



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Miguel Malheiro Araújo

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COLUNAS DE
AÇO ENFORMADO A FRIO COMPOSTAS POR
TRAVESSAS À COMPRESSÃO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro e pelo Professor Doutor Rui António Duarte Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021



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

Miguel Malheiro Araújo

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COLUNAS DE AÇO ENFORMADO A FRIO COMPOSTAS POR TRAVESSAS À COMPRESSÃO

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COLD FORMED STEEL BATTENED COLUMNS UNDER COMPRESSION

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pelo Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro e pelo Professor Doutor Rui António Duarte Simões

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 7 de Julho de 2021

AGRADECIMENTOS

Prestes a concluir esta fase importante da minha vida, gostaria de agradecer a todos os que durante este tempo contribuíram para o meu percurso académico.

Começo por agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro e Professor Doutor Rui António Duarte Simões por toda a disponibilidade e auxílio prestado no decorrer desta dissertação.

A todas as pessoas que colaboraram na realização dos provetes e dos ensaios pela prontidão com que se dispuseram a realizar essas tarefas.

Um agradecimento a todos os colegas de faculdade em particular aos colegas de perfil pela ajuda ao longo deste último ano.

A toda a minha família, nomeadamente aos meus pais e irmã.

Um obrigado à minha namorada por todo o apoio, incentivo e carinho ao longos destes anos.

Por fim, gostaria de agradecer à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo apoio ao projeto de investigação POCI-01-0145-FEDER-03185 - INNOCFSCONC - Solução estrutural híbrida inovadora com recurso a aço enformado a frio e betão leve, financiado por fundos do FEDER, Programa – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT.

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional



RESUMO

O recurso à utilização de aço enformado a frio em elementos estruturais principais tem aumentado significativamente nas últimas décadas, mostrando-se atualmente como uns dos materiais mais versáteis e capazes de responder aos desafios existentes em termos de sustentabilidade. As colunas compostas são amplamente utilizadas em estruturas, quando as secções individuais não são suficientes para resistir às cargas de projeto. No âmbito desta dissertação de mestrado pretendeu-se desenvolver um estudo experimental sobre o comportamento mecânico de colunas de aço enformado a frio compostas por travessas sujeitas a esforços de compressão, avaliando-se diversos parâmetros relevantes para o seu comportamento.

Foi realizada uma campanha em colunas curtas, variando diversos parâmetros, tais como a esbelteza dos elementos estudados, considerando o rácio h/b . O grau de conexão entre os perfis individuais foi também analisado, de modo a avaliar o número de parafusos auto-perfurantes necessários (e respetivo espaçamento) de modo a garantir uma ação compósita entre os perfis individuais. Além do comportamento mecânico foram também identificados e avaliados com rigor todos os modos de colapso observados, nomeadamente a existência de fenómenos de encurvadura local. Possíveis interações entre os modos de encurvadura foram também analisadas. Após a realização dos ensaios experimentais e tratamento de resultados, os mesmos foram comparados com as previsões obtidas através da metodologia para colunas de aço compostas por travessas à compressão de acordo com a EN 1993-1-1, com as necessárias alterações, considerando que os perfis de aço enformado a frio utilizados são de classe 4. Os cálculos das áreas efetivas foram realizados para o perfil individual, segundo a EN 1993-1-3, usando o método das larguras efetivas. Os trabalhos foram realizados no âmbito do projeto de investigação INNOCFSCONC.

Palavras-chave: coluna, secções compostas fechadas, aço enformado a frio, sigma, encurvadura local, análise experimental.

ABSTRACT

The use of cold-formed steel (CFS) in primary structural elements has increased significantly in recent decades, currently showing itself as one of the most versatile materials and capable of responding to the existing challenges in terms of sustainability. Built-up columns are widely used in CFS structures to obtain adequate load-bearing capacity when individual sections are not sufficient to withstand design loads. In the scope of this master's dissertation, it was intended to develop an experimental study on the mechanical behavior of Cold-Formed steel battened columns, evaluating several relevant parameters for their behavior.

A campaign was carried out in short columns, varying several parameters, such as the slenderness of the studied elements, h/b ratio. The degree of connection between the individual profiles was also analysed, to assess the number of self-drilling screws needed (and their spacing) to ensure appropriate composite action between the individual profiles. In addition to the mechanical behavior, all observed collapse modes were also identified and rigorously evaluated, namely the existence of local buckling phenomena. Possible interactions between buckling modes were also analysed. After carrying out the experimental tests and processing the results, they were compared with the predictions obtained through the methodology for steel columns composed of compression beams according to EN 1993-1-1, with the necessary changes, considering that the Cold-formed steel profiles used are of class 4. The calculations of the effective areas were carried out for the individual profile, according to EN 1993-1-3, using the method of effective widths. The work was carried out within the scope of the INNOCFSCONC research project.

Keywords: columns, build up sections, cold-formed steel, sigma, local buckling, experimental analysis.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
ABREVIATURAS	ix
SIMBOLOGIA	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais e motivação	1
1.2 Objetivo da dissertação	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Considerações gerais.....	3
2.2 Aço enformado a frio como elemento estrutural	4
2.2.1 Processo de fabrico	4
2.2.2 Tipos de elementos estruturais	5
2.2.3 Vantagens e desvantagens	7
2.2.4 Imperfeições geométricas	7
2.2.5 Tensões residuais.....	9
2.3 Colunas de aço enformado a frio à temperatura ambiente.....	10
2.3.1 Comportamento estrutural	10
2.3.2 Dimensionamento segundo a EN 1993-1-3.....	13
2.3.3 Estudos realizados em elementos em AEF e respetivas conclusões	18
3 CAMPANHA EXPERIMENTAL	27
3.1 Programa experimental	27
3.2 Esquema de Ensaios.....	30

3.3	Montagem e instrumentação das colunas	31
3.4	Procedimento experimental	34
3.5	Caracterização mecânica.....	35
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	36
4.1	Modos de encurvadura.....	36
4.2	Capacidade de carga	42
4.3	Evolução das extensões durante a fase de compressão.....	45
4.4	Deslocamentos horizontais e verticais	52
4.5	Comparação dos resultados experimentais com o EC3	54
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	58
	REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Linha industrial (AMOB@, 2021) e (b) Processo de perfilagem dividido em fases (adaptado de Rhodes, 1991).	4
Figura 2.2 – (a) Quinadora (FUTURENG@, 2021b) e (b) Processo de quinagem dividido em fases (adaptado de Rhodes, 1991).	5
Figura 2.3 – (a) Painéis para cobertura, (b) Painéis para fachada e (c) Painéis laje mista (adaptado de Yu, 2000).	5
Figura 2.4 – Formas típicas de perfis para secções enformadas a frio (adaptado de EN 1993-1-3, 2006).	6
Figura 2.5 – (a) e (b) Construção em aço leve (LSF) (Pinnacle@, 2020).	6
Figura 2.6 – Representação dos modos de encurvadura (Rahnavard et al., 2021).	8
Figura 2.7 – Representação da soma que origina as tensões residuais (adaptado de Schafer & Peköz, 1998).	9
Figura 2.8 – Tensões residuais médias como percentagem de f_y (Schafer & Peköz, 1998).	9
Figura 2.9 – Encurvadura local e distorcional para uma secção simples à compressão (Dubina et al., 2012).	11
Figura 2.10 – Modos de encurvadura para uma secção simples à compressão (Dubina et al., 2012).	12
Figura 2.11 – (a) Tensões não uniformes (situação real) e (b) Tensões uniformes sobre a secção efetiva (MLE) (Craveiro, 2015).	13
Figura 2.12 – Reforço de extremidade com uma dobra simples (EN 1993-1-3, 2006).	14
Figura 2.13 – (a) Secção bruta e (b) Secção efetiva após redução da alma e da espessura das extremidades.	15
Figura 2.14 – (a) Colunas com banzos em contacto (b) e (c) Sistema de eixos adotados.	15
Figura 2.15 – (a) Representação do método para elementos comprimidos associados por travessas (EN 1993-1-1, 2005), (b) Colunas com banzos afastados (c) e (d) Sistema de eixos adotados.	17
Figura 3.1 – Significado da nomenclatura dos modelos.	27
Figura 3.2 – Diferentes provetes analisados.	28
Figura 3.3 – Secção transversal dos provetes (dimensões em mm).	29
Figura 3.4 – Esquema de ensaios à compressão com respetivos apoios.	30
Figura 3.5 – Processo de montagem.	31
Figura 3.6 – Materiais usados na montagem e verificação do bom funcionamento.	32
Figura 3.7 – Fases da montagem.	32
Figura 3.8 – Localização dos extensómetros e LVDT's.	33
Figura 3.9 – Antes e depois da realização do ensaio.	34
Figura 3.10 – Proвете ensaiado (dimensões em mm).	35

Figura 3.11 – Curva Tensão-Extensão do aço utilizado (S280).	35
Figura 4.1 – (a) Encurvadura local e (b) Encurvadura distorcional.	36
Figura 4.2 – (a) 3P 3F h/b (1), (b) 3P 1F h/b (1.2), (c) 3P 3F h/b (1.2) e (d) 3P 3F h/b (1.74).	36
Figura 4.3 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1).	37
Figura 4.4 – Modo de rotura dos provetes 3P 1F h/b (1.2).	38
Figura 4.5 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1.2).	39
Figura 4.6 – Modo de rotura dos provetes 5P 2F h/b (1.2).	40
Figura 4.7 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1.74).	41
Figura 4.8 – Força- D_v para os diferentes modelos.	44
Figura 4.9 – Força- D_v das várias repetições.	44
Figura 4.10 – (a) SG.15 (3P 3F h/b (1)) e (b) SG.4 (3P 3F h/b (1.74)).	45
Figura 4.11 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1).	47
Figura 4.12 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 1F h/b (1.2).	48
Figura 4.13 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1.2).	49
Figura 4.14 – Curvas Força-Extensão para o provete 5P 2F h/b (1.2).	50
Figura 4.15 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1.74).	51
Figura 4.16 – (a) D_h dos diferentes tipos (b) Localização dos LVDT e (c) Sistema de eixos adotados.	52
Figura 4.17 – Deslocamento lateral dos diferentes tipos.	53
Figura 4.18 – Comparação entre os valores analíticos e experimentais.	56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Imperfeições usadas por diversos autores em modelos numéricos.	8
Quadro 2.2 – Secções compostas abertas investigadas por outros autores à temperatura ambiente.	18
Quadro 2.3 – Secções compostas fechadas investigadas por outros autores à temperatura ambiente.	21
Quadro 2.4 – Secções compostas abertas e fechadas investigadas por outros autores ao fogo.	25
Quadro 3.1 – Descrição geométrica de cada modelo.	29
Quadro 4.1 – Resultados das colunas ensaiadas.	42
Quadro 4.2 – Quadro resumo com extensómetros que não registaram plastificação do aço e os que registaram encurvadura local.	46
Quadro 4.3 – Comparação entre os ensaios e o EC3-1-1 (tensão nominal do aço).	55
Quadro 4.4 – Comparação entre os ensaios e o EC3-1-1 (tensão real do aço).	56

ABREVIATURAS

AEF	Aço enformado a frio
AS/NZS	Padrões da Austrália/Nova Zelândia (<i>Australian/New Zealand Standard</i>)
DSM	Método da força direta (<i>Direct Strength Method</i>)
EC	Eurocódigo
LSF	Construção em aço leve (<i>Light Steel Framing</i>)
LVDT	Defletómetro de haste (<i>Linear Variable Displacement Transformer</i>)
MLE	Método da largura efetiva
NAS	Especificação da América do Norte (<i>North American Specification</i>)
OSB	Painel de tiras de madeira orientada (<i>Oriented Strand Board</i>)
SG	Extensómetro (<i>Strain Gauge</i>)
C.V.	Coefficiente de variação

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

a	Distância entre o centro das chapas, medida na direção axial da coluna
a_p	Altura da chapa
b	Largura da secção transversal
b_e	Largura efetiva da chapa
b_p	Largura da chapa
c	Largura do reforço de extremidade
c_e	Largura efetiva do reforço de extremidade
d	Espaçamento entre perfis
d_b	Distância entre duas chapas
f_y	Tensão de cedência
f_{yb}	Tensão de cedência básica
f_u	Tensão última à tração
h	Altura de uma secção transversal
h_0	Distância entre o centroide das cordas (perfil)
h_e	Altura efetiva de uma secção transversal
i	Raio de giração
n	Número de planos de travessas (chapas)
n_f	Número de parafusos por chapa
n_p	Número de chapas por coluna em uma das faces
t	Espessura da chapa

Letras maiúsculas latinas

A	Área total da secção
A_{ch}	Área de uma corda (perfil)
A_{eff}	Área efetiva da secção transversal
A_s	Área efetiva do elemento reforçado
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia da secção
I_b	Momento de inércia de uma travessa (chapa)
I_{ch}	Momento de inércia de uma corda (perfil)
I_{eff}	Momento de inércia efetivo de uma secção
I_s	Momento de inércia de uma extremidade
K	Rigidez da mola do reforço de extremidade
L	Comprimento da peça
L_e	Comprimento de encurvadura
$N_{b,Rd1}$	Valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido (com tensão nominal do aço)
$N_{b,Rd2}$	Valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido (com tensão real do aço)
N_{cr}	Carga crítica elástica de encurvadura
$N_{cr,B}$	Carga crítica elástica de encurvadura de um elemento composto reforçado por chapas, com base na secção bruta
$N_{cr,eff}$	Carga crítica elástica de encurvadura de um elemento composto reforçado por chapas, com base na secção efetiva
$N_{cr,F}$	Carga crítica elástica de encurvadura por flexão
$N_{cr,T}$	Carga crítica elástica de encurvadura por torção

$N_{cr,F,T}$	Carga crítica elástica de encurvadura por flexão-torção
$P_{u,E}$	Carga máxima de compressão atingida experimentalmente
S_v	Rigidez ao esforço transversal de um elemento composto reforçado por chapas

Letras minúsculas gregas

α	Razão entre a zona comprimida e a totalidade de um componente de uma secção; fator de imperfeição relativo a encurvadura por flexão
γ_{M0}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
ε	Coefficiente dependente da tensão f_y
λ	Coefficiente de esbelteza relativo a encurvadura por flexão
$\bar{\lambda}$	Coefficiente de esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}_d$	Coefficiente de esbelteza relativa
μ	Média ponderada
ρ	Fator de redução para cálculo das larguras efetivas
σ	Desvio padrão
$\sigma_{cr,s}$	Tensão crítica elástica de encurvadura
χ	Fator de redução para a encurvadura por flexão
χ_d	Fator de redução para a encurvadura por distorção

Letras maiúsculas gregas

Φ	Coefficiente para determinação do coeficiente de redução χ
--------	---

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais e motivação

À medida que o setor da construção civil tem evoluído, tem-se procurado cada vez soluções mais competitivas, a nível económico e sustentável. A utilização de aço enformado a frio (AEF) tem aumentando bastante, principalmente em países onde a mão de obra tem um custo elevado ou onde não há condições favoráveis a uma construção convencional, como acontece nos países nórdicos, com poucas horas de luz e muita neve/chuva (Roque et al., 2021). É um material com um bom desempenho estrutural nomeadamente ao sismo. Hoje em dia constitui uma solução bastante competitiva, por ser um componente de grande leveza e ainda assim com grande capacidade resistente. Pode ser usado como substituto do betão, da madeira ou do aço laminado e a sua aplicação é variada. As construções comuns (edifícios de habitação e escritórios) em AEF em geral não ultrapassam três pisos; porém já se podem encontrar construções mais complexas que ultrapassam os quinze pisos em edifícios (Pinnacle@, 2013). O tipo construtivo passa por criar um esqueleto do edifício colocando como elementos verticais uma malha fina (40 cm a 60 cm de espaçamento) (FUTURENG@, 2021a) de pilares simples ou compostos e como elementos horizontais, vigas ou treliças, dependendo do vão.

O processo de fabrico do AEF permite obter perfis de secções abertas com diversas formas, como o caso de ómeças, Ω , ou sigmas, Σ . Têm uma espessura reduzida, o que se traduz em vantagens, como a sua leveza e desvantagens, como o fato de estes geralmente serem categorizados como elementos de classe 4 e assim serem suscetíveis a encurvadura local. Devido a serem secções abertas têm rigidez torsional baixa. O facto de o centro de corte e o centro geométrico não serem coincidentes, faz com que estes elementos sejam mais suscetíveis a efeitos de torção. Um perfil Σ é uma evolução de um perfil C que conta com reforços adicionais. Estes aproximam o centro de corte com o centro de rigidez, aumentando assim a capacidade de carga para a mesma quantidade de material diminuindo a suscetibilidade a efeitos de torção.

De modo a melhorar e aumentar a capacidade de carga deste tipo de elementos, surgiu a ideia de considerar dois perfis juntos, ligados por chapas, criando uma secção fechada. O dimensionamento em AEF é abordado no Eurocódigo 3 (EC3) parte 1.3 (EN 1993-1-3, 2006), porém esta norma não contempla qualquer situação que preveja a ligação entre dois perfis através de chapas. Devido a essa lacuna na norma referida, optou-se por usar o método de elementos comprimidos associados por travessas previsto no EC3 parte 1.1 (EN 1993-1-1, 2005) relativo a elementos laminados. Por ser um elemento de classe 4, a área efetiva tem de ser reduzida para se ter em conta a encurvadura local e distorcional; a contabilização da

encurvadura distorcional é feita segundo o EC3 parte 1.3 (EN 1993-1-3, 2006), porém para contabilizar a encurvadura local este remete para o EC3 parte 1.5 (EN 1993-1-5, 2006), devendo ser obtida pelo Método das Larguras Efetivas (MLE).

O trabalho desta dissertação está integrado no âmbito do projeto INNOCFSCONC desenvolvido pelo ISISE, na Universidade de Coimbra.

1.2 Objetivo da dissertação

O objetivo da dissertação é realizar um estudo paramétrico em colunas de AEF compostas por travessas formadas por 2 sigmas, Σ , submetidas à compressão, variando o espaçamento entre perfis, a dimensão das chapas, a quantidade de parafusos e a quantidade de chapas, para então comparar os resultados obtidos com as metodologias existentes na Europa (Eurocódigos), que por não contemplarem de forma direta estas configurações, têm sido alvo de investigação. É importante verificar se as previsões analíticas permitem obter valores conservadores ou não, de forma a validar e melhorar essas mesmas metodologias.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos.

- No capítulo 1 estão expostas as considerações gerais, a motivação e o objetivo da dissertação.
- No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica, onde é feita uma introdução ao AEF e as suas principais aplicações, a descrição dos procedimentos de cálculo previstos na EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 e EN 1993-1-1, bem como trabalhos de investigação realizados por outros autores em temas semelhantes.
- No capítulo 3 descreve-se o sistema experimental. O tipo de configurações e os procedimentos usados na montagem, instrumentação e ensaio.
- No capítulo 4 comentam-se os modos de encurvadura, expõem-se a capacidade de carga das colunas obtida por via experimental, comentam-se as curvas Força-Extensão, expõem-se os deslocamentos horizontais e verticais e comparam-se os resultados obtidos por via experimental para a capacidade de carga com as previsões da EN 1993-1-1.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

No que se refere ao processo de fabrico, os perfis metálicos podem ser agrupados em 3 grupos: laminados a quente, enformados a frio e soldados. Geralmente, para a utilização com função estrutural, o mais comum é usar aço laminado. Quando com este não é possível fabricar alguns tipos de peças, por serem fora do comum, recorre-se então à construção de perfis por soldadura de chapas. Devido à sua elevada resistência e à existência de regras de dimensionamento mais detalhadas e mais abrangentes, o aço laminado destaca-se quando comparado com o AEF.

O AEF, nomeadamente em Portugal, continua a ter como utilização principal os elementos secundários. Como se trata de um produto leve com uma relação resistência/peso muito favorável, começa também a ser utilizado na estrutura principal de edifícios de pequeno a médio porte, incluindo em trabalhos de reabilitação. O AEF começou a ser utilizado na construção dos edifícios nos USA e Reino Unido por volta de 1850. O seu uso tornou-se mais frequente a partir de 1940 devido à Segunda Guerra Mundial. (Dubina et al., 2012).

A regulamentação para o dimensionamento destes elementos surgiu pela primeira vez nos EUA em 1946, desenvolvida pelo “*American Iron and Steel Institute*”. A regulamentação em vigor nos EUA, Canada e México é a AISI S100 (AISII S100, 2016) – “*North American Cold Formed Steel Specifications (2016)*”. Na Austrália e Nova Zelândia é a AS/NZS 4600 (AS/NZS 4600, 2018) – “*Cold-Formed Structures (2018)*”. Na Europa, o ECCS (“*European Convention for Construction Steelwork*”) criou a primeira versão de um regulamento em 1987, denominada de “*European Recommendations for the design of light gauge steel members*”. Este documento foi desenvolvido e em 2006 surgiu a parte 1-3 do EC3 denominada de “*Design of steel structures. Part 1-3: General Rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting*” a qual permanece como a regulamentação mais atual (EN 1993-1-3, 2006).

2.2 Aço enformado a frio como elemento estrutural

2.2.1 Processo de fabrico

AEF é um termo dado ao aço que ao contrário do laminado, é moldado a frio através de perfilagem ou quinagem.

Quando falamos de um processo industrial de grande dimensão, a perfilagem é sem dúvida a melhor solução. Permite criar uma linha de produção de grande escala e produzir em massa um determinado produto. Funciona recorrendo a vários rolos (Figura 2.1) que vão moldando o aço por fases até se obter o perfil desejado. Oferece a possibilidade de criar secções complexas e com grande comprimento.

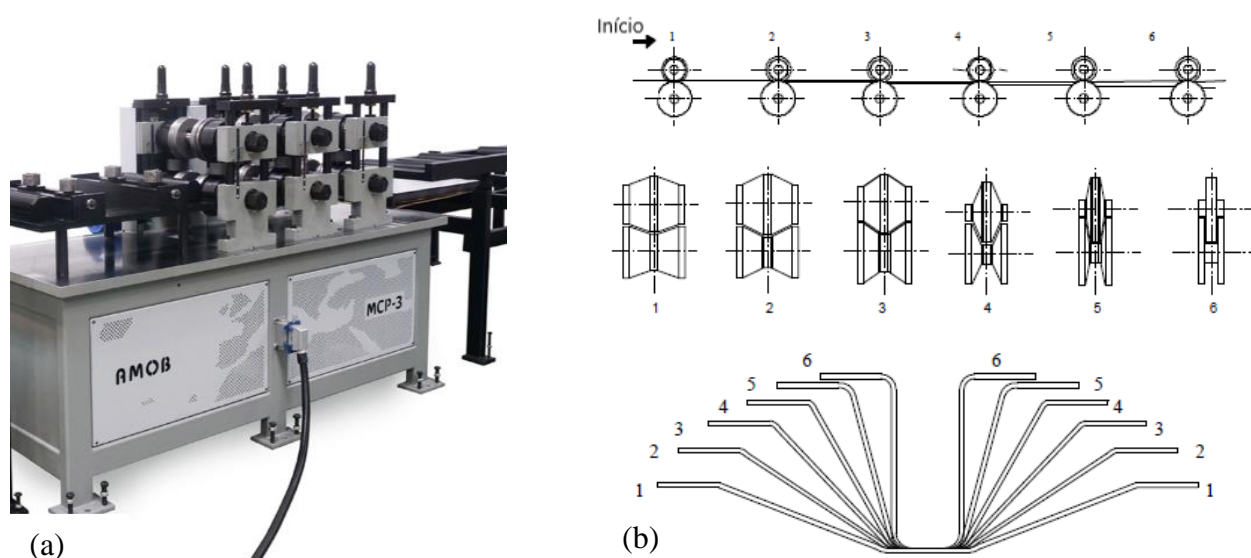


Figura 2.1 – (a) Linha industrial (AMOB@, 2021) e (b) Processo de perfilagem dividido em fases (adaptado de Rhodes, 1991).

A quinagem (Figura 2.2) é o processo utilizado para produção espontânea de diferentes secções. Comparado com a perfilagem, este recorre a equipamentos mais económicos e com reduzido espaço de encaixe. Tem limitações, nomeadamente no comprimento e complexidade das peças.

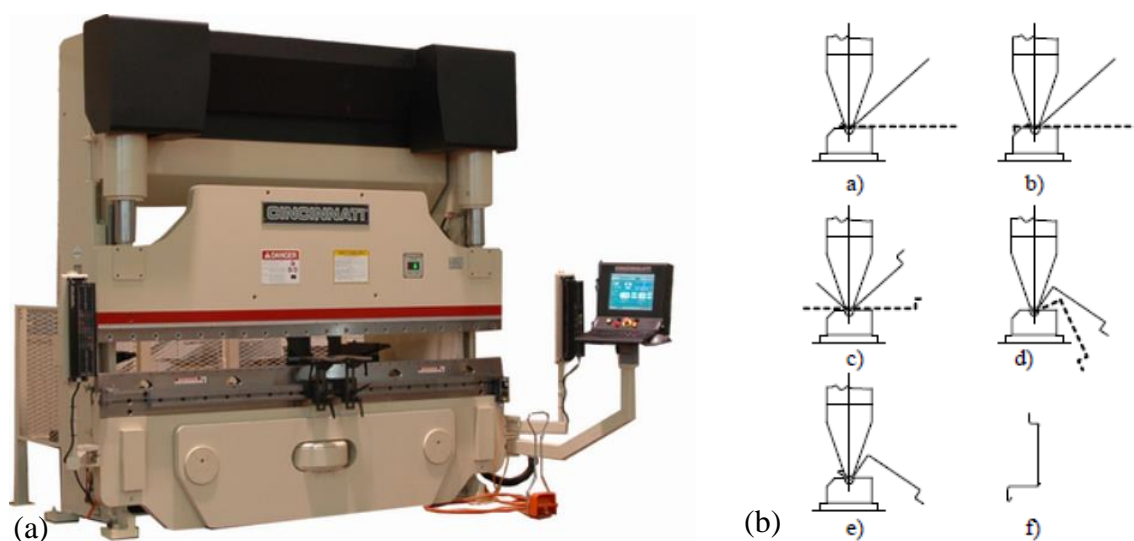


Figura 2.2 – (a) Quinadora (FUTURENG@, 2021b) e (b) Processo de quinagem dividido em fases (adaptado de Rhodes, 1991).

2.2.2 Tipos de elementos estruturais

O aço enformado a frio é usado maioritariamente em painéis e perfis.

Dentro dos painéis, o uso mais comum é a aplicação em coberturas, fachadas e lajes mistas. Geralmente são perfis finos, com espessuras entre 0.5 mm e 1.9 mm. Na Figura 2.3 são ilustrados exemplos tipo de cada um destes produtos.

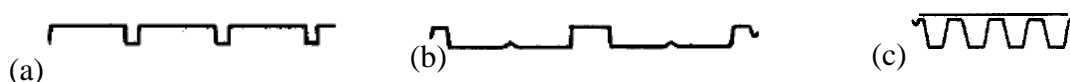


Figura 2.3 – (a) Painéis para cobertura, (b) Painéis para fachada e (c) Painéis laje mista (adaptado de Yu, 2000).

Os perfis são mais espessos que os painéis, variando nos casos mais comuns entre 1.2 mm e 6.4 mm. Atualmente há vários tipos de secções simples; adicionalmente é possível formar uma variedade enorme de secções compostas abertas ou fechadas. As secções compostas obtêm-se juntando duas ou mais secções simples iguais ou diferentes, alguma delas representadas na Figura 2.4.

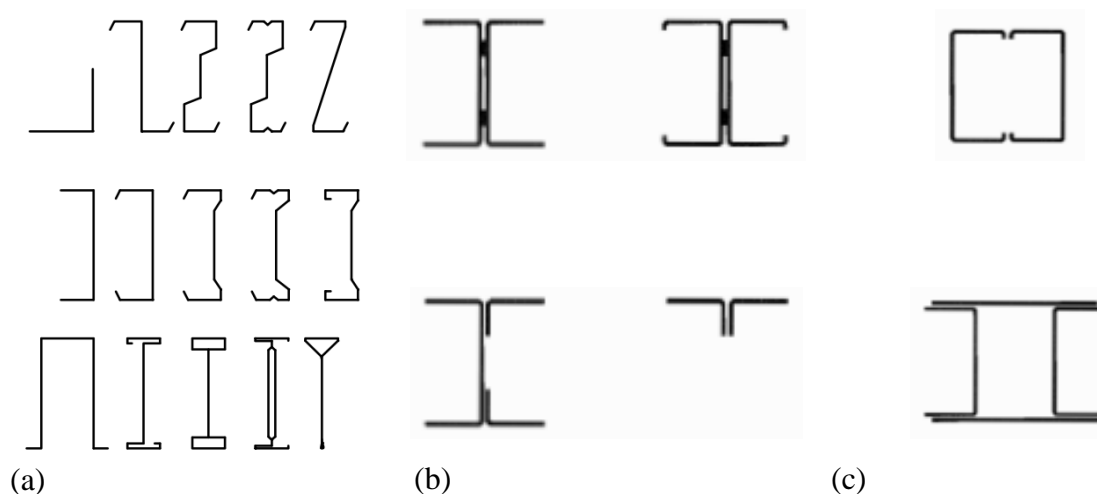


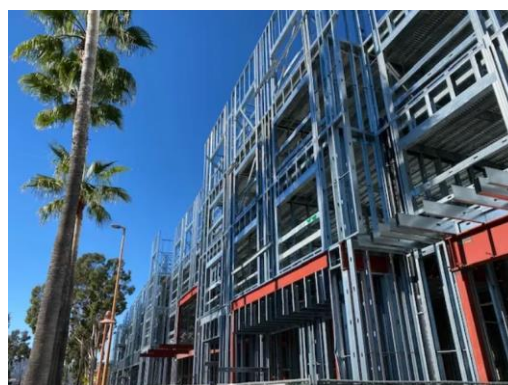
Figura 2.4 – Formas típicas de perfis para secções enformadas a frio (adaptado de EN 1993-1-3, 2006).

(a) Seções simples abertas, (b) Seções compostas abertas e (c) Seções compostas fechadas.

As construções em aço leve (LSF) são compostas por um esqueleto (Figura 2.5) de AEF. Este é revestido posteriormente, nos casos mais frequentes, por painéis de tiras de madeira orientadas (OSB). Atualmente, recorrendo a aço enformado a frio é possível construir edifícios com mais de 15 andares (Pinnacle@, 2013). As ferramentas computacionais e a investigação nessa área foram a chave para tornar isso possível, resolvendo algumas lacunas das normas e facilitando o cálculo de um esqueleto por vezes bastante complexo. Dependendo do país, esta solução pode fornecer uma poupança de gastos monetários e tempo de 20% e 50% respetivamente (Pinnacle@, 2020).



(a)



(b)

Figura 2.5 – (a) e (b) Construção em aço leve (LSF) (Pinnacle@, 2020).

2.2.3 Vantagens e desvantagens

Segundo Yu (Yu, 2000), o AEF apresenta entre outras as seguintes vantagens:

- Fácil aplicação em fábrica de uma camada de alumínio/zinco para os proteger da corrosão.
- Reduzida espessura, com a qual se tem um quociente de resistência sobre peso elevado.
- Grande capacidade de encaixe entre as peças feitas com AEF, o que permite uma otimização de transporte e armazenamento.
- Secções fora do comum podem ser produzidas em AEF, podendo obter-se assim soluções mais eficientes.
- Grandes vãos recorrendo a treliças, produção em massa, rápida e limpa instalação, material reciclável, não combustível, etc.

As principais desvantagens deste material são:

- Relutância por parte do mercado em aceitar a sua utilização.
- Necessidade de uma mão de obra mais especializada.
- Não permite suportar cargas demasiado elevadas
- Baixa resistência ao fogo o que implica custos elevados na sua proteção quando necessária.

2.2.4 Imperfeições geométricas

Mesmo cumprindo todas as regras de boa execução, as imperfeições geométricas são inevitáveis. Podem ser imperfeições geométricas como a falta de verticalidade e retilinearidade. Surgem devido ao processo de fabrico, armazenamento, transporte, instalação e dividem-se em dois grupos: imperfeições locais e imperfeições globais (Simões, 2014).

As imperfeições locais são traduzidas por mossas e ondulações (Figura 2.6b), que condicionam a resistência mecânica destas secções. As globais, imperfeições relativas a um elemento (barra), são fenómenos como curvaturas, torsões segundo o eixo e empenamento (Figura 2.6a).

No Quadro 2.1 apresenta-se um resumo sobre as imperfeições usadas por diversos autores para contabilizar as encurvaduras locais e globais em modelos numéricos.

Quadro 2.1 – Imperfeições usadas por diversos autores em modelos numéricos.

Referência	Imperfeições adotadas
(Dabaon et al., 2015a) e (Kherbouche & Megnounif, 2019)	Para imperfeições globais geométricas de colunas inferiores a 3000 mm usaram $L/1100$. Para imperfeições locais optaram por usar 0.5% da espessura do perfil (t), recomendado por (Ellobody & Young, 2005).
(Craveiro, 2015)	Recomendou o uso de $L/1000$ para imperfeição global e $h/200$ para imperfeição local.
(Meza et al., 2020)	Mediram as imperfeições através de um sensor de deslocamentos a laser. Para uma coluna com 1100mm, obtiveram uma imperfeição de 1.04 mm. Este valor deu entre as imperfeições sugeridas por (Craveiro, 2015) ($L/1000$) e (Dabaon et al., 2015a) ($L/1100$).
(Rahnavard et al., 2021)	Comparou os dois casos mais utilizados nos artigos consultados. O primeiro, $L/1100$ para imperfeição global e $0.005t$ para imperfeição local e o segundo, $L/1000$ para imperfeição global e $h/200$ para imperfeição local. Concluiu que embora não havendo diferenças significativas, o segundo caso é mais conservador e foi o adotado por esse autor.

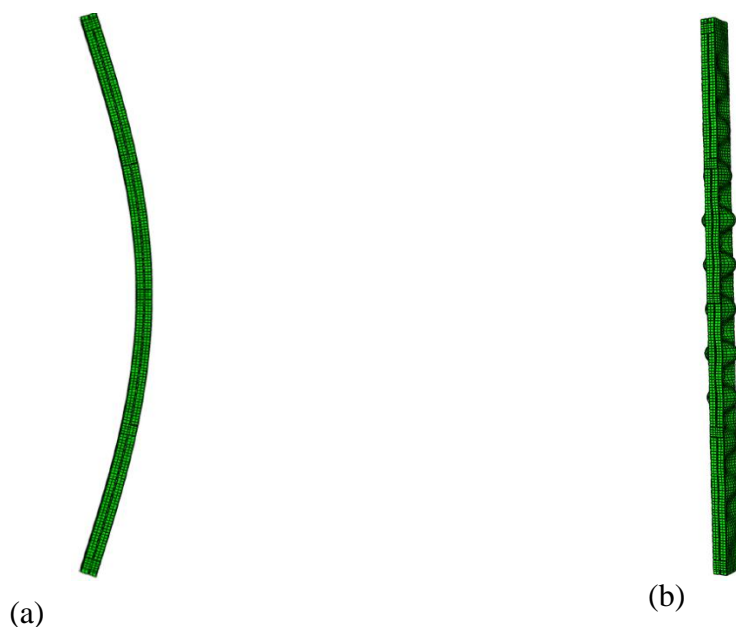


Figura 2.6 – Representação dos modos de encurvadura (Rahnavard et al., 2021).

(a) Encurvadura por flexão e (b) Encurvadura Local.

2.2.5 Tensões residuais

As tensões residuais surgem durante o processo de fabrico e condicionam a capacidade de carga e a resistência última dos elementos; são geralmente divididas em tensões de flexão e de membrana, como se ilustra na Figura 2.7. Nos perfis laminados as tensões predominantes são as de membrana, constantes ao longo da espessura. Os perfis enformados a frio, pelo contrário, têm como tensões predominantes as de flexão. Isto dificulta a sua análise uma vez que essa variação de tensões pode influenciar a rigidez e provocar pré cedência do aço nas faces das secções transversais. Não é incomum encontrar reduções máximas na ordem dos $0.5 f_y$ (Yu, 2000).

Os primeiros investigadores a abordar este tema concluíram que a zona onde ocorrem os valores mais significativos de tensão é nas dobras; porém, é também a zona de maiores tensões de cedência devido ao endurecimento do aço. Os autores afirmam que optando por ignorar a tensão residual deve-se também ignorar o aumento de tensão de cedência proveniente do endurecimento. Admitiram uma distribuição linear das tensões ao longo da espessura e concluíram que geralmente as tensões de membrana são menores que as de flexão para aço enformado a frio (Schafer & Peköz, 1998).

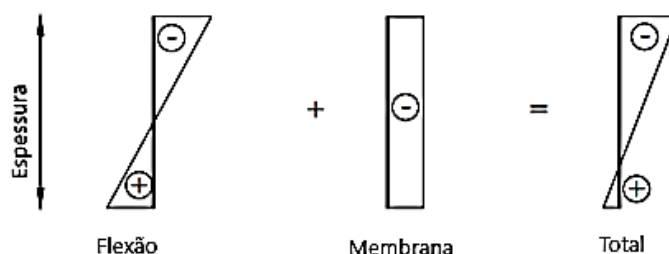


Figura 2.7 – Representação da soma que origina as tensões residuais (adaptado de Schafer & Peköz, 1998).

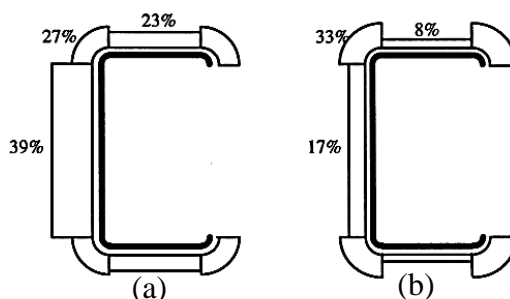


Figura 2.8 – Tensões residuais médias como percentagem de f_y (Schafer & Peköz, 1998).

(a) Perfilagem e (b) Quinagem.

Outros autores fizeram investigação sobre esse tema e chegaram à conclusão de que a variação das tensões residuais por flexão ao longo da espessura é não linear; o seu valor depende, entre outros, do processo de fabrico, da espessura da chapa e da tensão de cedência do aço da chapa (Moen et al., 2008; Quach et al., 2004, 2006).

2.3 Colunas de aço enformado a frio à temperatura ambiente

2.3.1 Comportamento estrutural

O comportamento do aço enformado a frio é bastante condicionado pelos complexos fenómenos de encurvadura local que resultam das espessuras reduzidas e do processo de fabrico.

O dimensionamento e o comportamento dos elementos em AEF são fortemente influenciados pela classe da secção transversal. A classe da secção transversal varia com a relação entre o comprimento e a espessura (c/t) e uns limites que tem como variável o parâmetro ε (Quadro 5.2 da EN 1993-1-1). Ao contrário dos perfis laminados que no geral pertencem às classes 1, 2 e 3, os perfis enformados a frio geralmente são de classe 4. Elementos de classe 4 são aqueles onde a tensão de cedência nas zonas mais comprimidas não é atingida devido a efeitos de encurvadura local (Simões, 2014).

Um dos problemas dos elementos em aço enformado a frio é a reduzida rigidez torsional. Sendo comum para secções simples uma vez que estas são maioritariamente abertas. O fato de serem mono simétricas com o centro de geométrico e centro de corte não coincidente vem agravar este inconveniente porque aumenta a suscetibilidade a este fenómeno

Os modos de encurvadura local mais comuns em perfis de AEF estão representados na Figura 2.10. A encurvadura local ocorre quando as extremidades da secção se encontram sem alteração e há o aparecimento de ondulações e mossas (Figura 2.9 a), (Figura 2.9 d), (Figura 2.10 a). Este fenómeno é comum em elementos de classe 4, nomeadamente de esbelteza baixa. A encurvadura distorcional ocorre com a abertura ou fecho dos banzos relativamente à alma (Figura 2.9 b), (Figura 2.9 c), (Figura 2.9 e), (Figura 2.10 b). É predominante em secções com banzos grandes devido à rigidez rotacional na ligação do banzo à alma.

A encurvadura por flexão (Figura 2.10 c) e por flexão-torção (Figura 2.10 d) são fenómenos de encurvadura global. Geralmente é identificada por uma deformação total do elemento sem distorção. Tem predominância em colunas esbeltas e secções mono simétricas. Pode ocorrer a interação destes vários modos como se pode analisar na Figura 2.10 (e), (f), (g), (h), (i) e (j).

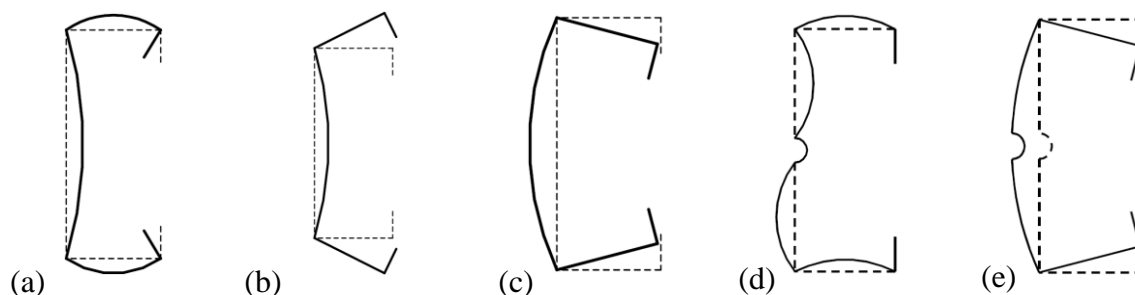


Figura 2.9 – Encurvadura local e distorcional para uma secção simples à compressão (Dubina et al., 2012).

Modos encurvadura em perfis C- (a) Local, (b) e (c) Distorcional.

Modos encurvadura em perfis C com reentrância - (d) Local e (e) Distorcional.

De modo a minimizar os problemas referidos acima, é comum que se opte por perfis com reentrâncias, como os Omega, Ω , e os Sigma, Σ . As zonas de reentrâncias, são geralmente zonas de aumento de tensão de cedência, devido ao processo de fabrico e ainda diminuem o comprimento livre de flexão, como se pode verificar comparando as duas situações ilustradas na Figura 2.9. Assim aumenta a rigidez e a capacidade de carga.

O uso dos perfis simples tem ainda limitações a nível da sua capacidade de carga. Apesar de serem perfis leves não suportam cargas axiais de compressão demasiado elevadas. Uma vez que, as construções começaram a ser cada vez mais altas, foi necessário desenvolver soluções com capacidade de carga superior. Combinaram-se elementos simples e surgiram as secções compostas. Com esta modificação passou-se de uma dominância de secções mono simétricas para duplamente simétricas. Isto coloca o centro geométrico e o centro de corte coincidentes, o que reduz a suscetibilidade a fenómenos de torção. Atualmente já há alguma investigação sobre esse tema, porém este trabalho ainda não se reflete nas normas de dimensionamento atuais.

O estudo desenvolvido no âmbito desta dissertação passa por uma análise comparativa entre secções compostas fechadas formadas por dois sigmas e discussão das suas capacidades de carga à compressão e dos modos de encurvadura.

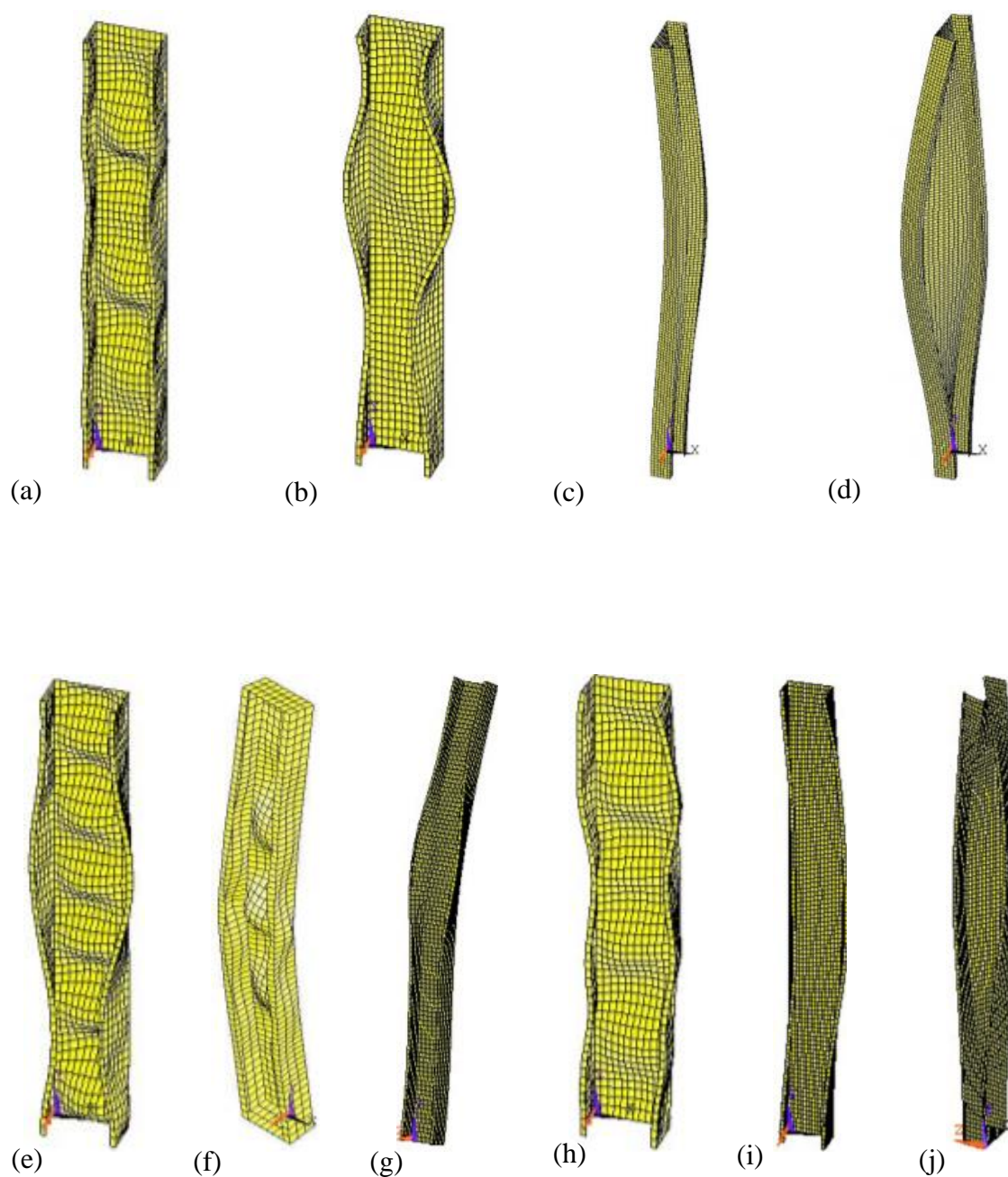


Figura 2.10 – Modos de encurvadura para uma secção simples à compressão (Dubina et al., 2012).

Modos simples - (a) Local (L), (b) Distorcional (D), (c) Global por flexão (F) e (d) Global por flexão-torção (FT).

Combinações - (e) L+D, (f) F+L, (g) F+D, (h) FT+L, (i) FT+D e (j) F+FT.

2.3.2 Dimensionamento segundo a EN 1993-1-3

O Eurocódigo 3 (EC3), parte 1.3 (EN 1993-1-3, 2006) não fornece regras desenvolvidas especificamente para o tipo de colunas estudadas no âmbito desta dissertação. Na análise e dimensionamento das colunas estudadas além da parte 1.3 do EC3 foram usadas as partes 1.5 e 1.1 do EC3 (EN 1993-1-5, 2006), (EN 1993-1-1, 2005).

O procedimento usado para calcular a área efetiva foi o método das larguras efetivas exposto na parte 1.3 do EC3 (EN 1993-1-3, 2006). Este permite considerar uma distribuição de tensões uniforme ao longo da largura efetiva, desprezando as partes que menos contribuem como uma simplificação (Figura 2.11). Através da remoção da área que não tem contribuição na capacidade resistente de uma secção de classe 4, tem-se em conta os efeitos da encurvadura local. Este procedimento deve ser aplicado a todos os elementos placa da secção, o que em geral constitui um processo moroso. Este torna-se menos expedito à medida que a complexidade da secção aumenta, como é o caso dos perfis com secção Σ e Ω .

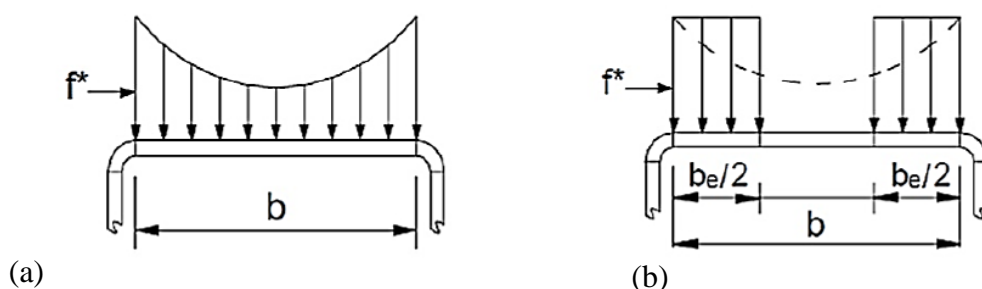


Figura 2.11 – (a) Tensões não uniformes (situação real) e (b) Tensões uniformes sobre a secção efetiva (MLE) (Craveiro, 2015).

Como foi referido anteriormente, os elementos de classe 4 são suscetíveis a fenómenos de encurvadura local. Estes tem o problema de impedirem que a tensão de cedência nas zonas comprimidas da secção seja por vezes atingida. Assim não se tira benefício de toda a capacidade elástica resistente de uma determinada secção.

Com base na parte 1.1 do EC3 (EN 1993-1-1, 2005) para elementos de classe 4, é imposto que seja usada a área efetiva relativa das partes comprimidas, contrariamente às classes 1, 2 e 3 na qual se pode usar a área bruta. A área efetiva (A_{eff}) é obtida pelo método das larguras efetivas (expressão (2.1)). Nessa expressão, ρ é um fator de redução obtido segundo a parte 1.5 do EC3 (EN 1993-1-5, 2006) por indicação da parte 1.3 do EC3 (EN 1993-1-3, 2006) e que varia para elementos comprimidos interiores e exteriores e t é a espessura.

Se a secção tiver reforços nas extremidades (como é o caso em estudo), a parte 1.3 do EC3 (EN 1993-1-3, 2006) permite ainda ter em conta a encurvadura distorcional. Parte-se de uma rigidez infinita e calcula-se então a tensão crítica elástica do elemento (expressão (2.2)). Nessa expressão K é a rigidez da mola linear, A_s é a área efetiva do elemento reforçado e I_s é o segundo momento efetivo da área desse reforço (Figura 2.12). Com a tensão crítica elástica obtém-se um fator de redução $\bar{\lambda}_d$ e subsequentemente o coeficiente χ_d (expressão (2.3)). Se $\chi_d = 1$ a área usada é a determinada anteriormente pelo método das larguras efetivas, se $\chi_d < 1$ aplica-se um processo iterativo até esse valor convergir. Deste processo surge a redução da espessura das extremidades, se existir.

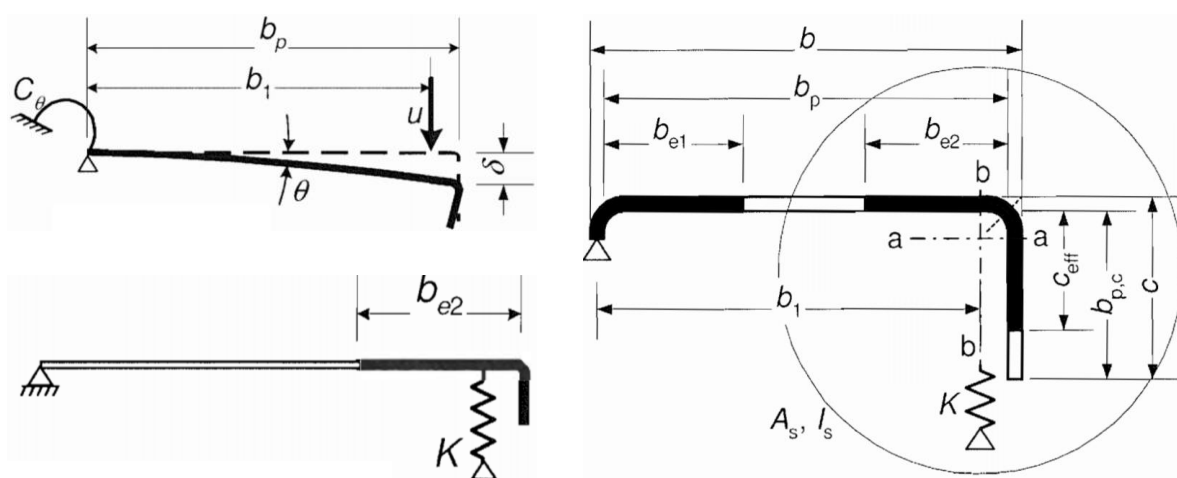


Figura 2.12 – Reforço de extremidade com uma dobra simples (EN 1993-1-3, 2006).

Cálculo da área efetiva segundo o método das larguras efetivas (EN 1993-1-3, 2006)

$$A_{eff} = t[2 * h_{e1} + 2 * h_{e2} + h_{e3} + 2 * b_{e1} + 2 * c_{e1}]; \quad b_e = \rho * b \quad (2.1)$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_s}}{A_s} \quad (2.2)$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}; \quad \begin{cases} \bar{\lambda}_d \leq 0.65, & \chi_d = 1 \\ 0.65 < \bar{\lambda}_d < 1.38, & \chi_d = 1.47 - 0.723\bar{\lambda}_d \\ \bar{\lambda}_d \geq 1.38, & \chi_d = \frac{0.66}{\bar{\lambda}_d} \end{cases} \quad (2.3)$$

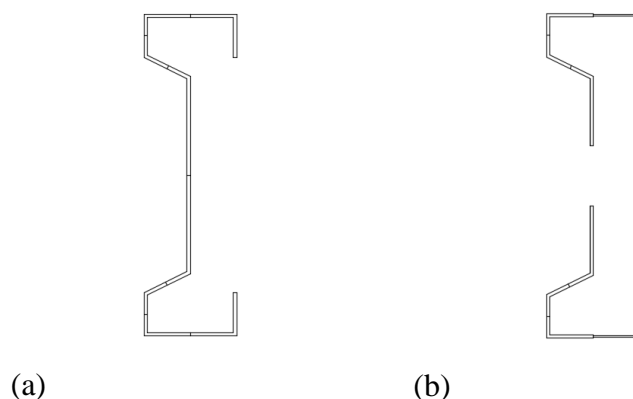


Figura 2.13 – (a) Secção bruta e (b) Secção efetiva após redução da alma e da espessura das extremidades.

A secção efetiva dos 2Σ foi sempre a mesma, 764.89 mm^2 , cerca de 89% da área bruta da secção.

Uma vez obtida a área efetiva, para colunas com $\frac{h}{b} = 1.74$ (Figura 2.14) aplicou-se diretamente o método expresso na parte 1.1 do EC3 cláusula 6.3.1 (expressão (2.4)) e obteve-se a resistência à encurvadura de um elemento comprimido de classe 4. Previamente foi necessário obter o menor valor para o N_{cr} , entre o fenómeno de flexão e o fenómeno de torção, sendo o menor o obtido para o fenómeno de flexão, $N_{cr,F}$ (expressão (2.7)). Uma vez obtido o $N_{cr,F}$, aplicou-se a expressão (2.5) e a expressão (2.6) e foi possível obter o fator de redução χ usado para calcular a resistência à encurvadura.

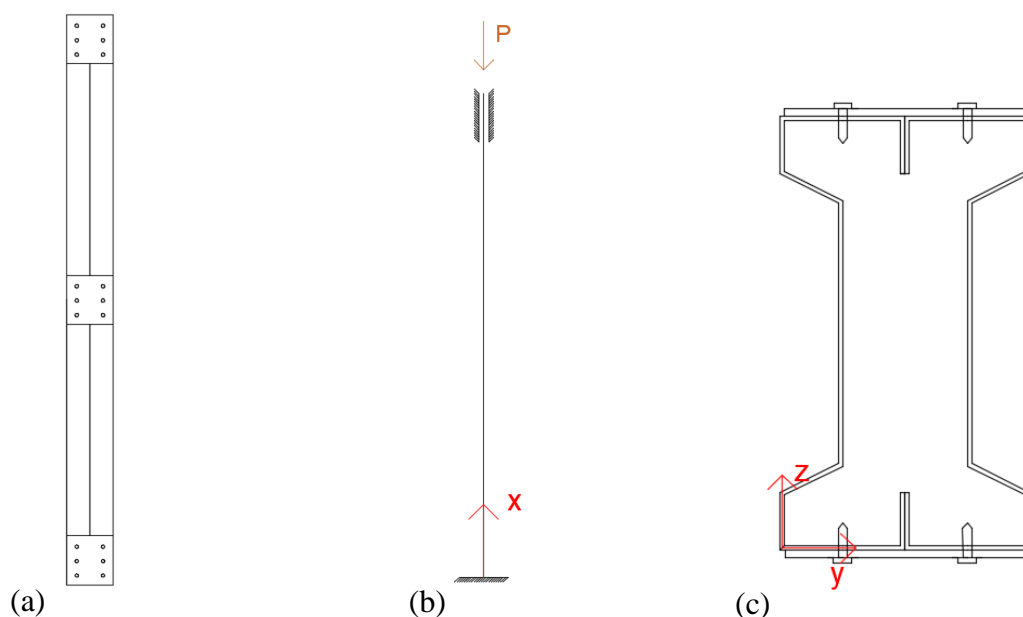


Figura 2.14 – (a) Colunas com banzos em contacto (b) e (c) Sistema de eixos adotados.

Resistência à encurvadura de um elemento à compressão de classe 4 (EN 1993-1-1, 2005)
cláusula 6.3.1

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.4)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}}; \quad \phi = 0.5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} * f_y}{N_{cr}}}; \quad N_{cr} = \min(N_{cr,F}, N_{cr,T}) \quad (2.6)$$

$$N_{cr,F} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_e^2} \quad (2.7)$$

Para as colunas onde o $\frac{h}{b} \leq 1.74$ ou seja, os perfis não estão em contacto, usou-se o método de elementos comprimidos associados por travessas. Este método é específico para elementos laminados, mas na falta de regulamentação específica foi esta a adotada. Permite obter a esbelteza normalizada para elementos que estão ligados por chapas, devendo então retomar o procedimento anterior recalculando então o novo fator de redução χ (expressão (2.5)) e a resistência à encurvadura $N_{b,rd}$ (expressão (2.4)).

A esbelteza normalizada (expressão (2.8)) para este método é obtida através de um $N_{cr,B}$ (expressão (2.9)). Esta conta com a contribuição do $N_{cr,eff}$ (expressão (2.10)) e do S_v (expressão (2.14)). O primeiro depende de uma redução de momento de inércia I_{eff} (expressão (2.11)), que é obtida através de um coeficiente de redução μ (expressão (2.12)) e este do fator de esbelteza λ (expressão (2.13)) inicialmente determinado com base no momento total de inércia. O segundo é a rigidez do esforço transversal (expressão (2.14)) e dependente das propriedades da secção.

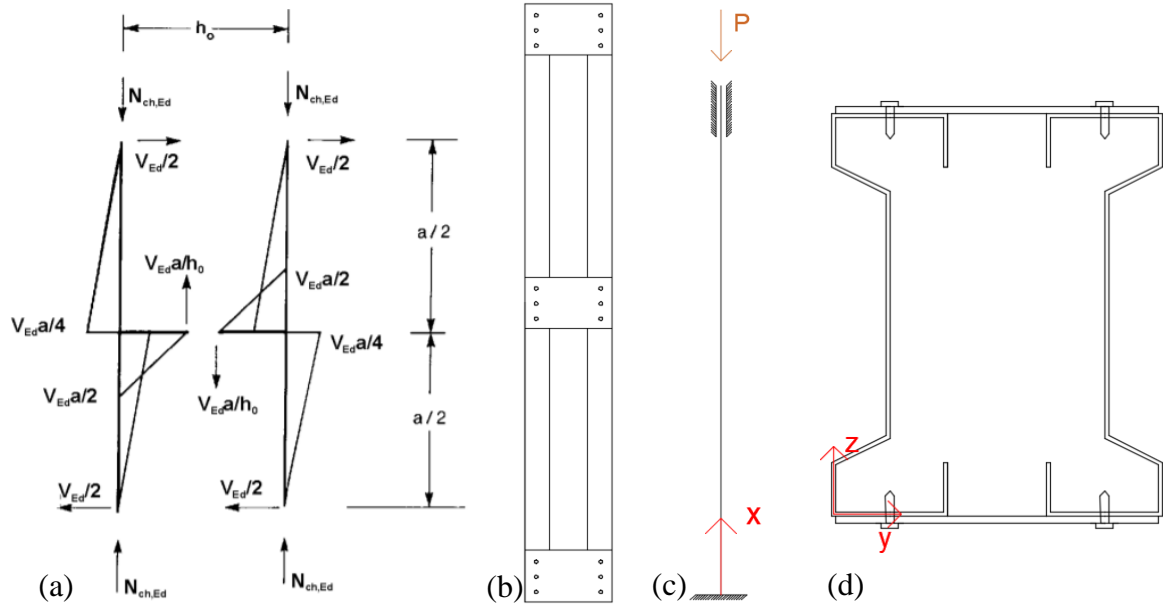


Figura 2.15 – (a) Representação do método para elementos comprimidos associados por travessas (EN 1993-1-1, 2005), (b) Colunas com banzos afastados (c) e (d) Sistema de eixos adotados.

Esbelteza normalizada para elementos comprimidos associados por travessas (EN 1993-1-1, 2005) cláusula 6.4.3

$$\bar{\lambda}^* = \sqrt{\frac{A_{eff} * f_y}{N_{cr,B}}} \quad (2.8)$$

$$N_{cr,B} = \frac{1}{\frac{1}{N_{cr,eff}} + \frac{1}{S_v}} \quad (2.9)$$

$$N_{cr,eff} = \frac{\pi^2 * E * I_{eff}}{L_e^2} \quad (2.10)$$

$$I_{eff} = 0.5 * h_0^2 * A_{ch} + 2 * \mu * I_{ch} \quad (2.11)$$

$$\mu = \begin{cases} 0, & \lambda \geq 150 \\ 2 - \frac{\lambda}{75}, & 75 < \lambda < 150 \\ 1, & \lambda \leq 75 \end{cases} \quad (2.12)$$

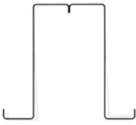
$$\lambda = \frac{L}{i_0}; i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2 * A_{ch}}}; I_1 = 0.5 * h_0^2 * A_{ch} + 2 * I_{ch} \quad (2.13)$$

$$S_v = \frac{24 * E * I_{ch}}{a^2 * [1 + \frac{2I_{ch} h_0}{nI_b a}]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2} \quad (2.14)$$

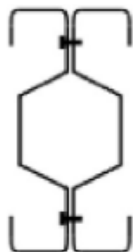
2.3.3 Estudos realizados em elementos em AEF e respetivas conclusões

O AEF tem sido alvo de alguns investigadores, quer através do desenvolvimento de modelos numéricos quer de modelos experimentais. No Quadro 2.2, Quadro 2.3 e Quadro 2.4 estão representados as secções estudadas e um breve resumo sobre as conclusões obtidas. Na maioria dos estudos os modelos foram comparados com as previsões analíticas fornecidas pelo EC3 (EN 1993-1-1, 2005; EN 1993-1-3, 2006; EN 1993-1-5, 2006), AS/NZS (AS/NZS 4600, 2018) (“*Australian/New Zealand Standard*”) e NAS (AISI S100, 2016) (“*North American Specification*”). Os dois últimos são os procedimentos mais utilizados a nível de investigação e sem dúvida uma referência, principalmente o DSM (“*Direct Strength Method*”) da NAS. Para mais informações sobre DSM é recomendada a leitura da NAS (AISI S100, 2016) para dimensionamento de AEF, no capítulo E para membros à compressão.

Quadro 2.2 – Secções compostas abertas investigadas por outros autores à temperatura ambiente.

Secções Abertas		
Referência	Secção	Conclusões
(Georgieva et al., 2012a) Georgieva et al., 2012b) e (Georgieva et al., 2012c)		Elaboraram uma análise experimental e numérica a <u>secções abertas compostas formadas por Z's</u> . Quando comparados os resultados com o EC3 (MLE) e NAS (DSM) estes foram conservadores. Os resultados são de difícil compreensão uma vez que o efeito benéfico de considerar uma secção composta através de dois perfis em Z não é refletido nas capacidades de carga esperadas. É sugerido que se restrinja o movimento lateral para evitar os efeitos de encurvadura e diminuir a sensibilidade às imperfeições iniciais. A comparação dos resultados numéricos com os experimentais foi próxima.

(Zhang & Young, 2012) e (Zhang & Young, 2015)



Efetuarão uma análise numérica e ensaios de compressão em elementos com secções abertas compostas formadas por Σ 's e C's a formar um I. Destas concluíram que quando usada a espessura real das zonas em contacto (2 vezes a espessura de um perfil), os valores foram não conservadores para colunas curtas. Admitindo a espessura de um perfil os valores foram sempre conservadores.

(Dabaon et al., 2015a) e (Dabaon et al., 2015b)



Realizaram uma análise não linear e experimental em elementos com secções aberta composta reforçada formada por C's. Os resultados fornecidos pela NAS, AS/NZS e EC3 mostraram-se no geral não conservadores quando a rotura ocorre por encurvadura local e conservadores quando a rotura é principalmente encurvadura por flexão.

(Vijayanand & Anbarasu, 2017)



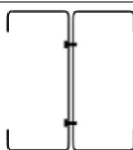
Executaram uma análise numérica em elementos com secções abertas compostas formadas por C's ligados por espaçadores (C's mais pequenos). Compararam esses resultados com os valores teóricos e concluíram que tanto NAS como o EC3 eram não conservadores, sendo o segundo o mais próximo do esperado.

(Roy et al., 2018a)



Elaboraram uma análise experimental de 40 provetes e numérica de 84 modelos em elementos com secções abertas compostas formadas por C's, ligados por espaçadores (C's mais pequenos). Verificaram uma boa relação entre os resultados experimentais e numéricos. As capacidades axiais das colunas foram comparadas com os métodos fornecidos pelo NAS e AS/NZS. Os modelos numéricos e ensaios experimentais foram conservadores em até 53%, quando comparados com o dimensionamento através do coeficiente de esbelteza de uma coluna λ_c . Quando comparado com o realizado através do coeficiente de esbelteza $\lambda_{c,GAP}$ para secções ligadas por espaçadores, esses valores são conservadores apenas por 5%. Para essas secções em específico foi recomendado usar esse coeficiente.

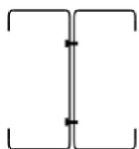
(Roy et al., 2018b)



Efetuarão uma análise experimental de 60 provetes e numérica de 204 modelos não lineares em elementos com secções abertas compostas formadas por C's sobre compressão. O objetivo principal era analisar a influência da espessura dos perfis. A capacidade das colunas obtidas pelos ensaios experimentais e

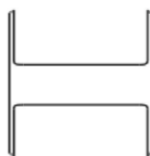
numéricos foram comparadas com as previsões fornecidas pela NAS e AS/NZS. Desta comparação concluíram que os resultados são geralmente conservadores para as colunas que tem como modo de rotura a encurvadura global e não conservadores em 12% para colunas onde este é encurvadura local. Foram propostas novas regras de dimensionamento.

(Fratamico et al., 2018a) e
(Fratamico et al., 2018b)



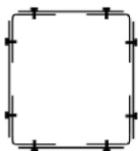

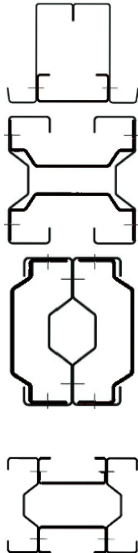
Realizaram uma análise experimental a diferentes elementos com secções abertas compostas formadas por C's. Com esses resultados forneceram um dimensionamento que incorpora o DSM para reduzir a complexidade do dimensionamento dos parafusos para condições de apoio encastradas. No segundo artigo é também concluído que ligar perfis costas com costas através de parafusos traz um incremento de capacidade de carga de até 21%.

(Muthuraman et al., 2020)

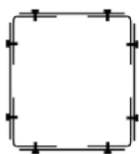


Executaram uma análise numérica a 44 modelos compostos por elementos com secções abertas compostas reforçadas por travessas formadas por C's. Concluíram que o DSM fornecia modos de encurvadura e carga de colapso estáveis para rácios de esbeltezas entre 20 e 60. Para rácios superiores a 60, estes eram instáveis. Com o aumento do rácio da esbelteza, a capacidade de carga da secção diminui. De um estudo comparativo, mostrou-se que a capacidade de encurvadura de secções compostas depende na maioria da encurvadura distorcional da coluna. Foi proposta uma expressão linear para encontrar a carga última destas secções. Pode-se fazer a encurvadura por flexão surgir no eixo paralelo à alma podendo ocorrer ações combinadas.

Quadro 2.3 – Secções compostas fechadas investigadas por outros autores à temperatura ambiente.

Secções Fechadas		
Referência	Secção	Conclusões
(El Aghoury et al., 2010)		Elaboraram uma análise experimental e numérica em elementos com <u>secções fechadas compostas reforçadas por travessas formadas por 4 L's</u> . Os resultados experimentais e numéricos tiveram uma boa relação, sendo os numéricos geralmente superiores, mas por menos de 8%. Os resultados foram próximos dos fornecidos pelo EC3 e NAS para colunas curtas. Para colunas médias devido à interação de fenómenos de torção e flexão alguns provetes deram inferiores ao previsto nas normas de dimensionamento. Colunas compostas que tiverem conexões aparafusadas, devem ser tidas em conta nos elementos finitos com estas.
(Reyes & Guzmán, 2011)		Efetuararam uma análise experimental em elementos com <u>secções fechadas compostas formadas por C's</u> e avaliaram o efeito das soldaduras. Analisaram algumas situações à compressão com diferentes espaçamentos e condições de apoio. Concluíram que o coeficiente de redução fornecido pela NAS não era necessário à exceção da situação com um espaçamento elevado (900 mm) independentemente do tipo de suporte.
(Georgieva et al., 2012d)		Realizaram uma análise numérica em elementos com <u>secções fechadas compostas formadas por Sigma's, Z's, C's e O's</u> . Compararam com o dimensionamento fornecido pela NAS e concluíram que os valores previstos por este estavam dentro do esperado. É um bom indicador para incluir esse tipo de construção no dia a dia.

(El Aghoury et al., 2013), (El Aghoury et al., 2015)



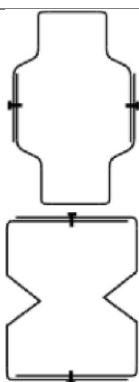
Executaram uma análise numérica a elementos com seções fechadas compostas reforçadas por travessas formadas por 4 L's e concluíram que EC3 é conservador para colunas médias e longas e fica ainda mais quanto maior for o valor de esbelteza λ_b (base/espessura). Foram sugeridas equações empíricas com base nos modelos numéricos para prever a capacidade de carga. O dimensionamento pelo EC3, o NAS e as fórmulas empíricas, para este tipo de colunas são realistas.

(Craveiro et al., 2016a)



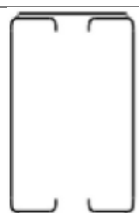
Elaboraram uma análise experimental de 24 provetes com seções abertas e fechadas compostas formadas por C's, originando C, I, R e 2R. Consideraram-se duas condições de apoio distintas, encastrado-encastrado e rotulado-rotulado. Foi medida a carga de encurvadura, deslocamentos verticais e horizontais. Concluiu-se que para as condições rotulado-rotulado a resistência à encurvadura aumentava em 9.4 para uma seção composta 2R em relação a um perfil C isolado, 3.35 em relação a seção composta I e 3.63 em relação a uma seção composta R. Para condições encastrado-encastrado, a seção composta 2R era 5.6 vezes mais resistente à encurvadura que um perfil C, 2.01 que seções compostas I e 2.51 que seções compostas R. Os resultados obtidos foram comparados com o EC3 e concluiu-se que estes eram próximos para condições rotulado-rotulado e conservadores para condições encastrado-encastrado.

(Zhang & Young, 2018)

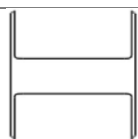


Efetuarão uma análise experimental em elementos com seções fechadas compostas formadas por V's e O's. Concluíram que quando comparando com NAS, usar 1.2, 1.5 e 2 vezes a espessura de um perfil na zona de sobreposição não é conservador. Por outro lado, usando a espessura de apenas um é.

(Kherbouche & Megnounif, 2019)

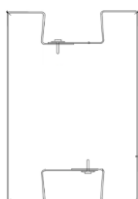


Realizaram uma análise numérica em elementos com seções abertas e fechadas compostas reforçadas por travessas formadas por C's. Quando comparados os resultados com o EC3, concluíram que para seções abertas estes são conservadores para colunas onde o modo de rotura é encurvadura local e ligeiramente conservadores para encurvadura global. Para seções fechadas é o



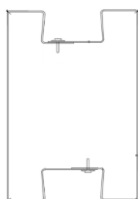
oposto. A distância entre chapas tem uma influência grande no tipo de encurvadura condicionante.

(Roy et al., 2019)



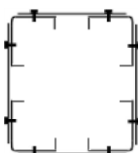
Executaram uma análise experimental de 36 provetes e numérica de 90 modelos a elementos com secções fechadas. Discutiram o modo de rotura, capacidade axial entre outros. Para “*stub*” e colunas curtas, o modo de rotura foi por encurvadura local. Para colunas intermédias e esbeltas, foi por encurvadura global ou uma combinação de global e local. No caso dos “*stub*” e colunas curtas, o aumento do espaçamento dos parafusos tem um efeito desprezável. Pelo contrário, para colunas intermédias e esbeltas, se o espaçamento entre parafusos for duplicado, a resistência axial é reduzida em média em 15%-20% no primeiro caso e 20% no segundo. Tanto os ensaios experimentais como os modelos numéricos foram comparados com o dimensionamento fornecido pelo NAS, AS/NZS e EC3. Os resultados foram demasiado conservadores para todas as colunas. Para as colunas nas quais o modo de rotura é a encurvadura por flexão em 15% e quando é encurvadura local em 8%.

(Roy & Lim, 2019)



Elaboraram uma análise numérica em elementos com secções fechadas e concluíram que para o “*stub*”, duplicar o espaçamento dos parafusos tem um efeito desprezável. Para colunas curtas, intermédias e esbeltas tem uma redução na capacidade axial de 5%, 12% e 22% respetivamente. Os valores foram comparados com as previsões obtidas pela NAS e AS/NZS e mostraram-se conservadores por 15% para colunas em que o modo de rotura foi a encurvadura global e não conservadores em 5% para colunas onde este foi a encurvadura local.

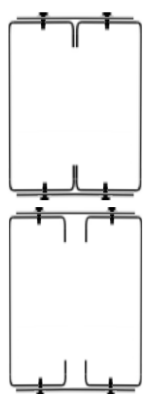
(Anbarasu & Dar, 2020)



Efetuararam uma análise numérica em elementos com secções fechadas compostas reforçadas por travessas formadas por 4 L's. Concluíram que quando comparados esses resultados com o EC3, AS/NZS e com o modelo proposto pelo (el Aghoury et al., 2013) para a resistência axial estes eram no geral não conservadores e não realistas para o AS/NZS e para coeficientes de esbelteza baixos (colunas curtas) pelo EC3. São conservadores para esbeltezas médias ou altas de colunas compostas pelo EC3. A formulação proposta pelo autor acima citado falhou em prever a capacidade axial deste tipo de secções. Foi sugerida uma

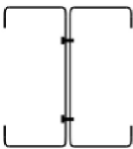
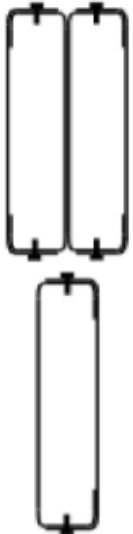
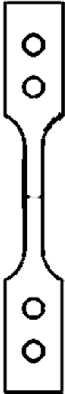
modificação ao AS/NZS e EC3 para tornar o dimensionamento de elementos com estas secções mais seguro.

(Rahnavard et al., 2021)

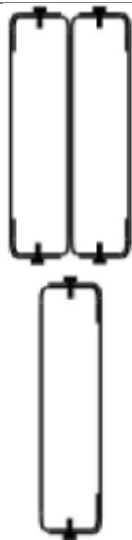


Realizaram uma análise numérica em elementos com secções fechadas compostas reforçadas por travessas formadas com C's. Variaram-se vários parâmetros, como o espaçamento entre perfis, a quantidade de parafusos e chapas, o tipo de chapas e ainda se considerou perfis soldados. Comparando o caso soldado com o ligado por chapas aparafusadas, concluíram que o segundo se tiver mais de 2 filas de parafusos oferece uma resistência à compressão superior à soldada. É recomendado considerar mais de 2 filas horizontais de parafusos tanto para condições de apoio encastradas como rotuladas. Para condições de apoio na base encastrado/apoiado, a capacidade de carga aumentou muito para soluções UP (chapas onde parte da alma é restrita), aquando do espaçamento entre chapas diminui. Este incremento não é tão notável para chapas FP (chapas onde apenas os banzos são restritos), uma vez que estas não fornecem um aumento tão grande na restrição à encurvadura local. O aumento de parafusos por chapa aumenta a resistência axial. O estudo mostrou que mais de 3 filas de parafusos não é vantajoso. Sendo 3 filas o valor ótimo. Estes resultados mostraram que o recomendado é um espaçamento igual ao mínimo entre $(3.25 h, 30 i_{min})$, isto apenas para as configurações investigadas. A comparação entre resultados analíticos (NAS e EC3) e os numéricos, não foi conservador para os elementos em AEF com apenas uma fila de parafusos. Para a solução ótima sugerida os resultados foram conservadores.

Quadro 2.4 – Secções compostas abertas e fechadas investigadas por outros autores ao fogo.

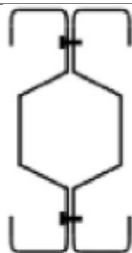
Secções ao fogo		
Referência	Secção	Conclusões
(Craveiro et al., 2014)		Executaram uma análise experimental em elementos com <u>secções simples e abertas compostas formadas por C's</u> ao fogo. Concluíram que o tipo de apoio e a carga inicial aplicada tem um efeito bastante significativo no comportamento das colunas ao fogo.
(Craveiro, 2015)		Elaboraram uma análise experimental de 24 ensaios à temperatura ambiente e 96 em situação de incêndio a elementos com <u>secções simples em U, C, secções compostas abertas em I e fechadas em R e 2R</u> . Variaram-se as secções transversais, influência do carregamento, restrição à dilatação térmica, condições de apoio e obteve-se a capacidade de carga para as diferentes secções. Todos os resultados foram utilizados para proceder à modelação em ABAQUS. Observaram que aço enformado a frio sem proteção tem um mau comportamento ao fogo, aumentando o nível de restrição à expansão térmica o comportamento da coluna é controlado pelo aumento das forças axiais geradas devido à restrição imposta, enquanto para níveis de restrição baixos o comportamento da coluna é controlado pelo aumento de temperatura e pela consequente degradação das propriedades mecânicas do aço.
(Craveiro et al., 2016b)		Efetuararam uma análise experimental a provetes sujeitos ao fogo através de um teste de tração. Para aço enformado a frio de baixa resistência como o S280GD, os resultados comparados com o EC3-1-2:2005 foram não conservadores.

(Craveiro et al., 2016c)



Realizaram uma análise experimental em elementos com secções fechadas compostas formadas por C's ao fogo. Concluíram que a resistência fornecida pelo EC3-1-2 ao fogo a 350°C era demasiado conservadora.

(Laím et al., 2020)



Executaram uma análise experimental em elementos com secções simples e abertas compostas formadas por Σ 's ao fogo. Concluíram que o modo principal de rotura para este tipo de secções sujeitas ao fogo é por encurvadura por flexão.

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Programa experimental

Neste capítulo será apresentado o trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação, em colunas compostas de aço enformado a frio reforçadas por travessas. O objetivo consistiu na análise do comportamento estrutural de vários provetes formados com 2 Σ , principalmente a sua ação compósita, a capacidade axial em compressão, os deslocamentos horizontais e verticais e os modos de encurvadura.

O programa experimental foi estabelecido de forma a variar os seguintes parâmetros: o número de chapas, o número de parafusos e o espaçamento entre perfis. Fizeram-se 3 repetições de cada provete para ter em conta as imperfeições que pudessem existir e aumentar o grau de validade dos resultados em termos estatísticos. Os modelos foram ensaiados com condições de apoio encastrado-encastrado, sendo os ensaios realizados com controlo de deslocamento, considerando-se uma velocidade de 0.01 mm/s (ensaio estático, sem influência de efeitos dinâmicos).

Na Figura 3.1 apresenta-se um breve esclarecimento sobre o significado da simbologia usada na nomenclatura dos modelos.

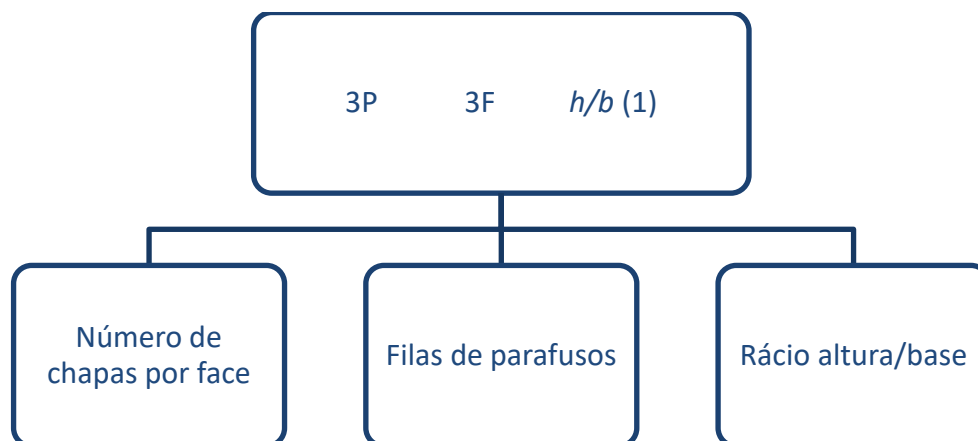


Figura 3.1 – Significado da nomenclatura dos modelos.

Na Figura 3.2 são representados os 5 tipos de modelos diferentes ensaiados. Estando os provetes (de secção duplamente simétrica) representados em vista lateral, apenas se visualizam metade das chapas e dos parafusos.

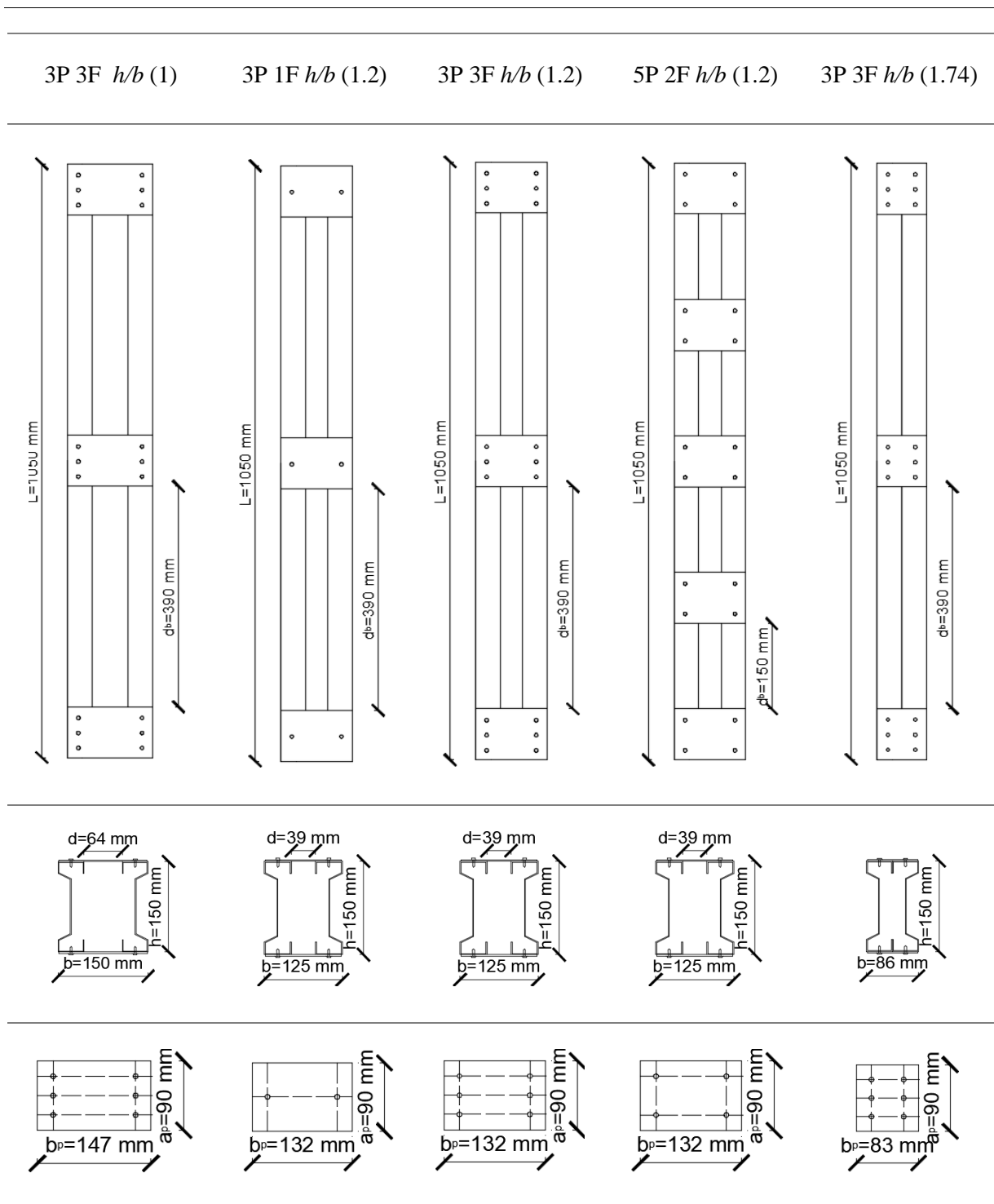


Figura 3.2 – Diferentes provetes analisados.

No Quadro 3.1 são indicadas a altura dos provetes (L), o espaçamento dos perfis (d), as dimensões das chapas ($a_p \times b_p \times t$), os espaçamentos entre chapas (d_b), o número de parafusos por chapa (n_f) e o número de chapas em uma das duas faces (n_p).

Quadro 3.1 – Descrição geométrica de cada modelo.

Provete	L (mm)	d (mm)	$a_p \times b_p \times t$ (mm)	d_b (mm)	n_f (mm)	n_p (mm)
3P 3F h/b (1)	1050	64	90x147x2.5	390	6	3
3P 1F h/b (1.2)	1050	39	90x122x2.5	390	2	3
3P 3F h/b (1.2)	1050	39	90x122x2.5	390	6	3
5P 2F h/b (1.2)	1050	39	90x122x2.5	150	4	5
3P 3F h/b (1.74)	1050	-	90x73x2.5	390	6	3

Os provetes usados foram fabricados pela PERFISA, todos 1050 mm de comprimento. A sua classe estrutural é S280GD+Z275 possuindo 0.04 mm (0.02 mm em cada face) de camada de galvanização em zinco segundo a EN 10346 (EN 10346, 2015).

A secção Σ simples tem 1.5 mm de espessura, 43 mm de banzo, reforços nas extremidades de 20 mm, e uma alma com 150 mm onde há dois reforços com um angulo de 117°. Todas as secções analisadas são compostas por 2 Σ , estando as dimensões destas descritas na Figura 3.3 onde se pode analisar a situação com os perfis encostados h/b (1.74) e a situação onde se varia o d de maneira a obter o h/b (1.2) e h/b (1). Para a ligação das chapas aos perfis optou-se por parafusos auto-perfurantes com 6.3 mm de diâmetro de classe 10.9, por serem os mais comuns.

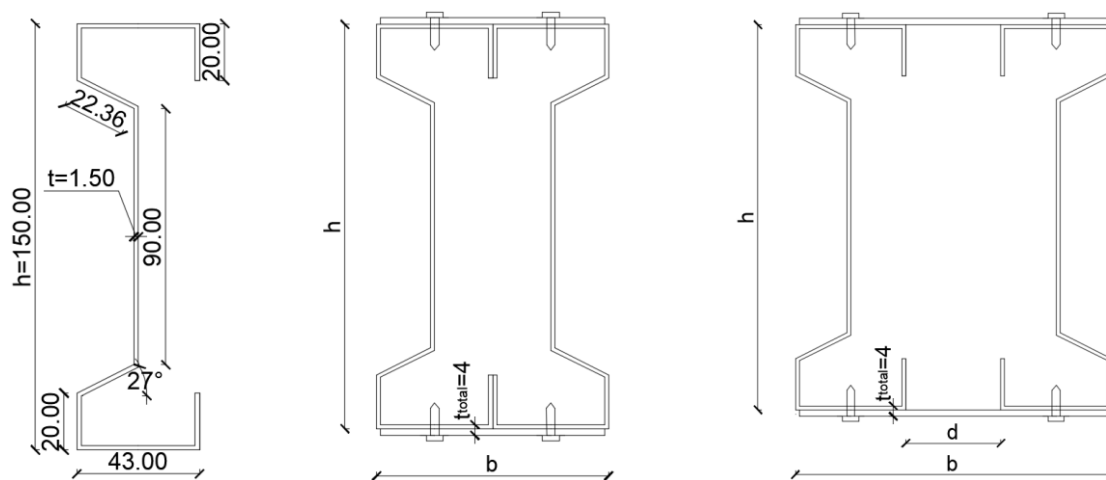


Figura 3.3 – Secção transversal dos provetes (dimensões em mm).

3.2 Esquema de Ensaios

Os provetes foram ensaiados à compressão utilizando um atuador hidráulico (Figura 3.4). Estes ensaios realizaram-se no FireLab, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O sistema experimental é composto por uma “*Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine, Series LFV 600kN*” da marca walter + bai e por apoios rígidos ilustrados na Figura 3.4

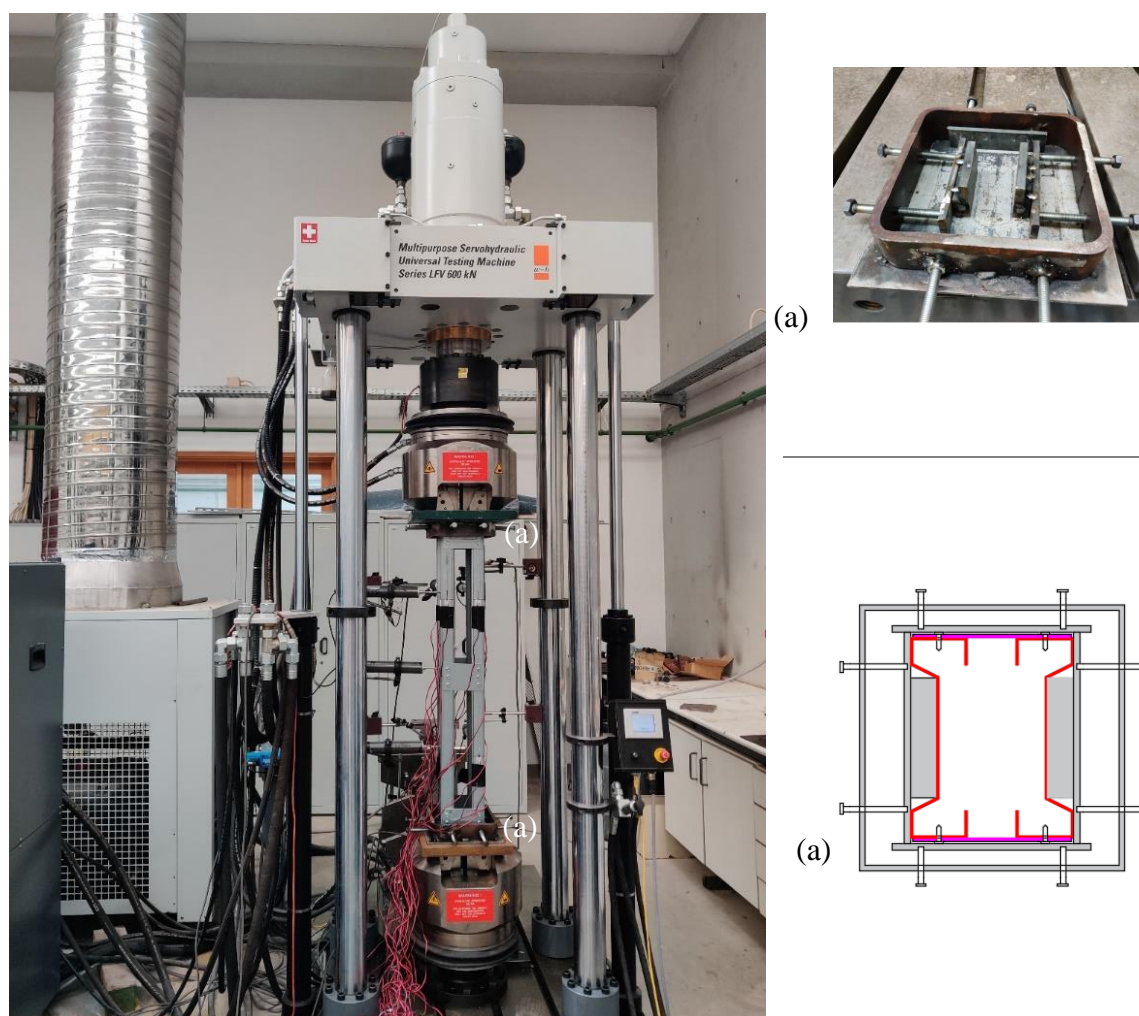


Figura 3.4 – Esquema de ensaios à compressão com respetivos apoios.

3.3 Montagem e instrumentação das colunas

O procedimento utilizado para a montagem das colunas consistiu nas seguintes fases:

- Marcação do posicionamento dos parafusos nas chapas.
- Colocação dos dois perfis com o espaçamento pretendido, colocando um contra o outro, ou recorrendo a um espaçador de madeira (Figura 3.5a).
- Montagem dos dois perfis a partir do mesmo ponto, evitando que estes estivessem desfasados.
- Colocação da chapa centrada e segura (com a ajuda de um ou dois alicates de pressão).
- Aparafusamento da chapa aos dois perfis (Figura 3.5b).
- Repetição do processo para todas as chapas de um provete, concluindo assim a sua montagem (Figura 3.5c).

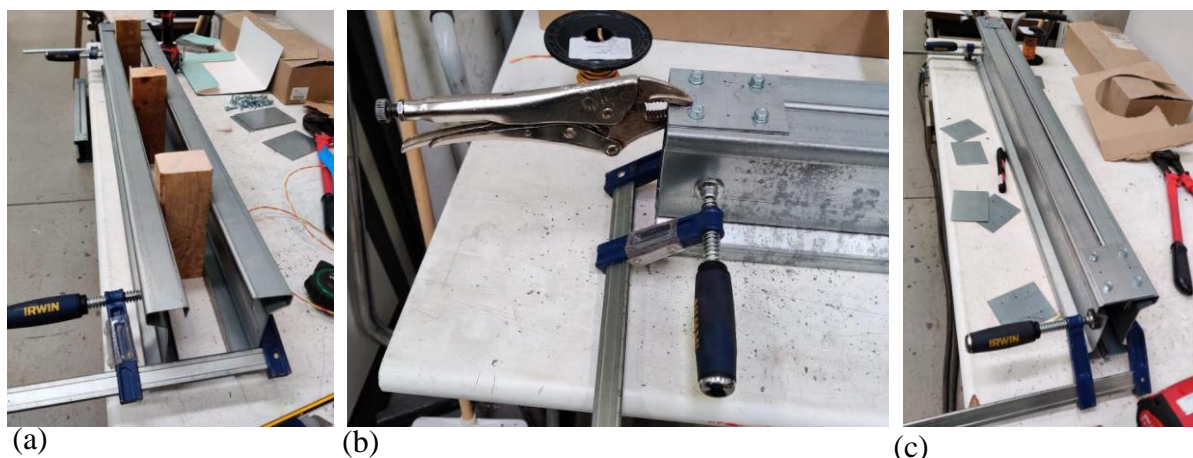


Figura 3.5 – Processo de montagem.

(a) Espaçamento dos perfis, (b) Ajuste, fixação e aparafusamento e (c) Coluna Completa.

A instrumentação é um processo minucioso e devido à elevada sensibilidade e impacto económico que os extensómetros (Figura 3.6a) tem nos custos, deve ser feita com especial atenção e cuidado.

Usou-se o procedimento comum e então:

- Procedeu-se ao desgaste da camada de zinco (Figura 3.7a) na zona de colagem do extensómetro, recorrendo-se a uma lixa fina. Foi feito de maneira suave para evitar remover área da secção e assim criar uma possível zona de fragilidade.
- Removeram-se as gorduras e poeiras através de um cotonete e acetona (Figura 3.6d).

- Com a superfície pronta a receber o extensómetro, colocou-se uma fita cola sobre este e transportou-se até à zona de colagem.
- Com o extensómetro previamente apontado procedeu-se à colagem deste usando cola de ciano acrilato (Figura 3.6b), deixando-se a secar de um dia para o outro (Figura 3.7b).
- No dia seguinte removeu-se a fita cola auxiliar e destacou-se os fios de ligação do extensómetro para então isolar o seu contacto do perfil através de uma fita de isolamento (Figura 3.6c e Figura 3.7c).
- Estanharam-se os fios de ligação a uns cabos de maior comprimento e verificou-se o seu funcionamento através de um voltímetro (Figura 3.6e).
- Para terminar, colocou-se uma fita cola preta logo após a cola branca de modo a fornecer alguma resistência extra e evitar que, quer a ligação do extensómetro aos cabos, quer o extensómetro se quebrasse (Figura 3.7d).

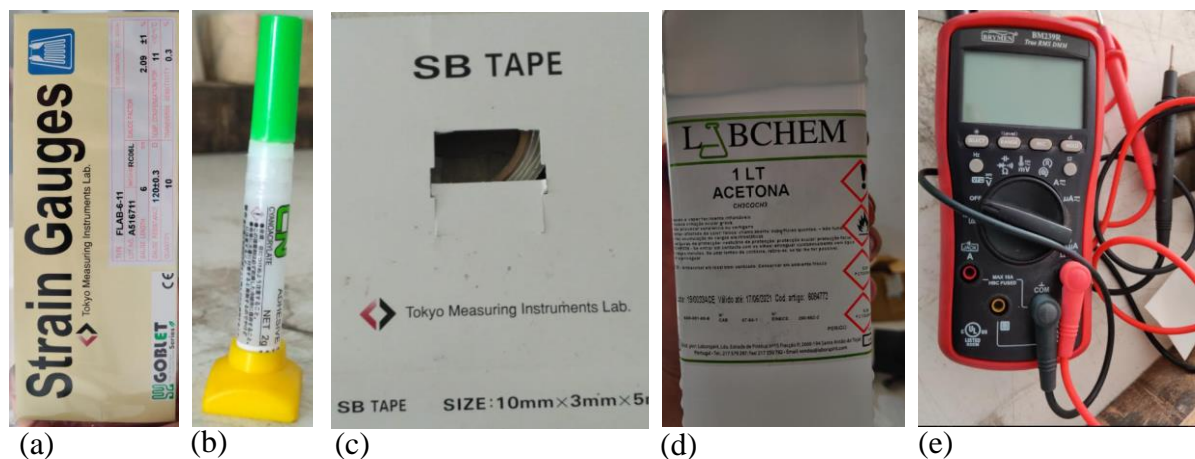


Figura 3.6 – Materiais usados na montagem e verificação do bom funcionamento.

(a) Extensómetros, (b) Ciano acrilato, (c) Fita de Isolamento, (d) Acetona e (e) Voltímetro.

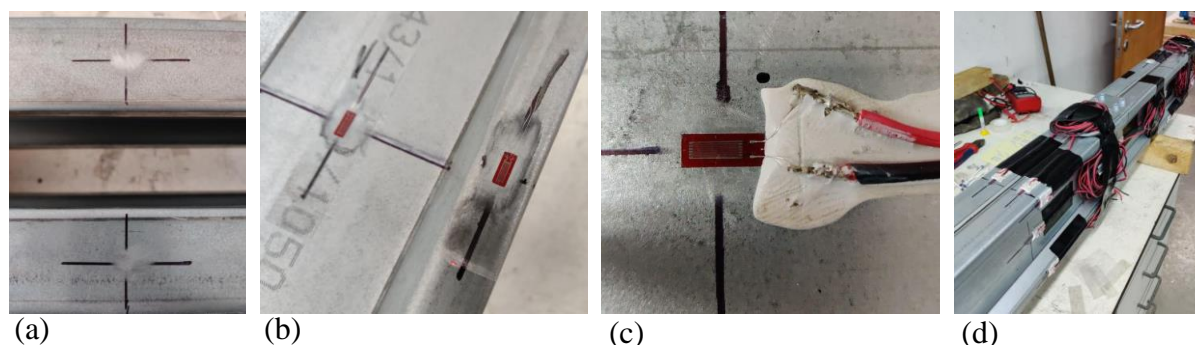
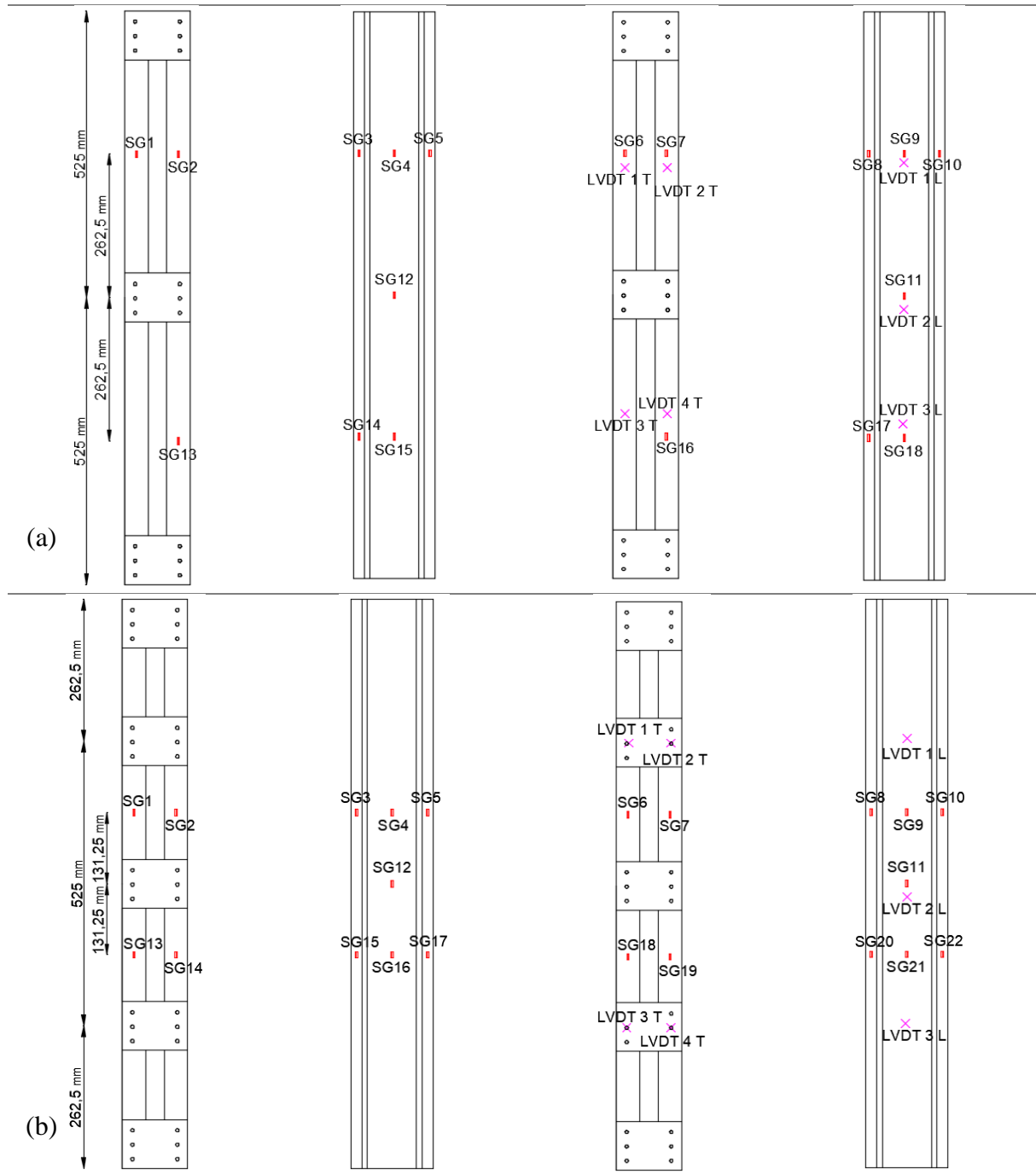


Figura 3.7 – Fases da montagem.

(a) Desgaste da camada de zinco, (b) Aplicação do extensómetro através de fita cola e ciano acrilato, (c) Aplicação fita de isolamento para evitar o contacto entre o perfil e os cabos e (d) Coluna completa.

Há 2 tipos diferentes de distribuições de extensómetros. Um é usado para os 4 grupos com 3 chapas e é composto por 18 extensómetros (Figura 3.8a). O outro é usado no único grupo com 5 chapas e composto por 22 extensómetros (Figura 3.8b). Os extensómetros foram todos colocados na direção axial das colunas.



Verifica-se que, ainda que se tenham dois mapas de extensómetros diferentes, os LVDT são os mesmos para ambas as situações, 3 laterais (L) e 4 traseiros (T).

3.4 Procedimento experimental

O procedimento experimental incluiu as seguintes etapas:

- Colocação dos provetes na máquina de ensaios e ligação dos extensómetros e LVDT previamente ajustados ao recetor de dados.
- Antes de iniciar o ensaio procedeu-se à verificação da verticalidade da peça como está representado na Figura 3.9a através de um nível.
- Início do ensaio aplicando um deslocamento contínuo de 0.01 mm/s à peça e registo das medições dos deslocamentos laterais e axiais, da força e extensão, com um intervalo entre registos de 0.5 s.

Os ensaios prolongaram-se todos no mínimo até 10 mm (Figura 3.9b) de deslocamento vertical, sendo isso mais que suficiente para atingir a carga máxima em todos os provetes.

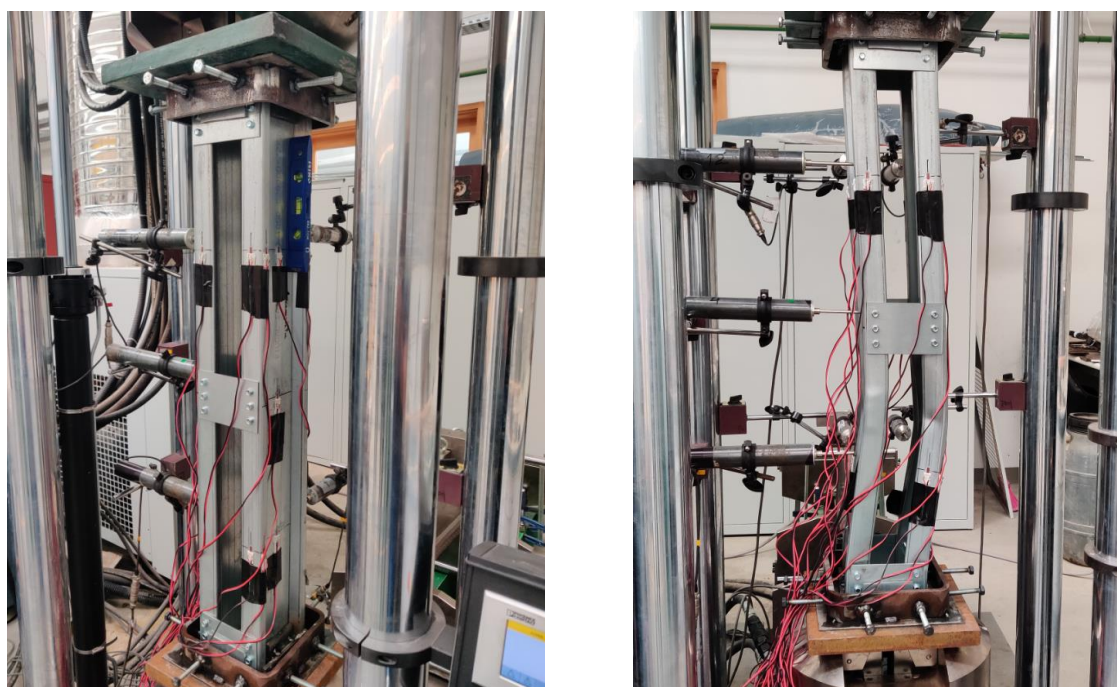


Figura 3.9 – Antes e depois da realização do ensaio.

(a) Colocação dos provetes e verificação da verticalidade e (b) Provette depois de ensaiado.

3.5 Caracterização mecânica

As dimensões do provete ensaiado à tração estão expressas na Figura 3.10. Foram feitas segundo a norma ISO 6892-1 (ISO 6892-1, 2019) e o aço analisado é o S280GD fornecido pela PERFISA. O provete foi retirado da alma e do banzo.

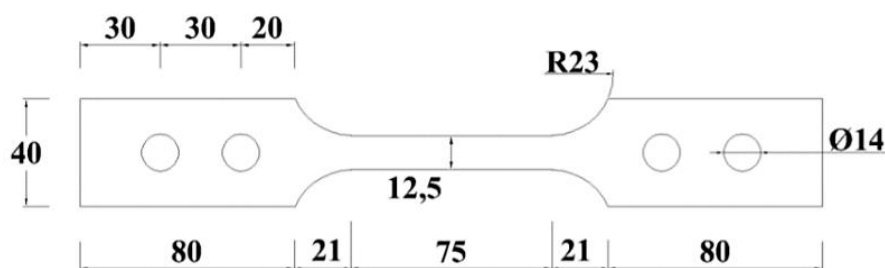


Figura 3.10 – Provete ensaiado (dimensões em mm).

Os valores nominais da tensão de cedência e da tensão última do aço S280GD, segundo a norma EN 10326 (EN 10326, 2004) são de 280 MPa e 360 MPa respectivamente. Analisando as curvas tensão-extensão do aço S280GD usado, obtidas nos ensaios, verificou-se que ambos os valores são superiores aos nominais. A tensão de cedência (f_y) é cerca de 300 MPa e a tensão última (f_u) é cerca de 420 MPa.

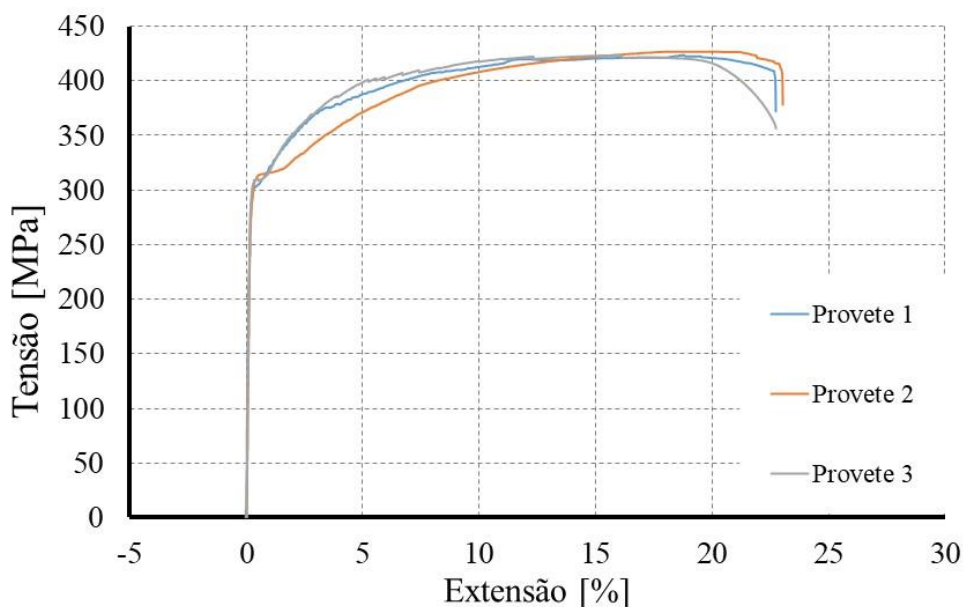


Figura 3.11 – Curva Tensão-Extensão do aço utilizado (S280).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Modos de encurvadura

No geral, os modos de rotura verificados nos diversos modelos ensaiados foram uma interação entre encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura global ocorreu segundo o eixo de menor inércia, a encurvadura local (Figura 4.1a) na alma dos perfis e a distorcional (Figura 4.1b) principalmente nos banzos. Serão expostos os modos de encurvadura de cada provete. Todos eles tiveram influência local que inevitavelmente provoca encurvadura distorcional.

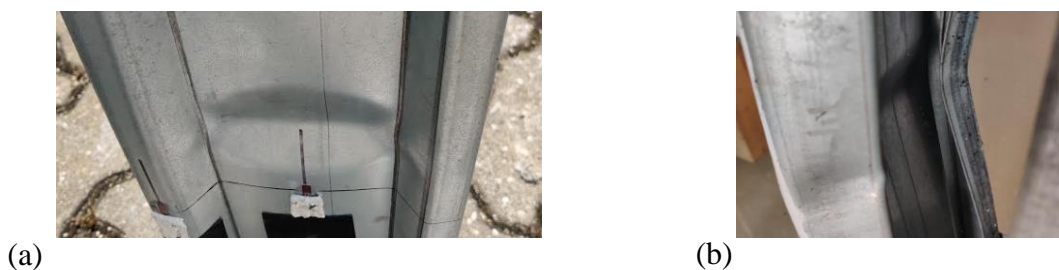


Figura 4.1 – (a) Encurvadura local e (b) Encurvadura distorcional.

Dentro das várias repetições para o mesmo modelo há modos de encurvadura diferentes. Ainda assim, entre os vários modelos há vários modos que se repetem devido ao facto de as colunas terem um comportamento bastante semelhante, à exceção do modelo com 5 chapas. Nessa coluna o comportamento é diferente das restantes.

O modo de encurvadura com dupla curvatura (Figura 4.2), é comum a todos os modelos com 3 chapas. É provocado pela chapa colocada a meio das colunas que funciona como um apoio, e é uma interação do modo global, local e distorcional.

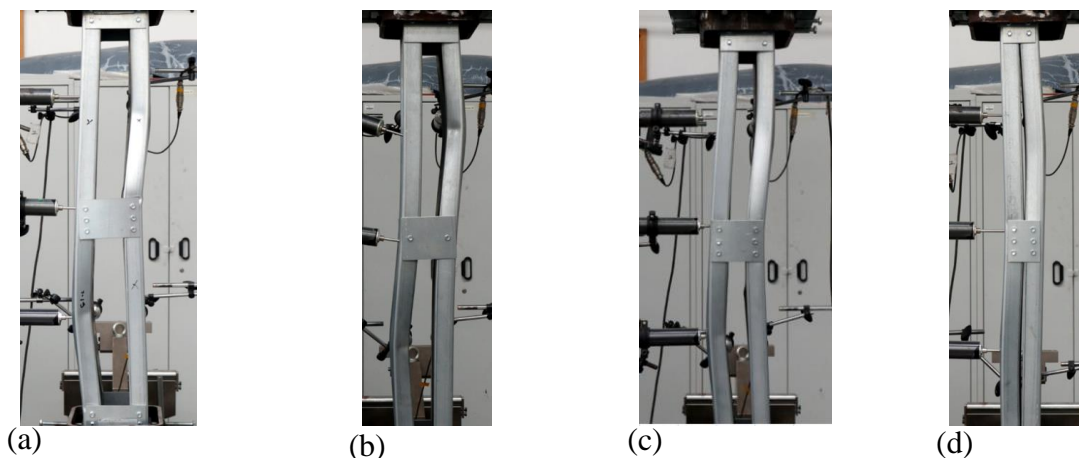


Figura 4.2 – (a) 3P 3F h/b (1), (b) 3P 1F h/b (1.2), (c) 3P 3F h/b (1.2) e (d) 3P 3F h/b (1.74).

O modo distorcional no geral provoca uma rotação dos banzos em direção ao centro.

A Figura 4.3 ilustra os modos de colapso verificados no ensaio da série de provetes 3P 3F h/b (1). Mais especificamente verifica-se:

- 1º provete para o 3P 3F h/b (1) verifica-se inicialmente uma encurvadura global, seguida de uma encurvadura local e distorcional nomeadamente na metade inferior da coluna (Figura 4.3a).
- 2º provete para o 3P 3F h/b (1) verifica-se uma interação entre a encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura local e distorcional é notável na parte superior direita e inferior esquerda da coluna (Figura 4.3b).
- 3º provete para o 3P 3F h/b (1) observou-se uma predominância de encurvadura local e distorcional, na parte inferior da peça (Figura 4.3c).

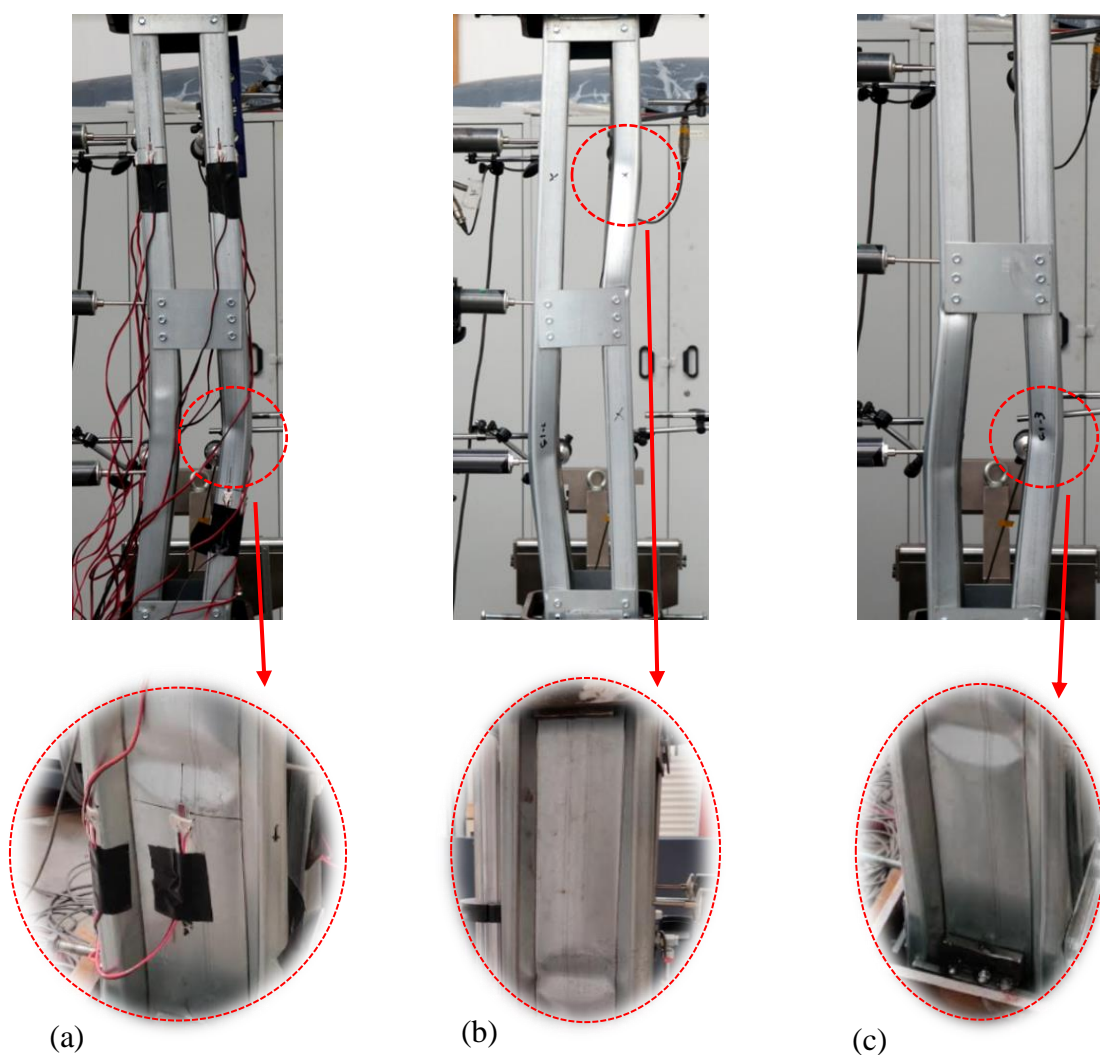


Figura 4.3 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1).

A Figura 4.4 ilustra os modos de colapso verificados no ensaio da série de provetes 3P 1F h/b (1.2). Mais especificamente verifica-se:

- 1º provete para o 3P 1F h/b (1.2) verifica-se inicialmente uma encurvadura global, seguida de uma encurvadura local e distorcional nomeadamente na metade inferior da coluna (Figura 4.4a).
- 2º provete para o 3P 1F h/b (1.2) verifica-se uma interação entre a encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura local e distorcional é notável na parte superior direita e inferior esquerda da coluna (Figura 4.4b).
- 3º provete para o 3P 1F h/b (1.2) observou-se uma interação entre a encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura local e distorcional é notável na parte superior esquerda e inferior direita da coluna (Figura 4.4c).

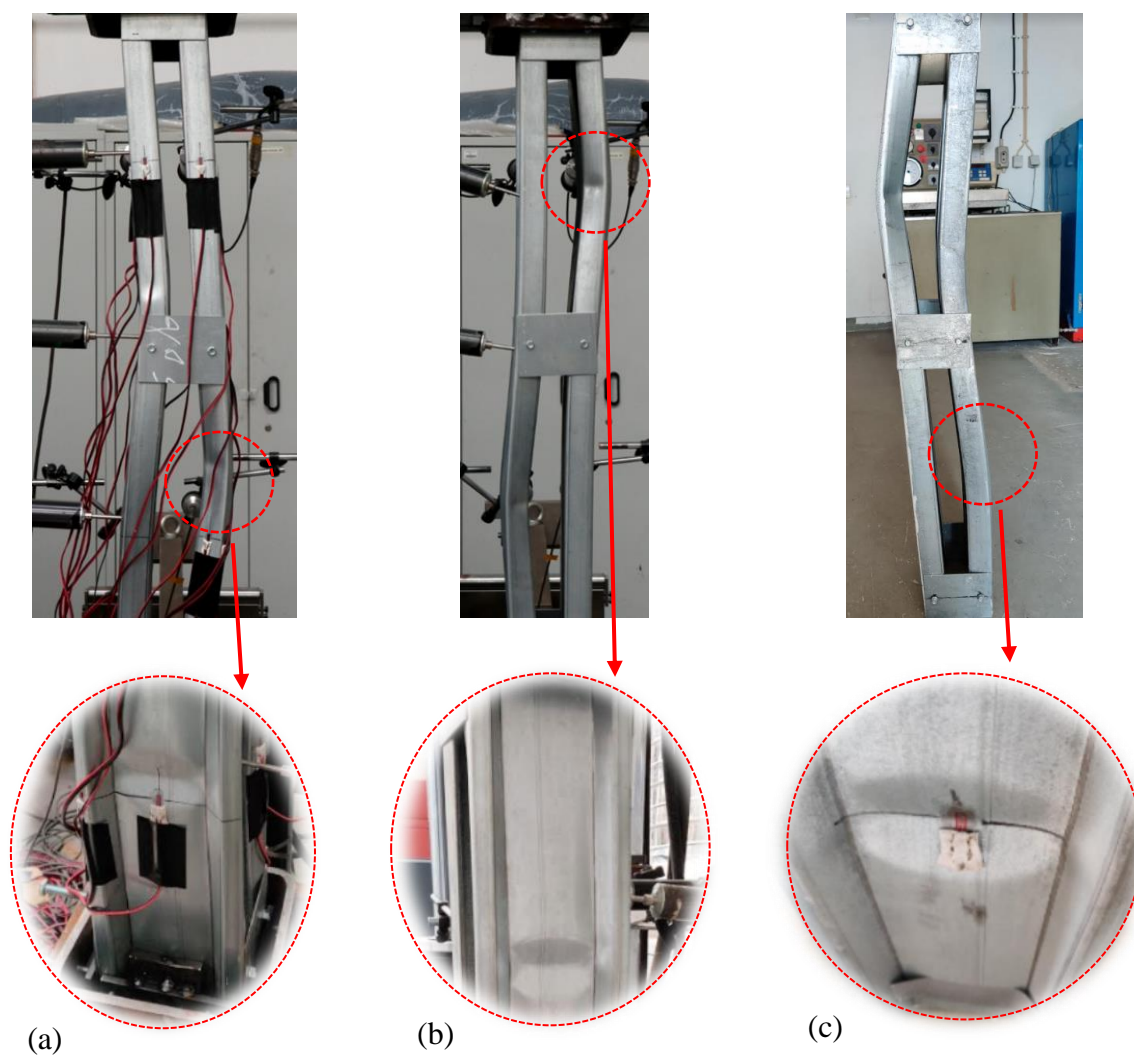


Figura 4.4 – Modo de rotura dos provetes 3P 1F h/b (1.2).

A Figura 4.5 ilustra os modos de colapso verificados no ensaio da série de provetes 3P 3F h/b (1.2). Mais especificamente verifica-se:

- 1º provete para o 3P 3F h/b (1.2) verifica-se inicialmente uma encurvadura local e distorcional na zona superior esquerda, seguida de uma encurvadura global (Figura 4.5a).
- 2º provete para o 3P 3F h/b (1.2) verifica-se uma interação entre a encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura local e distorcional é notável na parte superior direita e inferior esquerda da coluna (Figura 4.5b).
- 3º provete para o 3P 3F h/b (1.2) observou-se uma predominância de encurvadura global, com alguma local na zona próxima da chapa central (Figura 4.5c).

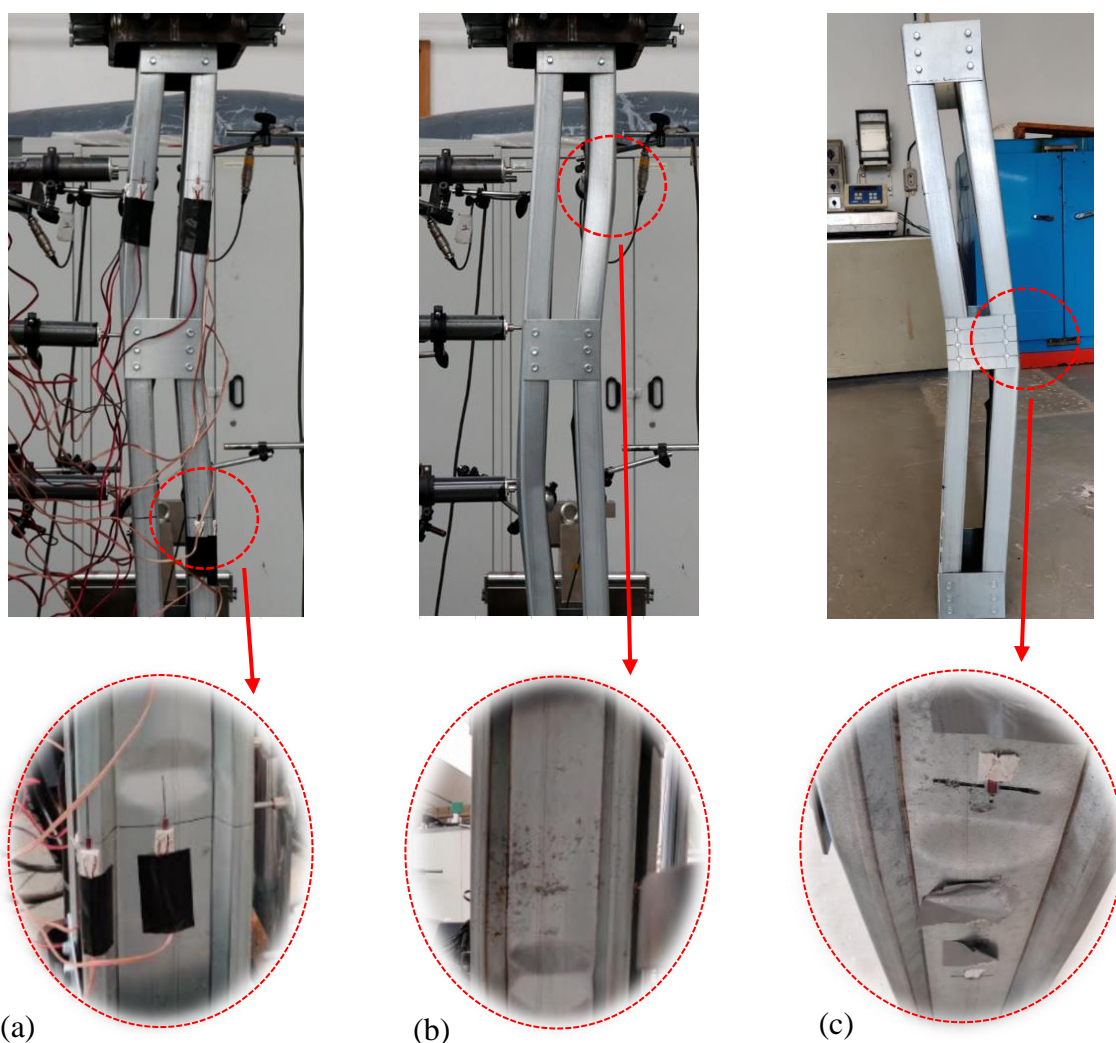


Figura 4.5 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1.2).

A Figura 4.6 ilustra os modos de colapso verificados no ensaio da série de provetes 5P 2F h/b (1.2). Esta serie é a que tem uma melhor ação compósita e por isso maior predominância de efeitos locais como modo de rotura. Mais especificamente verifica-se:

- 1º provete para o 5P 2F h/b (1.2) verifica-se uma encurvadura local na zona superior da peça. Desta surge alguma distorção e uma encurvadura global (Figura 4.6a).
- 2º provete para o 5P 2F h/b (1.2) verifica-se uma encurvadura local na zona inferior da peça. Desta surge alguma distorção e uma encurvadura global (Figura 4.6b).
- 3º provete para o 5P 2F h/b (1.2) observou-se encurvadura local e distorcional na zona abaixo da chapa central. Desta surgiu a encurvadura global que acabou por provocar encurvaduras locais na zona acima da chapa central (Figura 4.6c).

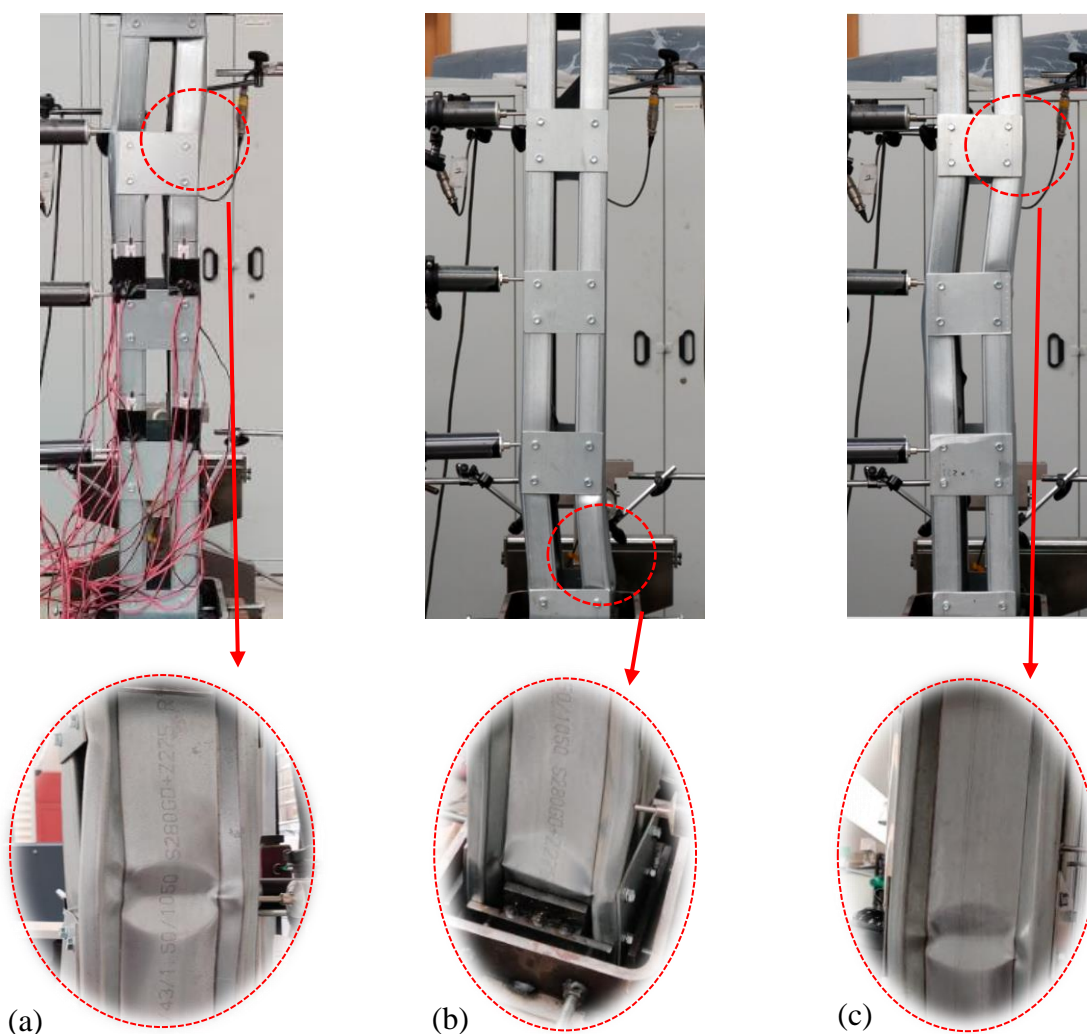


Figura 4.6 – Modo de rotura dos provetes 5P 2F h/b (1.2).

A Figura 4.7 ilustra os modos de colapso verificados no ensaio da série de provetes 3P 3F h/b (1.74). Mais especificamente verifica-se:

- 1º provete para o 3P 3F h/b (1.74) verifica-se uma encurvadura local na zona inferior da peça. Desta surge distorção e uma encurvadura global (Figura 4.7a).
- 2º provete para o 3P 3F h/b (1.74) verifica-se uma encurvadura global com uma componente local na zona central da peça (Figura 4.7b).
- 3º provete para o 3P 3F h/b (1.74) observou-se uma interação entre a encurvadura global, local e distorcional. A encurvadura local e distorcional é notável na parte superior direita e inferior esquerda da coluna (Figura 4.7c).

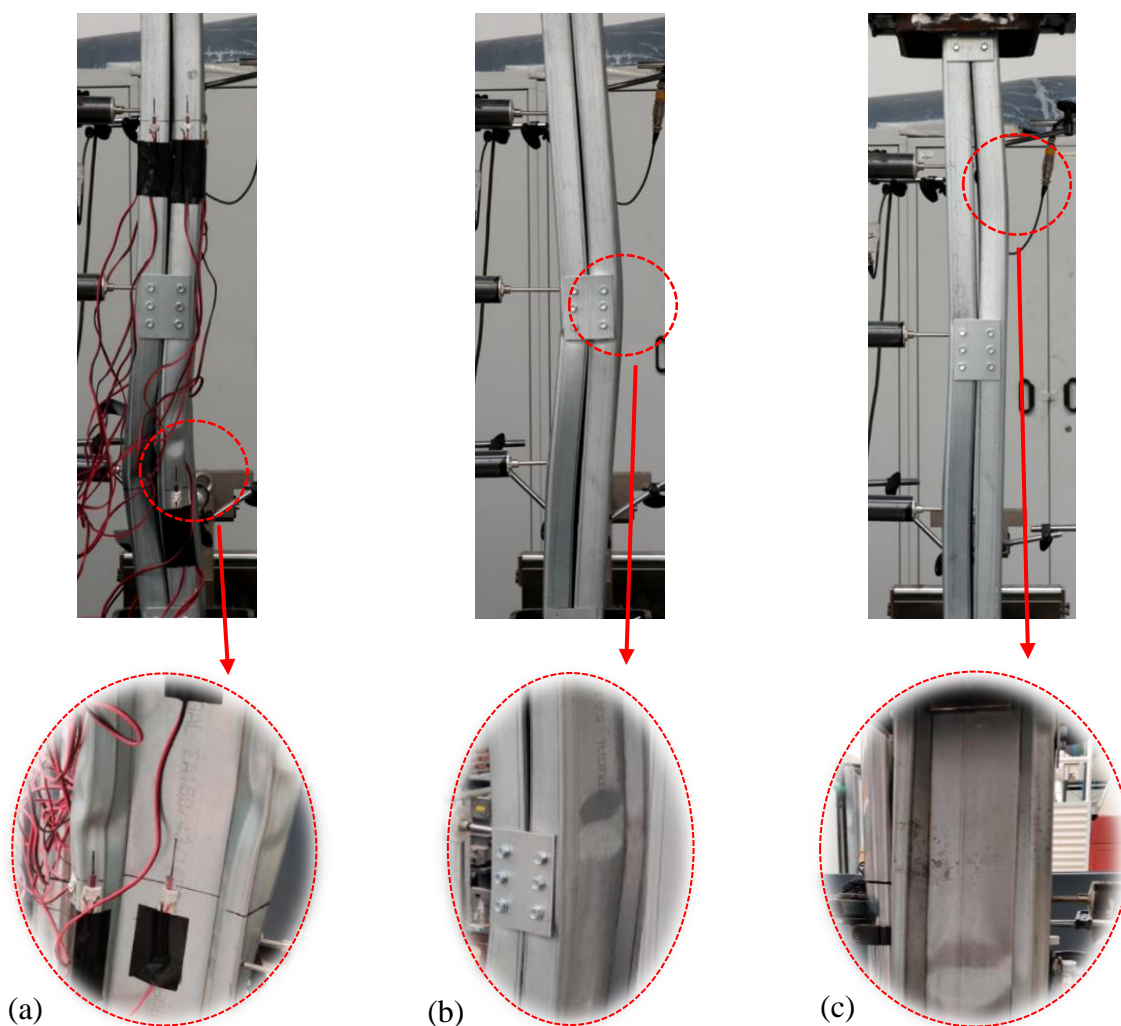


Figura 4.7 – Modo de rotura dos provetes 3P 3F h/b (1.74).

4.2 Capacidade de carga

Os ensaios foram realizados considerando condições de apoio encastrado-encastrado. No Quadro 4.1 apresenta-se a carga máxima de compressão atingida ($P_{u,E}$), o deslocamento vertical (D_v), a média (μ), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) para cada modelo. Na Figura 4.8 estão representadas as curvas força-deslocamento vertical (deformação axial dos provetes) entre os diferentes tipos de modelo, enquanto que na Figura 4.9 se pode comparar as semelhanças entre as varias repetições para o mesmo modelo.

Quadro 4.1 – Resultados das colunas ensaiadas.

Nome Modelo	Ensaio	$P_{u,E}$ [kN]	D_v [mm]
3P 3F h/b (1)	1	212.49	4.33
	2	211.18	4.32
	3	211.29	3.87
	μ	211.66	4.17
	σ	0.59	0.22
	C.V.	0.28	5.20
3P 1F h/b (1.2)	1	205.78	3.92
	2	196.62	3.93
	3	196.39	3.84
	μ	199.60	3.90
	σ	4.37	0.04
	C.V.	2.19	1.08
3P 3F h/b (1.2)	1	208.46	4.13
	2	206.14	4.02
	3	210.24	3.19
	μ	208.28	3.78
	σ	1.68	0.42
	C.V.	0.81	11.12
5P 2F h/b (1.2)	1	221.11	4.80
	2	207.03	4.57
	3	220.65	4.57
	μ	216.27	4.65
	σ	6.53	0.11
	C.V.	3.02	2.39
3P 3F h/b (1.74)	1	215.47	4.27
	2	212.27	4.44
	3	210.29	4.06
	μ	212.68	4.26
	σ	2.14	0.16
	C.V.	1.00	3.67

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 4.1 verifica-se que a carga máxima de compressão atingida foi semelhante nos diversos provetes ensaiados. É esperado que a diferença não seja muito grande uma vez que os perfis usados nos diferentes modelos são os mesmos e os modos de colapso foram semelhantes. Entre as repetições efetuadas a um mesmo modelo há sempre no mínimo duas muito semelhantes. Por vezes a restante acaba por fornecer valores ligeiramente superiores ou inferiores devido a imperfeições que existiam, fenómenos locais ou peça demasiado perfeita. O coeficiente de variação (C.V.), usado para mostrar a dispersão de resultados em termos relativos é baixo (<3%). É um fator importante para mostrar a homogeneidade dos resultados.

Para ser feita a comparação entre os diferentes modelos optou-se por considerar apenas uma das repetições. Na Figura 4.8 estão representadas as 5 curvas, e entre parênteses qual foi a repetição usada. Quase todos os gráficos de força-deslocamento apresentam uma variação de inclinação no início; isto deve-se aos ajustes do apoio à coluna que ocorrem nos instantes iniciais da aplicação do deslocamento. O deslocamento axial representando na realidade tende a ser menor, este pode ser estimado retirando a inclinação da reta para estimar qual seria o ponto exato de interseção com o eixo das abcissas.

A curva mais elevada é a azul, relativa ao modelo com 5 chapas. O caso 5P 2F h/b (1.2) oferece uma conexão superior aos outros entre os perfis e assim é o provete que melhor se comporta como um elemento composto. Esse é o motivo de ter uma capacidade de carga superior a todos os outros e uma predominância de encurvadura local. Devido a todas as outras situações com 3 chapas não mostrarem um comportamento de perfeita conexão, a situação que acaba por ficar em segundo lugar a nível de capacidade de carga é a que possui uma menor dimensão, 3P 3F h/b (1.74). Uma vez que as faces estão encostadas isto restringe os perfis de se moverem livremente para a zona central e assim aumentar a capacidade de carga comparativamente às outras com inércias superiores. A pior situação, como esperado, é a 3P 1F h/b (1.2). Oferece uma capacidade de rotação no centro o que facilita a ocorrência de uma encurvadura nessa zona; ainda assim, é de notar que apesar de ter o número mínimo de parafusos, estes não foram os responsáveis pela rotura, pois não apresentaram indícios de rotura por corte.

Na Figura 4.9 pode ver-se uma boa uniformidade entre as diferentes curvas. No caso em concreto da 3P 3F h/b (1.2) (3) há uma diferença na inclinação da reta. O motivo é de esse ensaio ter sido realizado num dispositivo antigo com rigidez diferente.

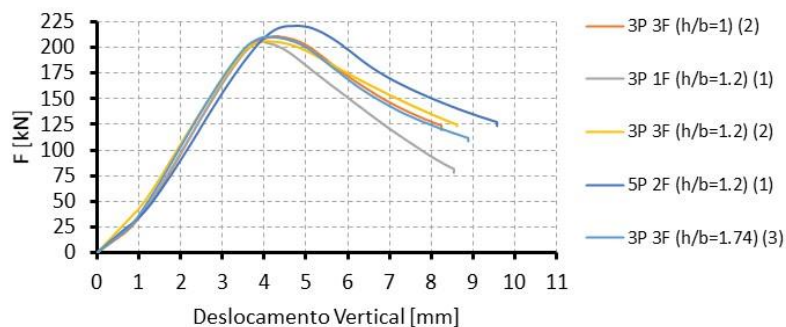


Figura 4.8 – Força- D_v para os diferentes modelos.

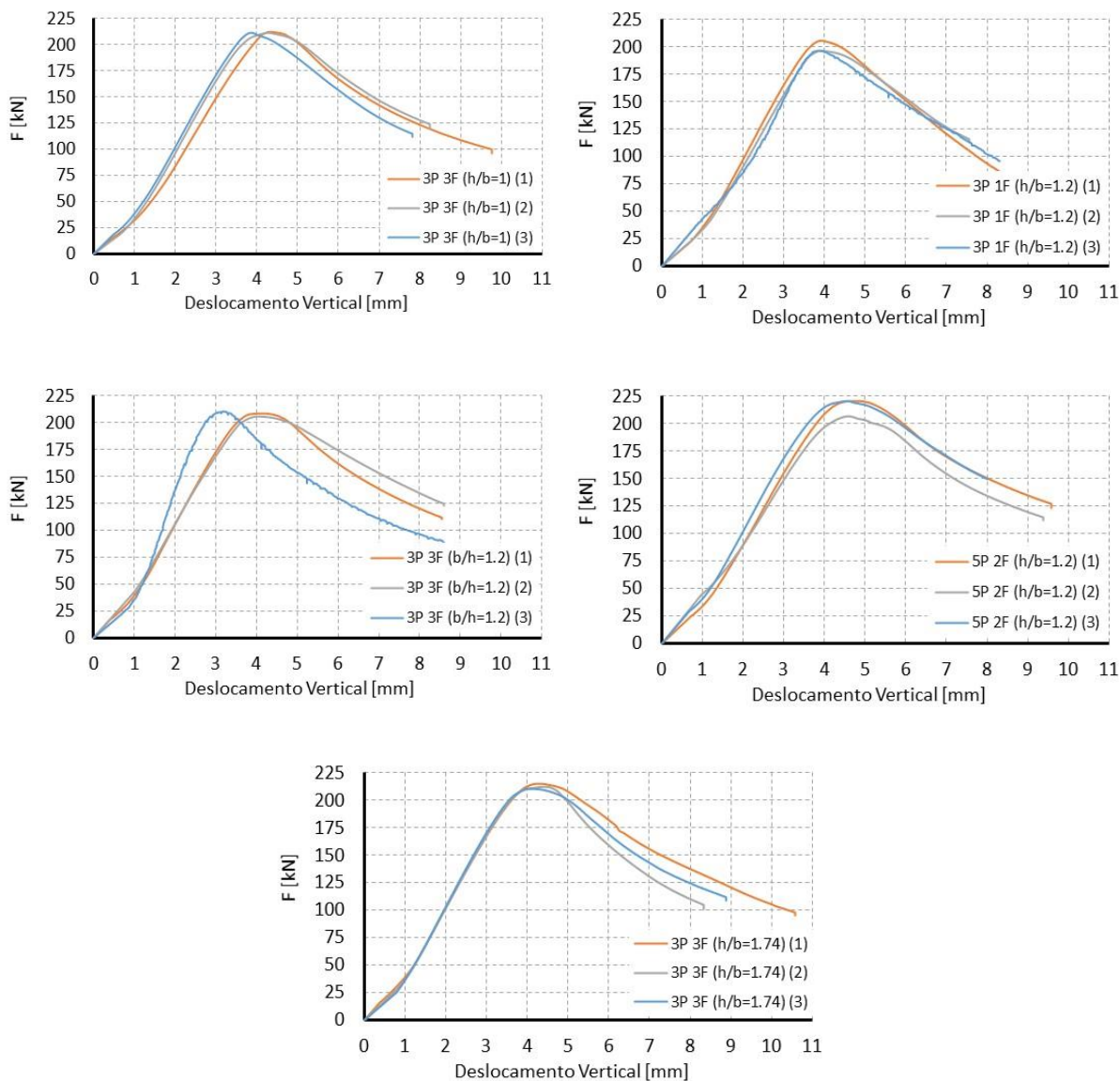


Figura 4.9 – Força- D_v das várias repetições.

4.3 Evolução das extensões durante a fase de compressão

Na Figura 4.10 ilustra-se os extensómetros SG.15 e SG.4. Estes são os extensómetros que registaram encurvadura local nesses provetes.

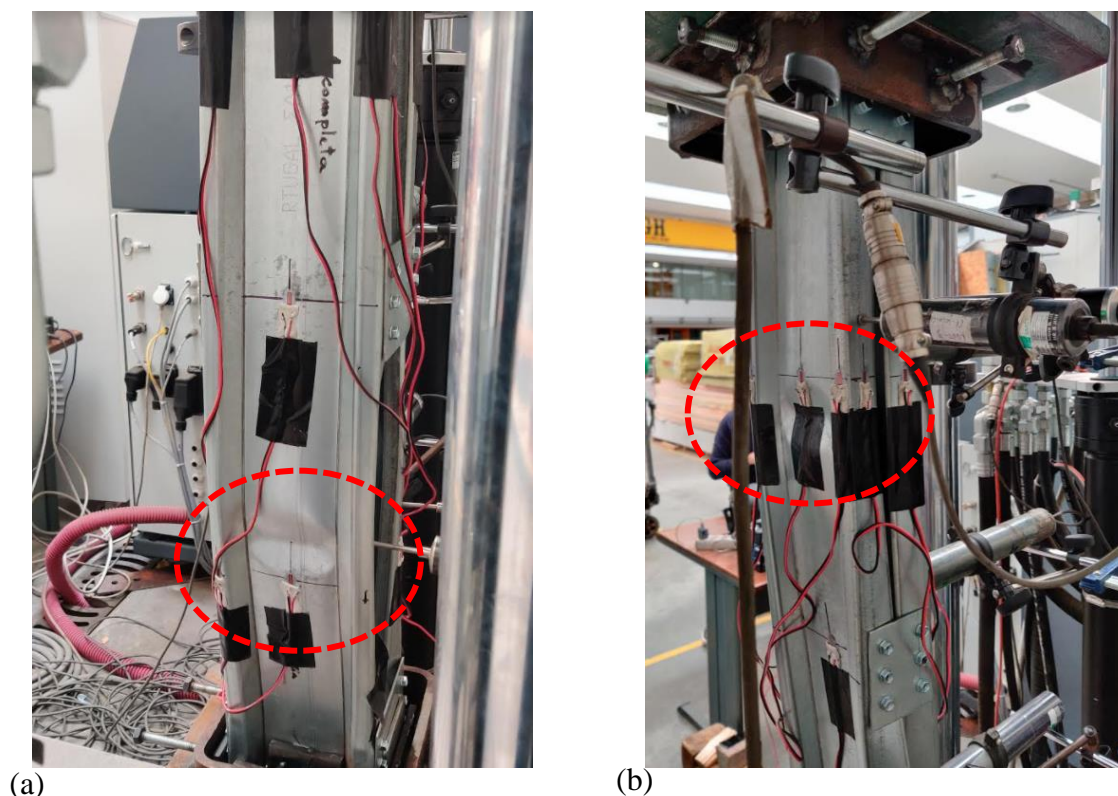


Figura 4.10 – (a) SG.15 (3P 3F h/b (1)) e (b) SG.4 (3P 3F h/b (1.74)).

As Figura 4.11 a Figura 4.15 representam as curvas força-extensão avaliadas em diversas partes dos provetes, são um parâmetro importante para a interpretação dos resultados durante a fase de compressão. O posicionamento dos extensómetros está representado ao lado de cada curva. O comportamento do material por simplificação foi considerado elástico perfeitamente plástico com um $f_y=300$ MPa. Na fase de descarga algumas zonas do provete estão em tração e outras em compressão. Em quase todos os provetes, algumas das zonas não atingem a tensão de cedência. É um fenómeno comum em elementos de classe 4 uma vez que a encurvadura local o impede.

São apresentadas 3 curvas força-Extensão por coluna. Uma curva inclui os extensómetros de 1 a 10, a outra de 11 a 12 e a última de 13 a 18 para modelos com 3 chapas e 13 a 22 para o modelo com 5 chapas. No Quadro 4.2 estão apresentados os extensómetros que não registaram plastificação do aço e os que registaram passagens bruscas de compressão para tração resultante de encurvaduras locais imediatas.

Quadro 4.2 – Quadro resumo com extensómetros que não registaram plastificação do aço e os que registaram encurvadura local.

Caso	Extensómetros que não registaram plastificação do aço	Encurvadura local imediata
3P 3F h/b (1) Figura 4.11	SG.8, SG.9, SG.11, SG.12 e SG.15	SG.15
3P 1F h/b (1.2) Figura 4.12	SG.9, SG.10, SG.12, SG.15 e SG.17	SG.15
3P 3F h/b (1.2) Figura 4.13	SG.4, SG.9, SG.15 e SG.18	SG.15
5P 2F h/b (1.2) Figura 4.14	SG.4 e SG.16	-
3P 3F h/b (1.74) Figura 4.15	SG.3, SG.4, SG.5, SG.9, SG.11, SG.12 e SG.18	SG.4

Os extensómetros colocados na alma foram em geral os que não registaram plastificação do aço. Para os quatro casos com 3 chapas tem-se os SG.4, SG.9, SG.15 e SG.18 nas extremidades e os SG.11 e SG.12 no centro. Estes não registaram plastificação devido à encurvadura local que ocorreu sobre ou próximos deles. É um fenómeno comum em elementos de classe 4 devido à ocorrência de ondulações antes de a tensão de cedência ser atingida. No caso dos banzos e zonas com reentrâncias, estes atingiram na sua maioria a tensão de cedência.

Para a situação com 5 chapas, é importante referir que devido a problemas com os extensómetros não foi possível reter leituras do SG.19, SG.20 e SG.21. Os extensómetros que fazem parte da alma são ligeiramente diferentes na base. Temos os SG.4, SG.9, SG.16, SG.21 nas extremidades e os SG.11 e SG.12 no centro. Falhou-se a prever o aparecimento de ondulações nesse provete, pelo que não há nenhum extensómetro na zona de encurvadura local. Ainda assim as conclusões são muito semelhantes. Os extensómetros da alma SG.4 e SG.16 não registaram plastificação do aço devido a fenómenos de encurvadura local.

Em vários extensómetros temos situações de encurvadura distorcional ligada principalmente aos banzos. Esta surgiu sempre que existia encurvadura local nessa zona, surgindo algumas vezes também com encurvadura global.

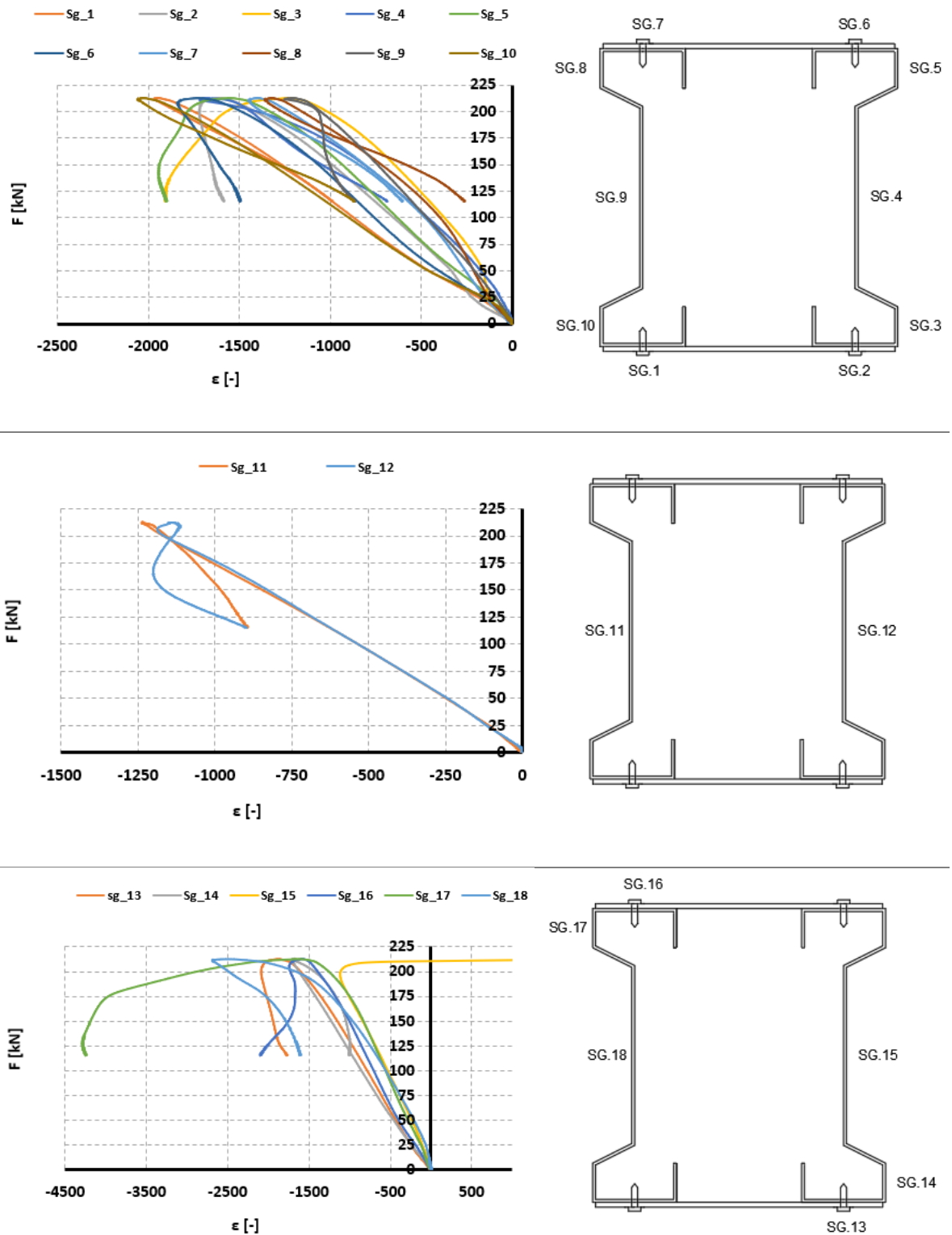


Figura 4.11 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1).

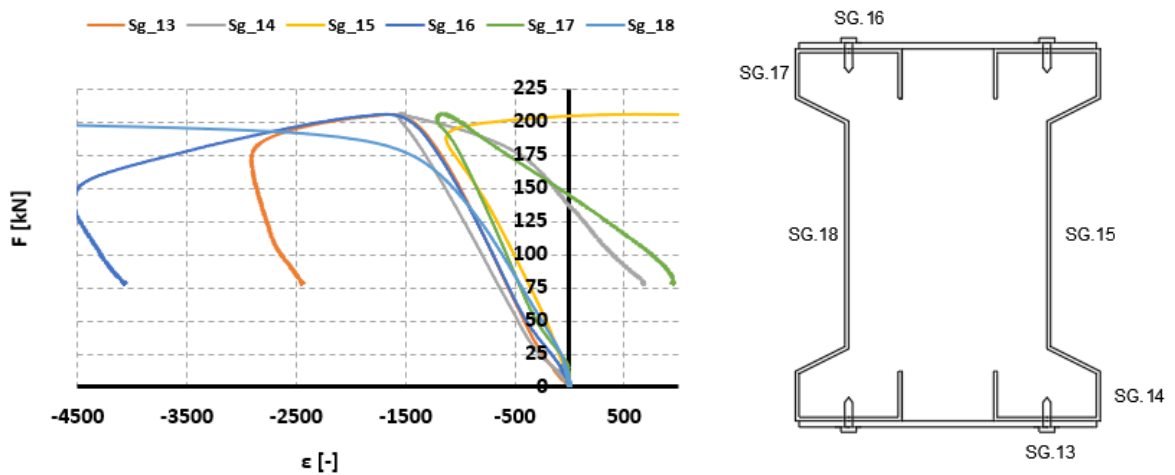
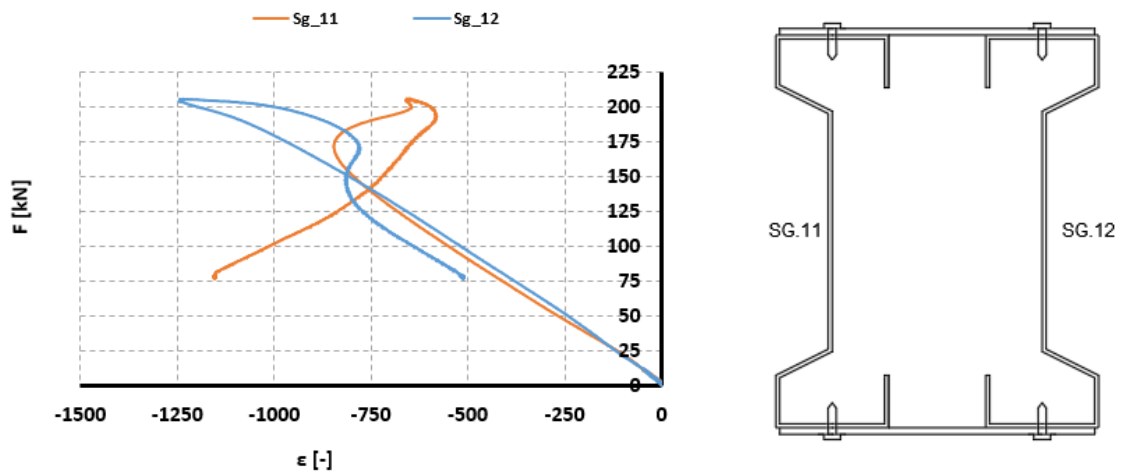
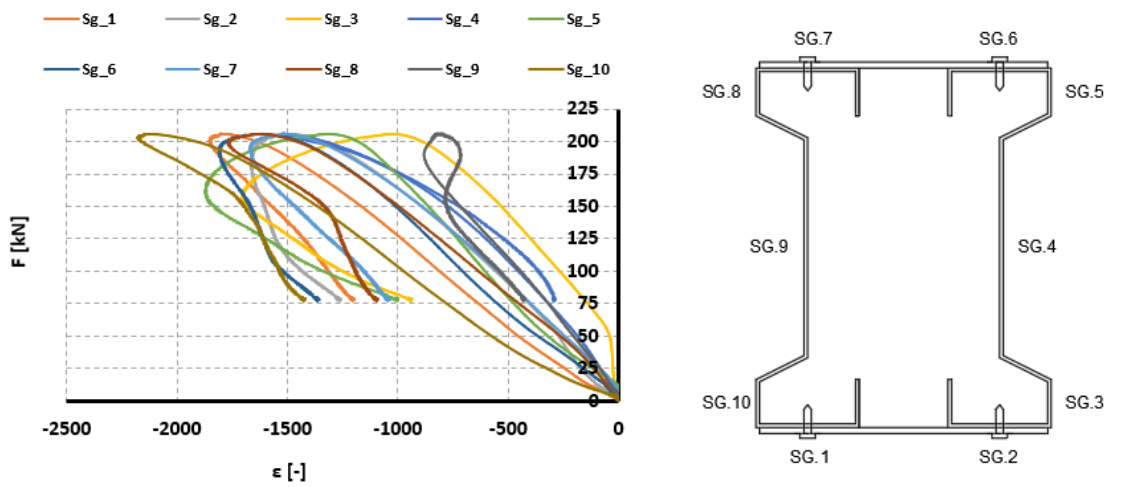


Figura 4.12 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 1F h/b (1.2).

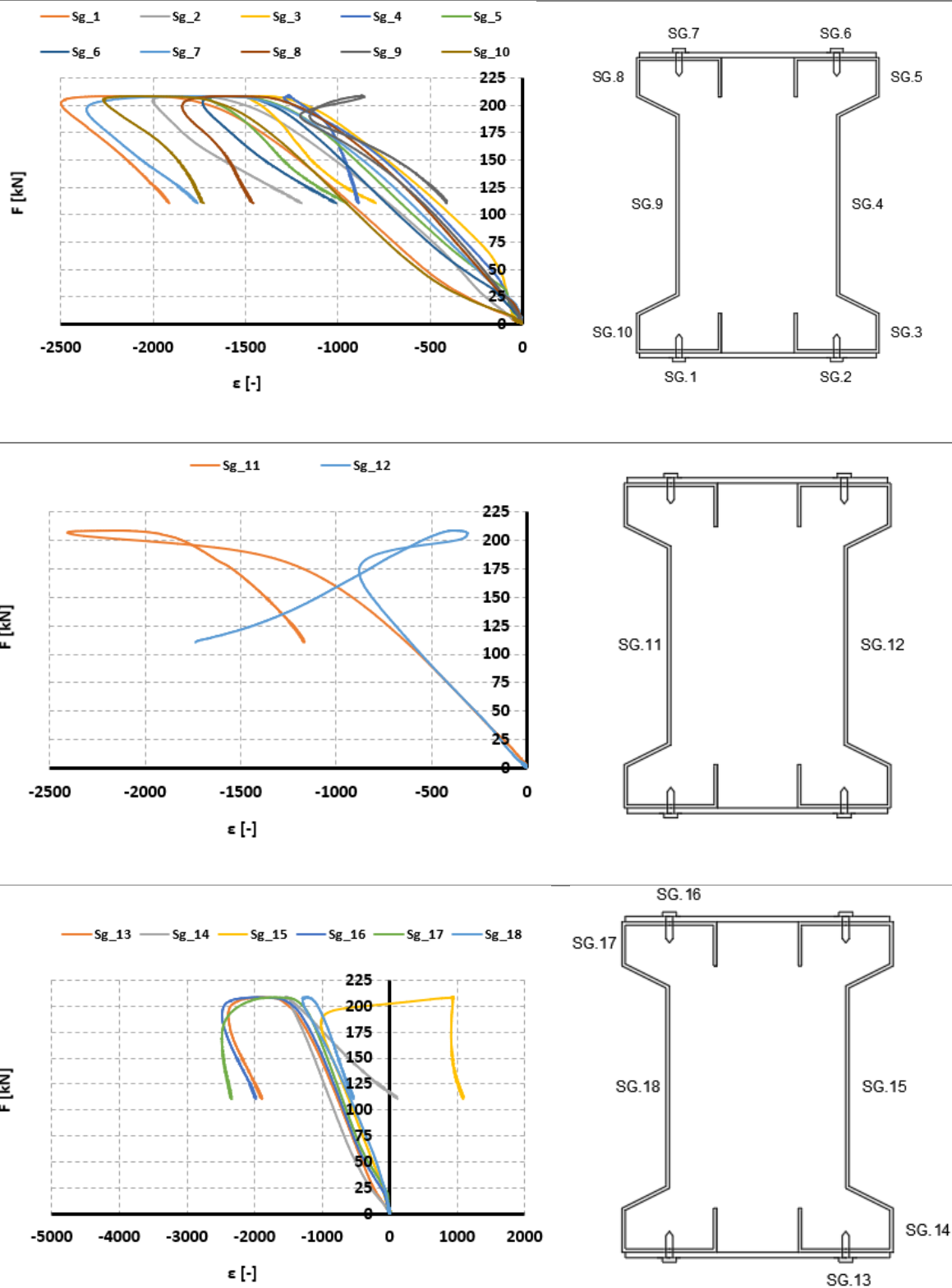


Figura 4.13 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1.2).

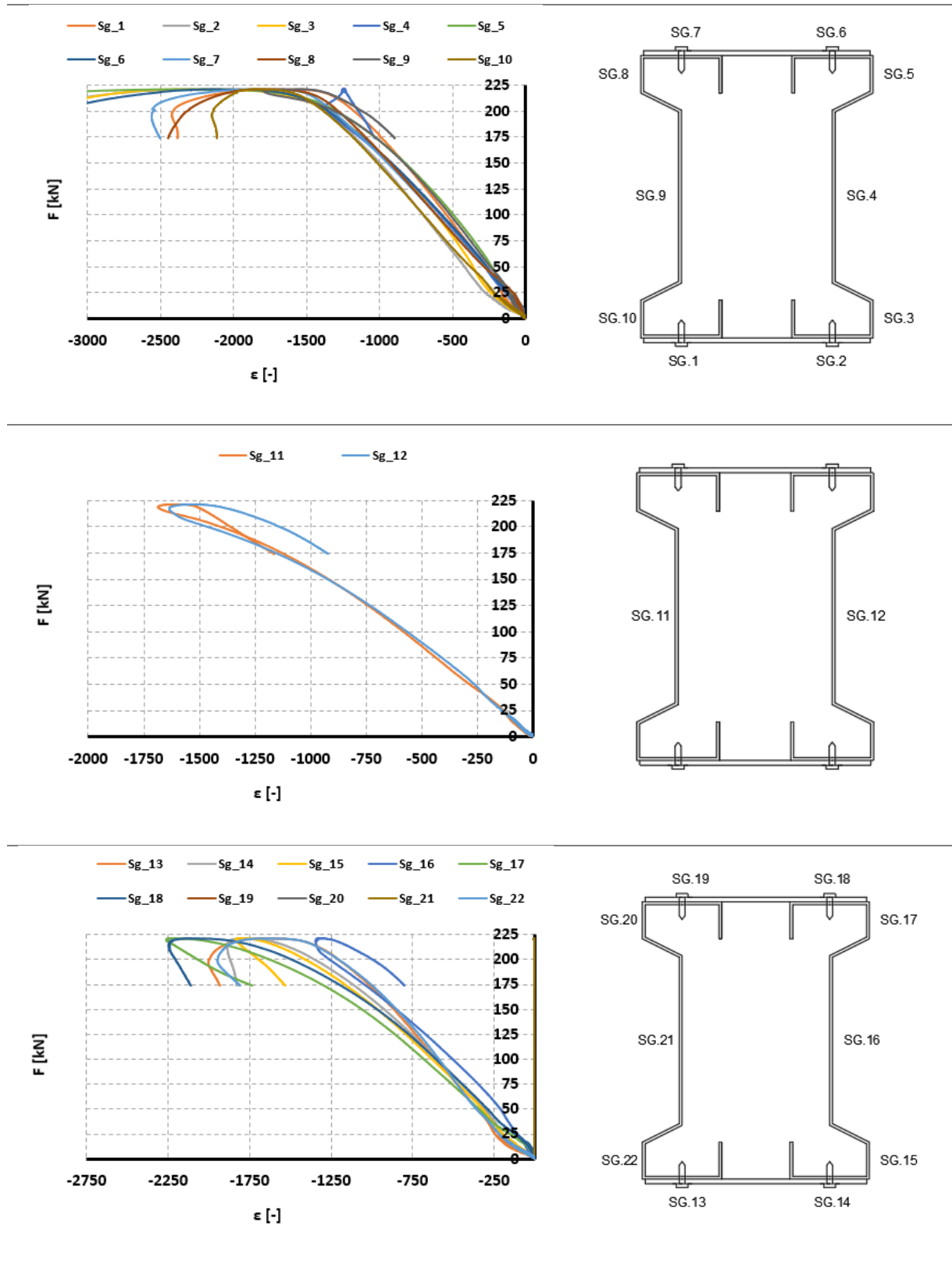


Figura 4.14 – Curvas Força-Extensão para o provete 5P 2F h/b (1.2).

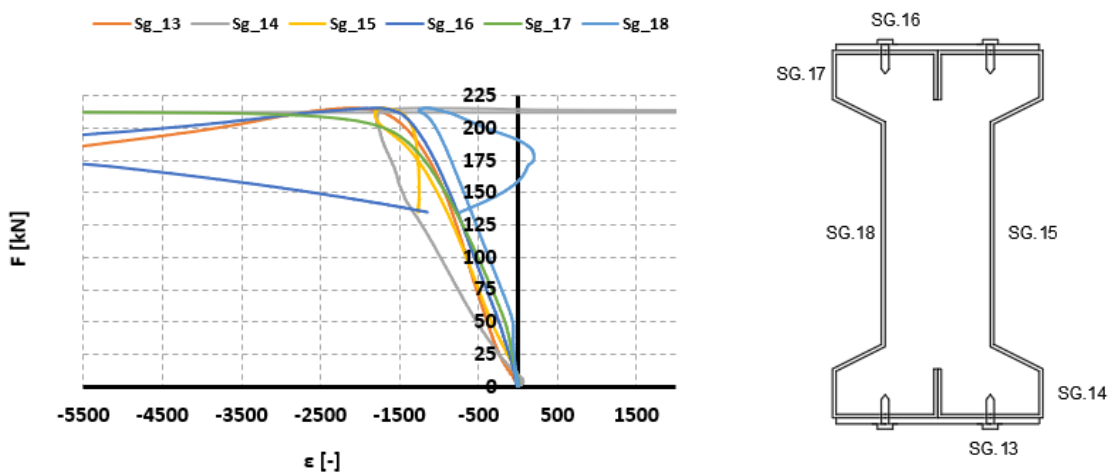
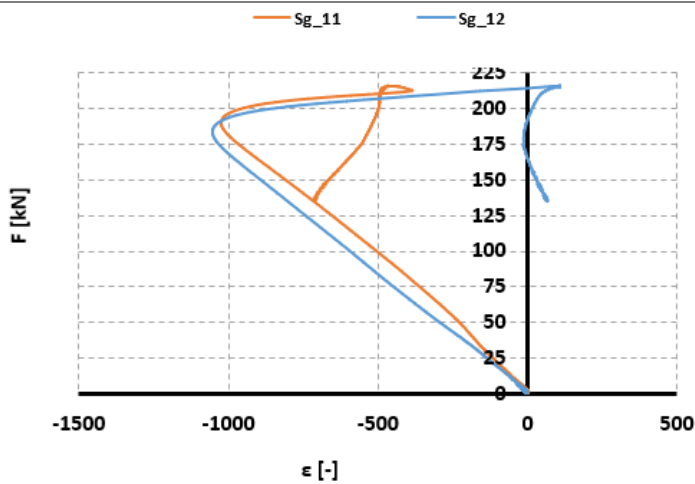
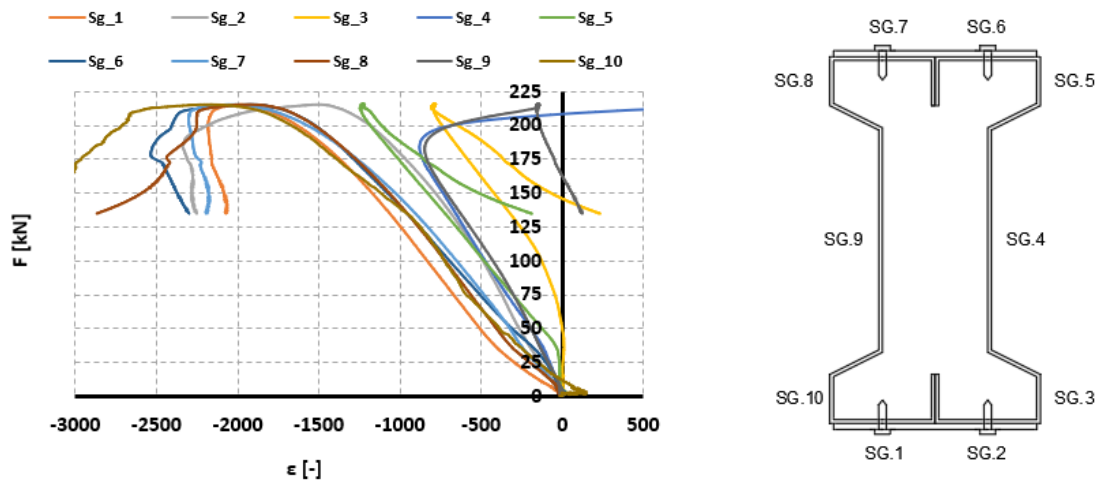


Figura 4.15 – Curvas Força-Extensão para o provete 3P 3F h/b (1.74).

4.4 Deslocamentos horizontais e verticais

Na Figura 4.16 pode analisar-se a relação entre a força e o deslocamento horizontal segundo o eixo de menor inércia (z). É apresentado apenas um LVDT por modelo, sendo o que indica o maior valor para a coluna em questão. Os LVDT1, LVDT2 e LVDT3 estão localizados a $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ do comprimento da coluna (ver Figura 4.16b), respetivamente.

O deslocamento segundo o eixo de maior inércia (y) não se encontra representado. Este foi verificado e confirmou-se que os deslocamentos nessa direção foram desprezáveis (< 5 mm). Não é possível comparar os deslocamentos uma vez que devido a modos de encurvadura distintos esses pontos ocorreram em LVDT's diferentes.

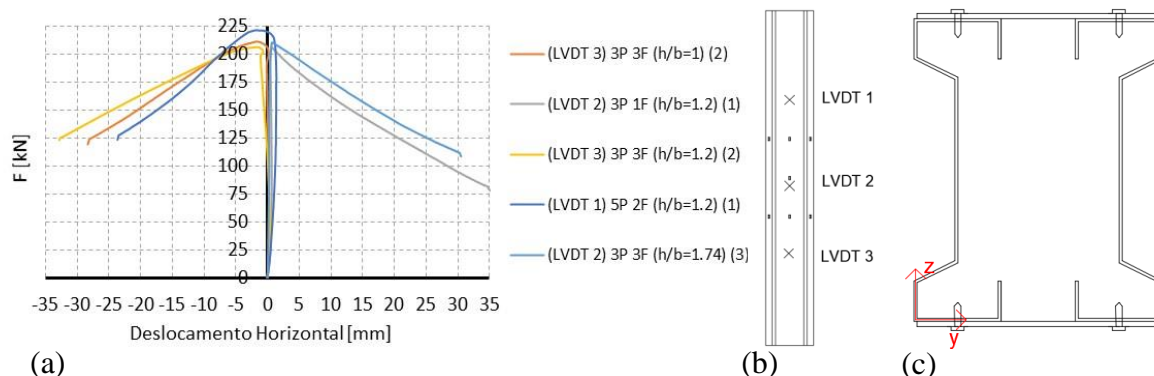


Figura 4.16 – (a) D_h dos diferentes tipos (b) Localização dos LVDT e (c) Sistema de eixos adotados.

Na Figura 4.17 estão expressos os deslocamentos laterais segundo o eixo de menor inércia (z) em função da carga aplicada, $25\%F_{max}$, $50\%F_{max}$, $75\%F_{max}$, F_{max} (carga), $75\%F_{max}$ (descarga). Uma vez que os perfis estavam ligados por chapas, a informação dada pelos LVDT acaba por ser apenas de um lado. Há fenómenos de encurvadura local que não são visíveis nas curvas representadas, mostrando apenas o que aconteceu numa das faces.

Para as situações representadas, na fase de carga máxima (representa nos gráficos a amarelo), percebe-se a influência da chapa central nos provetes com 3 chapas ficando representado um modo global, por outro lado, para a situação com 5 chapas ocorreu um efeito local.

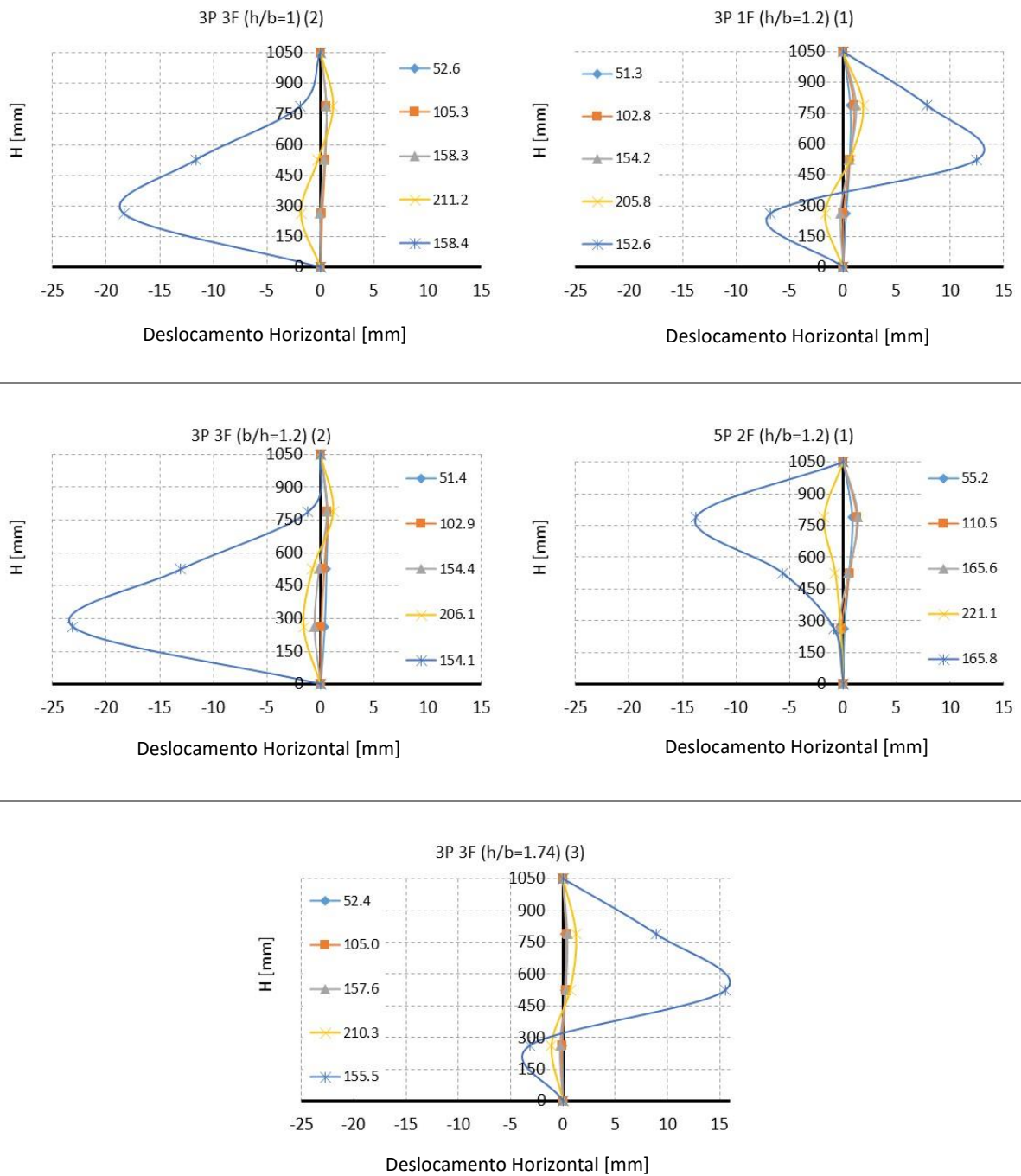


Figura 4.17 – Deslocamento lateral dos diferentes tipos.

4.5 Comparação dos resultados experimentais com o EC3

Foram usados dois métodos diferentes para calcular a capacidade axial dos diferentes modelos. O primeiro método, EC3-1-1 cláusula 6.3.1, foi usado na coluna onde os perfis estão juntos. O segundo método, EC3-1-1 cláusula 6.4.3 (método das travessas) é para a situação onde há um afastamento entre eles. Em ambos os casos foi considerado um fator de imperfeição relativo à curva de imperfeição b . Rahnavard et al. (Rahnavard et al., 2021) fizeram um estudo comparativo entre os métodos analíticos e numéricos e concluíram que para colunas semelhantes produzidas a partir de C's, a curva b ajustava-se melhor do que a d , independentemente do espaçamento entre perfis.

Começando por analisar os valores obtidos pelo EC3 é verificado que os três modelos com 3 chapas e uma relação de h/b (1) e h/b (1.2) têm valores muito próximos. Isso reflete a falha principal do método das travessas para aplicação nestes elementos, ao não contabilizar o número de parafusos. O provete com h/b (1) entre os 3 é o que tem uma maior capacidade axial devido a ter um momento de inércia efetivo, I_{eff} , superior. O valor do modelo 5P 2F h/b (1.2) é superior aos outros devido à contabilização do espaçamento entre chapas nesse modelo.

A aplicação do método comum, para o caso 3P 3F h/b (1.74) tem a limitação de não considerar a ligação entre os dois perfis através das chapas. É apenas contabilizada a área efetiva de dois perfis ao invés de um.

É importante referir que no Quadro 4.3 e Quadro 4.4 são apresentados os resultados obtidos através das cláusulas 6.3.1 e 6.4.3 do EC3 parte 1.1. O Quadro 4.3 diz respeito à comparação entre os resultados experimentais e o dimensionamento através da tensão nominal do aço ($N_{b,Rd1}$). O Quadro 4.4 diz respeito à comparação dos resultados experimentais e o dimensionamento através da tensão real do aço ($N_{b,Rd2}$). Ambos foram realizados considerando a caracterização geométrica nominal.

Comparando os valores analíticos (obtidos através da tensão nominal do aço) com a média dos valores experimentais (Quadro 4.3) verifica-se uma boa relação entre estes. O caso 3P 1F h/b (1.2), 5P 2F h/b (1.2) e 3P 3F h/b (1.74) são iguais ao obtido experimentalmente (<1% de variação). Os casos 3P 3F h/b (1) e 3P 3F h/b (1.2) são ligeiramente conservadores, 6% e 5% respetivamente. Da comparação dos resultados para este caso específico conclui-se que o dimensionamento pelo método das travessas é conservador para as situações que usam mais de 2 parafusos. Seria proveitoso realizar mais estudos nesta temática de forma que o método de cálculo incorporasse o número de parafusos usados.

As esbeltezas normalizadas para o dimensionamento, realizado com a tensão nominal do aço, variaram entre dois valores, 0.22 e 0.42. Esse parâmetro é obtido através de $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} * f_y}{N_{cr}}}$ para o método exposto em 6.3.1 e $\bar{\lambda}^* = \sqrt{\frac{A_{eff} * f_y}{N_{cr,B}}}$ para o método exposto em 6.4.3. A A_{eff} e f_y são iguais para todas as situações, variando apenas o N_{cr} ou $N_{cr,B}$. O N_{cr} e $N_{cr,B}$ apesar de serem obtidos de maneira diferente representam a carga crítica de encurvadura. É maior para a situação usando o método comum uma vez que esse considera que os perfis funcionam como um só. Para os 4 modelos usando o método das travessas, esse valor é maior na coluna com 5 chapas por essa ter um comportamento próximo do funcionamento como um só perfil. Nos restantes casos o valor do $N_{cr,B}$ é igual.

Quadro 4.3 – Comparação entre os ensaios e o EC3-1-1 (tensão nominal do aço).

Nome Modelo	Ensaio	$P_{u,E} [kN]$	Cláusula 6.3.1		Cláusula 6.4.3		Rácio
			$\bar{\lambda}$	$N_{b,RdI} [kN]$	$\bar{\lambda}$	$N_{b,RdI}^* [kN]$	$N_{brd,I}/P_{u,E}$
3P 3F h/b (1)	1	212.493					0.94
	2	211.181	-	-	0.42	199.43	0.94
	3	211.294					0.94
3P 1F h/b (1.2)	1	205.777					0.97
	2	196.618	-	-	0.42	198.78	1.01
	3	196.3904					1.01
3P 3F h/b (1.2)	1	208.456					0.95
	2	206.142	-	-	0.42	198.78	0.96
	3	210.2408					0.95
5P 3F h/b (1.2)	1	221.113					0.97
	2	207.034	-	-	0.24	213.83	1.03
	3	220.649					0.97
3P 3F h/b (1.74)	1	215.473					1.00
	2	212.266	0.22	215.32	-	-	1.01
	3	210.289					1.02

Comparando os valores analíticos (obtidos através da tensão real do aço) com a média dos valores experimentais (Quadro 4.4) verifica-se que os resultados são não conservadores. Os casos 3P 1F h/b (1.2), 5P 2F h/b (1.2) e 3P 3F h/b (1.74) são não conservadores em no mínimo 7%. Para os casos 3P 3F h/b (1) e 3P 3F h/b (1.2), estes são não conservadores ainda que ligeiramente (<3%). Da comparação dos resultados para este caso específico conclui-se que o dimensionamento quer pelo método das travessas quer pelo método para elementos de classe 4 à compressão são não conservadores considerando a tensão real do aço.

As esbeltezas normalizadas para o dimensionamento, realizado com a tensão real do aço, variaram entre dois valores, 0.23 e 0.44.

Quadro 4.4 – Comparação entre os ensaios e o EC3-1-1 (tensão real do aço).

Nome Modelo	Ensaio	$P_{u,E}$ [kN]	Cláusula 6.3.1		Cláusula 6.4.3		Rácio
			$\bar{\lambda}$	$N_{b,Rd2}$ [kN]	$\bar{\lambda}$	$N_{b,Rd2}^*$ [kN]	$N_{brd,2}/P_{u,E}$
3P 3F h/b (1)	1	212.493					1.01
	2	211.181	-	-	0.43	214.85	1.02
	3	211.294					1.02
3P 1F h/b (1.2)	1	205.777					1.04
	2	196.618	-	-	0.44	214.10	1.09
	3	196.3904					1.09
3P 3F h/b (1.2)	1	208.456					1.03
	2	206.142	-	-	0.44	214.10	1.04
	3	210.2408					1.02
5P 3F h/b (1.2)	1	221.113					1.05
	2	207.034	-	-	0.25	231.32	1.12
	3	220.649					1.05
3P 3F h/b (1.74)	1	215.473					1.08
	2	212.266	0.23	233.01	-	-	1.10
	3	210.289					1.11

Na Figura 4.18 compara-se os valores obtidos por via experimental e analítica (com tensão nominal e real do aço).

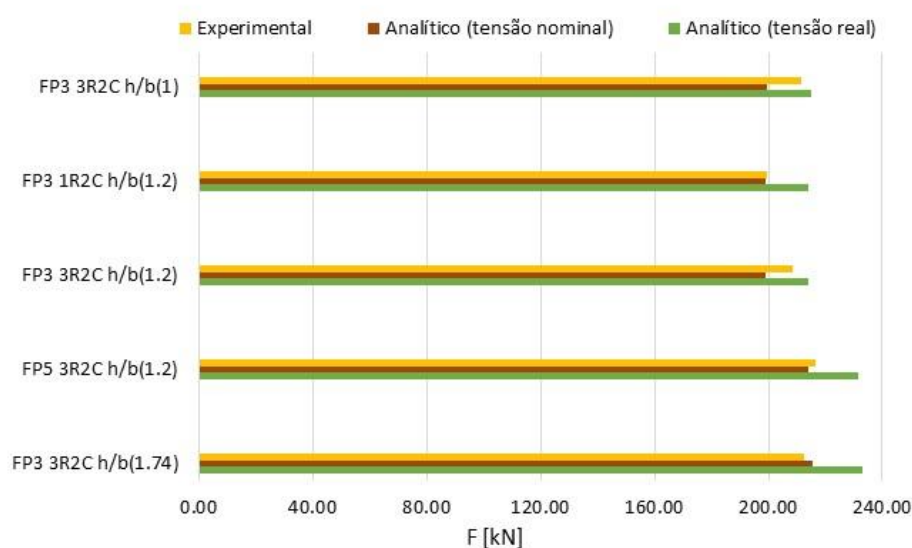


Figura 4.18 – Comparação entre os valores analíticos e experimentais.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Nesta dissertação foi investigado o comportamento de colunas de aço enformado a frio compostas por travessas sobre compressão com condições de apoio encastradas. O estudo baseou-se na realização de um conjunto de ensaios experimentais a partir dos quais se obtiveram curvas $F-D_v$, $F-D_h$, $F-\varepsilon$ e se identificaram os modos de rotura das peças.

Foram consideradas situações variando o espaçamento entre perfis, dimensão das chapas, quantidade de parafusos e quantidade de chapas. A capacidade de carga axial foi comparada com a prevista através das metodologias existentes no EC3.

As principais conclusões do estudo são as seguintes:

Relativamente ao dimensionamento através do EC3, este divide-se em duas cláusulas distintas. Foram realizados os cálculos considerando a tensão nominal e real do aço.

- Considerando a tensão nominal retiraram-se as seguintes conclusões:
Para o cálculo da resistência à encurvadura de elementos comprimidos de classe 4, o EC3-1-1 cláusula 6.3.1 (não considera os dois perfis conectados) forneceu valores próximos da realidade ainda que ligeiramente não conservadores (1%) Relativamente ao cálculo pelo método das travessas à compressão, através do EC3-1-1 cláusula 6.4.3 (não considera o número de parafusos) obteve-se valores conservadores para colunas com mais de 2 parafusos e semelhante ao obtido experimentalmente para o caso com 2 parafusos. O caso 3P 1F h/b (1.2), 5P 3F h/b (1.2) e 3P 3F h/b (1.74) são iguais ao obtido experimentalmente (<1% de variação). O caso 3P 3F h/b (1) e 3P 3F h/b (1.2) são ligeiramente conservadores, 6% e 5% respetivamente.
- Considerando a tensão real do aço retiraram-se as seguintes conclusões:
Os valores mostraram-se não conservadores para todos os modelos. Para o cálculo da resistência à encurvadura de elementos comprimidos de classe 4, o EC3-1-1 cláusula 6.3.1 (não considera os dois perfis conectados) forneceu valores não conservadores em 10%. Relativamente ao cálculo pelo método das travessas à compressão através do EC3-1-1 cláusula 6.4.3 (não considera o número de parafusos) obteve-se valores não conservadores em 7% para o modelo 3P 1F h/b (1.2), 7% para o modelo 5P 3F h/b (1.2), 2% para o modelo 3P 3F h/b (1) e 3% para o modelo 3P 3F h/b (1.2).

Os parafusos, apesar de influenciarem a capacidade resistentes e os modos de encurvadura, não contribuíram para o modo de rotura. Assim podemos concluir que mesmo quando é usado o seu número mínimo (2 parafusos por chapa) esta ligação (parafusos e chapas) tem uma resistência superior ao perfil. O facto de usar 2 parafusos permite uma rotação no centro da coluna que diminui a capacidade de carga desta.

Os resultados experimentais dos provetes são em geral próximos. O coeficiente de variação em cada grupo de 3 provetes ensaiados foi baixo o que mostra uma boa homogeneização e é um bom indicativo para fazer mais investigação nesta área. A maior diferença que se regista entre diferentes modelos é de 25 kN e é entre o provete com 5 chapas e 4 parafusos e o com 3 chapas e 2 parafusos. O provete com 5 chapas oferece um melhor comportamento conjunto, e por isso é a situação que tem uma maior carga máxima de compressão atingida e maior predominância de encurvadura local.

Para todas as colunas verificou-se encurvadura global, local e distorcional. São fenómenos comuns para colunas curtas com esbeltezas normalizadas entre 0.2 e 0.4. Os fenómenos de encurvadura global ocorreram sempre na direção do eixo de menor inércia. Devido aos fenómenos de encurvadura local, as colunas não atingiram a tensão de cedência na alma.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros indicam-se os seguintes:

- Realizar estudos numéricos e compará-los com o comportamento obtido experimentalmente.
- Ensaiai colunas longas e “*stubs*”.
- Estudar uma possível alteração no EC3 para serem considerados o número de parafusos por chapa no método das travessas à compressão.
- Realizar o mesmo tipo de ensaios, mas para outras configurações de secções, menos estudadas, como é o caso do ómega, Ω .
- Variar a espessura da chapa e procurar estudar qual seria a solução ótima.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISI S100 (2016). “AISI specification for the design of cold-formed steel structures members”. American Iron and Steel Institute, Washington (DC), USA

AMOB@ (2021). <https://www.amobgroup.com/pt-pt/produtos/perfiladoras>. Perfiladoras. Acedido em 20/05/2021.

Anbarasu, M., & Dar, M. A. (2020). “Improved design procedure for battened cold-formed steel built-up columns composed of lipped angles”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105781>

AS/NZS 4600 (2018). “Cold formed steel structures”. New Zealand standard, Australia.

Craveiro, H. D. (2015). “Fire Resistance of Cold-Formed Steel Columns”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Craveiro, H. D., Paulo, J., Rodrigues, C., & Laím, L. (2016a). “Buckling resistance of axially loaded cold-formed steel columns”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 106, pp. 358–375. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.010>

Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., & Laím, L. (2014). “Cold-formed steel columns made with open cross-sections subjected to fire”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 85, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.020>

Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., Santiago, A., & Laím, L. (2016b). “Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures - The case of the S280 Gd+Z steel”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 98, pp. 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.06.002>

Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., & Laím, L. (2016c). “Experimental analysis of built-up closed cold-formed steel columns with restrained thermal elongation under fire conditions”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 107, pp. 564–579. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.07.001>

Dabaon, M., Ellobody, E., & Ramzy, K. (2015a). “Nonlinear behaviour of built-up cold-formed steel section battened columns”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 110, pp. 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.007>

Dabaon, M., Ellobody, E., & Ramzy, K. (2015b). “Experimental investigation of built-up cold-formed steel section battened columns”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 92, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.001>

Dubina, D., Ungureanu, V., & Landolfo, R. (2012). “Design of cold-formed steel structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 Design of Cold-formed Steel Structures”. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 1st Edition, Brussels, Belgium.

El Aghoury, M. A., Salem, A. H., Hanna, M. T., & Amoush, E. A. (2010). “Experimental investigation for the behaviour of battened beam-columns composed of four equal slender angles”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 48(9), pp. 669–683. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.03.007>

El Aghoury, M. A., Salem, A. H., Hanna, M. T., & Amoush, E. A. (2013). “Ultimate capacity of battened columns composed of four equal slender angles”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 63, pp. 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.019>

El Aghoury, M. A., Salem, A. H., Hanna, M. T., & Amoush, E. A. (2015). “Strength of cold formed battened columns subjected to eccentric axial compressive force”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 113, pp. 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.008>

Ellobody, E., & Young, B. (2005). “Behavior of Cold-Formed Steel Plain Angle Columns”. *Journal of Structural Engineering*, pp. 457–466. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(457\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(457))

EN 1993-1-1 (2005). “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelles.

EN 1993-1-3 (2006). “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelles.

EN 1993-1-5 (2006). “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelles.

EN 10326 (2004). “Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels – Technical delivery conditions”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelles.

EN 10346 (2015). “Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelles.

Fratamico, D. C., Torabian, S., Zhao, X., Rasmussen, K. J. R., & Schafer, B. W. (2018a). “Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 144, pp. 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.01.007>

Fratamico, D. C., Torabian, S., Zhao, X., Rasmussen, K. J. R., & Schafer, B. W. (2018b). “Experimental study on the composite action in sheathed and bare built-up cold-formed steel columns”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 127, pp. 290–305. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.002>

FUTURENG@ (2021a). <http://www.futureng.pt/espacamento>. Espaçamento entre colunas. Acedido em 20/05/2021.

FUTURENG@ (2021b). <http://www.futureng.pt/quinagem>. Máquinas de Quinagem. Acedido em 20/05/2021.

Georgieva, I., Schueremans, L., & Pyl, L. (2012a). “Composed columns from cold-formed steel Z-profiles: Experiments and code-based predictions of the overall compression capacity”. *Engineering Structures*, Vol. 37, pp. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.017>

Georgieva, I., Schueremans, L., Pyl, L., & Vandewalle, L. (2012b). “Experimental investigation of built-up double-Z members in bending and compression”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 53, pp. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.017>

Georgieva, I., Schueremans, L., Pyl, L., & Vandewalle, L. (2012c). “Numerical study of built-up double-Z members in bending and compression”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 60, pp. 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.005>

Georgieva, I., Schueremans, L., Vandewalle, L., & Pyl, L. (2012d). “Design of built-up cold-formed steel columns according to the direct strength method”. *Procedia Engineering*, Vol. 40, pp. 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.066>

ISO 6892-1 (2019). “Metallic materials – Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature”. International Organization for Standardization.

Kherbouche, S., & Megnounif, A. (2019). “Numerical study and design of thin walled cold formed steel built-up open and closed section columns”. *Engineering Structures*, Vol. 179, pp. 670–682. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.069>

-
- Laím, L., Craveiro, H. D., Simões, R., Escudeiro, A., & Mota, A. (2020). “Experimental analysis of cold-formed steel columns with intermediate and edge stiffeners in fire”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 146. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106481>
- Meza, F. J., Becque, J., & Hajirasouliha, I. (2020). “Experimental study of cold-formed steel built-up columns”. *Thin-Walled Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106291>
- Moen, C. D., Igusa, T., & Schafer, B. W. (2008). “Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 46(11), pp. 1274–1289. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.02.002>
- Muthuraman, M., Anuradha, R., Awoyera, P. O., & Gobinath, R. (2020). “Numerical simulation and specification provisions for buckling characteristics of a built-up steel column section subjected to axial loading”. *Engineering Structures*, Vol. 207. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110256>
- Pinnacle@ (2013). https://pinnaclelgs.com/Building_Application.aspx. Aplicação a Edifícios. Acedido em 20/05/2021.
- Pinnacle@ (2020). <https://steelbuild.pinnaclelgs.com>. Construção em estrutura de aço leve. Acedido em 20/05/2021.
- Quach, W. M., Teng, J. G., & Chung, K. F. (2004). “Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: A closed-form analytical solution”. *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1249–1259. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.04.005>
- Quach, W. M., Teng, J. G., & Chung, K. F. (2006). “Finite element predictions of residual stresses in press-braked thin-walled steel sections”. *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1609–1619. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.013>
- Rahnavard, R., Craveiro, H. D., Laím, L., Simões, R. A., & Napolitano, R. (2021). “Numerical investigation on the composite action of cold-formed steel built-up battened columns”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 162. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107553>
- Reyes, W., & Guzmán, A. (2011). “Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.02.003>
- Roque, E., Vicente, R., & Almeida, R. M. S. F. (2021). “Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-term monitoring and comparison

with the heavyweight construction”. *Building and Environment*, Vol. 200. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107937>

Roy, K., & Lim, J. B. P. (2019). “Numerical investigation into the buckling behaviour of face-to-face built-up cold-formed stainless steel channel sections under axial compression”. *Structures*, Vol. 20, pp. 42–73. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.019>

Roy, K., Mohammadjani, C., & Lim, J. B. P. (2019). “Experimental and numerical investigation into the behaviour of face-to-face built-up cold-formed steel channel sections under compression”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 134, pp. 291–309. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.045>

Roy, K., Ting, T. C. H., Lau, H. H., & Lim, J. B. P. (2018a). “Nonlinear behaviour of back-to-back gapped built-up cold-formed steel channel sections under compression”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 147, pp. 257–276. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.007>

Roy, K., Ting, T. C. H., Lau, H. H., & Lim, J. B. P. (2018b). Effect of thickness on the behaviour of axially loaded back-to-back cold-formed steel built-up channel sections - Experimental and numerical investigation. *Structures*, Vol. 16, pp. 327–346. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.009>

Schafer, B. W., & Peköz, T. (1998). “Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses”. In *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 47.

Simões, R. (2014). “Manual de dimensionamento de estruturas metálicas – Eurocódigo 3: Projeto de Estruturas de Aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”. CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 3ª Edição.

Vijayanand, S., & Anbarasu, M. (2017). “Effect of Spacers on Ultimate Strength and Behavior of Cold-Formed Steel Built-up Columns”. *Procedia Engineering*, Vol. 173, pp. 1423–1430. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.205>

Yu, W. (2000). “Cold-formed steel design” John Wiley & Sons, 3rd Edition, USA.

Zhang, J. H., & Young, B. (2012). “Compression tests of cold-formed steel I-shaped open sections with edge and web stiffeners”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 52, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.11.006>

Zhang, J. H., & Young, B. (2015). “Numerical investigation and design of cold-formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners”. *Thin-Walled Structures*, Vol. 89, pp. 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.12.011>

Zhang, J. H., & Young, B. (2018). “Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 147, pp. 380–392. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.008>