



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

Avaliação experimental do desempenho de novas configurações de chapas metálicas de revestimento

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

Autor

João Miguel Griné de Oliveira Seixas

Orientadores

Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago

Professor Doutor Rui António Duarte Simões

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, 2016

AGRADECIMENTOS

À professora Aldina Santiago e ao professor Rui Simões, agradeço toda a colaboração, disponibilidade, compreensão e conhecimentos transmitidos na orientação deste trabalho e durante o meu percurso enquanto estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

A todos os funcionários do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, em particular ao Luís Gaspar e Engenheiro Ilídio Santos, agradeço por toda a colaboração, disponibilidade, conselhos e companheirismo demonstrados no decorrer da campanha experimental.

À ACIV, agradeço pelo apoio financeiro dispensado e à WSteel, pela disponibilização dos modelos de chapas perfiladas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos “Acimentados do Mondego” - amigos e colegas de curso – por toda a amizade, apoio, noites mal dormidas e aventuras vividas durante estes anos.

Por fim, um agradecimento especial à minha família - em particular, aos meus avós, pais, irmãos, Raquel e Salvador – por toda a formação pessoal e académica que me têm proporcionado. Agradeço por todo o apoio, motivação, compreensão e conselhos. Obrigado!

RESUMO

Nas últimas décadas, a utilização de elementos estruturais de aço enformado a frio na indústria da construção, tem vindo a conhecer um franco crescimento devido às inúmeras vantagens apresentadas quando comparadas a outro tipo de materiais estruturais como o betão, madeira ou vidro. Tratam-se de soluções economicamente vantajosas, uma vez que são leves, de fácil e rápida aplicação e o seu processo de fabrico permite uma produção em grande escala. A grande parte dos estudos já realizados e do conhecimento geral têm incidido sobre o desempenho e otimização de elementos estruturais principais, como colunas e vigas, aplicados em estruturas de pequeno porte, e de elementos estruturais secundários, como madres, aplicadas em estruturas de edifícios e pavilhões industriais para suporte de chapas de revestimento. Ao contrário destes, a produção e utilização de chapas de revestimento nem sempre são precedidas de estudos de otimização da sua configuração. Nesse sentido, e enquadrado numa prestação de serviços de engenharia solicitada ao Grupo de Construção Metálica e Mista do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, o trabalho de investigação apresentado na presente dissertação de mestrado pretende validar experimentalmente um conjunto representativo de chapas perfiladas com secções transversais diferentes, que se pretendem economicamente mais vantajosas, resultantes de um estudo analítico de otimização realizado previamente. Apesar do seu reduzido peso próprio, a utilização de chapas perfiladas com secções transversais otimizadas, podem contribuir de forma importante para a redução do custo global de uma obra, uma vez que correspondem a uma parcela significativa do peso da estrutura, por cobrirem grandes vãos. Os ensaios experimentais realizados, seguiram os pressupostos definidos no Anexo A da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006).

PALAVRAS-CHAVE

Aço enformado a frio, chapas perfiladas de revestimento, otimização, análise experimental, resistência à flexão

ABSTRACT

In recent decades, the use of structural cold-formed steel elements in the construction industry, has to meet a rapidly growing due to the numerous advantages presented when compared to other types of structural materials such as concrete, wood or glass. These are economically viable solutions, since they are lightweight, easy and quick application and its manufacturing process allows for large scale production. A large part of previous studies and general knowledge have focused on performance and optimization of main structural elements, such as columns and beams, applied in small structures, and secondary structural elements, such as beams, applied in building structures and industrial buildings for sheeting profile coated support. Unlike these, the production and use of coating plates are not always preceded by optimization studies of its configuration. In this sense, and framed in the provision of engineering services requested from the Group of Steel and Composite Construction of the Department of Civil Engineering FCTUC, the presented research work in this master thesis aims to experimentally validate a representative set of profiled plates with different cross-sections which are intended to be economically more advantageous, resulting from an analytical study of optimization done previously. Despite its low weight, the use of plates profiled with cross sections optimized, can contribute significantly to reducing the overall cost of the work, since they represent a significant portion of the weight of the structure, for covering large spans. Experimental tests carried was following the conditions defined in Annex A of EN 1993-1-3 (CEN, 2006).

KEY WORDS

Cold-formed steel, sheeting profile coated, optimization, experimental analysis, flexion strength

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice Geral	iv
Simbologia.....	vi
Abreviaturas.....	viii
1 Introdução	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Enquadramento histórico e normativo	5
2.2 Aplicação do aço enformado a frio	7
2.3 Elementos estruturais	9
2.3.1 Tipos de elementos estruturais em aço enformados a frio.....	9
2.3.1.1 Perfis.....	10
2.3.1.2 Chapas perfiladas	10
2.3.2 Processos de fabrico	11
2.4 Investigações experimentais realizadas	14
3 Comportamento e análise de chapas finas	17
3.1 Considerações iniciais.....	17
3.2 Aspectos gerais	17
3.2.1 Propriedades do material	17
3.2.2 Comportamento estrutural	18
3.2.3 Classificação de secções	20
3.2.4 Bases de dimensionamento.....	22
3.2.5 Análise estrutural.....	22

3.2.5.1	Determinação de secção efetiva	22
3.2.5.2	Reforços de extremidade ou intermédios em elementos planos	23
3.2.5.3	Reforço no banzo	23
3.2.6	Verificações de segurança	24
3.2.6.1	Estado Limite Último (E.L.U.)	24
3.2.6.2	Estado Limite de Serviço (E.L.S.).....	24
4	Campanha experimental	25
4.1	Considerações iniciais.....	25
4.2	Ensaio experimentais de caracterização do aço	25
4.3	Soluções desenvolvidas analiticamente	28
4.3.1	Chapa perfilada do tipo T5	28
4.3.2	Chapa perfilada do tipo T14	29
4.4	Ensaio experimentais de chapas perfiladas	29
4.4.1	Descrição dos modelos experimentais.....	29
4.4.2	Sistema e procedimento de ensaio.....	30
4.5	Apresentação de resultados.....	33
4.5.1	Introdução.....	33
4.5.2	Ensaio com provetes T5 – 1 vão	34
4.5.3	Ensaio com provetes T14 – 1 vão	35
4.5.4	Ensaio com provetes T14 – 2 vãos.....	37
5	Comparação de resultados	40
6	Conclusões e trabalhos futuros	42
6.1	Conclusões	42
6.2	Trabalhos futuros	42
	Referências Bibliográficas.....	44
	ANEXO A - Tabelas de cálculo direto de chapas perfiladas	47

SIMBOLOGIA

Letras Latinas

A_i	transdutores de deslocamento
B_I	transdutores de deslocamento em chapa de 2 vãos
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
c	comprimento dos elementos
E	módulo de elasticidade do aço
E_i	extensómetros eléctricos
ext_{elast}	extensão elástica
f_u	tensão última
f_y	tensão de cedência
G	módulo de distorção
I	momento de inércia da secção
k	coeficiente que depende do tipo de enformagem
L	comprimento de um elemento
M_{Rd}	momento fletor resistente para os estados limites últimos
m	factor empírico para o valor de cálculo da resistência ao corte
$p_{cal,def}$	valor de cálculo de carga para estado limite de deformação
$p_{cal,resist}$	valor de cálculo de carga para estado limite último
$p_{exp,def}$	valor experimental de carga para estado limite de deformação
$p_{exp,resist}$	valor experimental de carga para estado limite último
t	espessura dos elementos
u	carga aplicada no reforço
W	módulo de flexão da secção

Letras Gregas

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	deslocamento efetuado pelo reforço
ε	$\sqrt{235/f_y}$
ν	coeficiente de Poisson
ρ	massa volúmica
$\tau_{u,Rd}$	valor de cálculo da resistência ao corte longitudinal

ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
AS/NZS	Australia Standard/ New Zealand Standard
BS	British Standard
CEN	European Committee for Standardization
E.L.U.	Estado Limite Último
E.L.S.	Estado Limite de Serviço
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

Nas últimas décadas, com a evolução de técnicas e procura de uma maior eficiência dos métodos construtivos e de produção, a utilização de elementos estruturais e de revestimento em aço têm tido um crescimento exponencial na indústria da construção.

A utilização deste tipo de elementos oferece inúmeras vantagens, quando comparados com outros materiais estruturais como o betão, madeira ou vidro, devido à sua elevada resistência e ductilidade que permitem a conceção de elementos estruturais bastante esbeltos e consequentemente mais leves. A possibilidade de produção em grande escala, a redução dos custos associados à mão de obra dada a facilidade de montagem e desmontagem, aliada à economia no transporte, manuseamento e possibilidade de exportação, são algumas das mais-valias preponderantes para o crescimento e consequente globalização do sector de construção em aço. Para além disso, este tipo de elementos dispensa a utilização de cofragens quando utilizados para lajes-mistas, não são suscetíveis de sofrer retração e fluência à temperatura ambiente e contribuem para a sustentabilidade do planeta, uma vez que são recicláveis e não combustíveis.

Os elementos estruturais metálicos dividem-se em três grupos distintos: soldados, de aço laminado a quente e de aço enformado a frio. É neste último grupo que, no que se refere ao processo de produção, se tem verificado uma maior expansão e desenvolvimento de sistemas estruturais nos últimos anos, quer na criação de estruturas novas quer na reabilitação de estruturas já existentes. Capazes de vencer vãos curtos e/ou cargas reduzidas, os elementos de aço enformado a frio, são maioritariamente utilizados em estruturas de médio e pequeno porte, como pavilhões industriais e residências unifamiliares, destacando-se na utilização de vigas para pisos e coberturas, e em sistemas de paredes porticadas, “stud wall”, e de lajes mistas com chapa colaborante.

Apesar de existir uma vasta escolha de matérias-primas para a produção de elementos enformados a frio - aço, estanho, zinco, titânio, alumínio, bronze, cobre - o mais utilizado é o aço, previamente tratado por galvanização ou por outro processo de tratamento anti corrosão.

Quando comparados com os elementos de aço laminado a quente, têm-se revelado uma solução mais competitiva, economicamente vantajosa e com grande potencial de desenvolvimento devido à sua favorável relação resistência/peso, facilidade de transporte e enorme versatilidade do seu processo de fabrico, uma vez que permite a criação das mais variadas geometrias de secções transversais, conferindo assim uma maior flexibilidade no dimensionamento. No entanto, devido à elevada esbelteza, à baixa rigidez torsional e ao facto dos centros de corte e de gravidade não coincidirem na grande maioria das secções transversais, este tipo de elementos torna-se particularmente sensível a fenómenos de instabilidade local ou por torção ou flexão-torção, o que leva a uma maior complexidade de cálculo.

Os elementos de aço enformado a frio, obtidos a partir de dobragem de chapas de aço de reduzida espessura, podem dividir-se em duas categorias: elementos estruturais, perfis - colunas vigas ou madres - e elementos de revestimento de coberturas ou fachadas - painéis ou chapas perfiladas. A maioria dos estudos já realizados tem incidido sobre o desempenho e otimização de elementos estruturais principais. No entanto deve referir-se que as chapas de revestimento, por cobrirem grandes áreas, correspondem a uma parcela significativa do peso da estrutura e conseqüentemente consumo de aço; deste modo, a utilização de chapas de revestimento com perfis otimizados, pode contribuir significativamente para a redução do custo global da estrutura, tornando-se assim uma solução economicamente viável.

1.2 Objetivos

Inserida numa prestação de serviços de engenharia solicitada à Universidade de Coimbra, a presente dissertação de mestrado tem como objetivo a validação de um estudo analítico de otimização da forma da secção transversal de chapas perfiladas de elementos de aço enformado a frio, realizado no âmbito de uma outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014). Esta validação é obtida através da realização de vários ensaios experimentais de resistência à flexão, por aplicação de um carregamento uniforme simulado em ambiente controlado de laboratório, seguindo os pressupostos definidos no Anexo A da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006).

Deste modo, e sendo o principal objetivo o lançamento de novas soluções para um mercado cada vez mais competitivo, a realização dos ensaios experimentais, sob diversas condições, de um conjunto representativo de chapas perfiladas de diferentes secções, permite validar e comprovar corretamente a resistência e o comportamento em serviço destes elementos de aço enformado a frio obtidos analiticamente.

Releva-se um trabalho bastante útil, não só pela escassez de ensaios laboratoriais existentes, mas também pela enorme potencialidade e crescimento que este tipo de elementos de aço atravessa, sendo possível conhecer um pouco mais do seu comportamento e assim, otimizar e racionar a sua aplicação em obra.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação de mestrado encontra-se estruturada em seis capítulos.

No primeiro capítulo – Introdução - é feito um breve enquadramento geral das chapas perfiladas de aço enformado a frio e enunciadas as motivações e principais objetivos definidos para o trabalho de investigação a realizar.

No segundo capítulo - Revisão Bibliográfica - é feito um enquadramento geral e uma breve referência histórica relativamente à origem de elementos estruturais de aço, em particular chapas perfiladas de aço enformado a frio, bem como das investigações experimentais e numéricas já realizadas enunciando os vários tipos de elementos existentes, o seu processo de fabrico, aplicações, vantagens e desvantagens da sua utilização.

O terceiro capítulo - Enquadramento do Trabalho - é reservado à descrição das normas a seguir, bases de dimensionamento, definição das propriedades do material e classificação de secções existentes. São ainda apresentados alguns aspetos relacionados com a análise e comportamento estrutural dos elementos enformados a frio.

No quarto capítulo - Ensaio Experimentais – inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do aço e as características geométricas das chapas perfiladas sujeitas aos ensaios experimentais. Numa segunda fase, é feita uma descrição pormenorizada de toda a campanha experimental, realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, explicando-se o sistema e procedimentos utilizados durante os ensaios dos provetes e apresentação dos resultados obtidos.

No quinto capítulo - Comparação de Resultados - é feita a análise entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados e os resultados esperados pelo estudo analítico de otimização da secção transversal das chapas perfiladas feito anteriormente.

Por último, o sexto capítulo – Conclusões e Trabalhos Futuros – é destinado à apresentação das principais conclusões e considerações acerca do trabalho experimental realizado e de propostas de trabalhos futuros a desenvolver.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento histórico e normativo

O desenvolvimento de tecnologias que permitiram o processo de enformagem a frio surge na indústria automóvel e aeronáutica com a necessidade de obter elementos estruturais leves e resistentes. Foi na última metade do século XIX que se iniciou a utilização de elementos estruturais de aço enformado a frio na indústria da construção. Países como os Estados Unidos da América, Reino Unido e França, foram pioneiros na sua utilização, aplicando estes elementos, de forma experimental, em sistemas de armazenamento, protótipos de habitações com chapas perfiladas autoportantes e coberturas (Fena, 2011; Martins, 2011).

Em 1946, a American Iron and Steel Institute publicou as primeiras disposições regulamentares relativas ao comportamento estrutural deste tipo de elementos (Veríssimo, 2008), tendo contribuído para o crescimento da indústria e desenvolvimento de outros produtos relacionados (revestimentos, fixações e isolamento térmico). A sua popularização e crescente utilização dá-se assim na primeira metade do século XX e levou a que, desde então, vários países realizassem esforços no sentido de desenvolver normas de dimensionamento para este tipo de estruturas metálicas. No Quadro 2.1, é possível observar quais as normas em vigor em diversos países.

Na segunda metade do século XX e início do século XXI, devido às vantagens inerentes à sua utilização quando comparadas com outros materiais de construção, as soluções estruturais com elementos de aço enformado a frio têm sido bastante utilizadas em habitações de pequeno porte, sendo uma importante fração do setor da construção em países como os Estados Unidos, Canadá, Austrália, Japão, Dinamarca, Suécia, Noruega, Finlândia e França (Ferrer, 2014). Por outro lado, devido à sua leveza e resistência, a aplicação de elementos estruturais enformados a frio tem tido um acentuado crescimento e sido uma alternativa bastante válida na reabilitação de edificado existente.

Quadro 2.1 - Normas desenvolvidas para o dimensionamento de estruturas em aço enformados a frio

País	Ano	Regulamentação
Reino Unido	1987	BS 5950 - Structural Use of Steelwork in Building, Part 5: Code of Practice for Design of Cold-Formed Sections
Austrália e Nova Zelândia	1996	AS/NZS 4600 - Cold-Formed Steel Structures
Brasil	2001	NBR 14762 - Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio
Europa	2004	Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules cold-formed members and sheeting
USA, México e Canadá	2007	AISI S100 – North American Cold-Formed Steel Specifications

Em Portugal, somente na década de 90 a utilização destas soluções são introduzidas no mercado sob forma de importação ou fabrico, por encomenda, de fornecedores que as produziam com recurso a prensas quinadeiras. No entanto, o sector só se torna competitivo e com produtos de qualidade em 2003, com o início da produção em grande escala com recurso a perfiladoras. Atualmente, e dado o cenário de crise económica à escala global, a indústria continua a ter um crescimento bastante positivo e com diversas soluções construtivas inovadoras, como é o caso das habitações pré-fabricadas por painéis e módulos, com a possibilidade de desmontagem para deslocalização e incorporação de sistemas de aquecimento e arrefecimento baseado em geotermia e rede de águas cinzentas (Moreira, 2012).

Ainda no que diz respeito ao quadro normativo, e em particular na Europa, tem-se realizado diversos estudos analíticos e experimentais que permitam conhecer melhor o comportamento estrutural dos elementos de aço enformado a frio. Deste modo, e apesar da filosofia de dimensionamento ser a mesma, o Eurocódigo 3: Parte 1-3 tem sido alvo de sistemáticas correções e alterações à metodologia de cálculo de resistência destes elementos, tendo-se tornado um processo mais detalhado, complexo e demorado. No entanto, ainda não se produziram trabalhos de síntese suficientes nem foram desenvolvidos algoritmos e programas de cálculo automático que permitam facilitar o dimensionamento deste tipo de estruturas (Veríssimo, 2008).

2.2 Aplicação do aço enformado a frio

Na construção metálica, os perfis mais utilizados como elementos resistentes principais são os formados por laminagem a quente ou por soldadura de placas quando há necessidade de obter secções não comerciais ou peças de secção variável. Os elementos metálicos enformados a frio, com um recente, mas acentuado, crescimento na indústria da construção, têm sido maioritariamente utilizados como elementos secundários (Figura 2.1 (a)) ou elementos principais em estruturas de médio e pequeno porte (Figura 2.1 (b)). O facto de serem produzidos com recurso a chapas muito finas de espessura constante, permite obter secções com boas propriedades mecânicas e de variadas formas, com reduzidos gastos de material (Simões, 2014).



a) Elementos secundários em aço laminado a frio
(Silvestre & Camotim, 2006)



b) Edifício em aço enformado a frio
(@EngenhariaCivil.Wordpress, 2008)

Figura 2.1 – Aplicações de perfis em aço enformado a frio

Os elementos de aço enformados a frio, devido à sua vasta gama aplicações - não só na construção mas também na indústria automóvel, ferroviária, aeronáutica, agrícola; em instalações de drenagem e torres de distribuição elétricas, entre outros - estão expostos aos mais variados ambientes. Deste modo, com o intuito de minimizar ou eliminar futuros problemas de corrosão, os elementos de aço enformado a frio são submetidos a um processo de Galvanização. Processo esse que consiste no revestimento dos elementos metálicos com uma camada protetora de outro metal a altas temperaturas, normalmente o zinco, com uma espessura limitada de cerca de 3,5 mm de espessura, conferindo-lhes assim, uma maior durabilidade e menor necessidade de manutenção (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Processo de galvanização de elementos metálicos (@Galvaza)

Como qualquer outro material, existem vantagens e desvantagens, associadas à sua utilização. Assim, baseado em diversas referências bibliográficas (Landolfo e Mazzolani, 1990; Yu, 2000; Silvestre & Camotim, 2006; Veríssimo, 2008; entre outras), as principais vantagens da utilização de elementos em aço enformado a frio na indústria da construção, são:

- Elevada eficiência e otimização estrutural – não só devido à sua excelente relação entre a elevada resistência mecânica e o reduzido peso próprio dos elementos, mas também pela possibilidade de fabricar (ao contrário do que acontece com os elementos de aço laminado a quente que possuem geometrias mínimas pré-definidas) secções com espessuras e dimensões adequadas a cargas e vãos reduzidos, otimizando o material utilizado;
- Grande versatilidade do seu processo de fabrico – permitindo uma produção económica e em grande escala com inúmeras variedades de geometrias e dimensões dos elementos;
- Facilidade e rapidez de manuseamento, montagem e manutenção – devido ao seu peso próprio e processo de fabrico. Atualmente, a utilização de elementos enformados a frio para reabilitação de estruturas e edificado existente, é um mercado em vasta expansão, devido à sua grande versatilidade e rapidez de construção;
- Economia no transporte e armazenamento – devido à possibilidade de algumas secções, e as chapas perfiladas em particular, poderem encaixar sucessivamente umas nas outras;
- Soluções de ligações entre elementos - que não só facilitam a sua montagem mas também o seu desmantelamento e futuras reutilizações;
- Inexistência de retração e fluência à temperatura ambiente;
- A utilização de painéis nervurados em lajes de pavimentos mistas aço-betão que, para além de explorarem de modo eficaz a tração do aço e resistência à compressão do betão, têm a

vantagem de assegurar, em simultâneo, as funções de plataforma de trabalho e de cofragem (perdida). Também os painéis sandwich são uma boa opção para aplicação em coberturas e fachadas, funcionando como isolante térmico;

- Elevada sustentabilidade – uma vez que são elementos totalmente recicláveis, reutilizáveis e não combustíveis.

Por outro lado, as principais desvantagens inerentes à utilização de elementos em aço enformado a frio, são:

- Comportamento estrutural associado a diversos fenómenos de instabilidade, normalmente inexistentes ou de pouca relevância nos elementos de aço laminado a quente (fenómenos de encurvadura local, distorcional, global e suas interações), devido à elevada esbelteza das secções transversais;

- Maior complexidade de cálculo da resistência das secções comparativamente com os elementos laminados a quente;

- Menor ductilidade do aço, devendo-se evitar a sua aplicação em estruturas em que a fadiga seja predominante;

- Baixa rigidez de torção – devido à reduzida espessura dos elementos e ao facto da maioria das secções transversais abertas e monossimétricas;

- Maior custo de produção associado a um maior número de dobragens.

2.3 Elementos estruturais

2.3.1 Tipos de elementos estruturais em aço enformados a frio

Os elementos estruturais em aço enformado a frio são normalmente produzidos utilizando aços com tensões de cedência que variam entre 220 e 550 N/mm² sendo, no entanto, mais comum a utilização de perfis de aço das classes S280GD, S320GD E S350GD. Atualmente, os elementos estruturais em aço enformado a frio em função da aplicação, dividem-se em duas categorias: perfis e painéis ou chapas perfiladas.

2.3.1.1 Perfis

Os perfis de aço enformado a frio, normalmente fabricados a partir de chapas de aço com espessuras compreendidas entre 1 e 8 mm, são elementos estruturais de eixo reto e secção uniforme concebidos para suportar cargas relativamente baixas e vencer vãos curtos. Na Figura 2.3, encontram-se representadas diversas secções transversais correntemente utilizadas como elementos estruturais principais ou secundários em construções de pequena e média dimensão, podendo tomar a configuração de secções abertas, fechadas ou compostas, com e sem reforços intermédios e de extremidade.

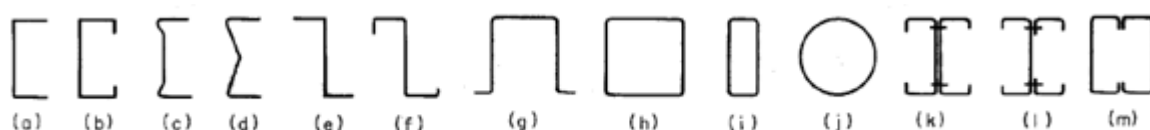


Figura 2.3 - Secções em aço enformado a frio: (a) Perfil U; (b) Perfil C; (c) e (d) Perfis Sigma; (e) Perfil Z; (f) Perfil Z, enrijecido; (g) Perfil Ómega; (h), (i) e (j) Perfis tubulares; (k), (l) e (m) Secções compostas (Yu, 2000)

Com esta enorme variedade de geometrias e dimensões, este tipo de perfis permite uma grande flexibilidade ao projetista aquando o seu dimensionamento conforme se ilustra na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Estruturas em aço enformado a frio (Silvestre & Camotim, 2006)

2.3.1.2 Chapas perfiladas

Os painéis ou chapas perfiladas, são peças laminares fabricadas a partir de chapas de aço com espessuras que variam entre 0,5 e 1,9 mm, são principalmente utilizados como revestimentos de coberturas ou fachadas (ver Figura 2.6 (a)) uma vez que, à semelhança dos perfis, são componentes leves, resistentes, capazes de vencer diferentes vãos e de fácil montagem e fixação (através de parafusos zincados, auto-perfurantes ou de inox auto-roscantes). Assumem normalmente uma configuração ondulada ou trapezoidal, como é possível observar na Figura

2.5, e são elementos que, bem aplicados, contribuem para uma boa impermeabilização, reduzida transmissão térmica e podem ser utilizados de forma ativa na estrutura de modo a evitar a deformação dos elementos estruturais principais (colunas e vigas). Devido à sua exposição direta com o exterior, devem ter de passar por um tratamento prévio anti-corrosão.

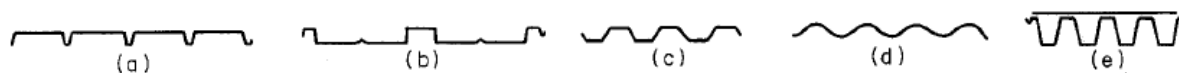


Figura 2.5 – Painéis ou chapas perfiladas em aço enformado a frio (Yu, 2000)

As chapas perfiladas podem ainda ser utilizadas em lajes com uma solução mista aço-betão (Figura 2.6 (b)) capaz de resistir a cargas verticais de utilização e a esforços horizontais provocados por vibrações, impactos, vento ou sismos. No entanto, dada a rigidez deste elemento, esta é uma solução com elevado peso próprio, desvantagem esta que pode ser amenizada com a introdução de agregados leves.



a) Chapa perfilada de revestimento (@mvcc)



b) Chapa perfilada em solução mista aço-betão (@constructalia)

Figura 2.6 – Aplicação de chapas perfiladas em aço enformado a frio

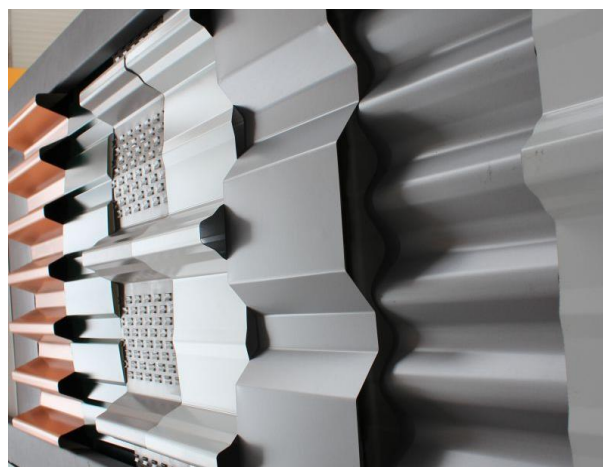
Este tipo de chapa permite ainda o fabrico cumeeiras, pingadeiras, rufos e remates que, apesar de serem elementos com uma função estrutural menos relevante, são muito importantes para um bom funcionamento dos revestimentos na estrutura.

2.3.2 Processos de fabrico

Os elementos enformados a frio são fabricados, essencialmente, por dois processos distintos: laminagem a frio e quinagem. Aproveitando a ductilidade do aço, estes processos de fabrico permitem a criação de uma enorme variedade de secções de elementos estruturais e não estruturais de parede fina (Figura 2.7).



a) Perfis



b) Chapas perfiladas

Figura 2.7 - Variedade de formas de elementos estruturais e não estruturais em aço enformado a frio (Silvestre & Camotim, 2006)

A laminagem a frio, também conhecida por perfilagem ou “cold rolling”, é o processo mais utilizado no fabrico de perfis leves e ideal para produções em grande escala ou obtenção de elementos, estruturais e não estruturais, com secções transversais de elevada complexidade. A perfiladora, máquina utilizada para este processo de laminagem a frio e representada na Figura 2.8, é composta por uma série de rolos compressores sequencialmente colocados que vão dobrando a chapa progressivamente à medida que esta é puxada a partir de rolos de folhas metálicas de aço galvanizado, com largura e comprimento até 900 mm e 900 m, respetivamente. É um processo que tem uma velocidade normal de fabrico na ordem dos 30 metros/minuto e que, no final da linha de produção, permite cortar a chapa em elementos com as dimensões pretendidas, tornando-se assim, uma produção sistematizada, normalizada, extremamente eficiente e económica (Silvestre & Camotim, 2006).

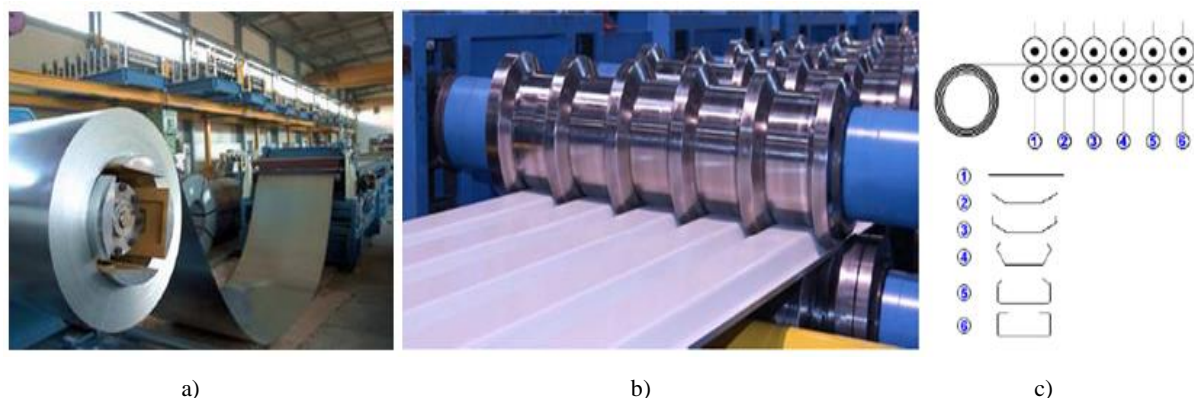


Figura 2.8 – a) Rolo de chapa de aço galvanizado (O Feliz, 2010); b) Perfiladora (Silvestre & Camotim, 2006); c) Esquema ilustrativo do processo de fabrico de laminagem a frio (Silvestre & Camotim, 2006)

A quinagem, também conhecida com dobragem ou “press braking”, é um processo de fabrico menos industrializado e mais utilizado para pequenas quantidades de produção. Geralmente utilizado para execução de peças de geometria simples, este processo consiste na dobragem de chapas metálicas de comprimento limitado ao comprimento da quinadora (Figura 2.9 (a)). Este equipamento, que permite uma grande variedade de processos de quinagem com uma velocidade de produção não superior a 60 metros/minuto (Silvestre & Camotim, 2006), é composto por uma prensa de forma convexa que comprime a chapa metálica contra a superfície inferior, conforme se pode observar na Figura 2.9. (b).

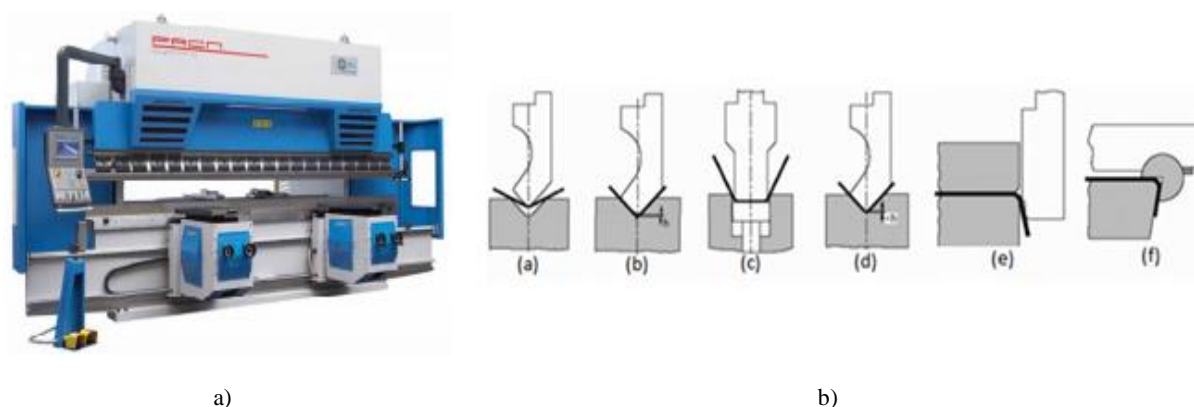


Figura 2.9 – (a) Quinadora (@Rico, 2012); (b) Processos de quinagem (a) no ar; (b) em V; (c) em U; (d) a fundo; (e) de bordo saliente com cunho de arraste; (f) em rotação (Ferrer, 2014)

2.4 Investigações experimentais realizadas

Como já referido, e apesar da crescente utilização que se tem vindo a observar ao longo dos tempos, o estudo do desempenho e otimização de elementos estruturais secundários em aço enformado a frio, em particular com chapas perfiladas de revestimento, é uma área ainda muito pouco desenvolvida. A maioria das investigações já realizadas tem incidido sobre elementos estruturais principais, como colunas e vigas, aplicados a estruturas de pequena dimensão. No entanto, é constante a procura por um melhor conhecimento sobre esta matéria não só a nível de metodologia de cálculo e comportamento estrutural, mas também no sentido de se criarem novas soluções e sistemas construtivos em aço enformado a frio. No caso das chapas perfiladas, existem alguns registos de investigações desenvolvidas no âmbito de outras dissertações de mestrado. Neste subcapítulo são apresentados, a título de exemplo e de forma muito genérica, dois estudos experimentais que se revelaram importantes para esta dissertação de mestrado.

Martins (2011) apresentou um estudo analítico e experimental, realizado na Escola de Engenharia da Universidade do Minho, sobre chapas metálicas em aço enformado a frio para revestimento de coberturas e fachadas. Este estudo foi realizado em parceria com uma empresa ligada à área da metalomecânica e dividiu-se em duas fases. Numa primeira fase, procurou-se analisar as características e capacidade de carga de vários tipos de chapas metálicas, e assim desenvolver uma análise paramétrica, de modo a identificar os parâmetros geométricos mais relevantes para o seu comportamento. Numa segunda fase, realizaram-se diversos ensaios experimentais em dois modelos de chapas trapezoidais com geometrias quase idênticas, que diferem apenas no banzo inferior com a adição de um reforço longitudinal de 3 mm de profundidade (ver Figura 2.10), e analisaram-se os resultados obtidos.

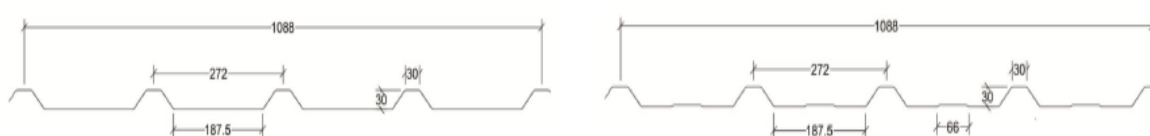


Figura 2.10 – Modelos de chapas metálicas sujeitas a ensaios experimentais (Martins, 2011)

Ainda no âmbito desta investigação, desenvolveu-se uma ferramenta de cálculo capaz de determinar as características mecânicas das chapas metálicas, permitindo assim a realização de um estudo paramétrico que avalie a influência da espessura da chapa, largura de banzos e dimensões de reforços inseridos. Concluiu-se ainda que quanto maior for a largura do banzo comprimido, maior poderá ser a largura do reforço adotado, desde que este se mantenha eficaz (Figura 2.11).



a) Reforço triangular

b) Reforço trapezoidal

Figura 2.11 – Tipologias de reforços longitudinais utilizados nos banzos comprimidos (Martins, 2011)

A realização dos ensaios experimentais (Figura 2.12) permitiu a observação e identificação de fenómenos de instabilidade local nos banzos e nas almas dos provetes ensaiados. Durante os ensaios foi possível concluir que ambos os modelos testados com o banzo inferior tracionado apresentaram um comportamento muito semelhante no que respeita à deformação e capacidade de carga. Por outro lado, nos provetes testados com o banzo inferior comprimido e ao contrário do que seria de esperar, observou-se um ligeiro aumento de capacidade resistente à flexão nos modelos de chapa que não apresentavam reforço longitudinal (Martins, 2011).

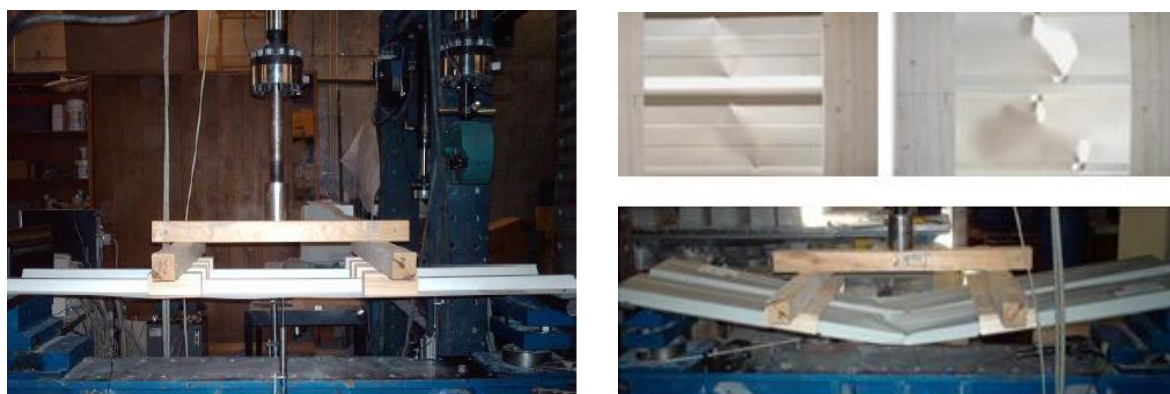


Figura 2.12 – Ensaios experimentais e resultados obtidos (Martins, 2011)

Em 2009, Carmona (Carmona, 2009) apresentou um estudo experimental, realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, de um conjunto de lajes mistas aço-betão com cofragem colaborante. Neste estudo pretendia-se determinar, por via experimental, as constantes m e k e o valor de $\tau_{u,Rd}$ para utilizar na verificação da resistência ao corte longitudinal de um conjunto de lajes com um modelo de chapa perfilada fornecido por uma empresa metalomecânica (Figura 2.13). Foram ainda realizados alguns ensaios adicionais com o intuito de avaliar a contribuição da introdução de varões, transversais às nervuras das chapas, na resistência ao corte longitudinal.



Figura 2.13 – a) Modelos de laje com chapa colaborante; b) Secção transversal da chapa perfilada com reforço transversal de varões (Carmona, 2009)

Os ensaios realizados permitiram constatar que o comportamento do modelo dos provetes testados foi bastante uniforme, tendo-se alcançado um modo de rotura bastante dúctil em todos eles. Relativamente aos valores dos parâmetros m e k , o autor conclui que foram determinados valores usuais para este tipo de chapas. Observou-se no entanto que a rotura por corte longitudinal dos provetes ensaiados ocorreu maioritariamente na direção das saliências existentes nas almas das chapas, pelo que se propõe que estas não estejam todas para o mesmo sentido e tenham um relevo mais acentuado para uma melhor interligação mecânica chapa-betão e, conseqüentemente, um melhor desempenho. Em relação aos ensaios realizados com a adição de varões transversais, concluiu-se ser uma boa solução dado o aumento muito significativo da capacidade resistente, aumento do grau de conexão e maior resistência às forças de escorregamento.

3 COMPORTAMENTO E ANÁLISE DE CHAPAS FINAS

3.1 Considerações iniciais

Como referido no primeiro capítulo, a presente dissertação de mestrado tem como principal objetivo a validação de um estudo analítico que envolveu o desenvolvimento e otimização da secção transversal de chapas perfiladas em aço enformado a frio, realizado previamente no âmbito de uma outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014). Nesse sentido, este capítulo faz uma abordagem dos aspetos relevantes para o caso de estudo. Numa primeira fase, apresentam-se as bases de dimensionamento utilizadas, as propriedades mecânicas do material e a classificação de secções segundo as disposições regulamentares em vigor. Numa segunda fase, apresenta-se a análise estrutural de chapas perfiladas que deve ser efetuada assim como as configurações de chapa desenvolvidas analiticamente que foram submetidas a ensaios experimentais de resistência à flexão.

3.2 Aspetos gerais

3.2.1 Propriedades do material

No que diz respeito às propriedades do material utilizado em elementos de aço enformado a frio, a norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006) estabelece os seguintes valores:

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

Segundo Silvestre e Camotim (2006), no fabrico deste tipo de elementos estruturais, é muito frequente a utilização de aços com tensões últimas (f_u) com valores compreendidos entre 300 e 720 N/mm² e tensões de cedência (f_y) entre 220 e 500 N/mm² que podem chegar a valores de 650 N/mm² para aços de alta resistência; a relação entre estas duas tensões (f_u/f_y) varia entre 1,1 e 1,9, e a extensão máximo do aço pode ir até 25%.

Como referido no segundo capítulo, as propriedades mecânicas dos elementos em aço enformado a frio, podem ser afetadas e variar durante o seu fabrico. Esta variação deve-se ao endurecimento que o material sofre durante o processo de dobragem das chapas, induzindo tensões residuais que melhoram quantitativamente a capacidade resistente da secção transversal dos elementos. Normalmente, em qualquer um dos processos de fabrico, verifica-se uma diminuição da ductilidade do aço e um aumento da tensão última e tensão de cedência, em relação à tensão de cedência base.

3.2.2 Comportamento estrutural

Quando comparados com os perfis laminados a quente, os perfis enformados a frios são caracterizados pela sua elevada esbelteza e espessura constante em todas as paredes de secção. Aliada à possibilidade de existência de secções sem qualquer simetria, de zonas de furação e de zonas com e sem reforços, estes perfis são suscetíveis a imperfeições geométricas da mesma ou superior ordem de grandeza da espessura da chapa, podendo dar origem a uma série de fenómenos de distorção da secção transversal que tornam o seu dimensionamento e análise do comportamento estrutural processos bastante complexos (Silvestre & Camotim, 2006).

Segundo Veríssimo (2008), para além dos fenómenos de instabilidade de natureza local e/ou global, devidos à elevada esbelteza das chapas e à baixa rigidez torsional das secções transversais, os perfis enformados a frio, estão ainda suscetíveis aos seguintes fenómenos:

- Elevada deformabilidade à torção, não só devida à baixa rigidez de torção já mencionada, mas também devido ao facto de, em diversos tipos de secções, o centro de corte não coincidir com o centro de gravidade (Figura 3.1);
- Empenamento, verificado em diversas secções de parede fina aberta quando submetidas a momento torsor. Neste modo de deformação, o tipo de condições de fronteira dos perfis têm uma grande influência na sua resistência mecânica (Figura 3.1);

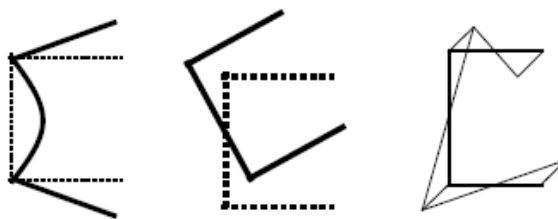


Figura 3.1 – Deformabilidade por instabilidade local, torção e empenamento (Veríssimo, 2008).

- Existência de reforços de extremidade e/ou intermédios nas secções, que limitam a suscetibilidade à sua deformação local, permitindo um melhor comportamento estrutural assegurando pontos de apoio elástico às paredes da secção, diminuindo o comprimento livre para as mesmas fletirem e aumentando o valor da tensão crítica de instabilidade local (Figura 3.2 (a));

- Endurecimento do aço verificado na zona das dobras devido ao processo de enformagem a frio. Como é possível observar na Figura 3.2 (b), esta mesma zona altera de forma significativa as propriedades mecânicas do aço, provocando uma diminuição da sua ductilidade e um aumento da tensão de cedência e de resistência última (Figura 3.3);

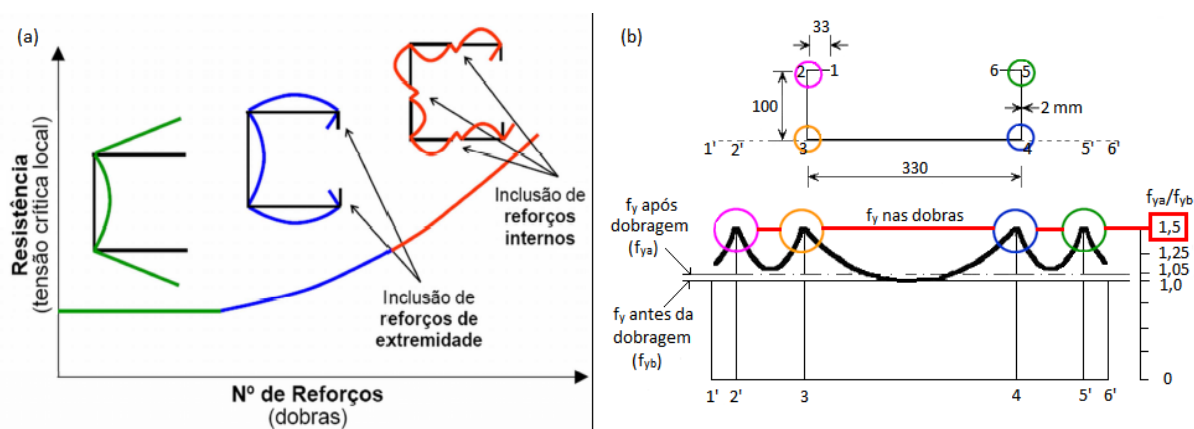


Figura 3.2 - a) Influência das dobras na resistência de secções em aço enformado a frio; (b) Distribuição das tensões ao longo da linha média da secção (Ferrer, 2014).

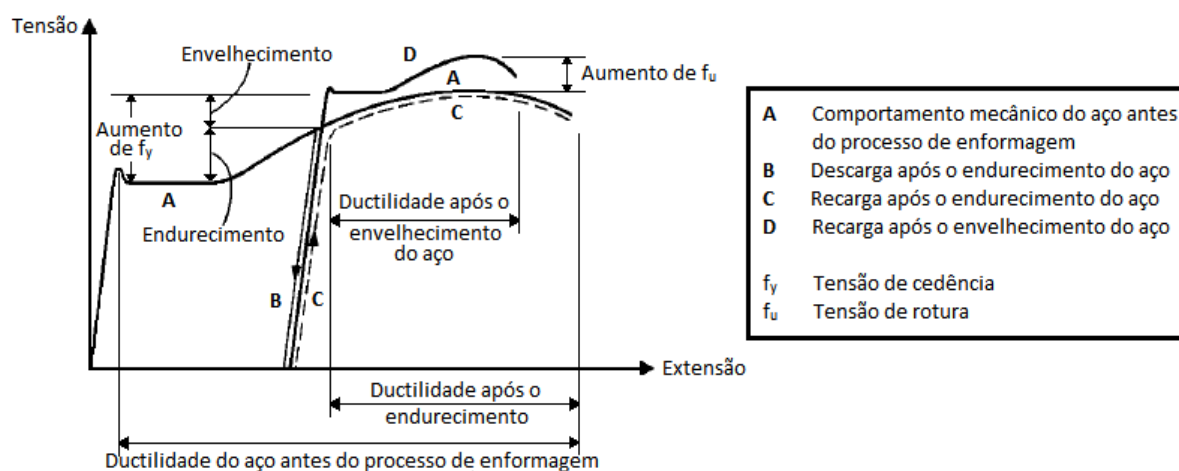


Figura 3.3 – Influência do processo de fabrico a frio nas propriedades mecânicas do aço (Yu, 2000).

- Colapso por esmagamento da alma, ou “web crippling”, sob ação de cargas concentradas aplicadas nas secções ou nas zonas de apoio, resultante da elevada esbelteza das paredes que constituem a alma. Este fenómeno pode ser evitado aplicando reforços nessas mesmas zonas.

- Imperfeições estruturais, causadas pelo processo de laminação a frio, que são responsáveis pela introdução de esforços secundários adicionais que devem ser tidos em conta no dimensionamento dos elementos, uma vez que influenciam a capacidade de carga e resistência última dos mesmos. As imperfeições num elemento metálico, podem ser essencialmente de dois tipos: imperfeições geométricas (devido à excentricidade de cargas, falta de linearidade, entre outras) e imperfeições do material (tensões residuais, comportamento não linear, entre outras) (Simões, 2007).

3.2.3 Classificação de secções

De acordo com a norma EN 1993-1-1 (CEN, 2005), a classificação de secções transversais de elementos estruturais está relacionada com a possibilidade da sua resistência e capacidade de rotação (isto é, capacidade de formação de uma rótula plástica) estar ou não limitada por fenómenos de instabilidade local. Estes fenómenos podem ocorrer em secções esbeltas, como é o caso das chapas perfiladas de aço enformado a frio, uma vez que as zonas comprimidas podem não plastificar totalmente.

Segundo a cláusula 5.5 da norma EN 1993-1-1 (CEN, 2005), as capacidades de rotação e de formação de uma rótula plástica das secções, classificam-se em quatro classes distintas:

- 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 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.

As curvas momento-curvatura para as diversas classes acima referidas são apresentadas na Figura 3.4. Pode-se observar que devido aos fenómenos de instabilidade local mencionados, as secções de classe 4 não atingem a resistência plástica (ou mesmo elástica).

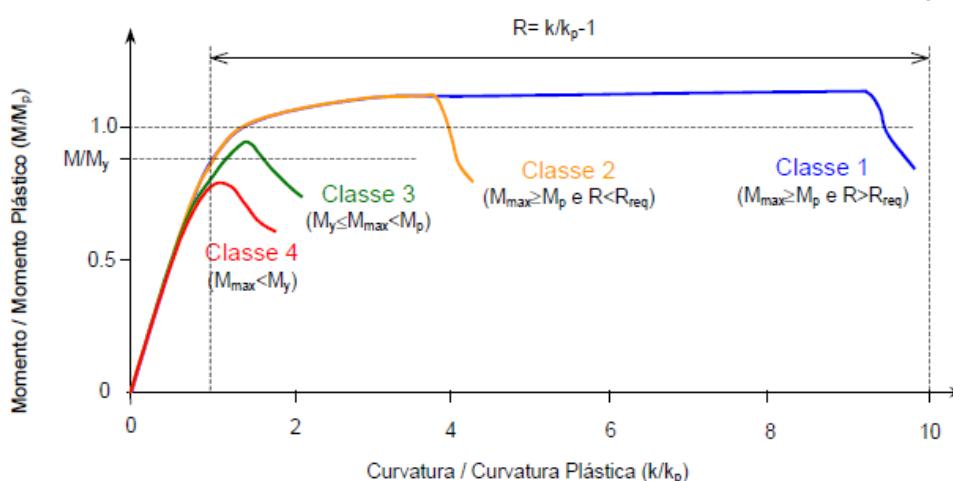


Figura 3.4 – Curvas momento-curvatura para as 4 classes de secção (Silvestre & Camotim, 2006)

A classificação de uma secção é efetuada com base na relação geométrica, entre o comprimento e espessura (c/t), dos seus elementos comprimidos. Estes elementos (banzos e alma) podem estar sujeitos a compressão total ou parcial, dependendo do esforço normal e momento fletor atuantes na secção. A tabela 5.2 da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006), apresenta os valores limite da relação geométrica (c/t) considerados, que dependem do parâmetro ε (e, consequentemente, da tensão de cedência do aço). Caso os limites desta relação não sejam verificados numa determinada classe, deve-se proceder à mesma verificação para a classe

imediatamente a seguir. Por fim, no caso dos elementos comprimidos apresentarem diferentes classes, considera-se a classe mais desfavorável, isto é, a maior existente entre eles.

Como referido anteriormente, a elevada esbelteza dos elementos de aço enformado a frio condiciona o seu comportamento estrutural e faz com que, na maioria das vezes, os fenómenos de instabilidade ocorram em regime elástico. Por este motivo, estes elementos pertencem normalmente a secções de classe 4, uma vez que não conseguem atingir a resistência plástica total. A norma EN 1993-1-1 (CEN, 2005) prevê que a avaliação da resistência dos elementos seja efetuada com base no conceito de secção efetiva, reduzindo as zonas da secção mais suscetíveis a instabilizar localmente. Este tipo de instabilidade pode ser reduzida, ou mesmo eliminada, com a introdução de reforços nos elementos. No entanto, é preciso algum cuidado na introdução desta solução, uma vez que pode desencadear instabilidade distorcional da secção (Espada, 2009).

3.2.4 Bases de dimensionamento

O dimensionamento de elementos estruturais em aço enformado a frio rege-se pelas disposições regulamentares gerais apresentadas na norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006). Assim, segundo esta mesma norma, os coeficientes parciais de segurança a adotar são:

- Coeficientes parciais de segurança para os Estados Limites Últimos: (a) resistência de secções a esforços internos: $\gamma_{M0} = 1,00$; (b) resistência de barras à instabilidade: $\gamma_{M1} = 1,00$ e (c) resistência de ligações: $\gamma_{M2} = 1,25$.
- Coeficientes parciais de segurança para os Estados Limites de Serviço: $\gamma_{M, serv} = 1,00$.

3.2.5 Análise estrutural

3.2.5.1 Determinação de secção efetiva

De um modo geral, a determinação de uma secção efetiva torna-se necessária devido ao aparecimento de fenómenos de instabilidade local nos elementos metálicos. A reduzida espessura das chapas de aço com que se fabricam estes elementos levam a secções com paredes e barras muito esbeltas e, conseqüentemente, a problemas de instabilidade. Os elementos de aço enformado frio, ao contrário dos laminados a quente, são geralmente reforçados com reforços intermédios (no banzo) e/ou reforços de extremidade, induzindo ao aparecimento de um outro tipo de instabilidade, a distorcional. Desta forma, quando se calcula a secção efetiva de um elemento de aço enformado a frio, é necessário distinguir entre secção efetiva para o modo local e modo distorcional. O modo local baseia-se no conceito de largura efetiva, com

uma redução da dimensão da largura do elemento; por sua vez, o modo distorcional, baseia-se no conceito de espessura reduzida, reduzindo a dimensão da espessura da chapa (Silvestre & Camotim, 2006). A metodologia de cálculo para a determinação da secção efetiva para a instabilidade local e distorcional deve ser realizada de acordo com o disposto nas cláusulas 5.5.2 (3) e 5.5.3 da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006), respetivamente.

3.2.5.2 Reforços de extremidade ou intermédios em elementos planos

A conceção de elementos de compressão com reforços intermédios deve-se basear no pressuposto de que o reforço aplicado funciona como um membro em compressão, com restrição parcial contínua, com uma mola rígida à flexão dos elementos planos adjacentes. Esta rigidez considerada na mola de um reforço deve ser determinada pela aplicação de uma unidade de carga por unidade de comprimento u , conforme ilustra a Figura 3.5. A rigidez da mola K por unidade de comprimento pode ser determinada através de: $K = u/\delta$, sendo δ o deslocamento efetuado pelo reforço devido à carga u (norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006)).

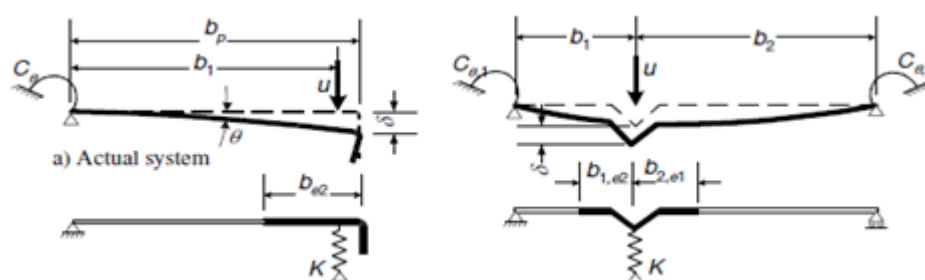


Figura 3.5 – Ilustração da aplicação da carga u no reforço do banzo
(norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006))

3.2.5.3 Reforço no banzo

O efeito da resistência do reforço em elementos submetidos à flexão (flexa para dentro do plano neutro) com um banzo muito extenso ou com perfil arqueado, com o lado côncavo à compressão, deve ser tido em conta, a menos que o tamanho do reforço seja inferior a 5% da profundidade do perfil transversal (Figura 3.6). Caso seja superior, então a redução na resistência das paredes e o possível efeito de flexão, devem ser tidos em conta (norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006)).

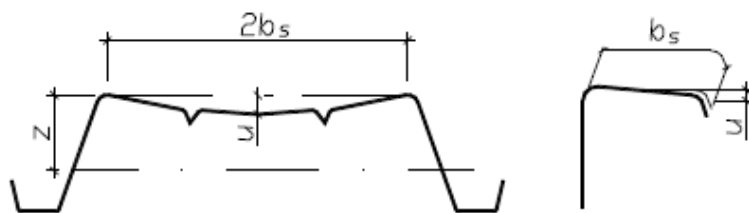


Figura 3.6 – Ilustração de reforços no banzo submetidos à flexão (norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006))

3.2.6 Verificações de segurança

3.2.6.1 Estado Limite Último (E.L.U.)

De acordo com a norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006), após o dimensionamento das secções transversais para o E.L.U., que se demonstra um processo bastante complexo e moroso, devem ser realizadas verificações de segurança dos elementos relativamente à encurvadura local, flexão, tensão e compressão axial, esforço transversal e momento fletor.

3.2.6.2 Estado Limite de Serviço (E.L.S.)

No que diz respeito às verificações de segurança dos elementos em serviço, estas são feitas através do estado limite de deformação, com uma flecha limite de $L/200$ (mm) para cargas descendentes e $L/150$ (mm) para cargas ascendentes.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 Considerações iniciais

A campanha experimental decorreu no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e consistiu na avaliação do desempenho de resistência à flexão de chapas perfiladas de revestimento em aço enformado a frio, de classe S280GD+Z com duas secções transversais distintas, sujeitas a ação de um carregamento uniformemente distribuído. Como já referido, com intuito de lançar novas soluções competitivas para o mercado, a realização deste trabalho experimental teve como principal objetivo testar e validar, em condições reais, o estudo de otimização analítico realizado previamente no âmbito de outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014).

Deste modo, este capítulo contempla toda a campanha experimental realizada, apresentando os ensaios de caracterização do aço utilizado, geometrias e características dos provetes sujeitos a ensaio e explicando todo o sistema e procedimento de ensaio realizado de acordo com o Anexo A da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006).

4.2 Ensaios experimentais de caracterização do aço

Os ensaios de caracterização do aço foram realizados com o intuito de determinar as principais propriedades mecânicas do aço utilizado nos provetes de chapas perfiladas (ex.: tensão de cedência) avaliadas nesta campanha experimental. Assim, e de acordo com a norma EN ISO 6892-1 (CEN, 2009), foram sujeitos a ensaios de tração e levados até à rotura, quatro provetes retirados dos banzos das chapas perfiladas do tipo T5 com 0,50 mm de espessura e as dimensões indicadas na Figura 4.1, efetuadas com um paquímetro.

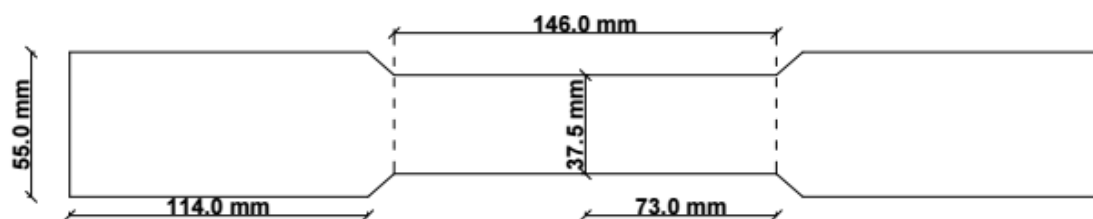
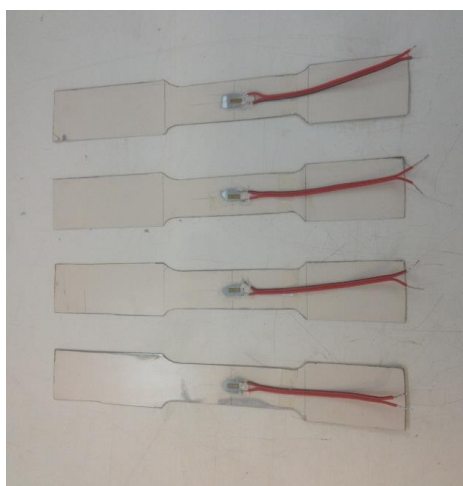


Figura 4.1 – Características geométricas dos provetes de ensaio

Com base na largura e espessura acima indicadas, determinou-se a área de secção transversal dos provetes de $18,75 \text{ mm}^2$.

Os ensaios de tração decorreram com recurso a uma máquina universal de tração/compressão e foram realizados com uma velocidade de deformação de $0,01 \text{ mm/s}$. Os deslocamentos e extensões foram medidos através de um transdutor de deslocamento, extensómetros eléctricos de alta resistência YFLA-5 e um extensómetro mecânico Epsilon com um afastamento inicial de 50 mm entre pontos de medição a partir do centro do provete. Todas as medições foram registadas com auxílio de uma Data-Logger TML e posteriormente analisadas e tratadas em ambiente Microsoft Office Excel[®]. As Figuras 4.2 e 4.3, apresentam imagens dos provetes antes e durante os ensaios bem como do layout adotado com toda a instrumentação utilizada atrás referida.



a)Provetes de ensaio



b)Instrumentação utilizada

Figura 4.2 – Provetes e instrumentação utilizada nos ensaios experimentais de caracterização do aço



a) Decorrer do ensaio

b) Rotura do provete

Figura 4.3 – Ensaios experimentais de caracterização do aço

Analisando os valores apresentados no Quadro 4.1, observa-se que os resultados obtidos no ensaio de tração são coerentes, uma vez que os quatro provetes apresentam valores de tensão de cedência e extensão muito próximos e ligeiramente superiores aos valores nominais como seria expectável.

Quadro 4.1 – Deformação sofrida e cálculo da tensão de cedência média do aço

Ensaio	Força (kN)	Área (mm ²)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de cedência média (MPa)
1	7,7	18,75	408,5	380,4
2	6,69		354,9	
3	6,81		361,3	
4	7,48		396,8	

Os resultados de cada ensaio realizado apresentam-se de forma mais detalhada na Figura 4.4, em que é possível observar as curvas tensão-extensão dos quatro provetes ensaiados à tração até uma extensão de 0,5%. Analisando as curvas tensão/extensão apresentadas, verifica-se que os provetes atingiram logo o patamar de cedência até a rotura e não passaram por uma fase de endurecimento, como é normal em aços macio. Importa ainda salientar que o aço trabalha em regime elástico-linear até determinado valor de tensão aplicada, admitindo assim a lei de Hooke, em que a sua deformação é proporcional ao esforço aplicado. Ultrapassado este valor, o aço passa pela chamada fase plástica, na qual ocorrem deformações crescentes sem variação de tensão. A linha a tracejado representa o valor da tensão de cedência média do aço.

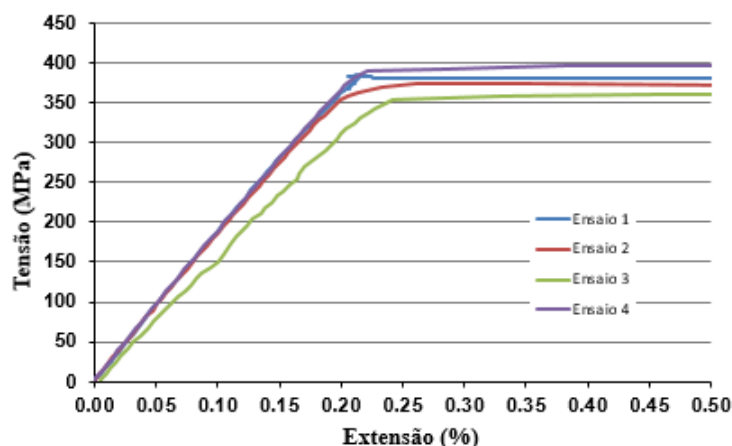


Figura 4.4 – Curvas tensão/extensão – extensómetro eléctrico obtidas através ensaios de tração realizados

4.3 Soluções desenvolvidas analiticamente

De seguida, apresentam-se as características geométricas das configurações concebidas analiticamente dos dois tipos de chapas perfiladas utilizadas nesta campanha experimental. As propriedades das secções podem ser consultadas na íntegra no Anexo A. Importa referir que devido ao seu processo de fabrico (quinagem), os provetes apresentaram algumas imperfeições que foram desprezadas no contexto deste estudo.

4.3.1 Chapa perfilada do tipo T5

A chapa perfilada do tipo T5 (Figura 4.5) é reforçada nos banzos inferiores para uma melhor resistência aos momentos negativos. Apresenta uma largura total de 1150 mm e foi concebida para revestimento de fachadas ou coberturas. No entanto, devido às suas características geométricas, é uma solução ideal para coberturas uma vez que tem uma elevada altura de secção (30 mm) e uma largura do banzo inferior (170 mm) que permitem um eficaz escoamento de águas, reduzindo assim possíveis problemas de infiltração nas zonas de sobreposição de chapas.

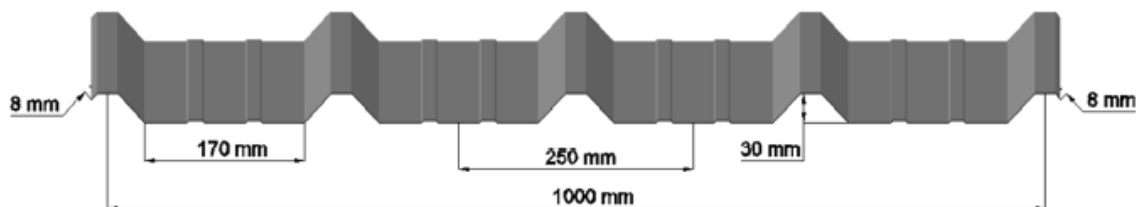


Figura 4.5 - Características geométricas da chapa perfilada do tipo T5 (Ferraz, 2014)

4.3.2 Chapa perfilada do tipo T14

A chapa perfilada do tipo T14 (Figura 4.6) foi concebida para revestimento de fachadas, portões e pequenas vedações. É uma solução menos resistente que a chapa do tipo T5, mas mais económica, na medida em que a sua largura total (1250 mm) permite cobrir mais área.

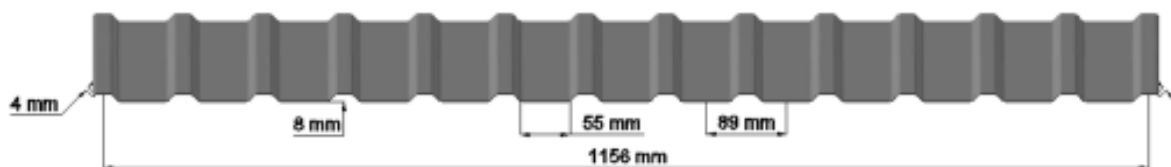


Figura 4.6 – Características geométricas de chapa perfilada do tipo T14 (Ferraz, 2014)

4.4 Ensaio experimentais de chapas perfiladas

4.4.1 Descrição dos modelos experimentais

Nesta campanha experimental foram sujeitos a ensaios de resistência à flexão provetes de chapas perfiladas com 2 tipos de secções transversais manifestamente distintas (T5 e T14), com um e/ou dois vãos, para uma melhor avaliação das variações do seu comportamento ao nível dos banzos comprimidos, alma e reforços adotados. Ambas as secções podem ser solicitadas por cargas de sentido descendente ou ascendente. No entanto, no âmbito desta dissertação de mestrado, as chapas perfiladas apenas foram ensaiadas sob ação de uma carga uniformemente distribuída de sentido descendente. Deste modo, foram realizados: 2 ensaios em chapas perfiladas de secção do tipo T5, com um vão de 2,00 m (Figura 4.7b); 3 ensaios em chapas perfiladas de secção do tipo T14, com um vão de 1,00 m (Figura 4.7c) e 2 ensaios em chapas perfiladas de secção do tipo T14, com dois vãos de 1,00 m cada.



a) Conjunto de chapas perfiladas T5 e T14

Figura 4.7 – Modelos experimentais de chapas perfiladas sujeitas a ensaio



b) Proвете com secção T5



c) Proвете com secção T14

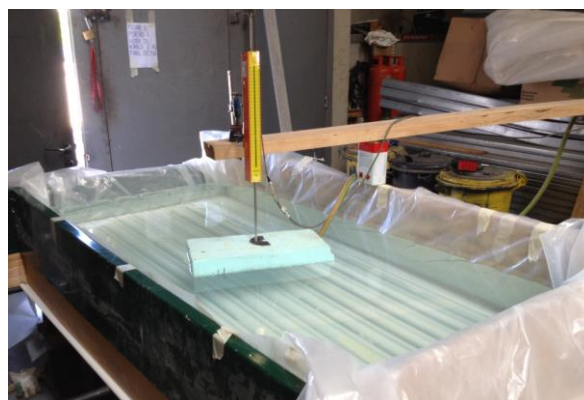
Figura 4.7 – Modelos experimentais de chapas perfiladas sujeitas a ensaio (continuação)

4.4.2 Sistema e procedimento de ensaio

A disposição de todos os elementos necessários para a realização e preparação dos ensaios experimentais, seguiu os pressupostos definidos no Anexo A da norma EN 1993-1-3 (CEN, 2006). Deste modo, e como já referido, os provetes foram submetidos a ensaios de resistência à flexão sob ação de uma carga uniformemente distribuída. Com o intuito de criar condições de ensaio o mais próximas possível da realidade, optou-se por aplicar um carregamento sob ação de uma camada de água introduzida de forma crescente num reservatório auxiliar de madeira concebido previamente (Figura 4.8a). Recorreu-se a um transdutor de deslocamento (LVDT) para medir a altura de água necessária ao longo do ensaio até ao colapso da chapa (Figura 4.8b).



a) Reservatório de madeira (ensaio do provete T14 - 2 vãos)



b) Sistema de medição da altura de água

Figura 4.8 – Preparação de ensaios de resistência à flexão

Um dos pontos fundamentais para a realização dos ensaios está relacionado com as condições de apoio dos provetes. Assim, na preparação do layout da presente campanha experimental,

utilizaram-se perfis metálicos laminados a quente (IPE) para servir de base e dar altura às chapas conseguindo assim colocar toda a instrumentação necessária por baixo das mesmas. De seguida, criou-se um sistema de apoios simplesmente apoiado para as chapas perfiladas. Utilizou-se um apoio simples - que permite deslocamentos segundo o eixo longitudinal da chapa e rotações segundo o eixo de maior inércia da secção transversal, e um apoio duplo - que permite apenas rotações segundo essa direção.

Durante os ensaios foram medidas em simultâneo, deformações verticais e extensões em vários pontos dos provetes. Para isso, foram colocados vários transdutores de deslocamento (LVDT'S) e extensómetros do tipo FLA-6-11, nos banzos superiores e inferiores dos provetes de chapas perfiladas a 1/2 vão e a 1/4 de vão. No caso dos ensaios dos provetes T14 com dois vãos, a instrumentação atrás referida também foi colocada na zona do apoio intermédio. À semelhança dos ensaios realizados para a caracterização das chapas perfiladas, todas as medições foram registadas com recurso a um data-logger e posteriormente analisadas e tratadas em ambiente Microsoft Office Excel®. A Figura 4.9 ilustra de forma pormenorizada a localização da instrumentação dos modelos para ensaio.

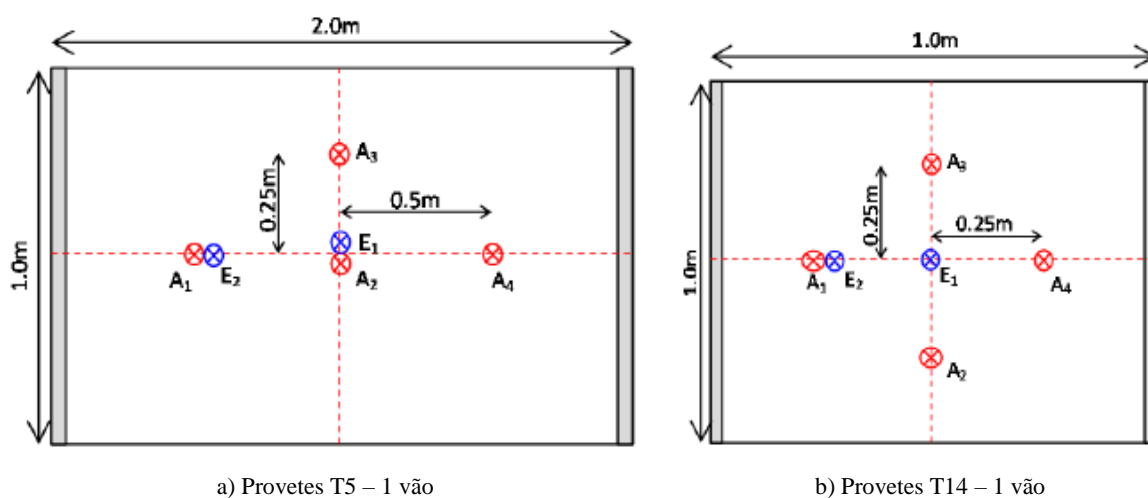
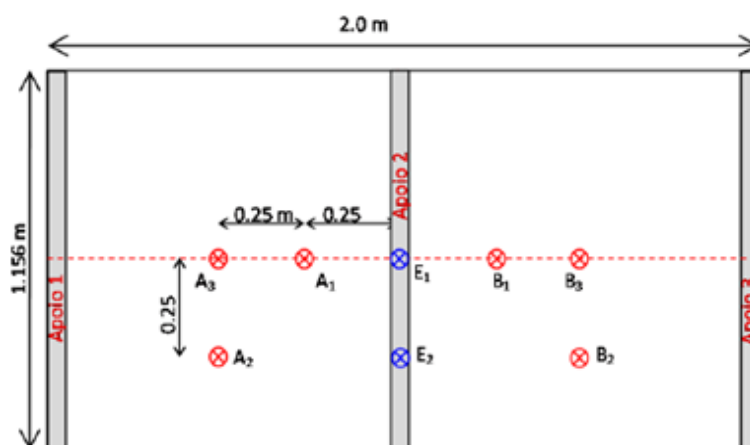


Figura 4.9 – Esquema com localização da instrumentação utilizada

Legenda:
 A_i e B_i – Transdutores de deslocamento
 E_i – Extensômetros



c) Extensômetros T5



d) Provetes T14 – 2 vãos

Figura 4.9 – Esquema com localização da instrumentação utilizada (continuação)

Na Figura 4.10 é possível observar algumas imagens da preparação dos provetes e montagem do sistema adotado para a realização dos ensaios de resistência à flexão das chapas perfiladas.



Figura 4.10 – Instrumentação dos provetes e preparação do sistema de ensaio



Figura 4.10 – Instrumentação dos provetes e preparação do sistema de ensaio (continuação)

4.5 Apresentação de resultados

4.5.1 Introdução

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nos diversos ensaios de resistência à flexão realizados. Embora para cargas uniformemente distribuídas de valores distintos, como seria de esperar, a rotura de todos os provetes deu-se por plastificação seguida de enfunamento da chapa, confirmando o modo de instabilidade local referido no Capítulo 3. De salientar que se observou que os provetes não sofreram um colapso imediato, apresentando uma resistência residual, pós-instabilidade. A Figura 4.11 corresponde aos instantes imediatamente anteriores ao colapso dos provetes com o reservatório de madeira praticamente cheio de água.



a) Proвете T14 – 2 vãos

b) Proвете T14 – 1 vão

Figura 4.11 – Fase final dos ensaios experimentais

4.5.2 Ensaio com provetes T5 – 1 vão

Nos 2 ensaios realizados com os provetes de chapas perfiladas de secções do tipo T5, com um vão de 2 metros (L), não se verificaram diferenças muito significativas na resistência à flexão dos provetes. O colapso deu-se por flexão na secção de meio vão (Figura 4.12) para uma altura de água de aproximadamente 125 mm, correspondente a uma carga uniformemente distribuída de 1,25 kN/m². As Figuras 4.13 e 4.14, apresentam os resultados obtidos nos 2 ensaios realizados, ilustrando as curvas carga/deslocamento vertical a 1/2 vão e a 1/4 de vão, respetivamente; importa referir que as linhas a traço interrompido correspondem aos valores de cálculo da carga para o estado limite de deformação ($L/200 = 10$ mm) e estado limite último, constantes nas tabelas de dimensionamento direto desenvolvidas no âmbito de outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014) (Anexo A).



Figura 4.12 – Colapso dos provetes de chapas perfiladas com secção T5 - 1 vão

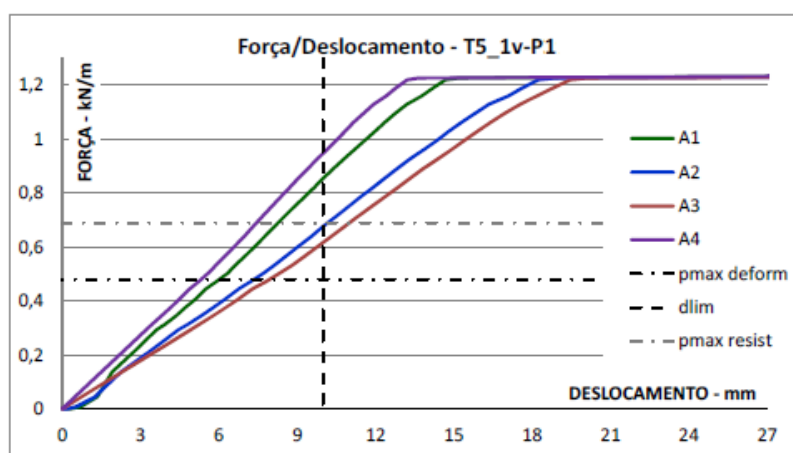


Figura 4.13 – Curvas carga/deslocamento vertical dos provetes T5 nas secções a 1/2 vão

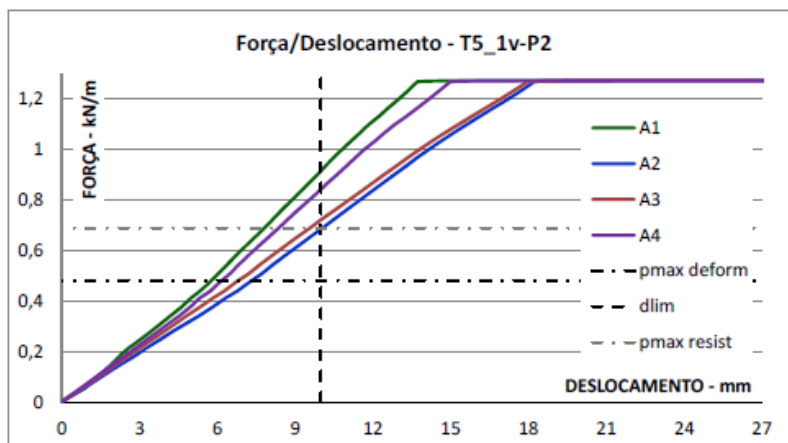


Figura 4.14 – Curvas carga/deslocamento vertical dos provetes T5 nas secções a 1/4 vão

4.5.3 Ensaios com provetes T14 – 1 vão

À semelhança dos ensaios anteriores, também não se verificaram diferenças significativas do ponto de vista de resistência à flexão dos 3 provetes de secções do tipo T14 ensaiados, com vãos de 1 metro. O colapso deu-se igualmente por flexão na secção de meio vão (Figura 4.15) com uma altura de água de aproximadamente 300 mm, correspondente a uma carga uniformemente distribuída de $3,00 \text{ kN/m}^2$. O modo de colapso é confirmado pelas elevadas extensões observadas na secção de meio vão, em particular no banzo superior em compressão de cada provete. A Figura 4.16 ilustra as curvas carga/extensão obtidas na secção de meio vão do primeiro ensaio desta série.



Figura 4.15 – Colapso dos provetes de chapas perfiladas com secção T14 - 1 vão

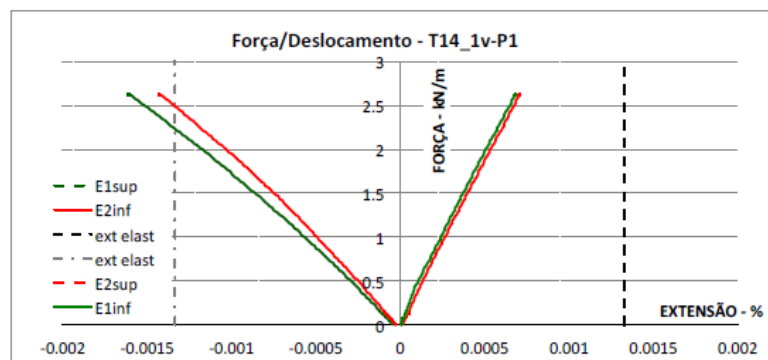


Figura 4.16 - Curvas carga/extensão dos provetes T14 na secção de meio vão

A Figura 4.17 apresenta, de forma ordenada, os resultados obtidos nos ensaios realizados aos 3 provetes, ilustrando as curvas carga/deslocamento vertical a 1/2 vão e a 1/4 de vão. As linhas a traço interrompido correspondem aos valores de cálculo da carga para o estado limite último e de deformação ($L/200 = 5 \text{ mm}$), constantes nas tabelas de dimensionamento direto (Anexo A).

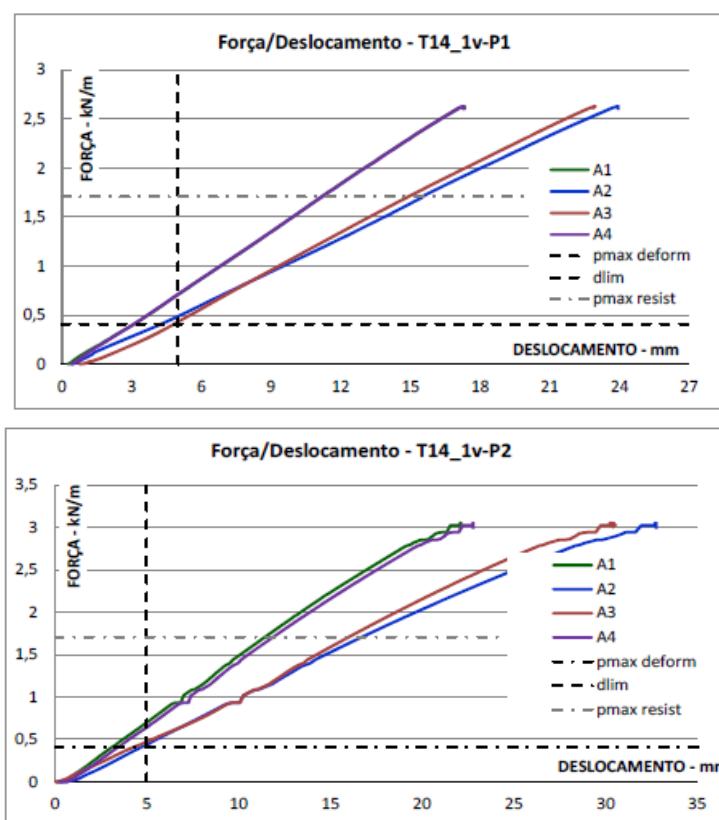


Figura 4.17 – Curvas carga/deslocamento vertical dos provetes T14 nas secções a 1/2 vão e a 1/4 vão

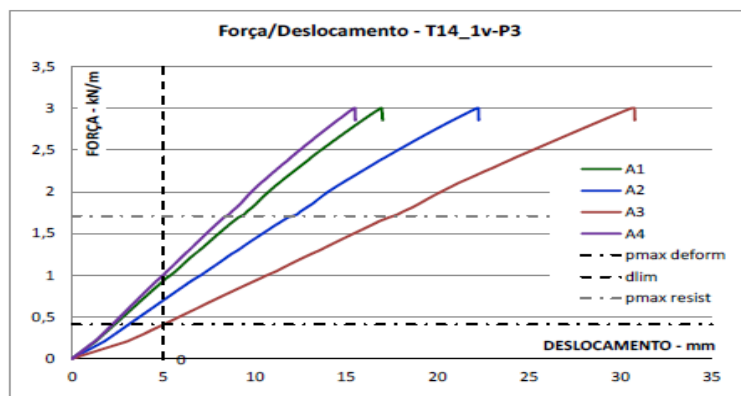


Figura 4.17 – Curvas carga/deslocamento vertical dos provetes T14 nas secções a 1/2 vão e a 1/4 vão (continuação)

4.5.4 Ensaios com provetes T14 – 2 vãos

Por último, apresentam-se os resultados obtidos nos 2 ensaios experimentais realizados com os provetes de chapa perfilada de secção T14 com 2 vãos de 1 metro cada. Conforme se pode observar na Figura 4.18, o colapso deu-se por flexão em duas zonas distintas: numa primeira fase, na zona do apoio intermédio e posteriormente na secção a meio vão. De salientar que a rotura não se deu ao mesmo tempo nos dois vãos. Facto este justificado pela dificuldade de se conseguir obter um sistema de ensaios com descarga de água perfeitamente simétrica para os dois vãos, possibilitando assim que um dos vãos atingisse a sua capacidade de resistência máxima primeiro que outro. Deste modo, a rotura dos provetes deu-se para uma altura de água de aproximadamente 400 mm, que corresponde a uma carga uniformemente distribuída de 4,0 kN/m². A Figura 4.19 apresenta as curvas carga/extensão obtidas no primeiro ensaio desta série em que se pode observar as elevadas extensões atingidas na secção de colapso, em particular no extensómetro Elsup, correspondente ao banzo superior em tração do provete na secção do apoio intermédio.



a)



b)

Figura 4.18 – a) Apoio intermédio; b) Colapso dos provetes com secção T14 - 2 vãos de 1 metro



Figura 4.18 – c e d) Colapso dos provetes com secção T14 - 2 vãos de 1 metro (continuação)

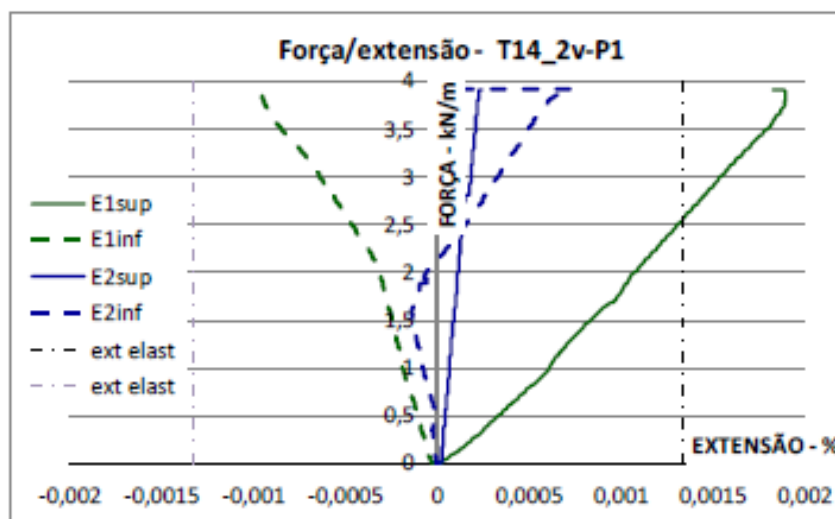
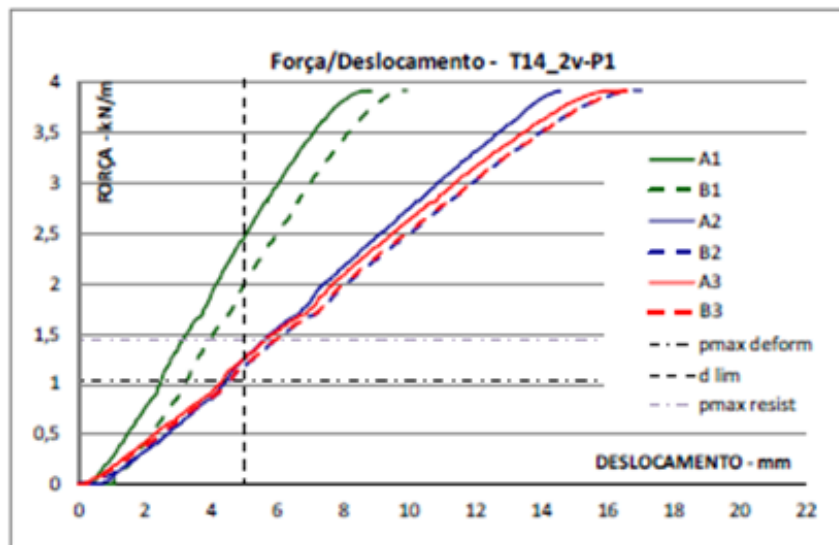
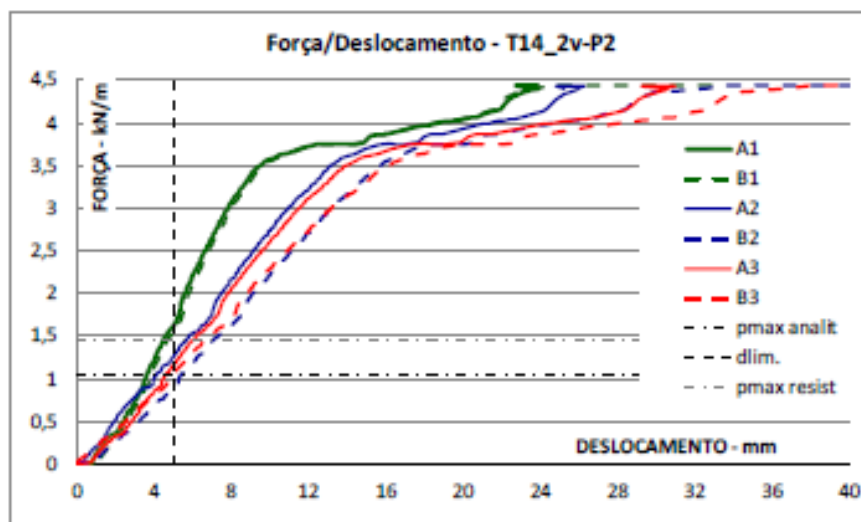


Figura 4.19 – Curvas carga/extensão dos provetes T14 com 2 vãos, na secção do apoio intermédio

Na Figura 4.20 são apresentadas as curvas carga/deslocamento vertical para os dois vãos em cada um dos ensaios realizados aos provetes de chapas perfiladas. Os valores correspondem aos registados pela instrumentação colocada a 1/2 vão e a 1/4 de vão, e à semelhança dos ensaios anteriores, as linhas a traço interrompido correspondem aos valores de cálculo da carga para o estado limite de deformação ($L/200 = 5$ mm) e estado limite último, constantes nas tabelas de dimensionamento direto (Anexo A).



a) Primeiro ensaio



b) Segundo ensaio

Figura 4.20 – Curvas carga/deslocamento vertical dos provetes T14 com 2 vãos, nas secções a 1/2 vão e a 1/4 vão.

5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os valores resultantes da campanha experimental realizada nos provetes de chapa perfilada de aço enformado a frio e comparados com os valores de cálculo obtidos por via analítica no âmbito de outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014) (que podem ser consultados na íntegra no Anexo A).

Analisando o Quadro 5.1, observa-se que todos os provetes apresentaram uma capacidade resistente de carga ($p_{exp,resist}$) consideravelmente superior aos valores de cálculo analítico ($p_{cal,resist}$). Note-se que o rácio mínimo é de 1,53 e obteve-se no ensaio P1 realizado aos provetes de chapa T14 com 1 vão. As maiores diferenças observam-se nos ensaios com os provetes T14 de 2 vãos em que se atinge uma capacidade resistente de carga três vezes superior à esperada analiticamente. No que diz respeito à deformação das chapas correspondente ao estado limite de deformação, com $\delta_{vertical} = L/200$ para cargas descendentes, também se obtiveram valores de ensaio superiores aos valores de cálculo. No entanto, estas diferenças foram muito pouco significativas, em particular nos provetes do tipo T14 em que o rácio médio é de 1,05. Por outro lado, os ensaios realizados com os provetes do tipo T5 já apresentaram valores mais significativos com um rácio médio de 1,38. Importa referir que os valores de cálculo analítico de resistência e deformação, foram determinados utilizando as propriedades nominais e coeficientes de segurança das ações.

Quadro 5.1 – Resultados experimentais e analíticos obtidos para todos os provetes testados

Provete	Ensaio	Cálculo analítico		Ensaio experimentais			
		$p_{cal,def}$ (kN/m)	$p_{cal,resist}$ (kN/m)	Estado limite de deformação	Capacidade Resistente		
				$p_{exp,def}$ (kN/m)	$p_{exp,def}/p_{cal,def}$	$p_{exp,resist}$ (kN/m)	$p_{exp,resist}/p_{cal,resist}$
T5_1v	P1	0.48	0.69	0.61	1.27	1.25	1.81
	P2			0.71	1.48	1.28	1.86
T14_1v	P1	0.41	1.71	0.42	1.02	2.61	1.53
	P2			0.43	1.05	3.05	1.79
	P3			0.42	1.01	2.88	1.68
T14_2v	P1	1.03	1.44	1.18	1.15	3.90	2.71
	P2			1.06	1.03	4.39	3.05

O Quadro 5.2 apresenta o rácio entre os valores analíticos - presentes nas tabelas de cálculo de resistência à tração (Anexo A) – e os valores experimentais - calculados de acordo com a capacidade resistente observada nos ensaios ($\rho_{exp,resist}$) - dos momentos fletores resistentes das chapas perfiladas.

Quadro 5.2 – Comparação dos valores dos momentos resistentes obtidos por meio analítico e experimental

Provete	Ensaio	Valor analítico	Valor experimental	Variação
		M_{rd}^+ (kN.m/m)	$M_{máx}$ (kN.m/m)	(%)
T5_1v	P1	0.59	0.63	+6.8
	P2		0.64	+8.5
T14_1v	P1	0.33	0.33	+0.0
	P2		0.38	+15.2
	P3		0.36	+9.1
T14_2v	P1	0.33	0.49	+48.5
	P2		0.55	+66.7

Tendo em conta os resultados acima apresentados, em que as cargas e os momentos fletores máximos atingidos superam a capacidade resistente de cálculo, conclui-se que as chapas perfiladas T5 e T14 sujeitas aos ensaios de flexão por meio de cargas descendentes apresentaram um bom comportamento mecânico e em conformidade com as previsões analíticas. Apesar dos colapsos se terem dado por instabilidade, a verificação de segurança das chapas em relação a este fenómeno, está assegurada uma vez que a determinação do valor de cálculo dos esforços resistentes foi efetuada analiticamente com base no princípio de secção efetiva.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Nesta dissertação foram apresentados os detalhes e resultados da campanha experimental realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, com o intuito de validar o estudo analítico de otimização de novas configurações de dois tipos de chapas perfiladas de revestimento em aço enformado a frio desenvolvido no âmbito de outra dissertação de mestrado (Ferraz, 2014). Esta campanha experimental englobou um total de sete ensaios de resistência à flexão, por aplicação de um carregamento uniforme descendente simulado em ambiente controlado de laboratório, de acordo com os pressupostos definidos na norma EN 1993-1- (CEN, 2006).

O estudo desenvolvido mostrou que as duas soluções de chapas perfiladas testadas têm um bom desempenho mecânico e são uma boa opção competitiva para o setor da construção metálica. Não só pelo facto de os valores das cargas e momentos fletores máximos atingidos, em todos os ensaios realizados, terem sido superiores aos valores estimados analiticamente, mas também porque o trabalho desenvolvido permitiu obter secções transversais otimizadas, reduzindo o gasto de matéria-prima utilizada no processo de fabrico, tornando-se assim mais atrativas e competitivas para o mercado.

Relevou-se um trabalho experimental bastante desafiante principalmente no que diz respeito ao sistema de ensaio adotado. Foi necessário pensar num sistema seguro e eficaz, de forma a ser capaz de armazenar um grande volume de água, sem danificar nenhuma instrumentação utilizada, e que simulasse da melhor forma possível uma situação real de carregamento uniforme.

6.2 Trabalhos futuros

Dada a escassez de ensaios laboratoriais existentes, a campanha experimental desenvolvida na presente dissertação de mestrado revelou-se um trabalho bastante útil no que diz respeito ao avanço do conhecimento experimental de chapas perfiladas de revestimento. No entanto, novos estudos experimentais e numéricos são necessários, dada a enorme potencialidade e crescimento observado na utilização deste tipo de elementos de aço enformado a frio.

Relativamente aos modelos de chapas perfiladas ensaiados, devido ao reduzido número de provetes dispensados pela empresa adjudicatária do trabalho, considera-se que foi feita uma curta análise experimental. Deste modo, é importante desenvolver outro tipo de ensaios - ensaios de durabilidade, ensaios de resistência à flexão por meio de cargas ascendentes, entre outros - que permitam um conhecimento mais aprofundado destas soluções testadas bem como das restantes configurações desenvolvidas no âmbito de dissertação de mestrado de Ferraz (2014).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carmona, R., 2009. *Avaliação Do Comportamento Experimental De Lajes Mistas Aço-Betão Com Cofragem Metálica Colaborante*, Dissertação de Mestrado: Universidade de Coimbra.

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.

CEN, 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.

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

CEN, EN ISO 6892-1, 2009. *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*, s.l.: European Committee for Standardisation, Brussels.

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

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

Fena, 2011. *Interação Entre Instabilidade Local E Distorcional Em Colunas De Aço Enformadas A Frio De Secção Em "Hat"*, Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ferraz, G., 2014. *Otimização Da Secção Transversal De Chapas Perfiladas E Madres Ómega De Aço Enformado A Frio*, 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.

Gherzi, A., Landolfo, R., Mazzolani, 2002. *Design Of Metallic Cold-formed Thin-walled Members*. New York: Spon Press, Taylor & Francis Group.

Martins, A., 2011. *Chapas Metálicas Enformadas A Frio Para Coberturas E Fachadas. Análise Experimental e Analítica*, Dissertação de Mestrado: Universidade do Minho.

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.

Mezzomo, G., 2004. *Verificação Teórica E Experimental Do Comportamento De Telhas Trapezoidais De Aço Formadas A Frio*, Dissertação de Mestrado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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. *Chapa perfilada enformados a frio* (Catálogo), Braga.

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

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.

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

Simões, R., 2014. *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas - Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço, Parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios*, s.l.: 3ª Edição, CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

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

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.

ANEXO A - TABELAS DE CÁLCULO DIRETO DE CHAPAS PERFILADAS

A1 CHAPA PERFILADA – T5 (S280GD+Z)

A1.1 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Chapa	t _{nom} (mm)	Peso (kg/m ²)	Momentos Positivos			Momentos Negativos		
			M _{Rd} ⁺ (kN.m/m)	I ⁺ (cm ⁴ /m)	W ⁺ (cm ³ /m)	M _{Rd} ⁻ (kN.m/m)	I ⁻ (cm ⁴ /m)	W ⁻ (cm ³ /m)
T5	0.45	4.06	0.48	3.93	1.59	0.61	2.98	2.12
	0.50	4.51	0.59	4.75	1.95	0.73	3.47	2.62
	0.55	4.97	0.71	5.62	2.35	0.86	3.98	3.08
	0.60	5.42	0.84	6.55	2.78	1.00	4.50	3.58
	0.70	6.32	1.13	8.42	3.68	1.31	5.60	4.67

A1.2 TABELAS DE CALCULO DIRETO

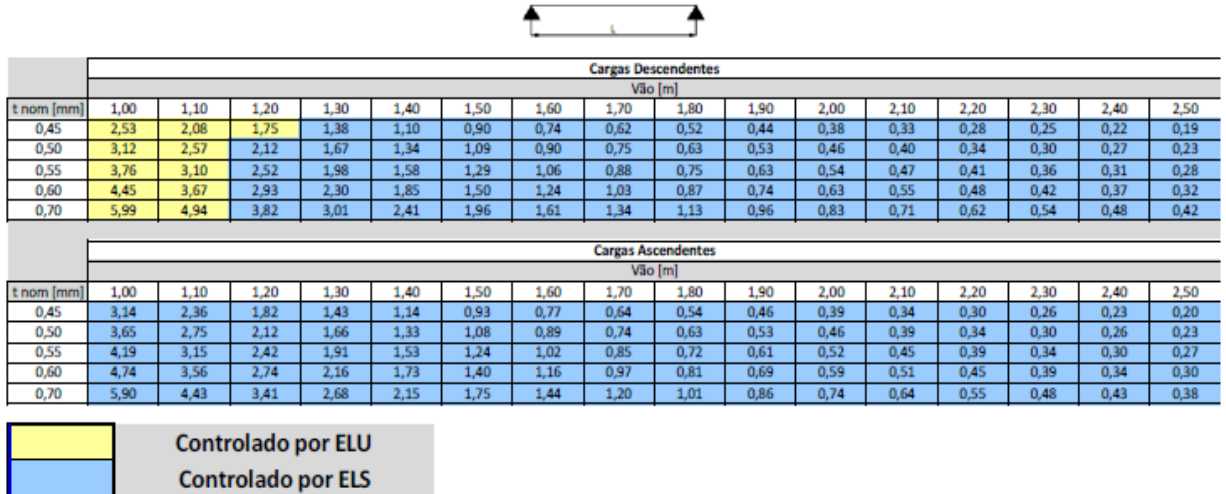


Figura A.1 – 1 vão

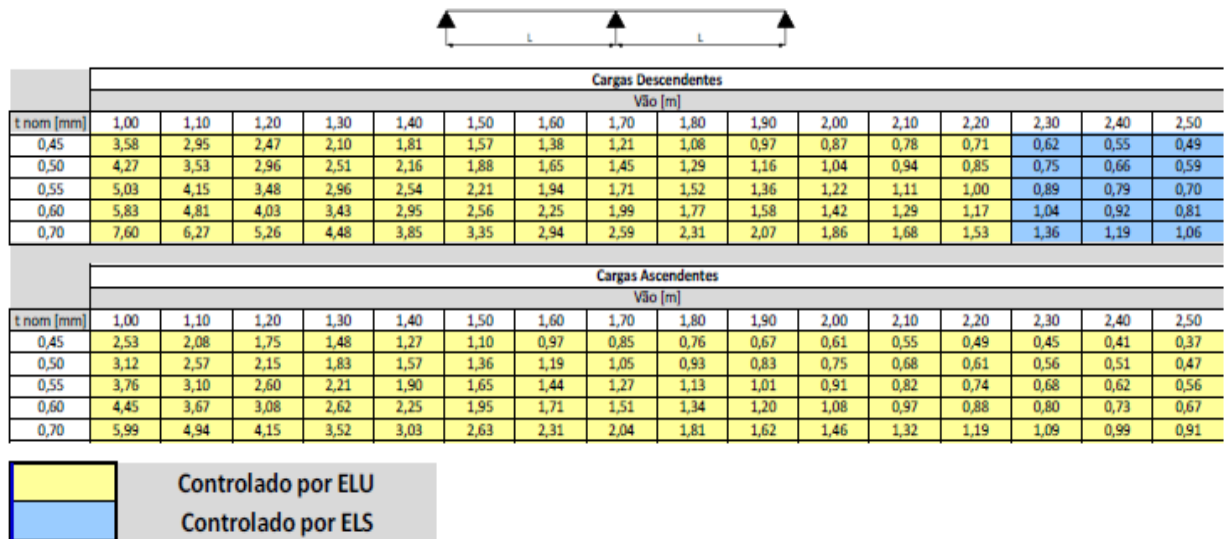


Figura A.2 – 2 vãos



Figura A.3 – 3 vãos

A2 CHAPA PERFILADA – T14 (S280GD+Z)

A2.1 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Chapa	t_{nom} (mm)	Peso (kg/m ²)	Momentos Positivos			Momentos Negativos		
			M_{Rd}^+ (kN.m/m)	I^+ (cm ⁴ /m)	W^+ (cm ³ /m)	M_{Rd}^- (kN.m/m)	I^- (cm ⁴ /m)	W^- (cm ³ /m)
T14	0.45	4.42	0.28	0.44	0.77	0.23	0.65	0.82
	0.50	4.91	0.33	0.51	0.91	0.28	0.77	0.99
	0.55	5.40	0.38	0.58	1.05	0.33	0.92	1.18
	0.60	5.89	0.41	0.64	1.15	0.39	1.07	1.39
	0.70	6.87	0.49	0.76	1.36	0.51	1.43	1.83

A2.2 TABELAS DE CALCULO DIRETO

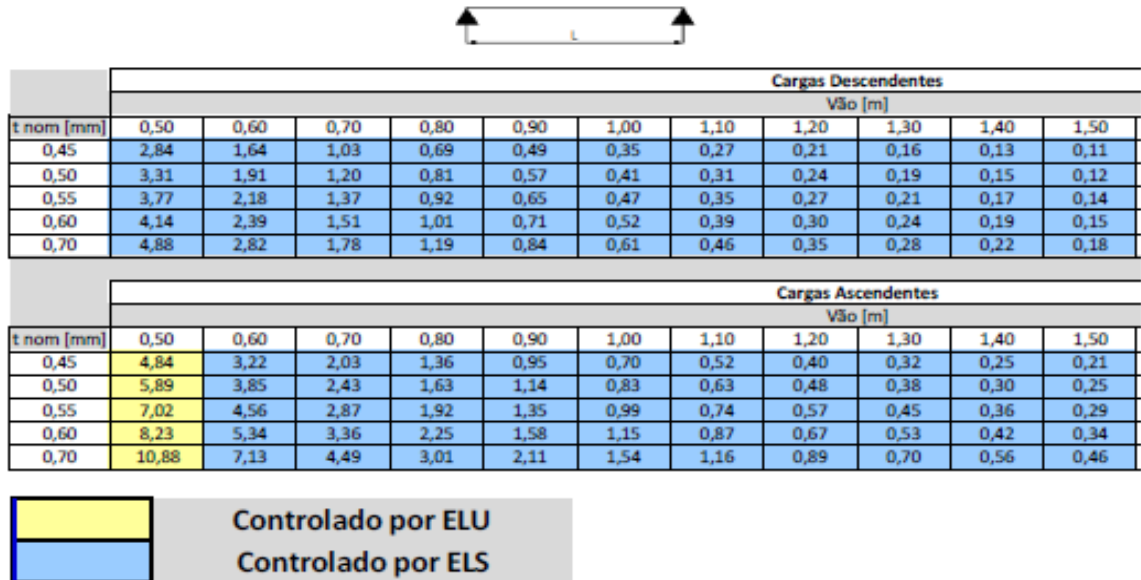


Figura A.4– 1 vão

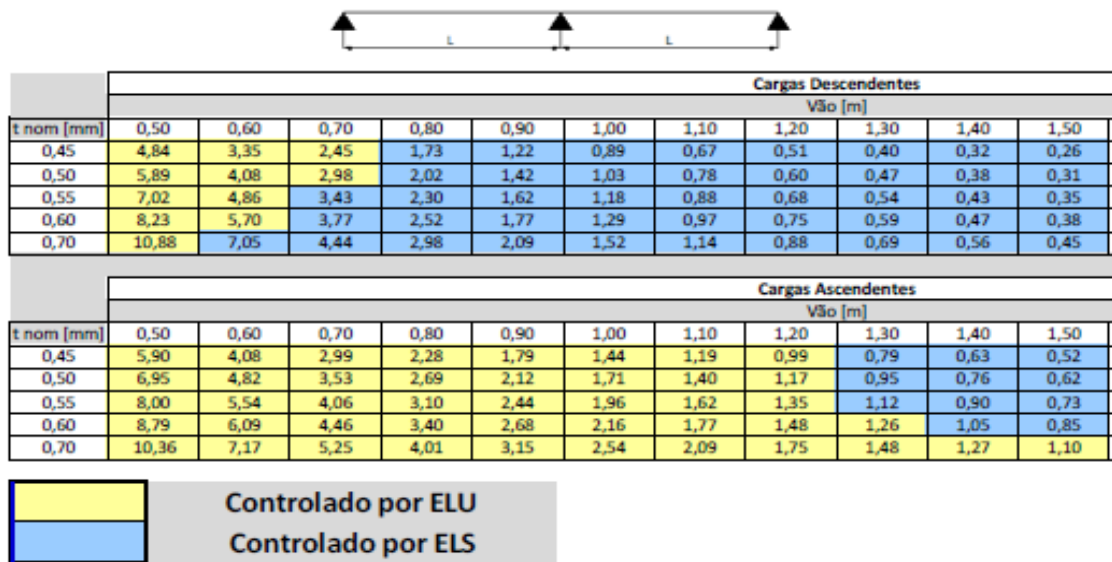


Figura A.5 – 2 vãos

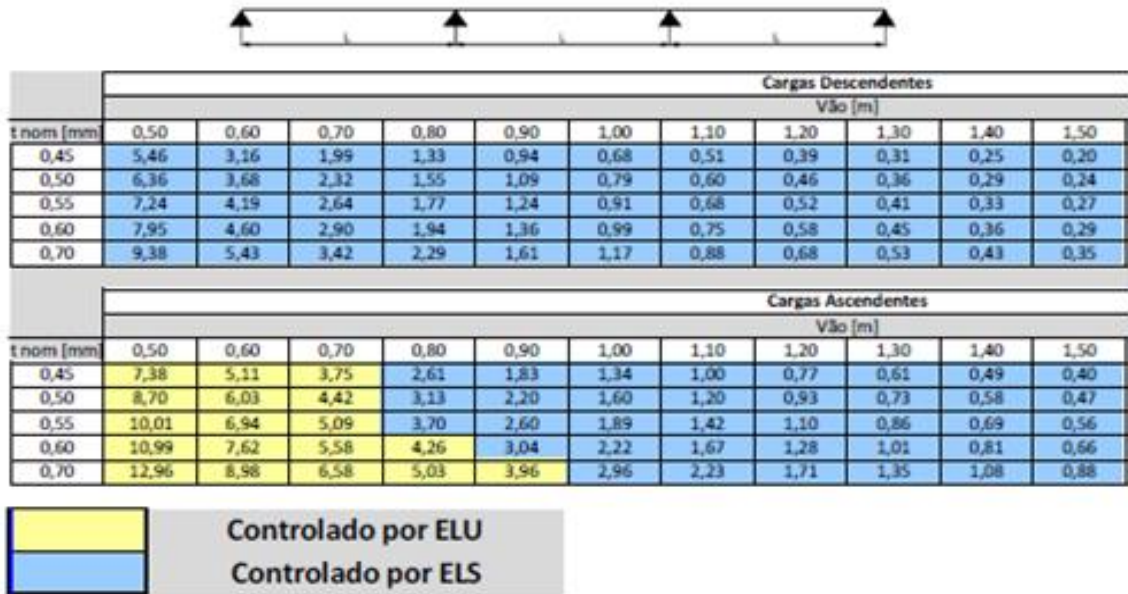


Figura A.6 – 3 vãos