



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

# **Análise de painéis com perfis de aço enformados a frio para utilização em construção modular CoolHaven**

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

Autor

**Filipe Daniel Oliveira Garcia**

Orientadores

**Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva**

**Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio**

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

**Coimbra, Julho, 2013**

## AGRADECIMENTOS

É curioso que, após escrever o presente documento, que se trata de um trabalho exigente, onde impera a coerência e a razão, me seja difícil escrever este pequeno texto com o coração. Pois falo com sinceridade aos que me deram o seu melhor e a dificuldade aumenta quando pretendo mencionar todas as pessoas que me foram essenciais nesta etapa da minha vida. Quero assim, agradecer em especial aos que se seguem.

Ao Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva pelo exemplar trabalho de orientação, pela exigência de um bom trabalho, devidamente fundamentado, transmitindo com isso toda a sua sabedoria.

À Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio pela irrepreensível orientação, contribuindo com constantes sugestões e correções, pela grande disponibilidade e pelo empenho que demonstrou perante as dúvidas que pretendia esclarecidas.

Ao Doutor José Alexandre Gouveia Henriques pela grande e constante disponibilidade e dedicação, pela paciência demonstrada nas incontáveis vezes que solicitei a sua ajuda no programa de cálculo, pelo apoio e sugestões sem as quais não teria conseguido atingir os objetivos propostos.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, por todo o esforço que fizeram durante estes anos, por terem confiado nas minhas decisões e, mais importante que tudo, pelo carinho e amor que sempre me deram. Não quero deixar de referir os meus avós e tias que sempre estiveram ao meu lado e por quem tenho enorme carinho.

À Sandra, por tanta coisa que seria impossível descrever neste texto, pela força e motivação nos momentos difíceis, por sempre acreditar que posso melhorar, pelas preciosas sugestões e por todo o amor, carinho e compreensão que me dedicou ao longo destes anos.

Por fim, quero agradecer aos meus Grandes amigos João Cid, João Vinhas e Tiago Sardinha, não esquecendo todos os outros, que não vou aqui nomear, não correndo o risco de não deixar uma palavra de apreço a todos os que me apoiaram.

## RESUMO

Numa época em que o Mundo reclama crescentes cuidados com o meio ambiente, a comunidade científica tem vindo a despertar para uma realidade onde o conceito de sustentabilidade assume assinalável importância.

Dentro desta linha de pensamento, os projetistas constataram que o conceito sustentabilidade está intimamente ligado à construção civil, uma vez que esta contribui para a alteração do meio ambiente, tendo a construção em aço, e em especial em aço enformado a frio (também designado como " aço leve" ou *cold formed* ou *light steel framing* na nomenclatura anglo-saxónica) ganho uma preponderância elevada.

O aço, mais concretamente o aço enformado a frio, tem inúmeras vantagens, tais como a sua eficiência estrutural (relação peso resistência) e o facto de, sendo infinitamente reciclável, ser sem dúvida um material de futuro e excelência, ganhando quota de mercado dentro da construção civil.

Esta dissertação relaciona-se com a empresa CoolHaven, que tem como conceito e filosofia a sustentabilidade e vê na inovação um dos conceitos chave, promovendo, em parceria com o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, o estudo e desenvolvimento de novos métodos construtivos, métodos estes que constituem uma inovação tecnológica dentro da engenharia civil, recorrendo para tal a uma construção modular. A construção modular permite a pré fabricação, facilidade de construção, diminuição de erros em obra durante execução, diminuição dos prazos da mesma, menores desperdícios e consequente minimização de impactos ambientais.

Na construção modular utilizam-se painéis, que são constituídos por perfis de aço enformado a frio, que requerem um estudo exaustivo através de uma análise numérica, recorrendo a modelos estruturais reproduzidos em programas de cálculo automático, devidamente calibrados com base em ensaios experimentais, com o objetivo de os analisar e otimizar. Um aspeto preponderante na sua análise é o comportamento das ligações no comportamento estrutural do painel, sem descuidar o comportamento dos próprios perfis, que sendo normalmente de classe 4, têm inúmeros tipos de instabilidade.

## **ABSTRACT**

Nowadays, when the world requires increasing environment protection, the scientific community needs to be awake to the reality where the concept of sustainability assumes great importance.

According to mentioned, the engineers noticed that the concept of sustainability is closely connected to the civil engineering construction, especially that it contributes to changes in the surrounding environment. Therefore metal framework, particularly the cold formed or light steel framing, gets an increasing importance.

The steel, specifically the light steel framing, has many advantages, such as its structural efficiency (relation weight resistance) or its infinite recycling. It is certainly an excellence material and a material for the future, playing a great role on the civil construction market.

Present dissertation is related to the company CoolHaven. Its philosophy is based on the sustainability and the innovation with is seen as a key-issue. The company, together with The Department of Civil Engineering of the Faculty of Science and Technology of Coimbra, promotes the study and development of new construction methods. Methods represent a technologic innovation inside civil engineering, which requires a modular construction. This modular construction enables pre-fabrication and easier construction, decreases number of errors during the constructions execution, decrease construction time, reduces wastage and minimize consequently environmental impacts.

First of all, the process of obtaining the panels, which are made of light steel framing, requires their study through a numeric analysis, using structural models reproduced on automatic calculation programs, calibrated on a base of experimental tests, in order to optimize them. An important issue on the optimization process is a behavior of the connections has on the structural behavior of the panel, having in consideration the behavior of the own profiles, that are usually class four, have many kinds of instability.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento Geral .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação .....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. Aço Enformado a Frio .....	5
2.1.1. Considerações introdutórias .....	5
2.1.2. Métodos de fabricação.....	7
2.1.3. Caracterização do aço .....	10
2.1.4. Vantagens e desvantagens na utilização de estruturas de aço enformado a frio .....	11
2.1.5. Construção modular.....	13
2.2. Comportamento Estrutural.....	13
2.2.1. Estabilidade estrutural .....	14
2.2.2. Instabilidade estrutural.....	15
2.3. Estudo do Comportamento de Painéis de Aço Enformado a Frio. ....	17
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS LIGAÇÕES .....	19
3.1. Introdução .....	19
3.2. Ligações .....	19
3.3. Programa Experimental .....	20
3.4. Ensaio dos Protótipos de Aço Enformados a Frio .....	21
3.5. Ensaio da Ligação .....	24
3.5.1. Preparação dos protótipos experimentais.....	24

---

3.5.2	Geometria dos provetes.....	25
3.5.3	Montagem e instrumentação.....	26
3.5.4	Descrição do ensaio.....	27
3.5.5	Resultados experimentais e sua análise.....	27
4.	ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPOTAMENTO DA LIGAÇÃO .....	32
4.1.	Introdução .....	32
4.2.	Método dos Elementos Finitos .....	32
4.3.	Análise Não Linear .....	35
4.4.	Modelos Numéricos Estudados .....	36
4.4.1.	Descrição da modelação .....	37
4.4.2.	Calibração dos modelos .....	41
4.5.	Resultados e Confirmação da Calibração .....	43
4.5.1.	Modelos utilizando parafusos FAB.....	43
4.5.2.	Modelos utilizando parafusos SFS.....	47
5.	ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MODELOS ESTRUTURAIIS	51
5.1.	Introdução .....	51
5.2.	Caracterização da Estrutura .....	51
5.2.1.	Tipos de secções.....	51
5.2.2.	Geometria dos modelos.....	52
5.2.3.	Condições de apoio e carregamentos .....	53
5.3.	Modelos Numéricos .....	54
5.4.	Discussão de Resultados .....	58
5.4.1.	Análise detalhada do modelo com excentricidades .....	58
5.4.2.	Comparação do comportamento dos diversos modelos .....	63
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	69
6.1.	Conclusões .....	69
6.2.	Propostas de Trabalhos Futuros .....	70
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfis de aço enformados a frio (Veríssimo, 2008). .....	7
Figura 2.2 - Painéis de chapa e chapas perfiladas de aço enformados a frio (Veríssimo, 2008). .....	8
Figura 2.3 - Laminagem a frio (" <i>Cold Rolling</i> ") (Silvestre, 2012). .....	9
Figura 2.4 - Quinagem (" <i>Press braking</i> ") (Veríssimo, 2008). .....	9
Figura 2.5 - Processo de endurecimento do aço (Silvestre, 2012). .....	11
Figura 2.6 - Estabilidade do equilíbrio (Silvestre e Camotim, 2006). .....	15
Figura 2.7 - Trajetória de equilíbrio associada a instabilidade bifurcacional, (Silvestre e Camotim, 2006). .....	16
Figura 2.8 - Trajetória de equilíbrio associada a instabilidade por "snap-through", (Silvestre e Camotim, 2006). .....	16
Figura 3.1 - Prensa <i>Servosis ME 402/20</i> . .....	21
Figura 3.2 - Geometria tipo dos provetes de aço. ....	22
Figura 3.3 - Provetes de aço instrumentalizados (a) e provetes depois de ensaiados com a rotura em evidência (b)). .....	23
Figura 3.4 - Curva tensão-extensão do material utilizado. ....	23
Figura 3.5 - Parafuso auto-perfurante <i>SFSintec</i> . .....	24
Figura 3.6 - Parafuso auto-perfurante <i>Fabory</i> . .....	25
Figura 3.7 - Exemplo de um protótipo experimental e chapas auxiliares de ligação. ....	25
Figura 3.8 - Medidas nominais referentes aos modelos experimentais. ....	26
Figura 3.9 - Posição dos defletómetros aplicados nos modelos experimentais. ....	27
Figura 3.10 - Curvas força-deslocamento dos protótipos experimentais SFS. ....	28
Figura 3.11 - Curvas força-deslocamento dos protótipos experimentais FAB. ....	29
Figura 3.12 - Curvas força-deslocamento de todos os protótipos experimentais. ....	30
Figura 3.13 - Comportamento do parafuso <i>SFSintec</i> . .....	31
Figura 3.14 - Deslocamento do parafuso <i>SFSintec</i> . .....	31
Figura 4.1 - Principais tipologias de elementos finitos, adaptado de Dassault Systèmes. Abaqus 6.9 analysis user`s manual volume iv, 2009. ....	34
Figura 4.2 - Características lineares e não lineares de uma mola (Dassault, 2009) .....	36
Figura 4.3 - Partes que constituem o modelo numérico: a) parafuso; b) perfil C (base); c) perfil C. ....	38
Figura 4.4 - Exemplo de ligação devidamente modelada. ....	38
Figura 4.5 - Pormenor da malha de elementos finitos na zona do parafuso: a) com parafuso; b) sem parafuso. ....	39

---

Figura 4.6 - Malha de elementos finitos adotada no modelo numérico. ....	40
Figura 4.7 - Malha de elementos finitos adotada para os dois tipos de parafusos modelos, parafuso FAB (a) e SFS (b)). ....	40
Figura 4.8 - Modelo "completo" (a) e modelo "simplificado" (b)). ....	42
Figura 4.9 - Protótipo experimental vs modelo numérico. ....	43
Figura 4.10 - Tensões no modelo numérico. ....	43
Figura 4.11 - Comparação entre zonas plastificadas no protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)). ....	44
Figura 4.12 - Zona plastificada no orifício do parafuso referente ao modelo numérico. ....	44
Figura 4.13 - Curvas força deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos FAB. ....	45
Figura 4.14 - Comparação da deformada entre protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista lateral. ....	46
Figura 4.15 - Comparação da deformada entre protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista frontal. ....	47
Figura 4.16 - Visualização do deslocamento do parafuso (FAB) (a) e deslocamento dos perfis na zona do parafuso (b)). ....	47
Figura 4.17 - Tensões no modelo numérico. ....	48
Figura 4.18 - Tensões no modelo numérico. ....	48
Figura 4.19 - Curvas forças deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos SFS. ....	49
Figura 4.20 - Comparação da deformada entre o protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista lateral. ....	49
Figura 4.21 - Comparação da deformada entre o protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista frontal. ....	50
Figura 4.22 - Comportamento real da ligação através da sua curva força-deslocamento. ....	50
Figura 5.1 - Características das secções: a) perfil "tipo C", b) perfil "tipo macho", perfil "tipo fêmea", respectivamente. ....	52
Figura 5.2 - Painel de parede: a) com excentricidades e b) sem excentricidades. ....	53
Figura 5.3 - Modelos numéricos: a) com excentricidade e b) sem excentricidades. ....	55
Figura 5.4 - Curva força-deslocamento adotada para simular o comportamento real da ligação através do " <i>connector</i> ". ....	57
Figura 5.5 - Comportamento adotado para o material. ....	57
Figura 5.6 - Modelo com comportamento rígido das ligações: a) representação das tensões, b) representação das zonas plastificadas. ....	59
Figura 5.7 - Localização do <i>Connector</i> com maior força instalada. ....	60
Figura 5.8 - Modelo com comportamento real das ligações: a) representação das tensões, b) representação das zonas plastificadas. ....	61

---



---

Figura 5.9 - Localização do <i>Connector</i> mais solicitado em termos de esforços e deslocamentos.....	62
Figura 5.10 - Comparação do comportamento do <i>connector</i> mais esforçado com o comportamento real da ligação, através das respectivas curvas força deslocamento. ....	63
Figura 5.11 - Gráficos curva força-deslocamento para o primeiro caso de carga. ....	64
Figura 5.12 - Gráficos curva força-deslocamento para o segundo caso de carga. ....	65
Figura 5.13 - Gráficos curva força-deslocamento para o modelo com excentricidades.....	66
Figura 5.14 - Gráficos curva força-deslocamento para o modelo sem excentricidades.....	66
Figura 5.15 - Gráficos curva força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação para o modelo com excentricidades.....	67
Figura 5.16 - Gráficos curva força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação para o modelo sem excentricidades. ....	67
Figura 5.17 - Gráficos de comparação de resistência, para um comportamento de ligação rígido (esquerda) e real (direita). ....	68

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento Geral

No contexto da construção sustentável, os projetistas têm sido desafiados ao longo dos últimos anos a desenvolver estruturas cada vez mais leves e resistentes, tendo sempre em conta a redução dos impactos ambientais.

Devido à atual conjuntura económica, existe uma maior procura e exigência na engenharia civil no que diz respeito a novas soluções, tanto a nível material como a nível de métodos construtivos, métodos estes que se querem mais rápidos, com um melhor desempenho estrutural, englobando materiais inovadores e conduzindo a estruturas otimizadas e sustentáveis.

O aço, com as suas características intrínsecas, surge como um material de futuro, que possibilita obter uma maior eficiência estrutural com secções cada vez mais esbeltas, tendo ainda a vantagem de ser um material amigo do ambiente. Bertrand Lemoine , diretor da *Arcelor Building & Construction Suport*, refere-se ao aço como um material que se enquadra na perfeição no conceito de desenvolvimento sustentável. O facto de ser infinitamente reciclável, sem perder nenhuma das suas propriedades, é o principal fator de destaque que o este material apresenta para ser considerado sustentável sendo que, neste momento, 40% da sua produção mundial é obtida da reciclagem, tendo este valor tendência a aumentar (Lemoine, B. 2006).

A sustentabilidade está na agenda dos mais importantes organismos mundiais, os quais têm promovido a consciência ambiental dos diversos agentes para a sua implementação, e para os quais "a indústria do aço tem tentado tomar a liderança no que diz respeito à minimização de impactos ambientais associados à produção do aço" (Silva e Gervásio, 2005).

"A construção sustentável implica a adoção dos princípios do desenvolvimento sustentável ao ciclo global de construção" (Silva e Gervásio, 2005). No contexto de comunicação da economia da comissão Europeia sobre a competitividade da indústria da construção, *Communication from the European commission: "The competitiveness of the construction Industry" COM (97) 539, 1997*, "...os principais aspetos da sustentabilidade que afetam a industria da construção foram identificados como sendo os seguintes: i) materiais de

construção amigos do ambiente, ii) eficiência energética em edifícios e iii) gestão de desperdícios da construção e/ou demolição".

A CoolHaven-Habitacões Modulares Eco-Sustentáveis, S.A. é uma empresa portuguesa, fundada em 2009, "que incide essencialmente na investigação e desenvolvimento de diversas áreas da Engenharia e Arquitetura" (CoolHaven, 2013) e que vem responder a todas estas exigências, com uma nova filosofia de construção inovadora, recorrendo a um novo conceito de construção modular, em que o grande passo no que diz respeito à inovação é o método construtivo, "onde os vários componentes se interligam quase como um jogo de legos", o que "potencializa a formação de qualquer tipologia, sendo possível adaptar o sistema a um projeto já existente ou criar um novo ao gosto do cliente" (CoolHaven, 2013).

A CoolHaven, através do seu novo método construtivo, pretende impulsionar o mercado habitacional, com habitações eco sustentáveis, que tiram partido das energias renováveis, (da energia solar e da inércia térmica do solo), aproveitando a água da chuva e fazem o tratamento das águas residuais domésticas, adaptando-se assim aos novos requisitos de economia e sustentabilidade.

A utilização de perfis de aço enformado a frio apresenta vantagens que permitem à CoolHaven apresentar as seguintes características para o seu método construtivo: "i) capacidade de mudança, ii) flexibilidade e adaptabilidade, iii) modularidade, iv) estética, v) custo fixo à partida sem alterações posteriores, vi) desempenho funcional, vii) industrialização e pré-fabricação, viii) reciclagem e reutilização, ix) segurança sísmica".

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo a elaboração e análise de um modelo de cálculo representativo de um painel de parede constituído por perfis de aço enformado a frio, de uma das soluções propostas pela CoolHaven.

As ligações existentes no painel têm um papel preponderante no comportamento do mesmo, surgindo daí o objetivo do estudo destas de forma a perceber o seu funcionamento para determinar a respetiva rigidez com vista à sua otimização. A presente dissertação envolve o desenvolvimento de modelos capazes de simular a sua geometria, utilizando o programa de cálculo *Abaqus*, que permite uma liberdade de criação apreciável com uma capacidade de cálculo bastante evoluída. De modo a aferir a veracidade dos resultados obtidos nos modelos numéricos, ou seja, de forma a calibrar os mesmos, foram realizados diversos ensaios das ligações entre perfis do tipo "C".

Outro objetivo é modelação do painel de parede com e sem excentricidades, comparando os respetivos comportamentos para os mesmos casos de carga.

Como objetivos secundários existe o interesse em apresentar, explicar e caracterizar os painéis de parede, especificando os materiais que os constituem, assim como as suas características.

Assim sendo, com esta dissertação, pretende-se estudar a resistência mecânica do painel de parede e suas ligações, de forma a proceder à sua análise quando são aplicadas cargas horizontais e verticais no seu plano, verificando os deslocamentos e a sua resistência.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A presente Dissertação desenvolve-se ao longo de seis capítulos, incluindo o capítulo presente, Capítulo 1, de carácter introdutório, cuja pretensão é a de descrever e enquadrar de forma sucinta o trabalho desenvolvido. Os demais capítulos são:

Capítulo 2: Estado da Arte - Neste capítulo percorrem-se as bases teóricas necessárias à compreensão e ao fundamento do estudo presentemente desenvolvido, ao passo que também são citadas ideias decorrentes de alguns estudos conduzidos por diversos autores nesta área específica.

Capítulo 3: Análise Experimental das Ligações - O presente capítulo refere-se à parte experimental do trabalho. É feita uma descrição dos diversos passos executados para a preparação dos provetes assim como são explicados os ensaios realizados referentes à ligação em causa.

Capítulo 4: Análise Numérica do Comportamento da Ligação - Nesta etapa é efetuada uma leve introdução relativa à ferramenta computacional usada assim como se procede a uma explicação detalhada da modelação dos modelos numéricos bem como à sua calibração, efetuando-se no final uma análise de resultados.

Capítulo 5: Análise de Numérica do Comportamento de Modelos Estruturais - A este capítulo cabe a apresentação e modelação numérica dos diversos modelos representativos do painel de parede bem como a análise e discussão dos resultados obtidos a partir dos mesmos, comparando-os entre si, de forma a delinear uma estratégia de otimização.

Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos Futuros - Apresentam-se as principais conclusões a reter do estudo realizado ao longo desta dissertação, com forte incidência naquelas proporcionadas

pela análise dos resultados realizada no capítulo anterior. Neste capítulo são ainda sugeridos alguns temas de estudo para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 7: Referências bibliográficas - No presente capítulo faz-se referência a todas as obras consultadas durante a execução desta dissertação.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Aço Enformado a Frio

#### 2.1.1. Considerações introdutórias

Na Engenharia Civil existem inúmeros tipos de perfis de aço. Estes por sua vez podem ser divididos em três grupos: i) perfis laminados a quente, ii) perfis soldados e iii) perfis laminados a frio.

No que diz respeito aos perfis laminados a frio, estes são obtidos a partir da dobragem de chapas de aço, com espessuras reduzidas, à temperatura ambiente. Resultado da sua esbelteza, têm um peso reduzido, daí a designação de aço leve, (*Light Steel Framing*, na terminologia anglo-saxónica).

A primeira publicação registada sobre o aço enformado a frio data de 1845, e dava conta de um trabalho efetuado por Bryan, que realizou um estudo de uma chapa fina quadrada sujeita a esforços de compressão (Chou e Rhodes, 1995).

O aço leve começou a ser utilizado na indústria automóvel, onde se assistiu ao desenvolvimento de tecnologias específicas para produzir componentes de aço enformado a frio com fins estruturais. Também a indústria aeronáutica, condicionada pela necessidade e importância de obter estruturas simultaneamente leves e resistentes, constitui um domínio privilegiado para a utilização de chapas com espessuras muito pequenas (Walker, 1975).

Neste sentido, os projetistas, ligados à área da Engenharia Civil, perceberam as potencialidades deste tipo de aço e começaram assim a estudar o aço enformado a frio, com a finalidade de criar estruturas apenas constituídas por este tipo de material.

O aço leve foi utilizado na construção civil pela primeira vez em 1850 nos Estados Unidos da América e no Reino Unido (Yu, 2010). Ao longo dos anos foram realizados vários estudos com o objetivo de conhecer melhor o comportamento deste material. O desenvolvimento, quer de ensaios experimentais, quer de métodos analíticos, permitiu analisar a encurvadura dos elementos comprimidos.

---

Assim, em 1930, Schuman e Back verificaram através de ensaios experimentais, nos quais fizeram variar a largura das chapas testadas, que o aumento desta largura não se traduzia num aumento da resistência. Ao constatarem este facto, concluíram que apenas uma parte da secção transversal do perfil tinha um comportamento eficaz. Pouco tempo mais tarde, Von Kárman aprofundou este tema criando o conceito de largura efetiva, que refere que, de uma forma geral, apenas uma parte da secção transversal contribui para a resistência a esforços de compressão (Chou e Rhodes, 1995).

Apenas a partir de 1940 os perfis de aço enformados a frio são aplicados em edifícios com um carácter mais sistemático (Veríssimo, 2008). Este facto coincide com a publicação feita em 1946 pela *AISI, American Iron and Steel Institute*, acerca das primeiras disposições regulamentares relativas ao comportamento deste tipo de elementos, que tiveram como base o trabalho de investigação desenvolvido pelo professor *Winter* na Universidade de Cornell, desde 1934.

Nas últimas décadas, a construção com estruturas de aço leve tem vindo a tornar-se numa solução competitiva em relação à construção mais tradicional em países como os Estados Unidos da América, Canadá e Austrália (Veríssimo, 2008). Na Europa, só agora se começam a utilizar perfis de aço enformado a frio como elemento estrutural, uma vez que anteriormente apenas se usavam perfis de aço leve em madres para suporte de revestimento de fachadas ou coberturas.

Os perfis de aço enformados a frio requerem uma aplicação mais cuidada, uma vez que o seu comportamento estrutural é de elevada complexidade, o que se traduz num cálculo analítico exigente, "...pois o dimensionamento de estruturas metálicas constituídas por perfis enformados a frio obriga à consideração de fenómenos de encurvadura local da secção, distorção de secção transversal e encurvadura global."(Silva et. al, 2003).

Estes perfis são caracterizados, principalmente, pela elevada esbelteza das suas secções transversais, que são constituídas por chapa de espessura reduzida. "Esta esbelteza elevada provoca potencialmente fenómenos de distorção da secção transversal, para além dos fenómenos de encurvadura local da secção e encurvadura global tradicionalmente presentes e tratados regularmente para secções laminadas a quente." (Silva et. al, 2003).

A crescente utilização deste tipo de perfis levou à elaboração de uma parte específica do Eurocódigo 3, a parte 1.3, que se refere ao dimensionamento de perfis enformados a frio.

O dimensionamento de perfis de aço enformados a frio com base no EC3 impõe várias restrições quanto á geometria da secção transversal, uma vez que os métodos de

dimensionamento referidos na norma foram calibrados com base em ensaios sobre secções correntes. Este tipo de limitações contraria uma das vantagens da utilização de perfis de aço enformado a frio, que é a possibilidade de existir uma grande variedade de secções transversais. "As restrições abrangem a espessura da chapa, o raio de curvatura e a esbelteza das almas, banzos e reforços." (Vieira, 2013). Caso não se verifiquem todos os requisitos referidos no EC3 parte 1.3, preconiza-se a verificação de segurança com base em ensaios experimentais ou através de análises numéricas que tenham em conta todos os fenómenos de natureza não linear. (Vieira, 2013).

Apesar de atualmente, as investigações sobre esta temática terem resultado em várias publicações de referência, a regulamentação que vigora é ainda algo conservadora, podendo-se destacar as normas Americana, Australiana/ Neo Zelandeza e a Europeia (EN 1993-1-3). As normas Americana e Australiana/ Neo Zelandeza, permitem o cálculo da resistência das secções através do Método da Resistência Directa, que considera a secção transversal como um todo. A norma europeia baseia-se no conceito da área efetiva reduzida.

### 2.1.2. Métodos de fabricação

Existem inúmeros perfis de aço enformados a frio, como ilustra a Figura 2.1. Existe também no mercado os designados painéis de chapa e as chapas perfiladas representadas na Figura 2.2. Ambos os grupos de elementos de aço leve são obtidos através de chapas de aço, que apresentam espessuras entre 1.0 e 5.0 mm, mas que podem chegar a 0.5 mm, em perfis, caso se esteja na presença de um aço de alta resistência (Yu, 2010).

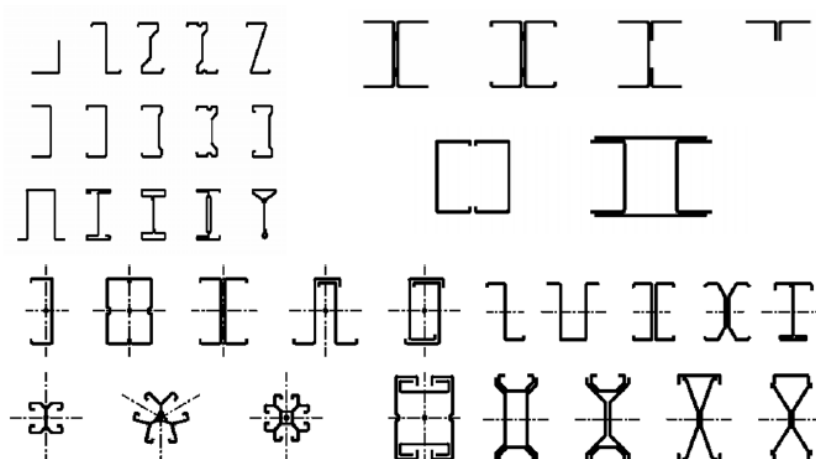


Figura 2.1 - Perfis de aço enformados a frio (Veríssimo, 2008).



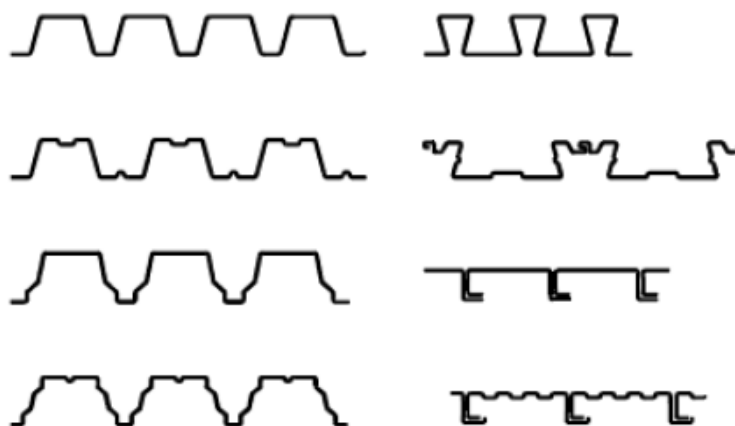


Figura 2.2 - Painéis de chapa e chapas perfiladas de aço enformados a frio (Veríssimo, 2008).

As diversas formas da secção transversal visam responder a requisitos específicos de uma determinada aplicação. Neste sentido estas têm de suportar de uma forma eficiente as cargas que lhe serão aplicadas.

Os tipos de perfis mais frequentemente utilizados assumem uma geometria em C, U, Z, mas existem também outros perfis menos comuns, ou seja, perfis que apresentam uma geometria mais complexa, mas que têm a vantagem de apresentar uma melhor eficiência do ponto de vista estrutural.

Existem dois processos de fabricação que tiram partido da ductilidade do aço e são essencialmente mecânicos, através dos quais se obtêm as geometrias pretendidas para a secção transversal de um determinado perfil. Estes processos designam-se por laminagem a frio ("*Cold Rolling*"), representado na Figura 2.3, e quinagem ("*Press Braking*") representado na Figura.2.4.



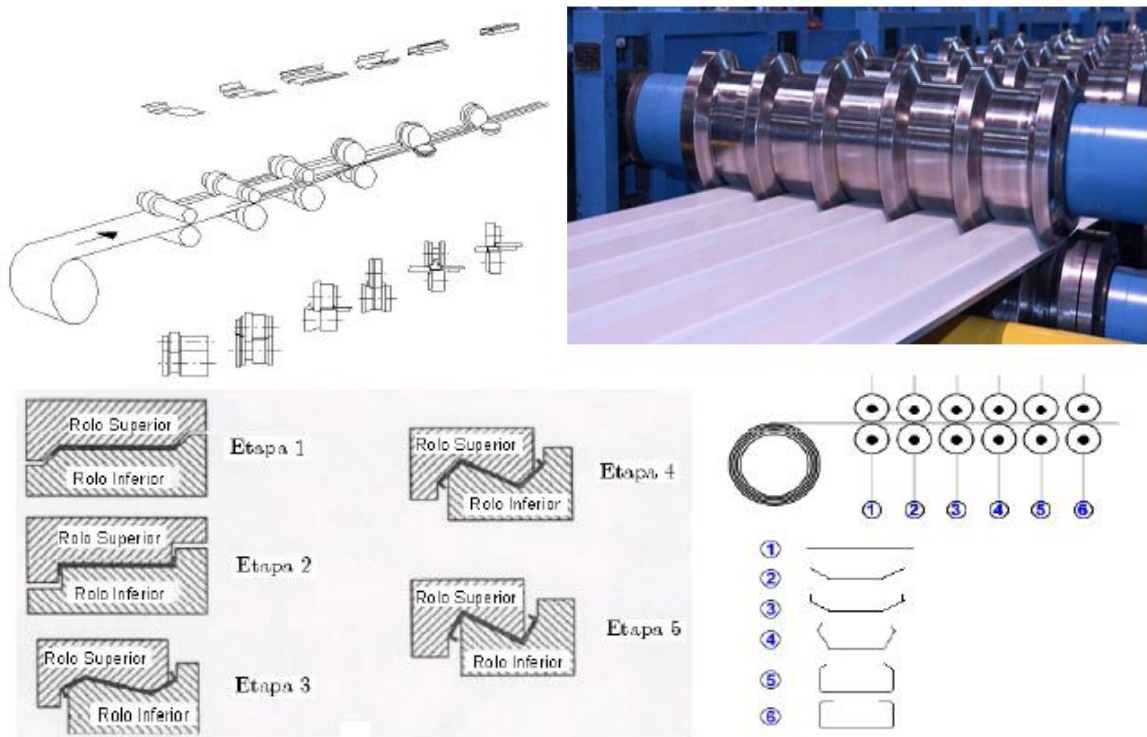


Figura 2.3 - Laminagem a frio ("Cold Rolling") (Silvestre, 2012).

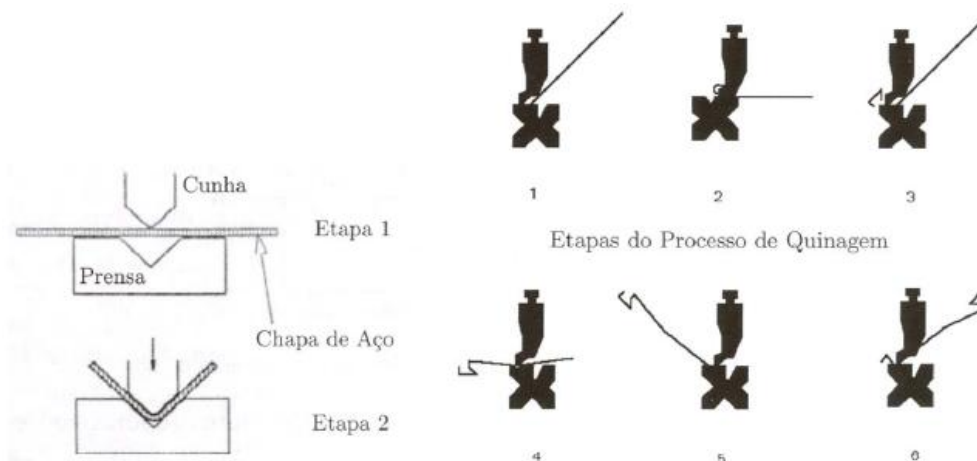


Figura 2.4 - Quinagem ("Press braking") (Veríssimo, 2008).

A energia e o tempo despendido durante o processo de criar um determinado elemento de aço leve, depende naturalmente da forma da secção, espessura da chapa e das características do aço.

Por sua vez os processos de fabrico alteram as propriedades mecânicas do aço de forma significativa, levando ao seu endurecimento. Particularmente nas zonas das dobragens a

resistência da secção é melhorada com um aumento na tensão de cedência e da tensão última do aço, mas tem um decréscimo na ductilidade, que se traduz no acréscimo da extensão de rotura do aço (Silvestre e Camotim,2006). Estes fenómenos são provocados pela dobragem da chapa, que induz tensões residuais que melhoram quantitativamente a resistência.

A laminagem a frio é um processo de fabrico que se utiliza quando é necessário um elevado número de perfis com uma determinada secção transversal. O processo consiste em dobrar a chapa do aço, já com a espessura definida, de forma gradual aquando da sua passagem por vários rolos compressores dispostos em série, os quais se designam por perfiladoras, ganhando assim o perfil a geometria desejada. Ao adicionar ou retirar rolos da perfiladora, dispendo-os de diversas maneiras, consegue-se obter inúmeras variedades de secções transversais. Naturalmente o número de pares de rolos sucessivos depende da complexidade pretendida.

Por sua vez o processo de dobragem ou quinagem é utilizado quando é necessário um número reduzido de perfis com determinada secção e de comprimento limitado a 6 metros (Silvestre e Camotim, 2006). O processo consiste em comprimir a chapa entre uma superfície convexa e uma superfície côncava, formando assim o ângulo de dobragem pretendido para os perfis.

Este processo é menos industrializado, não permitindo assim uma grande diversidade de secções transversais, normalmente produz secções mais simples, como é o caso de perfis com secções transversais em C, L, U e Z (Silvestre e Camotim, 2006).

### **2.1.3. Caracterização do aço**

Usualmente, os projetistas quando idealizam estruturas constituídas por perfis de aço enformados a frio, pensam em utilizar aço galvanizado, que apresenta uma tensão de cedência ( $f_y$ ) entre 220 a 500 N/mm<sup>2</sup> e 650 N/mm<sup>2</sup> quando se está na presença de aços de alta resistência. Já no que diz respeito às tensões últimas ( $f_u$ ) estas oscilam entre 300 a 720 N/mm<sup>2</sup>. A relação  $f_u/f_y$  varia entre 1.1 e 1.9, e a extensão máxima entre 10 a 15% (Silvestre e Camotim, 2006).

Como já foi referido anteriormente, independentemente do processo de fabrico utilizado, existe um acréscimo das tensões de cedência e tensões últimas, apesar de uma diminuição na ductilidade do aço, devido ao endurecimento que provoca alterações nas suas propriedades mecânicas. A Figura 2.5 ilustra a curva representativa do processo de endurecimento do aço.

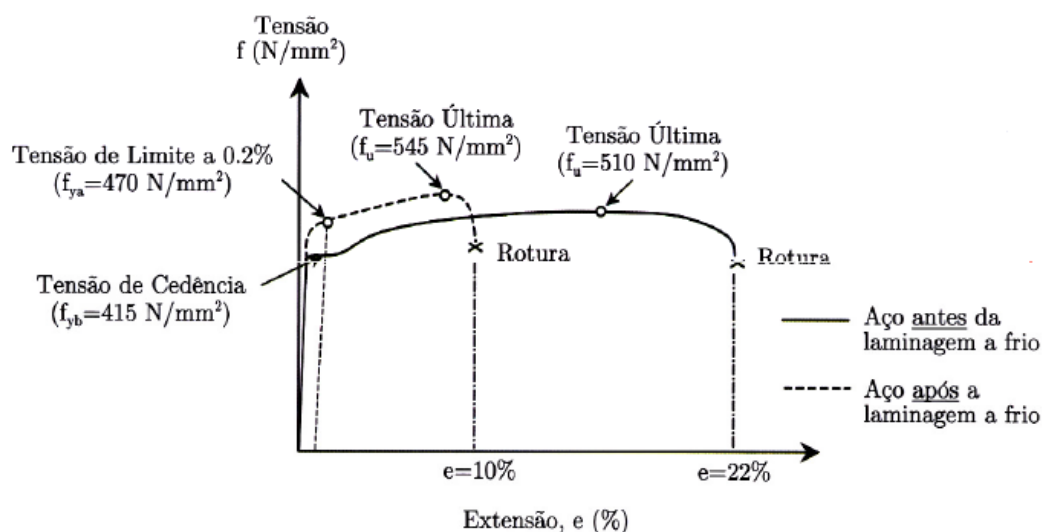


Figura 2.5 - Processo de endurecimento do aço (Silvestre, 2012).

#### 2.1.4. Vantagens e desvantagens na utilização de estruturas de aço enformado a frio

O aço enformado a frio exibe inúmeras vantagens na sua aplicação em comparação com o aço laminado a quente, nomeadamente a elevada eficiência estrutural, conseguindo-se uma elevada resistência com um peso reduzido, e a capacidade de otimização estrutural das secções, com a hipótese de utilizar uma grande variedade de secções transversais, o que possibilita empregar perfis com dimensões reduzidas para suportar cargas pequenas, de modo a não haver sobredimensionamento, como acontece com a utilização de aço laminado a quente, que tem dimensões mínimas padronizadas.

Uma vez que o fabrico é executado à temperatura ambiente, os perfis enformados a frio exibem menores tensões residuais em comparação com o aço laminado a quente, que exibe valores mais significativos.

Tratando-se do designado aço leve, como o próprio nome indica, apresenta um peso reduzido, em que algumas secções são produzidas com a possibilidade de encaixarem sucessivamente umas nas outras, permitindo uma maior economia no seu armazenamento e transporte. O baixo peso associado a uma pré-fabricação proporciona uma rápida montagem em obra, sem recurso a maquinaria pesada para o seu manuseamento.

A utilização do aço enformado a frio em conjunto com uma construção modular permite uma grande flexibilidade e mobilidade no que diz respeito à estrutura, uma vez que permite a mudança de partes da estrutura e até a deslocação da mesma (habitação) para outro local.

Sendo também um material reciclável, permite o seu reaproveitamento, sendo por isso considerado um material eco-eficiente.

Um mercado com potencial de desenvolvimento é o da reabilitação de estruturas antigas. Neste contexto, a aplicação de perfis de aço enformado a frio está em franca expansão, pois a sua utilização permite uma grande versatilidade e rapidez de construção (Silvestre e Camotim, 2006).

Inovação é uma palavra que caracteriza bem o domínio das estruturas de aço enformado a frio, pois permite novas configurações de secções transversais para os perfis, com a crescente procura para estruturas cada vez mais arrojadas e leves.

As características do aço enformado a frio descritas anteriormente permitem-lhe competir diretamente com outros materiais, tais como as estruturas de betão armado ou o aço laminado a quente, uma vez que as vantagens associadas, quer ao seu processo de fabrico, quer de aplicação, têm garantido a sua preferência em diversas aplicações.

No entanto, este tipo de aço apresenta alguns inconvenientes, de onde se destacam os fenómenos de instabilidade causados pela esbelteza das chapas que constituem as paredes de perfil. Existe a possibilidade de colapso por esmagamento da alma, principalmente quando se está na presença de cargas concentradas, devido mais uma vez à elevada esbelteza das almas e a uma difícil aplicação de reforços transversais. Tratando-se de secções abertas de paredes finas, existe uma grande deformabilidade por torção, o designado empenamento, devido à baixa rigidez e aos centros de gravidade e de corte das secções não serem coincidentes.

A opção de aplicar, em modelos estruturais, perfis em que a secção transversal apresenta esbeltezas significativas (elevadas), possibilita um dimensionamento otimizado, "apesar de eventuais limitações quanto à tensão máxima de dimensionamento a utilizar..." assim como à necessidade de adotar reforços transversais ou longitudinais, nas almas ou nos banzos (Silva e Gervásio, 2007).

Usualmente, as secções transversais de perfis enformados a frio estão dentro do domínio das secções de classe 4, apresentando estas uma complexidade extra em relação a secções transversais de classes superiores (1 a 3), "...uma vez que ocorre a encurvadura local da secção antes de se atingir a tensão de cedência do aço em mais pontos da secção (EN3-1-1, cláusula 5.5.2(1)), torna-se necessário determinar, direta ou indiretamente, a resistência à encurvadura local." (Silva e Gervásio, 2007).

---

Neste sentido, para um correto dimensionamento de estruturas de aço enformado a frio, é necessário perceber o seu comportamento estrutural, sendo este caracterizado por diversos fenómenos de instabilidade, leva a que o dimensionamento seja de elevada complexidade, com o cálculo da resistência de secções dos perfis a necessitar de um elevado esforço computacional.

Uma outra desvantagem, já referida anteriormente é que o endurecimento do aço, subjacente ao seu processo de fabrico, conduz a uma diminuição da ductilidade, apesar de aumentar a tensão de cedência.

### **2.1.5. Construção modular**

A construção modular, como o próprio nome indica, é um tipo de construção efetuada por módulos, que tem como grande vantagem tirar partido de todas as potencialidades do aço enformado a frio, elencadas anteriormente. Tem como principal objetivo permitir uma construção personalizada e faseada ao longo do tempo, possibilitando acrescentar ou retirar divisões com relativa facilidade, onde a articulação entre painéis de parede ou de cobertura facilita a expansão ou diminuição de volume e espaço edificado, indo de encontro às necessidades das famílias.

Neste tipo de construção, a criação dos vários elementos que compõem a estrutura é executada em fábrica, o que permite a sua pré-fabricação. Posteriormente procede-se à sua montagem em obra, contribuindo para uma redução de ocorrência de erros e consequentes defeitos na construção.

Com a execução da construção modular consegue-se uma otimização dos prazos de construção, sendo estes bastante inferiores aos praticados quando se utiliza a construção tradicional, em que se empregam estruturas de betão ou alvenaria.

## **2.2. Comportamento Estrutural**

O comportamento estrutural dos perfis de aço enformados a frio, devido à sua elevada esbelteza, são normalmente de classe 4, de acordo com o Eurocódigo 3 parte 1.3. Torna-se necessário o cálculo da secção efetiva aquando do seu dimensionamento e estes, por sua vez, são bastante sensíveis a fenómenos de instabilidade. Estes podem ser local, global e local, tornando o seu estudo fundamental para perceber o comportamento estrutural dos perfis quando estes são solicitados por ações que lhes induzem esforços de compressão, uma vez que o colapso destes perfis resulta, essencialmente, da combinação de fenómenos de instabilidade e plasticidade (Reis e Camotim, 2001).

Na estabilidade global (por flexão, torção ou flexão-torção) apenas o eixo de perfil se deforma, ou seja, "as secções transversais sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido". A instabilidade local caracteriza-se pelo facto de as secções se deformarem nos seus próprios planos, permanecendo o eixo de perfil inalterado. Por sua vez, a instabilidade local "engloba dois modos com características distintas: i) modelos locais de placa (flexão das paredes, sem deslocamento dos bordos longitudinais internos) e ii) modos distorcionais (flexão das paredes, com deslocamentos significativos de um ou mais bordos longitudinais internos) (Fena, 2011).

Outros fenómenos que condicionam o comportamento estrutural dos perfis de aço enformado a frio são: i) elevada deformabilidade à torção (devido à baixa rigidez de torção, pois o centro de corte não coincide com o centro de gravidade); ii) empenamento (quando sujeitos a torção, onde o tipo de condições de fronteira do perfil têm uma grande influência na sua resistência mecânica); iii) existência de reforços (os quais permitem melhorar o comportamento estrutural das secções, limitando a sua suscetibilidade à deformação local); iv) endurecimento do aço (junto dos bordos longitudinais na zona de dobragem da chapa); v) colapso da alma (nas secções onde são aplicadas forças concentradas ou nas zonas de apoio); vi) tipo de ligações (Solvestre e Camotim, 2006).

Está provado, com diversos estudos de autores de referência ( Camotim, Prola e Silvestre), que os perfis de aço enformados a frio exibem comportamentos de pós-encurvadura local-de-placa e global estáveis, com diferenças distintas no acréscimo de resistência pós-crítica, algo significativa no primeiro caso e muito reduzida no segundo. Por outro lado, o comportamento de pós-encurvadura distorcional "i) situa-se entre os dois anteriores (em termos cinemáticos e de resistência) e ii) exhibe uma aximetria significativa em relação ao sentido do movimento dos banzos (abertura ou fecho das secções do perfil)", como demonstram os trabalhos realizados por Prola e Camotim e Camotim e Silvestre.

### **2.2.1. Estabilidade estrutural**

O conceito de estabilidade estrutural está efetivamente relacionado com a capacidade de uma estrutura conseguir estabelecer uma configuração de equilíbrio após sofrer uma perturbação causada por uma força ou deslocamento. O comportamento da estrutura, após a solicitação, permite avaliar a estabilidade da sua configuração de equilíbrio.

Caso a estrutura retorne à configuração inicial, diz-se que a estrutura apresenta equilíbrio estável. Caso contrário, se a estrutura não retornar à sua configuração inicial, diz-se que apresenta um equilíbrio instável. Pode-se assim dizer que a estrutura apresenta um

comportamento neutro caso se mantenha na posição inicial, independentemente da ação (Reis e Camotim, 2001).

Reis e Camotim (2001) explicaram estes conceitos recorrendo a uma analogia com o problema de uma “esfera rígida submetida à ação do seu peso próprio e em repouso”, como ilustra a Figura 2.6.

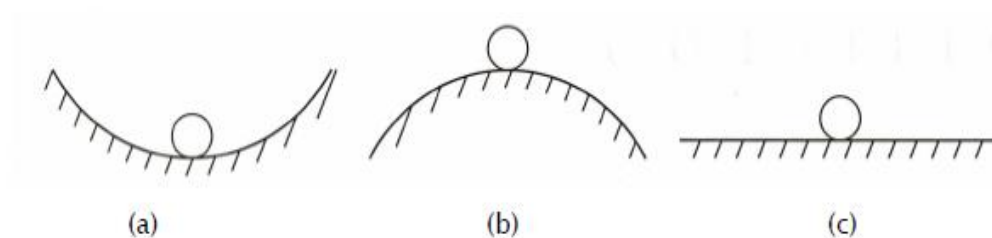


Figura 2.6 - Estabilidade do equilíbrio (Silvestre e Camotim, 2006).

- a. Superfície côncava: equilíbrio estável;
- b. Superfície convexa: equilíbrio instável;
- c. Superfície horizontal: equilíbrio neutro.

O estudo da estabilidade apenas faz sentido em situações em que há tensões de compressão.

### 2.2.2. Instabilidade estrutural

A instabilidade de uma estrutura que vai sendo progressivamente carregada, corresponde à transição entre as configurações de equilíbrio estável e instável. Ao ser carregada, a estrutura numa fase inicial vai progredir ao longo de uma trajetória de equilíbrio, que representa a relação carga/deslocamento, até ser atingida a "carga crítica", a partir da qual passa a uma configuração de equilíbrio instável, que pode acontecer de duas formas distintas: instabilidade bifurcacional ou instabilidade por ponto limite, como demonstra a Figura 2.7 e 2.8, respetivamente.



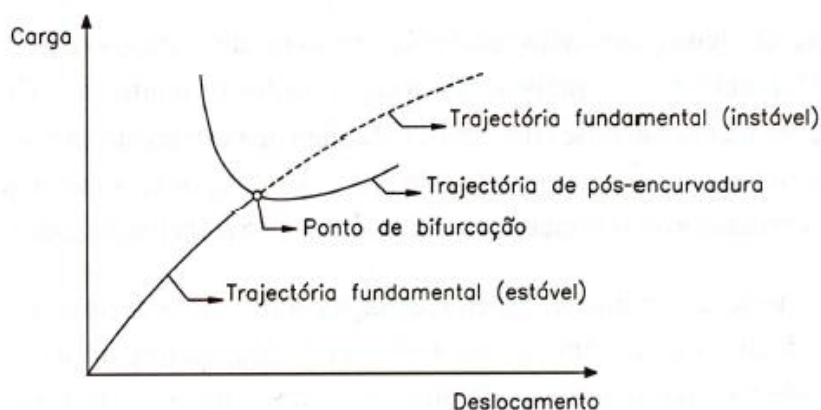


Figura 2.7 - Trajetória de equilíbrio associada a instabilidade bifurcacional, (Silvestre e Camotim, 2006).

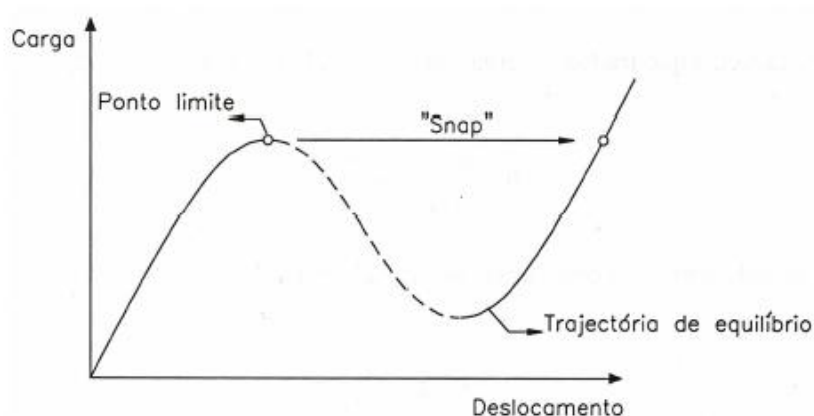


Figura 2.8 - Trajetória de equilíbrio associada a instabilidade por "snap-through", (Silvestre e Camotim, 2006).

Estando os elementos em estudo apenas sujeitos a instabilidade bifurcacional, apenas esta será aqui descrita. Como se demonstra pela Figura 2.7, um perfil sujeito a uma carga de compressão crescente, apresenta uma configuração inicial de deformação pré-encurvadura, designada trajetória fundamental.

Essa trajetória inicia-se na origem do diagrama carga/deslocamento e pode apresentar um comportamento linear ou não linear. Quando é atingida a carga crítica a deformação altera-se subitamente, ou seja, a relação carga/deslocamento passa a exibir um comportamento diferente. A essa relação carga/deslocamento chama-se "ponto de bifurcação", uma vez que o modo de encurvadura pós-crítico apresenta uma bifurcação, passando a exibir duas trajetórias possíveis no diagrama carga/deslocamento pós-crítico.

De referir que o diagrama carga/deslocamento foi deduzido sem ter em consideração as imperfeições iniciais, tratando-se de uma estrutura "idealizada". Em estruturas reais não existe bifurcação "e a aproximação das trajetórias de equilíbrio às da estrutura perfeita (fundamental e pós-encurvadura) é tanto maior quanto menor for a amplitude da imperfeição" (Silvestre e Camotim, 2006).

Uma Análise Linear da Estabilidade (ALE) de um problema deste género implica a determinação das coordenadas onde ocorre o ponto de bifurcação e do modo de instabilidade que corresponde à estrutura quando ocorre a bifurcação. As propriedades da trajetória de pós-encurvadura obtêm-se através de uma Análise Não Linear de Estabilidade (ANLE), (Pinto, 2010)

Os diversos casos da coluna de Euler e das placas comprimidas axialmente são um exemplo de problema de instabilidade bifurcacional.

### **2.3. Estudo do Comportamento de Painéis de Aço Enformado a Frio.**

Recentemente, autores de referência (Fulop e Dubina, 2004) têm efetuado inúmeros estudos para diferentes configurações de painéis utilizando perfis de aço enformados a frio. Publicaram alguns artigos sobre o seu comportamento, bem como o comportamento das suas ligações, que são parte fundamental na resistência dos painéis, utilizando vários tipos de parafusos. Muitos dos autores testaram painéis bastante semelhantes ao que irá ser testado no presente estudo, através de uma análise numérica.

Muitos dos estudos efetuados incidiram sobre a capacidade resistente das estruturas a cargas horizontais, com o intuito de perceber o comportamento destas a cargas dinâmicas, simulando as forças sísmicas, ao realizarem ensaios cíclicos e monotónicos.

Dubina e Fulop, (2004), realizaram diversos ensaios em que aplicaram cargas horizontais a um painel parede de aço leve, com o objetivo de observar os deslocamentos no topo do painel.

Dentro do mesmo estudo, os autores aplicaram diversos tipos de revestimentos ao painel, uma vez que o estudo insidia em avaliar a resistência do painel a cargas dinâmicas, com os revestimentos a terem um papel preponderante nesta temática (Fulop e Dubina, 2004).

No estudo, constataram que quando o revestimento OSB é aplicado em diversas placas individuais, estas têm tendência para rodar como corpo rígido, contribuindo de forma pouco significativa para a resistência do painel. Este fenómeno obriga a que as ligações OSB-membros do painel sejam as responsáveis por compatibilizar os deslocamentos.

Fulop e Dubina publicaram, em 2006, mais um estudo em que o objetivo era perceber o comportamento do revestimento com OSB e suas ligações. "Concluíram assim que a capacidade de carga e de deformabilidade conferida pelos revestimentos advém principalmente das suas ligações á estrutura e que estas são também as grandes responsáveis pela variação da deformação devido à sua não linearidade". Devido à pequena homogeneidade das ligações o estudo revela-se inconclusivo, uma vez que, "a baixa ductilidade da ligação é responsável pela pequena ductilidade que se observa nas cedências deste tipo de painéis."(Fulop e Dubina, 2006).

Eray e Cagatay, publicaram em um artigo em 2012, sobre um estudo do comportamento de painéis constituídos por perfis de aço enformados a frio. Painéis esses bastante idênticos aos utilizados no presente trabalho. Os autores efetuaram bastantes testes ao painel com o objetivo de estudar o seu comportamento aquando da aplicação de uma carga pontual horizontal aplicada no topo do mesmo, fazendo variar de ensaio para ensaio as espessura do revestimento OSB, o espaçamento entre parafusos que fixam o OSB aos elementos do painel assim como a existência ou não de elementos de contraventamento.

Avaliaram que o comportamento (deslocamentos) é controlado pela espessura do revestimento e espaçamento entre parafusos e não pela incorporação de contraventamentos, uma vez que apresentaram deslocamentos, no topo do painel, sensivelmente iguais quando se tem revestimento OSB e sem elementos diagonais (contraventamentos), tendo registado uma resistência bem menor quando o painel não tem revestimentos, apesar de ter contraventamentos.

Verificaram que os painéis sofreram encurvadura local na base do mesmo e na zona intermédia onde se encontra a ligação do montante com o elemento de contraventamento. O painel com revestimento apresenta grandes deformações na base (apoios), deixando sinais que na zona de apoio é necessário utilizar perfis com maior espessura.

Concluíram que quanto maior a espessura do revestimento OSB e quanto menor o espaçamento entre parafusos que liga o revestimento ao painel, maior será a resistência do painel, levando a um melhor comportamento do mesmo.

### **3. ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS LIGAÇÕES**

#### **3.1. Introdução**

O presente capítulo descreve os ensaios laboratoriais efetuados para dar suporte ao estudo desenvolvido nesta dissertação. Uma vez que, através dos ensaios, consegue-se extrair informação essencial para a compreensão do comportamento da ligação em estudo e, por outro lado, fornecem dados para a calibração dos modelos numéricos, os quais permitirão um estudo mais aprofundado e uma melhor caracterização do comportamento da ligação em causa.

Neste sentido, torna-se indispensável a realização de ensaios experimentais para que se possam calibrar os modelos numéricos, de forma a que estes se assemelhem o mais possível à realidade.

#### **3.2. Ligações**

Um dos parâmetros com lugar de destaque na análise do comportamento estrutural de painéis parede constituídos por perfis de aço enformados a frio é a ligação dos mesmos entre si. Esta apresenta características bastante diferentes das que são utilizadas para o aço laminado a quente, com o comportamento caracterizado pela pequena resistência das chapas dos perfis.

Este tipo de ligações são efetuadas por parafusos de pequena dimensão, normalmente do tipo auto-perfurantes com o objetivo de reduzir o efeito de esmagamento que estes fazem na chapas dos perfis, que por sua vez são de espessura reduzida. É de referir também que neste tipo de painéis a ligação é bastante solicitada a esforços de corte.

Qualquer que seja o modelo estrutural, o seu comportamento, no que diz respeito à deformabilidade e resistência, é fortemente condicionado pelas suas ligações, uma vez que são estas as responsáveis pela transmissão de esforços entre elementos, assim como aos apoios. Neste sentido existe o interesse em determinar a curva força-deslocamento das ligações, evidenciando a carga máxima admissível.

Embora as ligações, em estruturas metálicas, possam ser soldadas, estas não são aconselháveis para o tipo de construção visada neste estudo, por estas necessitarem de um grande controlo de qualidade, de técnicos especializados e não permitem a desmontagem da obra de uma

forma simples. As ligações aparafusadas são as recomendáveis, tanto do ponto de vista económico como de eficiência, pois permitem uma fácil e rápida aplicação em obra.

Com base em ensaios experimentais verificou-se que, tipicamente, ocorrem quatro modos de rotura nas ligações aparafusadas de enformados a frio. São estes: "i) corte longitudinal da chapa ao longo de duas linhas paralelas, ii) esmagamento ou enrugamento do material na frente do parafuso, iii) rotura da chapa à tração e iv) corte do parafuso" (Silva e Tiago, 2003).

Em consonância com resultados de estudos experimentais, foram desenvolvidas regras próprias para ligações em elementos enformados a frio, devido às seguintes razões: i) inclinação do parafuso no esmagamento do orifício, ii) rotação do parafuso em roturas por escorregamento ou iii) a grande distorção da chapa quando o parafuso está à tração e a chapa é solicitada diretamente em cima da cabeça do parafuso (Yu, 2010).

No que diz respeito à modelação das ligações, em software de análise numérica, estas podem ser modeladas, genericamente, através de uma mola tridimensional com seis graus de liberdade, que correspondem a três translações e três rotações. Neste sentido, ao considerar, na modelação, que a mola tem um comportamento não linear, naturalmente, tem de se realizar uma análise não linear "onde a curva momento rotação apresenta um comportamento inicialmente elástico, seguido por uma resposta plástica resultante da plastificação progressiva de algumas componentes" (Silva e Gervásio, 2007).

### **3.3. Programa Experimental**

Os ensaios referidos foram realizados no Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Estes têm como finalidade analisar o comportamento de uma ligação à tração, entre dois perfis de aço enformados a frio. Também foram ensaiados provetes de aço à tração, de modo a determinar corretamente as características do aço utilizado.

Os ensaios foram efetuados com o auxílio da prensa *SERVOSIS ME 402/20*, utilizando-se em conjunto com esta um aparelho de processamento de sinal, designado por *DataLogger*, cuja função é registar os dados medidos pelos extensómetros e defletómetros, para posteriormente se proceder à análise de resultados. A Figura 3.1 ilustra a prensa utilizada.



Figura 3.1 - Prensa Servosis ME 402/20.

Foram ensaiadas seis ligações (protótipos experimentais), sendo a única diferença o tipo de parafusos utilizados (*Fabory* e *SFSintec*) para efetuar a ligação entre os dois perfis do tipo "C". De notar que a ligação tem de permitir um encaixe perfeito entre perfis, uma fácil e rápida execução e garantir a transmissão de esforços entre elementos de uma forma eficaz. Com estes ensaios pretende-se avaliar a influência do tipo de parafusos no comportamento e resistência da ligação. Foram realizados seis ensaios, os quais são indicados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Plano de ensaios

Tipo de Parafusos	Ensaio
Fabory	FAB T1
	FAB T2
	FAB T3
SFSintec	SFS T1
	SFS T2
	SFS T3

### 3.4. Ensaio dos Protótipos de Aço Enformados a Frio

Na presente dissertação optou-se por utilizar um aço com tensão de cedência igual a 320 N/mm<sup>2</sup> e com uma tensão última de 390 N/mm<sup>2</sup>. As restantes características são as seguintes: densidade do aço igual a 77 kN/m<sup>3</sup>, modulo de Young igual a 210 N/mm<sup>2</sup>, coeficiente de Poisson igual a 0.3e e modulo de distorção igual a 81 N/mm<sup>2</sup>.

Apesar de se conhecerem as características nominais do aço, existe a necessidade de se conhecer com o maior rigor possível o tipo do aço com que são feitos os perfis utilizados no presente estudo. Devido ao processo de fabrico do aço enformado a frio, este apresenta algumas flutuações assinaláveis de tensão de cedência mesmo dentro do mesmo lote de chapa de aço, supostamente todo com as mesmas características. Assim sendo, foram ensaiados três provetes, segundo a norma EN 10002-1 de 2006, sendo que dois foram retirados do banzo de um perfil da ligação testada e um foi recolhido aleatoriamente do mesmo lote da chapa.

Em termos de velocidade de ensaio, a norma EN10002-2006 indica que, para a zona elástica e de início de cedência, a velocidade do ensaio deve estar limitada a 0.0025/s e para a zona plástica a 0.008/s. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento com velocidade de 0.01mm/seg em fase elástica, e de 0.1mm/seg em fase plástica.

Os provetes são planos, proporcionais e definidos segundo as indicações geométricas da norma EN10002-2006 [20 Cap. 2, 2006]. Desta forma é possível estabelecer uma comparação entre os valores encontrados no ensaio de tração e os valores nominais regulamentares e os valores dos documentos de certificação.

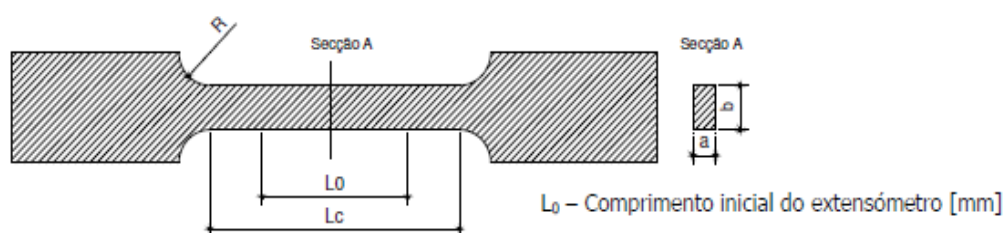


Figura 3.2 - Geometria tipo dos provetes de aço.

Com  $a=1\text{mm}$ ,  $b=20\text{mm}$ ,  $R=20\text{mm}$  e  $L_c=80\text{mm}$ .

Os provetes foram devidamente instrumentados com extensómetros elétricos com uma capacidade nominal máxima de 15% de extensão.

A Figura 3.3 ilustra os provetes de aço utilizados nos ensaios.

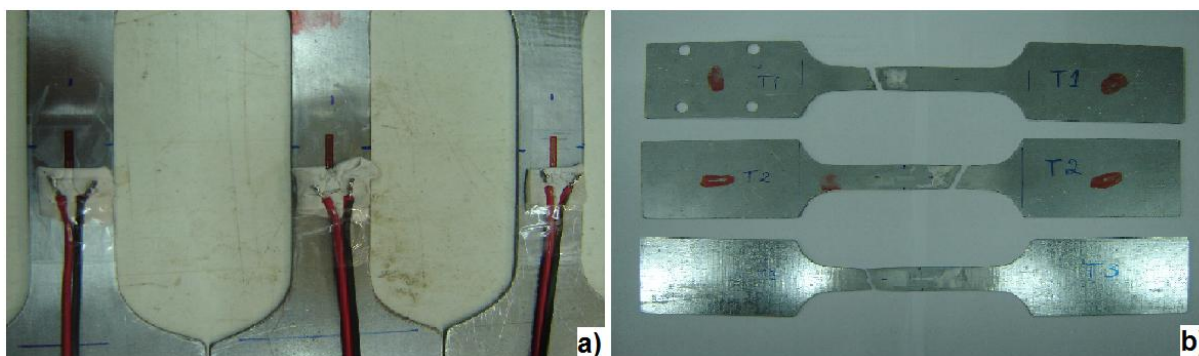


Figura 3.3 - Provetes de aço instrumentados (a) e provetes depois de ensaiados com a rotura em evidência (b).

Os ensaios dos provetes não correram como o previsto, pois devido à chapa de aço ensaiado ter apenas um milímetro de espessura, os instrumentos que tinham como função a leitura dos resultados durante o ensaio não se revelaram os mais adequados para o efeito, assim como a prensa utilizada. Pois esta aquando da colocação dos provetes na mesma provocava deformação nos provetes a ensaiar, chegando até a provocar a plastificação do aço em certas zonas do provete.

Outra dificuldade, deveu-se com a leitura dos resultados por parte do equipamento "datalogger", o qual não leu corretamente os valores das extensões instaladas nos provetes. Este erro deveu-se a um erro na introdução de um código específico do equipamento para o efeito deste estudo.

Assim sendo apenas se validou um ensaio. Assumindo-se assim a curva tensão-extensão do material exposta na Figura 3.4. Apesar de todas as condicionantes, estes resultados revelaram-se satisfatórios para a calibração do modelo.

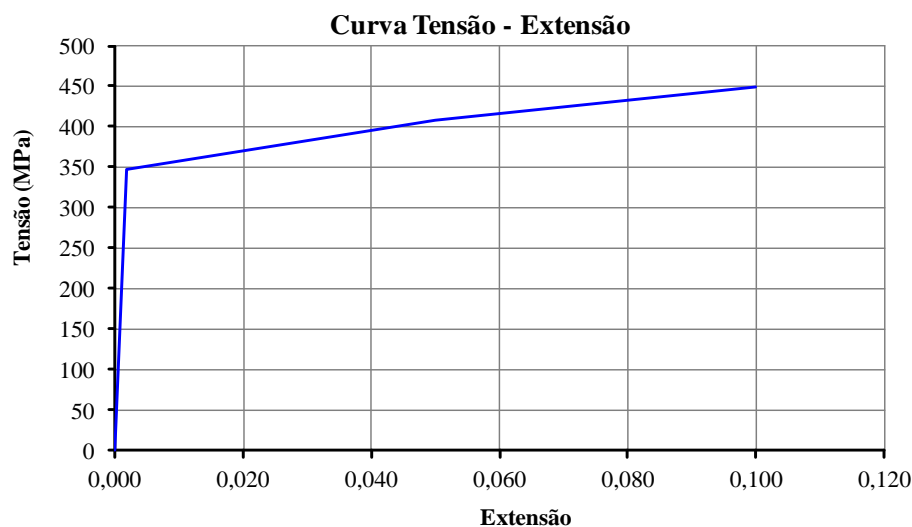


Figura 3.4 - Curva tensão-extensão do material utilizado.



### 3.5. Ensaio da Ligação

#### 3.5.1 Preparação dos protótipos experimentais

Os diversos protótipos experimentais foram preparados procurando, na medida do possível, recriar as características da ligação que se pretende adotar no painel parede criado pela empresa *CoolHaven*.

Como já foi referido anteriormente, a ligação é constituída por dois perfis de aço enformados a frio do tipo "C". Para efetuar a ligação utilizaram-se dois tipos de parafuso, com o objetivo de perceber a sua influência para o comportamento da mesma.

Os dois tipos de parafusos testados são apresentados de seguida.

Os parafusos SL3-F  $\varnothing$  4.2\*15, ilustrados na Figura 3.5, são parafusos auto-perfurantes produzidos pela *SFSintec*, vocacionados para ligações entre chapas de pequena espessura. Estes têm um comprimento de 15 mm e um diâmetro de 4.2 mm. Relativamente à sua aplicação, estes possuem um mecanismo, que através da ferramenta apropriada, permite a sua aplicação com a força de aperto adequada. Este tipo de parafusos tem a cabeça achatada, o que permite, posteriormente, uma melhor aplicação de revestimento sobre o painel parede em causa. Segundo o fabricante, estes apresentam uma resistência à tração de 6.730 kN e ao corte de 5.140 kN. Estando estes parafusos certificados. A Figura 3.4 ilustra um exemplar deste tipo de parafusos.



Figura 3.5 - Parafuso auto-perfurante *SFSintec*.

Relativamente aos parafusos ST  $\varnothing$  4.8\*13, estes são parafusos auto-perfurantes produzidos pela *Fabory*, também eles bastante usados para ligações entre chapas de pequena espessura. Possuem um comprimento de 13 mm e um diâmetro de 4.8 mm. Este apresenta uma cabeça do tipo *Phillips*, que permite uma fácil e rápida aplicação, mas sem controlo da força de aperto. Este tipo de parafuso já não é tão conveniente para aplicação de revestimento sobre o painel parede, por ter a cabeça maior e mais saliente em comparação com o parafuso referido anteriormente. Uma vez que este tipo de parafusos não são certificados, não existe a certeza

quanto à exatidão dos valores da sua resistência à tração e ao corte, pelo que não são apresentadas. A Figura 3.6 ilustra um exemplar deste tipo de parafusos.

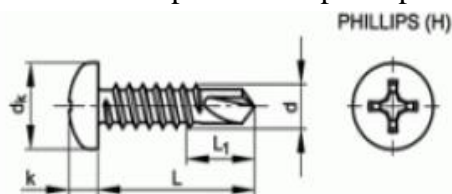


Figura 3.6 - Parafuso auto-perfurante *Fabory*.

De forma a ensaiar as ligações (protótipos experimentais), houve a necessidade de os preparar. Neste sentido foram adicionadas chapas de aço devidamente aparafusadas ao provete, utilizando naturalmente características superiores às que serão testadas para que a rotura nunca se dê por parte deste. As chapas referidas são chapas de ligação entre o provete e a prensa utilizada, como ilustra a Figura 3.7. Estas servem para a prensa através das suas "garras" fixar o provete de modo a conseguir provocar esforços de tração.

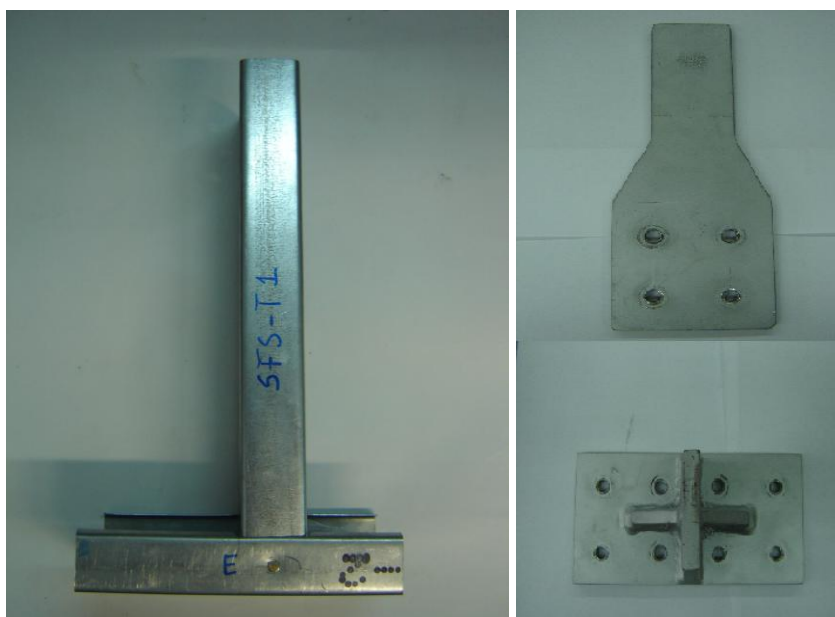


Figura 3.7 - Exemplo de um protótipo experimental e chapas auxiliares de ligação.

### 3.5.2 Geometria dos provetes

Relativamente à geometria dos provetes, estes apresentam as seguintes dimensões nominais demonstradas na Figura 3.8.

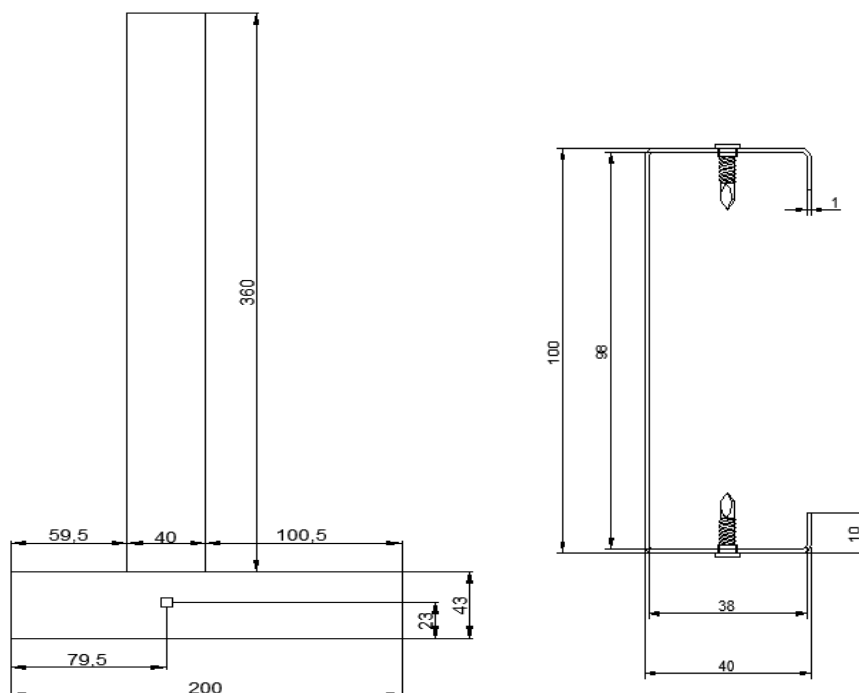


Figura 3.8 - Medidas nominais referentes aos modelos experimentais.

De notar que, existem pequenas diferenças (na ordem dos milímetros) entre as medidas nominais e as medidas reais que os modelos experimentais apresentam.

### 3.5.3 Montagem e instrumentação

Uma vez que o parâmetro que se pretende avaliar é a rigidez da ligação, e tendo a prensa utilizada um software auxiliar, através do qual se extrai um gráfico força-deslocamento, optou-se por colocar dois defletómetros mecânicos da marca TML com um comprimento inicial na ordem dos 25mm, para validar o gráfico obtido. Estes foram colocados do lado "interior e exterior" do perfil disposto na vertical, ou seja, do lado direito e esquerdo respetivamente do modelo experimental, o mais centrados na medida do possível, afim de registar a deformação da ligação consoante a força exercida pela prensa hidráulica. A Figura 3.9 ilustra a posição dos defletómetros.

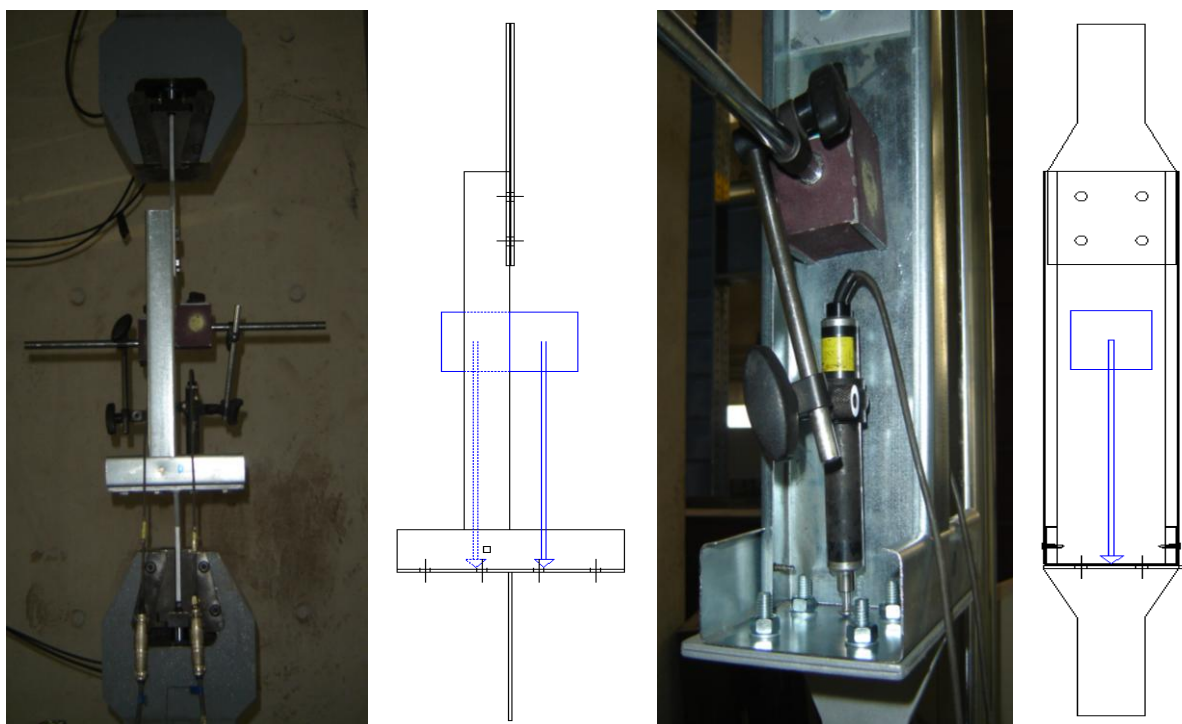


Figura 3.9 - Posição dos defletómetros aplicados nos modelos experimentais.

Importa referir que a posição dos defletómetros foi registada com o objetivo de comparar devidamente os resultados experimentais com os resultados numéricos, pois nos modelos numéricos retiram-se os valores dos deslocamentos nas posições dos defletómetros.

### 3.5.4 Descrição do ensaio

O carregamento é do tipo monotónico e foi aplicado um controlo de deslocamento de 0.02mm/s, válido para todos os ensaios, os quais foram conduzidos à rotura.

### 3.5.5 Resultados experimentais e sua análise

A análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais é de extrema importância, uma vez que permite a compreensão da evolução dos deslocamentos consoante o aumento da força de tração aplicada (à medida que o carregamento evolui), assim como analisar o comportamento do parafuso.

#### Ensaio dos protótipos experimentais SFS

O primeiro protótipo experimental com o tipo de parafuso SFS (protótipo SFS T1) apresentou um comportamento muito díspar em relação aos seus pares, devendo-se ao facto de este ter

vido ensaiado com uma chapa na base pouco rígida, ou seja, permitiu uma grande rotação na base, o que é de todo indesejável, pois altera a forma como a ligação se deforma e, como consequência altera a leitura dos deslocamentos pelos defletómetros. Nos restantes ensaios, a situação descrita foi resolvida utilizando uma chapa auxiliar na base mais robusta de forma a fixar os modelos experimentais de modo mais efetivo, passando a não existir uma rotação excessiva do perfil que se encontra na base.

Na Figura 3.10 estão representadas as curvas força-deslocamento dos dois protótipos, em que se utilizam parafusos auto-perfurantes da marca *SFSintec*.

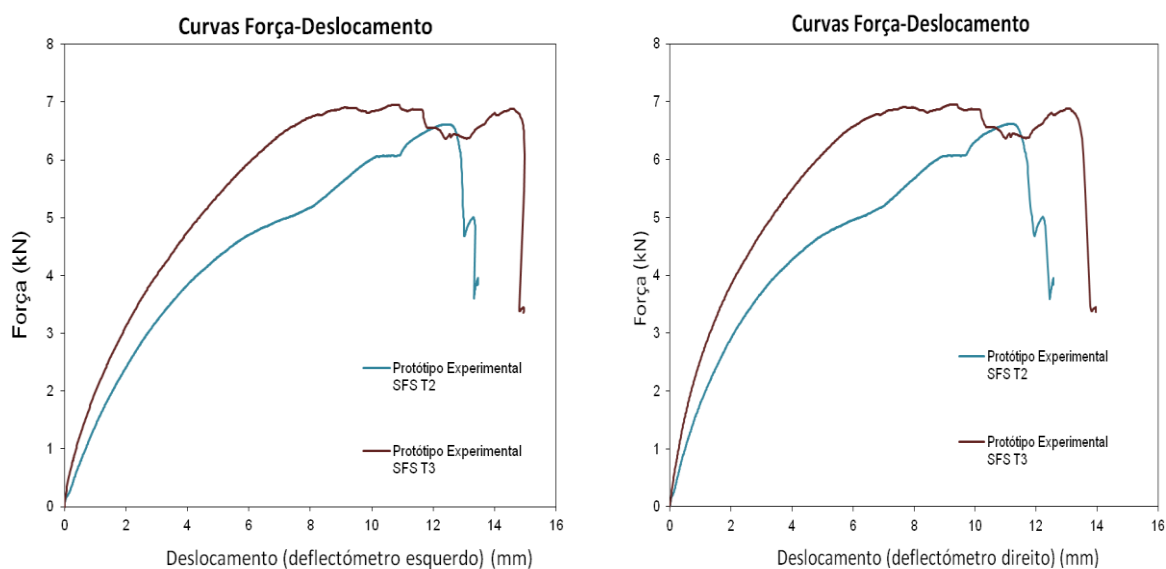


Figura 3.10 - Curvas força-deslocamento dos protótipos experimentais SFS.

Da figura anterior, denota-se que os dois protótipos ensaiados utilizando parafusos SFS não apresentam o mesmo comportamento (as curvas não são "coincidentes" desde o princípio do ensaio). Assim sendo, facilmente se percebe que o protótipo SFS T3 apresenta um melhor comportamento. Neste modelo registou-se uma força máxima de 6.90kN para um deslocamento de 9.06mm. Relativamente ao protótipo SFS T2, este registou um pior desempenho, tendo-se registado uma força de 6.47kN e um deslocamento de 12.75mm aquando da rotura da ligação.

As curvas força-deslocamento referentes a estes protótipos experimentais, não são tão próximas como seria de esperar, apresentando um comportamento um pouco diferente. Este facto pode dever-se ao aço utilizado nos provetes experimentais serem de diferentes lotes e com isso apresentarem flutuações nas suas características, como se verificou nos ensaios dos

provetes de aço. Outra explicação pode dizer respeito a alguma imperfeição inicial, como a colocação dos parafusos auto-perfurantes, assim como ao comportamento destes durante o ensaio, com influência da geometria da cabeça do parafuso assim como da sua rosca.

As perturbações registadas no final da curva força-deslocamento dos ensaios, após a rotura devem-se à rotação do parafuso, assim como ao deslocamento deste, uma vez que este fica praticamente na vertical, onde a rosca do parafuso se desloca e a cabeça do mesmo reentra pela chapa dos perfis, esmagando-a.

### Ensaios dos protótipos experimentais FAB

Na Figura 3.11 estão representadas as curvas força-deslocamento dos três protótipos ensaiados em que se utilizam parafusos auto-perfurantes da marca *Fabory*.

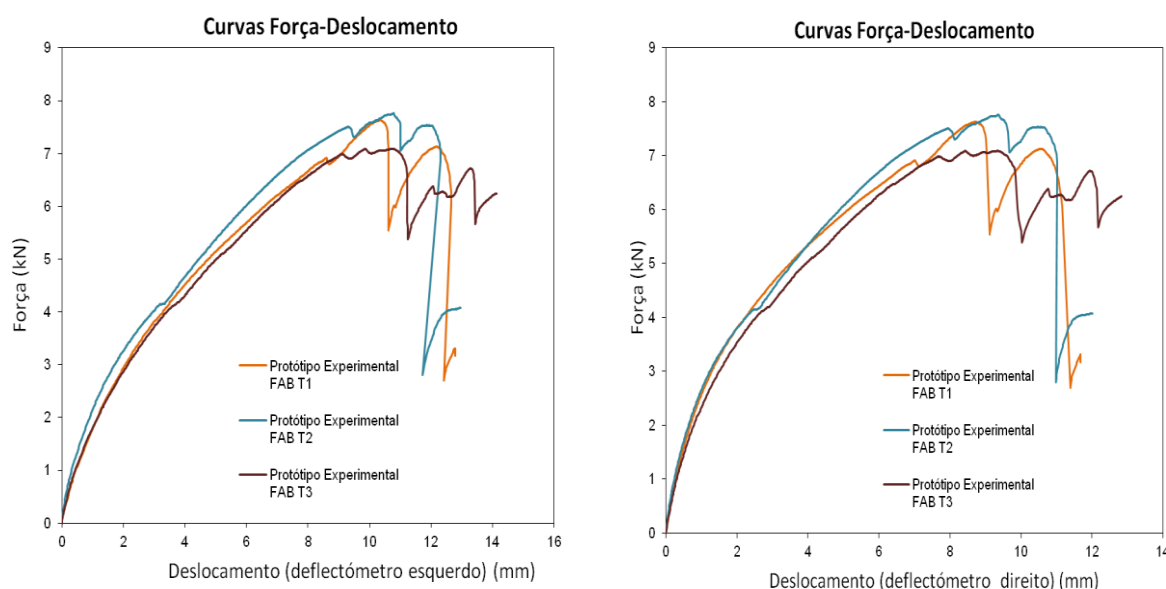


Figura 3.11 - Curvas força-deslocamento dos protótipos experimentais FAB.

Ao visualizar a figura anterior, conclui-se que os três modelos ensaiados utilizando parafusos FAB apresentam sensivelmente o mesmo comportamento até à rotura. Considera-se que a rotura dos protótipos ocorre quando do início das oscilações das curvas representadas na Figura 3.11. A rotura em ambos os protótipos ocorre para valores do deslocamento entre os 8 e 10 mm para uma resistência média que ronda os 7.5 kN. Uma análise mais cuidada à mesma figura, repara-se que o protótipo FAB T2 apresenta uma maior resistência em comparação com os outros protótipos.

Referente ao protótipo FAB T3, este tem uma resistência menor em comparação com os outros dois protótipos ensaiados, atingindo apenas uma resistência de 7.08 kN para um deslocamento de 9.57mm.

As perturbações que se registaram após a rotura e refletidas no final da curva força-deslocamento dos diversos ensaios, devem-se à rotação do parafuso e à sua reentrada nas chapas dos perfis, o que permite verificar um acréscimo de deformação.

Com os resultados dos protótipos experimentais todos agrupados, obtém-se os seguintes gráficos ilustrados na Figura 3.12.

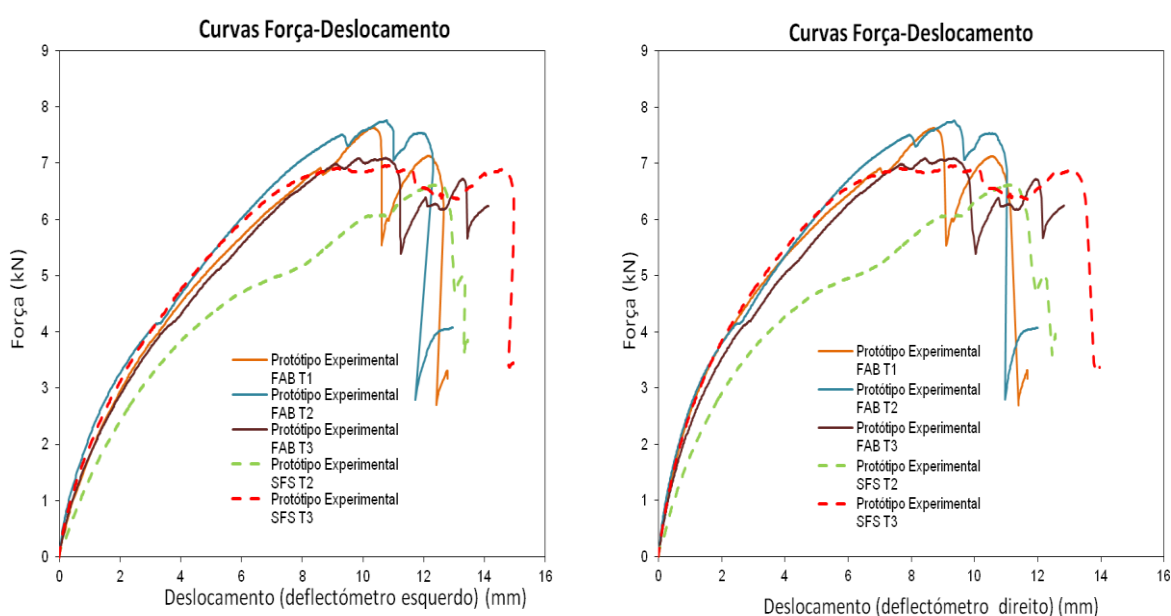


Figura 3.12 - Curvas força-deslocamento de todos os protótipos experimentais.

Tendo como referência os gráficos anteriores, comparando as curvas força-deslocamento de todos os protótipos ensaiados, conclui-se que, de uma forma geral, os protótipos experimentais em que se utilizou os parafusos do tipo FAB da Fabory apresentam um melhor comportamento em termos de resistência (em que se consegue chegar a forças mais elevadas), apesar de atingirem a rotura para valores de deslocamento menores.

O tipo de parafusos SFS apresentou um comportamento um pouco diferente dos FAB. Isto deve-se ao facto de ter um diâmetro menor bem como espessura e a geometria da sua cabeça, que sendo de menor espessura, tem maior facilidade em esmagar a chapa dos perfis, como se demonstra pela Figura 3.13, o que permite uma maior deformação.

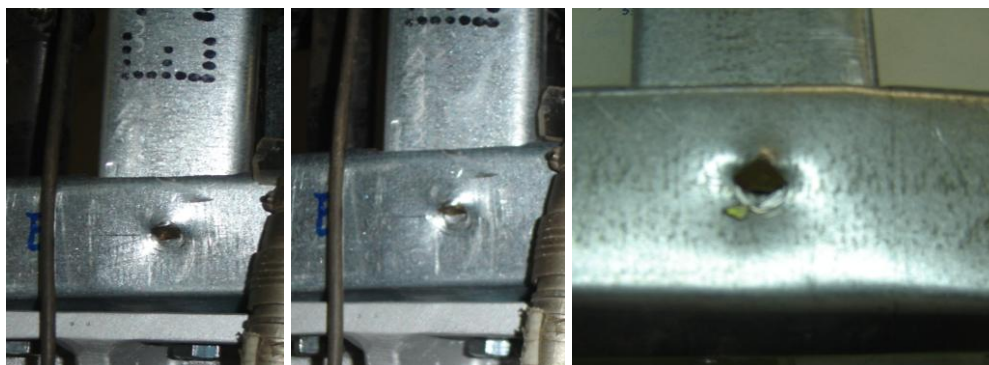


Figura 3.13 - Comportamento do parafuso *SFSintec*.

Referente aos protótipos experimentais em que se utiliza o tipo de parafusos SFS, uma vez que estes têm um diâmetro mais pequeno, 4.2 mm, era de esperar obter uma resistência ligeiramente menor, como se verificou.

Na fase final dos ensaios, verificou-se um comportamento diferente do parafuso *SFSintec*, como se pode observar nas Figuras 3.13 e 3.14. Este roda, ficando praticamente na vertical, o que, com a ajuda da sua própria rosca se fixa nas chapas dos perfis, permitindo uma maior deformação na ligação. No entanto, essa deformação pode ser desprezada, uma vez que se considera que a ligação já atingiu a rotura.

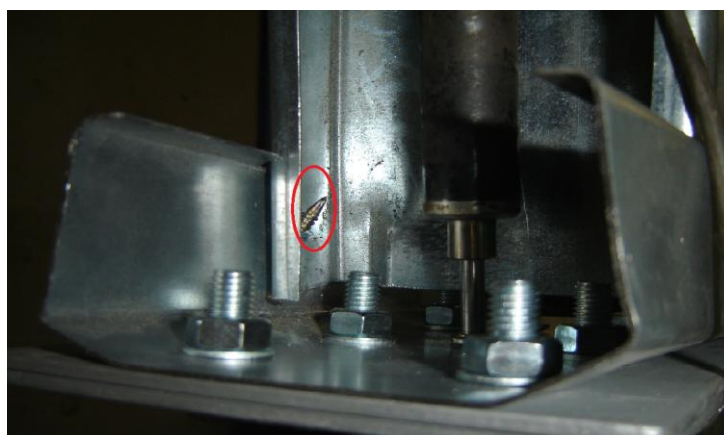


Figura 3.14 - Deslocamento do parafuso *SFSintec*.



## 4. ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO

### 4.1. Introdução

A análise numérica da ligação foi efetuada com recurso ao software de cálculo automático *Abaqus*. Este é um software utilizado por diversas áreas de Engenharia, que permite reproduzir modelos complexos fazendo análises numéricas com grande precisão, graças à sua extraordinária capacidade de cálculo. Este é um pacote de ferramentas que tem por base de resolução o método dos elementos finitos, comercializado pela *SIMULA*.

### 4.2. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é, seguramente, o mais utilizado dos métodos numéricos, na medida em que permite modelar, com grande precisão "os diversos aspetos que influenciam o respetivo comportamento estrutural e simular com precisão fenómenos de instabilidade com elevado grau de complexidade" (Veríssimo, 2008), resolvendo variadíssimos problemas de engenharia.

Esta afirmação é corroborada pela existência, em diversas áreas científicas, de um elevado número de programas de cálculo automático, em que se aplica o método dos elementos finitos. Trata-se de um método extremamente dinâmico e poderoso, sendo que, devidamente aplicado, assegura a convergência da solução aproximada para a solução exata quando: "i) a dimensão dos elementos tende para zero e/ou ii) o grau de interpolação do elemento finito utilizado tende para infinito" (Silva e Gervásio, 2007).

A base para o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi criada em finais do século XVIII, pelo matemático Gauss, que resolveu problemas matemáticos com base em funções de aproximação. O primeiro registo, utilizando este método, data de 1960, através de um artigo de Ray Clough (Clough, 2004), professor da Universidade de Barkely e funcionário da Boeing.

As enormes evoluções que ocorreram nas últimas décadas e o contínuo desenvolvimento de ferramentas computacionais, tanto a nível de hardware como de software, possibilitaram o aparecimento e divulgação de diversos programas comerciais de elementos finitos, os quais efetuam análises geométricas e fisicamente não lineares a elementos bidimensionais e

tridimensionais, ou seja, a qualquer sistema estrutural, e.g. Abaqus (Simulia Inc. Abaqus Standard (version 6.7-5), 2008).

Devido à sua simples, mas sólida, fundamentação matemática, flexibilidade e diversidade como ferramenta de cálculo, o MEF tornou-se numa ferramenta de calculo numérico indispensável em diversos domínios da engenharia, em que é necessário considerar comportamentos física e geometricamente não lineares.

A comunidade científica, ligada às estruturas de aço, tem utilizado de uma forma crescente estes meios, nomeadamente devido a: "i) os estudos paramétricos efetuados através de simulações numéricas apresentarem grandes vantagens em relação à realização de ensaios experimentais, ii) a racionalidade e eficácia das metodologias de dimensionamento dependerem de um conhecimento, permitindo analisar a influência de deformabilidade local no pós-encurvadura de perfis de parede fina" (Fena, 2011).

Neste sentido, apenas através do método dos elementos finitos é possível determinar com elevado rigor o comportamento estrutural de perfis de aço enformados a frio, principalmente em regime elasto-plástico e/ou na presença de fenómenos de interação entre modos de instabilidade.

O MEF tem como finalidade a modelação de um problema genérico, sendo que estuda meios contínuos através de uma análise das partes discretas dos mesmos, possibilitando obter uma solução matemática do seu comportamento. Os elementos discretos que fazem parte do problema são denominados por "elementos finitos" e ao processo de análise estrutural do problema, em vez do conjunto contínuo, dá-se o nome de "descretização".

Essa discretização consiste na subdivisão dos elementos estruturais num número finito de pequenos elementos, usualmente de forma retangular, nos quais o campo de deslocamentos é aproximado através de uma combinação linear de funções de aproximação, multiplicadas pelos respetivos graus de liberdade do problema. Quando agrupadas, a resolução de todas as funções referentes aos elementos estruturais, dão origem à solução global do problema inicial.

"Na perspetiva do utilizador, os problemas são vistos como modelos matemáticos de situações físicas. Estes modelos matemáticos são o resultado de equações diferenciais com parâmetros iniciais, condições de fronteira e condições de carregamento conhecidos." (Oliveira, 2010).

A seleção de modelos de casca ou modelos sólidos e as respetivas discretizações interferem na precisão dos resultados, aquando da utilização de elementos finitos bi e tridimensionais.

Neste sentido, torna-se necessário efetuar "estudos de convergência com refinamento sucessivo da malha de elementos finitos" (Silva e Gervásio, 2007).

"De acordo com Frey e Jirousek (2001), a modelação consiste em relacionar a estrutura real com um modelo conhecido de mecânica dos meios contínuos, capaz de descrever o seu comportamento com precisão adequada" (Silva e Gervásio, 2007).

A discretização do modelo (estrutura) deve respeitar a geometria da mesma, através dos elementos criados aquando da geração da malha, assim como o tipo de análise deve estar de acordo com o comportamento da estrutura.

Tratando-se de elementos de paredes finas, em que é necessário considerar a deformabilidade local, torna-se indispensável a discretização da superfície média dos perfis através de elementos finitos geometricamente não lineares.

Neste sentido existem diversos tipos de elementos finitos, em que o seu comportamento é caracterizado pelos seguintes aspetos: i) a formulação do elemento, ii) os graus de liberdade do elemento, iii) o numero de nós do elemento, iv) a tipologia do elemento (1D, 2D, 3D) e v) o esquema de integração do elemento. Cada tipo de elemento no *Abaqus* tem uma identificação única, como por exemplo T2D2, S4R ou C3D8R, em que cada sigla identifica os cinco aspetos descritos acima.

Na Figura 4.1 são representadas as principais famílias de elementos usados em análises numéricas.

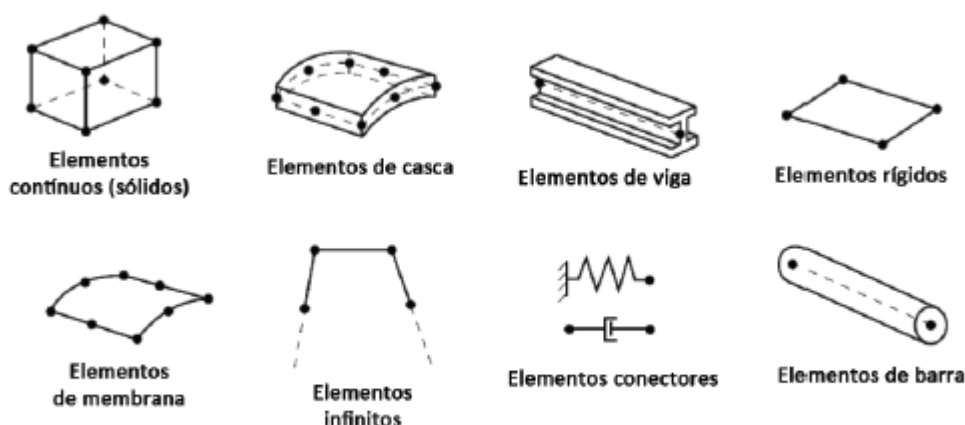


Figura 4.1 - Principais tipologias de elementos finitos, adaptado de Dassault Systèmes. Abaqus 6.9 analysis user's manual volume iv, 2009.

Existem dois tipos de modelos constitutivos, designados como: i) elástico (linear): no fim da aplicação da carga, a estrutura regressa à sua forma inicial, sem qualquer deformação; ii) plástico (não linear): o material é caracterizado por uma zona inicial em que se comporta como um material elástico e por uma zona final em que este assume comportamento plástico. O elemento finito deve estar em concordância com o tipo de problema e deve ser analisado "...em função da formulação do elemento (deslocamento, equilíbrio) da convergência, dos nós e incógnitas nos nós, da compatibilidade com outros elementos e da sua performance e limitações" (Silva e Gervásio, 2007).

Naturalmente, a exatidão dos resultados depende da qualidade da modelação, em que uma boa malha de elementos finitos respeita as seguintes regras: i) malha regular sem apresentar distorções ou desproporções; ii) adaptar-se a todas as singularidades de um determinado elemento, assegurando a conformidade de transições suaves entre zonas distintas do elemento.

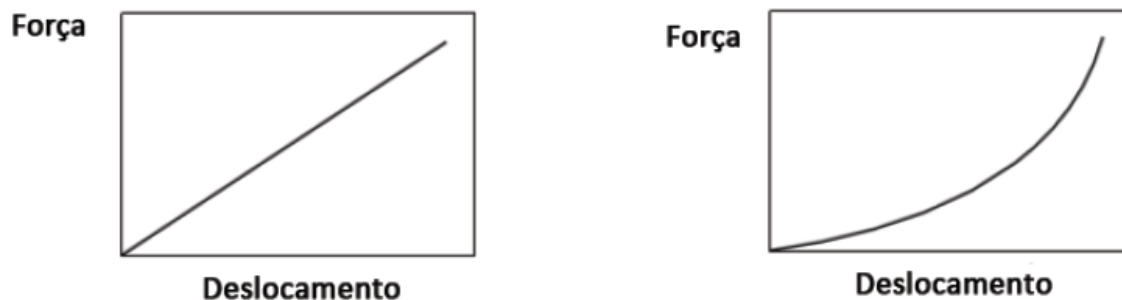
É relevante salientar que a implementação devida do método dos elementos finitos implica que sejam satisfeitos dois critérios de convergência: "i) critério de continuidade, conformidade ou compatibilidade: a interpolação deve ser tal que o campo de deslocamentos seja contínuo e diferenciável no elemento e contínuo através das fronteiras do elemento"; ii) critério das deformações constantes ou da completude: a interpolação deve permitir representar estados de deslocamentos constantes ou modos de corpo rígido e estados de deformação constantes" (Silva e Gervásio, 2007).

Importa ainda referir que, sendo o método dos elementos finitos um método aproximado, efetuado através de equações matemáticas e aplicado a problemas com condições fronteiras finitas, é determinante saber avaliar o erro por este cometido para um determinado modelo.

### **4.3. Análise Não Linear**

Perante determinados estudos existe a necessidade de ter em consideração uma análise não linear em detrimento de uma análise linear, ou seja, sempre que a rigidez de uma determinada estrutura varia enquanto esta se deforma tem de se utilizar uma análise não linear. Enquanto que uma análise linear, utiliza-se quando se pretende apenas estudar o comportamento elástico da estrutura.

Consegue-se explicar a diferença entre os dois tipos de análises utilizando um exemplo sobre molas, como se demonstra na Figura 4.2.



(a) Mola linear: a rigidez é constante.

(b) Mola não-linear: a rigidez é variável.

Figura 4.2 - Características lineares e não lineares de uma mola (Dassault, 2009)

Como a rigidez depende do deslocamento numa análise não-linear, não é possível multiplicar a flexibilidade inicial pela carga inicial de forma a obter o deslocamento da mola para uma carga arbitrária. Perante uma análise implícita não-linear a matriz rigidez necessita de ser invertida durante o processamento da análise, tornando assim este método mais complexo em comparação com uma análise linear.

No decorrer da análise dos modelos numéricos no software de cálculo escolhido, optou-se por utilizar um método de cálculo "*General Riks*". Este método é usualmente utilizado para prever o colapso de estruturas instáveis com não linearidade geométrica. Este pode incluir propriedades não-lineares de materiais e condições de fronteira.

#### 4.4. Modelos Numéricos Estudados

Neste ponto são descritos os modelos numéricos criados e os pressupostos que estão na base da sua modelação.

O objetivo, é então estudar o comportamento da ligação para dois tipos de parafusos auto-perfurantes. Para tal foram realizados modelos numéricos da ligação com diferentes propriedades e características, de maneira a simular os diferentes tipos de parafusos utilizados nas ligações.

Para a obtenção de resultados foi necessário o desenvolvimento de modelos que representassem devidamente a ligação que se pretende modelar e posteriormente estudar os resultados obtidos com o maior rigor possível.

#### 4.4.1. Descrição da modelação

A modelação é a primeira fase da reprodução qualquer tipo de modelo num programa de cálculo automático. Neste sentido, a modelação das ligações no programa de cálculo "Abaqus" foi executada de forma a respeitar todas as medidas (nominais) dispostas nos desenhos de pormenor, anteriormente definidas aquando da preparação dos ensaios realizados (nos quais se idealizou como se iria testar a ligação). O modelo numérico (que representa a ligação) apresenta uma pequena excentricidade, tal como acontece nos protótipos experimentais, pois os parafusos auto-perfurantes não estão alinhados com a alma do perfil que está a ser tracionada, provocando uma pequena rotação do perfil tracionado. Facto este que levou a uma complicação adicional na modelação devido à compatibilização entre malhas de elementos finitos.

Uma vez que se modelou a ligação com base nas medidas nominais, não foram consideradas as pequenas imperfeições iniciais (que estão presentes nos protótipos e que dizem respeito às medidas não serem exatamente as medidas nominais), existindo desvios de 1 a 2 mm na localização dos parafusos, assim como outras imperfeições que serão posteriormente apresentadas.

A primeira escolha a fazer é optar por elementos "sólidos" ou "casca", neste caso optou-se por modelar a ligação com elementos sólidos.

Assim, inicia-se um processo em que se criam as diversas partes que constituem o modelo numérico (ligação), como os dois perfis e os parafusos, e posteriormente se agrupam devidamente para dar forma ao modelo pretendido. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram o que foi referido. A correta definição dos contactos, ou interações, entre as superfícies numa análise numérica é de extrema importância, como é o caso deste tipo de modelos em que existem superfícies em contacto, pondo mesmo em causa a validade dos resultados se estes forem definidos incorretamente.

Por forma a definir as interações entre as superfícies dos perfis de aço enformado a frio, foi utilizado um modelo de interações do tipo "*Surface to Surface contact*", sendo necessário distinguir as superfícies em contacto entre "slave ou master". Esta propriedade de contacto tem dois objetivos: evitar a penetração entre superfícies durante a análise e simular o atrito existente entre as mesmas, de maneira a condicionar o escorregamento das diferentes partes.

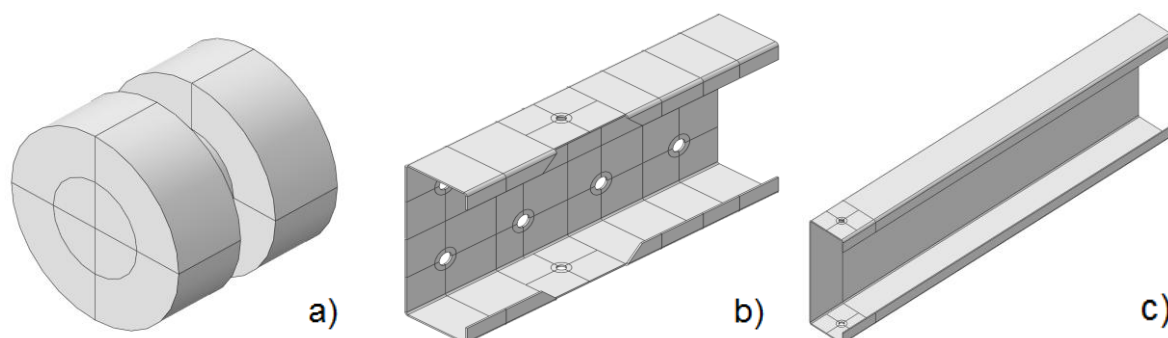


Figura 4.3 - Partes que constituem o modelo numérico: a) parafuso; b) perfil C (base); c) perfil C

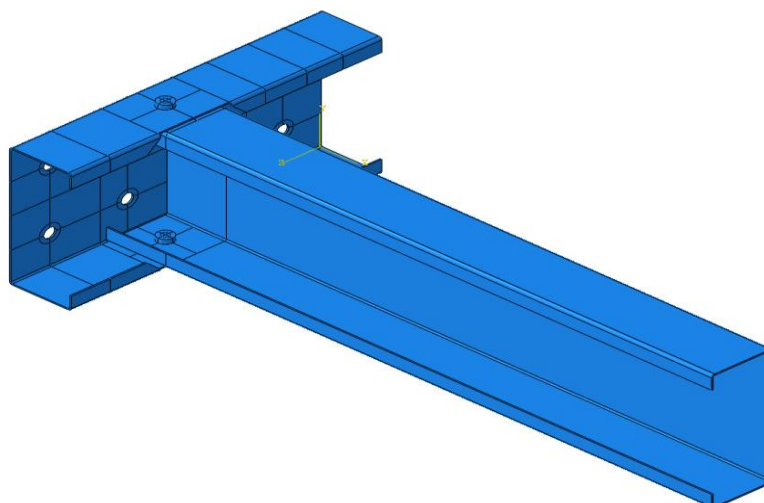


Figura 4.4 - Exemplo de ligação devidamente modelada

Na modelação dos parafusos também foram respeitadas todas as medidas, sendo o diâmetro a mais importante, devido ao parafuso estar a ser solicitado ao corte. Na modelação, foi necessário modelar uma "2ª cabeça" (do lado "interior") adicionando contacto como se tratasse de uma porca auxiliar ou até mesmo "uma 2ª cabeça do parafuso". Pois o programa não executava os cálculos convenientemente sem essa cabeça "auxiliar", pois sem ela o parafuso deslocava-se, saindo do seu devido local, o que tem como consequência uma não convergência do modelo. Com esta "peça auxiliar" consegue-se simular corretamente o comportamento da ligação, tanto em termos de resistência como de deformação. Até é possível verificar a rotação do parafuso, se bem que não é tão evidente como na fase final dos ensaios, onde se verifica uma elevada rotação dos parafusos.

Os parafusos SFS requerem uma modelação mais cuidada, em particular para a sua cabeça de forma quadrada e de pequena espessura, que devido a esta tem problemas acrescidos para simular a zona de contacto (entre superfície do parafuso e a chapa do perfil), bem como gerar

a malha de elementos finitos (nas duas superfícies em contacto). Uma vez que o fuso do parafuso é redondo e a sua cabeça quadrada, a malha de elementos finitos não é exatamente igual no parafuso e na chapa do perfil, como se pode visualizar na Figura 4.5. Uma vez que a área da cabeça é bastante pequena (logo a zona de contacto também), a sua influência no comportamento da ligação é mínima, possibilitando assumir, como correto, simular o parafuso exatamente como ele é, apesar de não ser muito compatível a malha de elementos finitos gerada em cada elemento. Para ilustrar o que se referiu anteriormente, reproduziu-se um modelo exatamente igual, apenas com a cabeça do parafuso redonda, o que devido à área de contacto ser muito pequena e o parafuso trabalhar ao corte, a diferença, é praticamente impercetível.

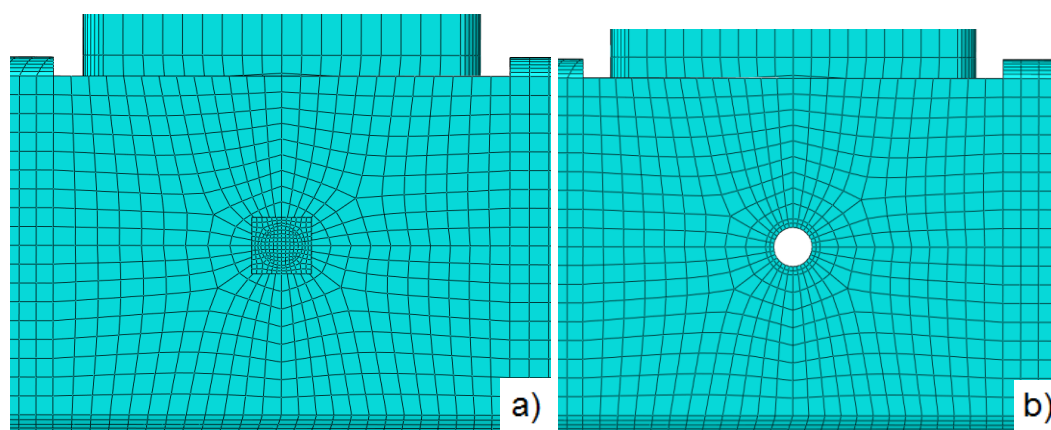


Figura 4.5 - Pormenor da malha de elementos finitos na zona do parafuso: a) com parafuso; b) sem parafuso.

Outra parte importante na modelação diz respeito às condições de apoio, ou seja, à forma como se simula a fixação do perfil (disposto na base). Numa primeira fase, modelaram-se os oito parafusos "auxiliares" presentes na base do perfil (tal como nos protótipos experimentais) com as devidas medidas, incluindo a presença da anilha, mas rapidamente se percebeu que se podia fixar todos os graus de liberdade na área referente à colocação dos mesmos, o que é importante para evitar possíveis problemas associados às zonas que requerem contacto.

A forma de simular a tração no perfil, e por sua vez levar o modelo à rotura, foi modelar os quatro parafusos no perfil (tal como no protótipos experimentais) e aplicar um deslocamento, mas logo se verificou que ao tracionar apenas a alma do perfil os resultados eram os mesmos, ou seja podia-se simplificar o modelo ao não considerar esses parafusos (que iriam adicionar complexidade ao modelo em termos de zonas de contacto como em gerar a malha de elementos finitos na mesma, o que ao pequeno erro levava à não convergência do modelo).



Com a geometria do modelo 3D definida e com todas as outras características introduzidas, procedeu-se à definição da malha de elementos finitos do modelo. Parte esta que é complexa e bastante sensível ao tipo de elementos finitos utilizados, ao seu tamanho, bem como à capacidade de adaptação da malha a todas as singularidades do modelo que se pretende estudar. Assim sendo, utilizou-se uma malha constituída por elementos finitos do tipo de família hexagonal com a seguinte designação: C3D8R. Esta nomenclatura significa que se trata de um elemento sólido 3D com integração reduzida, ou seja, o elemento só tem um ponto de integração no centro do mesmo, apresentando 8 nós. As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram a malha de elementos finitos adotada para o modelo em estudo.

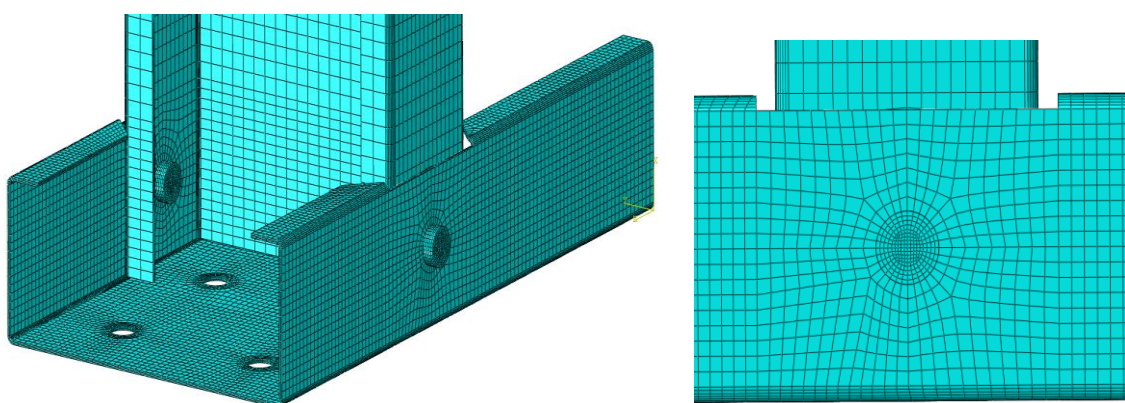


Figura 4.6 - Malha de elementos finitos adotada no modelo numérico.

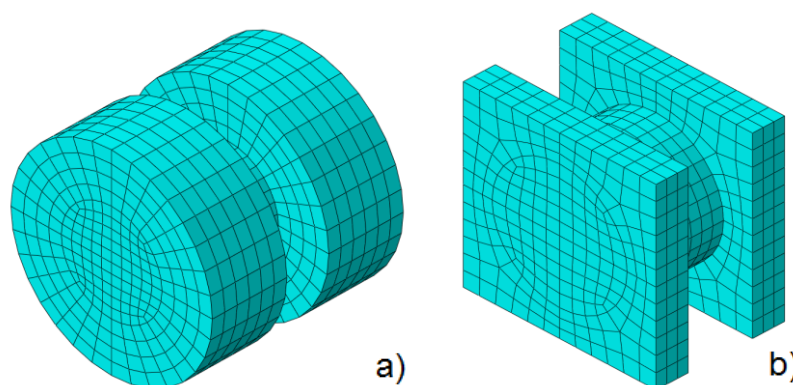


Figura 4.7 - Malha de elementos finitos adotada para os dois tipos de parafusos modelos, parafuso FAB (a) e SFS (b).

No Abaqus, tal como aconteceu nos ensaios, a ligação foi levada à rotura impondo um deslocamento. Deslocamento este que vai provocar tração no perfil, desencadeando esforços em toda a ligação, o que nos permite estudar o comportamento dos parafusos até à rotura da mesma.

#### 4.4.2. Calibração dos modelos

A fase de calibração dos modelos numéricos é essencial quando se trata de uma análise numérica e esta consiste em simular no programa de cálculo utilizado (*Abaqus*) o comportamento dos protótipos experimentais ensaiados, quer em termos de resistência e deslocamento, assim como em termos de zonas plastificadas e de tensões. Esta foi a fase em que se despendeu maior tempo, devido essencialmente, às zonas de contacto entre elementos.

Numa fase inicial, o objetivo foi de reproduzir o modelo em estudo de uma forma evolutiva no que diz respeito à sua complexidade e como consequência a sua melhor aproximação ao modelo real. Neste sentido começou-se por testar as zonas de contacto, passando a testar diferentes condições de apoio (com e sem parafusos auxiliares na base), assim como a aplicação do deslocamento (nos 4 parafusos auxiliares ou apenas na alma do perfil), chegando à definição da malha de elementos finitos. Por último, testou-se como seria variar as propriedades do material e tal como se esperava, existem diferenças entre o uso de um material com valores nominais para a curva tensão-extensão e os valores corretos obtidos através de ensaios de tração.

No decorrer deste processo chegou-se a um modelo muito completo, mas por sua vez bastante complexo e muito condicionado por zonas de contacto em simultâneo com a malha de elementos finitos gerada, a qual era bastante refinada em todo o modelo.

Depois de estar o modelo calibrado, mas pesado em termos de análise numérica, procurou-se simplificar o mesmo. A simplificação passou por utilizar uma curva tensão-extensão do material em troços, adotando-se uma curva de três troços com as propriedades do material extraídas do ensaio que se realizou aos provetes de aço.

De seguida, retiraram-se os quatro parafusos auxiliares do topo do perfil (nos quais se aplicavam o deslocamento para provocar tração na ligação) e aplicou-se o deslocamento apenas na alma do perfil, segundo a direção pretendida (tal como no ensaio uma vez que a prensa bloqueia as 2 outras direções). Com esta simplificação não houve alterações nos resultados permitindo que se tenham menos zonas de contacto e uma simplificação na malha de elementos finitos nesse perfil.

O mesmo raciocínio foi posto em prática para criar as condições de apoio. Retiraram-se os "parafusos auxiliares" na base e fixaram-se a área correspondente a estes. Mais uma vez os resultados foram satisfatórios.

Na Figura 4.8 pode-se visualizar o modelo numérico em que se utilizou parafusos FAB

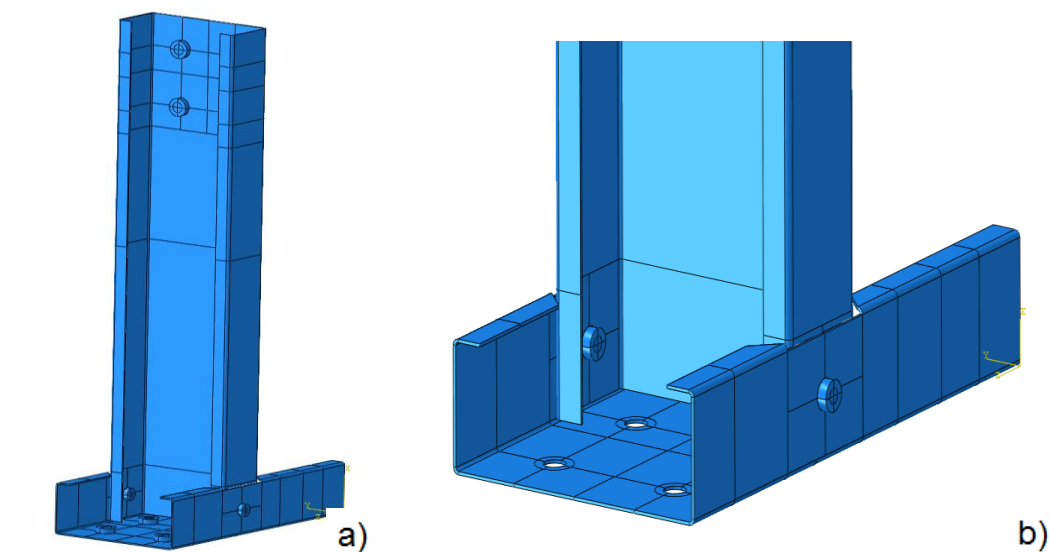


Figura 4.8 - Modelo "completo" (a)) e modelo "simplificado" (b)).

A malha de elementos finitos e a respetiva discretização é crucial para se obterem resultados corretos, pois esta tem relevância no que diz respeito à forma como se deforma o modelo em estudo. Para tal, fez-se um estudo de convergência da referida malha, uma vez que ter uma malha de elementos finitos exageradamente refinada não leva à obtenção de resultados mais precisos e no que diz respeito à análise computacional esta torna-se mais exigente. Por outro lado, uma malha pouco refinada reflete-se nos resultados, não estando estes com o rigor exigido e não refletindo o que acontece na realidade. A malha deve respeitar o mais fielmente a geometria da peça em estudo, evitando elementos finitos distorcidos, o que é prejudicial para o cálculo do mesmo.

Na calibração dos modelos, um ponto essencial é reproduzir o comportamento dos parafusos, pois é nele que reside o cerne do estudo, com clara influência no comportamento de toda a ligação. A modelação do parafuso não é exata, pois não se reproduziu a parte roscada no fuso deste (devido à elevada complexidade na zona de contacto, com a existência de reentrâncias que era necessário reproduzir entre o fuso do parafuso e a superfície das chapas). Este acréscimo de complexidade no modelo não iria alterar de forma significativa os resultados finais, uma vez que não se traduzia num ganho de resistência. Logo, o comportamento do parafuso não é exatamente fiel ao real, não se conseguindo obter a rotação total do parafuso, que nos ensaios experimentais fica praticamente a 90 graus.

### 4.5. Resultados e Confirmação da Calibração

Nesta secção irão ser apresentados os resultados referentes aos dois tipos de modelos numéricos estudados, comparando-os com os resultados dos protótipos experimentais respetivos, evidenciando a calibração de cada um deles. Começando por comparar visualmente os protótipos experimentais e modelos numéricos expostos na Figura 4.9.

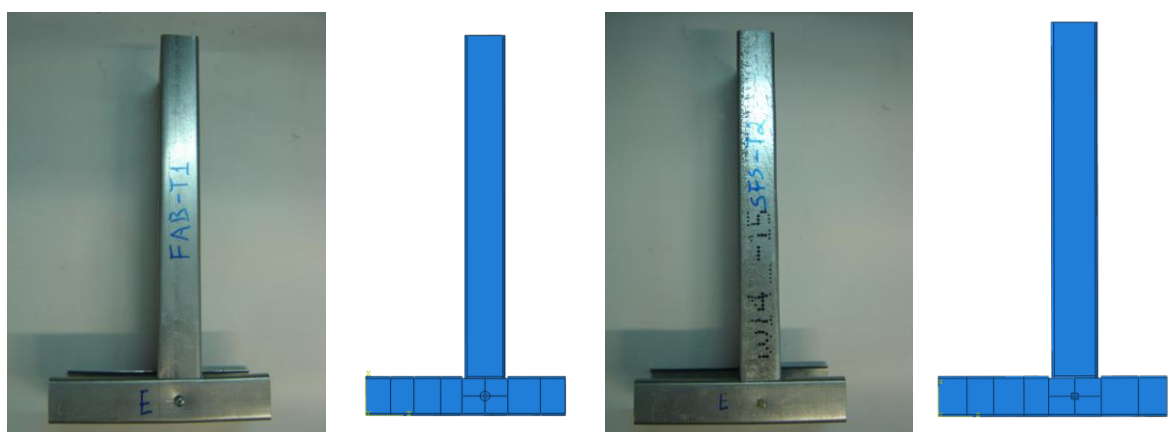


Figura 4.9 - Protótipo experimental vs modelo numérico.

#### 4.5.1. Modelos utilizando parafusos FAB

No que diz respeito às tensões, visíveis no modelo numérico, tal como ilustra a Figura 4.10, estas são mais elevadas nas zonas plastificadas das chapas dos perfis e na zona circundante aos parafusos, existindo uma concentração de tensões no fuso do parafuso, tal como seria de esperar, uma vez que o parafuso está a trabalhar ao corte, sendo apenas estes os responsáveis pela transmissão de esforços entre os dois perfis que constituem a ligação.

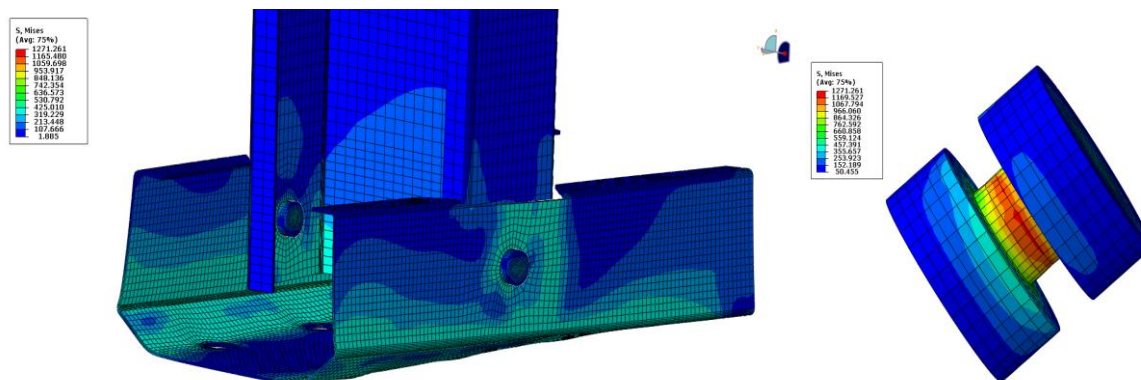


Figura 4.10 - Tensões no modelo numérico.

Relativamente às zonas plastificadas, estas surgiram principalmente no perfil disposto na base, surgindo duas linhas bem definidas tal como nos protótipos experimentais, como se pode observar na Figura 4.11. Outra zona plastificada é a zona envolvente ao orifício do parafuso em ambas as chapas dos perfis, como demonstra a Figura 4.12

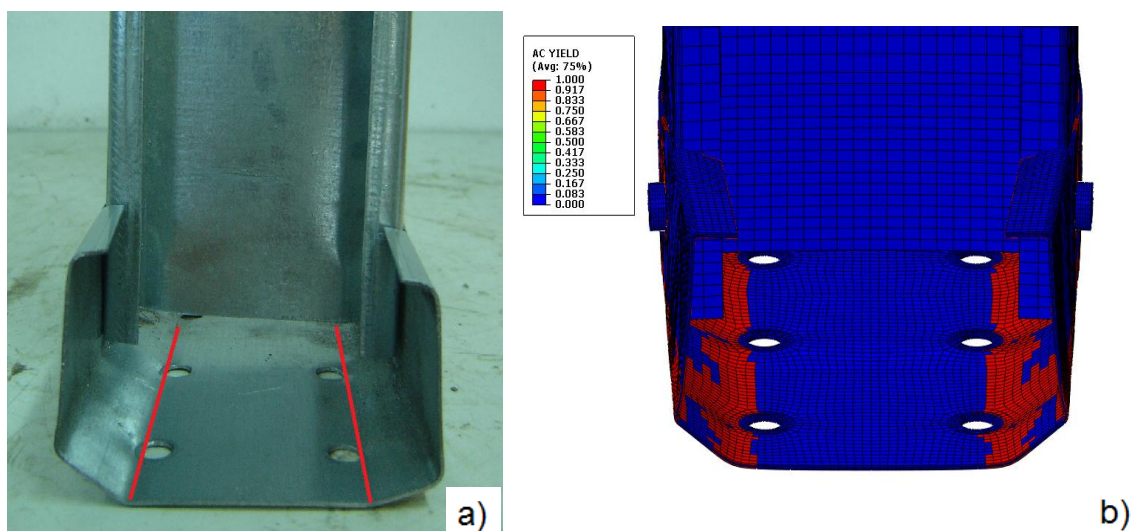


Figura 4.11 - Comparação entre zonas plastificadas no protótipo experimental (a) e modelo numérico (b).

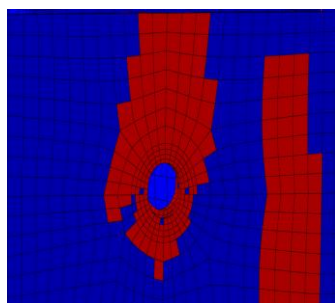


Figura 4.12 - Zona plastificada no orifício do parafuso referente ao modelo numérico.

Os deslocamentos e a resistência da ligação podem ser evidenciados com um gráfico força deslocamento da ligação. Seguindo este raciocínio coloca-se no mesmo gráfico as curvas força deslocamento dos protótipos experimentais e modelo numérico para o mesmo tipo de parafusos, como se pode observar na Figura 4.13. Com esta comparação e com as figuras representativas dos mesmos consegue-se verificar a calibração do modelo. A comparação foi efetuada tendo em conta a posição dos defletómetros nos protótipos experimentais, uma vez que aquando dos ensaios experimentais registou-se a sua posição (aproximada) com o

objetivo de tirar os deslocamentos do modelo numérico no mesmo local em que se situavam os defletómetros.

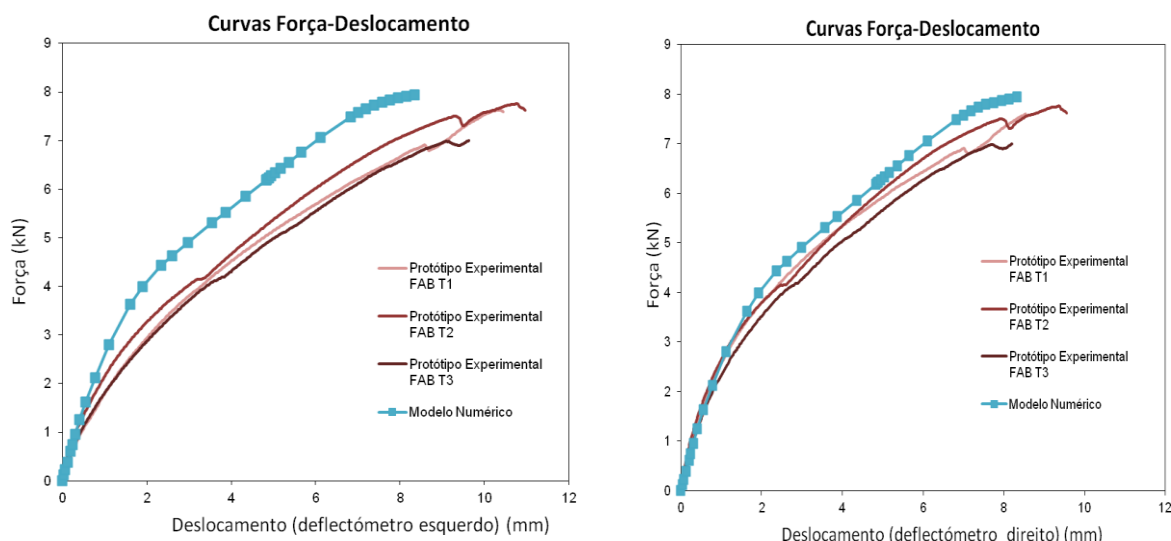


Figura 4.13 - Curvas força deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos FAB.

Como se pode observar pelos gráficos acima representados, conseguiu-se de forma satisfatória a calibração do modelo em causa, pois as três curvas força-deslocamento referentes aos protótipos experimentais estão bastante próximas da curva força-deslocamento referente ao modelo numérico.

A curva força-deslocamento do modelo numérico não está ainda mais próxima devido às imperfeições iniciais existentes nos protótipos experimentais. Pois o modelo numérico foi reproduzido com base nas medidas nominais, podendo ainda ter ocorrido uma pequena rotação do perfil na base nos protótipos experimentais ensaiados. Está é a razão pela qual a curva força-deslocamento do modelo numérico está ligeiramente acima das do ensaio, pois no modelo numérico a não existência de imperfeições pode significar uma melhoria em termos de resistência.

As imperfeições iniciais existentes nos protótipos experimentais não foram introduzidas nos modelos numéricos, apesar de estas interferirem nos resultados, mas não de uma forma significativa, logo não foram consideradas na análise.

As imperfeições iniciais que não se consideraram no modelo numérico e que existem nos modelos experimentais são: i) a localização dos parafusos nos modelos reais, que naturalmente estão com desvios de 1 a 2 mm em relação à localização exata; ii) a localização

dos perfis entre si, existindo assim a possibilidade da excentricidade conhecida e aplicada nos modelos poder ser ligeiramente maior e menor; iii) os cortes nos perfis têm ligeiros desvios; iv) o raio de curvatura da chapa (pode não estar devidamente dobrada devido à quinagem); v) o perfil, disposto na vertical, foi dobrado para os protótipos experimentais, ou seja, foi forçado a entrar no perfil disposto na horizontal, causando localmente alguma plastificação e introdução de tensões indesejáveis (no modelo numérico foi feito o perfil com 98 mm de altura em vez de 100 mm); vi) as superfícies dos dois perfis na zona circundante à localização do parafuso em alguns modelos não estavam totalmente em contacto

O facto de a curva força-deslocamento referente ao lado exterior do perfil, ou seja, defletómetro esquerdo, não estar tão próxima como a referente ao lado interior deve-se ao facto da posição do próprio defletómetro, pois este está no "lado exterior do perfil", ou seja, está muito mais afastado da alma e a sua leitura dos deslocamentos pode não estar a ser o mais correto.

O facto de se registar um maior deslocamento nos protótipos experimentais deve-se ao comportamento do parafuso. Comportamento esse que não se consegue reproduzir no modelo numérico, pois não se consegue uma rotação tão elevada por parte do parafuso, devido ao facto de não existir rosca no fuso do parafuso. Rosca esta que, nos protótipos experimentais, reentra nas chapas do perfil (permite ter uma ligação mais efetiva) permitindo um maior deslocamento à ligação.

Por forma a ilustrar a consistência dos modelos numéricos são apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15 as deformadas dos protótipos experimentais e dos modelos numéricos para a mesma carga.

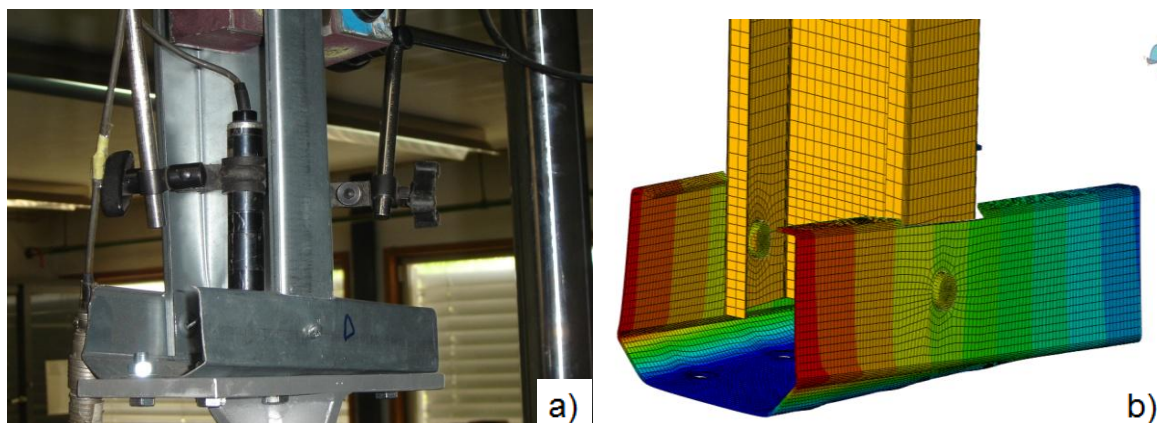


Figura 4.14 - Comparação da deformada entre protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista lateral.

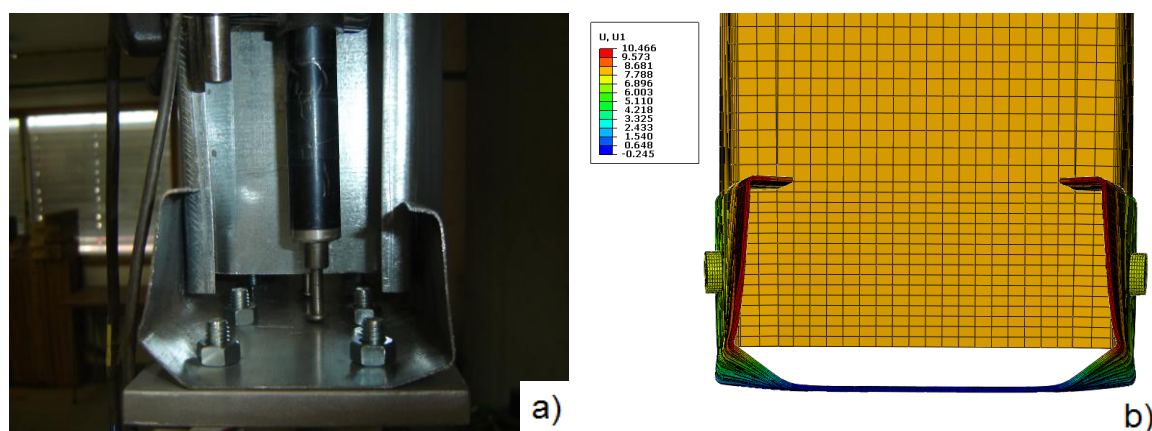


Figura 4.15 - Comparação da deformada entre protótipo experimental (a) e modelo numérico (b), vista frontal.

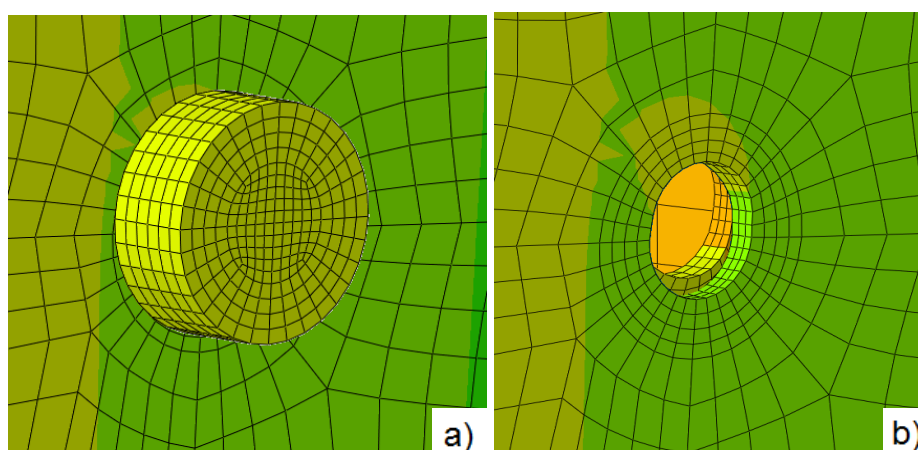


Figura 4.16 - Visualização do deslocamento do parafuso (FAB) (a) e deslocamento dos perfis na zona do parafuso (b).

#### 4.5.2. Modelos utilizando parafusos SFS

A análise referente a esta ligação, em que se utilizam parafusos SFS, é em tudo idêntica ao que se analisou para a ligação anterior, em que se utilizaram parafusos FAB.

No que diz às tensões, estas tomam um valor significativo, mais uma vez, nas zonas plastificadas das chapas dos perfis e na zona circundante aos parafusos, existindo um pico de tensões no fuso do parafuso como se pode ver pela Figura 4.17.



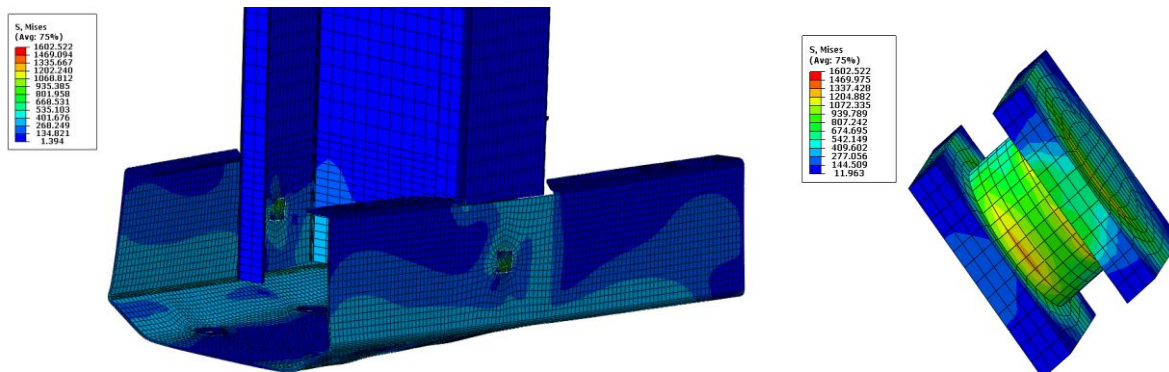


Figura 4.17 - Tensões no modelo numérico.

As zonas plastificadas são evidentes no perfil disposto na base, surgindo mais uma vez "duas linhas bem definidas" tal como nos modelos experimentais. Outra zona que entra em plastificação é a zona em volta do orifício do parafuso nas chapas dos perfis. A Figura 4.18 demonstra essas mesmas zonas.

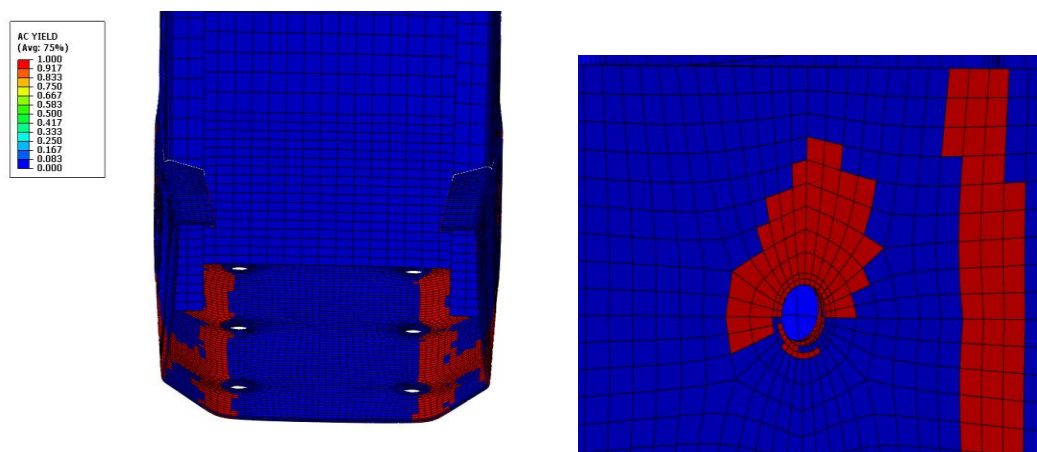


Figura 4.18 - Tensões no modelo numérico.

Evidenciando agora os deslocamentos obtidos no modelo numérico e comparando a força curva-deslocamento com as do protótipo experimental obtém-se os seguintes gráficos expostos na Figura 4.19.

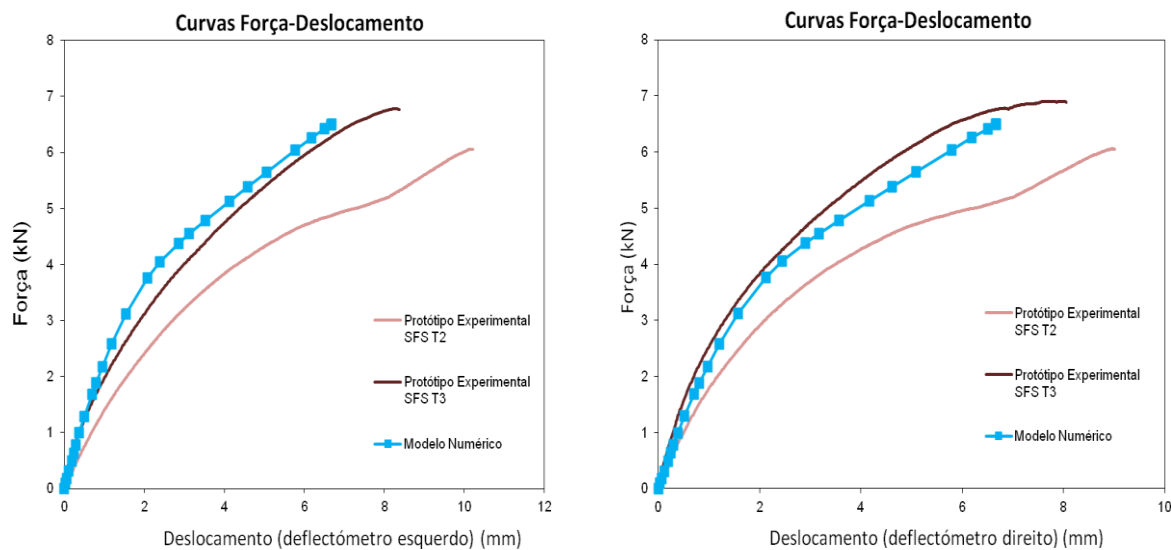


Figura 4.19 - Curvas forças deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos SFS.

A curva força-deslocamento do modelo numérico não é coincidente com a do protótipo experimental devido, mais uma vez, às imperfeições iniciais existentes nos protótipos experimentais (que também não foram consideradas neste modelo numérico). Está é a razão pela qual a curva força-deslocamento do modelo numérico está ligeiramente diferente da do ensaio.

De maneira a demonstrar o comportamento idêntico entre o modelo experimental e numérico apresenta-se as Figuras 4.20 e 4.21, que têm como objetivo evidenciar as semelhanças entre os dois modelos.

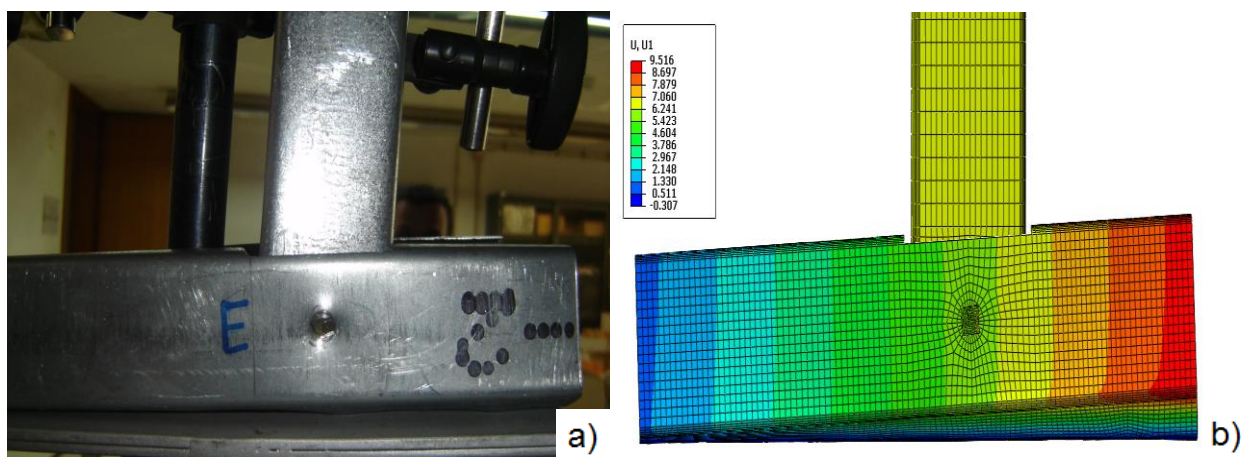


Figura 4.20 - Comparação da deformada entre o protótipo experimental (a)) e modelo numérico (b)), vista lateral.

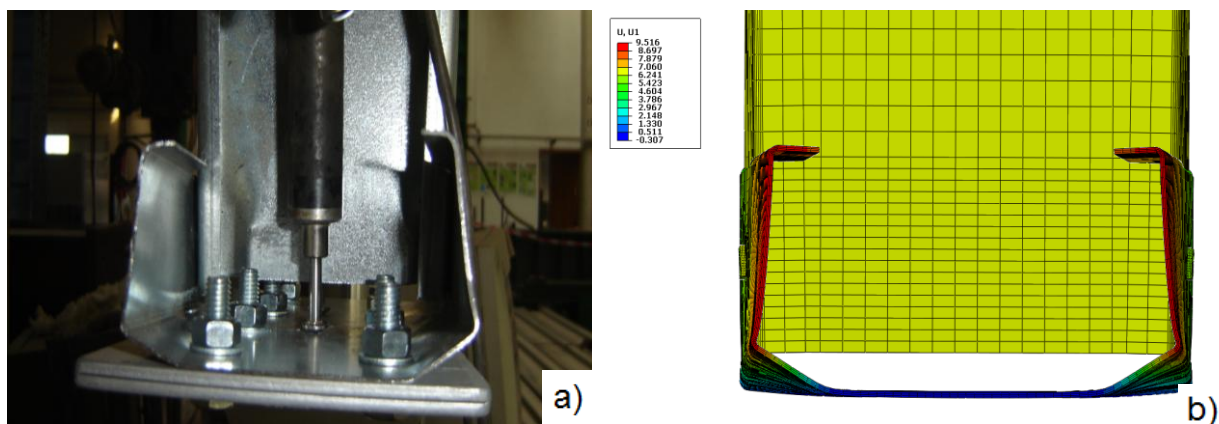


Figura 4.21 - Comparação da deformada entre o protótipo experimental (a) e modelo numérico (b)), vista frontal.

Como conclusão, apresenta-se na Figura 4.22 a curva força-deslocamento referente ao comportamento da ligação, extraída do modelo numérico em que se utilizou parafusos FAB. Este comportamento da ligação irá ser utilizado no capítulo seguinte, quando se pretender simular o comportamento real da ligação. Escolheu-se utilizar o comportamento da ligação com parafusos FAB em detrimento do comportamento da ligação com parafusos SFS devido a se ter obtido uma melhor calibração para este modelo.

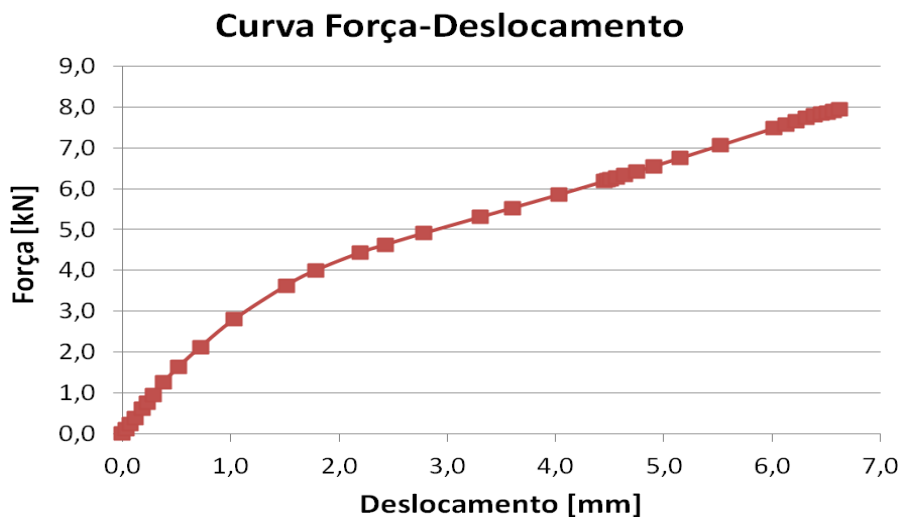


Figura 4.22 - Comportamento real da ligação através da sua curva força-deslocamento.

## **5. ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MODELOS ESTRUTURAIS**

### **5.1. Introdução**

Após o estudo do comportamento isolado da ligação, o objetivo seguinte foi o de simular o comportamento da mesma no painel parede proposto pela CoolHaven.

O objetivo, neste caso, consiste no estudo do comportamento do painel de parede, considerando a influência da ligação no mesmo, para duas situações: i) considerando a existência de excentricidades na ligação entre elementos e ii) não considerando qualquer tipo de excentricidade. Para isso analisou-se os deslocamentos do painel de parede assim como a força horizontal máxima a aplicar no topo do mesmo para diferentes casos de carga.

No presente capítulo, efetua-se uma análise comparativa entre modelos, para os diferentes comportamentos da ligação, tanto para os deslocamentos do painel de parede como para a sua resistência.

Para o estudo do comportamento do painel de parede utilizou-se uma análise não linear, uma vez que a rigidez varia enquanto este se deforma e, por outro lado, devido à introdução do comportamento real da ligação.

### **5.2. Caracterização da Estrutura**

#### **5.2.1. Tipos de secções**

A geometria das secções transversais utilizadas no presente estudo não são comerciais, daí a necessidade de determinar as suas características. Assim sendo recorreu-se ao software de cálculo, onde se reproduziu exatamente a geometria das mesmas, calculando de seguida as suas propriedades.

No que se refere á geometria das secções, estas apresentam três tipologias diferentes: i) perfil "tipo C", ii) perfil "tipo macho", iii) perfil "tipo fêmea". A sua geometria e respetivas características são apresentadas na Figura 5.1.

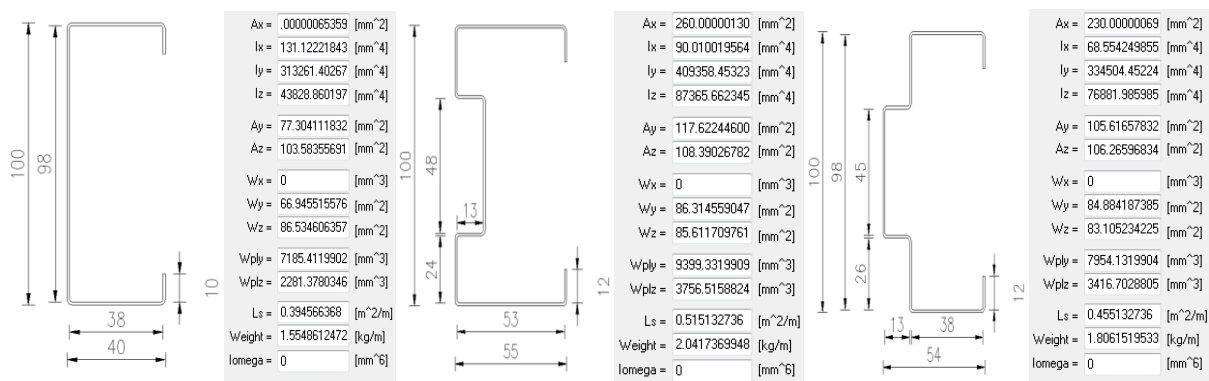


Figura 5.1 - Características das secções: a) perfil "tipo C", b) perfil "tipo macho", perfil "tipo fêmea", respectivamente.

## 5.2.2. Geometria dos modelos

Os painéis de parede, são constituídos por perfis de aço enformados a frio, criteriosamente dispostos de forma a se obter um bom comportamento estrutural, utilizando a menor quantidade de aço possível.

O painel de parede, representado na Figura 5.2, apresenta uma largura de 632 mm e tem uma altura total de 2600 mm. Nas suas extremidades laterais é composto por perfis do "tipo macho" ou "tipo fêmea", com o objetivo de se conseguir um encaixe mais efetivo entre painéis consecutivos.

Dispostos na horizontal, colocam-se perfis igualmente espaçados ao longo do mesmo, de forma a ligar os perfis que se encontram na vertical. Estes têm como objetivo conferir resistência ao painel e posteriormente servem de apoio para fixar o revestimento OSB.

Existe a necessidade, de forma a se obter um bom desempenho estrutural, colocar contraventamentos, sendo também estes constituídos por perfis do "tipo C", dispostos na diagonal. Estes contraventamentos fornecem ao painel uma rigidez e estabilidade pretendida para resistir aos diversos esforços a que vão ser solicitados durante o seu período de vida, nomeadamente para resistir a esforços provocados por sismos (forças horizontais)).

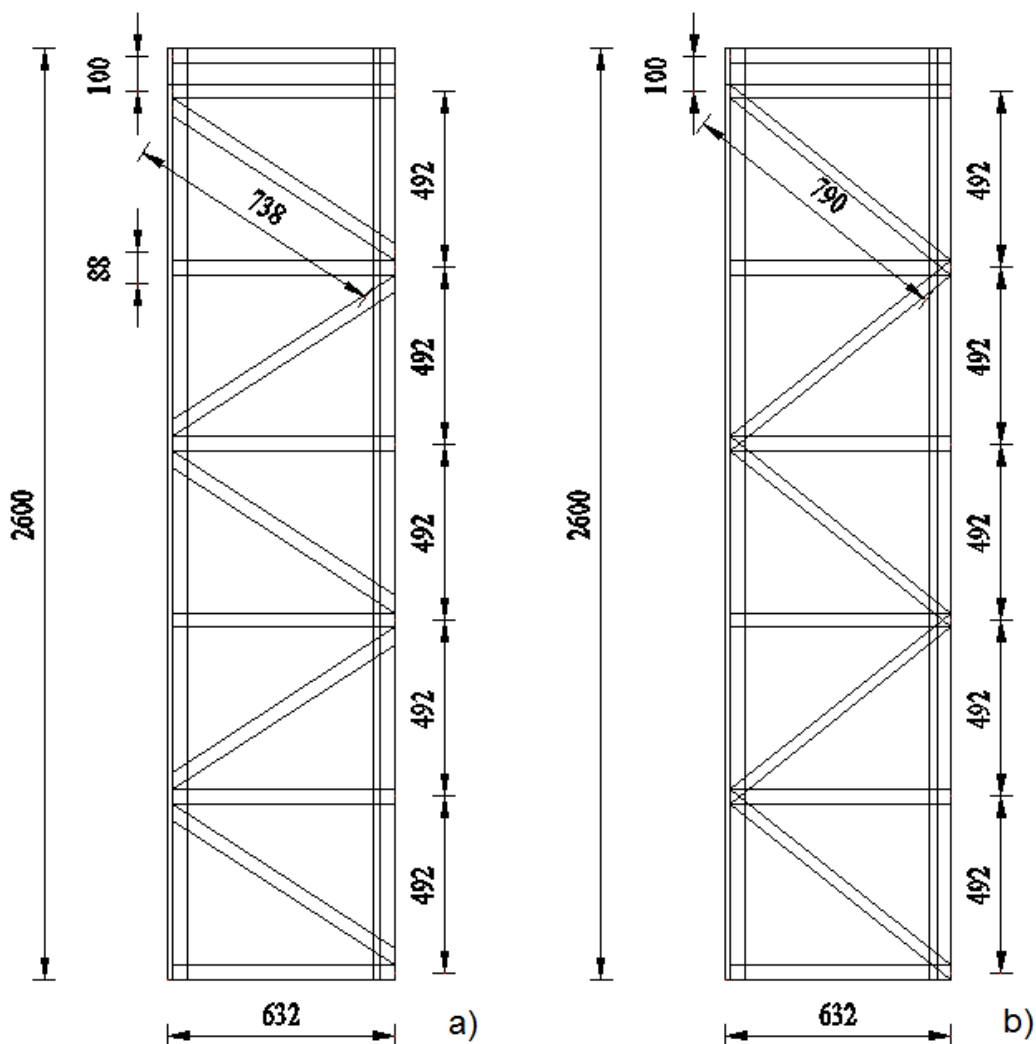


Figura 5.2 - Painel de parede: a) com excentricidades e b) sem excentricidades.

Por fim, os perfis colocados na horizontal do "tipo C", na parte superior do painel têm o objetivo de fazer a ligação com o painel de cobertura e possibilitar a passagem de tubagens e ventilação sem a necessidade de cortes adicionais, já no que diz respeito ao perfil colocado na parte inferior do painel, este tem o objetivo de fazer a ligação com a laje de fundação.

### 5.2.3. Condições de apoio e carregamentos

A definição das condições de apoio é um fator preponderante na modelação do modelo, pois, se estas não forem corretamente consideradas irão conduzir a resultados que não correspondem á realidade. Assim sendo, adotou-se uma solução rotulada (apoiada) na base dos montantes (perfis dispostos na vertical), simulando as condições reais.

---

Referente ao tipo de carregamento, aplicaram-se dois casos de carga. O primeiro, designado de "C1" no Quadro 5.1, em que apenas se aplica uma carga horizontal no topo do painel no valor de 15kN. O segundo caso de carga, designado de "C2" no Quadro 5.1, aplica-se uma carga horizontal no topo do painel no valor de 15 kN (tal como no caso de carga 1) e duas forças pontuais verticais no topo do painel, também no valor de 15kN, cada.

O valor considerado para o carregamento, foi obtido tendo em consideração a combinação fundamental para edifícios residenciais, conduzindo a um valor de 5 KN/m<sup>2</sup>. Tendo em consideração a área de influência do painel de parede chega-se a um valor de 15kN para as cargas pontuais.

### 5.3. Modelos Numéricos

Consideraram-se duas situações ao modelar o painel de parede no programa de cálculo utilizado: i) uma considerando excentricidades, neste modelo os perfis em C dispostos na diagonal (com função de contraventamento no painel) não concorrem no mesmo ponto que os perfis em C dispostos na horizontal e os perfis macho-fêmea que estão na vertical, existindo assim uma pequena excentricidade que tem de ser considerada no modelo; ii) outra situação em que não se considera qualquer excentricidade ou seja, os perfis em C (dispostos na horizontal) e os perfis em C que têm função de contraventamento concorrem num único ponto (em junção com os perfis que estão na vertical). Os dois tipos de painéis de parede considerados podem ser observados na Figura 5.3.

Referindo agora um aspeto importante em todo o comportamento do painel como são as ligações, estas são consideradas como: i) rígidas, ii) com comportamento elástico e iii) com o comportamento real, para cada tipo de modelo.

No programa de cálculo *Abaqus*, procedeu-se à modelação dos painéis de parede com recurso a elementos barra (*wire*) em três dimensões, devido ao tipo de secções utilizadas a atribuir a estes. Visto que, ao modelar com rigor as secções transversais dos perfis, torna-se necessário considerar uma modelação 3D. Posteriormente, uma vez que apenas existe interesse em analisar o painel no seu próprio plano, optou-se por fixar o mesmo, por forma a realizar uma análise somente em duas dimensões.

Na modelação criaram-se todos os elementos barra (perfis) separadamente, refletindo a realidade, atribuindo as devidas secções transversais a cada perfil consoante a sua posição no painel de parede. Esta abordagem permitiu que se pudesse efetuar a modelação das ligações isoladamente.

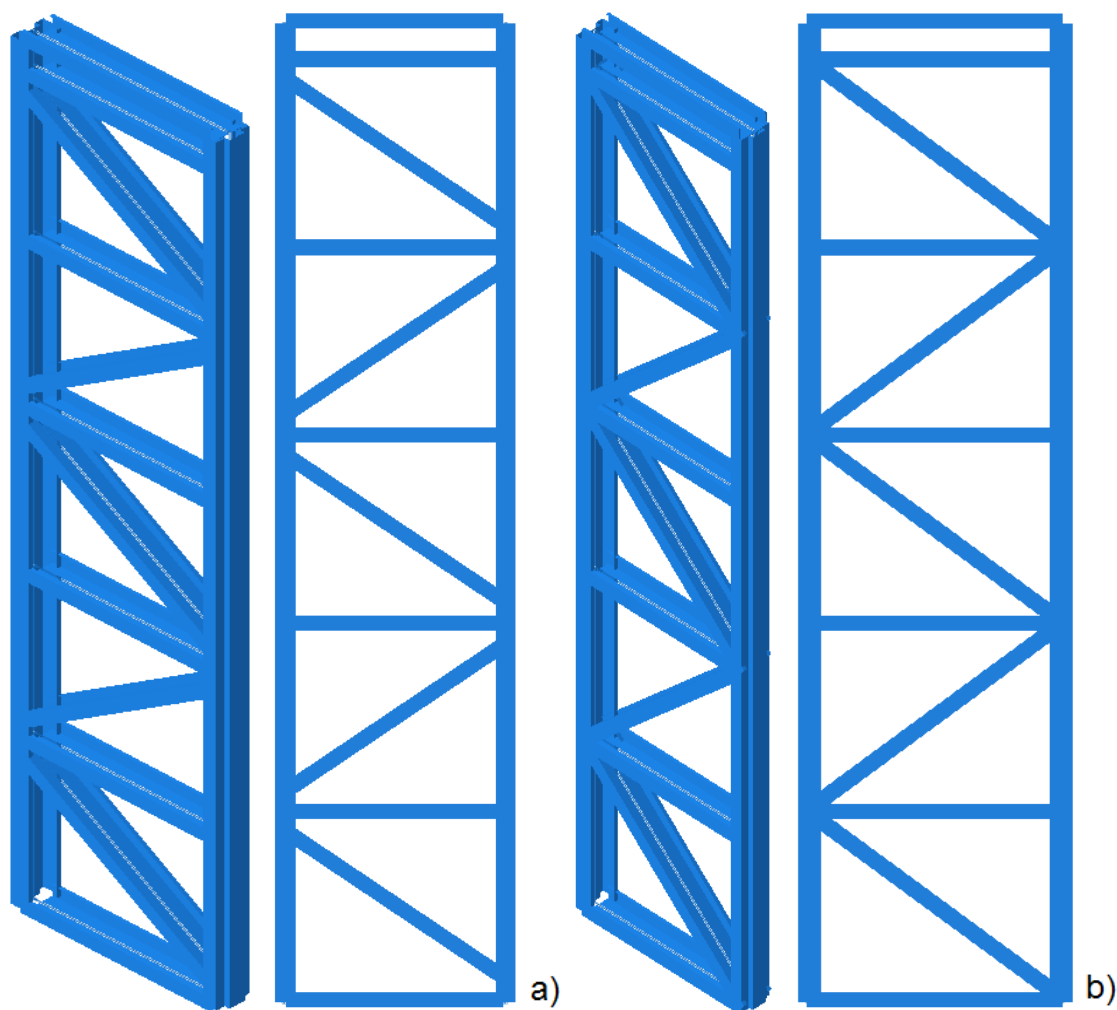


Figura 5.3 - Modelos numéricos: a) com excentricidade e b) sem excentricidades.

Os modelos numéricos considerados no presente estudo são apresentados no Quadro 5.1, onde são indicadas as referências de cada modelo.



Quadro 5.1: Modelos numéricos

		Modelo Com Excentricidades		Modelo Sem Excentricidades	
Tipo de Carregamento		C1	C2	C1	C2
Análise Elástica Linear	Ligação com Comportamento Rígido	A1Ex	A2Ex	A1	A2
	Ligação com Comportamento Elástico ( $k=2000$ N)	B1Ex	B2Ex	B1	B2
	Ligação com Comportamento Real	C1Ex	C2Ex	C1	C2
Análise Não Linear	Ligação com Comportamento Rígido	A1ExNL	A2ExNL	A1NL	A2NL
	Ligação com Comportamento Elástico ( $k=2000$ N)	B1ExNL	B2ExNL	B1NL	B2NL
	Ligação com Comportamento Real	C1ExNL	C2ExNL	C1NL	C2NL

No que diz respeito à simulação das ligações entre perfis, estas foram modeladas com recurso a um "*Connector*", que simula a ligação entre os perfis, especificando o comportamento da mesma para cada grau de liberdade.

O comportamento da ligação reflete-se na rigidez axial do "*Connector*", pois é segundo o eixo longitudinal do perfil que se simula o comportamento da ligação. Considera-se que a ligação é sempre rotulada no plano do painel de parede.

Ao simular o comportamento real da ligação, utilizou-se a curva força-deslocamento, exposta na Figura 4.22. Esta foi extraída do modelo numérico, reproduzido no capítulo 4 referente à análise numérica do comportamento da ligação.

Assumiui-se que a ligação tem um comportamento igual, tanto para esforços de tração como de compressão. Assim sendo, colocou-se no comportamento do "connector" a curva força deslocamento exposta na Figura 5.4.

### Curva Força-Deslocamento

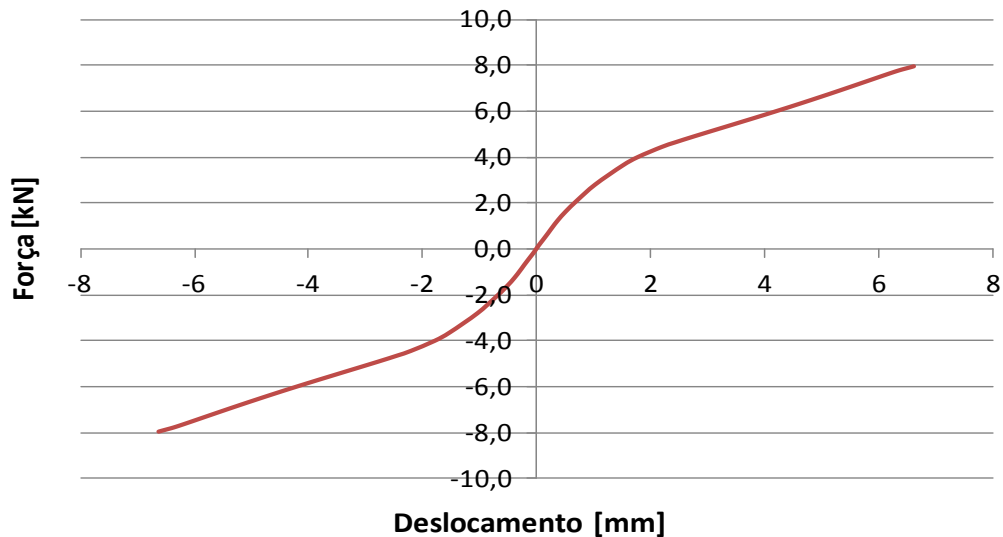


Figura 5.4 - Curva força-deslocamento adotada para simular o comportamento real da ligação através do "connector".

Na análise não linear, considera-se a não linearidade geométrica e material, sendo que para o material considerou-se que este segue uma lei elástica perfeitamente plástica com comportamento bilinear no gráfico tensão-extensão, considerando-se os valores nominais descritos no EuroCodigo 3 parte 1-3. A Figura 5.5 ilustra o comportamento adotado para o material.

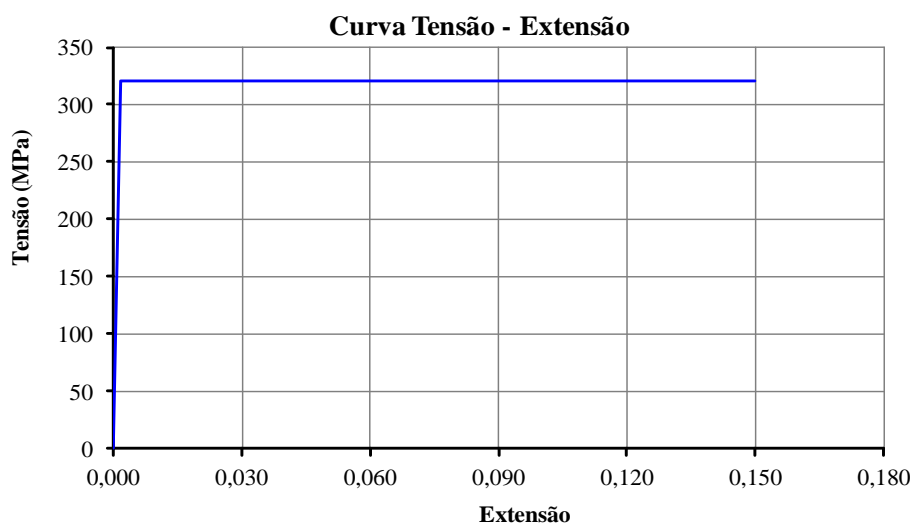


Figura 5.5 - Comportamento adotado para o material.

Ao realizar o estudo dos modelos, assumiu-se como critérios de rotura a plastificação do material e a rotura das ligações.

No estudo deste tipo de estruturas, em que se utiliza perfis de aço enformados a frio, quando se procede à classificação de secções, verifica-se que estão são geralmente de classe 4, sendo no máximo de classe 3, de acordo com o Eurocódigo 3 parte 1.3, devido à sua elevada esbelteza. Assim sendo este tipo de perfis apresentam fenómenos de instabilidade que condicionam todo o comportamento do painel.

Com isto, o estudo dos modelos em causa exigia uma análise de estabilidade local, bem como com a consideração das imperfeições iniciais e locais que têm influência direta no comportamento do respetivo modelo. No entanto, este trabalho não foi possível devido a vários fatores, tais como a limitação em termos de tempo e a necessidade de um estudo prévio da estabilidade estrutural.

## **5.4. Discussão de Resultados**

### **5.4.1. Análise detalhada do modelo com excentricidades**

O objetivo, passa por analisar em detalhe o comportamento do modelo com excentricidades, evidenciando como e onde ocorre a rotura. Verificando as tensões no aço bem como as zona em que este plastifica. Quando se simula o comportamento real da ligação, é importante verificar o comportamento do "Connector", percebendo se este reflete o comportamento pretendido para as ligações, verificando se a força instalada neste bem como o seu deslocamento está de acordo com a curva força-deslocamento introduzida no modelo de cálculo.

Considerando o segundo caso de carga e um comportamento rígido para a ligação (modelo A2ExNL), representa-se na Figura 5.6 as tensões no painel de parede e a zona em que ocorre plastificação do aço.

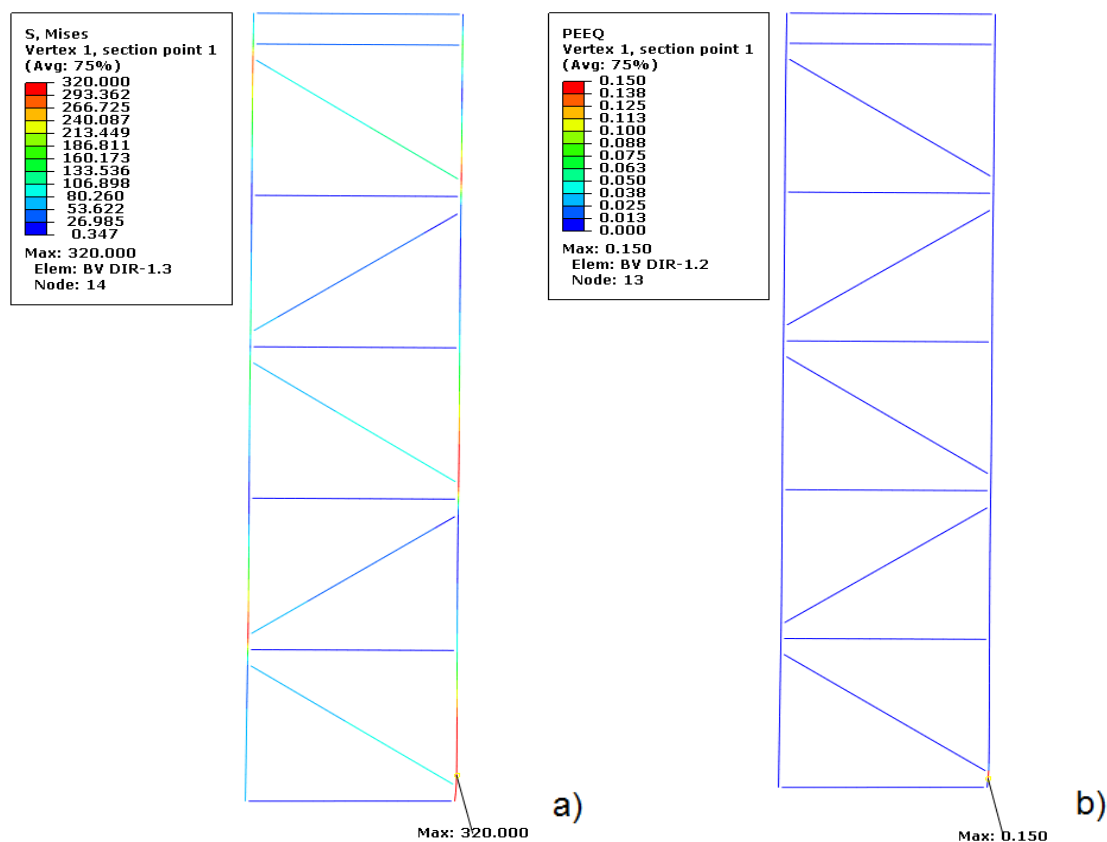


Figura 5.6 - Modelo com comportamento rígido das ligações: a) representação das tensões, b) representação das zonas plastificadas.

Verificou-se que a zona crítica situa-se no canto inferior direito, (na zona da ligação entre perfis e a base do painel). A rotura do painel acontece pela cedência do aço, tendo este atingido a extensão última admitida.

Tendo-se atingido a rotura do painel de parede pela cedência do aço, é relevante verificar que força está instalada na ligação mais esforçada. Esta informação pode ser consultada na Figura 5.7.

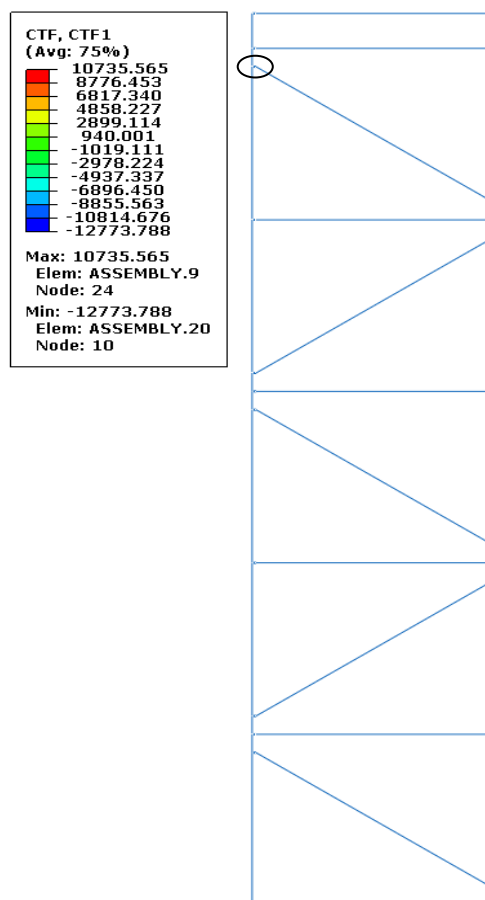


Figura 5.7 - Localização do *Connector* com maior força instalada.

No programa de cálculo, a forma de visualizar os deslocamentos e a força instalada nos *connectors* é através das funções com a designação "*CUE*" e "*CTF*", respetivamente. No presente caso não serão apresentados os deslocamentos, uma vez que a ligação tem um comportamento rígido. Assim sendo apenas se indica qual o *connector* (ligação) com maior esforço instalado na direção axial do mesmo.

Analisando agora o mesmo modelo, mas introduzindo o comportamento real para as ligações (modelo C2ExNL), obtiveram-se os seguintes resultados em termos de tensões, expostos na Figura 5.8.

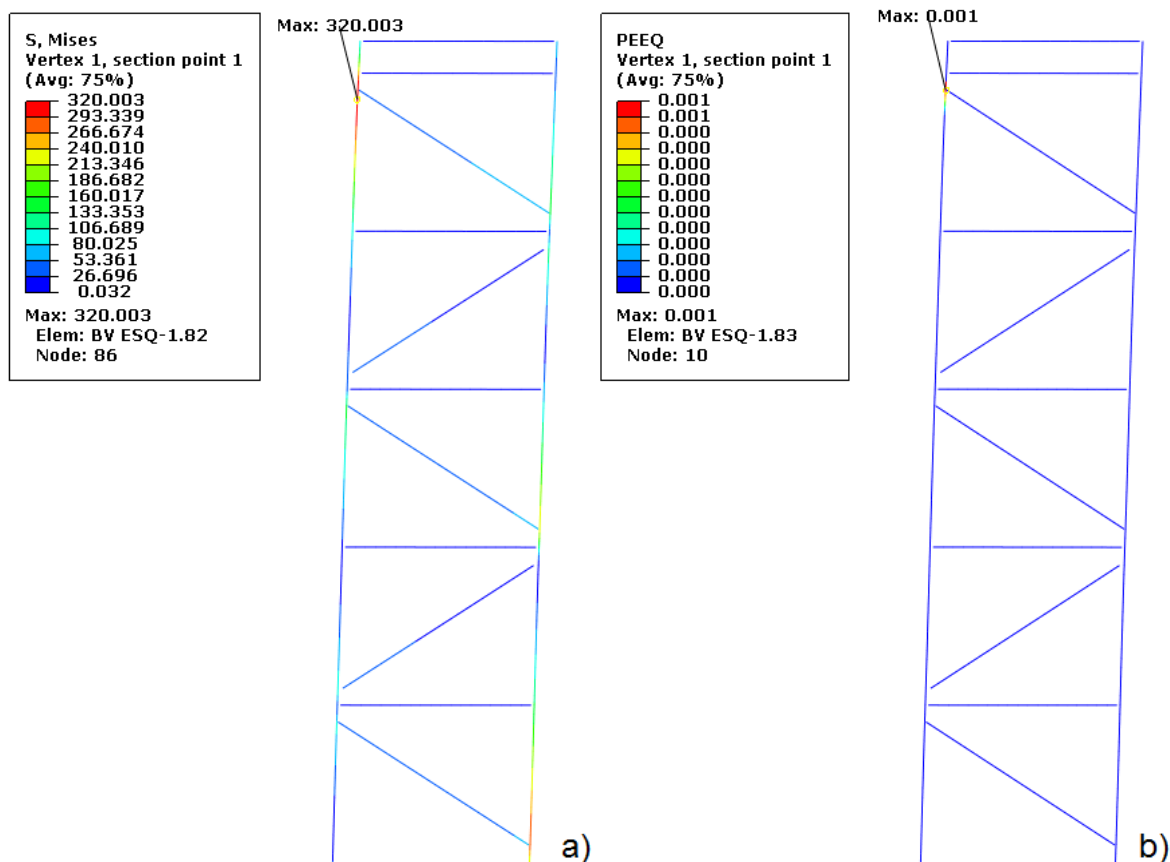


Figura 5.8 - Modelo com comportamento real das ligações: a) representação das tensões, b) representação das zonas plastificadas.

Para este modelo, ao se analisar as tensões, verifica-se que o aço está no patamar de cedência, ou seja, regista-se uma pequena plastificação por parte deste. Para este modelo, em que se introduziu o comportamento real da ligação através da sua curva força-deslocamento, a rotura acontece pelas ligações, ou seja, os *connectors* atingem o deslocamento máximo que estes podem atingir, assim como se verifica que foi alcançada a forma máxima que estes podem suportar, como se pode verificar pela Figura 5.9.

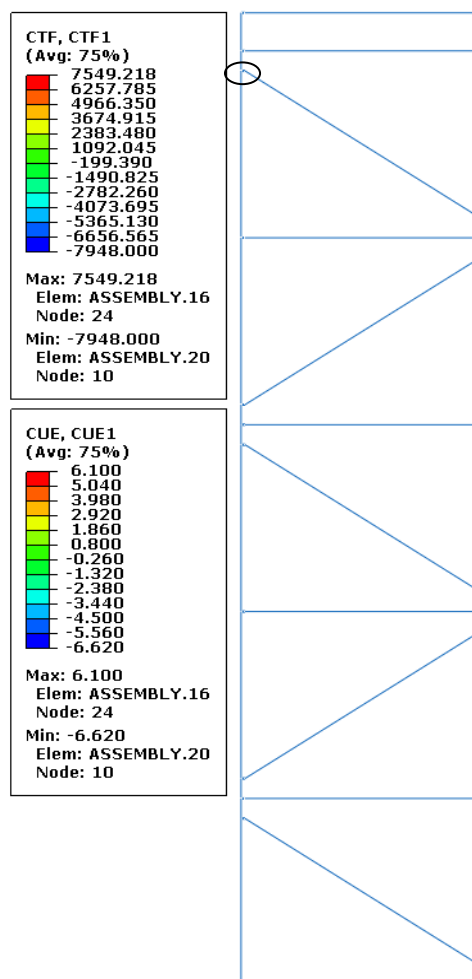


Figura 5.9 - Localização do *Connector* mais solicitado em termos de esforços e deslocamentos.

Ao observar a figura anterior, verifica-se que a ligação (conector) mais esforçada se situa na parte superior do painel de parede, sendo o comportamento deste condicionado pela resistência da ligação, esta por sua vez atinge a rotura a trabalhar à compressão, na zona de ligação entre um perfil com funções de contraventamento e o montante do mesmo.

De seguida procede-se à análise, que diz respeito à verificação que os "*connectors*" que simulam o comportamento real da ligação, estão de facto a cumprir com o seu objetivo.

Assim sendo extraiu-se, do "*connector*" mais esforçado, a curva força deslocamento que este apresenta ("output"), comparando-a de seguida com a curva força deslocamento introduzida para este simular o comportamento real da ligação ("input"). A Figura 5.10 ilustra o que foi referido anteriormente.

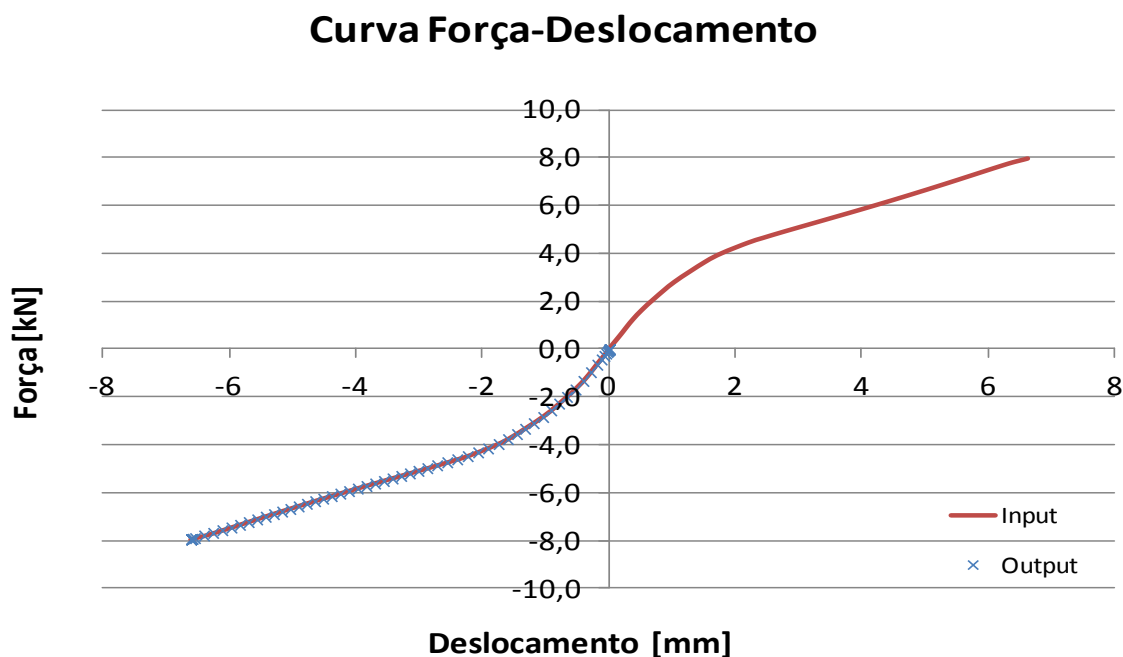


Figura 5.10 - Comparação do comportamento do *connector* mais esforçado com o comportamento real da ligação, através das respetivas curvas força deslocamento.

Como se comprova pela figura 5.10, o *connector* tem exatamente o comportamento pretendido, uma vez que este reproduz o comportamento real da ligação que se pretende simular, pois as duas curvas força deslocamento estão coincidentes. Prova-se também, que o *connector* mais esforçado está exclusivamente em compressão.

Uma última nota para referir que o modelo C1ExNL atinge o colapso devido à cedência das suas ligações, mas com a particularidade de o aço estar em regime elástico, ou seja, aquando do colapso do presente modelo não se registou qualquer plastificação por parte deste, registando-se uma tensão máxima no aço de 294MPa, no topo do modelo.

#### 5.4.2. Comparação do comportamento dos diversos modelos

O presente subcapítulo analisa os resultados do estudo desenvolvido para o comportamento do painel de parede, referente aos diversos modelos apresentados no Quadro 5.1.

Ao efetuar uma análise linear aos modelos em estudo, pode-se concluir desde logo que os modelos em que não se considera a existência de excentricidades apresentam um melhor comportamento para todas as situações consideradas. Pois registaram-se deslocamentos, no topo do mesmo, menores em comparação com os deslocamentos no mesmo ponto para o



painel com excentricidades (para iguais situações de carregamento e comportamento das ligação).

Para o mesmo tipo de comportamento da ligação, não existe diferença no que diz respeito ao caso de carga, tanto para os modelos com excentricidade e sem excentricidade.

Passando de seguida a analisar o comportamento dos modelos para uma análise não linear, em que o objetivo passa por determinar a força máxima horizontal que se pode aplicar no topo do painel de parede. A análise será efetuada com base em curvas força-deslocamento, confrontando o comportamento dos diversos tipos de modelos.

Neste primeiro grupo de quatro gráficos, expostos nas Figuras 5.11 e 5.12, efetua-se a comparação entre modelos com excentricidades e modelos sem excentricidades.

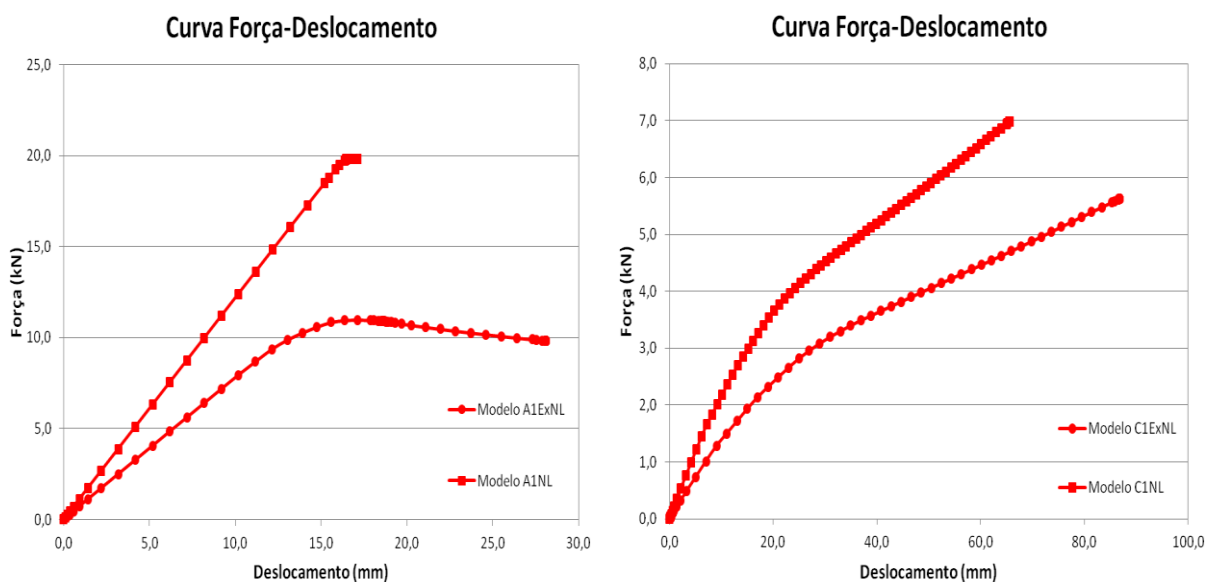


Figura 5.11 - Gráficos curva força-deslocamento para o primeiro caso de carga.

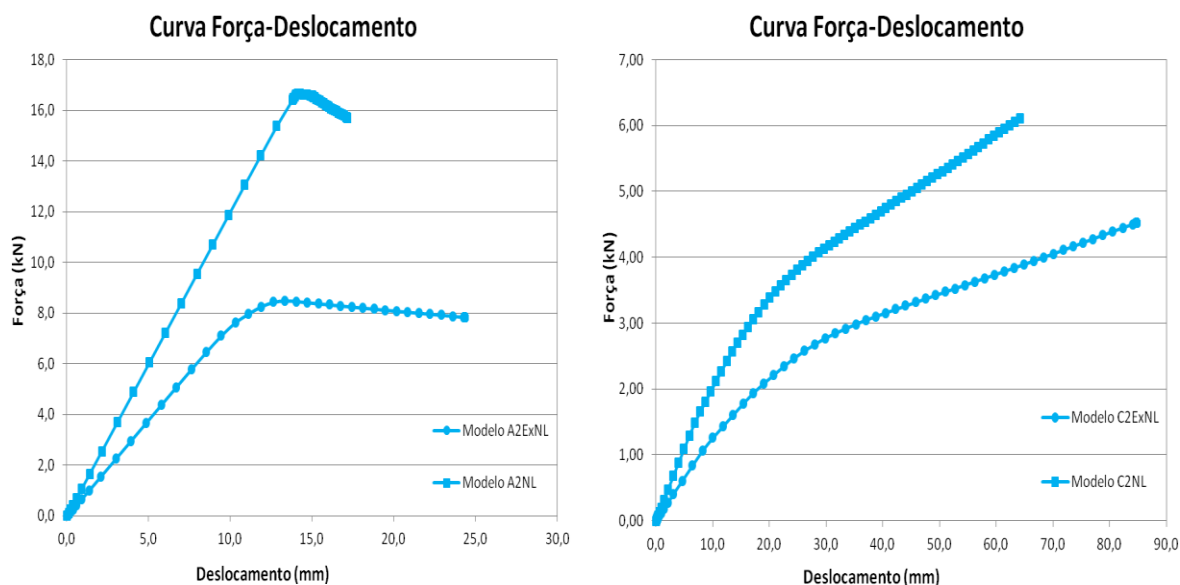


Figura 5.12 - Gráficos curva força-deslocamento para o segundo caso de carga.

Por observação da Figura 5.11, pode-se verificar que, para o mesmo caso de carga, o comportamento do painel é muito diferente quando se simula um comportamento rígido das ligações. Sendo as ligações rígidas, estas não permitem grandes deslocamentos e para o modelo sem excentricidades consegue-se obter grande resistência com pequenos deslocamentos em comparação com o modelo com excentricidades. Neste ultimo, desenvolvem-se grandes esforços transversais na zona da excentricidade, atingindo-se a extensão ultima do aço adotada para o comportamento não linear deste, dando-se a rotura precisamente na zona da excentricidade. Neste modelo obtém-se menor resistência mas com maiores deslocamentos. Já para o comportamento real das ligações, os dois tipos de modelos apresentam o mesmo padrão de comportamento, apesar de o modelo sem excentricidades ter, mais uma vez, maior resistência mas agora com pouca diferença no que diz respeito aos deslocamentos.

Atendendo há Figura 5.12, em que se aplica o segundo caso de carga, pelo facto de os perfis estarem em compressão, todos os modelos apresentam menor resistência, bem como menores deslocamentos em relação aos gráficos da Figura 5.11. Nesta análise regista-se maior diferença entre os dois tipos de modelos estudados, tanto em termos de resistência como de deslocamentos.

No segundo grupo de quatro gráficos, expostos nas Figuras 5.13 e 5.14, efetua-se a comparação entre os dois casos de carga considerados.

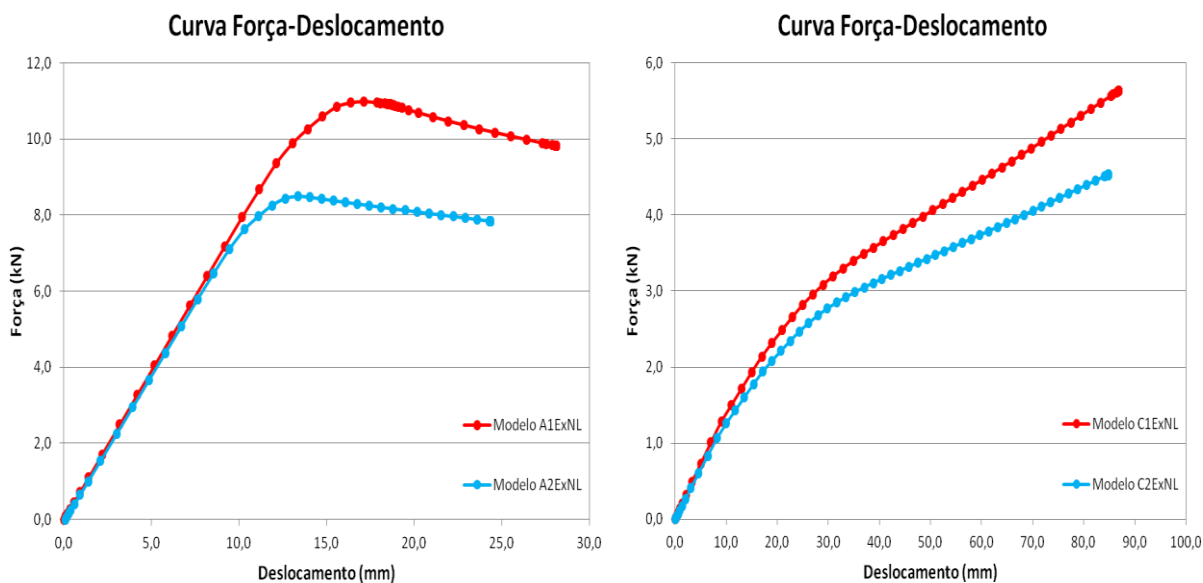


Figura 5.13 - Gráficos curva força-deslocamento para o modelo com excentricidades.

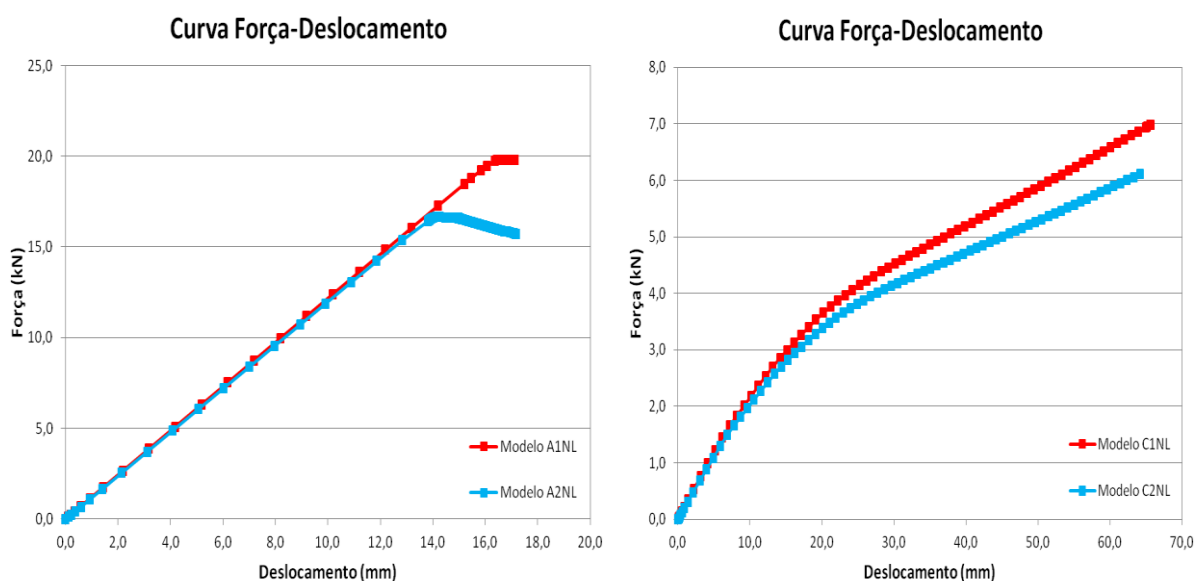


Figura 5.14 - Gráficos curva força-deslocamento para o modelo sem excentricidades.

Neste grupo, alterando apenas o carregamento em cada gráfico, os modelos apresentam o mesmo tipo de comportamento, evidenciando que o segundo caso de carga é o mais desfavorável, atingindo para este menores resistências mas sem grande diferença na amplitude dos deslocamentos.

Por último expõem-se, nas Figuras 5.15 e 5.16, os gráficos com as curvas força deslocamento, em que se pretende realçar a resposta do modelo quando apenas varia o tipo de comportamento das ligações entre os perfis.

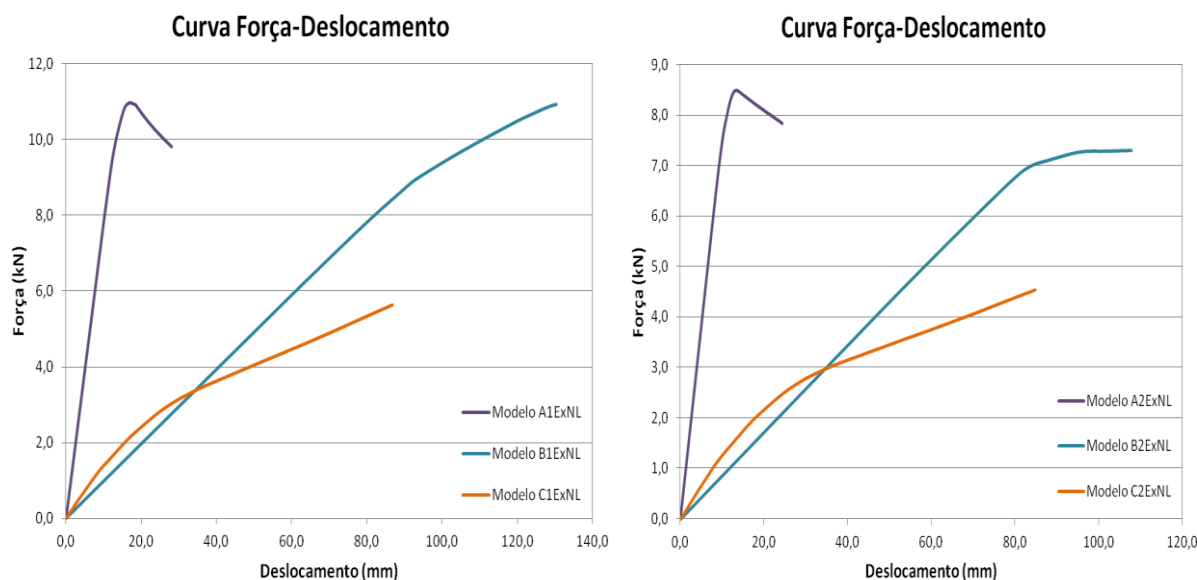


Figura 5.15 - Gráficos curva força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação para o modelo com excentricidades.

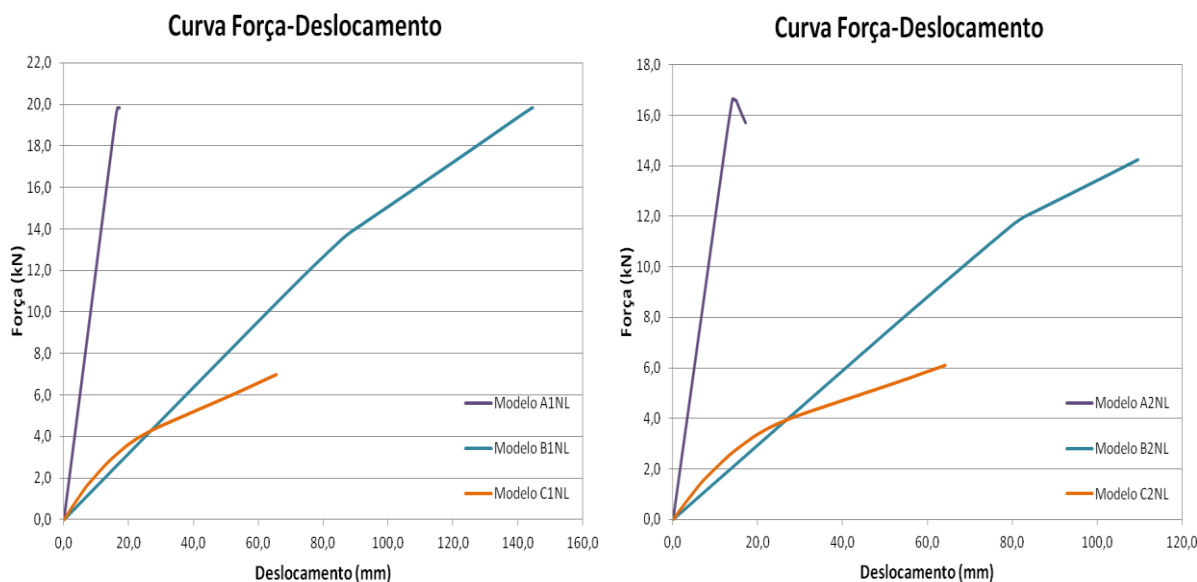


Figura 5.16 - Gráficos curva força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação para o modelo sem excentricidades.

Verifica-se, que para os dois tipos de modelos e para os dois tipos de casos de carga (nos 4 gráficos anteriores), que existe uma grande disparidade em termos de comportamento dos modelos quando se altera o comportamento das ligações entre perfis. Fica claramente evidenciado que a rigidez e deformabilidade das mesmas têm grande influência no comportamento e conseqüentemente na capacidade de carga que os dois modelos em estudo conseguem suportar.

A Figura 5.17, destaca a diferença entre os modelos em estudo para um comportamento rígido e real da ligação.

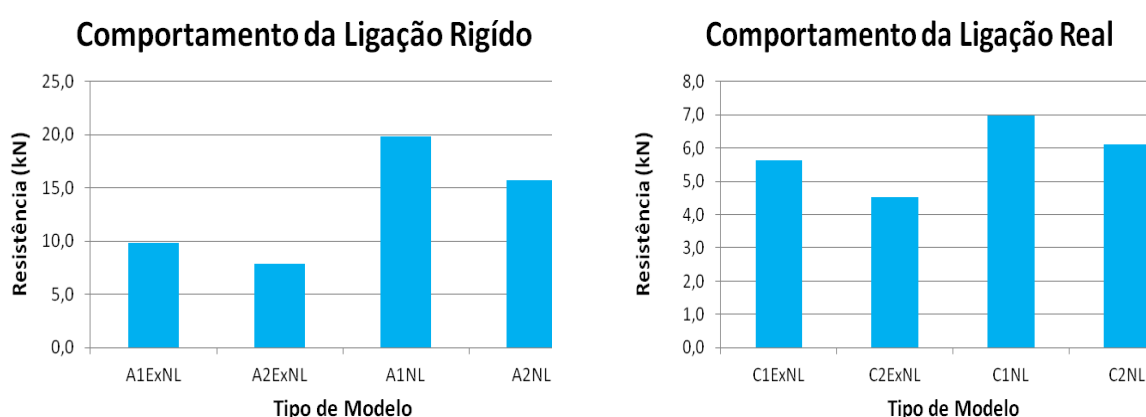


Figura 5.17 - Gráficos de comparação de resistência, para um comportamento de ligação rígido (esquerda) e real (direita).

Uma primeira análise à figura anterior, verifica-se que o modelo C2ExNL é o que apresenta uma menor resistência, em contraste com o modelo A1NL. Como anteriormente se verificou nas figuras 5.16 e 5.17 os modelos com um comportamento rígido das ligações apresentam uma maior capacidade de carga. É também evidente que os modelos com excentricidades têm menor resistência em comparação com os modelos sem excentricidades, para ambos os casos de carga.

Verifica-se que existe uma diferença, em termos de resistência, de praticamente 15 kN entre os modelos A1NL e C2ExNL. Entre os modelos que representam mais fielmente o comportamento do painel de parede, ou seja, entre os modelos A2ExNL e C2ExNL existe uma diferença de 3.3 kN.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Conclusões

A presente dissertação procurou analisar o comportamento mecânico para dois tipos de configurações de painéis de parede constituídos por perfis de aço enformados a frio, propostos pela empresa CoolHaven. Procurou-se ainda perceber a influência que as ligações têm para o comportamento dos mesmos.

Os ensaios experimentais realizados às ligações entre perfis de aço leve, permitiram perceber qual a influência de dois tipos de parafusos no comportamento das mesmas. Nesta fase, conclui-se que tanto o diâmetro, como as configurações da rosca e da cabeça dos parafusos influenciam quer a resistência, quer a deformação da ligação, através do esmagamento da chapa dos perfis.

Estes ensaios serviram de base para a calibração dos modelos numéricos reproduzidos no programa de cálculo, sendo essencial o tipo de análise não linear, assim como o tipo e tamanho de elementos finitos utilizados.

Durante a modelação e calibração dos modelos numéricos referentes às ligações, concluiu-se que as zonas de contacto entre perfis, assim como as zonas entre as chapas dos perfis e o parafuso são essenciais para uma correta modelação.

A análise do comportamento do painel de parede permitiu constatar que é essencial caracterizar corretamente a ligação entre perfis que se pretende implementar no painel de parede, pois esta é uma peça chave no comportamento do mesmo, tanto a nível de resistência, como em termos de amplitudes de deslocamentos. Nesta etapa foi essencial o estudo realizado sobre o comportamento real que a ligação apresenta. Constatou-se que a adoção de um comportamento rígido ou elástico para a ligação implicaria, de uma forma considerável, numa incorreta análise do painel de parede.

Verificou-se que quanto mais rígido for o comportamento da ligação, melhor o comportamento do painel. O aumento da rigidez na ligação consegue-se com a utilização de reforços na zona das ligações ou com o aumento da espessura das chapas dos perfis, uma vez que ao aumentar a espessura da chapa aumenta-se a resistência ao esmagamento desta por

parte dos parafusos, o que por sua vez vai reduzir os deslocamentos, pois a chapa não permite um esmagamento tão elevado, conseguindo-se uma ligação mais rígida.

No que se refere ao tipo de painel de parede, conclui-se que um painel em que não existam excentricidades na zonas das ligações, ou seja, no caso ideal em que todas as ligações entre perfis concorrem num mesmo nó, estarem coincidentes num único ponto, apresenta um melhor comportamento, tanto em termos de resistência, como de deslocamentos. Assim sendo, existe todo o interesse em estudar e implementar um painel de parede em que se consiga reduzir, ou até mesmo eliminar, as excentricidades das ligações.

Resumindo, as principais contribuições deste trabalho passam pelo aumento do conhecimento de comportamento de painéis de parede constituídos por perfis de aço enformados a frio desde a fase elástica até à rotura. Foi dada especial relevância ao comportamento das ligações entre perfis.

Este trabalho contribui também para o desenvolvimento de modelos numéricos, que representam a ligação entre perfis de aço enformados a frio através de elementos sólidos (*solid*), bem como o desenvolvimento de modelos numéricos do painel de parede através de elementos barra (*wire*).

No decorrer deste trabalho foi ainda possível compreender a metodologia do método de elementos finitos bem como a importância que a escolha do tipo de elementos finitos tem na análise estrutural, quer em modelação com elementos sólidos (*solid*) ou na modelação com elementos barra (*wire*). Este trabalho tornou-se enriquecedor pelo facto de utilizar um programa de cálculo bastante complexo mas de inquestionável importância no tipo de análises efetuadas assim como a sua capacidade de cálculo.

## 6.2. Propostas de Trabalhos Futuros

Para completar o estudo efetuado nesta dissertação seria importante abordar os seguintes aspetos em trabalhos futuros:

- i) Determinar qual poderia ser a contribuição, em termos de resistência, das placas de revestimento OSB, em particular para forças horizontais.
- ii) Estudar o painel de parede com ligações soldadas (por ponto ou por fricção, através de meios automáticos).
- iii) Modelar todo o painel de parede com elementos sólidos no programa de elementos finitos (Abaqus), de forma a captar todos os modos de instabilidade e de encurvadura, até à rotura do mesmo.

- iv) Estudar a resistência do painel de parede aquando da aplicação de forças fora do seu plano.
- v) Modelar a ligação com o objetivo de reproduzir fielmente o comportamento do parafuso, modelando a sua rosca e toda rotação que este sofre, (demonstrada nos ensaios experimentais).
- vi) Estudar outras configurações para o painel de parede, procurando soluções alternativas para diferentes exigências estruturais.
- vii) Aplicar a mesma metodologia de estudo para os painéis de cobertura.
- viii) Estudar a ligação entre painéis de parede, encaixe entre perfis do "Tipo macho" e "Tipo fêmea".
- ix) Estudar o encaixe entre painel de parede e painel de cobertura.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chou S. M., Rhodes J., (1995) "Review and Compilation of Experimental on Thin-Walled Structures", pp. 47-67.

Clough R., (2004) "Early history of the finite element method from the view point of pioneer". *International journal of numerical Methods in Engineering Fracture Mechanics*, 60: 283 – 287.

Communication from the European Commission: "The Competitiveness of the Construction Industry" COM (97) 539, 1997.

Dassault Systèmes, (2009) "Getting started with Abaqus: interactive edition".

Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R., (2012) "Design of Steel Structures Part 1-3: Design of Cold-formed Steel Structures.

Eray B., Cagatay A., (2012). "Behaviour of cold-formed steel wall panels under monotonic horizontal loading".

Fena R., (2011). "Interação entre instabilidade local e distorcional em colunas de aço enformadas a frio de secção em "HAT"". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico.

Fulop L. A., Dubina D., (2004). "Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part I: Experimental research", *Thin-Walled Structures*, Volume 42, Issue 2.

Gherzi A., Landolfo R., e Mazzolani F. M. (2002). "Design of Metallic cold-formed Thin-walled Members", Spon Press, New York.

Lemoine B., (2006). "Steel, an ecological construction material for a sustainable Development".

- 
- CEN - Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold formed members and sheeting, Commission of the European Communities, 2006.
- NP EN 10002-1, "materiais metálicos - Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente", IPQ, 2006
- Oliveira S., (2010). "Modelação e simulação numérica em estruturas aeronáuticas reforçadas". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Universidade de Aveiro.
- Oliveira V., (2012). "Desenvolvimento de uma linha de fabrico de módulos parede para casas CoolHaven". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Pinto A., (2010). "Estabilidade Local de Perfis de Aço Enformados a Frio". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico.
- Reia A. J., Camotim D., (2001). "Estabilidade Estrutural", McRow Hill de Portugal.
- Silva L. S. e Gervásio H., "A sustentabilidade do Aço", V Congresso de Construção Metálica e Mista.(2005)
- Silva L. S. e Gervásio H., (2007). "Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados", CMM, Coimbra.
- Silva L. S., Gervásio H., Santiago A., (ano?). "Manual de Ligações Metálicas", CMM, Coimbra.
- Silva L. S., Gervásio H., Simão P., "Dimensionamento de elementos metálicos com perfis enformados a frio de acordo com a parte 1.3 do Eurocódigo 3".
- 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 enformados a frio, Aço-Inox e Alumínio, 1º curso de Mestre em construção Metálica e Mista - Instituto Superior Técnico.

Veríssimo H., (2008). "Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio de Acordo com o Eurocódigo 3". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico.

Vieira F.,(2013). "Análise experimental e numérica de estruturas em aço enformado a frio". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Walker A. C., (1975). "Design and Analysis of cold-formed Section". John Wiley & Sons, New York - Toronto.

Yu W. W., (2010). " Cold-formed Steel Design". John Wiley, New York.

### **Sites consultados**

CoolHaven@2013 - <http://www.coolhaven.pt>. Acedido em Abril e Maio de 2013.