretivas, apresentadas nos capítulos destinados aos dois casos de estudos, não eram claras no início deste processo. A sua definição implicou um período de maturação no que respeita às necessidades da indústria da construção e respetivos processos de produção, só conseguido através da iteração direta com engenheiros de produção da empresa adjudicatária do projeto. Recorde-se que, no caso de chapas perfiladas, uniformizaram-se as dimensões das bobinas de chapa necessárias à sua perfilagem (1150 e 1250 mm). No caso das secções Ω , foram uniformizados vários pormenores geométricos, no sentido de se sistematizar a produção. Durante este processo de otimização, houve a necessidade de analisar várias secções preliminares, tanto de chapas perfiladas como de madres Ω , que não estão apresentadas nesta dissertação.

Como resultado do estudo de otimização de chapas perfiladas, apresentou-se um conjunto de três chapas trapezoidais e uma ondulada, pensadas como uma solução global, capaz de satisfazer a maior parte das necessidades de revestimento, no sector da construção metálica. As soluções apresentadas são equiparáveis a nível da resistência à flexão às existentes no mercado, mas, mais competitivas a nível económico.

No que diz respeito ao caso de estudo de madres Ω , conseguiram-se secções otimizadas do ponto de vista da resistência à flexão segundo o eixo de maior inércia, com poupanças muito significativas no peso das madres, podendo ir até 19 % para a secção $\Omega 160$. O processo de fabrico foi também tido em consideração, no sentido de se obterem soluções ainda mais competitivas a nível económico. Refira-se que a análise da flexão segundo o eixo de menor inércia não é apresentada nesta dissertação, embora sejam esperadas resistências bastante

elevadas uma vez que, as secções desenvolvidas são bastante largas e possuem reforço de extremidade nos seus banzos livres.

Relativamente às opções tomadas nos processos de cálculos, a EN 1993-1-3:2006 possibilita o cálculo das tensões críticas dos reforços através de análises de encurvadura elástica recorrendo a métodos numéricos. No entanto não se recorreu a esses métodos uma vez que se pretendia uma automatização total do cálculo propriedades resistentes da secção.

7.2 Desenvolvimentos futuros

A curta análise experimental referida no final desta dissertação teve apenas como referência ensaios à flexão simples em chapas perfiladas de um vão. Contudo, considera-se importante concretizar outros ensaios que permitam um conhecimento mais aprofundado e geral das soluções desenvolvidas. As secções resultantes do caso de estudo de madres Ω também deverão ser produzidas e testadas.

Por fim, propõe-se a elaboração de tabelas de dimensionamento de chapas perfiladas com as secções otimizadas (Quadro 7.1). Relativamente à verificação do estado último de resistência, deverão ser quantificados todos os parâmetros relativos da resistência à flexão simples, resistência ao esforço transversal, resistência a forças localizadas e interação entre forças localizadas e momento fletor quando estes dois efeitos ocorrem simultaneamente na mesma secção. Também deverão ser verificados os estados limites de serviço – deformação.

Quadro 7.1- Proposta para elaboração de tabelas de dimensionamento de chapas perfiladas.

Chapas T5, T7 e C13	
Vãos:	1,00 m; 1,10 m; 1,20 m; 1,30 m; 1,40 m; 1,50 m; 1,60 m; 1,70 m; 1,80 m; 1,90 m; 2,00 m; 2,10 m; 2,20 m; 2,30 m; 2,40 m; 2,50 m
Espessura da chapa:	0,45 mm; 0,50 mm; 0,60 mm; 0,70 mm
Nº de tramos:	chapa de 1 tramo; chapa com 2 tramos e chapa com 3 tramos
Direção do carregamento:	ascendente e descendente
Classe do Aço:	S280 e S320
Chapa T14	
Vãos:	0,50 m; 0,60 m; 0,70 m; 0,80 m; 0,90 m; 1,00 m; 1,10 m; 1,20 m; 1,30 m; 1,40 m; 1,50 m
Espessura da chapa:	0,45 mm; 0,50 mm; 0,60 mm; 0,70 mm
Nº de tramos:	chapa de 1 tramo; chapa com 2 tramos e chapa com 3 tramos
Direção do carregamento:	ascendente e descendente
Classe do Aço:	S280 e S320

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, C., 2008. *Análise Numérica Do Comportamento De Madres Enformadas A Frio*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Aveiro.

Chaves, P., 2014. *Madres enformados a frio com chapas de revestimento*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Aveiro.

Constálica, 2014. <http://www.constalica.pt/madremax/>. [Online] Available at: http://www.constalica.pt/wp-content/themes/constalica/pdf/catalogo_madremax_pt_en.pdf

Dubina, D., Ungureanu, V. & Landolfo, R., 2012. *Design of Cold-Formed Steel Structures*. 1st Edition ed. s.l.:ECCS.

EN 1991-1-1, 2009. *Eurocode 1 - Design of steel structures – Part 1-1: General actions, Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: CEN.

EN 1993-1-1, 2005. *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*, s.l.: European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 1993-1-3, 2006. *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, s.l.: European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 1993-1-5, 2006. *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated Structural Elements*, s.l.: European Committee for Standardisation, Brussels.

Espada, M., 2009. *Análise E Dimensionamento De Chapas Perfiladas De Aço De Acordo Com O Eurocódigo 3*, Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ferraz, G., 2014. *Thermal Analysis Of Steel Columns Exposed To Localisde Fires*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Coimbra.

Ferrer, B., 2014. *Comportamento ao Fogo de Vigas Sigma em Aço Enformado a Frio*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Coimbra.

Kaitila, O., 2002. *Finite element modelling of cold-formed steel members at high temperatures*, s.l.: Thesis to obtain the Degree of Licentiate in Science and Technology, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.

Li, Z. & Shafer, B., 2010. *Buckling Analysis Of Cold-Formed Steel Members With General Boundary Conditions Using Cufsm: Conventional And Constrained Finite Strip Methods..* St. Louis, U.S.A, Proceedings of the 20th INT.

Martins, A., Valente, I., Feliz, A. & Silva, J., 2013. Análise Experimental E Analítica De Chapas Metálicas Enformadas A Frio Para Coberturas E Fachadas. *IX Congresso de Construção Metálica e Mista & I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável*, Volume II, pp. 885-894.

Moreira, H., 2012. *Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação*, Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Nolasco, A., 2008. *Análise Experimental Do Comportamento De Madres Enformadas A Frio*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Aveiro.

O Feliz, 2014. <http://www.ofeliz.pt>. [Online]
Available at: http://www.ofeliz.pt/arq/fich/O_FELIZ_Chapa_Perfilada.pdf

Pinto, A., 2010. *Estabilidade Local De Perfis De Aço Enformados A Frio*, Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Rodrigues, J. & Martins, P., 2010. Tecnologia da Deformação Plástica. In: *Tecnologia Mecânica Vol. II*. s.l.:Escolar Editora, pp. 400-430.

Rondal, J. & Dubina, D., 2005. *Light gauge metal structures: recent advances*, s.l.: International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Italy.

Schafer, B. & Peköz, T., 1998. *Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses*, s.l.: Journal of Constructional Steel Research.

Silvestre, N. & Camotim, D., 2010. *Construção em aço leve*, s.l.: Revista da Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Silvestre, N. & Camotim, D., 2006. *Análise E Dimensionamento De Estruturas De Aço Enformadas A Frio*. Apontamentos de apoio à Disciplina de Análise e Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformadas a Frio, Aço-Inox e Alumínio: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Simões da Silva, L., Simões, R. & Gervásio, H., 2010. Introduction. In: *Design of Steel Structures*. s.l.:ECCS, pp. 1-28.

Simões, R., 2007. *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas - Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço, Parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios*, s.l.: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Veríssimo, H., 2008. *Dimensionamento De Elementos Estruturais De Aço Enformados A Frio De Acordo Com O Eurocódigo 3*, Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Yu, W., 2000. *Cold-formed steel design*, s.l.: 3ª Edição, John Wiley and Sons, Inc..