

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PERFIS METÁLICOS ENFORMADOS A FRIO

JOSÉ ALBERTO FONTÃO CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

Coorientador: Doutor Luís Augusto Ferreira Rodrigues de Macedo

Coorientador: Doutora Rita Cláudia Jorge Peres

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto mais concretamente ao Departamento de Engenharia Civil pelo acolhimento nas suas instalações e por estes cinco anos de ensino com ótimos professores.

Agradeço ao Professor Doutor José Miguel Castro pela oportunidade conferida no desenvolvimento deste tema, a orientação e a motivação que conferiu ao longo da elaboração desta dissertação.

Agradeço aos coorientadores Doutor Luís Macedo e Doutora Rita Peres pela ajuda, pelo acompanhamento e a disponibilidade que tiveram.

Agradeço à empresa 361 METAL pelo projeto proposto que acabou por me conferir este tema de dissertação e o fornecimento de todos os perfis que foram utilizados e testados.

A todos os que me auxiliaram na aprendizagem dos softwares informáticos, nomeadamente, o Eng.º Cyrus e Eng.º Vasco Pires no ABAQUS e a Eng.ª Elisa Cerqueira no GBTUL.

E a todos os outros que me ajudaram direta, ou indiretamente, e que possibilitaram a aquisição dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Os perfis enformados a frio surgiram em 1850 nos Estados Unidos e em Inglaterra. No entanto, o seu uso no setor da construção permaneceu muito limitado até ao aparecimento das primeiras normas relativas ao comportamento estrutural destes elementos em 1946, pelo *American Iron and Steel Institute* (AISI). Na Europa, os perfis enformados a frio estão regulamentados pela Parte 1-3 do Eurocódigo 3, que está disponível apenas na versão “*British Standards EN 1993-1-3:2006: General rules: Supplementay rules for cold-formed members and sheeting*”. Em Portugal tem-se observado progressivamente a substituição dos perfis UPN ou IPE por perfis com secções do tipo OMEGA, C e Z na materialização de madres e construção de estruturas metálicas, incluindo reabilitação e edifícios.

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento dos perfis enformados a frio, que desempenham a função de elementos secundários, com foco especial na avaliação da redução da sua resistência devido aos fenómenos de encurvadura. Atualmente, a versão mais recente do Eurocódigo 3 considera o uso da curva de encurvadura “b” proposta na Parte 1-1 para perfis laminados a quente como uma resposta conservadora para obtenção do parâmetro de redução associado a esse fenómeno, desde que seja conhecido o valor do momento crítico associado ao elemento.

Com este objetivo em mente, diversas abordagens são utilizadas no cálculo do momento crítico, incluindo o uso de expressões analíticas, análises pelo software ABAQUS e a teoria generalizada das vigas pelo GBTUL.

Os modelos utilizados foram calibrados com base nos resultados experimentais de várias secções OMEGA da mesma família e diferentes condições de carregamento, para possibilitar a avaliação dos parâmetros de instabilidade que afetam os perfis.

A principal finalidade deste trabalho é fornecer ao fabricante as curvas que relacionam os fatores redutivos dos fenómenos de encurvadura dos perfis OMEGA com o comprimento do vãos a vencer. Para tal são tidas em conta três casos teóricos onde é aplicado momento puro na secção e um caso prático de carregamento distribuído.

PALAVRAS-CHAVE: ABAQUS, GBTUL, LTB, Enformados a Frio, Momentos Críticos

ABSTRACT

Cold-formed profiles emerged in 1850 in the United States and England. However, their use in the construction sector remained very limited until the appearance of the first standards regarding the structural behaviour of these elements in 1946 by the American Iron and Steel Institute (AISI). In Europe, cold-formed profiles are regulated by Part 1-3 of Eurocode 3, which is only available in the "British Standards EN 1993-1-3:2006: General rules: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting" version. In Portugal, there has been a progressive replacement of UPN or IPE profiles with OMEGA, C, and Z sections in the construction of beams.

The objective of this study was to evaluate the behaviour of cold-formed profiles, which are used as secondary structural elements, with a special focus on assessing the reduction of their strength due to the buckling phenomenon. The latest version of Eurocode 3 considers the use of the "b" buckling curve proposed in Part 1-1 for hot-rolled profiles as a conservative response to obtaining the reduction parameter associated with this phenomenon, provided that the critical moment values associated to the element is known.

With this objective in mind, various approaches are used to calculate the critical moment, including the use of analytical expressions, analyses using ABAQUS software, and the generalized beam theory by GBTUL.

The models used were calibrated based on experimental results of various OMEGA sections from the same family and under different loading conditions to enable the evaluation of instability parameters that affect the profiles.

The main purpose of this work is to provide the manufacturer with curves that relate the reduction factors of the buckling phenomena of OMEGA profiles to the span length to be overcome. For this purpose, three theoretical cases are considered, where pure moment is applied to the section, as well as one practical case of distributed loading.

KEYWORDS: ABAQUS, GBTUL, LTB , Cold-Formed, Critical Moment

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
 2. ENQUADRAMENTO	 3
2.1. ASPETOS GERAIS	3
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS ENFORMADOS A FRIO	5
2.2.1. Tipos de Elementos Estruturais	5
2.2.2. Processos de Fabrico.....	7
2.2.3. Alterações do Material.....	8
2.2.4. Modos de Encurvadura	10
2.2.6. Outros Parâmetros Relevantes	12
2.2.6.1. Rigidez Torsional.....	12
2.2.6.1. Ductilidade.....	12
2.2.6.1. Resistência á Corrosão e ao Fogo.....	13
2.3. CARACTERIZAÇÃO PELO EUROCÓDIGO	13
2.3.1. Classificação dos Perfis	13
2.3.2. Análise Seccional	15
2.3.3. Quantificação do Efeito do Painel de cobertura	16
2.3.4. Curvas de Encurvadura.....	19
2.4. SOFTWARES DE FEM	20
2.4.1. ABAQUS.....	20
2.4.2. LTBEM & GBTUL	21
 3. APRESENTAÇÃO DOS PERFIS AVALIADOS E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS	 23
3.1. PERFIS AVALIADOS	23
3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS	25
3.2.1. Layouts Utilizados	26

3.2.2. Caracterização do Material.....	28
3.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS SECCIONAIS	29
3.3.1. Carga Descendente.....	29
3.3.2. Carga Ascendente.....	30
3.3.3. Resultados Esperados	30
3.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS COM OS TESTADOS	32
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS PERFIS TESTADOS.....	35
4.1. INTRODUÇÃO AO ABAQUS	35
4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS PERFIS TESTADOS EM LABORATÓRIO	37
4.2.1. Modelação das Componentes dos Ensaio	37
4.2.2. Modelação dos Materiais	38
4.2.3. Modelação dos Layouts de Ensaio	39
4.2.4. Modelação das Condições Fronteira	40
4.2.5. Modelação de outras Variáveis.....	41
4.3. CALIBRAÇÃO E RESULTADOS.....	42
4.3.1. Carregamento Descendente	42
4.3.2. Carregamento Ascendente	44
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À ENCURVADURA	47
5.1. INSTABILIDADE DOS PERFIS.....	47
5.2. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS MALHAS.....	48
5.2.1. ABAQUS e GBTUL	48
5.3. VALIDAÇÃO DOS VÁRIOS MÉTODOS DE CÁLCULO	49
5.3.1. <i>Softwares</i> de Cálculo	49
5.3.2. Expressão Analítica do Momento Crítico.....	50
5.3.3. Resultados e Comparações para o Perfil com Secção em I	51
5.3.4. Resultados e Comparações com um Perfil de Secção Mono simétrica	54
5.3.5. Resultados e Comparação com os Perfis de Secção OMEGA	55
5.4. ANÁLISE À ENCURVADURA DOS PERFIS OMEGA.....	57
5.4.1. Momentos Críticos Torsionais-Distorsionais.....	57

5.4.2. Momentos Críticos do Perfil OMEGA 300x2.5	60
5.4.3. Reduções do Momento Resistente	62
5.4.4. Consideração dos Painéis de Cobertura	63
5.4.5.Reduções para Casos de Carga Distribuída.....	65
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
 6. CONCLUSÃO	 69
6.1. SÍNTESE DO ESTUDO REALIZADO	69
6.2. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	70
6.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 71
 ANEXOS	 73
ANEXO A. PERDAS DE RIGIDEZ DA ALMA DO 300x2.5 E DEFORMAÇÕES LOCAIS EM LABORATÓRIO ...	75
ANEXO B.1. MATERIAIS CONSIDERADOS NA MODELAÇÃO E AS RESPECTIVAS CURVAS.....	77
ANEXO B.2. PARÂMETROS ADICIONAIS DO ABAQUS	78
ANEXO C. PERDAS DE RIGIDEZ DO OMEGA 300x2.5 E DEFORMAÇÕES LOCAIS NO MODELO NUMÉRICO	79
ANEXO D.1. QUADRO DE RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DA MALHA ABAQUS	81
ANEXO D.2. QUADRO DE RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DA MALHA GBTUL	82
ANEXO E. MODOS DO GBTUL PARA O PERFIL EM I	83
ANEXO F. QUADRO DE RESULTADOS DA SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO K_w	85
ANEXO G. MODOS DO GBTUL PARA O PERFIL UAP	87
ANEXO H.1. QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 70x1.5	89
ANEXO H.2. QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 170x2.0	91
ANEXO H.3. QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 300x2.5	93
ANEXO H.4. GRÁFICO DAS REDUÇÕES PELOS COMPRIMENTOS DOS PERFIS OMEGA 300x2.5	95
ANEXO H.5. MACRO ELABORADA E USADA NO AUXÍLIO DA CRIAÇÃO DE MODELOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Peso Reduzido de um Asna em Aço Leve	4
Figura 2.2 – Perfis Enformados a Frio (EN 1993-1-3,2006)	5
Figura 2.3 – Painéis Perfilados e Painéis Lineares (EN 1993-1-3,2006)	5
Figura 2.4 – <i>Stiffeners</i> mais Comuns (EN 1993-1-3,2006)	6
Figura 2.5 – Processo de Laminagem a Frio (Dubina,2012)	7
Figura 2.6 – Passos do Processo de Quinagem (Dubina,2012)	8
Figura 2.7 –Tensões Residuais de Flexão numa Secção em C (Bivolaru,1993)	10
Figura 2.8 –Encurvadura Local num Perfil RHS 150x25x1	11
Figura 2.9 – Encurvadura Global Torsional-Lateral num Perfil IPE 80	12
Figura 2.10 – Consideração da Mola e o Aspetto da Secção Útil (EN 1993-1-3,2006)	16
Figura 2.11 – Representação Esquemática da Ligação Banzo-Painel (EN 1993-1-3,2006)	17
Figura 2.12 – Modelos de Cálculo para o Parâmetro $C_{D,C}$ (EN 1993-1-3,2006)	18
Figura 3.1 – Perfis Fornecidos e Escolhidos para serem Avaliados.....	23
Figura 3.2 – Ensaio da Vigas no <i>Layout</i> de 4 metros: a) Desenho simplificado do <i>layout</i> , b) Fotografia durante o ensaio de aplicação de carga descendente no OMEGATEK 70, c) Fotografia da configuração dos travamentos para utilização na carga ascendente do OMEGATEK 170	27
Figura 3.3 – Ensaio da Vigas no <i>Layout</i> de 8 metros: a) Desenho simplificado do <i>layout</i> , b) Fotografia durante o ensaio de aplicação de carga descendente no OMEGATEK 300, c) Fotografia no ensaio da emenda de continuidade	28
Figura 3.4 – Modos de Rotura dos Ensaio de Carga Descendente: a) Rotura do OMEGA 70x1.5, b) Rotura do OMEGA 170x2.0, c) Rotura do OMEGA 300x2.5	29
Figura 3.5 – Modos de Rotura dos Ensaio de Carga Ascendente: a) Rotura do OMEGA 70x1.5, b) Rotura do OMEGA 170x2.0	30
Figura 4.1 – Comparações dos Resultados obtidos do ABAQUS e Cálculo Analítico	35
Figura 4.2 – Distribuição de Tensões e Quadro com Comparações: a) Momento Elástico, b) Momento Plástico Máximo	36
Figura 4.3 – Deformada e Quadro com Comparações: a) Encurvadura Lateral, b) Zona de Rotura....	37
Figura 4.4 – Partes usados nos modelos: a) Perfil OMEGATEK 300x2.5, b) Chapa de contacto com o perfil c) Cilindro de Apoio	38
Figura 4.5 – Layouts em Modelo Numéricos: a) <i>Layout</i> 1, b) <i>Layout</i> 2, c) Zona de Carregamento do <i>Layout</i> 2	40
Figura 4.6 – Condições de Apoio: a) OMEGATEK 70x1.5 e 170x2.0, b) OMEGATEK 300x2.5 com Cilindro	41
Figura 4.7 – Modos de rotura dos modelos: a) Rotura dos Perfis 70x1.5 e 170x2.0, b) Rotura do Perfil 300x2.5.....	43

Figura 4.8 – Modos de Rotura dos Modelos Invertidos: a) Rotura do Perfil 70x1.5, b) Rotura do Perfil 170x2.0	45
Figura 5.1 – Encurvadura Lateral Torcional num Perfil em I	47
Figura 5.2 – Esquema seguido para os Casos de Aplicação de Carga	48
Figura 5.3 – Condições Fronteira aplicadas no ABAQUS: a) Com Empenamento, b) Sem Empenamento	50
Figura 5.4 – Influência do Ponto de Aplicação da Carga no Momento Crítico: a) No Banzo Comprido Influência Negativa, b) No Banzo Tracionado Influência Positiva	51
Figura 5.5 – Encurvadura dos Perfis: a) 70x1.5 ABAQUS, b) 70x1.5 GBTUL, c) 170x2.0 ABAQUS, d) 170x2.0 GBTUL	60
Figura 5.6 – Restrições Laterais aplicadas no Perfil	64
Figura 5.7 – Aplicação da Carga no Banzo Superior	65
Figura 5.8 – Modelo Analítico do Carregamento: a) Aplicação da Carga, b) Diagrama de Momentos Fletores	66
Figura A.1 – Perda de Rigidez da Alma do Perfil 300	75
Figura A.2 – Deformação Local do Banzo do Perfil 300	75
Figura B.2.1 – Propriedades usadas na definição do Contacto Geral	78
Figura B.2.2 – Propriedades usadas na definição da Transmissão de Deslocamento do Ponto de Referência para as Placas de Carregamento	78
Figura C.1 – Perda de Rigidez da Alma do Perfil 300 no Modelo Numérico	79
Figura C.2 – Deformação Local do Banzo do Perfil 300 no Modelo Numérico	79
Figura E.1 – Modos de Rotura possíveis de um Perfil em I	83
Figura G.1 – Modos de Rotura possíveis de um Perfil em UAP	87
Figura H.6.1 – – Exemplo do <i>Script</i> em Python que realiza as Análises no ABAQUS	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Curva Tensão-Deformação Teórica processo de <i>Strain Hardening</i>	9
Gráfico 2.2 – Diferenças na Resposta Seccional entre as Classes.....	14
Gráfico 2.3 – Curvas de Encurvadura Propostas pelo EC3 com a Fórmula Modificada de Ayrton-Perry	20
Gráfico 4.1 – Curva Tensão-Deformação Tipo	39
Gráfico 4.2 – Comparação dos Resultados Descendente: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.0, c) OMEGATEK 300x2.5	43
Gráfico 4.3 – Comparação dos Resultados Ascendente: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.0	44
Gráfico 5.1 – Resultados das Análises de Sensibilidade: a) ABAQUS, b) GBTUL	49
Gráfico 5.2 – Repartição da Contribuição dos Modos obtidos em GBTUL	53
Gráfico 5.3 – Análises da importância da consideração do Parâmetro K_w : a) IPE 140, b) IPE 300.....	53
Gráfico 5.4 – Contribuição dos Modos segundo o GBTUL: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.....	56
Gráfico 5.5 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 70 x 1.5: a) ABAQUS, b) GBTUL.....	58
Gráfico 5.6 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 170 x 2.0: a) ABAQUS, b) GBTUL.....	59
Gráfico 5.7 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 300 x 2.0: a) ABAQUS, b) GBTUL.....	61
Gráfico 5.8 – Contribuição dos Modos para o Perfil 300 x 2.5 em Vãos Extremos	62
Gráfico 5.9 – Reduções dos Perfis OMEGATEK 300 x 2.5 com base nos Resultados Obtidos	63
Gráfico 5.10 – Momentos Críticos com Restrição Lateral Total	64
Gráfico 5.11 – Comparação das Reduções dos Perfis com e sem Restrição Lateral	65
Gráfico 5.12 – Comparação das Reduções da Carga Distribuída com as respectivas Restrições.....	66
Gráfico B.1.1 – Curvas Tensão – Deformação do Material de cada Perfil	77
Gráfico H.4.1 – Reduções não Apresentadas no Gráfico 5.9: a) ABAQUS, b) GBTUL	95

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Propriedades Brutas dos Perfis Avaliados.....	24
Quadro 3.2 – Descrição dos Ensaios Laboratoriais.....	25
Quadro 3.3 – Valores Médios do Material Testado.....	28
Quadro 3.4 – Carregamento e Deslocamento Registrado pelo Atuador no Instante da Rotura	29
Quadro 3.5 – Carregamento e Deslocamento Registrado pelo Atuador no Instante da Rotura	30
Quadro 3.6 – Resistências Seccionais para a Flexão Positiva Efetiva.....	31
Quadro 3.7 – Resistências Seccionais para a Flexão Negativa Efetiva com e sem Reforço nas Abas	31
Quadro 3.8 – Comparação entre os Resultados Analíticos e os Valores Experimentais da Carga Descendente	32
Quadro 3.9 – Comparação entre os Resultados Analíticos e os Valores Experimentais da Carga Ascendente.....	33
Quadro 4.1 – Comparação Cargas Máximas (Descendente).....	42
Quadro 4.2 – Comparação Cargas Máximas (Ascendente).....	44
Quadro 5.1 – Resultados dos Momentos Críticos no Perfil IPE 100	52
Quadro 5.2 – Resultados dos Momentos Críticos no Perfil UAP 100.....	54
Quadro 5.3 – Contribuição dos Respetivos Modos.....	55
Quadro 5.4 – Avaliação da Esbelteza do Perfil no <i>Layout</i> 1.....	55
Quadro 5.5 – Resultados dos Momentos Críticos Negativos nos OMEGAS	56
Quadro 5.6 – Casos do Carregamento Distribuído.....	67
Quadro B.1.1 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Testados e Usados nos Modelos.....	77
Quadro D.1.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.1 a)	81
Quadro D.2.1 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.1 b)	82
Quadro F.1 – Resultados obtidos em LTBEAM do Gráfico 5.3	85
Quadro H.1.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.5 a)	89
Quadro H.1.2 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.5 b)	90
Quadro H.2.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.6 a)	91
Quadro H.2.2 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.6 b)	92
Quadro H.3.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.7 a) e 5.9	93
Quadro H.3.2 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.7 b) e 5.9	94

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{bruta} – Área Bruta

b – Largura

E – Módulo de Elasticidade

F_u – Tensão Última

F_y – Tensão de Cedência

G – Modulo de Distorção

h – Altura

I_t – Inércia á Torção

I_w – Inércia de empenamento

I_y – Inércia segundo o eixo y-y

I_z – Inércia segundo o eixo z-z

kN – KiloNewton

$M_{b,Rd}$ – Momento Resistente de Encurvadura

M_{cr} – Momento Crítico

MPa – MegaPascal

M_{Rd} – Momento Resistente

M_y – Momento segundo o eixo y

t_{eff} – Espessura Efetiva

t_{nom} – Espessura Nominal

W_y – Modulo de Flexão y-y

W_z – Modulo de Flexão z-z

δ – Deformação

ε – Extensão

$\bar{\lambda}$ – Esbelteza Normalizada

ν – Coeficiente de Poisson

χ_{LT} – Factor de Redução Associado á Encurvadura Lateral

LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AISI – American Iron and Steel Institute

BS – British Standard

CMM – Construção Metálica e Mista

EC – Eurocódigo

EN – European Norm

FEM – Finite Element Method

GBT – Generalized Beam Theory

GBTUL – Generalized Beam Theory at University of Lisbon

HE – European wide flange beams

IPE – European I-beam

MEF – Método dos Elementos Finitos

NP – Norma Portuguesa

PRS – Perfil Reconstituído Soldado

RHS – Rectangular Hollow Shape

S.I. – Sistema Internacional

SSRC – Structural Steel Research Council

LABEST - Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LSF – Light Steel Framing

LTB – Lateral Torsional Buckling

LTBEAM – Lateral Torsional Buckling of Beams

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

UAP – Channels with Parallel Flanges

UPN – European Standard Channels

1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os perfis Enformados a Frio têm ganho popularidade na Europa como uma alternativa sustentável. Embora sejam de aplicação mais comum nos Estados Unidos da América, Canadá e Austrália, onde até competem com a construção tradicional, na Europa também têm vindo a ser muito utilizados como componentes estruturais principais em habitações que seguem o método construtivo "Light Steel Framing" (LSF).

Com o aparecimento destes perfis, o novo processo de fabricação de elementos de baixa espessura passou a ser amplamente utilizado na criação de objetos do quotidiano, desde latas de alumínio até vigas estruturais em aço. A facilidade de fabricação e a resistência destes produtos possibilitam a criação de inúmeros objetos.

No entanto, em Portugal, ainda há uma falta de normas para o uso adequado desses perfis, o que requer confiar nas informações fornecidas pelos fabricantes durante o dimensionamento. Os países que mais avançaram nessa área são aqueles que possuem um maior grau de utilização do LSF, como os Estados Unidos da América, que possuem as *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI, 2007). Estas especificações são constituídas por oito partes, sendo que seis delas foram alvo de revisão em 2007 e duas novas publicações também nesse ano.

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico de perfis com secção em OMEGA, desenvolvidos no âmbito de uma colaboração com a empresa 361 Metal, calibrado com base nos resultados de uma campanha experimental. Com este modelo pretende-se verificar as resistências destes perfis, em particular o seu comportamento à encurvadura, e ultrapassar algumas das limitações dos métodos pouco desenvolvidos propostos no EN 1993-1-3:2006.

A calibração do modelo foi realizada com base nos resultados experimentais de várias secções OMEGA da mesma família e diferentes condições de carregamento, para possibilitar a avaliação dos parâmetros de instabilidade que afetam os perfis. O objetivo é auxiliar os potenciais compradores destes produtos na sua correta utilização e dimensionamento.

A presente dissertação apresenta-se dividida em seis Capítulos. Para além deste Capítulo introdutório, no Capítulo 2, será fornecido um resumo dos conceitos de Enformados a Frio, juntamente com suas

características específicas e diferenças em relação aos perfis mais comuns. São também apresentados os softwares de modelação numérica que serão utilizados para a obtenção de resultados.

No Capítulo 3, é apresentada uma descrição dos ensaios laboratoriais realizados e os resultados obtidos, com foco especial nos ensaios cujos resultados serão utilizados para a calibração dos modelos numéricos.

No Capítulo 4, é realizada uma introdução ao programa ABAQUS e são detalhados os passos seguidos durante o processo de aprendizagem do programa, a fim de garantir resultados precisos. Em seguida, são descritos os modelos utilizados e os seus componentes para a obtenção e calibração de modelos coerentes com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

No Capítulo 5, serão avaliados os fenómenos de encurvadura. Primeiro é feita uma análise em perfis laminados a quentes, com secções mais comuns (I e U), cujos resultados serão utilizados para validar os modelos desenvolvidos para os perfis com secção OMEGA e obter os valores dos momentos críticos. Finalmente, serão estudadas as respostas dos perfis com secção OMEGA, quando submetidos a momentos fletores.

No Capítulo 6, serão apresentadas as conclusões obtidas em cada um dos capítulos anteriores. Os resultados obtidos são discutidos e possíveis desenvolvimentos futuros para este tópico são sugeridos.

2

ENQUADRAMENTO

2.1. ASPETOS GERAIS

Na conceção de estruturas metálicas é possível dividir os elementos estruturais de aço em três tipos:

- i. Perfis laminados a quente, sendo estes os mais comuns por terem formatos práticos e serem standardizados e, portanto, estarem mais bem caracterizados. Neste grupo estão incluídos os perfis IPE, HEA, UPN.
- ii. Perfis reconstituídos soldados (PRS), mais utilizados quando é necessário vencer vãos maiores do que os perfis convencionais permitem. São constituídos por chapas soldadas para obter o formato desejado, sendo as secções mais comuns os perfis em I reforçados ou em caixão
- iii. Perfis enformados a frio, conhecidos por terem espessuras muito baixas entre 0.5 mm a 6.0 mm. O seu processo de fabrico permite que sejam moldados com variadíssimas secções, sendo as mais comuns sendo as secções em Z, C, U.

Os perfis enformados a frio surgem inicialmente em 1850 nos Estados Unidos e em Inglaterra. No entanto, o seu uso no setor construtivo permaneceu muito limitado até ao aparecimento das primeiras normas relativas ao comportamento estrutural destes elementos. Em 1946 o *American Iron and Steel Institute* (AISI) publicou a *Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members* (Especificação para o Projeto de Elementos Estruturais em Aço de Calibre Leve), que foi baseada num projeto de investigação do Professor George Winter da Cornell University. Esta norma foi um marco importante para promover o uso e estabelecer diretrizes adequadas para os perfis enformados a frio na construção.

Principais vantagens dos perfis enformados a frio:

- Têm uma boa eficácia estrutural devido á sua relação entre o seu baixo peso com a sua elevada capacidade resistente (ver Figura 2.1);
- Os elementos são produzidos para resistirem a cargas baixas, permitindo a otimização das soluções estruturais;
- Existe a possibilidade de criar secções com geometrias não convencionais, de modo a ter soluções mais económicas;
- O seu processo de fabrico é rápido e permite a produção em grandes quantidades;

- Os processos de montagem e desmontagem são simples e é possível a reutilização do material;
- Os perfis galvanizados possuem uma alta resistência à corrosão;
- De forma geral, têm configurações que facilitam o transporte, sendo compactáveis.



Figura 2.1 – Peso Reduzido de um Asna em Aço Leve

Principais desvantagens destes perfis:

- Devido às suas baixas espessuras, estão suscetíveis a fenómenos de instabilidade, que não são comuns nos perfis laminados a quente;
- Possuem uma resistência ao fogo muito baixa, exigindo sempre cuidados adicionais para garantir a segurança contra incêndios;
- Devido ao processo de fabrico, são pouco dúcteis, o que significa que não dissipam energia quando solicitados pela ação sísmica.

Apesar do atraso em relação ao resto da Europa, em Portugal já se observa a substituição dos perfis UPN ou IPE por perfis com secções do tipo OMEGA, C e Z na materialização de madres. Inclusive é possível construir habitações inteiramente utilizando perfis enformados a frio com o sistema construtivo LSF Light Steel Framing (LSF), embora sejam poucos os profissionais que dimensionam e constroem estes sistemas. É verdade que a regulamentação deste tipo de perfis especial é reduzida, especialmente quando comparada com a sua contraparte Americana. No entanto, durante o processo de desenvolvimento do Eurocódigo 3, foi criada uma Parte 1-3 dedicada aos perfis enformados a frio, que está disponível apenas na versão “British Standards *EN 1993-1-3:2006: General rules: Supplementay rules for cold-formed members and sheeting*”. É evidente a discrepância em termos de normas quando comparado com as 6 publicações do AISI. Apesar de as normas europeias conterem a informação base necessária para a caracterização e dimensionamento, há uma falta significativa de diretivas que o auxiliem/facilitem o seu uso.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS ENFORMADOS A FRIO

2.2.1. TIPOS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Relativamente às configurações geométricas, os elementos de aço enformado a frio podem ser divididos em duas classes: Perfis e Painéis.

Os **Perfis** (ver Figura 2.2) são membros lineares individuais (barras prismáticas) fabricados apartir de chapas com espessuras entre os 0.5 e 6 mm. As configurações mais comuns incluem perfis em forma de U, Z, C, Ω .

Os **Painéis Perfilados e Lineares** (ver Figura 2.3) são peças laminares compostas por secções contínuas podendo ter espessuras entre o 0.4 e 1.5 mm.

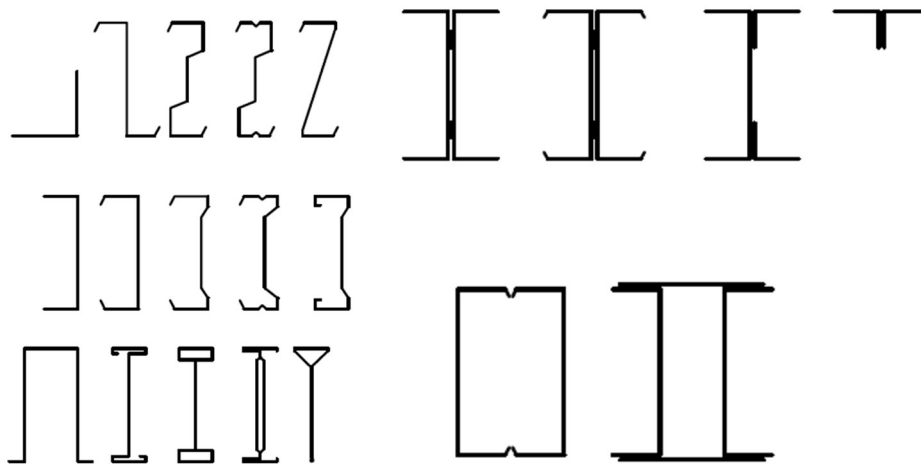


Figura 2.2 – Perfis Enformados a Frio (EN 1993-1-3,2006)

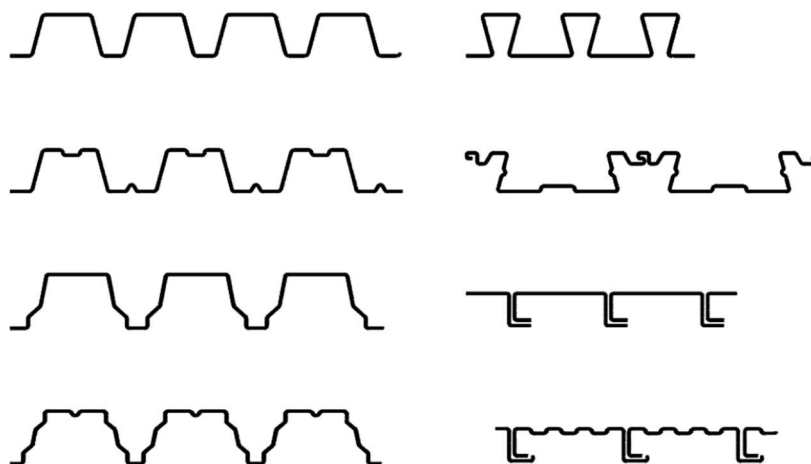


Figura 2.3 – Painéis Perfilados e Painéis Lineares (EN 1993-1-3,2006)

Os perfis individuais são, na sua maioria, usados como elementos estruturais principais quando usado o sistema construtivo LSF, sendo comuns na materialização de vigas de pavimento, como elementos principais, ou na criação de encaixes para a aplicação de isolamentos térmico e acústico, como elementos secundários.

Por outro lado, os painéis têm a função de distribuir cargas para os elementos estruturais principais. São empregados em pavimentos e coberturas leves, assim como em lajes colaborantes, contribuindo para a estrutura global.

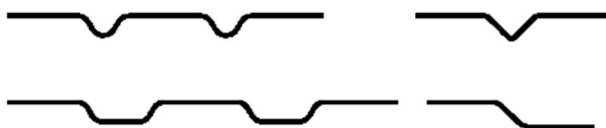
Os perfis enformados a frio apresentam geometrias complexas, com dobras e saliências em zonas que poderiam ser mais esbeltas. Estas saliências são conhecidas como *Stiffeners* (rigidificadores ou reforços), e como o próprio nome indica têm a funcionalidade de aumentar a rigidez do elemento em que se encontra. Em geral, os *stiffeners* podem ser divididos em 4 tipos: Dobras simples; Dobras duplas; Intermédios de banzo; e, Intermédios de alma (ver Figura 2.4).



Stiffeners Dobra Simples



Stiffeners Dobras Duplas



Stiffeners Intermédios de Banzo



Stiffeners Intermédios de Alma

Figura 2.4 – *Stiffeners* mais Comuns (EN 1993-1-3,2006)

De facto, é a presença destes elementos que torna estes perfis únicos e que os diferencia dos perfis laminados a quente, pois a geometria base deste tipo de perfis podia perfeitamente ser reproduzida com outros métodos de fabrico. Assim, ao fazer a partição das secções mais compridas/esbeltas dos perfis, é possível otimizá-las, através do aumento da área efetiva. No caso dos perfis de Classe 4, a partição pode ser feita até ao ponto de não haver encurvaduras locais, ou seja, que o comportamento seccional não seja comprometido pela esbelteza das placas do perfil. Nesse caso, o perfil passa a ser classificado como Classe 3.

2.2.2. PROCESSOS DE FABRICO

Existem três métodos de fabricação para elementos em aço enformados a frio, sendo que dois deles são muito semelhantes e, por isso, são apresentadas em conjunto.

O primeiro método é a **Laminagem a Frio**, que consiste em passar uma chapa metálica por uma sequência de rolos que deformam o aço de forma plástica e progressiva até ao formato final (ver Figura 2.5). Em geral, quanto mais complexa a secção do perfil, mais fases e mais rolos são necessários neste processo. Embora a aquisição dos vários rolos para formar a linha de laminagem tenha um custo inicial mais elevado, este método permite a pré-fabricação de grandes quantidades do mesmo perfil. Após a montagem da linha de laminagem, basta desenrolar a bobina sem a necessidade de manutenção ou apoio técnico adicional, tornando-o economicamente viável para a fabricação em grande escala de perfis estandardizados.

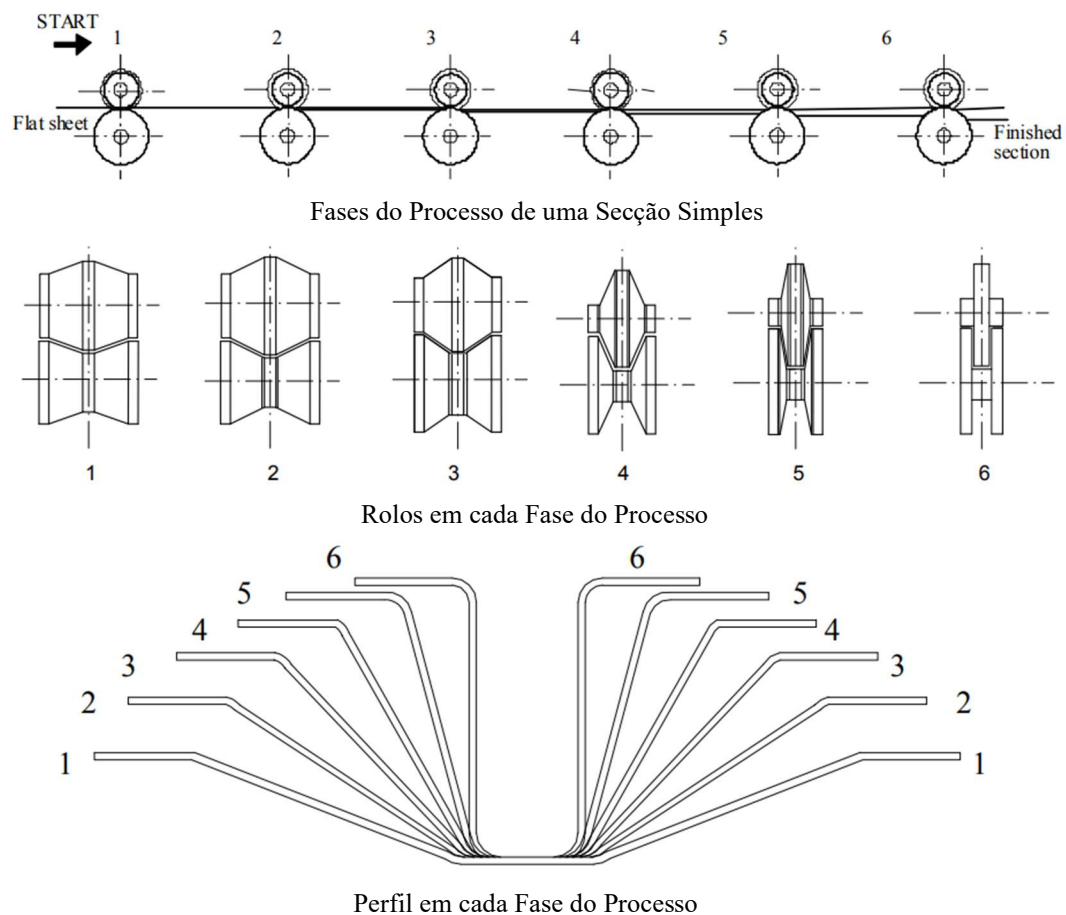


Figura 2.5 – Processo de Laminagem a Frio (Dubina,2012)

O segundo e o terceiro são a **Quinagem e Dobragem** que impõem uma deformação plástica local ao aço de forma a obter-se o formato pretendido (ver Figura 2.6). A dobragem é o processo simples de dobrar a chapa e a quinagem consiste em pressionar a chapa sobre um molde para que chapa fique com o formato do molde.

Apesar da praticabilidade deste processo e do seu custo reduzido de processamento da chapa, a longo prazo com secções constantes não é tão viável do ponto de vista económico, quando comparando com o processo de laminagem, que permite a fabricação em grande escala,

Estes métodos acabam por ser mais utilizados em secções com formatos não convencionais, com secções pensadas para utilizações específicas, uma vez que o formato final não é definido pela máquina, mas sim pelo técnico que a manuseia, tendo este a liberdade da execução de formatos mais criativos.

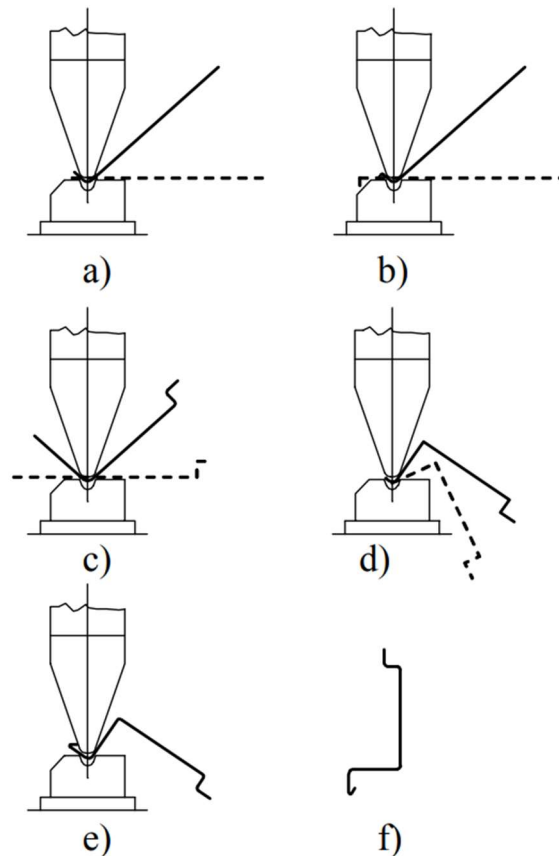


Figura 2.6 – Passos do Processo de Quinagem (Dubina,2012)

2.2.3. ALTERAÇÕES DO MATERIAL

Como já foi mencionado, os processos de fabrico dos enformados a frio conduzem à indução sobre a chapa de deformações plásticas que irão alterar as características mecânicas do material usado.

O processo de laminagem a frio irá provocar um incremento na tensão de cedência e nas tensões últimas na totalidade da peça, apesar de este incremento ser mais relevante na zona das dobras, devido à passagem nos rolos da totalidade da chapa e não apenas de uma parte específica desta.

Em contrapartida, nos processos de quinagem e dobragem, a dobra tem uma localização específica na chapa e, por isso, os aumentos notáveis de tensões só são sentidos na zona das dobras e não na secção toda.

O incremento da tensão de cedência é devido à imposição da deformação plástica, que obriga à passagem direta da cedência para a zona de *Strain Hardening* do aço sem passar pelo patamar de cedência, característica da maioria dos aços (ver Gráfico 2.1). A eliminação deste patamar da curva característica do material também conduz a uma menor extensão total, que justifica a perda de ductilidade dos elementos.

O incremento da tensão última é devido ao fenómeno de *Strain Aging*. Este fenómeno depende do tempo e da temperatura a que está sujeito o aço. É um processo complexo que, resumidamente, consiste no rearranjo ao nível molecular dos átomos de carbono e nitrogénio dissolvidos. No entanto, para que este processo se inicie é necessário deformar o aço até à zona de endurecimento para que estes átomos se libertem e consigam mexer-se livremente. Este fenómeno pode ser visível quando, no processo de fabrico, as zonas afetadas pela dobragem, são levadas da pós-cedência à deformação plástica. Seguidamente poderá ocorrer o processo de *strain aging*, sendo este fortemente dependente do tempo e da temperatura a que é armazenado.

Ambos os processos provocam o incremento de tensões em troca de ductilidade. O material passa a ser suscetível à rotura frágil pois deixa de ter a capacidade de deformar até à mesma extensão que a chapa original.

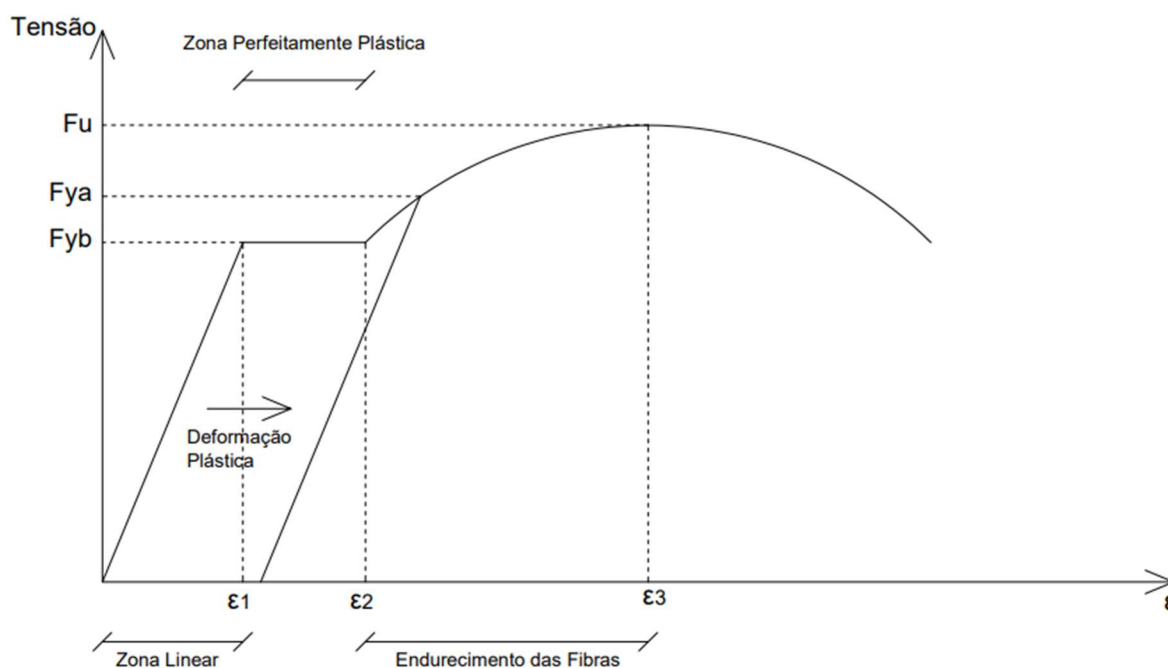


Gráfico 2.1 – Curva Tensão-Deformação Teórica processo de *Strain Hardening*

Qualquer processo de fabrico deixará tensões residuais nos perfis, especialmente no caso de serem laminados a quente. O fenómeno ocorre devido ao aumento da temperatura do aço durante o arrefecimento ao ar, que é realizado de forma rápida, e também devido às maiores espessuras dos perfis. Estas condições resultam num arrefecimento diferencial ao longo dos elementos, provocando o aparecimento de Tensões Resíduas Axiais. Isto acontece porque as zonas externas, que estão mais frias,

tentam retomar à posição inicial, enquanto a zona central do elemento ainda está quente e mantém-se expandida devido à temperatura.

No caso dos perfis enformados a frio, as principais tensões residuais são as de flexão, provenientes das deformações induzidas pelo processo de fabrico. Estas tensões surgem devido à aplicação de forças de um dos lados para formar as concavidades do perfil, resultando em compressão de um lado e uma tração no lado oposto, gerando um esforço de flexão. Após peça ser aliviada, uma grande parte da força utilizada para a deformação desaparece, mas uma parte permanece na peça, evidenciando a tentativa da peça de recuperar ao seu estado inicial. No entanto, como essa força não é suficiente para dobrar o elemento novamente, são geradas tensões internas. A Figura 2.7 mostra a presença destes esforços internos, com maior destaque nas dobras.

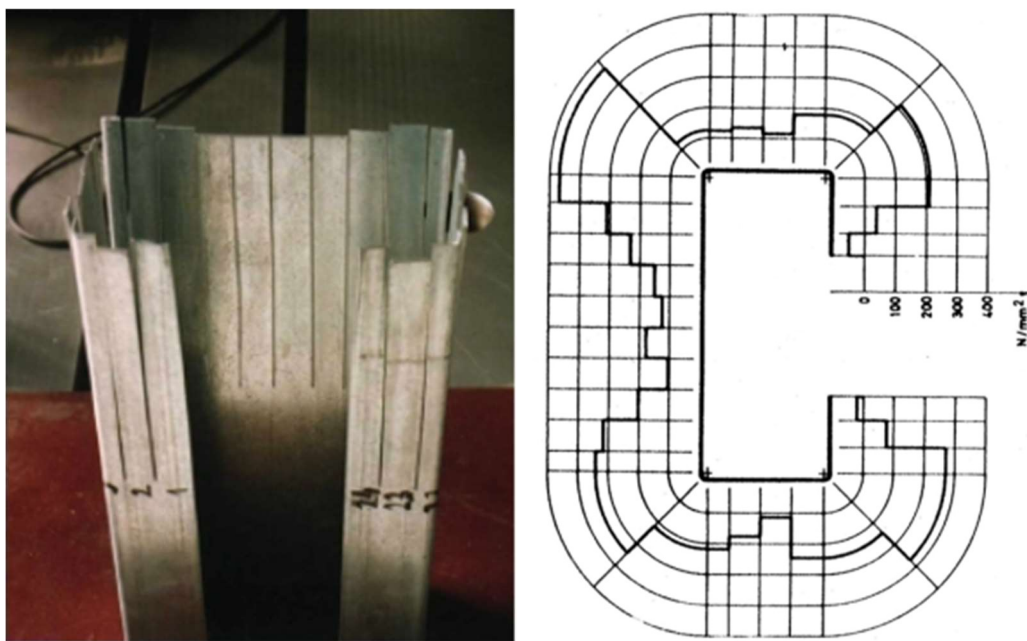


Figura 2.7 –Tensões Residuais de Flexão numa Secção em C (Bivolaru,1993)

2.2.4. MODOS DE ENCURVADURA

A encurvadura nos perfis metálicos resulta de instabilidades em elementos individuais dos perfis ou do perfil na sua globalidade.

Caso não existam imperfeições provenientes do fabrico, uma coluna sujeita à uma compressão pura terá o comportamento de uma barra ideal, sendo perfeita até à esbelteza normalizada 1, que corresponde ao 1º modo de encurvadura, só depois de atingir a carga crítica correspondente á esbelteza 1 é que a sua encurvadura segue a Curva de Euler (2.1).

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L_{crit}^2} \quad (2.1)$$

Os perfis metálicos podem estar sujeitos a três tipos de encurvadura:

- **Local:** este tipo de encurvadura é muito comum em perfis com elementos muito esbeltos, ou seja, com a relação comprimento/espessura muito elevada. Consiste na encurvadura individual do elemento caracteriza-se por ter baixos comprimento de onda.

No cálculo, este tipo de encurvadura é considerado conforme as normas do *BS EN 1993-1-5:2010*. É realizada uma redução da área útil que pode ser mobilizada no cálculo da resistência da secção. No caso de ser sujeita à flexão, a redução aplica-se à área e inércia do perfil. A presença deste fenómeno classifica a secção como Classe 4. A Figura 2.8 demonstra o aparecimento de instabilidades quando este tipo de perfil é sujeito a uma compressão uniforme, sendo visíveis nas deformações da alma.

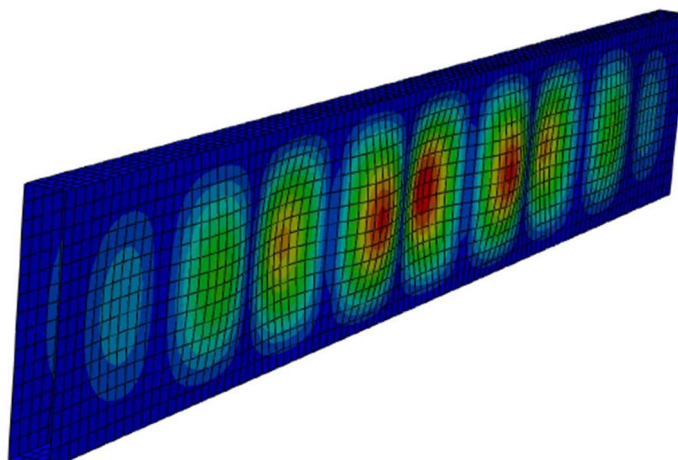


Figura 2.8 –Encurvadura Local num Perfil RHS 150x25x1

- **Global:** ocorre quando há deslocamento total da secção que engloba a encurvadura de Euler (flexão) e também a flexão-torção. Neste modo a secção ao deslocar-se comporta-se como um corpo rígido, sem distorção dos elementos constituintes do perfil.

Neste caso de encurvadura, é muito comum que o perfil saia do plano de aplicação da carga devido à inércias ser consideravelmente inferior no outro plano. Este fenómeno é facilmente observável nos perfis com secção em I, pois são projetados para aumentar a inércia em relação ao eixo principal e negligenciar a inércia no outro plano, tornando-os mais leves e aumentando o parâmetro peso-eficiência. No caso da aplicação de uma carga axial, ambos os banzos têm um deslocamento relativo ao apoio igual e regular fora do plano. No entanto, quando aplicado um momento fletor, a instabilização é mais evidente no banzo tracionado, como é ilustrado na Figura 2.9.

- **Distorcional:** como o nome sugere, engloba distorções provocadas na própria secção e é caracterizada, em perfis enformados a frio, pelos deslocamentos relativos a zonas de dobragem.

Uma consequência da variabilidade e complexidade dos perfis enformados a frio é o aumento da dificuldade do cálculo dos modos de encurvadura local, o que tem levado a um maior reconhecimento da importância do estudo dos modos distorcionais.

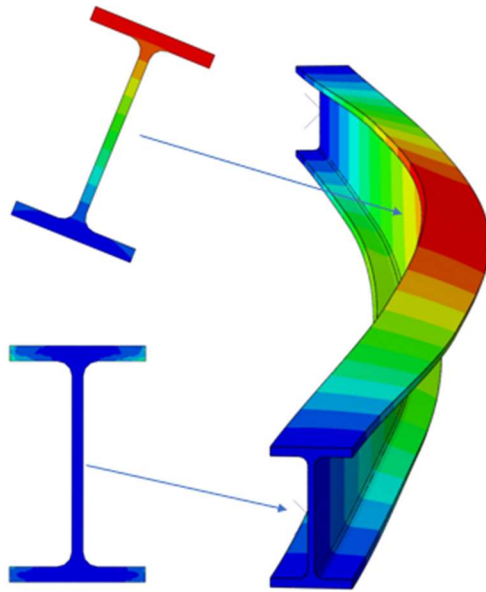


Figura 2.9 – Encurvadura Global Torcional-Lateral num Perfil IPE 80

2.2.6. OUTROS PARÂMETROS RELEVANTES

2.2.6.1. Rigidez Torcional

Os perfis enformados a frio têm, por norma, espessuras muito baixas, o que resulta em uma baixa rigidez torcional. Além disso, muitos destes perfis são mono-simétricos, o que significa que o centro de rigidez da secção pode vir a ser excêntrico ao centro de gravidade.

Este fenómeno faz com que surja um momento torsor no perfil, o qual pode causar deformações consideráveis devido à baixa rigidez torcional, podendo ser um fator limitador da sua capacidade resistente. Para prevenir este tipo de comportamento, serão necessárias restrições adicionais que impeçam a rotação do perfil. Isto demonstra a necessidade de verificação do modo de encurvadura flexão torção em perfis mono-simétricos.

2.2.6.2. Ductilidade

Devido às elevadas esbeltezas dos elementos constituintes dos perfis, estes são frequentemente limitados por fenómenos de encurvadura local sendo classificados como Classe 4 na maioria dos casos e, em situações limite, como Classe 3. Além disso, o processo de fabrico provoca uma redução na ductilidade como já mencionado anteriormente.

Devido a esta falta de ductilidade, estas secções não são capazes de dissipar energia em estruturas sujeitas a carga sísmica. Porém, podem ser usadas em estruturas sujeitas à ação sísmica, devido à sua reduzida massa, que traz outras vantagens. No entanto o dimensionamento destes elementos deverá ser

realizado com base no espectro de resposta elástico, conforme definido pela norma EN 1998-1, com o fator de redução igual à unidade ($q = 1$).

2.2.6.3. Resistência à Corrosão e ao Fogo

Como a maioria dos perfis em aço são muito pouco resistentes quando expostos a altas temperaturas, estes começam a perder a sua resistência. Em situações de incêndio estes ficam muito enfraquecidos, tornando necessária a implementação de medidas de segurança adicionais em contextos práticos. A solução mais comum é a proteção destes perfis com um gesso cartonado especial resistente ao fogo.

Outro problema que afeta as estruturas em aço pode por ser a corrosão. Porém, durante o processo de fabrico, é realizada uma galvanização a quente do perfil para que este tenha uma camada protetora contra a corrosão.

Os tipos de corrosão mais agressivos ocorrem durante o transporte e no armazenamento quando realizado em ambiente exterior. Quando são feitos furos na chapa galvanizada, não é necessário qualquer tratamento adicional porque as camadas de zinco possuem uma capacidade de autorreparação, transferindo a camada de envolvente para as zonas não protegidas.

Estudos realizados pelo *British Steel* e outras Instituições mostram que a perda de zinco é cerca de 0.1 g/m^2 por ano quando o perfil está em ambiente interno. Os resultados mostram que ao utilizar uma camada de zinco com peso de 275 g/m^2 haverá proteção suficiente para uma durabilidade de 100 anos em qualquer circunstância de uso normal.

2.3. CARACTERIZAÇÃO PELO EUROCÓDIGO

2.3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS

Os perfis enformados a frio, de acordo o EC3- Parte1-1 (*NP EN 1993-1-1:2010*) podem ser classificados em 4 classes. Esta classificação depende das propriedades geométricas das secções bem como as tensões de cedência do material usado.

Estes dois fatores são determinantes para a classificação, pois estas divisões expressam a estabilidade dos perfis quando expostos a certas tensões. Quanto mais esbelta for uma secção, ou uma parte dela, maior será a propensão dessa secção para instabilizar sob tensões mais baixas. Portanto a tensão de cedência do material influencia a classificação, pois materiais com tensões de cedência mais altas têm maior probabilidade de instabilizar elementos que aparentam ser estáveis. Daí a afirmação que, com o aumento da qualidade dos materiais, há uma maior propensão à instabilidade.

As Classes 1 e 2 estão associadas a perfis que são capazes de mobilizar na globalidade a secção como um todo, permitindo o cálculo plástico. A diferença entre a Classe 1 e a Classe 2 é que a Classe 1 permite deformações mais elevadas, possibilitando a formação de uma rótula plástica. Além disso, na Classe 1 é possível realizar uma análise plástica e redistribuir momentos.

Na Classe 3, a capacidade de plastificação da secção é perdida devido a instabilidades relacionadas com compressão dos elementos que quando a secção se encontra na distribuição elástica não serão tão solicitadas.

Por fim, nos elementos de Classe 4, as secções apresentam tensões inferiores as tensões cedência e, por isso, instabilizam localmente apresentando encurvaduras locais. É necessária uma análise da secção útil que poderá ser mobilizada, ou seja, é necessário quantificar a secção efetiva.

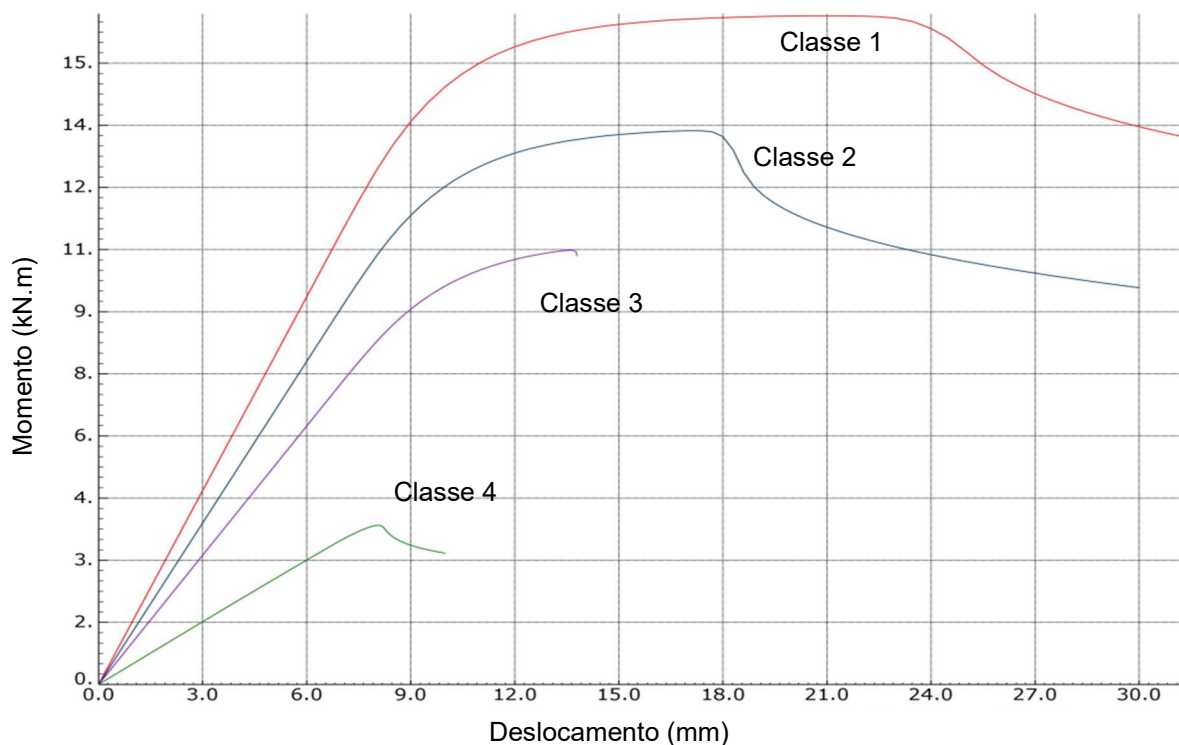


Gráfico 2.2 – Diferenças na Resposta Seccional entre as Classes

Para ilustrar as diferenças entre as quatro classes, foram realizadas análises em quatro modelos numéricos de um perfil RHS 150 x 25, variando a espessura para cada classe. Os resultados mostram o comportamento de deformação em diferentes níveis de carregamento.

Na Classe 1, é possível observar uma capacidade de deformação superior, atingindo um patamar representativo do momento plástico. Nessa classe, a secção é capaz de atingir a plasticidade e permite uma maior deformação.

No Classe 2, é observado que a secção entra ligeiramente no patamar de plasticidade, podendo atingir o momento plástico, porém, com uma menor capacidade de deformação em comparação à Classe 1. A secção apresenta uma resposta elástica até certo ponto antes de atingir a plasticidade.

Na Classe 3, a secção atinge a resistência seccional elástica, mas não chega à plasticidade. A deformação é limitada e não é possível atingir um patamar significativo de momento plástico. Instabilidades locais podem ocorrer nesta classe.

Na Classe 4, o modo de falha ocorre mesmo antes de atingir a resistência bruta da secção. A secção apresenta uma baixa capacidade de deformação e é mais propensa a instabilidades locais. Nessa classe, a secção é considerada mais frágil em termos de resistência.

A análise numérica feita aos perfis RHS demonstra como as diferentes classes de perfis apresentam comportamentos distintos em relação à capacidade de deformação e resistência plástica.

2.3.2. ANÁLISE SECCIONAL

Para que um perfil seja classificado como enformado a frio e se comporte de acordo com as especificações, é necessário que ele cumpra certos pré-requisitos em relação aos raios entre largura e espessura da seção. Esses pré-requisitos são estabelecidos com base nas Partes 1-3 e 1-5 do EC3.

Os raios entre largura e espessura da seção são utilizados como indicadores da esbelteza do perfil. Perfis com raios mais elevados são considerados mais esbeltos, o que significa que sua seção é mais fina em relação à sua largura. Essa esbelteza pode afetar a capacidade de resistência e estabilidade do perfil. Além disso, é necessário garantir que os *Stiffeners* (rigidificadores) no perfil proporcionem rigidez suficiente. Os *stiffeners* são elementos que são adicionados ao perfil para aumentar sua rigidez e resistência. Eles são projetados para evitar ou reduzir a encurvadura e a instabilidade do perfil. A rigidez adequada dos *stiffeners* é importante para que eles sejam contabilizados corretamente no comportamento estrutural do perfil.

Como já referido anteriormente, o processo de fabrico dos perfis enformados a frio conduz ao incremento de tensões de cedência. A tensão média de cedência pode ser avaliada através da seguinte fórmula (2.2) presente no *BS EN 1993-1-3:2006*:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A_g} \quad (2.2)$$

Em que:

f_{yb}	tensão de cedência base do material
f_u	tensão última
A_g	área bruta da seção
k	coeficiente que depende do processo de fabrico ($k=7$ para laminados e $k= 5$ para outros processos)
n	número de dobras de 90° com um raio interno de $r \leq 5t$ (ângulos inferiores deverão ser contados como as respetivas frações de 90°)
t	espessura efetiva do material antes do processo de fabrico

Devido à esbelteza dos elementos constituintes dos enformados a frio, estes perfis são geralmente classificados como Classe 4. Para calcular as seções úteis desses perfis e mitigar o efeito redutor causado pela instabilidade, é necessário levar em consideração os *stiffeners*, quando presentes. O *BS EN 1993-1-3:2006* permite o cálculo destes elementos de forma iterativa, considerando que o processo iterativo inicial resulta em uma redução superior à realidade.

Resumidamente, o processo envolve uma redução inicial que é considerada como um efeito de mola equivalente causado pelos elementos *stiffeners*. Essa mola fictícia permite reduzir a esbelteza da zona crítica, o que, por sua vez, diminui o efeito de redução inicial. O *BS EN 1993-1-3:2006* afirma que as iterações subsequentes são opcionais, mas a primeira iteração é sempre favorável e recomendada (ver Figura 2.10). Este processo iterativo permite a análise do perfil de forma mais exata, isto é, permite a quantificar a capacidade de carga e a estabilidade do perfil, levando em conta a sua esbelteza e os efeitos dos *stiffeners*.

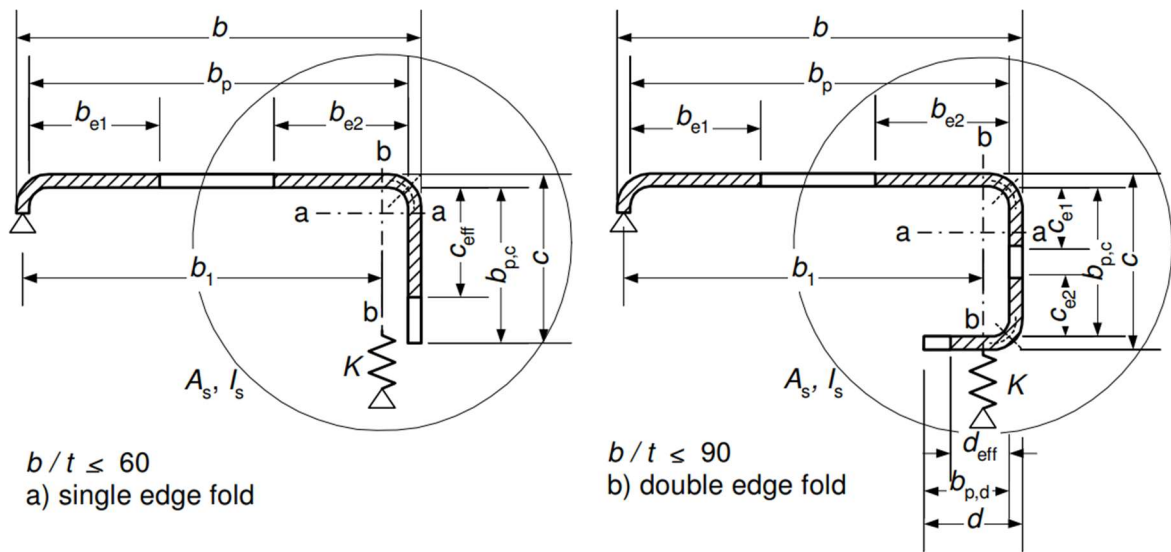


Figura 2.10 – Consideração da Mola e o Aspeto da Secção Útil (EN 1993-1-3, 2006)

2.3.3. QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DO PAINEL DE COBERTURA

Os perfis enformados a frio que têm a funcionalidade de madres em coberturas estão tipicamente conectadas no banzo superior com ligações aparafusadas aos painéis também de aço leve que funcionam como cobertura. Este tipo de ligação irá conferir ao perfil usado uma restrição no seu movimento lateral e na sua rotação.

Num caso corrente de laminados a quente, este tipo de consideração poderá ser desconsiderada devido aos elevados carregamentos e os finos painéis que os restringem. Não sendo esta restrição, portanto, muito significativa e servindo assim como uma segurança extra.

No entanto devido às dimensões correntes dos enformados a frio e as finas espessuras usadas nos perfis, este efeito torna-se notável e de boa prática a sua contabilização. Para tal o BS EN 1993-1-3 (2006) têm presente o capítulo 10 as regras e as possíveis quantificações a ter durante o dimensionamento.

De modo a iniciar a quantificação, é validado se o painel a ser utilizada na cobertura não será suficientemente rígido para conferir ao perfil travamento lateral completo ($K_{Mola,Lateral} = \infty$). Para esta validação é calculado a rigidez ao corte da chapa (2.3)

$$S = 1000\sqrt{t^3} \left(50 + 10\sqrt[3]{b_{cobertura}} \right) \frac{s}{h_w} \quad (2.3)$$

Em que:

s	espaçamento entre madres
h_w	altura da chapa perfilada
$b_{cobertura}$	largura da cobertura

No entanto para a validação da contabilização da restrição lateral completa é necessário que seja cumprido a equação proposta (2.4).

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0.25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (2.4)$$

Em que:

E	Módulo de Young
I_w	Inércia ao empenamento
I_t	Inércia á torção
I_z	Inércia á torção

Ora tendo a análise preliminar feita caso seja necessário a quantificação da mola lateral a norma prevê a possibilidade desta quantificação por meio experimental. No entanto caso não seja possível é previsto a seguinte formula para a mola lateral (2.5).

$$\frac{1}{K_{lateral}} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d+b_{mod})}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D} \quad (2.5)$$

Em que:

ν	Coeficiente de Poisson
h	altura do perfil
h_d	altura do perfil contabilizando as dobras da alma
b	largura do banzo
C_d	rigidez da mola rotacional

A quantificação da rigidez da mola rotacional segundo o EC3 é muito extensa e esta dependerá das condições de execução em obra. Visto que caso a ligação não seja bem feita o painel não terá a possibilidade de conferir uma rigidez rotacional. Sendo muitas vezes considerada de “0” e que a lateral traz a maioria das mais valias.

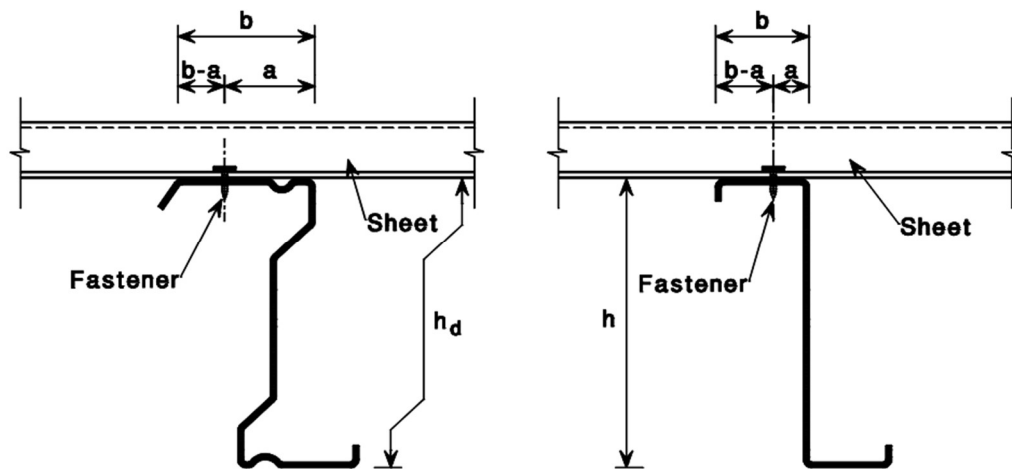


Figura 2.11 – Representação Esquemática da Ligação Banzo-Painel (EN 1993-1-3,2006)

No entanto, a quantificação desta é dada pela seguinte equação (2.6).

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})} \quad (2.6)$$

Em que:

$C_{D,A}$ rigidez rotacional da ligação entre o painel e a madre

$C_{D,C}$ rigidez rotacional correspondente á rigidez de flexão do painel

O valor de $C_{D,C}$ pode ser obtido tendo em conta o mínimo obtido pelos dois modelos de cálculo representados na Figura 2.12, que têm em conta a rotação das madres adjacentes e o grau de continuidade do painel.

$$C_D = m/\theta \quad (2.7)$$

Em que:

m momento aplicado por metro de largura do painel

θ rotação resultante do momento [radianos]

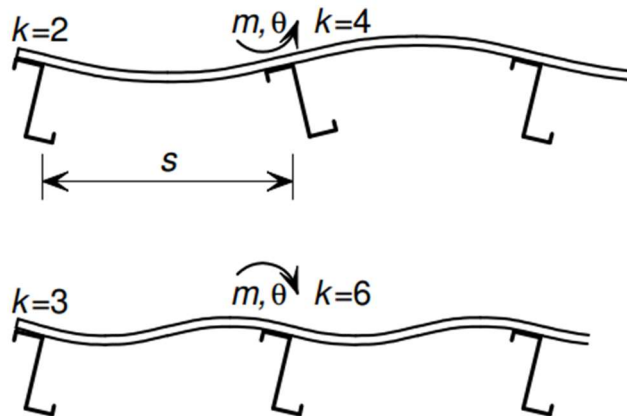


Figura 2.12 – Modelos de Cálculo para o Parâmetro $C_{D,C}$ (EN 1993-1-3,2006)

Alternativamente este parâmetro pode ser calculado de forma a obter valores conservativos pelo expressão (2.8).

$$C_D = \frac{k E I_{eff}}{s} \quad (2.8)$$

Em que:

I_{eff} Inercia efetiva por metro quadrado do painel

S espaçamento entre madres

Para a quantificação do parâmetro $C_{D,A}$ é remetido aos BS EN 1993-1-(2006) às páginas 88-90 tendo principal atenção aos pontos (5) e (7) nestas páginas.

2.3.4. CURVAS DE ENCURVADURA

Sendo os perfis Laminados a Quente amplamente mais utilizados na Europa e são padronizados de acordo com diferentes dimensões e propriedades. Embora estes perfis possam ter geometrias semelhantes, as diferenças nas tensões residuais destes perfis podem influenciar na sua resposta estrutural, especialmente em situações de carregamento crítico como a encurvadura.

No *NP EN 1993-1-1:2010*, as curvas de encurvadura são usadas para representar o comportamento estrutural dos perfis. Estas curvas são o resultado de uma série de estudos e análises experimentais realizadas em grande escala aos perfis laminados a quente (Sfintesco, 1970); são baseadas na fórmula de Ayrton-Perry (2.6) no qual o fator de imperfeição “ α ” é calibrado com base no trabalho de Rondal & Maquoi,(1979).

A fórmula de Ayrton-Perry substitui o conjunto de 3 curvas definidas por Bjorhovde no *Structural Steel Research Council (SSRC) Guide* formuladas com base no parâmetro adimensional da esbelteza (λ). As curvas obtidas eram aproximadas a um conjunto de 5 equações, cada uma para um intervalo de esbeltezas específico.

A possibilidade de utilizar uma equação em vez de cinco para definir uma reta torna o método de cálculo muito mais simples. Porém, esta simplificação, referente ao limite a partir do qual a esbelteza normalizada começa a ser notável na presença das imperfeições, foi alterado de 0.15 para 0.20 na presente versão do Eurocódigo. A justificação é a suposta melhoria da qualidade de fabrico que conduz à redução do número de imperfeições.

$$\sigma_u = \frac{\sigma_y}{2\lambda^2} \left\{ [1 + \alpha(\lambda - 0.15) + \lambda^2] - \sqrt{[1 + \alpha(\lambda - 0.15) + \lambda^2]^2 - 4\lambda^2} \right\} \quad (2.6)$$

Em que:

σ_u	tensão última
σ_y	tensão instalada no perfil
λ	esbelteza normalizada
α	factor de imperfeição (dependente da curva a utilizar)

Sabendo agora que as curvas de encurvadura do EC3 são especificamente propostas para perfis laminados a quente, é justificável afirmar que as curvas de encurvadura para perfis enformados a frio deverão ser diferentes. No entanto, devido à variabilidade das secções e ao recente aumento de popularidade, as Normas Europeias adotaram um método simplificado para perfis laminados a frio, fazendo uso de uma das curvas de encurvadura dos perfis laminados a quente. O EC3 considera de forma conservativa, de forma a englobar todos os casos possíveis, o uso da curva “b”, representada no Gráfico 2.3, como adequada para estimar a redução da resistência à encurvadura de perfis enformados a frio.

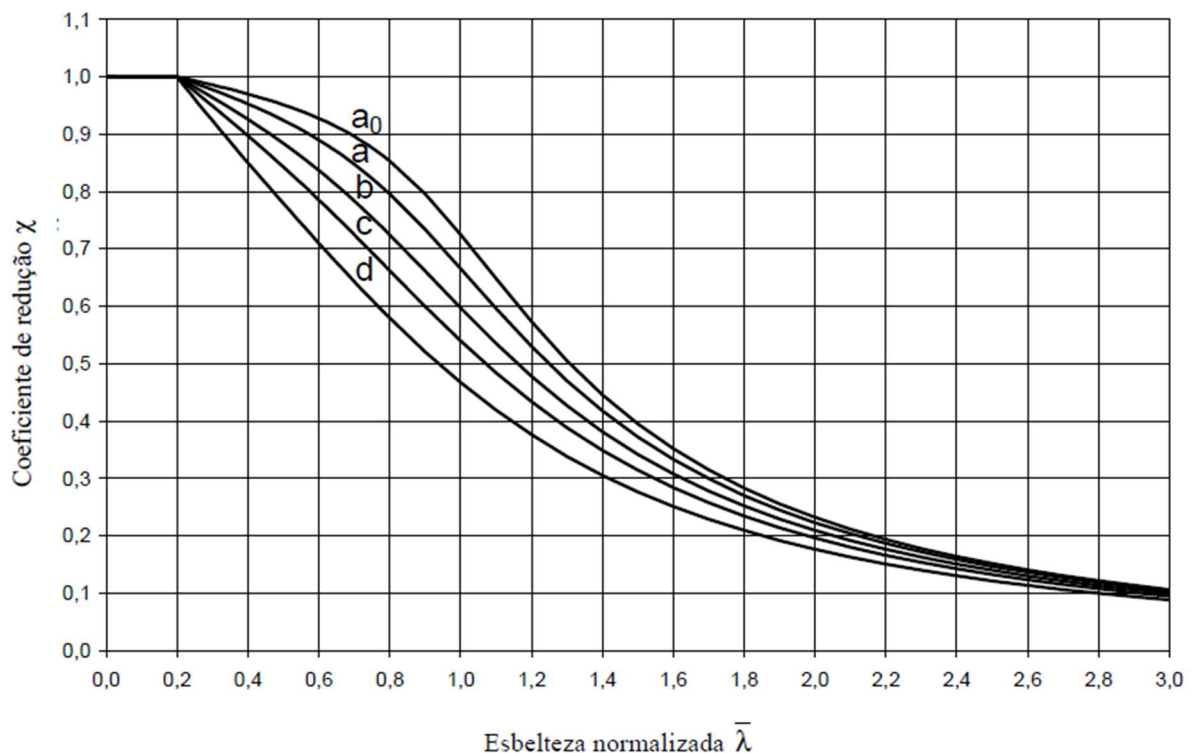


Gráfico 2.3 – Curvas de Encurvadura Propostas pelo EC3 com a Fórmula Modificada de Ayrton-Perry

2.4. SOFTWARES DE FEM

2.4.1. ABAQUS

ABAQUS é um *software* que realiza análises pelo Método dos Elementos Finitos podendo assim ser uma ferramenta computacional que auxilia em trabalhos de Engenharia. Este foi o programa usado como referência para a calibração dos modelos e a obtenção de resultados devido a sua alta versatilidade e eficiência computacional.

A primeira versão deste programa foi originalmente lançada em 1978 para um cliente particular que pretendia analisar a disposição de varões de combustível nuclear. A 3ª versão foi lançada em 1979 e tinha como objetivo principal a análise não-linear estática e dinâmica de estruturas, assim como análises de transferência de calor ou problemas de condutividade. A versão atual foi lançada em 1992, inclui a interface ABAQUS/CAE bem como a possibilidade de resolver problemas implícitos e explícitos.

As vantagens do uso do ABAQUS são:

- i. Simulação abrangente: O ABAQUS permite simular virtualmente qualquer cenário, oferecendo flexibilidade e adaptabilidade para modelar uma ampla variedade de problemas físicos e estruturais. Inclui análises estáticas, dinâmicas, térmicas, de fluidos, entre outras;
- ii. Comportamento personalizado: O ABAQUS não depende de bases de dados predefinidas para materiais. Os usuários podem definir o comportamento dos materiais com base em análises externas, como testes de laboratório ou dados experimentais, permitindo uma modelação mais precisa e realista.

- iii. Calibração: Com base em análises externas e dados experimentais, o ABAQUS permite a calibração dos modelos para garantir que os resultados simulados sejam concordantes com os resultados reais.
- iv. Análise avançada: O *software* oferece recursos avançados de análise, como elementos finitos, análise não linear, análise de contato, análise de grandes deformações e muito mais. Isso permite a modelação de comportamentos complexos e o estudo de fenômenos físicos detalhados.
- v. Interface amigável: O ABAQUS possui uma interface gráfica intuitiva e amigável, facilitando a criação, configuração e análise dos modelos. Além disso, possui recursos de pós-processamento eficientes para visualização e interpretação dos resultados.

Estas vantagens tornam o ABAQUS uma ferramenta poderosa e versátil para simulação e análise em diversas áreas, como engenharia estrutural, mecânica, civil, aeroespacial, automóvel e muitas outras, tanto em ambiente industrial como acadêmico.

2.4.2. LTBEAM & GBTUL

Ambos os *softwares* LTBEAM e GBTUL são mais simples e têm como função principal o cálculo de encurvaduras.

LTBEAM (*Lateral Torsional Buckling of Beams*) é um *software* desenvolvido para a análise de perfis comerciais, como os perfis IPE, e fornece valores de momentos críticos relacionados com a encurvadura lateral-torcional. Esses momentos críticos são calculados quando o perfil é submetido a momentos em torno do eixo de maior inércia.

Os valores de momentos críticos obtidos pelo LTBEAM são muito semelhantes aos valores calculados pelas expressões sugeridas pelo Anexo C do Eurocódigo 3 (EC3). O Anexo C do EC3 fornece métodos simplificados para determinar os momentos críticos de encurvadura lateral-torcional em perfis laminados de aço.

Ao fornecer valores de momentos críticos semelhantes aos calculados pelo Anexo C do EC3, o LTBEAM oferece uma ferramenta conveniente e confiável para a análise e projeto de perfis comerciais. Ele permite aos engenheiros avaliar a capacidade de carga dos perfis IPE em termos de encurvadura lateral-torcional e tomar decisões informadas para garantir a segurança e a eficiência das estruturas.

O GBTUL (*Generalized Beam Theory at the University of Lisbon*) é um programa desenvolvido no Instituto Superior Técnico de Lisboa que possui uma abordagem mais completa para a análise de encurvadura de perfis metálicos. A vantagem principal deste programa é a capacidade de modelar perfis de forma personalizada, não estando limitado a um catálogo pré-existente de perfis. Isso é especialmente útil ao lidar com seções complexas, como os enformados a frio.

O programa segue as formulações da *Generalized Beam Theory* (GBT), que é uma teoria avançada utilizada para descrever o comportamento de vigas e perfis. Essa teoria considera os efeitos de flexão, torção, encurvadura e outros fenômenos estruturais, fornecendo uma abordagem abrangente para a análise de perfis metálicos.

GBTUL oferece aos engenheiros e investigadores uma ferramenta poderosa para a análise e projeto de estruturas metálicas, permitindo uma modelação mais precisa e detalhada.

3

APRESENTAÇÃO DOS PERFIS AVALIADOS E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1. PERFIS AVALIADOS

A família de perfis OMEGATEK inclui 6 tipos de perfis, cada um com 3 ou 4 espessuras distintas. Para serem testados em laboratório escolheram-se 3 dos 6 perfis com o objetivo avaliar e caracterizar comportamento à flexão deste tipo de perfis. Isto permite validar as propriedades calculadas de acordo com o EN 1993-1-3, bem como as resistências seccionais dos perfis selecionados.

A escolha dos elementos para os testes foi feita de forma a incluir o perfil mais pequeno (70 mm), o maior (300 mm) e um intermédio (170 mm). Na seleção das espessuras, seguiu-se a mesma lógica: a espessura menor (1.5 mm) para o perfil mais pequeno, a maior espessura (2.5 mm) para o maior e uma espessura central (2.0 mm) para o perfil intermédio.

Estes perfis possuem uma geometria no formato de Ω (ver Figura 3.1) e sua principal função estrutural é a de elemento secundário. Estes tipos de perfis são usados como madres em coberturas, estando principalmente sujeito a esforços de flexão. Sendo então, importante realizar-se testes para avaliar o seu comportamento em relação à flexão simples.

OMEGATEK 70 - 170 - 300

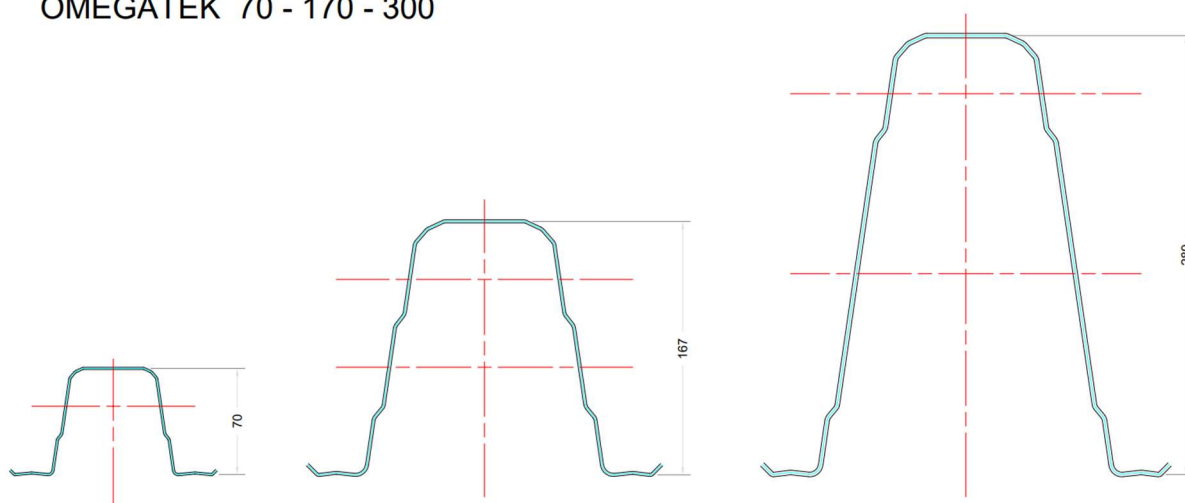


Figura 3.1 – Perfis Fornecidos e Escolhidos para serem Avaliados

Seguindo a metodologia proposta pelo Anexo C do BS EN 1993-1-3:2006, é possível calcular as propriedades da secção, mesmo quando esta possui um formato mais complexo, através da divisão dos perfis em partes. Esta abordagem permite obter, todas as propriedades necessárias para a sua caracterização em qualquer secção. Os resultados dessa avaliação estão demonstrados no Quadro 3.1, onde são apresentadas as propriedades brutas dos 3 perfis testados.

Quadro 3.1 – Propriedades Brutas dos Perfis Avaliados

Secção	Peso	Altura	Largura	Espessura	
				nominal	efectiva
	[kg/m]	h [mm]	b [mm]	t_{nom} [mm]	t_{eff} [mm]
OMEGATEK 70x1.5	2.90	70	138	1.5	1.46
OMEGATEK 170x2.0	7.75	170	234	2.0	1.96
OMEGATEK 300x2.5	14.47	300	269	2.5	2.46

Propriedades da Secção Bruta						
A_{bruta}	$I_{y,bruta}$	$I_{z,bruta}$	$W_{y,bruta}$	$W_{z,bruta}$	I_w	I_t
[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ⁶]	[mm ⁴]
369.58	274400	527030	7348.9	7608	122150000	262.60
986.87	3654500	4229600	42179	35954	3009000000	1264.90
1843.8	18126000	10311000	122730	76258	1.5635E+10	3720

Neste tipo de secções, como é frequentemente o caso, os perfis têm uma largura maior do que a altura e a sua geometria no geral resulta num aumento da inércia ao longo do "eixo fraco", onde não há aplicação de carga. Isso significa que é improvável que o perfil saia do plano, pois este encurva muito antes segundo o eixo principal. No entanto, a aplicação de carga ao longo do outro eixo não é uma opção viável devido à geometria e à alta excentricidade do centro de corte, o que causaria momentos flectores de torção indesejados.

As secções enformadas a frio são particularmente suscetíveis a resistir a esses momentos de torção. Realizando uma comparação rápida das propriedades brutas da secção, é possível comparar a inércia de torção (I_t) dos perfis OMEGA com um perfil convencional em formato de I, de modo a tornar a comparação relevante. Ao considerar a área bruta, a comparação é feita entre o IPE 160 (2 009 mm²) e o OMEGATEK 300x2.5 (1 843.8 mm²). O perfil IPE 160 tem uma inércia de torção de 36 000 mm², enquanto o perfil enformado a frio tem 3 720 mm², ou seja, cerca de 9.6 vezes menos.

Por outro lado, é evidente que, no que diz respeito à inércia de empenamento (I_w), o perfil em forma de I possui 3 960 cm⁶, enquanto o perfil em Ómega comparável possui cerca de 3.9 vezes mais, com 15 635 cm⁶.

Além disso, ao ser comparado as inércias em relação aos eixos principais, o I_y apresenta um aumento de 2.0 vezes, e ao longo do eixo mais fraco (I_z), um aumento de 15 vezes em relação à sua concorrência direta.

Este segmento representa uma breve análise que nos permite ter uma perspectiva sobre a influência da geometria nestes parâmetros e os benefícios obtidos em considerar estas geometrias durante o desenvolvimento de perfis cada vez mais otimizados.

3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios aos perfis surgiram como parte de uma campanha experimental realizado no Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST) cujo objetivo era avaliar os perfis. Embora essa campanha não tenha sido motivada pela necessidade de modelar os perfis no contexto da tese, a presença e observação nesta campanha foi altamente relevante para a calibração dos modelos numéricos que seriam posteriormente realizados. O Quadro 3.2 mostra a abrangência total da campanha, mas neste trabalho serão principalmente abordados os ensaios observados em laboratório, que seriam posteriormente modelados. Especificamente, os perfis relacionados às cargas ascendentes e cargas descendentes. Além disso, os perfis de 4 metros foram privilegiados devido à sua simplicidade, uma vez que possuem um carregamento mais constante e, geralmente, não apresentam encurvaduras.

Quadro 3.2 – Descrição dos Ensaios Laboratoriais

Perfil	Comprimento do vão (L) e condições de apoio	Tipo de ensaio
OMEGATEK 70 x 1.5	L=4.0m (extremidades simplesmente apoiadas)	Carga descendente
		Carga ascendente (com travamento lateral)
		Emenda simples- furação contínua
OMEGATEK 170 x 2.0	L=4.0m (extremidades simplesmente apoiadas)	Carga descendente
		Carga ascendente (com travamento lateral)
		Emenda simples - furação contínua
OMEGATEK 300 x 2.5	L=4.0m (extremidades simplesmente apoiadas)	Carga descendente
		Carga ascendente (com travamento lateral)
OMEGATEK 300 x 2.5	L=8m (extremidades simplesmente apoiadas)	Carga descendente (sem e com travamento lateral)
		furação contínua
OMEGATEK 170 x 2.0	L=8m (extremidades simplesmente apoiadas e apoio intermédio a meio vão)	Emenda simples sobre apoio intermédio -furação contínua
		Emenda com reforço sobre apoio intermédio - furação contínua

Os ensaios de carga descendente e ascendente têm como finalidade avaliar a resistência seccional esperada pelas propriedades que foram calculadas analiticamente. Os ensaios das emendas serão realizados para confirmar as disposições construtivas a adotar, no cenário de projeto, de forma a garantir que esses perfis não sejam comprometidos nas ligações. Em ambos os comprimentos dos *layouts*, 4 e 8 metros, serão avaliadas as emendas realizadas no meio do vão. Além disso, no *layout* de 8 metros, também será avaliada a colocação das emendas sobre os apoios intermédios.

3.2.1. LAYOUTS UTILIZADOS

Foram definidos 3 *layouts* em conformidade com as regras estabelecidas no Anexo A.3 do BS EN 1993-1-3 para a realização da campanha experimental. No entanto, nesta tese só serão apresentados dois deles, uma vez que o terceiro *layout* diz respeito à avaliação das disposições construtivas relativas às ligações de emenda, que não faz parte do âmbito desta dissertação.

Layout 1

Composto pela viga principal com 4200 mm de comprimento, que estará simplesmente apoiada nos extremos, com 4 metros de distância entre apoios. No centro do *layout* encontra-se o atuador, que irá distribuir a carga em 4 pontos, garantindo uma zona central onde o momento fletor atuante é máximo, de valor constante, e os esforços transversos são nulos, de forma a evitar interação entre essas duas cargas.

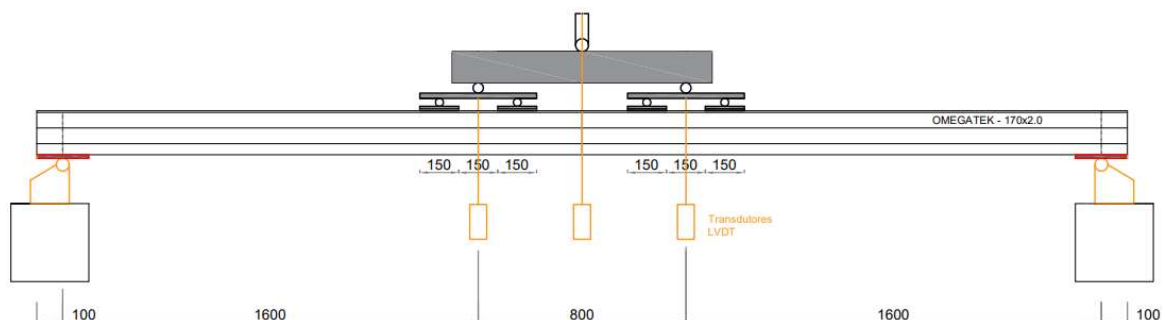
Para garantir a transmissão completa do deslocamento imposto pelo atuador, é colocada uma viga em formato de "I" ou "H", dependendo do perfil, entre o atuador e as placas metálicas com dimensões de 46 cm x 10 cm x 2 cm. Estas placas transmitem, o deslocamento ao perfil por intermédio de 4 roletes e 4 chapas sob uma banda de neoprene. Esta banda é colocada entre perfil e chapa para evitar o deslizamento devido à falta de atrito.

O atuador regista simultaneamente o deslocamento imposto no perfil e a força resistente correspondente. No entanto, o ponto de maior deslocamento não será o registado pelo atuador, mas sim o deslocamento medido pelo extensómetro no centro do perfil. Por isso, são colocados 3 extensómetros (LVDTs) para fazer essa leitura: dois deles ficam abaixo do ponto de aplicação da carga, onde devem apresentar resultados semelhantes ao do atuador, e um localizado a meio vão, para medir a deformação máxima (Figura 3.2 a).

Estes ensaios foram usados principalmente para testar as resistências seccionais dos perfis e permitir posteriormente a validação dos módulos de flexão dos perfis.

Na avaliação do módulo de flexão positivo ($W_{eff} +$), a carga é imposta no sentido descendente, como ilustrado na Figura 3.2 b). Para avaliar o módulo de flexão negativo ($W_{eff} -$), é necessário simular a aplicação da carga no sentido ascendente, pelo que os perfis são testados na posição invertida. Nestes casos, os perfis tornam-se altamente instáveis, sendo necessário realizar o travamento lateral e pontuais para evitar instabilidades (Figura 3.2 c).

a)



b)



c)



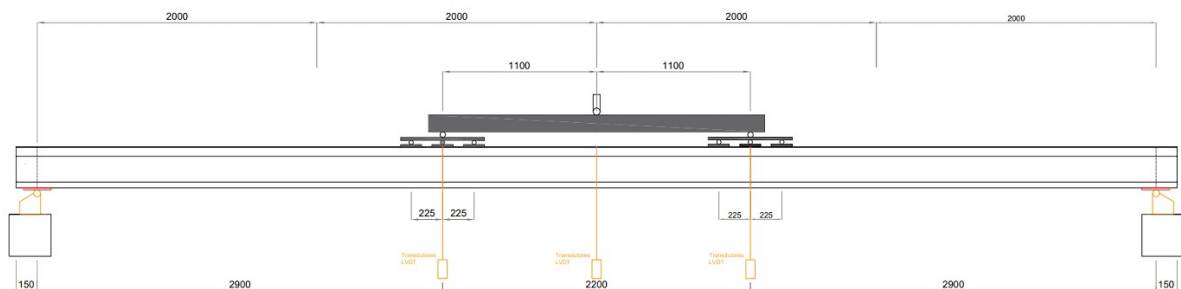
Figura 3.2 – Ensaio das Vigas no *Layout* de 4 metros: a) Desenho simplificado do *layout*, b) Fotografia durante o ensaio de aplicação de carga descendente no OMEGATEK 70, c) Fotografia da configuração dos travamentos para utilização na carga ascendente do OMEGATEK 170

Layout 2

Este segue a mesma lógica do anterior, mas terá 8 metros de comprimento entre apoios. O atuador estará novamente localizado a meio vão, onde irá distribuir a carga em 6 pontos. Com esta configuração não é possível que a distribuição dos carregamentos pelas placas seja uniforme visto que a placa que está imediatamente abaixo do rolete estará mais carregada. No entanto, o pressuposto geral continua presente, sendo esta uma zona central onde só está presente flexão simples.

Este *layout* é principalmente utilizado na verificação do módulo de flexão positivo (W_{eff+}) do perfil OMEGATEK 300 (Figura 3.3 a e b), bem como as disposições construtivas das emendas de continuidade (Figura 3.3 c)

a)



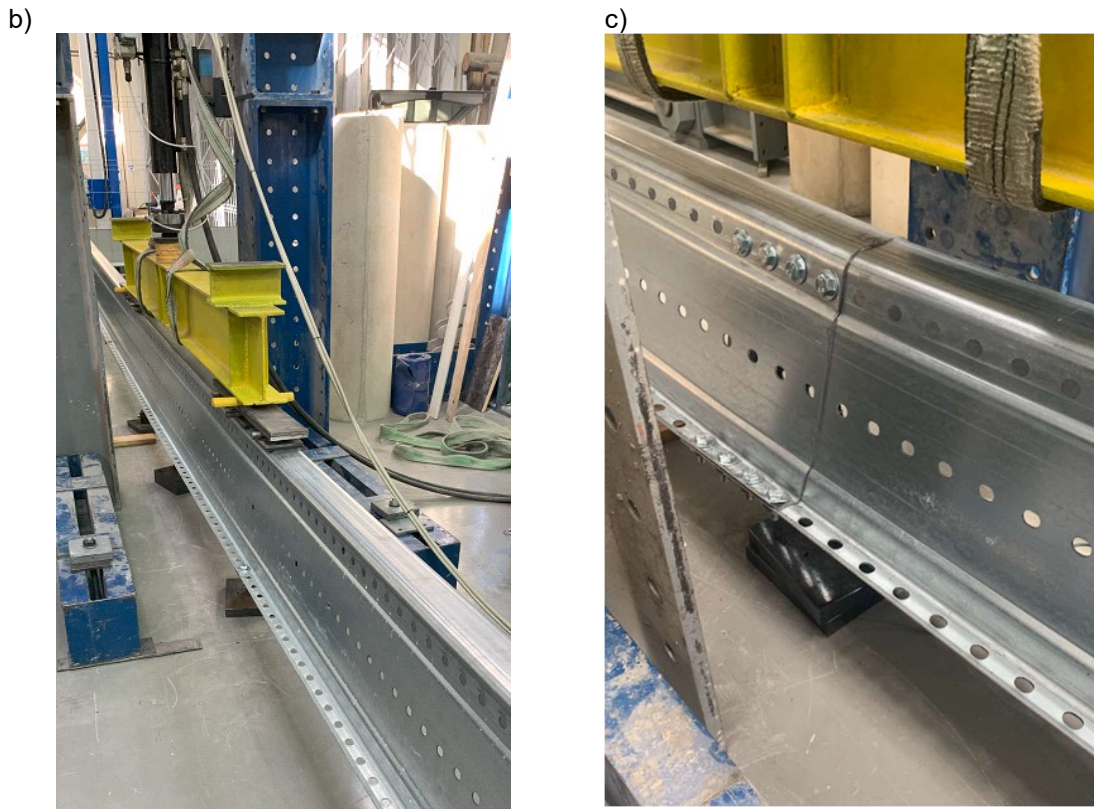


Figura 3.3 – Ensaio das Vigas no *Layout* de 8 metros: a) Desenho simplificado do *layout*, b) Fotografia durante o ensaio de aplicação de carga descendente no OMEGATEK 300, c) Fotografia no ensaio da emenda de continuidade.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Como parte da avaliação dos perfis e com o objetivo de garantir ao fabricante que o material que está a comprar e utilizar nos seus produtos corresponde ao comercializado, foram retiradas 3 amostras por perfil do banzo superior dos três perfis (70 x 1.5, 170 x 2.0 e 300 x 2.0). Estas amostras são então testadas para obter as propriedades relevantes para sua caracterização, as quais estão resumidas no Quadro 3.3. No entanto, não é fornecida uma curva Tensão-Deformação, que seria útil para a modelação do material.

Estes perfis deveriam de ter uma tensão de cedência de 350 MPa na chapa inicial, antes de ser moldada. No entanto, como mencionado anteriormente, o processo de fabrico provoca alterações nessa tensão e os perfis apresentam valores inferiores e superiores.

Quadro 3.3 – Valores Médios do Material Testado

Valores médios	Tensão de cedência, F_y (MPa)	Tensão última, F_u (MPa)	Extensão máxima, ϵ (%)
OMEGATEK 70 x 1.5	340	455	27.5
OMEGATEK 170 x 2.0	330	453	31.6
OMEGATEK 300 x 2.5	374	476	29.0

3.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS SECCIONAIS

3.3.1. CARGA DESCENDENTE

Passando agora aos resultados obtidos durante os ensaios que foram previamente mencionados.

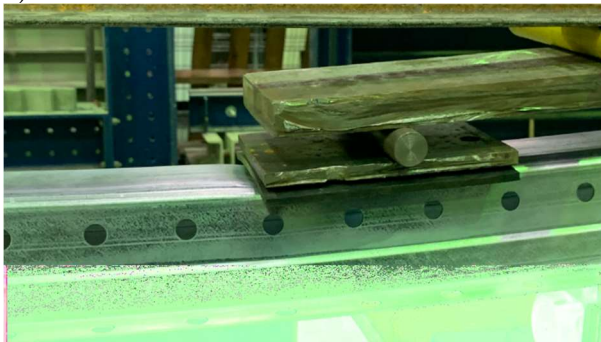
Para a carga descendente são lidas as forças exercidas pelo atuador até o momento da rotura. Além disso, o carregamento é mantido por mais algum tempo de modo que a rotura seja visível e compreensível.

Os resultados estão apresentados no Quadro 3.4, juntamente com as fotografias dos modos de rotura dos 3 perfis. Todos os gráficos obtidos estarão disponíveis no Capítulo 4 para mostrar a comparação e a aproximação dos modelos numéricos.

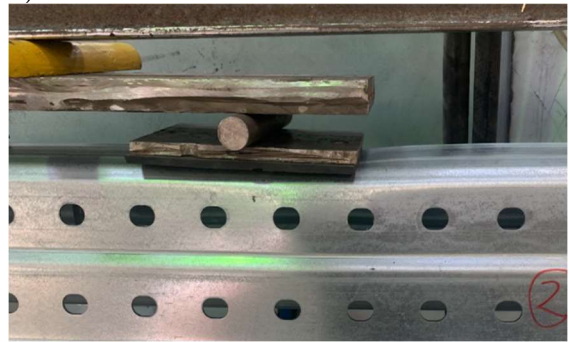
Quadro 3.4 – Carregamento e Deslocamento Registrado pelo Atuador no Instante da Rotura

Perfis ensaiados	Carga registada	Deslocamento
OMEGATEK 70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 1	3.20 kN	153.37 mm
OMEGATEK 70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 2	3.21 kN	151.52 mm
OMEGATEK 170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 1	18.13 kN	49.70 mm
OMEGATEK 170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 2	17.68 kN	51.40 mm
OMEGATEK 300 x 2.5 - Layout 2- Ensaio 1	26.83 kN	25.14 mm
OMEGATEK 300 x 2.5 - Layout 2- Ensaio 2	27.51 kN	25.99 mm

a)



b)



c)



Figura 3.4 – Modos de Rotura dos Ensaios de Carga Descendente: a) Rotura do OMEGA 70x1.5, b) Rotura do OMEGA 170x2.0, c) Rotura do OMEGA 300x2.5

3.3.2. CARGA ASCENDENTE

Estes ensaios que despoletaram o interesse no estudo da instabilidade destes perfis, uma vez que se mostram altamente instáveis mesmo para o comprimento de 4 metros. Conforme mencionado anteriormente, são necessários travamentos laterais e pontuais para alcançar a carga esperada por meio do cálculo analítico.

O Quadro 3.5 apresenta os resultados obtidos nos dois perfis que foram ensaiados, seguindo o *layout* 1, uma vez que o perfil 300 não foi possível testar para o *layout* 2, devido à impossibilidade da realização de um travamento lateral para 8m de comprimento. Também serão incluídas as fotos dos modos de rotura correspondentes aos respectivos ensaios.

Quadro 3.5 – Carregamento e Deslocamento Registrado pelo Atuador no Instante da Rotura

Perfis ensaiados	Carga registrada	Deslocamento
OMEGATEK 70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 1	2.34 kN	68.05 mm
OMEGATEK 70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 2	2.30 kN	75.80 mm
OMEGATEK 170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 1	13.02 kN	30.04 mm
OMEGATEK 170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 2	14.42 kN	35.88 mm

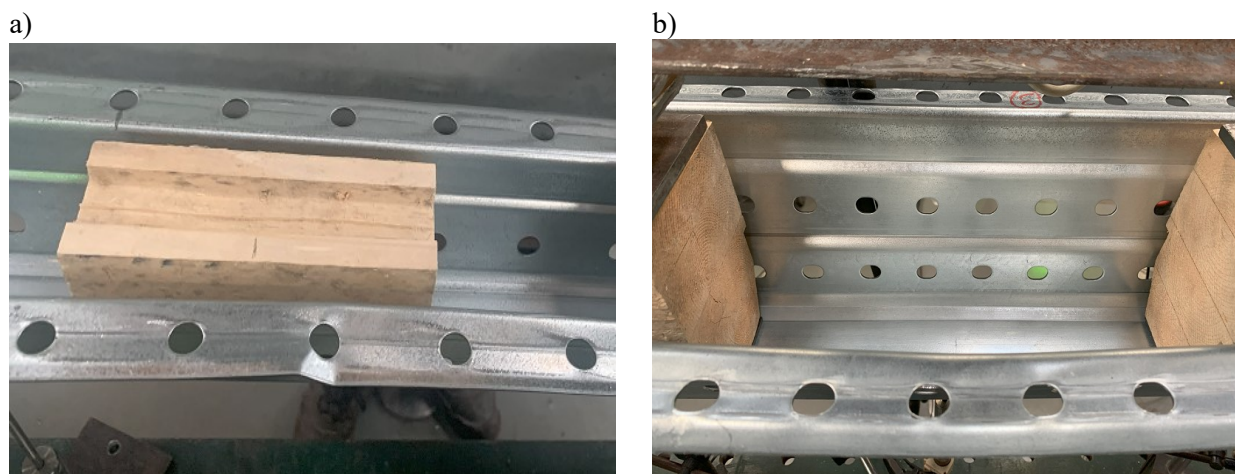


Figura 3.5 – Modos de Rotura dos Ensaios de Carga Ascendente: a) Rotura do OMEGA 70x1.5, b) Rotura do OMEGA 170x2.0

3.3.3. RESULTADOS ESPERADOS

Para realizar a validação de acordo com a norma NP EN 1993-1-1, é necessário calcular as resistências esperadas com base nas propriedades calculadas. No entanto, ao contrário das resistências brutas mencionadas anteriormente, devemos considerar as resistências efetivas, uma vez que os perfis são de classe 4, seguindo o método tradicional do Eurocódigo, levando em conta também os *Stiffeners* conforme a norma correspondente (BS EN 1993-1-3).

No entanto, como observado em contexto laboratorial, os perfis mais pequenos não apresentavam dobras no banzo inferior. Isso significa que, para a campanha experimental, essas dobras não devem ser

consideradas. No entanto, para a modelação, os valores devem ser comparáveis às resistências com a presença das abas, uma vez que o perfil comercializado as terá e serão assim modeladas.

O cálculo do momento resistente da secção é dado pela expressão (3.1).

$$M_{Rd} = \frac{W_{y,eff} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.1)$$

Em que:

$W_{y,eff}$ Módulo de flexão segundo o eixo de aplicação da carga

f_y Tensão de cedência do material

γ_{M0} Coeficiente parcial de segurança

Os resultados esperados, tanto com a contabilização das abas e sem esta estarão apresentados no Quadro 3.6 e no Quadro 3.7, respetivamente.

Quadro 3.6 – Resistências Seccionais para a Flexão Positiva Efetiva

Perfis ensaiados	$W_{eff} (+)$ (mm ³)	$M_{rd} (+)$ (kN.m)
OMEGATEK 70 x 1.5	7346	2.51
OMEGATEK 170 x 2.0	41583	13.52
OMEGATEK 300 x 2.5	112050	41.91

Quadro 3.7 – Resistências Seccionais para a Flexão Negativa Efetiva com e sem Reforço nas Abas

Perfis ensaiados	$W_{eff} (-)$ (mm ³)	$M_{rd} (-)$ (kN.m)
OMEGATEK 70 x 1.5 – com reforço nas abas	7336	2.49
OMEGATEK 170 x 2.0 – com reforço nas abas	42206	13.93
OMEGATEK 70 x 1.5 – sem reforço nas abas	6220	2.15
OMEGATEK 170 x 2.0 – sem reforço nas abas	36230	11.96

Nos *layouts* definidos, a leitura dos resultados é feita pelo atuador, no entanto, este faz a quantificação da resistência dos perfis quando sujeitos aos deslocamentos impostos por este. Assim os resultados obtidos vêm expressos como uma força (kN). As expressões 3.2 e 3.3 quantificam o momento atuante que é produzido pelo binário criado através dos pontos de aplicação de carga, para o *layout* 1 e 2, respetivamente.

$$M_{ed} = \frac{F_{ed}}{2} * 1.6 \quad (3.2)$$

$$M_{ed} = \frac{F_{ed}}{2} * 2.9 \quad (3.3)$$

Os valores de 1.6 e 2.9 representam as distâncias, em metros, entre os apoios e a resultante dos pontos de carregamento do atuador.

3.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS COM OS TESTADOS

O Quadro 3.8 pretende demonstrar a proximidade que é observada entre os valores analíticos e os reais dos perfis. O momento calculado anteriormente

De forma geral, as cargas obtidas apresentam grandes semelhanças, como seria de esperar, tendo sempre um valor ligeiramente superior nos ensaios dos 70 x 1.5 e no 170 x 2.0. Tal seria esperado, uma vez que o material utilizado não é necessariamente uniforme, podendo haver áreas onde ele apresenta um desempenho melhor do que o testado. Além disso, uma razão para isto reside no facto de que no cálculo analítico é assumido que o material não consegue ultrapassar a tensão de cedência, o que nem sempre reflete a realidade. Pode ocorrer uma ligeira plastificação, mesmo que não seja substancial ou contabilizada.

No perfil 300x2.5, não é observada uma variação positiva, pois os valores registados são inferiores aos valores analíticos. No entanto, devido à alta variabilidade na largura dos perfis que podem ter sofrido durante o transporte e armazenamento, especialmente caracterizada pelo aumento da largura desses perfis, considera-se que essa diferença não é substancial.

Quadro 3.8 – Comparação entre os Resultados Analíticos e os Valores Experimentais da Carga Descendente

Perfis OMEGATEK ensaiados	M_{rd}(+) kN.m	Carga expectável (kN)	Carga registada (kN)	Diferença
<i>70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 1</i>	<i>2.50</i>	<i>3.12</i>	<i>3.20 kN</i>	<i>+0.08</i>
<i>70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 2</i>			<i>3.21 kN</i>	<i>+0.09</i>
<i>170 x 2.0 - Layout 1- Ensaio 1</i>	<i>13.72</i>	<i>17.15</i>	<i>18.13 kN</i>	<i>+0.98</i>
<i>170 x 2.0 - Layout 1- Ensaio 2</i>			<i>17.68 kN</i>	<i>+0.53</i>
<i>300 x 2.5 - Layout 2- Ensaio 1</i>	<i>41.91</i>	<i>28.90</i>	<i>26.83 kN</i>	<i>-2.09</i>
<i>300 x 2.5 - Layout 2- Ensaio 2</i>			<i>27.51 kN</i>	<i>-1.39</i>

Quando os perfis são invertidos devido às imperfeições já mencionadas, é de esperar que variações negativas, uma vez que o comportamento das abas imperfeitas não pode ser completamente caracterizado.

O Quadro 3.9 demonstra as comparações entre o analítico e o esperado, e, como seria de esperar, existem diferenças nos resultados. No entanto, essas diferenças são de baixa magnitude e ainda assim captam bem a caracterização do perfil.

Quadro 3.9 – Comparação entre os Resultados Analíticos e os Valores Experimentais da Carga Ascendente

Perfis OMEGATEK ensaiados	$M_{rd}(-)$ kN.m	Carga expectável (kN)	Carga registada (kN)	Diferença
<i>70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 1</i>	2.15	2.68	2.34	-0.34
<i>70 x 1.5 - Layout 1- Ensaio 2</i>			2.30	-0.38
<i>170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 1</i>	11.96	14.94	13.02	-1.92
<i>170 x 2.0- Layout 1- Ensaio 2</i>			14.42	0.07

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A campanha experimental teve outros ensaios que foram realizados, no entanto não foram alvos da modelação e, por isso, não serão aqui descritos.

Com os resultados obtidos na campanha experimental ficam validadas as caracterizações feitas às propriedades brutas e efetivas dos perfis, não só os testados, mas os restantes da família OMEGATEK. As resistências seccionais destes perfis andam, quando sujeitos ao carregamento descendente testando a flexão positiva, com uma erro percentual na ordem dos $[-7.2\%, +5.6\%]$ não sendo assim uma variação muito significativa e mesmo em alguns casos ter se obtido valores de resistência superiores.

Para a flexão negativa, devido às imperfeições geométricas das abas notadas nos perfis, a comparação direta deixa de ser tão possível o que poderia conduzir a variações maiores, no entanto os resultados andam com uma baixa variabilidade na mesma $[-14.17\%; +0.46\%]$.

O importante é, no entanto, salientar que as normas europeias BS EN 1993-1-3 (2006) são capazes de caracterizar estes perfis aplicando as metodologias convencionais.

4

MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS PERFIS TESTADOS

4.1. INTRODUÇÃO AO ABAQUS

Os primeiros passos no ABAQUS consistiram na aprendizagem da sequência lógica de modelação, na qual o próprio *software* ajuda por intermédio da sua interface. Essa sequência compreende: Geometria e Partes → Propriedades dos Materiais → Montagem do *Layout* → Etapa (Tipo de Análise) → Interação entre as Partes → Cargas aplicadas e Condições de Contorno → Definição da Malha e, por fim, → A execução do modelo.

Os primeiros modelos criados foram bastante simplificados, compostos por uma barra metálica com secção RHS 150 x 25 x 1.0, encastrada numa das extremidades. O objetivo foi a avaliação das deformações elásticas da peça, para comparação com os cálculos analíticos. Com o refinamento da malha, obtiveram-se resultados com variações muito baixas.

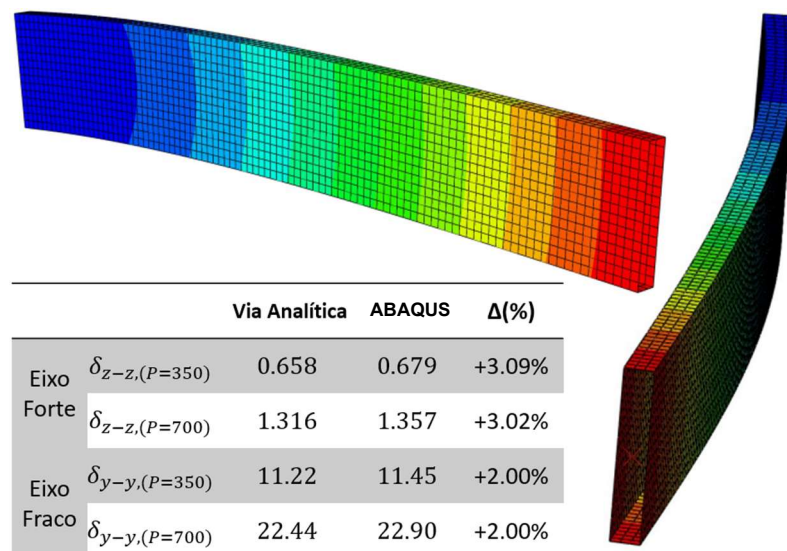


Figura 4.1 – Comparações dos Resultados obtidos do ABAQUS e Cálculo Analítico

A seguir realizou-se o cálculo das capacidades resistentes. Observou-se que este perfil, inicialmente classificado como as Classes 4 ou 3, se sofrer um ligeiro aumento na espessura da secção, tornando-a

menos esbelta, exibe uma leve plastificação após a cedência e atinge um valor de momento superior ao momento de cedência (Figura 4.2).

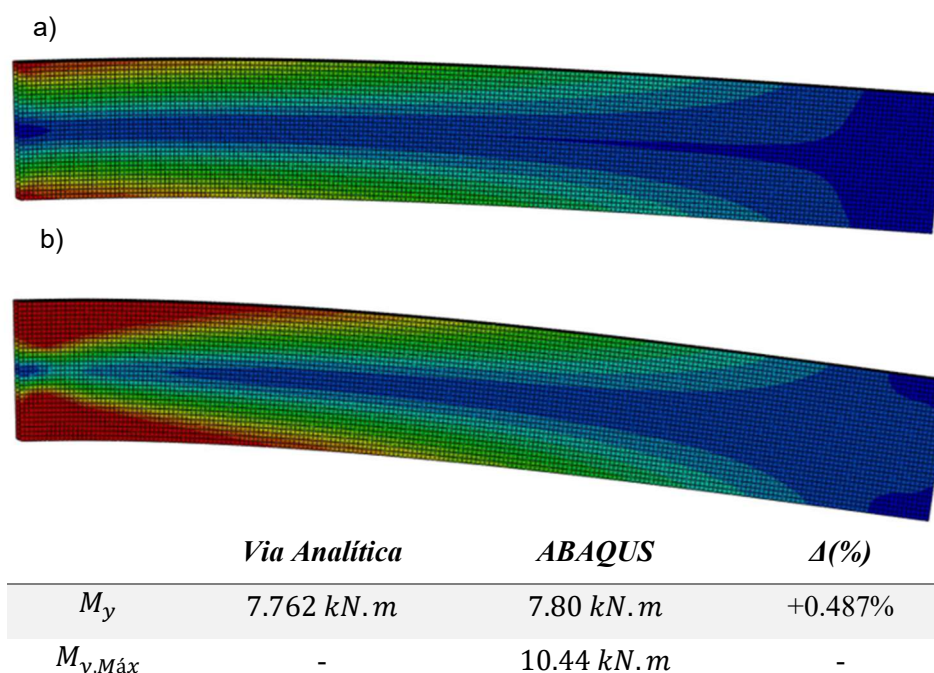


Figura 4.2 – Distribuição de Tensões e Quadro com Comparações: a) Momento Elástico, b) Momento Plástico Máximo

Após esta etapa, são introduzidas as imperfeições, de acordo com expressões propostas na literatura e conforme o indicado nas normas. O EC3 recomenda a consideração, em simultâneo, das imperfeições e do efeito das tensões residuais para a avaliação da resistência dos elementos. Como não são conhecidos os valores do efeito das tensões residuais, este fenómeno foi compensado por um ligeiro incremento no valor da imperfeição.

Para exemplificar o procedimento, é usado o perfil de secção RHS 40 x 25 x 2.0, seguindo as mesmas condições de apoio e carga do caso anterior, ou seja, com uma carga aplicada na extremidade. É feito o cálculo do valor do Momento Crítico utilizando as fórmulas propostas por Ayrton-Perry e, em seguida, a respetiva redução (χ_{LT}) com base na Curva de Encurvadura "a". Os valores finais da resistência, obtidos de acordo com o EC3 e através do ABAQUS são apresentados na Figura 4.3.

	<i>Expressão Analítica</i>	<i>ABAQUS</i>	$\Delta(\%)$
$L/500$	56.9 kN	56.3 kN	-1.05%
$L/530$	-	56.9 kN	0.0%
$L/750$	-	60.0 kN	+5.16%

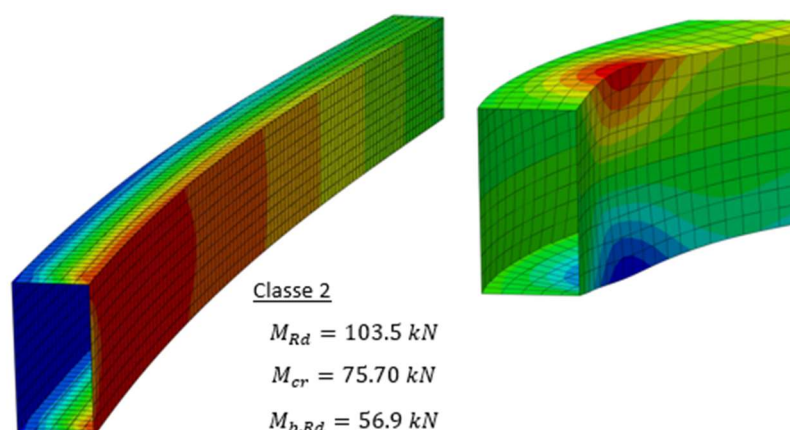


Figura 4.3 – Deformada e Quadro com Comparações: a) Encurvadura Lateral, b) Zona de Ruptura

4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS PERFIS TESTADOS NO LABORATÓRIO

4.2.1. MODELAÇÃO DAS COMPONENTES DOS ENSAIOS

Com o objetivo de simular o *layout* do laboratório, o primeiro passo será identificar as componentes constituintes do mesmo. As secções do perfil em Ómega são modeladas em 2D usando um modelo de casca, seguindo a linha média da geometria fornecida pelo fabricante, e ignorando as imperfeições que foram observadas nos perfis testados no laboratório.

Desta forma, será possível modelar a espessura desejada, mesmo que esta não seja a real. O mesmo modelo pode ser utilizado com espessuras diferentes para simular qualquer situação, caso seja necessário, como por exemplo, propor uma alteração nos perfis devido a altas instabilidades locais.

Para criar o perfil Ómega, foi realizada uma *extrusion* usando o modelo 2D previamente desenvolvido (Figura 4.4 a). Esta extrusão adiciona profundidade ao perfil, tornando-o do mesmo comprimento da viga a ser ensaiada. No caso de uma viga de 4 metros, o layout tem um comprimento de 4200 milímetros, e no caso de uma viga de 8 metros, tem o comprimento de 8300 milímetros. As dimensões de 200 e 300 mm dizem respeito às dimensões necessárias para simular os apoios nos testes laboratoriais.

A modelação do perfil inclui a furação circular nos perfis menores e a furação ovalizada nos perfis maiores, conforme as informações do fabricante e verificados durante a campanha experimental. Isto permitirá simular a geometria real do perfil com precisão, pois a presença desses furos pode ter impacto no modo de ruptura, uma vez que representam uma área onde a secção bruta é naturalmente inferior à do perfil completo.

Conforme descrito no capítulo anterior, a carga é distribuída pelo perfil por intermédio de chapas metálicas. No modelo numérico, esta chapa é considerada como uma placa sólida, seguindo aproximadamente as dimensões reais de 150 milímetros de comprimento, 50 milímetros de largura e 10 milímetros de espessura (Figura 4.4 b). A modelação desta é necessário pois existe interação entre a chapa e o perfil que é visível nos ensaios laboratoriais.

No caso dos perfis com altura 300 mm, foi modelado um cilindro com diâmetro de 40 milímetros e comprimento de 300 milímetros, para a simulação dos apoios (Figura 4.4 c). É importante salientar que as dimensões do cilindro modelado numericamente não coincidem com as dimensões dos cilindros usados no laboratório, pois a função destes elementos é apenas a de realizar contacto e suporte. Este cilindro foi incluído no modelo numérico para captar a deformação local observada na região do apoio

aquando dos ensaios laboratoriais. Verificou-se que a não inclusão destes elementos nos apoios afetava significativamente os resultados numéricos.

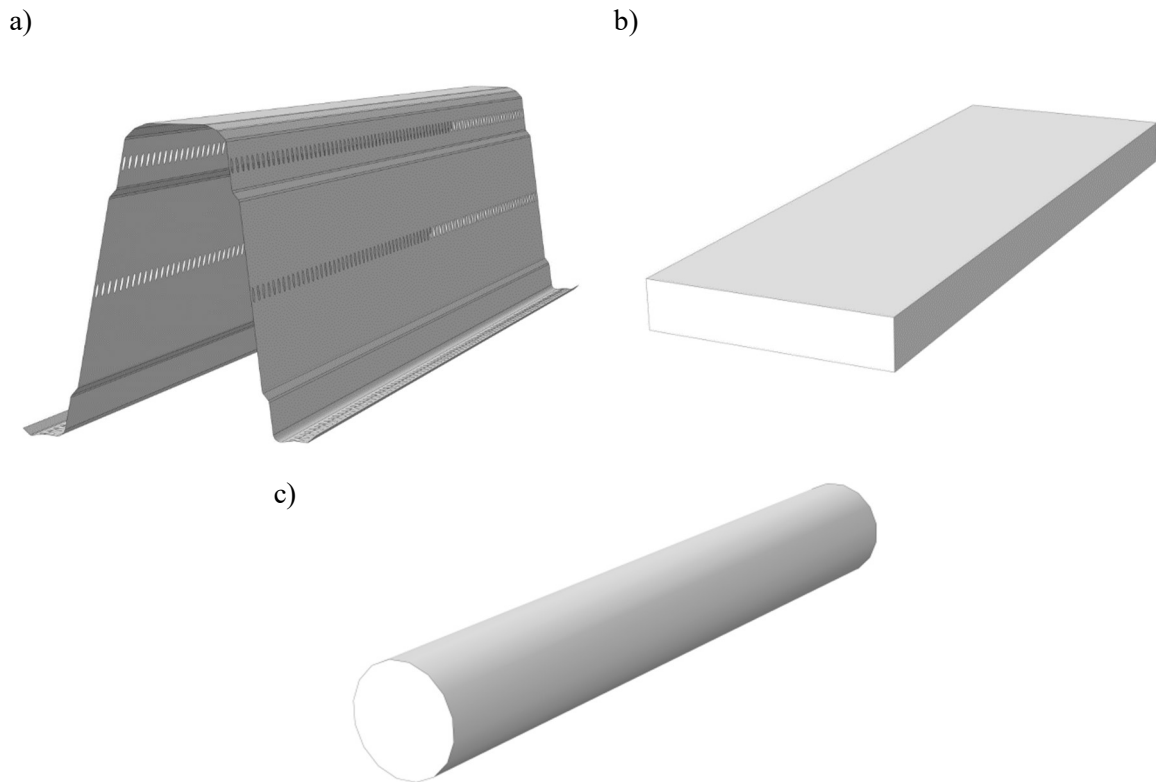


Figura 4.4 – Partes usados nos modelos: a) Perfil OMEGATEK 300x2.5, b) Chapa de contacto com o perfil, c) Cilindro de Apoio

4.2.2. MODELAÇÃO DOS MATERIAIS

O ABAQUS tem a opção da escolha de materiais, uma funcionalidade que pode ser considerada vantajosa ou desvantajosa, dependendo do ponto de vista. A principal desvantagem é que, por não possuir uma base de dados incorporada de materiais, é necessária a caracterização de materiais comuns, como barras de aço (A400, A500, ente outros) ou até mesmo betão, cujo comportamento é um pouco mais complexo. No entanto, caso se deseje utilizar materiais menos convencionais, como é o caso dos aços enformados a frio com curvas tensão-deformação diferentes, esta funcionalidade apresenta-se como uma vantagem, pois é possível definir a parte plástica específica de qualquer material.

O *software* não reconhece as unidades introduzidas pelo utilizador, apenas utiliza os valores indicados, por isso é importante manter a coerência entre os parâmetros fornecidos e respetivas unidades. Foi utilizado o Sistema Internacional de Unidades (S.I.) em que a unidade de comprimento utilizada foi milímetro, devido às baixas espessuras dos perfis.

Na caracterização do material, foram utilizados os seguintes parâmetros: toneladas/mm² na densidade, o Módulo de Elasticidade (E), o Coeficiente de Poisson (ν) e a definição da zona plástica da curva Tensão-Deformação.

No caso das chapas metálicas foi considerado um material rígido, impedindo qualquer deformação no ponto de contato com o perfil. Desta forma, sem deformações, não ocorre mobilização da resistência das chapas e avaliação da resistência do perfil não é afetada.

Para a caracterização da parte plástica dos perfis enformados a frio, são utilizadas as curvas tensão-deformação baseadas nas equações definidas por Ramberg-Osgood, definidas especificamente para este tipo de material e processo de fabrico.

$$n = \log (\sigma_u / \sigma_y) / \log (\varepsilon_2 / 0.002) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \sigma / E + 0.002 \times (\sigma / \sigma_y)^{1/n} \quad (4.2)$$

Em que:

σ_u	Tensão última
σ_y	Tensão de cedência
ε_2	Extensão máxima do material

Estas expressões permitem calcular a extensão (ε) para qualquer ponto de tensão, possibilitando o traçado de uma curva bem definida, com os pontos necessários (ver Gráfico 4.1). No caso dos valores das tensões de cedência e tensões últimas usados no modelo, eles são obtidos a partir de ensaios realizados no material. Devido à transição muito subtil da parte elástica para a plástica no modelo, é frequentemente considerado que a parte plástica começa antes da cedência, o que permite capturar a curva conforme pretendido.

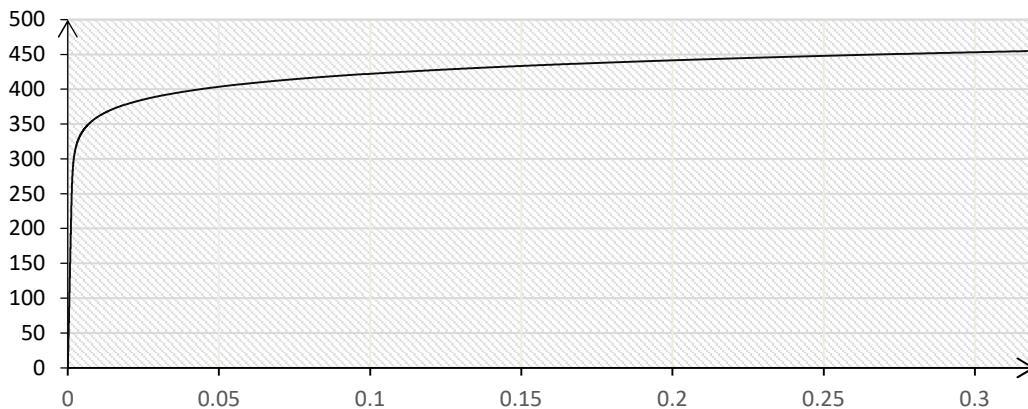


Gráfico 4.1 – Curva Tensão-Deformação Tipo

4.2.3. MODELAÇÃO DOS *LAYOUTS* DE ENSAIO

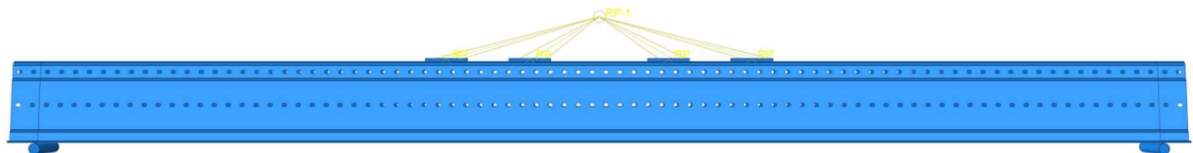
Este é o processo que corresponde à modelação do *Layout* de modo a simular o ensaio realizado no laboratório. No *layout* de 4 metros, são utilizadas quatro placas com o material rígido, a colocação destas placas necessita de ter especial atenção pois está se a realizar contacto entre um modelo 3D e um modelo em casca na qual a espessura não é representada visualmente, para ter em conta isso é necessário que

haja um espaçamento entre a placa e o perfil igual à espessura da casca. No entanto é ainda necessário para que o ABAQUS assuma que estas estão em contacto um sobreposição de 0.05 mm. Caso contrário, o primeiro passo teria um custo computacional muito elevado, pois seria necessário realizar um contato com uma distância extremamente pequena. Apesar de os 0.05 mm estarem sobrepostos com este valor tão pequeno, o software desconsidera e assume como contato.

No *layout* de 4 metros, ainda é colocado um ponto de referência no meio da viga, a uma altura acima de qualquer outra parte pertencente ao *layout*. Este ponto é onde será aplicado o deslocamento. A este ponto está associada a restrição de *coupling-structural-uniform* com as placas (chapas metálicas). Ou seja, fica estabelecida a conexão das placas ao ponto de referência, fazendo com que este ponto e as placas tenham o mesmo deslocamento. É importante referir que não se deve bloquear a rotação das placas para permitir que estas acompanhem as deformações translacionais e rotacionais do perfil (Figura 4.5 a).

No *layout* de 8 metros, temos dois pontos de referência para a distribuição da carga. Estes, por sua vez, estão ligados às placas que simulam as três chapas metálicas que transmitem a carga ao perfil. Desta forma é possível simular o fenómeno observado no laboratório, isto é, a chapa metálica mais próxima dos pontos de distribuição da carga é a mais solicitada. Assim sendo, desde que o modelo numérico do *layout* respeite as distâncias reais entre os roletes usados sobre as chapas metálicas, a modelação da distribuição de carga é feita de forma realista (Figura 4.5 b e c).

a)



b)



c)

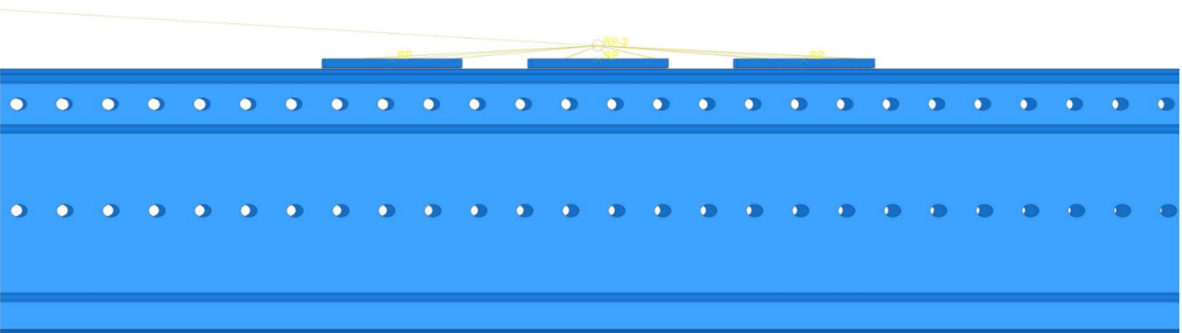


Figura 4.5 – *Layouts* em Modelo Numéricos: a) *Layout* 1, b) *Layout* 2, c) Zona de carregamento do *Layout* 2

4.2.4. MODELAÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA

Nos perfis pequenos e médios (70 x 1.5 e x 2.0), os pontos para simular o contato que existe entre o cilindro e o apoios são quatro. No entanto, no perfil OMEGATEK 300 x 2.5, devido a deformações locais na zona de apoio associadas às cargas mais elevadas que o perfil pode estar sujeito, é necessário modelar o cilindro do apoio, para que essas deformações sejam visíveis e o resultado seja realista.

Os quatro pontos de apoio dos perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0 são fixos nas direções X e Y (Figura 4.6 a). No caso dos perfis 300 x 2.5, é necessário considerar que o cilindro está bloqueado nas três direções (Figura 4.6 b), o que corresponde a bloquear os 6 graus de liberdade do apoio.

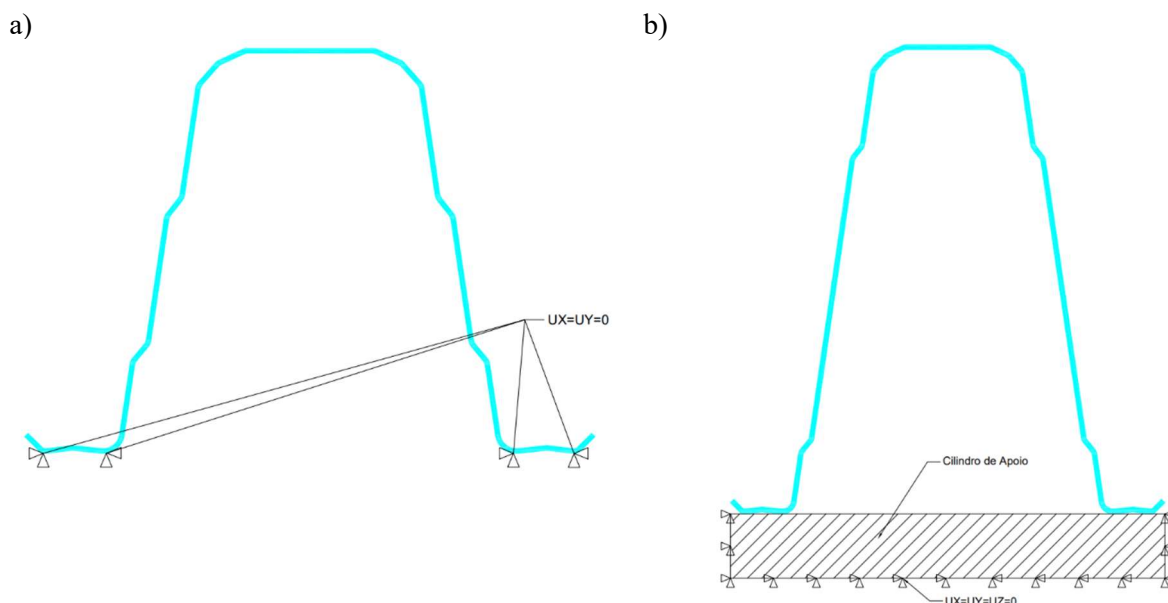


Figura 4.6 – Condições de Apoio: a) OMEGATEK 70x1.5 e 170x2.0, b) OMEGATEK 300x2.5 com Cilindro

4.2.5. MODELAÇÃO DE OUTRAS VARIÁVEIS

O contacto é definido através do comando "Contacto Geral", indicando ao programa que qualquer peça com sobreposição estabelecerá contacto. Esta opção/comando provoca um pequeno aumento no tempo de processamento, mas garante a simulação numérica do contacto entre perfil e chapas metálicas, mesmo com o aparecimento de deformações locais. A variável necessária para esta simulação ser realista é o coeficiente de atrito associado ao atrito entre a borracha e aço, cujo valor é de 0.35, evitando a modelação da camada de teflon colocada entre as chapas metálicas e o perfil.

A malha é definida com o mesmo tamanho para todos os perfis, uma vez que as áreas com furos e pequenas dobras são especialmente propensas a ter resultados imprecisos caso a malha não esteja bem refinada. Por esta razão, optou-se pela utilização de uma malha quadrada sempre que possível, com dimensões de 5 x 5 mm². O tipo de elemento usado foi linear com integração reduzida, podendo ser alterado para elementos quadráticos, em casos onde é necessário obter resultados mais precisos.

Para que os resultados sejam fornecidos na forma de gráfico, é necessário solicitar ao programa que gere um conjunto de pontos em função do número de passos, com os parâmetros de deslocamento localizados exatamente abaixo do ponto de aplicação da carga. Isso permite obter os valores correspondentes aos registados pelo LVDT instalado nesta localização. Além disso, como está a ser aplicado um deslocamento, é pedido que o programa faça a leitura da resistência imposta pela viga ao deslocamento.

O tipo de análise realizada é uma análise estática geral, o que significa que o parâmetro de deslocamento aumentará à medida que o número de passos pré-estabelecidos é alcançado. Normalmente, são realizadas análises com cerca de 100-200 passos para que os valores obtidos permitam uma boa representação da curva Força-Deslocamento.

4.3. CALIBRAÇÃO E RESULTADOS

4.3.1. CARREGAMENTO DESCENDENTE

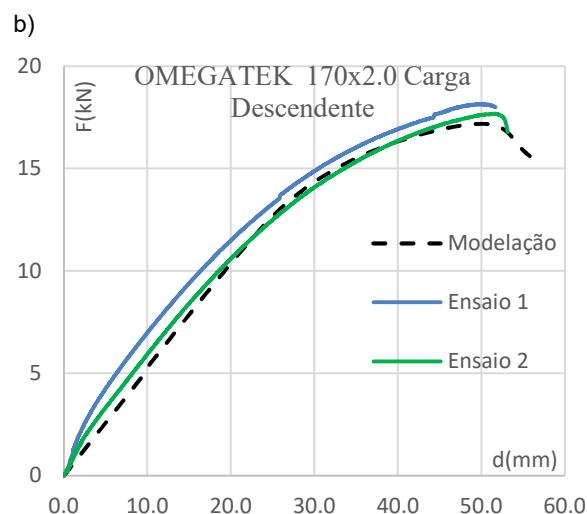
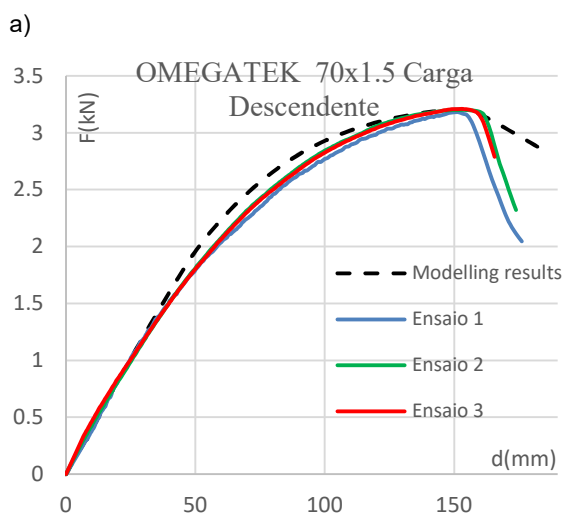
Os modelos foram calibrados até cumprirem três parâmetros considerados fundamentais para garantir resultados confiáveis. Primeiro, o material deve possuir as propriedades que foram testadas em laboratório, permitindo pequenos ajustes, uma vez que dificilmente o material será completamente uniforme. Segundo, o gráfico e os valores obtidos devem ser consistentes tanto com a carga máxima como com os deslocamentos impostos, mantendo-os consistentes. Por fim, o modo de rotura dos perfis deve ser semelhante ao real, tendo em consideração a simetria da peça e o modo de rotura que, em alguns casos, ocorre no lado oposto.

Os ensaios com o *layout* de 4 metros e aplicação de carga descendente foram os mais relevantes para a calibração do material, uma vez que neste *layout* os perfis não sofrem reduções causadas pelo efeito da encurvadura. O Quadro 4.1 ilustra a variação dos resultados entre os modelos numéricos, os ensaios realizados em laboratório e ainda a avaliação analítica. Os valores na linha de variações representam a diferença entre os valores obtidos em laboratório e os valores dos modelos numéricos.

Os Gráficos 4.2 mostram as comparações das curvas Força-Deslocamento obtidas em ambiente laboratorial com os valores dos modelos numéricos. As Figuras 4.7-a) e 4.7-b) apresentam os modos de rotura associados a cada um dos ensaios.

Quadro 4.1 – Comparação Cargas Máximas (Descendente)

	70 x 1.5		170 x 2.0		300 x 2.5	
	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	d(mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	d(mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	d(mm)
Laboratório	3.198	152.64	17.92	50.43	46.25	25.67
Analítico	3.12	-	17.15	-	47.15	-
ABAQUS	3.206	153.41	17.19	49.7	46.6	25.22
Variação	+ 0.008	+ 0.77	- 0.73	- 0.73	+ 0.35	+ 0.45



c)

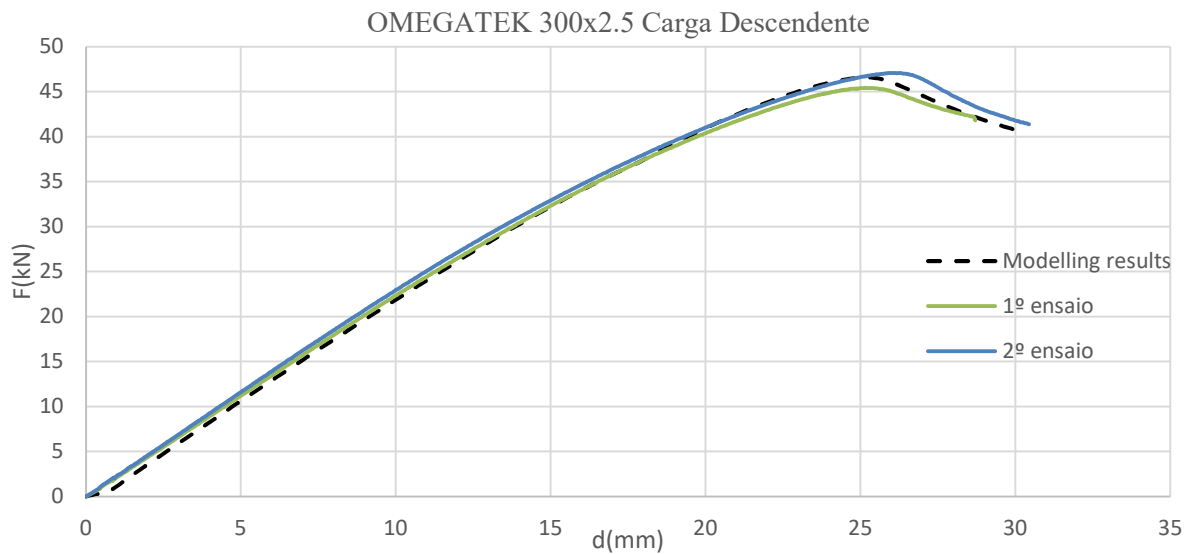
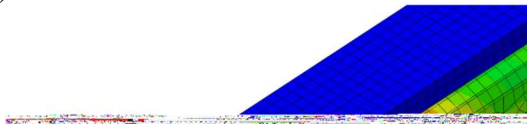


Gráfico 4.2 – Comparação dos Resultados Descendente: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.0, c) OMEGATEK 300x2.5

Devido à semelhança entre as curvas obtidas, é considerado que o modelo é capaz de captar de forma precisa não apenas os valores finais das cargas e deslocamentos, mas também a rigidez da peça e a perda gradual que geralmente ocorre antes da rotura.

a)



b)

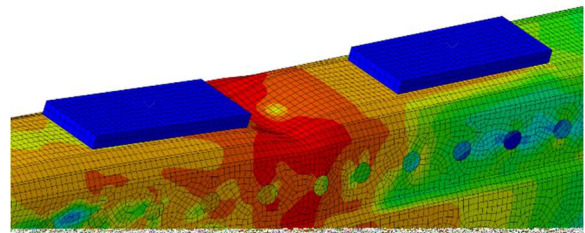


Figura 4.7 – Modos de rotura dos modelos: a) Rotura dos Perfis 70x1.5 e 170x2.0, b) Rotura do Perfil 300x2.5

Os padrões de rotura também são idênticos aos observados em laboratório, conforme demonstrado no capítulo anterior. Nos perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0, a rotura ocorre abaixo da chapa na zona central, da região de maior momento fletor. No perfil 300 x 2.5, a rotura ocorre na região entre as chapas, mas não na área de maior momento fletor. Observou-se um ligeiro bambeamento da alma nesse perfil, o que indica uma possível perda de resistência. Portanto, a região onde a combinação entre o esforço transversal e o momento fletor atua é identificada como a zona de rotura.

4.3.2. CARREGAMENTO ASCENDENTE

Os perfis, na posição invertida, também foram testados em laboratório e a comparação destes resultados com os resultados numéricos surge como uma validação adicional da modelação numérica realizada. Por outras palavras, os resultados obtidos com os modelos numéricos dos perfis na posição invertida têm de ser semelhante aos resultados obtidos experimentalmente pois o processo de calibração é o mesmo (ver Gráficos 4.3).

Os resultados experimentais utilizados para esta comparação são os obtidos nos ensaios dos perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0, porque o perfil 300 x 2.5 apresenta um valor de esbelteza ligeiramente superior a 0.20 provocando uma pequena redução ao resultado esperado. No entanto esta redução valida o preconizado no BS EN 1993-1-3:2006 que diz que, para enformados a frio o uso da curva de encurvadura “b” é adequado para o cálculo da redução da resistência real do perfil.

Quadro 4.2 – Comparação Cargas Máximas (Descendente)

	70x1.5		170x2.0	
	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	d(mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	d(mm)
Laboratório	2.32	71.9	13.75	35.76
Analítico	2.68	-	14.94	-
ABAQUS	2.7	84.8	14.23	33.7
Variação	+ 0.36	+ 12.9	+ 0.48	- 2.06

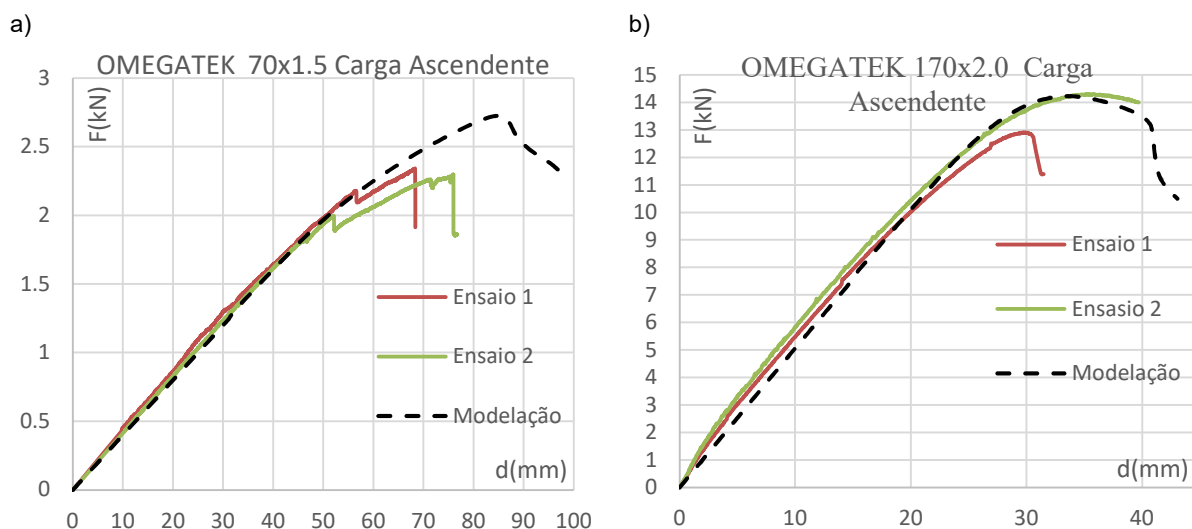


Gráfico 4.3 – Comparação dos Resultados Ascendente: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.0

No caso específico do perfil 70 x 1.5, foi visível a presença de imperfeições nas abas inferiores, nomeadamente a ausência de *stiffeners* numa das abas e comprimentos inferiores aos inicialmente fornecidos pelo fabricante para o cálculo das propriedades efetivas. Apesar de terem sido obtidos valores

na mesma ordem de grandeza, é possível notar diferenças nos gráficos e na variação em relação ao expectável. No entanto, posteriormente foi confirmado com o fabricante que esse perfil foi fabricado usando uma máquina nova e passou por um processo de recalibração após a produção destes perfis. Desta forma, foi assumido que as diferenças observadas são causadas por essas imperfeições, uma vez que elas estão localizadas no lado da zona comprimida do perfil e, por isso, sujeito a instabilidade. Esta conclusão é confirmada com os resultados de uma análise analítica considerando a geometria real do perfil.

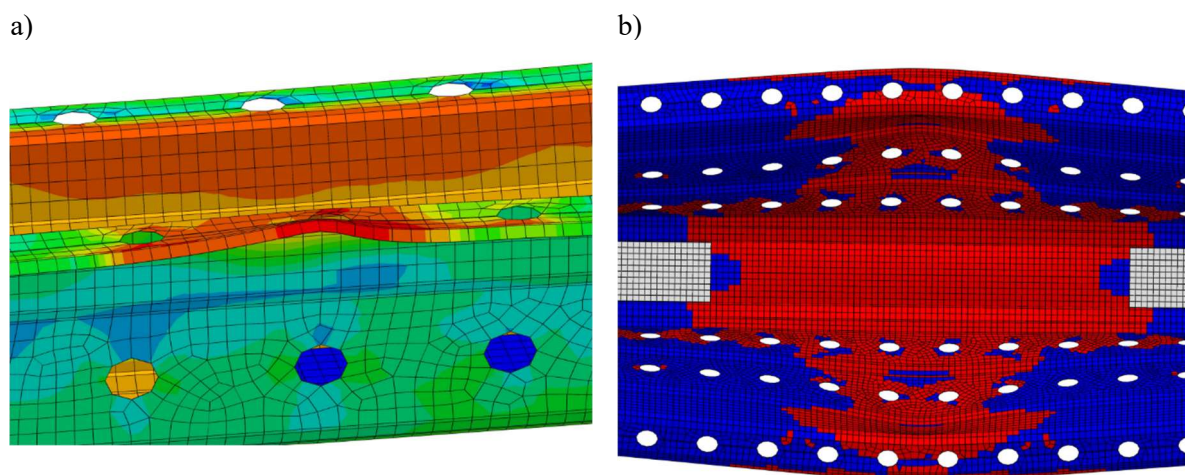


Figura 4.8 – Modos de Ruptura dos Modelos Invertidos: a) Ruptura do Perfil 70x1.5, b) Ruptura do Perfil 170x2.0

As rupturas (ver Figura 4.8) são semelhantes às observadas em laboratório. No perfil 70 x 1.5, há uma dobra pronunciada no banzo superior, o que indica a ruptura localizada na região de carregamento. No perfil 170 x 2.0, ocorre uma abertura do perfil na zona de momentos máximos, característica de um modo de ruptura distorcional, o que sugere que esse perfil está próximo ou já atingiu sua esbelteza limite, resultando numa possível redução de resistência.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esses resultados, a calibração dos modelos está terminada e é possível concluir que os modelos numéricos desenvolvidos captam com precisão os ensaios realizados. Também se conclui que o tamanho mínimo de malha utilizado é adequado e pode ser utilizado em análises futuras. Além disso, obtemos a confirmação das propriedades do material, o que pode ser útil na calibração de uma curva de encurvadura específica.

A comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos por cálculo analítico possibilitou a validação de que a curva "b" representa bem a redução da resistência real no caso de 4 metros. Portanto, o próximo passo é a obtenção dos valores do Momento Crítico de Encurvadura Lateral-Torcional, para o cálculo da esbelteza normalizada e aplicação da curva "b" para avaliar a redução da resistência real do perfil. No entanto, não se coloca de parte a necessidade da derivação de uma curva de encurvadura própria para otimizar o aproveitamento máximo do perfil.

5

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO
À ENCURVADURA

5.1. INSTABILIDADES DOS PERFIS

Devido aos fenómenos de instabilidade que foram observados durante a campanha experimental sempre que foi aplicada uma carga ao perfil na posição invertida, com o objetivo de simular a aplicação de carga ascendente, tornou-se relevante a questão de como quantificar os valores dos momentos críticos de encurvadura, e avaliar se a expressão analítica frequentemente utilizada para perfis convencionais em I fornece resultados satisfatórios em comparação com outros métodos de cálculo.

Este tipo de carregamento não é muito comum em estruturas convencionais, mas pode ocorrer quando, por exemplo, é considerado o efeito de sucção do vento em coberturas, levando a uma inversão do diagrama de momentos e resultando em esforços desestabilizadores no meio do vão os esforços, tornando estes fenómenos de encurvadura relevantes. Além do mais, negligencia-se o facto de que os esforços em perfis com secções em Z, C, Ω etc., são diferentes dos esforços em perfis com secções em I. Os perfis com secção em I apresentam comportamento semelhante nas diversas situações de carga, devido à sua dupla simetria.

Os perfis metálicos, quando submetidos a esforços de flexão, podem estar sujeitos a encurvaduras do tipo lateral-torcional, resultado da instabilização lateral do banzo comprimido. Para que o banzo comprimido se desloque do plano de aplicação da carga, ele terá de torcer a secção, uma vez que o banzo tracionado permanece estável. Essa instabilidade é conhecida como *Lateral-Torsional Buckling* (LTB) (ver Figura 5.1).

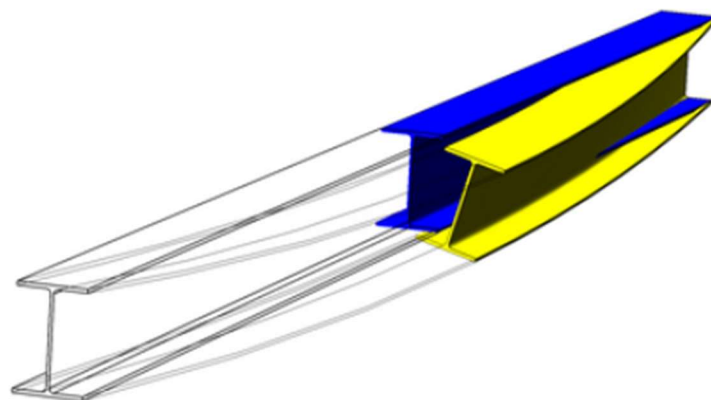


Figura 5.1 – Encurvadura Lateral Torcional num Perfil em I

Os perfis com secção OMEGA não possuem a mesma dupla simetria encontrada nos perfis com secção em I, e na maioria dos casos, a aplicação da carga ocorre segundo o eixo mais fraco (eixo y), o que impossibilita que ele saia do plano. Isso poderá vir a resultar num modo de encurvadura diferente do espetável.

Para calcular os valores críticos dessas encurvaduras, são seleccionados quatro métodos distintos: a expressão analítica publicada no *BS EN 1993-1-1:1992- Annex F*, na qual alguns dos parâmetros são corrigidos de acordo com o publicado no livro escrito por Luís Simões da Silva (2020), o LTBEAM, o GBTUL e o programa Abaqus, que tem vindo a ser utilizado.

5.2. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS MALHAS

Devido a incertezas relacionadas com o tamanho das malhas e ao nível de refinamento necessário nos *softwares* de cálculo automáticos, é realizada uma análise preliminar para identificar o refinamento ideal. O objetivo é garantir que as diferenças em relação ao valor real sejam suficientemente pequenas para que possam ser negligenciadas, assegurando assim que o resultado não depende desta variável.

5.2.1. ABAQUS E GBTUL

O Abaqus define o tamanho da malha em termos de dimensão dos elementos quadrados, uma vez que serão utilizados elementos quadrangulares. Dessa forma, quanto menor a dimensão, mais refinada será a malha. Utilizando um dos perfis com secção OMEGA estudados anteriormente, com um comprimento de 2 metros, mantendo as condições de fronteira constantes, serão aplicados dois casos de carga, conforme ilustrado na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Esquema seguido para os Casos de Aplicação de Carga

O GBTUL, por sua vez, segue uma lógica diferente no que toca à refinação da malha. Este *software* realiza a subdivisão de um comprimento fixo de 500 milímetros. Em outras palavras, quanto maior for o número de subdivisões, maior será o nível de refinamento. Neste *software*, foram utilizados os mesmos dois casos de carga, seguindo a mesma lógica.

No Gráfico 5.1, são apresentados os resultados obtidos quando este parâmetro de malha é alterado em ambos os *softwares*. No Gráfico 5.1 a), é possível observar a análise feita no Abaqus, onde a malha varia de $24 \times 24 \text{ mm}^2$ até $2 \times 2 \text{ mm}^2$. A última malha é considerada extremamente refinada. Já no Gráfico 5.1 b), o número de subdivisões varia de 3 por 500 mm até 25. Acima de 25, o programa perde a capacidade de realizar o cálculo.

É importante salientar que, nestas análises, assim como em todas as análises de Elementos Finitos (FEM), quanto mais refinada for a malha, maior será o custo computacional. Isso significa que o tempo necessário para o processamento aumentará. Portanto, esta análise procura encontrar um ponto em que o tempo seja o mais baixo possível e ao mesmo tempo que mantenha a precisão nos resultados obtidos.

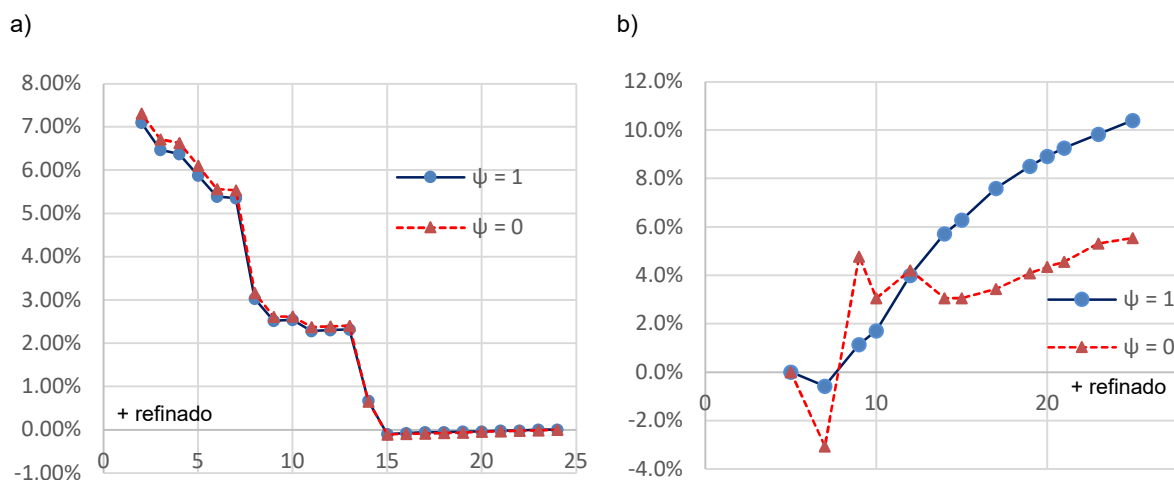


Gráfico 5.1 – Resultados das Análises de Sensibilidade: a) ABAQUS, b) GBTUL

Da análise feita no ABAQUS, podemos observar que, para os perfis analisados, que ele funciona em níveis, com grandes aumentos em malhas específicas. No entanto, seria adequado escolher um tamanho de malha no último nível, que varia entre 7 e 2. Nesse caso, escolhe-se o valor 5, pois é um valor intermédio que apresenta uma variação máxima de 1% - 2% da malha mais refinada, o que é considerado aceitável.

No GBTUL, os resultados seguem uma lógica diferente. É possível observar que, para valores de malha entre 3 e 15, há grandes variações e falta de consistência, especialmente para o caso em que $\psi=0$. No entanto, a partir desse valor, há um crescimento constante nos resultados. Portanto, é conveniente utilizar uma malha com o valor de 20, onde as variações estão na ordem de 1% - 2% da malha mais refinada, tornando-se semelhante ao outro programa.

O LTBEAM não possui um limite nos parâmetros de refinamento, por isso consegue produzir os resultados rapidamente, independentemente do refinamento da malha. Portanto, esta análise de sensibilidade da malha não se aplica ao LTBEAM.

5.3. VALIDAÇÃO DOS VÁRIOS MÉTODOS DE CÁLCULO

Para assegurar que estas quatro metodologias são adequadas para o cálculo dos valores dos Momentos críticos associados às encurvaduras, é feita uma comparação inicial com um perfil padrão, um IPE 100. Neste caso, os valores das fórmulas analíticas estão calibrados para este tipo de perfil e servem como referência para a comparação com os resultados obtidos com os *softwares*, garantindo que são usados os parâmetros corretos e as condições de fronteira adequadas. Esta comparação permite verificar a precisão dos resultados obtidos pelos *softwares* em relação aos valores analíticos obtidos para o perfil de referência (o IPE100), validando assim as configurações e as simulações realizadas nos programas.

5.3.1. SOFTWARES DE CÁLCULO

No GBTUL e no LTBEAM, não há uma componente de modelação, pois as condições de fronteira são definidas pelos próprios programas, sem qualquer interação adicional.

No entanto, no caso do Abaqus, é necessário pensar em como serão definidas as restrições para obter valores coerentes. Os casos estudados incluem um cenário em que $L=L_{cr}$, com possível empenamento e outro caso sem empenamento. É importante mencionar que o GBTUL não é capaz de considerar o empenamento, portanto, apenas o cálculo sem empenamento será realizado nesse caso.

No ABAQUS, o método de carregamento é realizado por meio da criação de um ponto de referência onde a carga é aplicada. Essa carga é distribuída na face do perfil, uma vez que o perfil é modelado como um sólido 3D. Nas condições de fronteira com empenamento, os deslocamentos UX e UY são bloqueados nas faces extremas (ver Figura 5.3 b), enquanto nas condições sem empenamento, considera-se que as faces atuam como um corpo rígido, tendo todos os deslocamentos iguais e bloqueando os deslocamentos UX, UY, URZ e URY nessa face (ver Figura 5.3 a). De forma simplificar o cálculo computacional, é colocado um único ponto, por norma no centro da alma do perfil pois este não terá impacto nos resultados, onde UZ estará bloqueado.

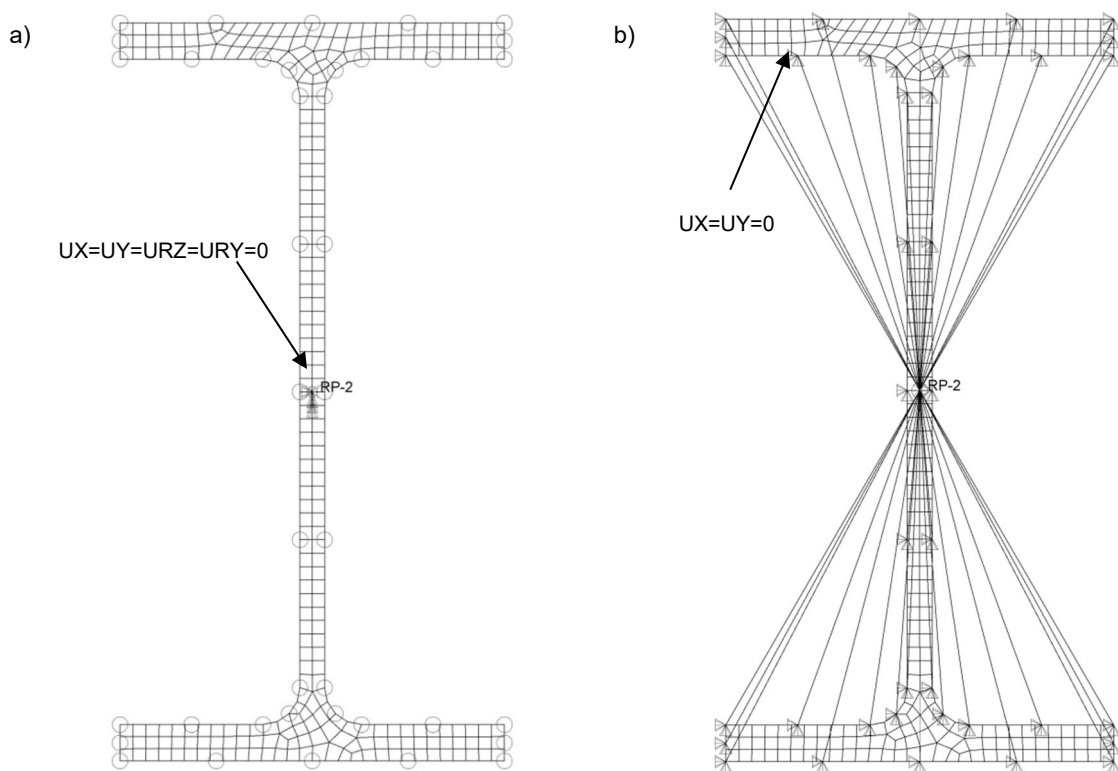


Figura 5.3 – Condições Fronteira aplicadas no ABAQUS: a) Com Empenamento, b) Sem Empenamento

5.3.2. EXPRESSÃO ANALÍTICA DO MOMENTO CRÍTICO

Como mencionado anteriormente, esta expressão é apresentada no anexo "F" das normas europeias, na versão britânica de 1992, como uma extensão da fórmula clássica da encurvadura de Euler. A formulação clássica é usada para avaliar a encurvadura à flexão/lateral quando um perfil está sujeito a um carregamento axial. A extensão pretende tomar em consideração o efeito torcional que surge ao se aplicar um momento fletor, e só um dos banzos estar sujeito à compressão, daí a inclusão da inércia à torção (I_t) e da inércia ao empenamento (I_w) visto que o banzo inferior e superior podem ter comportamento distintos. Por fim, este incremento contabiliza ainda um coeficiente de mono simetria (α) e a influência que o ponto de aplicação da carga terá na encurvadura (β) (ver Figura 5.4).

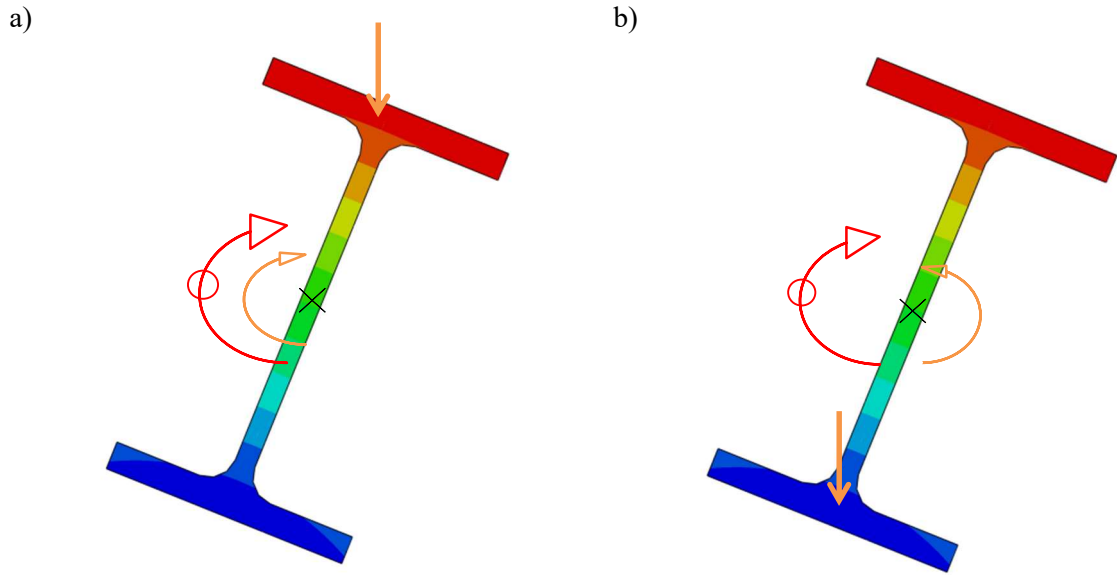


Figura 5.4 – Influência do Ponto de Aplicação da Carga no Momento Crítico: a) No Banzo Comprimido Influência Negativa, b) No Banzo Tensionado Influência Positiva

$$M_{cr,LT} = C_1 \frac{\pi^2 * E * I_z}{L^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 * E * I_z} + [C_2 z_g - C_3 z_j]^2 \right]^{0.5} - [C_2 z_g - C_3 z_j] \right\} \quad (5.1)$$

Em que:

C_1, C_2, C_3	Fatores dependendo do carregamento e das condições de apoio
I_z	Inercia segundo o eixo z-z
I_w	Inercia ao empenamento da secção
I_t	Inercia á torção
k, k_w	Coefficientes relativos as restrições de rotação nos apoios
z_g	Distancia do ponto de aplicação da carga ao centro de corte
z_j	Fator representativo da mono simetria do perfil

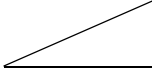
Nesta fórmula as condições de apoio são alteradas através da variação do valor do coeficiente “k”. Para contabilizar o empenamento da secção considera-se $k_w = 1.0$ e caso se queira realizar a fixação desta rotação, adota-se $k_w = 0.5$.

5.3.3. RESULTADOS E COMPARAÇÕES PARA O PERFIL COM SECÇÃO EM I

Com as condições de fronteira já definidas para todos os *softwares* utilizados, é possível comparar os resultados obtidos pelas quatro metodologias. O Quadro 5.1 apresenta estes resultados, juntamente com os valores dos parâmetros que foram utilizados para a comparação dos diferentes programas,

nomeadamente os parâmetros associados ao carregamento ilustrado na Figura 5.2 e os valores de “k” para simular as condições de apoio. Devido à incapacidade do *software* GBTUL de realizar a análise com o empenamento travado, este *software* não poderá ser utilizado para avaliar o momento crítico neste caso. Com o uso do $K_w = 0.5$ é feito ao perfil uma restrição na rotação da zona de apoio o que confere ao perfil uma maior rigidez aumentando assim teoricamente o resultados obtido do momento crítico.

Quadro 5.1 – Resultados dos Momentos Críticos no Perfil IPE 100

 Casos de Carga	$K_w = 1.0$				$K_w = 0.5$			
	M_{cr}	LTBEAM	GBTUL	ABAQUS	M_{cr}	LTBEAM	ABAQUS	
$\Psi = 1.0$	23.64	23.6	22.47	23.4	37.5	40.4	39.5	kN.m
$\Psi = 0.5$	39.97	31.12	29.65	30.87	48.9	53.43	52.1	
$\Psi = 0.0$	41.84	43.3	41.40	42.61	66.4	75.5	72.89	
$\Psi = -0.5$	55.55	60.3	59.28	57.65	86.4	110.8	103.4	
$\Psi = -1.0$	61.46	64.15	75.53	59.36	87.5	130.83	115.6	

Globalmente, observa-se que os valores obtidos pelos *softwares* são consistentes com os obtidos por aplicação da expressão analítica. No entanto, é possível notar que, quando é aplicado o travamento ao empenamento ($K_w = 0.5$), os resultados tendem a apresentar maiores discrepâncias. Isso pode estar relacionado com a tentativa das normas de formulação serem conservadoras com este parâmetro, uma vez que, na maioria dos casos práticos, ele não é utilizado. Esta abordagem, não sendo conservadora com este parâmetro, pode conduzir a valores incorretos na quantificação do Momento Crítico, resultando em dimensionamentos inadequados.

Uma das vantagens do GBTUL é a capacidade de identificar quais os modos de encurvadura que mais afetam os perfis estudados. Neste caso, espera-se que sejam totalmente dominados pelo modo lateral e pelo modo torcional. São considerados 42 modos, onde o modo 1 representa a deformação axial, o modo 2 representa a deformação lateral ao longo do eixo forte, o modo 3 representa a deformação lateral ao longo do eixo fraco, o modo 4 representa a deformação torcional, e os modos 5-16 são modos locais. Os demais modos são considerados negligenciáveis para esse tipo de análise. O Gráfico 5.2 ilustra a distribuição desses modos. No anexo E estão as representações de alguns dos modos.

Sendo assim, o resultado está de acordo com o esperado. Quando os perfis em forma de "I" são submetidos à flexão, eles apresentam encurvadura lateral ao longo do eixo fraco, isto é, o perfil sai do plano de aplicação da carga. Além disso, neste caso, há a ocorrência simultânea do fenômeno da torção.

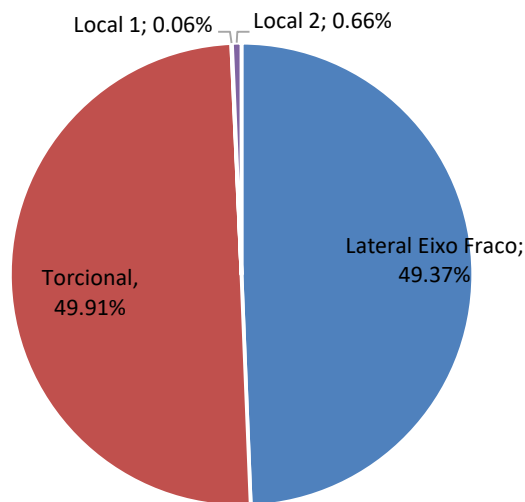
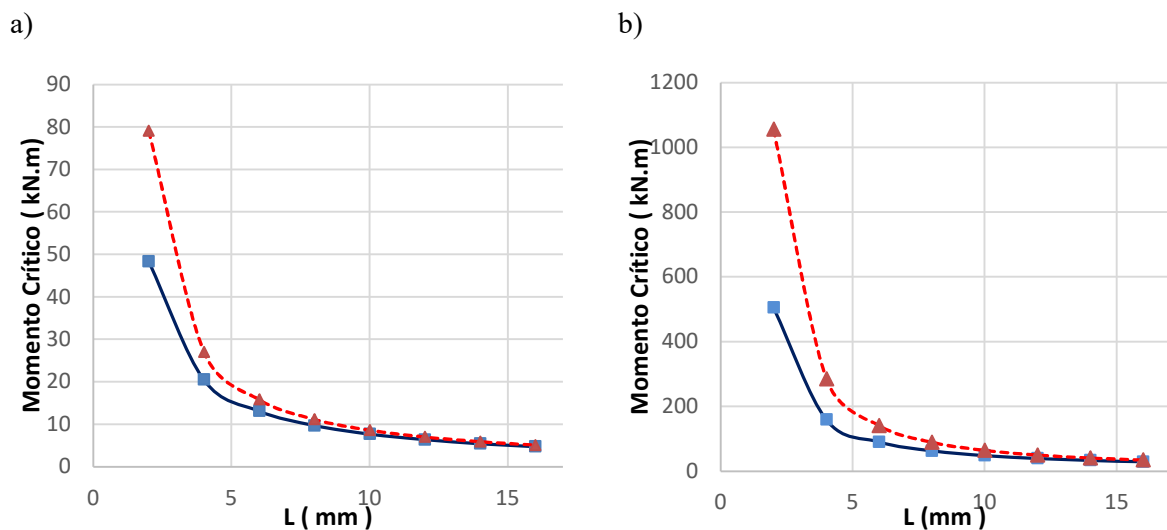


Gráfico 5.2 – Repartição da Contribuição dos Modos obtidos em GBTUL

Retomando o foco para o parâmetro do empenamento, é evidente que sua presença terá influência nos resultados obtidos. Surge a dúvida se será necessário estudar a modelação de ambos os casos nos perfis enformados a frio, com secção OMEGA. Naturalmente, se considerarmos sempre a presença deste fenómeno, os valores obtidos estão sempre do lado da segurança, uma vez que valores mais baixos de $M_{cr,LT}$ resultam em esbeltezas normalizadas, $\bar{\lambda}_{LT}$, mais elevadas. Porém, maiores esbeltezas normalizadas resultam numa maior redução nos valores resistentes da secção.

Assim sendo, será adequado considerar o pior cenário ao implementar os valores do parâmetro de empenamento nos perfis que vão ser avaliados.

No entanto, foi realizada uma análise comparativa, com o objetivo de avaliar o impacto deste parâmetro nos resultados, considerando perfis com comprimentos secções diferentes (ver Gráficos 5.3). A escolha dos perfis IPE 140 e IPE 300 deve-se à semelhança das inércias, respetivamente, com os perfis OMEGAS 70 x 1.5 e 170 x 2.0. Desta forma, é aferido se este parâmetro irá ser impactante nas análises futuras.

Gráfico 5.3 – Análises da importância da consideração do Parâmetro K_w : a) IPE 140, b) IPE 300

Os resultados mostram que o impacto deste parâmetro é mais significativo quando o comprimento é menor e a secção do perfil utilizado é maior. A maior diferença observada é de 50%, enquanto a menor diferença é quase desprezível, com apenas 6% de variação.

5.3.4. RESULTADOS E COMPARAÇÕES COM UM PERFIL DE SECÇÃO MONO SIMÉTRICA

O objetivo final destas análises preliminares é garantir que os perfis Omega em estudo sejam modelados com precisão, tendo em consideração as condições fronteiras já validadas, e que demonstrem valores representativos da realidade esperada. Para isso, é realizada uma segunda validação, a fim de compreender as limitações dos *softwares* e da fórmula analítica estudada. Essa validação é feita utilizando um perfil laminado a quente, de secção mono simétrica, o UAP 100, que é um perfil em forma de U com os banzos paralelos. O objetivo é perceber se o facto do perfil ser mono simétrico irá influenciar os resultados.

A escolha deste perfil invalida a utilização do *software* LTBEAM. Apesar da ampla biblioteca de perfis predefinidos, o LTBEAM só analisa os perfis com comportamentos do tipo lateral-torcional, especificamente com secções I ou H. Portanto, não é possível utilizar o LTBEAM em perfis com formatos menos convencionais e que não se enquadrem nestes critérios específicos. Apesar disto o LTBEAM é o de mais prático uso para os perfis com secção em I.

Seguindo neste a mesma lógica do perfil em I e aplicando as mesmas condições fronteira (pré-estabelecidas na Figura 5.3) é possível a retirar os resultados apresentados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Resultados dos Momentos Críticos no Perfil UAP 100

	$K_w = 1.0$			
	M_{cr}	GBTUL	ABAQUS	
$\Psi = 1.0$	45.70	49.01	44.75	kN.m
$\Psi = 0.5$	59.90	64.40	58.91	
$\Psi = 0.0$	80.94	87.78	81.07	
$\Psi = -0.5$	107.46	118.38	110.00	
$\Psi = -1.0$	118.90	140.36	117.41	

Observa-se que, para este perfil, o GBTUL apresenta valores sempre ligeiramente superiores aos valores obtidos pelo ABAQUS e pela formulação analítica. É possível observar a contribuição dos modos segundo o GBTUL, e percebe-se a perda de proximidade nos resultados em função da alteração dos casos de carga (ver Quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Contribuição dos Respetivos Modos

<i>Casos de Carga</i>	<i>Torcional</i>	<i>Lateral Eixo-Fraco</i>	<i>Local</i>	<i>Outros</i>
$\Psi = 1.0$	49.83 %	47.56 %	1.53 %	1.08 %
$\Psi = 0.5$	49.83 %	47.34 %	1.75 %	1.08 %
$\Psi = 0.0$	49.84 %	46.12 %	2.95 %	1.09 %
$\Psi = - 0.5$	49.66 %	43.20 %	5.92 %	1.22 %
$\Psi = - 1.0$	49.33 %	41.95 %	6.99 %	1.73 %

5.3.5. RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM OS PERFIS DE SECÇÃO OMEGA

Por fim, após confirmação de que as metodologias de cálculo fornecem valores coerentes entre si, é realizada uma breve validação com os ensaios laboratoriais, antes de analisar os momentos críticos associados aos diagramas de momentos reais. Nos ensaios, observa-se que quando o perfil de 4 metros é submetido a uma carga descendente, este não encurva. No entanto, quando é submetido a uma carga ascendente sem travamentos, constata-se que ocorre uma encurvadura significativa antes de atingir sua resistência seccional. Portanto, sem conhecer o nível de imperfeições associado a esse perfil, pode-se afirmar que, se fosse perfeito, a relação entre a resistência seccional e a força de encurvadura ($\lambda = M_{rd}/M_{cr}$), caso ocorra a encurvadura, deve ser superior a "1"; caso contrário, deve ser inferior (Quadro 5.4).

Quadro 5.4 – Avaliação da Esbelteza do Perfil no Layout 1

<i>Perfis</i>	<i>Carregamento</i>	M_{rd}	$\frac{Abaqus}{M_{cr}}$	λ	$\frac{GBTUL}{M_{cr}}$	λ
<i>OMEGATEK</i> <i>70 x 1.5</i>	Descendente	2.51	7.59	0.33	12.7	0.19
	Ascendente	2.49	0.56	4.54	0.45	5.53
<i>OMEGATEK</i> <i>170 x 2.0</i>	Descendente	13.52	43.64	0.31	61.45	0.22
	Ascendente	13.93	6.2	2.25	5.38	2.59

Apesar de o modelo GBTUL ser simplificado e os resultados possivelmente não serem precisos, este modelo serve para observar que os resultados numéricos são coerentes com o que foi observado nos ensaios laboratoriais nos carregamentos ascendentes.

Diante disso, verifica-se que os perfis, quando submetidos a uma carga ascendente estarão sujeitos a encurvaduras. O Quadro 5.5 apresenta os resultados obtidos pelos três métodos disponíveis quando a eles lhes é aplicado um carregamento instabilizador.

Quadro 5.5 – Resultados dos Momentos Críticos Negativos nos OMEGAS

$\triangle$ <i>Casos de Carga</i>	OMEGATEK 70x1.5 (L = 1 METRO)			OMEGATEK 170x2.0 (L = 1 METRO)		
	M_{cr}	GBTUL	ABAQUS	M_{cr}	GBTUL	ABAQUS
$\Psi = 1.0$	3.16	2.63	1.69	12.77	5.87	5.24
$\Psi = 0.5$	4.15	3.48	2.20	17.02	7.69	6.91
$\Psi = 0.0$	6.30	4.68	3.10	25.41	10.36	9.65
$\Psi = -0.5$	12.13	6.14	4.55	48.72	13.64	12.71
$\Psi = -1.0$	43.40	6.75	6.38	166.05	15.05	18.32

Os valores apresentam discrepâncias nas três avaliações, sendo que os resultados associados à fórmula são os mais extremos, especialmente nos últimos casos de carga. Verifica-se, porém, que resultados obtidos com os *software* Abaqus e GBTUL, são consistentes entre si, e apresentam discrepâncias na ordem de grandeza de 1 ou 2 kN.m. Neste sentido, dá-se maior importância à evolução geral destes dois métodos, uma vez que ambos apresentam resultados com um aumento que aparenta ser linear ao contrário dos resultados associados à formulação analítica, que no último caso de carga apresenta um crescimento muito acentuado e desproporcional aos restantes.

Nestas análises, observa-se que os perfis são fortemente influenciados pelos modos torsionais e distorcionais (ver Gráfico 5.4), havendo uma clara diferença em relação ao fenómeno de LTB, que a expressão analítica busca captar. Outro parâmetro a ser considerado é que, como já apresentado no terceiro capítulo, os perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0 possuem uma inércia maior ao longo do eixo z-z do que no eixo y-y, que corresponde ao eixo de aplicação do carregamento, o que impossibilita que estes apresentem um deslocamento lateral. Esta observação confere legitimidade aos resultados obtidos e justifica os valores dos modos observados.

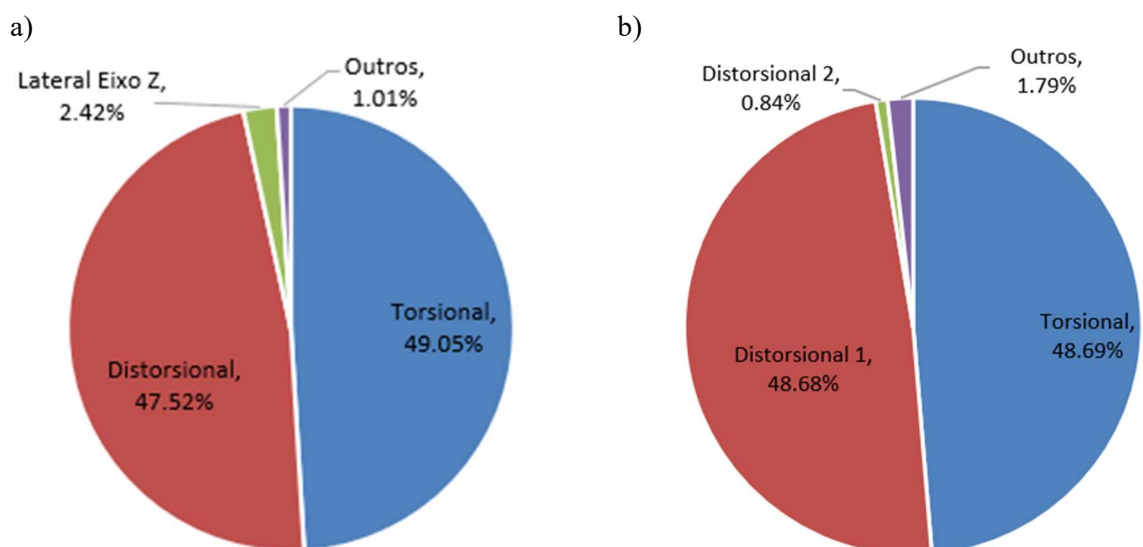


Gráfico 5.4 – Contribuição dos Modos segundo o GBTUL: a) OMEGATEK 70x1.5, b) OMEGATEK 170x2.0

Conclui-se que, nos casos dos perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0, devido à diferença no comportamento em relação à encurvadura, os valores dos fatores de redução descritos no Eurocódigo não são aplicáveis. Nestes casos, o fenómeno de encurvadura principal é o Torcional-Distorcional, para o qual as normas atuais não oferecem solução. A sobreavaliação do valor da redução vai inviabilizar a otimização da secção, enquanto a subavaliação do valor da redução conduz a valores de resistência superiores aos reais comprometendo o dimensionamento das solução estrutural.

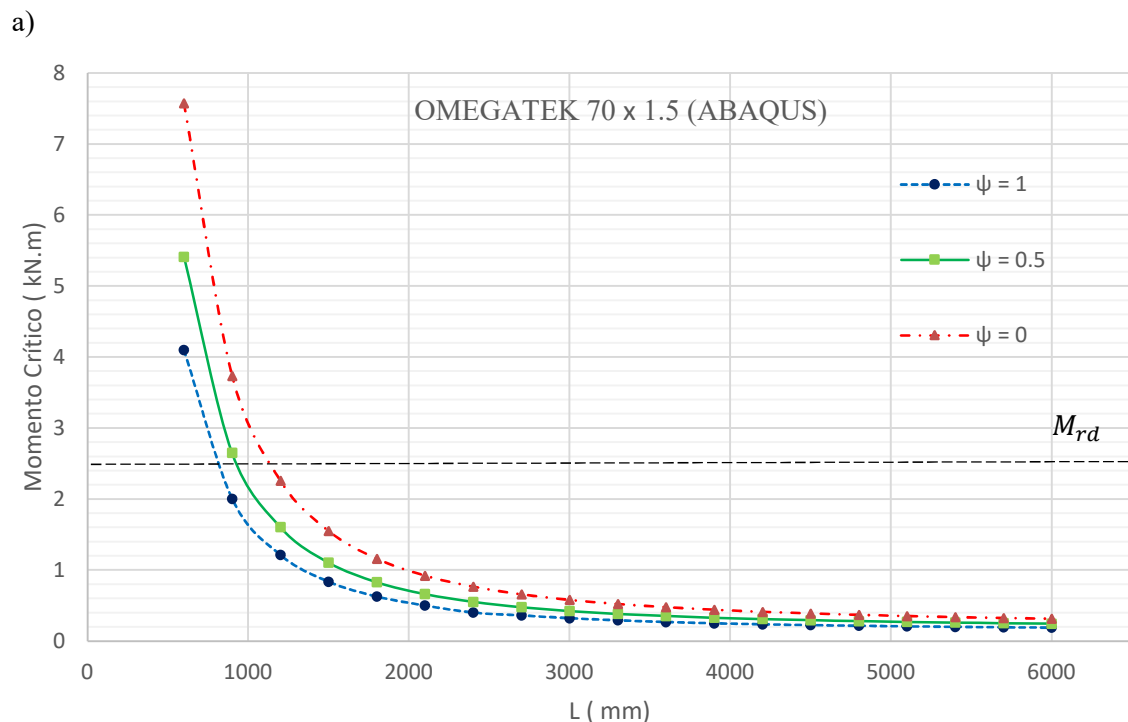
No caso do perfil 300x2.5, a inércia ao longo do eixo y-y é superior à do eixo z-z. Isto significa que este perfil possui a capacidade de sair do plano de aplicação da carga quando submetido a esforços de flexão. Nesse caso, o fenómeno de LTB torna-se aplicável, e o EC3 permite avaliação da redução causada por esse fenómeno. No entanto, é importante salientar que, mesmo podendo ter o comportamento esperado pelo EC3, os valores das inercia são muito semelhantes.

5.4. ANÁLISE À ENCURVADURA DOS PERFIS OMEGA

5.4.1. MOMENTOS CRÍTICOS TORSIONAIS-DISTORSIONAIS

Apesar dos perfis de secção menor (70 x 1.5 e 170 x 2.0) não poderem ser avaliados de acordo com o preconizado na norma europeia, estes ainda estão sujeitos a encurvaduras que podem ser laterais, torsionais ou de qualquer outro tipo. Como mencionado anteriormente, esses perfis são altamente influenciados pela distorcionabilidade em vãos curtos.

Foi realizada uma análise mais ampla destes perfis para entender o seu comportamento em vãos que variam de 600 mm a 6000 mm. Os resultados destas análises são representados nos Gráficos 5.5 e 5.6. São realizadas três análises para avaliar a encurvadura em aplicações de carga ascendente com o Abaqus e o GBTUL.



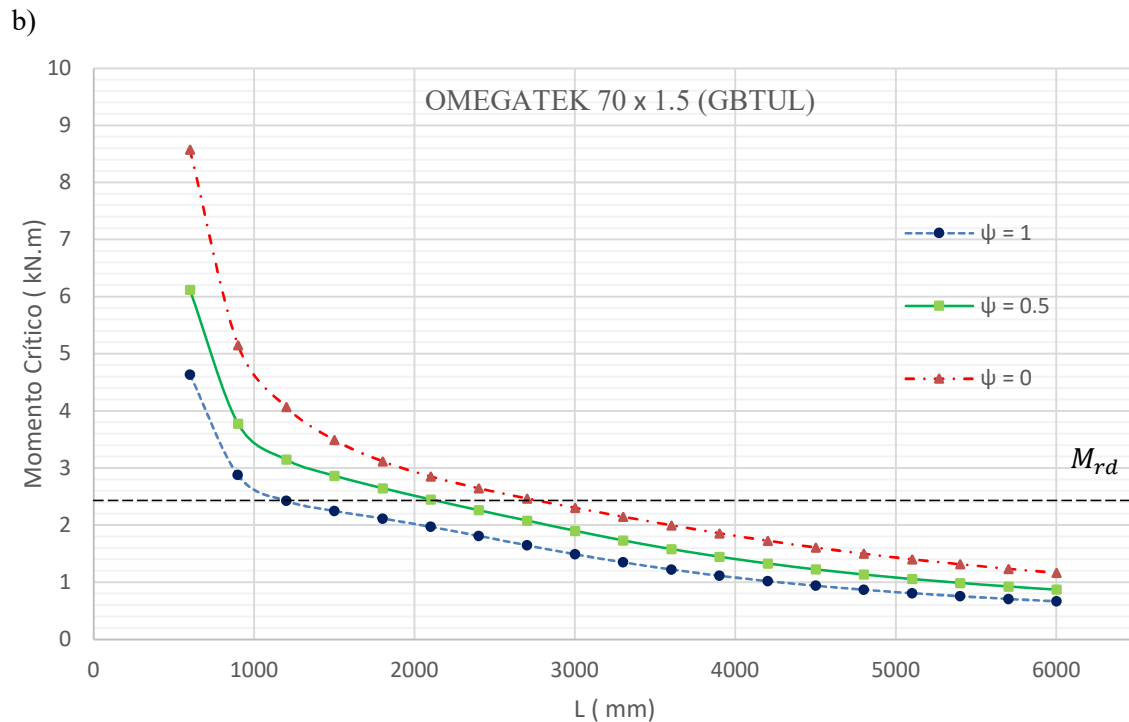


Gráfico 5.5 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 70 x 1.5: a) ABAQUS, b) GBTUL

Os valores obtidos com os dois métodos de cálculo apresentam algumas discrepâncias, principalmente para valores de vãos compreendidos entre 1000 mm e 4500 mm. No entanto, como o fenómeno de encurvadura não corresponde à inicialmente expectável, as condições de fronteira e o método de aplicação de carga considerados no ABAQUS podem não ser os ideais para obter valores coerentes.

Devido à simplicidade que o GBTUL oferece com sua interface, não é possível alterar o método de aplicação dos momentos, o que torna difícil manter este parâmetro constante nos dois *softwares*. Além disso, o GBTUL não demonstra explicitamente como as aplica, o que torna impossível replicar a modelação do GBTUL em Abaqus.

As contribuições dos modos de encurvadura sofrem alterações ao longo dos comprimentos do vão, até atingirem 2000 milímetros. Nesse intervalo, os modos distorcional e torcional dominam principalmente este fenómeno. No entanto, após este valor de comprimento, ocorre uma mudança, resultando num aumento constante da contribuição do modo lateral ao longo do eixo y-y, que é o eixo de aplicação da carga. Esse modo lateral chega a representar 49% da resposta total. No entanto, vale a pena mencionar que essa mudança não implica que este passe a ser considerado um comportamento lateral torcional, uma vez que o fenómeno descrito pelas normas refere-se ao comportamento lateral em relação a um eixo ao qual a carga não é aplicada.

A curva prevista pelo ABAQUS tem um formato mais tradicional e semelhante ao que é possível calcular pela fórmula de Euler, sendo esta uma função inversa.

O Gráfico 5.6 são apresentados os resultados das análises realizadas ao perfil 170 x 2.0. Verifica-se que, porém, devido à sua altura, a medição nos 600 milímetros torna-se difícil, pois este vão será muito influenciado por fenómenos locais. Assim sendo estende-se a análise de 900 até 6300 milímetros.

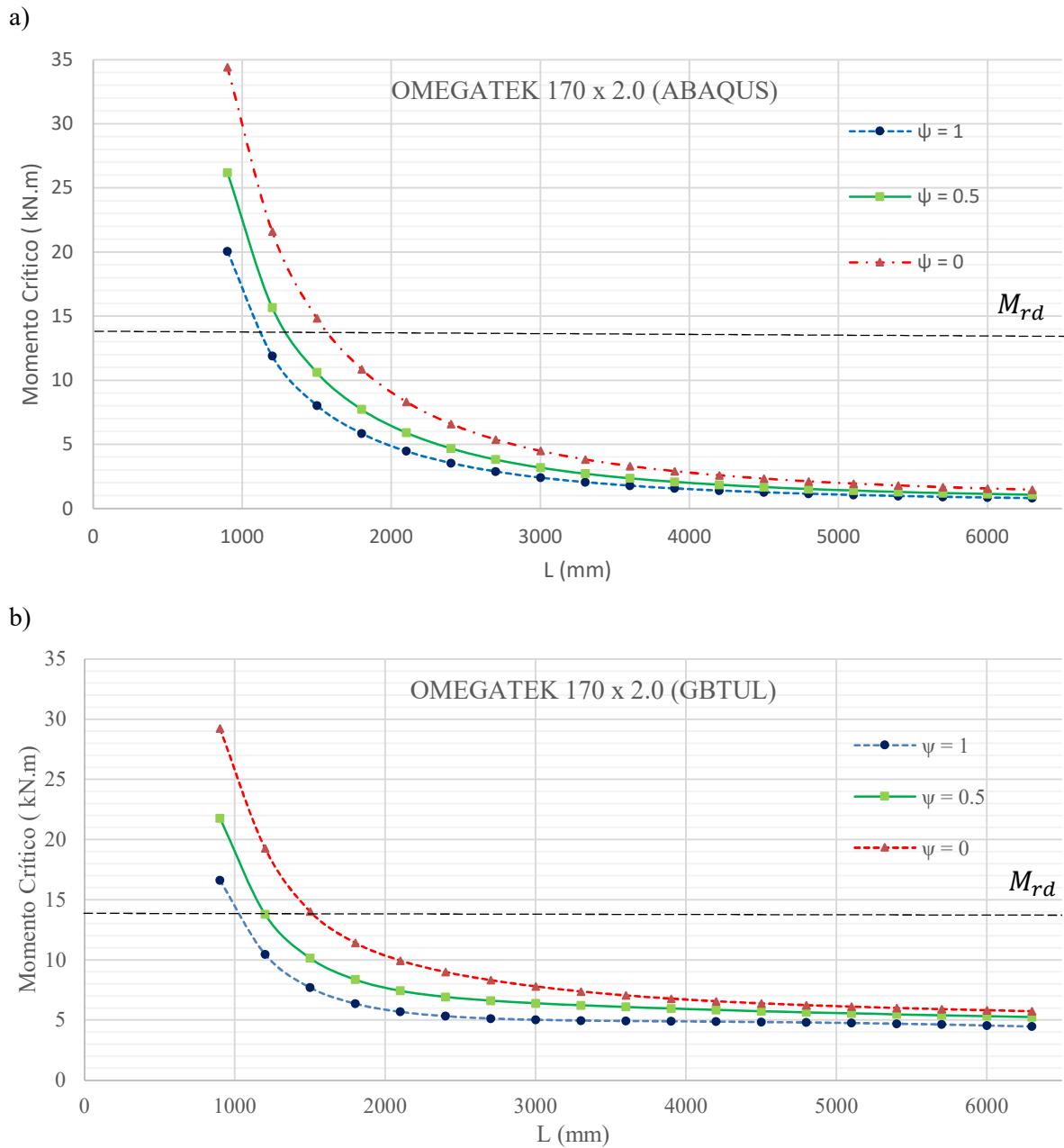


Gráfico 5.6 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 170 x 2.0: a) ABAQUS, b) GBTUL

Neste perfil, os resultados também apresentam disparidades entre os métodos de cálculo, mas a divergência torna-se notável a partir de 1500 mm de vão. A contribuição dos modos segue o mesmo princípio do perfil anterior, começando por ser dominada pelos modos torsionais e de distorcionais. À medida que o vão vai aumentando, o modo de distorção perde sua importância, sendo substituído pelo modo lateral ao longo do eixo y-y, e tornando-se secundário a partir de 6000 milímetros.

Ambas as curvas apresentam um formato de equação inversa. No entanto, a curva prevista pelo GBTUL tende para um valor em torno de 4.5 kN.m, o que não parece lógico, pois isso implicaria que a resistência para um vão infinito não seria igual a zero.

As Figuras 5.5 mostram as encurvaduras apresentadas pelos *softwares* de cálculo, onde é visível, principalmente no Abaqus, a presença do modo torcional.

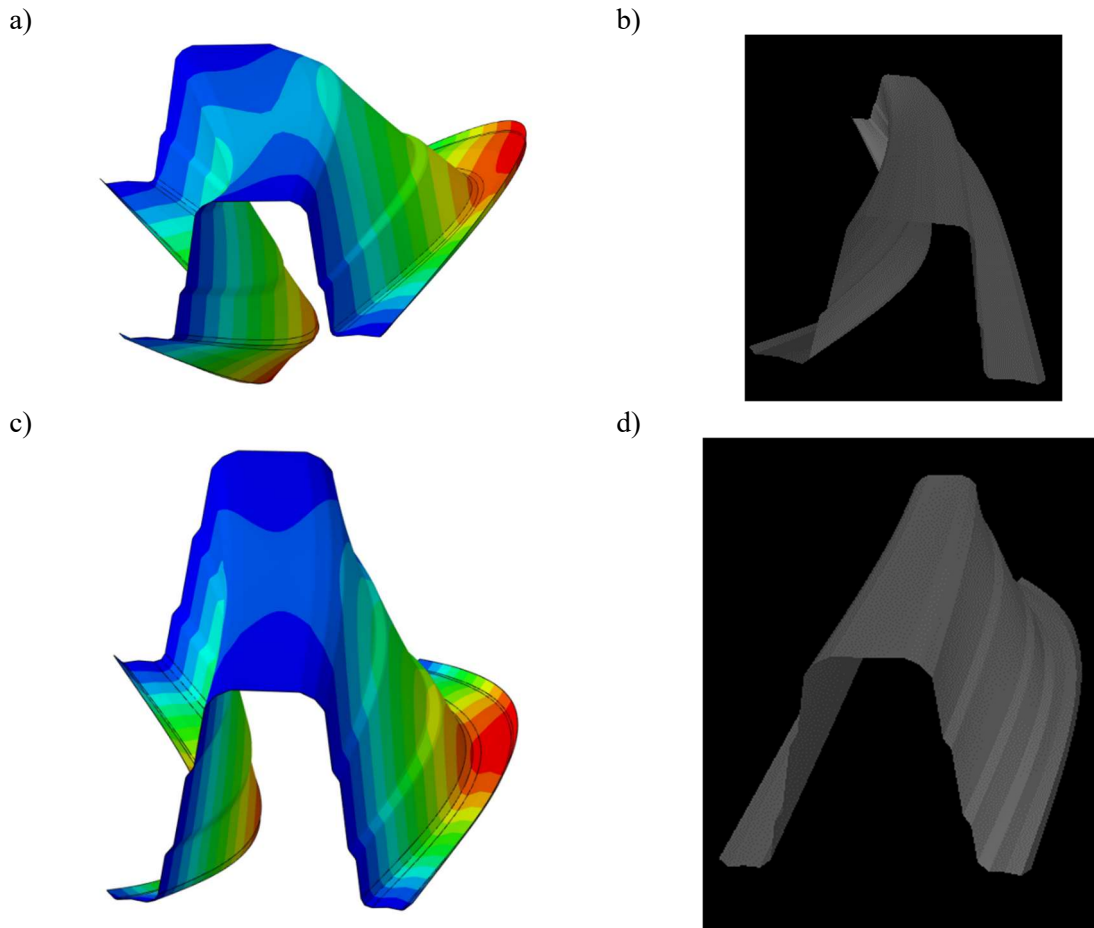


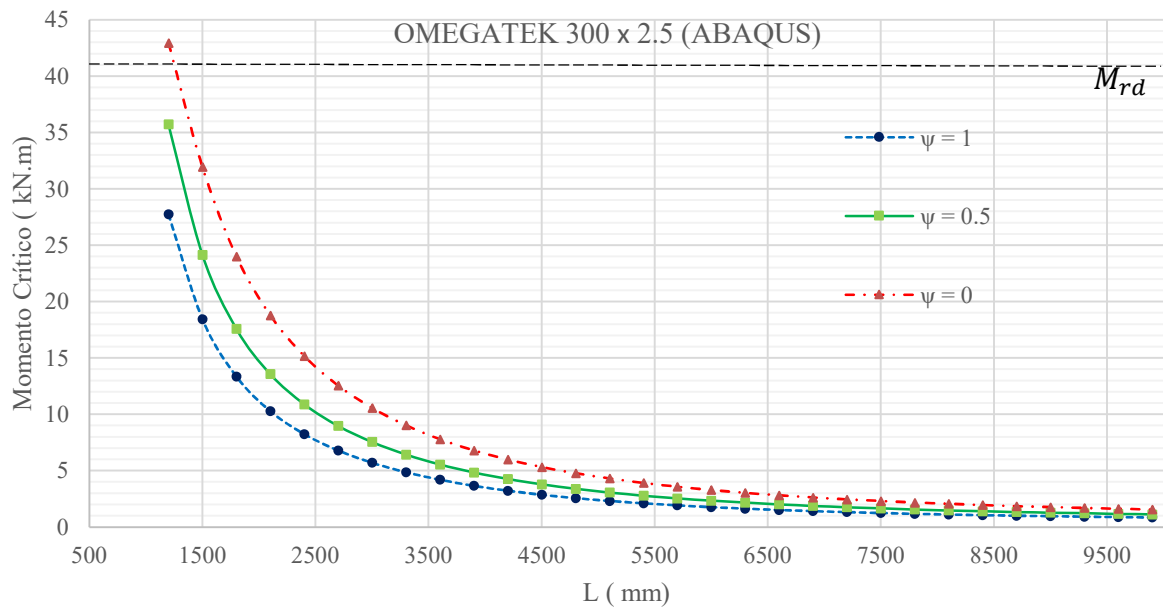
Figura 5.5 – Encurvadura dos Perfis: a) 70x1.5 Abaqus, b) 70x1.5 GBTUL, c) 170x2.0 Abaqus, d) 170x2.0 GBTUL

5.4.2. MOMENTOS CRÍTICOS DO PERFIL OMEGA 300x2.5

O perfil 300 x 2.5 possui uma maior inércia ao longo do eixo de aplicação das cargas ($I_y > I_z$), portanto é de esperar que ele apresente um comportamento de encurvadura lateral-torcional quando submetido a tais carregamentos. Para analisar este comportamento, é realizada uma análise mais abrangente ainda, com vãos desde 1200 milímetros até 9900 milímetros, uma vez que perfis dessa dimensão são esperados para vencer vãos maiores superiores a 5000 mm. (ver Gráfico 5.7).

Após identificar os valores do momento crítico, é importante determinar quando é que estes perfis são suscetíveis à encurvadura, conforme a aplicação da metodologia proposta, mostrando os valores de redução do momento resistente. Para esse perfil, é considerado que o material que foi testado em laboratório tem uma tensão de cedência de 375 MPa, uma vez que esse valor influencia a resistência do perfil, assim como a esbelteza normalizada associada à carga.

a)



b)

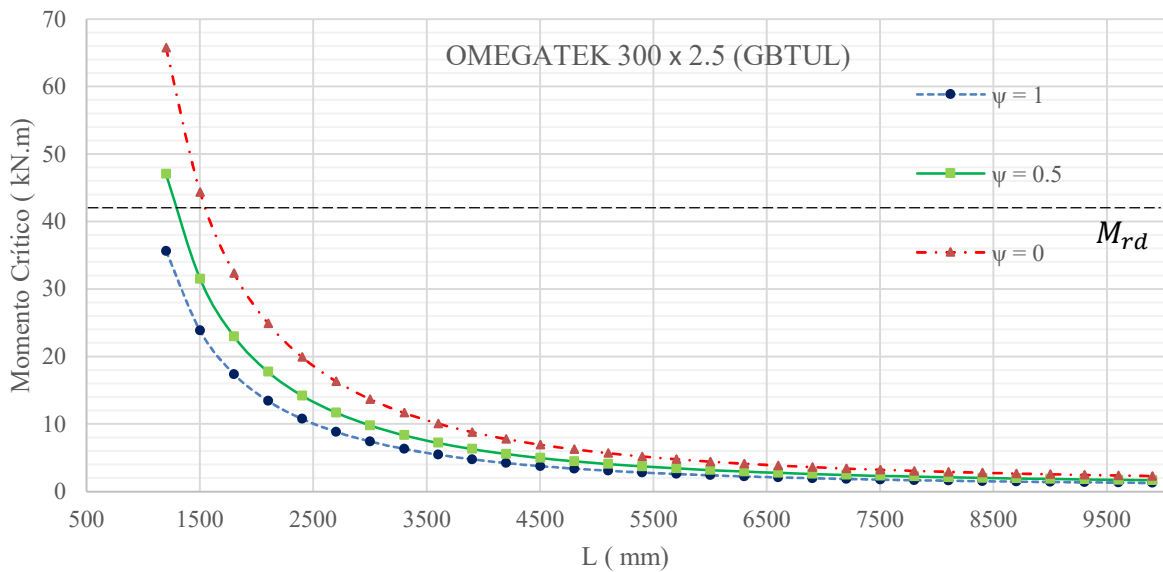


Gráfico 5.7 – Momentos Críticos dos Perfis OMEGATEK 300 x 2.5: a) ABAQUS, b) GBTUL

Ao contrário das curvas dos outros perfis, estas apresentam muitas semelhanças no formato, apesar dos valores do GBTUL serem superiores. No entanto, essa tendência tem sido observada de forma consistente nas análises anteriores. Estes perfis apresentam uma contribuição do modo torcional muito superior em comparação aos perfis anteriores, variando de uma média de 68% para o menor vão até 98.7% para o maior, tornando-o a principal causa de instabilidade (ver Gráfico 5.8).

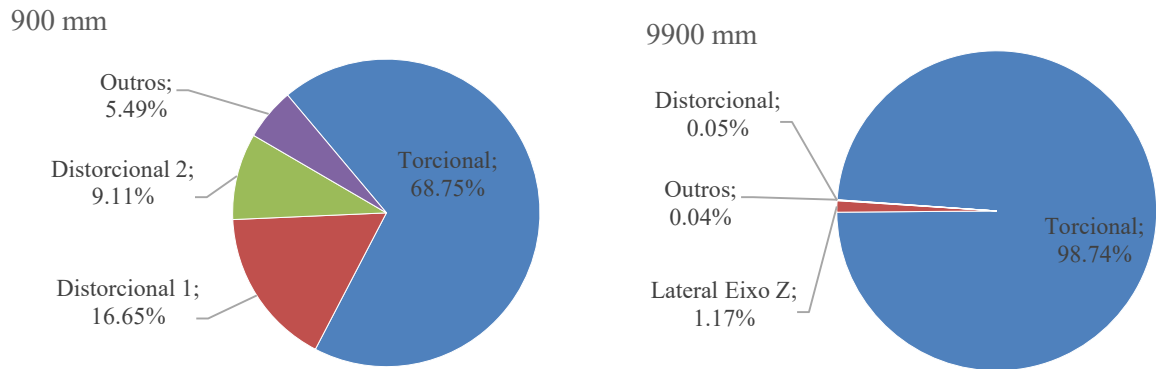


Gráfico 5.8 – Contribuição dos Modos para o Perfil 300 x 2.5 em Vãos Extremos

5.4.3. REDUÇÕES DO MOMENTO RESISTENTE

Para concluir, é realizada uma comparação das reduções propostas pela metodologia do EN NP 1993-1-1:2010 quando utilizados estes dois *softwares* no cálculo do momento crítico.

A metodologia da norma começa por calcular a esbelteza normalizada ($\bar{\lambda}_{LT}$), que é a raiz quadrada do quociente entre o valor do momento resistente e o valor obtido para o momento crítico ($\sqrt{M_{rd}/M_{cr,LT}}$). Em seguida, utiliza as curvas de encurvadura "b" propostas pela norma para esses perfis, obtendo as reduções (χ_{LT}) com base no parâmetro adimensional da esbelteza. As equações 5.2, 5.3 e 5.4 correspondem as usadas no método do Eurocódigo

O momento resistente é o apresentado no Capítulo 3 para o OMEGA 300 x 2.5 e os momentos críticos são os obtidos pelas análises realizadas nos dois *softwares* com os resultados apresentados no Gráfico 5.7.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{rd}}{M_{cr,LT}}} \quad (5.2)$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (5.3)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (5.4)$$

Em que:

λ_{LT} Esbelteza normalizada para a encurvadura Lateral-Torcional

α_{LT} Factor de imperfeição associados as curvas de encurvadura a usar, (curva b = 0.34)

χ_{LT} Factor de redução a aplicar aos perfis sujeito a encurvadura do tipo Lateral-Torcional

Para facilitar a comparação entre os dois *softwares*, são mostradas no Gráfico 5.9 as reduções aplicadas aos perfis apenas para um caso de carga. Os demais casos de carga estarão disponíveis no Anexo H.

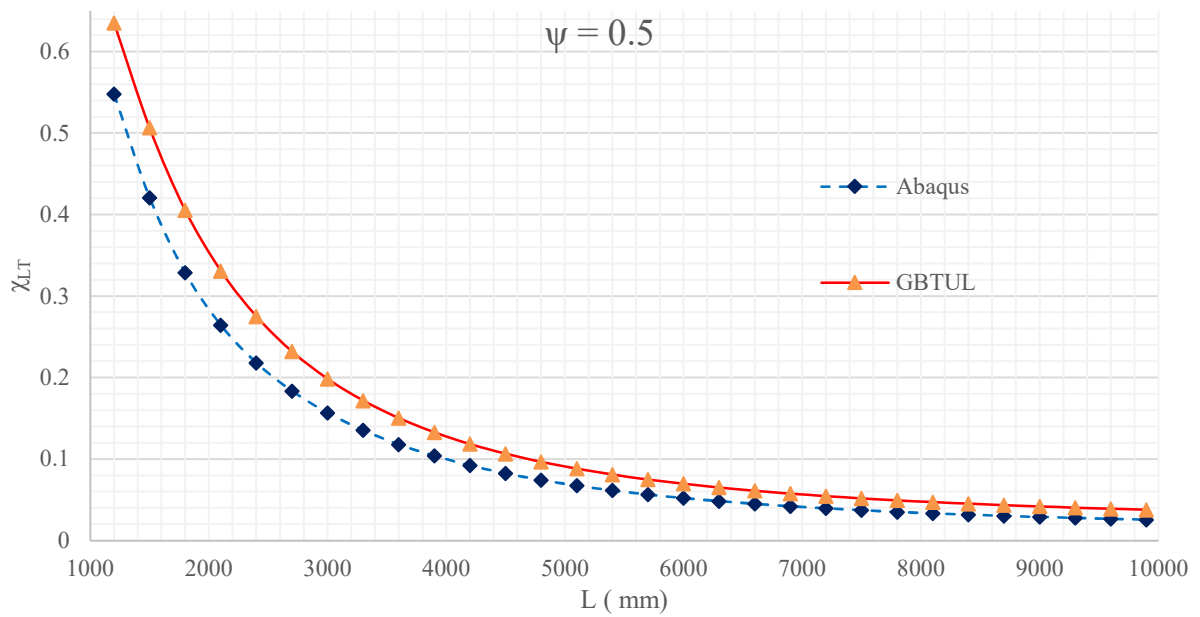


Gráfico 5.9 – Reduções dos Perfis OMEGATEK 300 x 2.5 com base nos Resultados Obtidos

Os perfis, quando avaliados pelo GBTUL, apresentam reduções menores em relação ao Abaqus. No entanto, ambos os *softwares* mostram similaridades nos valores e no formato das curvas obtidas. Portanto, é possível afirmar que ambos os *softwares* podem fornecer resultados viáveis, dada a pouca disparidade entre eles.

Para a simplificação do uso destes valores os resultados são expressos numa equação tanto para o ABAQUS (5.5) como para o GBTUL (5.6).

$$\chi_{LT} = (5303.6\psi + 21807)L^{-1.49} \quad (5.5)$$

$$\chi_{LT} = (2663.6\psi + 12937)L^{-1.40} \quad (5.6)$$

Em que:

χ_{LT}	Factor de redução a aplicar aos perfis
ψ	Relação entre os momentos de extremidade, $\forall \psi \in \mathbb{Q} : [1, 0]$
L	Comprimento do perfil em milímetros

Ambas as equações demonstram uma alta capacidade de representar os valores obtidos visto que têm um $R^2 \geq 0.98$. No entanto é aconselhado a realização e validação para vãos que não estejam compreendidos nos efetuados, apesar de que, a expectativa será de estes comprimentos sejam representativos da realidade de projeto.

5.4.4. CONSIDERAÇÃO DOS PAINÉIS DE COBERTURA

Como já mencionada a interação das coberturas de painéis perfilados em aço leve é feita pela quantificação de molas que conferem resistência na ligação. A mola permite assim realizar uma restrição

parcial do deslocamento. No entanto devido à extensa gama de painéis que podem ser escolhidos pela equipa projetista, é preferível realizar o intervalo onde não é contabilizado o efeito da cobertura até à restrição lateral total ($K_{mola,Lateral} = \infty$). Devido ainda às incertezas relacionadas com a mola rotacional, nomeadamente a execução impropria da ligação, esta não será tida em conta.

O Gráfico 5.10 procura demonstrar os resultados obtidos para os momentos críticos quando a estes lhes é aplicado um travamento lateral no banzo superior. Seguindo a configuração apresentada na Figura 5.6.

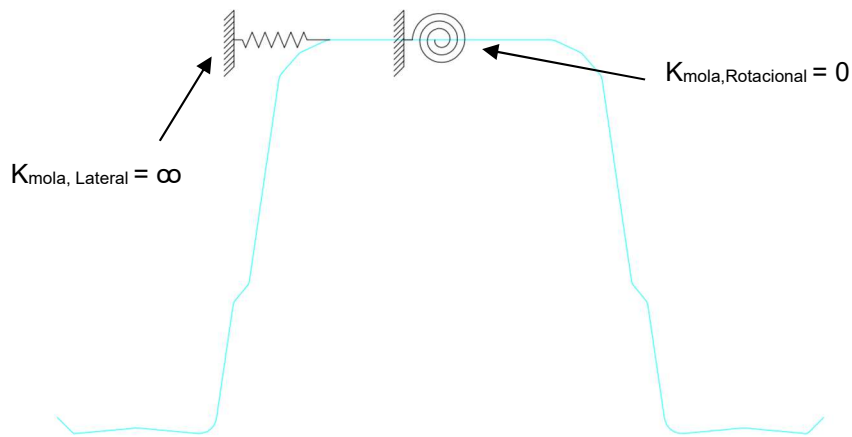


Figura 5.6 – Restrições Laterais aplicadas no Perfil

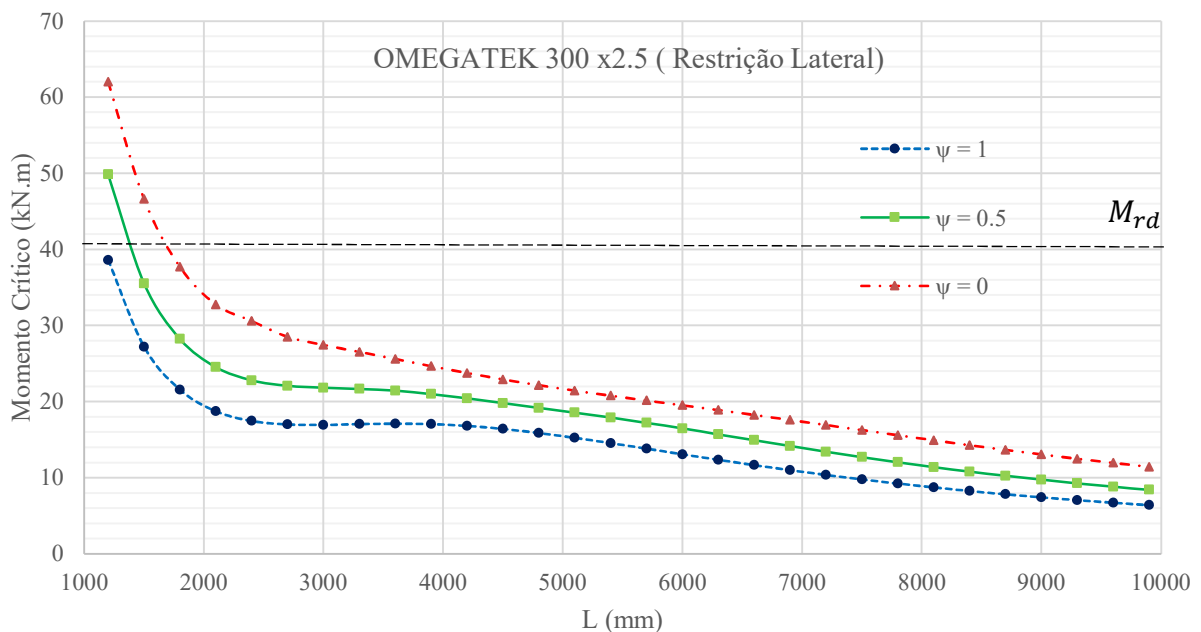


Gráfico 5.10 – Momentos Críticos com Restrição Lateral Total

Tal como é feito para quando o perfil está livre de se deformar, com restrição é realizado o cálculo da redução que este valor dos momentos críticos traduz seguindo a lógica do EN NP 1993-1-1:2010 (Gráfico 5.11)

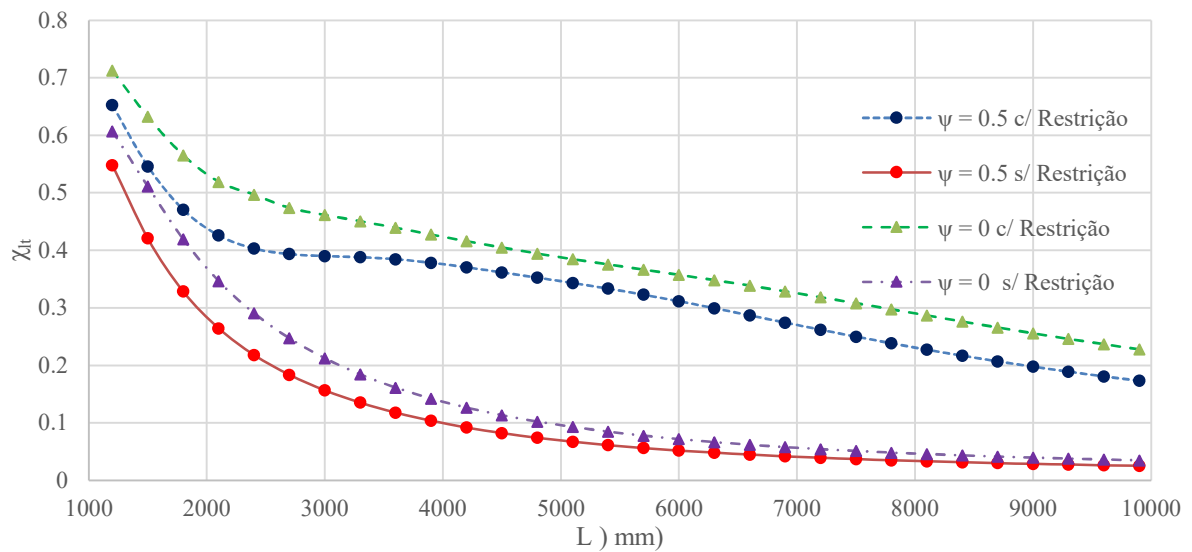


Gráfico 5.11 – Comparação das Reduções dos Perfis com e sem Restrição Lateral

De forma geral, com a inclusão da restrição lateral, os valores das reduções não serão tão elevados e mais próximos da realidade.

5.4.5. REDUÇÕES PARA CASOS DE CARGA DISTRIBUÍDA

As análises feitas anteriormente foram efetuadas para casos puramente teóricos visto que a aplicação da carga está a ser feita por momentos críticos nas extremidades, este será um caso muito raro de ser encontrado numa situação realista.

Para que sejam obtidos valores que possam ser mais facilmente transmitidos á equipa projetista que pretende usar estes perfis é efetuado um carregamento distribuído ao longo do vão do perfil. A carga será aplicada no banzo superior como é apresentado na Figura 5.7.

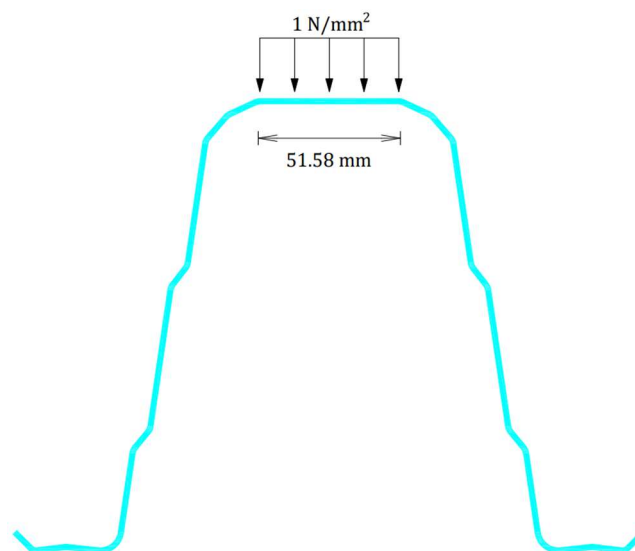


Figura 5.7 – Aplicação da Carga no Banzo Superior

A aplicação da carga segue o representado na Figura 5.8 a), com o respetivo diagrama de momentos fletores e o seu valor de máximo na Figura 5.8 b).

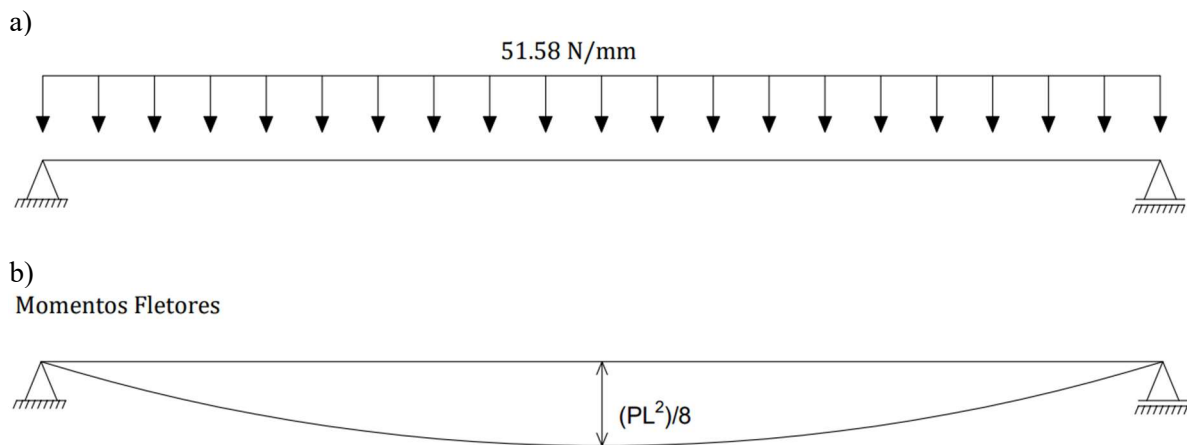


Figura 5.8 – Modelo Analítico do Carregamento: a) Aplicação da Carga, b) Diagrama de Momentos Fletores

Com os resultados anteriores é visto que os painéis de cobertura têm uma influência notável mesmo quando só considerado o efeito da restrição lateral, é para este caso de carga feito quatro casos. No Gráfico 5.12 estão representados os resultados obtidos nesta configuração com as respetivas restrições. Ainda no Quadro 5.6 estão representados cada caso bem como o valor que foi tido em conta para a respetiva restrição.

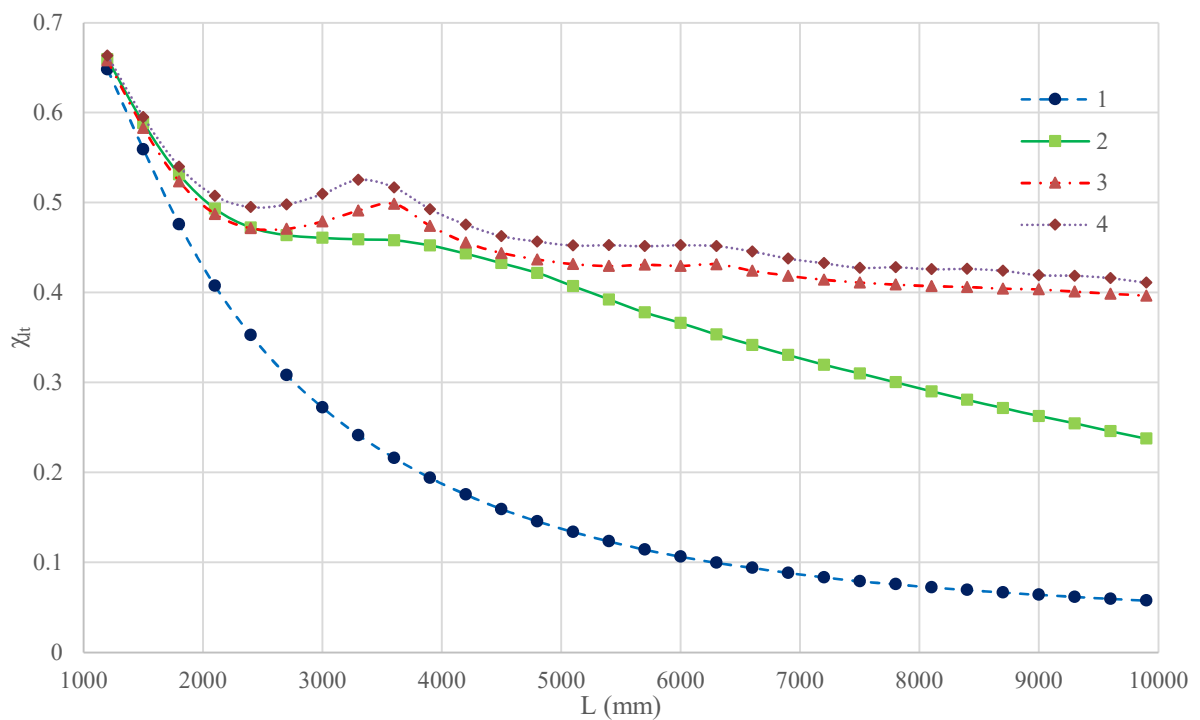


Gráfico 5.12 – Comparação das Reduções da Carga Distribuída com as respetivas Restrições

Quadro 5.6 – Casos do Carregamento Distribuído

<i>Casos</i>	<i>Mola Lateral (K_L)</i>	<i>Mola Rotacional (K_R)</i>
<i>1</i>	0	0
<i>2</i>	∞	0
<i>3</i>	0	∞
<i>4</i>	∞	∞

Seria expectável que o incremento dos momentos críticos fosse visível quando aumento as restrições, no entanto a restrição da rotação é que mais influência os resultados daí ter alguma importância a sua quantificação, principalmente para os maiores vãos.

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação dos perfis enformados a frio é frequentemente em madres para o suporte e de uma cobertura leve. Esta cobertura terá pontos de contato no banzo superior do perfil, o que pode proporcionar um incremento da rigidez do perfil na globalidade. Este incremento pode reduzir a esbelteza normalizada e, consequentemente, resultar um melhor desempenho do perfil.

Com esta informação, o fabricante deste perfil pode fornecer algo aos seus clientes que facilite seu uso no contexto do projeto, sem exigir cálculos adicionais.

Para os perfis mais pequenos a obtenção desta curva não foi possível, porque seria necessário outro tipo de ensaios laboratoriais de forma a calibrar uma curva de encurvadura específica para o comportamento observado.

6

CONCLUSÃO

6.1. SÍNTESE DO ESTUDO REALIZADO

Os perfis enformados a frio, apesar de não serem uma novidade, ainda têm um uso limitado, apesar das suas inúmeras vantagens. Devido à sua utilização restrita, a caracterização destes perfis ainda é reduzida do ponto de vista regulamentar. O processo de fabrico que permite a criação de secções pouco comuns, com características específicas. No entanto, a liberdade ganha no formato da secção resulta em alterações nas propriedades mecânicas dos materiais e no surgimento de tensões residuais com características diferentes dos perfis convencionais.

Atualmente, as normas europeias têm a capacidade de caracterizar as propriedades das secções considerando os seus formatos distintos, de modo a permitir a otimização destas com espessuras reduzidas. Em um ambiente laboratorial, foram escolhidos três perfis com secção em OMEGA para validar as capacidades resistentes calculadas de acordo com normas europeias. Numa primeira análise, as propriedades da secção bruta são muito promissoras, uma vez que conseguem obter melhores valores em comparação direta com a mesma área de aço. Isto indica que o material utilizado nestas secções está a ser bem aproveitado devido à otimização da geometria. No entanto, é importante destacar que foram observadas instabilidades significativas quando aplicado um carregamento ascendente aos perfis. Estas instabilidades precisam de ser cuidadosamente analisadas e consideradas no projeto e no uso destes perfis.

Com base nos ensaios laboratoriais, foi elaborado um modelo numérico utilizando o software ABAQUS. Numa fase inicial, e para aumentar a confiança no modelo desenvolvido, foram criados modelos mais simples para avaliar diferentes parâmetros, cujos resultados pudessem ser obtidos analiticamente. De seguida, os *layouts* utilizados em laboratório foram reproduzidos, incluindo todas as partes utilizadas e a configuração correspondente. Na obtenção dos resultados, procurou-se manter a coerência em três parâmetros: modo de rotura, carga máxima e deslocamento máximo.

Durante os ensaios, foi observado que, quando estes perfis são submetidos a um carregamento ascendente, eles tendem a ser altamente instáveis. A caracterização desse valor crítico de instabilidade é essencial no processo de projeto de uma estrutura metálica. A norma prevê uma metodologia de cálculo associada à redução da resistência em caso de instabilidade, assumindo que os perfis apresentam um comportamento de encurvadura lateral torcional quando sujeitos a momentos de flexão. Este tipo de comportamento é visível quando se utilizam perfis convencionais em formato de I. No entanto, este não

é o caso dos perfis estudados, daí a importância de uma caracterização específica para os perfis com secção OEMGA.

6.2. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Relativamente à extensiva campanha experimental realizada, verificou-se coerência entre os valores analíticos resultantes da aplicação das metodologias do cálculo normativo propostas e os valores experimentais. Os resultados encontram-se dentro dos esperados havendo uma pequena variação que estará associada as elevadas imperfeições geométricas dos banzos inferiores dos perfis.

Os resultados da modelação também são coerentes com os obtidos em laboratório permitindo assim afirmar que os modelos estarão bem calibrados. Com estes modelos bem definidos é possível realizar futuras análises para perceber o comportamento deste tipo de perfis, caso seja desejada a alteração da geometria ou do material utilizado. Ficou comprovada a alteração que o processo de fabrico introduz nas propriedades do material, tendo sido necessário para a calibração dos modelos, o uso de uma curva tensão-deformação diferente das utilizadas nos perfis laminados a quente.

As principais conclusões do estudo de análise da instabilidade utilizando quatro metodologias diferentes (uso da expressão analítica proposta no Anexo do EC3 e análise com os softwares ABAQUS, GBTUL e LTBEAM) são que os perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0 não apresentam o comportamento esperado pelas normas. O comportamento de encurvadura destes perfis é mais orientado para o torcional-distorcional. Assim sendo, no caso dos perfis 70 x 1.5 e 170 x 2.0 não é possível aplicar a metodologia proposta de redução de resistências quando estão sujeitos a instabilidade, para estas seria necessário ter em consideração podendo por passar pela criação de curvas que incluam as encurvaduras distorcionais. Em contrapartida, o perfil 300 x 2.5 apresenta um comportamento dentro do expectável e, para este, é feito o seguimento lógico proposto normativamente. São elaborados gráficos que facilitam a obtenção do valor da redução a ser aplicado tendo em conta o comprimento do perfil, o modo de carregamento efetuado e as restrições aplicadas ao banzo.

6.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como já mencionado previamente uma das barreiras que impede o desenvolvimento mais acentuado da construção com enformados a frio, pelo menos na Europa, é a falta de normas a serem seguidas, bem como bases de dados sobre estes perfis, com caracterização do seu comportamento e regras/pormenores construtivos a serem seguidos de forma a facilitar o seu uso. Sugere-se, por isso, os seguintes trabalhos futuros:

- A avaliação do comportamento à instabilidade de uma ampla quantia de perfis enformados a frio para que a sua resposta aos fenómenos de encurvadura seja mais bem estudada e caracterizada;
- A realização de curvas de encurvadura específicas para que este tipo de perfis, para que se possa aumentar a eficiência destes quando sujeitos a instabilidades,
- Criação de regras construtivas de forma a auxiliar o seu uso na construção corrente, de forma a garantir o seu bom desempenho e reduzir a quantia de incertezas associados ao seu uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre Rossi, Daniel Hideyuki Saito, Carlos Humberto Martins, Alex Sander Clemente de Souza, *The influence of structural imperfections on the LTB strength of I-beams*, Structures, Volume 29, 2021, pág. 1173-1186.
- Basaglia C., Camotim D., Gonçalves R., Graça A., *GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting*, Thin-Walled Structures, Volume 72, 2013, pág. 217-229.
- Bivolaru D., *Numerical methods and technical experimentation in determination of residual stresses in cold-formed profiles*, Final Work. University of Liege, Belgium.
- British Standard Institution. BS EN 1993-1-3:2006. *Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 Design of cold-formed Steel Structures*, London, British Standard Institution.
- British Standard Institution. BS EN 1993-1-5:2006. *Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-5 Plated structural elements*, London, British Standard Institution.
- Schafer B.W., T. Peköz, *Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 47, Issue 3, 1998, Pages 193-210.
- Dubina D., Viorel Ungureanu and Raffaele Landolfo (2012) - *Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3 Design of cold-formed Steel Structures*, Wiley.
- Dubina D., Viorel Ungureanu, *Local/distortional and overall interactive buckling of thin-walled cold formed steel columns with open cross-sections*, Thin-Walled Structures, Volume 182, Parte A, 2023.
- Gardner G., Yun X., *Description of stress-strain curves for cold-formed steels*, Construction and Building Materials, 2018, pág. 527-538.
- Gardner G., Yun X., *Stress-strain curves for hot-rolled steels*, Journal of Constructional Steel Research, 2017, pág 36-46.
- Hill H. N., *Determination of Stress-Strain Relations From "Offset" Yield Strength Values*, Technical Note No. 927, Washington, D.C., 1944.
- Hosford, W. - Iron and Steel. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. - Strain Aging.
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 1993-1-1:2010. *Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Instituto Português da Qualidade.
- Kannan R., Hendry S., Higham N. J., Tisseur F., *Detecting the Causes of Ill-Conditioning in Structural Finite Elements Models*, Computers & Structures, Volume 133, 2014, pág. 79-89.
- Kitipornchai, S., Trahair, N., S., *Buckling Properties of Monosymmetric I-Beams*. Department of Civil Engineering, Research Report No. CE4, Maio, 1979, Queensland.
- Lei Zhang, Gen-shu Tong, *Lateral buckling of simply supported C- and Z-section purlins with top flange horizontally restrained*, Thin-Walled Structures, 2016, pág. 155-167.
- Long-yuan Li, *Lateral-torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheeting*, Thin-Walled Structures, 2004, pág. 995-1011.

- Luís Simões da Silva, Helena Gervásio, *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas - Métodos Avançados*, CMM, 2020.
- Raheem J., Dubey S.K., Dindorkar N., *Numerical Simulation for Critical Elastic Moment of Steel Beams with Different Cross Sections*, International Journal of Civil Engineering and Technology, volume 9, 2018, pág. 699-706.
- Ren C., Zhao X., Chen Y., *Buckling behaviour of partially restrained cold-formed steel zed purlins subject to transverse distributed uplift loading*, Engineering Structures, 2015, Shanghai.
- Ren C., Liu X., He W., Dai L., *Buckling analyses of cold-formed steel Sigma sections in purlin-sheeting systems subjected to uniformly distributed uplift loading*, Structures, 2021, Shanghai.
- Rondal J., Maquoi R., *Formulation d'Ayrton-Perry pour le flambement des barres métalliques*, Construction Métallique, 4, 1979, pág. 41-53.
- Rondal J., Maquoi R., *Single Equation for SSRC Column Strength Curves*, ASCE J. Struct. Div., Vol. 105, No. ST1, 1979, pág. 247-250.
- Rui A. D. Simões, *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas*, CMM, 2014.
- R. Bebiano, D. Camotin, R. Gonçalves, *GBTuL 2.0 – A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration of thin-walled members*, Thin-Walled Structures, Volume 124, 2018 pág. 235-257.
- Sfintesco D., *Fondement expérimental des courbes européennes de flambement*, Construction Métallique N°3, 1970, pág. 5-12.
- Sivaganesh Selvaraj, Mahendrakumar Madhavan, *Sheathing Bracing Requirements for Cold-formed Steel Wall Panels: Experimental Investigation*, Structures, Volume 19, 2019, pág. 258-276.
- Xie Wenbin, Mohareb Magdi, *Elastic critical moment for monosymmetric beams under linear moment gradients*, Canadian Journal of Civil Engineering, 2021.
- Ye Z., Kettle R., Schafer B., Li L., *Buckling behavior of cold-formed zed-purlins partially restrained by steel sheeting*, Thin-Walled Structures, 2002, pág. 853-864.
- WIKIPEDIA: (<https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>), 31 de Março de 2023.
- WIKIPEDIA: (https://en.wikipedia.org/wiki/Cold-formed_steel), 17 de Março de 2023.
- W. Ramberg, W.R. Osgood, *Description of stress-strain curves by three parameters*, Technical Note No. 902, Washington, D.C., 1943.

ANEXOS

ANEXO A

PERDAS DE RIGIDEZ DA ALMA DO 300x2.5 E DEFORMAÇÕES LOCAIS EM LABORATÓRIO



Figura A.1 – Perda de Rigidez da Alma do Perfil 300

Durante os ensaios aos perfil OMEGATEK 300x2.5 no *Layout* 1, apesar de não ser expectável o uso deste para este perfil, foi notado uma perda de rigidez na alma no perfil na zona de apoio devido ao esforço transversal.

Ainda quando este é invertido é notável a deformação local do banzo que se encontra em contacto com o apoio devido á baixa espessura da secção.

Isto vêm a ser representado no modelo numérico como é mostrado no Anexo C.



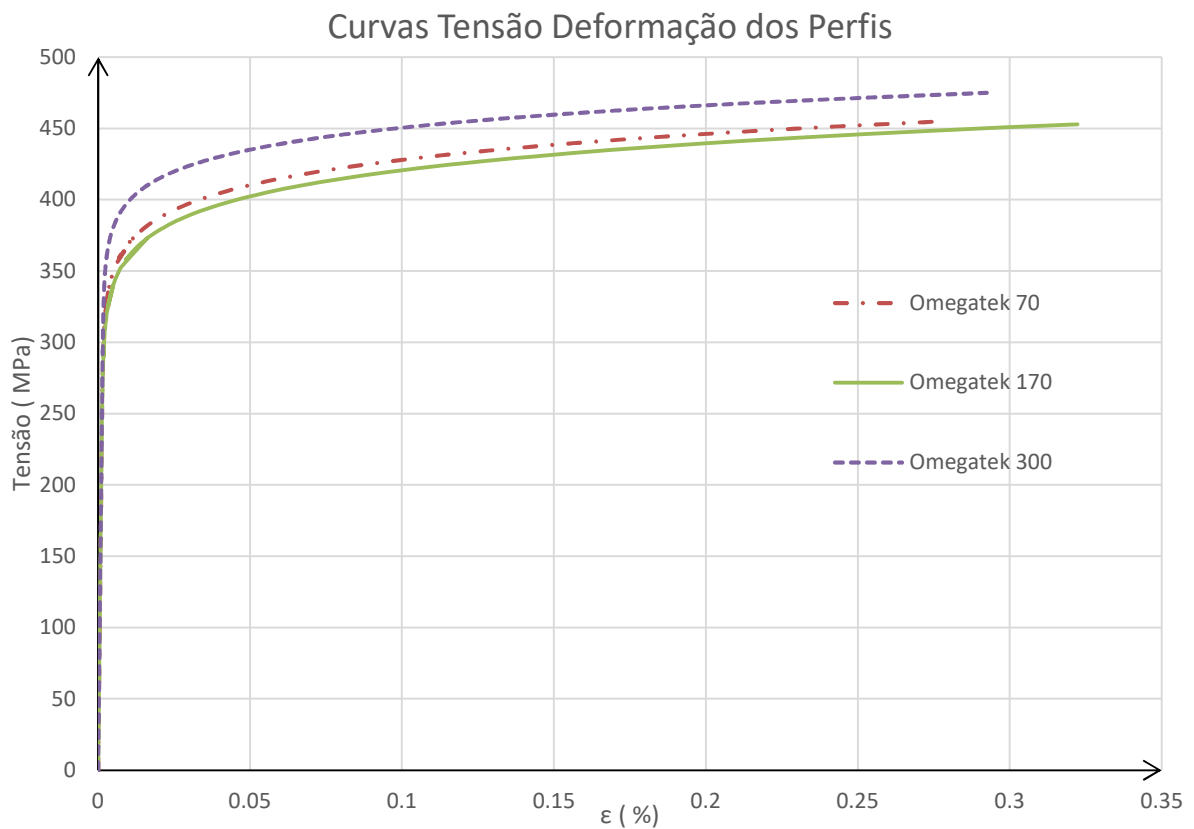
Figura A.2 – Deformação Local do Banzo do Perfil 300

ANEXO B.1

MATERIAIS CONSIDERADOS NA MODELAÇÃO E AS RESPECTIVAS CURVAS

Quadro B.1.1 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Testados e Usados nos Modelos

70 x 1.5			
<i>Cedência</i>	340	MPa	
<i>Última</i>	455	MPa	
<i>Modulo de Elasticidade</i>	210000	MPa	
<i>Extensão Máxima</i>	27.5	%	
170 x 2.0			
<i>Cedência</i>	330	MPa	
<i>Última</i>	453	MPa	
<i>Modulo de Elasticidade</i>	210000	MPa	
<i>Extensão Máxima</i>	32	%	
300 x 2.5			
<i>Cedência</i>	373	MPa	
<i>Última</i>	475	MPa	
<i>Modulo de Elasticidade</i>	210000	MPa	
<i>Extensão Máxima</i>	29	%	



ANEXO B.2

PARÂMETROS ADICIONAIS DO ABAQUS

Tangential Behavior

Friction formulation: Penalty

Friction **Shear Stress** **Elastic Slip**

Directionality: ☒ Isotropic ☐ Anisotropic (Standard only)

☐ Use slip-rate-dependent data

☐ Use contact-pressure-dependent data

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Friction Coeff
0.35

Normal Behavior

Pressure-Overclosure: "Hard" Contact

Constraint enforcement method: Default

☒ Allow separation after contact

Figura B.2.1 – Propriedades usadas na definição do Contacto Geral

Coupling type: ☐ Kinematic ☐ Continuum distributing ☒ Structural distributing

Constrained degrees of freedom:

☒ U1 ☒ U2 ☒ U3 ☒ UR1 ☒ UR2 ☒ UR3

Weighting method: Uniform

Influence radius: ☒ To outermost point on the region ☐ Specify:

Figura B.2.2 – Propriedades usadas na definição da Transmissão de Deslocamento do Ponto de Referência para as Placas de Carregamento

ANEXO C

PERDAS DE RIGIDEZ DO OMEGA 300X2.5 E DEFORMAÇÕES LOCAIS NO MODELO NUMÉRICO

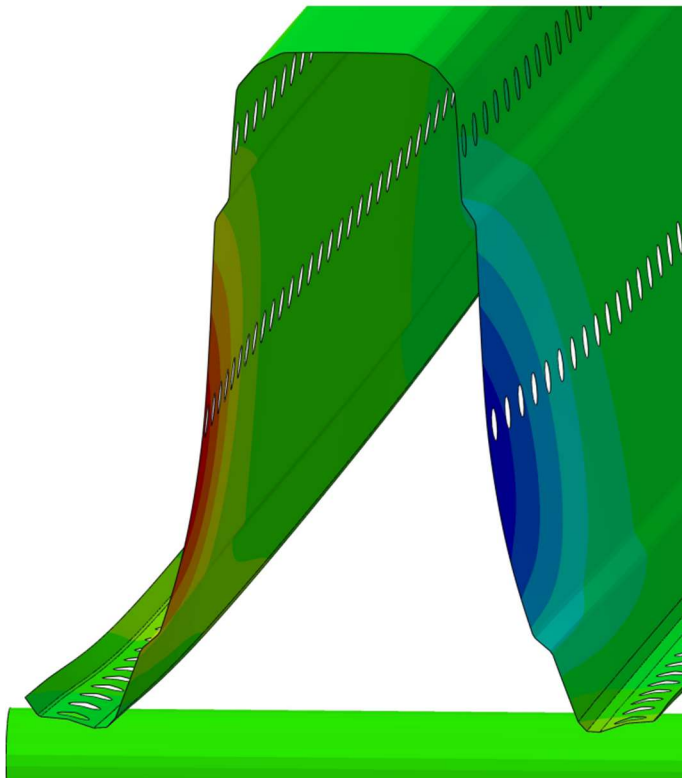


Figura C.1 – Perda de Rigidez da Alma do Perfil 300 no Modelo Numérico

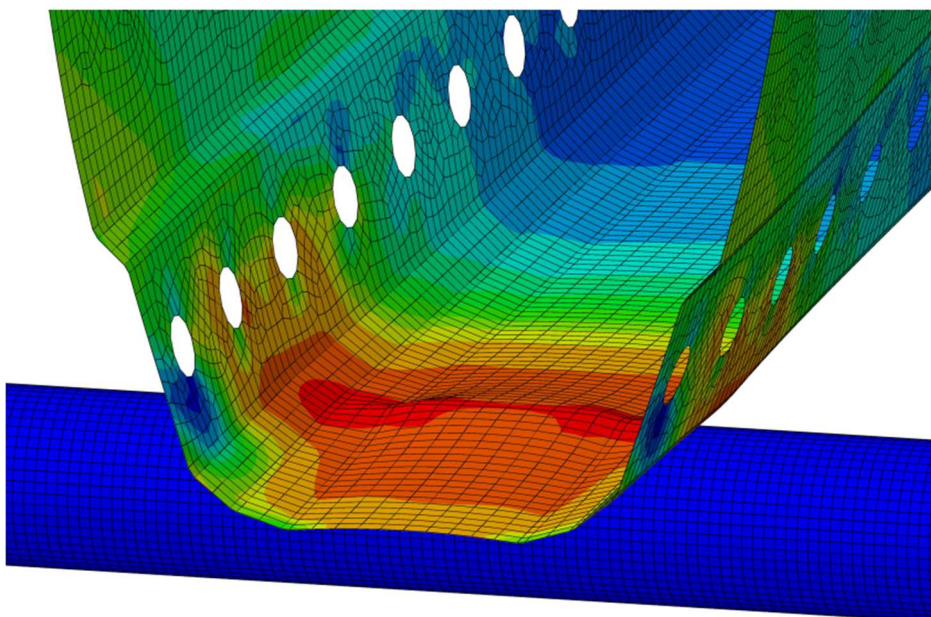


Figura C.2 – Deformação Local do Banzo do Perfil 300 no Modelo Numérico

ANEXO D.1

QUADRO DE RESULTADOS DA SENSIBILIDADE DA MALHA

Quadro D.1.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.1 a)

$\psi = 1$		$\psi = 0$	
Dimensão da Malha	M_{rd} (kN.m)	Dimensão da Malha	M_{rd} (kN.m)
24	0.5085	24	0.9337
23	0.5085	23	0.9336
22	0.5084	22	0.9335
21	0.5084	21	0.9334
20	0.5083	20	0.9333
19	0.5083	19	0.9331
18	0.5082	18	0.933
17	0.5082	17	0.9329
16	0.5081	16	0.9328
15	0.508	15	0.9327
14	0.5119	14	0.9398
13	0.5203	13	0.9562
12	0.5202	12	0.956
11	0.5201	11	0.9559
10	0.5214	10	0.9582
9	0.5213	9	0.9581
8	0.5239	8	0.9632
7	0.5357	7	0.9854
6	0.5359	6	0.9857
5	0.5384	5	0.9907
4	0.5409	4	0.9956
3	0.5414	3	0.9964
2	0.5446	2	1.002

ANEXO D.2

Quadro D.2.1 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.1 b)

$\psi = 1$					
Subdivisão da Malha	M_{rd} (kN.m)	Torção	Distorção 1	Distorção 2	Outros
5	1.75	48.74%	26.96%	13.18%	11.12%
7	1.74	48.20%	26.58%	12.99%	12.23%
9	1.77	48.08%	27.04%	13.35%	11.53%
10	1.78	48.15%	27.42%	13.64%	10.79%
12	1.82	48.39%	28.21%	14.26%	9.14%
14	1.85	48.63%	28.85%	14.81%	7.71%
15	1.86	48.72%	29.11%	15.04%	7.13%
17	1.883	48.85%	29.49%	15.42%	6.24%
19	1.899	48.91%	29.74%	15.71%	5.64%
20	1.906	48.91%	29.82%	15.83%	5.44%
21	1.912	48.91%	29.88%	15.93%	5.28%
23	1.922	48.85%	29.94%	16.09%	5.12%
25	1.932	48.75%	29.94%	16.22%	5.09%

$\psi = 0$					
Subdivisão da Malha	M_{rd} (kN.m)	Torção	Distorção 1	Distorção 2	Outros
5	5.23	45.29%	39.34%	6.25%	9.12%
7	5.07	39.81%	35.29%	7.37%	17.53%
9	5.48	15.95%	23.97%	20.17%	39.91%
10	5.39	22.22%	17.83%	16.69%	43.26%
12	5.45	38.43%	34.45%	6.10%	21.02%
14	5.39	41.50%	36.88%	7.03%	14.59%
15	5.39	42.15%	37.36%	7.15%	13.34%
17	5.41	43.21%	38.14%	7.20%	11.45%
19	5.444	44.09%	38.79%	7.18%	9.94%
20	5.458	44.35%	39.00%	7.14%	9.51%
21	5.469	44.10%	38.82%	7.02%	10.06%
23	5.508	39.93%	34.42%	6.38%	19.27%
25	5.52	45.53%	39.59%	7.12%	7.76%

ANEXO E

MODOS DO GBTUL PARA O PERFIL EM I

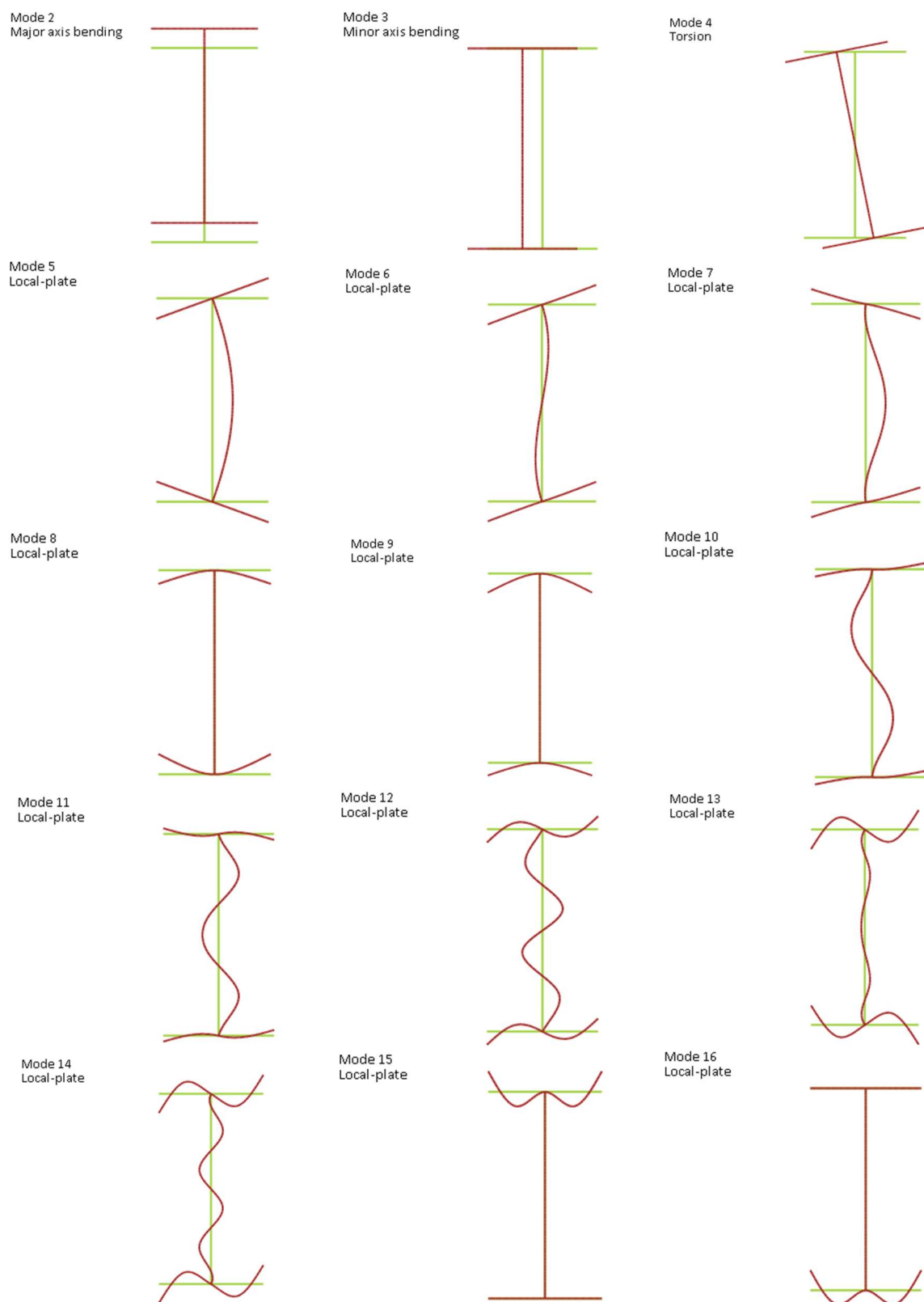


Figura E.1 – Modos de Rotura possíveis de um Perfil em I

ANEXO F

QUADRO DE RESULTADOS DA SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO K_w

Quadro F.1 – Resultados obtidos em LTBEAM do Gráfico 5.3

		2 m		4m		6 m		8 m	
		$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$
IPE 140	$\psi = 1$	26.43	42.41	11.38	14.67	7.34	8.667	5.44	6.15
	$\psi = 0$	48.38	79.09	20.52	27.05	13.13	15.82	9.7	11.15
	Variação	38%		23%		16%		12%	
IPE 300	$\psi = 1$	504.97	1055.8	159.21	285.2	90.04	140.93	62.75	89.13
	$\psi = 0$	935	1979.8	293.08	533.36	164.58	262.6	113.98	165.4
	Variação	52%		45%		37%		30%	

		10 m		12 m		14 m		16 m	
		$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$	$K_w = 1$	$K_w = 0.5$
IPE 140	$\psi = 1$	4.33	4.76	3.6	3.9	3.07	3.3	2.68	2.85
	$\psi = 0$	7.7	8.6	6.38	7.01	5.45	5.91	4.76	5.11
	Variação	10%		8%		7%		6%	
IPE 300	$\psi = 1$	48.33	64.15	39.4	49.86	33.32	40.7	28.88	34.38
	$\psi = 0$	87.33	118.55	70.91	91.77	59.77	74.65	51.7	62.85
	Variação	25%		22%		19%		17%	

ANEXO G

MODOS DO GBTUL PARA O PERFIL UAP

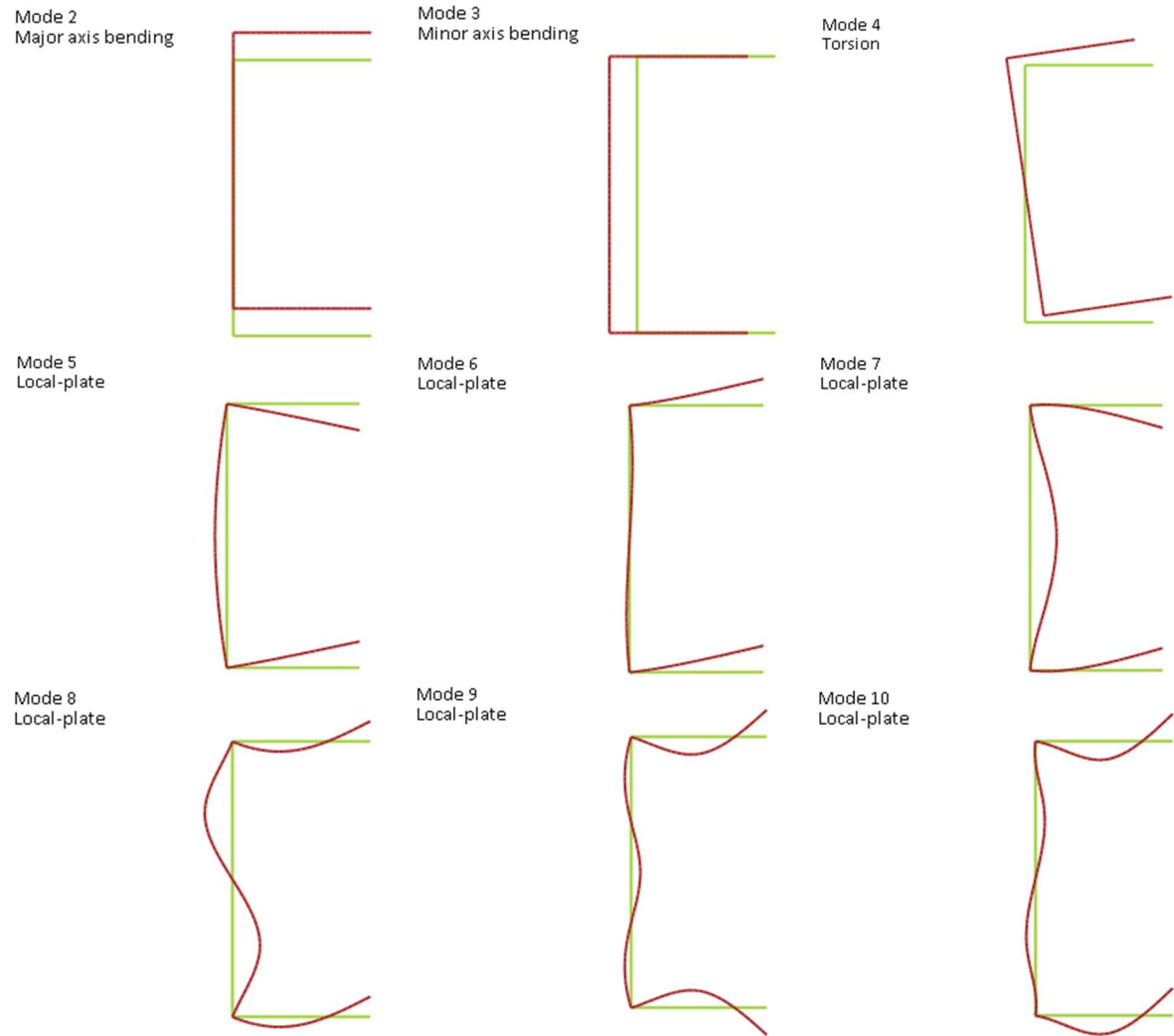


Figura G.1 – Modos de Rotura possíveis de um Perfil em UAP

ANEXO H.1

QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 70x1.5

Quadro H.1.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.5 a)

ABAQUS					
L (mm)	$\psi = 1$	0.75	$\psi = 0.5$	0.25	$\psi = 0$
600	4.099	4.676	5.412	6.36	7.576
900	2.005	2.288	2.65	3.121	3.734
1200	1.215	1.386	1.605	1.89	2.261
1500	0.837	0.954	1.105	1.3	1.552
1800	0.628	0.717	0.83	0.975	1.161
2100	0.502	0.573	0.662	0.777	0.922
2400	0.402	0.479	0.553	0.648	0.767
2700	0.363	0.414	0.478	0.559	0.659
3000	0.323	0.368	0.424	0.495	0.581
3300	0.293	0.333	0.384	0.447	0.523
3600	0.269	0.307	0.354	0.47	0.478
3900	0.251	0.286	0.329	0.381	0.442
4200	0.237	0.27	0.31	0.358	0.413
4500	0.225	0.256	0.294	0.339	0.39
4800	0.216	0.245	0.281	0.323	0.37
5100	0.208	0.236	0.27	0.309	0.353
5400	0.201	0.228	0.261	0.298	0.338
5700	0.195	0.221	0.253	0.288	0.326
6000	0.19	0.215	0.246	0.279	0.315
6300	0.185	0.21	0.239	0.271	0.305
6600	0.181	0.206	0.234	0.264	0.296
6900	0.178	0.202	0.229	0.258	0.288
7200	0.175	0.198	0.224	0.252	0.281
7500	0.172	0.195	0.22	0.247	0.275
7800	0.169	0.191	0.217	0.243	0.269
8100	0.166	0.189	0.213	0.238	0.263
8400	0.164	0.186	0.21	0.234	0.258
8700	0.162	0.184	0.207	0.23	0.254
9000	0.16	0.181	0.204	0.227	0.249
9300	0.158	0.179	0.202	0.224	0.245
9600	0.157	0.177	0.199	0.221	0.242
9900	0.155	0.175	0.197	0.218	0.238

Quadro H.1.2 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.5 b)

GBTUL					
L (mm)	$\psi = 1$	0.75	$\psi = 0.5$	0.25	$\psi = 0$
600	4.63745	5.29005	6.12213	7.19227	8.57658
900	2.87542	3.27724	3.77856	4.40017	5.15242
1200	2.42637	2.75882	3.15013	3.59269	4.06823
1500	2.24978	2.54746	2.86561	3.18522	3.49413
1800	2.11711	2.38663	2.64892	2.89278	3.11816
2100	1.97264	2.21992	2.45218	2.6623	2.85329
2400	1.81243	2.04277	2.26468	2.46608	2.6471
2700	1.64815	1.86265	2.08085	2.28532	2.46916
3000	1.49154	1.68971	1.90247	2.1122	2.30475
3300	1.34946	1.53142	1.73517	1.9467	2.14831
3600	1.22425	1.39099	1.58334	1.79182	1.99917
3900	1.11553	1.26849	1.44857	1.65019	1.85866
4200	1.02165	1.16238	1.33037	1.52288	1.72832
4500	0.9406	1.07056	1.22717	1.4096	1.60901
4800	0.870415	0.990929	1.13709	1.30928	1.50084
5100	0.809348	0.921564	1.05824	1.22053	1.40332
5400	0.755918	0.860822	0.988957	1.14188	1.31564
5700	0.708895	0.807329	0.927775	1.072	1.23683
6000	0.667266	0.759949	0.873474	1.00968	1.16593
6300	0.6302	0.717747	0.825032	0.953885	1.102
6600	0.597017	0.679956	0.781601	0.903716	1.04423
6900	0.567157	0.645942	0.742474	0.85842	0.99185
7200	0.540158	0.61518	0.707064	0.81736	0.944224
7500	0.515634	0.587237	0.67488	0.779995	0.900782
7800	0.493266	0.561746	0.645511	0.745865	0.861034
8100	0.472784	0.538404	0.618608	0.714581	0.824556
8400	0.453961	0.516951	0.593879	0.685811	0.79098
8700	0.436605	0.497169	0.571072	0.65927	0.759989
9000	0.420549	0.47887	0.549974	0.634714	0.731306
9300	0.405655	0.461893	0.5304	0.61193	0.704691
9600	0.391799	0.446101	0.512191	0.590737	0.679936
9900	0.378876	0.431372	0.495211	0.570975	0.656856

ANEXO H.2

QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 170x2.0

Quadro H.2.1 – Resultados do ABAQUS para o Gráfico 5.6 a)

ABAQUS					
L (mm)	$\psi = 1$	0.75	$\psi = 0.5$	0.25	$\psi = 0$
900	20.05	22.83	26.19	29.73	34.41
1200	11.9	13.57	15.68	18.338	21.61
1500	8.04	9.17	10.616	12.472	14.845
1800	5.856	6.681	7.736	9.103	10.872
2100	4.4758	5.106	5.914	6.963	8.327
2400	3.546	4.046	4.686	5.518	6.601
2700	2.892	3.3	3.822	4.5	5.383
3000	2.417	2.758	3.194	3.76	4.495
3300	2.062	2.352	2.724	3.205	3.829
3600	1.789	2.042	2.364	2.78	3.318
3900	1.576	1.798	2.082	2.447	2.918
4200	1.407	1.605	1.857	2.182	2.599
4500	1.27	1.448	1.676	1.968	2.341
4800	1.157	1.32	1.527	1.791	2.128
5100	1.064	1.213	1.403	1.645	1.952
5400	0.986	1.124	1.299	1.522	1.803
5700	0.919	1.048	1.211	1.418	1.677
6000	0.862	0.983	1.136	1.329	1.569
6300	0.814	0.928	1.071	1.252	1.476
6600	0.771	0.879	1.015	1.185	1.395
6900	0.734	0.837	0.966	1.126	1.323
7200	0.702	0.8	0.922	1.075	1.261
7500	0.673	0.767	0.884	1.029	1.205
7800	0.647	0.738	0.85	0.989	1.155
8100	0.625	0.711	0.82	0.952	1.111
8400	0.604	0.688	0.792	0.919	1.071
8700	0.586	0.667	0.768	0.89	1.034
9000	0.569	0.648	0.745	0.863	1.001
9300	0.554	0.631	0.725	0.839	0.971
9600	0.54	0.615	0.707	0.817	0.944
9900	0.528	0.613	0.69	0.796	0.919

Quadro H.2.2 – Resultados do GBTUL para o Gráfico 5.6 b)

GBTUL					
L (mm)	$\psi = 1$	0.75	$\psi = 0.5$	0.25	$\psi = 0$
900	16.6228	18.9136	21.776	25.2366	29.2418
1200	10.4793	11.9494	13.8028	16.1103	19.2857
1500	7.70797	8.7895	10.1553	11.8832	14.0296
1800	6.37059	7.26121	8.37379	9.75585	11.4308
2100	5.69086	6.48104	7.44821	8.60951	9.95133
2400	5.33234	6.06484	6.93348	7.9263	9.00486
2700	5.13812	5.83291	6.62048	7.46611	8.32701
3000	5.03066	5.69606	6.40639	7.11855	7.80444
3300	4.96937	5.6073	6.24003	6.83587	7.3888
3600	4.9316	5.54058	6.09749	6.59899	7.05575
3900	4.90387	5.48127	5.96941	6.39944	6.78841
4200	4.87775	5.42199	5.85315	6.2313	6.57258
4500	4.84775	5.36013	5.7479	6.08891	6.39611
4800	4.81036	5.29573	5.65257	5.96675	6.24905
5100	4.76344	5.22942	5.56538	5.85992	6.12367
5400	4.70596	5.1612	5.48415	5.76436	6.01417
5700	4.63776	5.09017	5.40669	5.67686	5.9163
6000	4.55933	5.01488	5.33096	5.59493	5.82698
6300	4.47172	4.93381	5.25514	5.51664	5.74394
6600	4.37626	4.84584	5.17766	5.44044	5.66547
6900	4.27451	4.75056	5.09718	5.36508	5.59026
7200	4.16808	4.64832	5.01267	5.28947	5.51727
7500	4.05853	4.54019	4.92342	5.21273	5.44563
7800	3.94728	4.42761	4.8292	5.13411	5.3746
8100	3.83562	4.31217	4.73019	5.05302	5.30357
8400	3.72462	4.19539	4.62701	4.96908	5.23199
8700	3.61517	4.07861	4.52059	4.88213	5.15942
9000	3.50797	3.96295	4.41199	4.79221	5.0855
9300	3.40356	3.84928	4.30234	4.69961	5.00998
9600	3.30232	3.73828	4.19269	4.60477	4.93269
9900	3.20451	3.63043	4.08393	4.50828	4.85361

ANEXO H.3

**QUADRO DOS MOMENTOS CRÍTICOS DOS PERFIS OMEGA 300x2.5, OS PARÂMETROS DE
ESBELTEZA E AS REDUÇÕES.**

Quadro H.3.1 – Resultados do ABAQUS para os Gráfico 5.7 a) e 5.9

L (mm)	M _{cr} (kN.m)			Esbelteza ($\bar{\lambda}_{lt}$)			Redução (χ_{lt})		
	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$
1200	27.75	35.73	42.95	1.224	1.079	0.984	0.465	0.548	0.607
1500	18.45	24.15	31.95	1.501	1.312	1.141	0.342	0.421	0.511
1800	13.37	17.59	24.02	1.764	1.538	1.316	0.261	0.329	0.419
2100	10.29	13.57	18.79	2.010	1.751	1.488	0.208	0.264	0.347
2400	8.25	10.89	15.18	2.245	1.954	1.655	0.170	0.218	0.291
2700	6.8	8.98	12.56	2.473	2.152	1.820	0.143	0.184	0.247
3000	5.71	7.55	10.58	2.699	2.347	1.983	0.121	0.157	0.213
3300	4.87	6.44	9.03	2.922	2.541	2.146	0.104	0.136	0.185
3600	4.2	5.55	7.8	3.147	2.737	2.309	0.091	0.118	0.162
3900	3.66	4.85	6.81	3.371	2.928	2.471	0.080	0.104	0.143
4200	3.23	4.27	6	3.588	3.121	2.633	0.071	0.092	0.127
4500	2.87	3.79	5.33	3.807	3.313	2.793	0.063	0.082	0.114
4800	2.57	3.4	4.78	4.023	3.497	2.950	0.057	0.074	0.103
5100	2.32	3.07	4.32	4.234	3.681	3.103	0.052	0.067	0.093
5400	2.11	2.79	3.92	4.440	3.861	3.257	0.047	0.062	0.085
5700	1.93	2.55	3.58	4.642	4.039	3.408	0.043	0.057	0.078
6000	1.77	2.35	3.29	4.847	4.207	3.555	0.040	0.052	0.072
6300	1.64	2.17	3.04	5.036	4.378	3.699	0.037	0.048	0.067
6600	1.52	2.02	2.82	5.231	4.538	3.840	0.034	0.045	0.062
6900	1.42	1.88	2.63	5.412	4.703	3.977	0.032	0.042	0.058
7200	1.33	1.76	2.46	5.592	4.861	4.112	0.030	0.040	0.055
7500	1.25	1.66	2.32	5.768	5.005	4.234	0.028	0.037	0.052
7800	1.18	1.56	2.18	5.937	5.163	4.368	0.027	0.035	0.049
8100	1.12	1.48	2.07	6.094	5.301	4.482	0.026	0.033	0.046
8400	1.06	1.41	1.96	6.264	5.431	4.606	0.024	0.032	0.044
8700	1.01	1.34	1.86	6.417	5.571	4.729	0.023	0.030	0.042
9000	0.97	1.28	1.78	6.548	5.700	4.834	0.022	0.029	0.040
9300	0.93	1.23	1.7	6.687	5.815	4.946	0.021	0.028	0.038
9600	0.89	1.17	1.63	6.836	5.962	5.051	0.020	0.027	0.037
9900	0.85	1.13	1.56	6.995	6.067	5.163	0.019	0.026	0.035

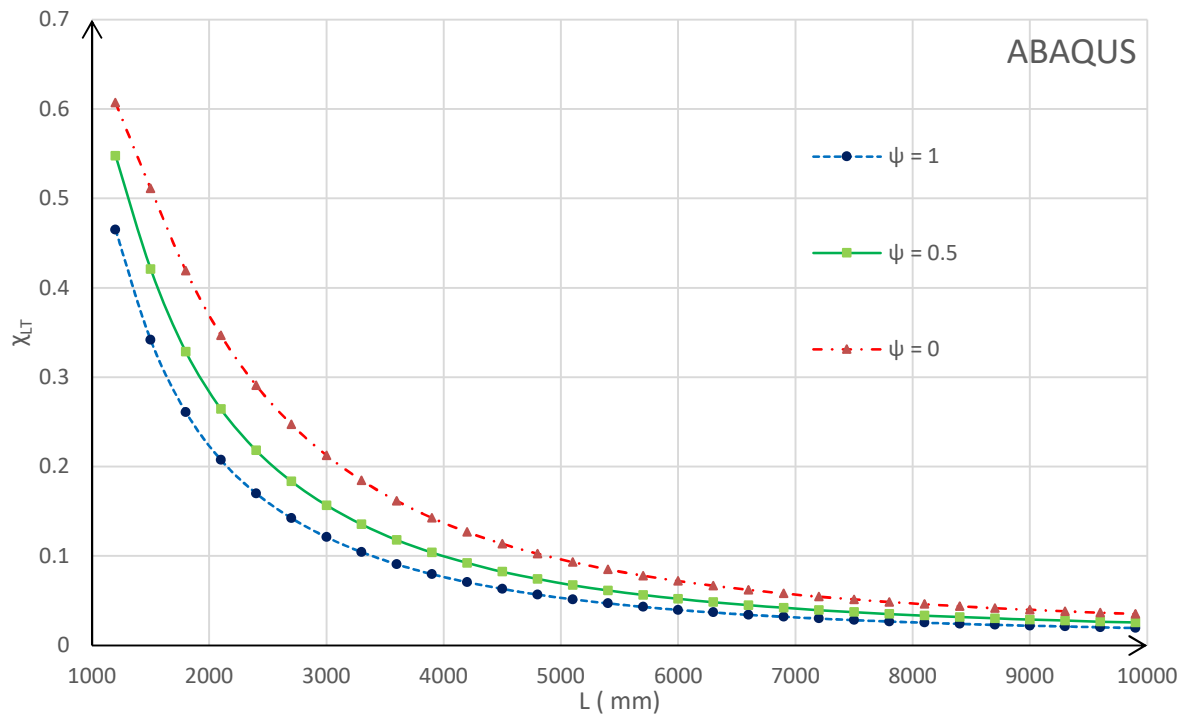
Quadro H.3.2 – Resultados do GBTUL para os Gráfico 5.7 b) e 5.9

	M_{cr} (kN.m)			Esbelteza ($\bar{\lambda}_{lt}$)			Redução (χ_{lt})		
L (mm)	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$	$\psi = 1$	$\psi = 0.5$	$\psi = 0$
1200	35.647	47.061	65.757	1.080	0.940	0.795	0.547	0.635	0.727
1500	23.850	31.515	44.356	1.321	1.149	0.968	0.417	0.507	0.617
1800	17.391	22.979	32.335	1.546	1.345	1.134	0.326	0.406	0.515
2100	13.427	17.736	24.911	1.760	1.531	1.292	0.262	0.331	0.431
2400	10.763	14.211	19.919	1.966	1.711	1.445	0.216	0.275	0.363
2700	8.851	11.684	16.349	2.168	1.887	1.595	0.181	0.232	0.310
3000	7.421	9.795	13.691	2.367	2.061	1.743	0.154	0.199	0.266
3300	6.323	8.344	11.657	2.565	2.233	1.889	0.133	0.172	0.232
3600	5.462	7.208	10.068	2.759	2.402	2.032	0.116	0.150	0.204
3900	4.777	6.304	8.805	2.951	2.569	2.173	0.103	0.133	0.180
4200	4.224	5.574	7.786	3.138	2.732	2.311	0.091	0.119	0.161
4500	3.772	4.978	6.953	3.321	2.891	2.446	0.082	0.107	0.145
4800	3.399	4.485	6.264	3.498	3.045	2.577	0.074	0.097	0.132
5100	3.087	4.074	5.687	3.670	3.195	2.704	0.068	0.088	0.121
5400	2.825	3.727	5.201	3.837	3.341	2.828	0.062	0.081	0.111
5700	2.602	3.432	4.786	3.998	3.481	2.948	0.058	0.075	0.103
6000	2.411	3.180	4.431	4.154	3.617	3.064	0.054	0.070	0.096
6300	2.246	2.962	4.123	4.303	3.747	3.176	0.050	0.065	0.089
6600	2.102	2.772	3.855	4.448	3.873	3.285	0.047	0.061	0.084
6900	1.977	2.607	3.620	4.586	3.994	3.390	0.044	0.058	0.079
7200	1.867	2.461	3.413	4.719	4.111	3.491	0.042	0.055	0.075
7500	1.770	2.333	3.230	4.847	4.223	3.588	0.040	0.052	0.071
7800	1.684	2.218	3.067	4.970	4.330	3.683	0.038	0.049	0.067
8100	1.607	2.116	2.921	5.087	4.433	3.773	0.036	0.047	0.064
8400	1.538	2.025	2.790	5.200	4.532	3.861	0.035	0.045	0.062
8700	1.476	1.943	2.672	5.308	4.627	3.945	0.033	0.044	0.059
9000	1.420	1.868	2.565	5.412	4.718	4.026	0.032	0.042	0.057
9300	1.370	1.801	2.468	5.511	4.805	4.105	0.031	0.040	0.055
9600	1.324	1.740	2.380	5.606	4.889	4.180	0.030	0.039	0.053
9900	1.282	1.684	2.299	5.697	4.969	4.253	0.029	0.038	0.051

ANEXO H.4

GRÁFICOS DAS REDUÇÕES PELOS COMPRIMENTOS DOS PERFIS OMEGA 300x2.5

a)



b)

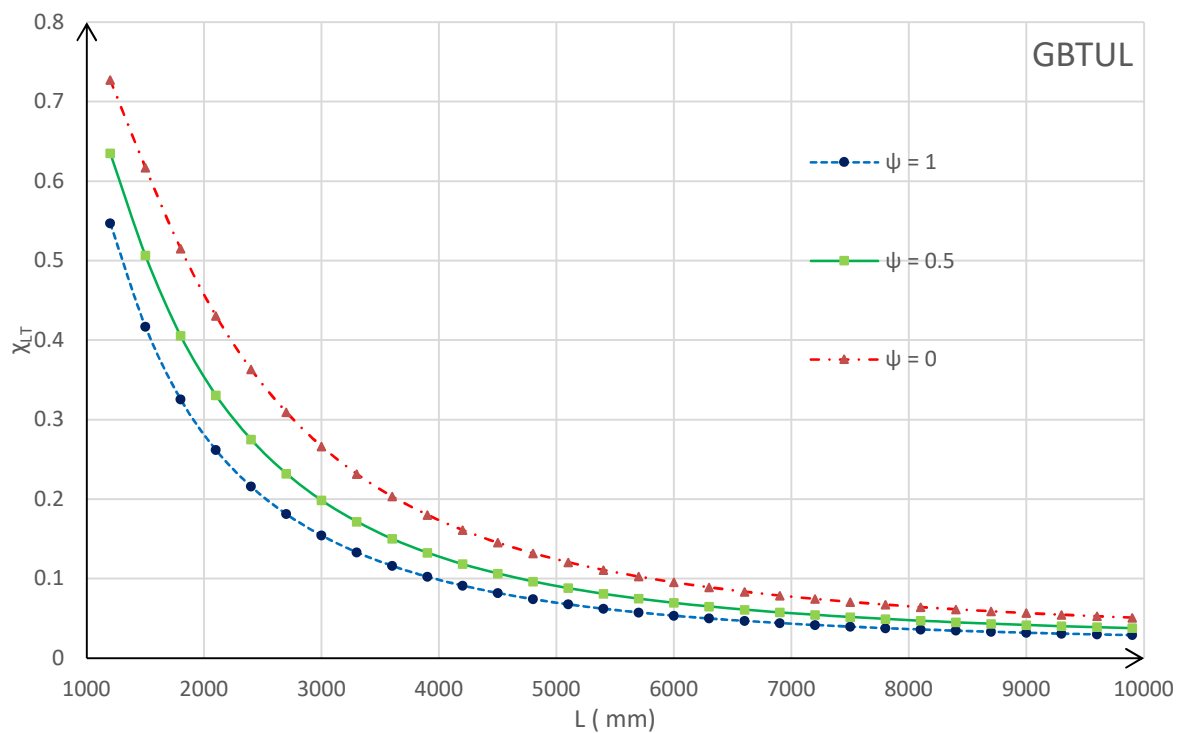


Gráfico H.4.1 – Reduções não Apresentadas no Gráfico 5.9: a) ABAQUS, b) GBTUL

ANEXO H.6

MACRO ELABORADA E USADA NO AUXÍLIO DA CRIAÇÃO DE MODELOS

```

1  from abaqus import *
2  from abaqusConstants import *
3  import __main__
4
5  def Macro1():
6      import section
7      import regionToolset
8      import displayGroupMdbToolset as dgm
9      import part
10     import material
11     import assembly
12     import step
13     import interaction
14     import load
15     import mesh
16     import optimization
17     import job
18     import sketch
19     import visualization
20     import xyPlot
21     import displayGroupOdbToolset as dgo
22     import connectorBehavior
23     L = 900
24
25     #Creating a while loop to change the lenght of the Beams
26
27     while L != 10200:
28         mdb.Model(name=str(L), modelType=STANDARD_EXPLICIT)
29         session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=None)
30
31     #Using a predefined sketch to define the geometry os the cross-section
32
33     step = mdb.openStep(
34         'Abaqus Perfis Omega/Sem Restrição/300/Omegatek
35         300.stp',
36         scaleFromFile=OFF)
37     mdb.models[str(L)].ConstrainedSketchFromGeometryFile(name='Omegatel 170',
38         geometryFile=step)
39     session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=None)
40     s = mdb.models[str(L)].ConstrainedSketch(name=' profile ', sheetSize=200.0)
41     g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
42     s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
43     s.sketchOptions.setValues(gridOrigin=(0.0, 83.5867797322571))
44     s.retrieveSketch(sketch=mdb.models[str(L)].sketches['Omegatel 170'])
45     session.viewports['Viewport: 1'].view.fitView()
46     p = mdb.models[str(L)].Part(name='Part-1', dimensionality=THREE D,
47         type=DEFORMABLE BODY)
48     p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
49
50     #Giving the Length to the profile according to the value of L
51
52     p.BaseShellExtrude(sketch=s, depth=L)
53     s.unsetPrimaryObject()
54     p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
55     session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
56     del mdb.models[str(L)].sketches['__profile__']
57     session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
58         engineeringFeatures=ON)
59     session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
60         referenceRepresentation=OFF)

```

```

60
61 #Creating the Material with the necessary properties for buckling analysis
62
63 mdb.models[str(L)].Material(name='Material-1')
64 mdb.models[str(L)].materials['Material-1'].Density(table=((7.85e-09, ), ), )
65 mdb.models[str(L)].materials['Material-1'].Elastic(table=((210000.0, 0.3), ))
66 session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues(nearPlane=1035.97,
67 farPlane=1864.19, width=1352.07, height=628.303, viewOffsetX=108.772,
68 viewOffsetY=39.4333)
69
70 #Assigning the material to the profile with the specified thickness
71
72 mdb.models[str(L)].HomogeneousShellSection(name='Section-1', preIntegrate=OFF,
73 material='Material-1', thicknessType=UNIFORM, thickness=2.0,
74 thicknessField='', nodalThicknessField='',
75 idealization=NO IDEALIZATION, poissonDefinition=DEFAULT,
76 thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT, useDensity=OFF,
77 integrationRule=SIMPSON, numIntPts=7)
78 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
79 f = p.faces
80 faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#ffffffff #1ff ]', ), )
81 region = p.Set(faces=faces, name='Set-1')
82 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
83 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Section-1', offset=0.0,
84 offsetType=MIDDLE SURFACE, offsetField='',
85 thicknessAssignment=FROM SECTION)
86 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
87 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
88 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(
89 optimizationTasks=OFF, geometricRestrictions=OFF, stopConditions=OFF)
90 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
91 a.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
92 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
93 a.Instance(name='Part-1-1', part=p, dependent=ON)
94 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(
95 adaptiveMeshConstraints=ON)
96
97 #Creating the Buckling Step with the necessary Eigenvalues
98
99 mdb.models[str(L)].BuckleStep(name='Step-1', previous='Initial', numEigen=5,
100 vectors=100, maxIterations=300)
101 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Step-1')
102 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Initial')
103 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(loads=ON, bcs=ON,
104 predefinedFields=ON, connectors=ON, adaptiveMeshConstraints=OFF)
105 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
106 e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
107 edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=
108 '([#db6db6d5 #b6db6db6 #b6db6db7 #2db6db6d ]', ), )
109 v1 = a.instances['Part-1-1'].vertices
110 verts1 = v1.getSequenceFromMask(mask=('[#ffffffff:2 #3ffffff ]', ), )
111 region = a.Set(vertices=verts1, edges=edges1, name='Set-1')
112
113 #Assigning the Boundary Conditions to both ends
114
115 mdb.models[str(L)].DisplacementBC(name='BC-1', createStepName='Initial',
116 region=region, u1=SET, u2=SET, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET,
117 ur3=UNSET, amplitude=UNSET, distributionType=UNIFORM, fieldName='',
118 localCsys=None)
119 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
120 v1 = a.instances['Part-1-1'].vertices
121 verts1 = v1.getSequenceFromMask(mask=('[#0 #400 ]', ), )
122 region = a.Set(vertices=verts1, name='Set-2')
123 mdb.models[str(L)].DisplacementBC(name='BC-2', createStepName='Initial',
124 region=region, u1=UNSET, u2=UNSET, u3=SET, ur1=UNSET, ur2=UNSET,
125 ur3=UNSET, amplitude=UNSET, distributionType=UNIFORM, fieldName='',
126 localCsys=None)
127 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(loads=OFF, bcs=OFF,
128 predefinedFields=OFF, interactions=ON, constraints=ON,
129 engineeringFeatures=ON)

```

```

131 #Creating Reference Points to apply the Loads
132
133 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
134 a.ReferencePoint(point=(0.0, 0.0, 0.0))
135 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
136 a.ReferencePoint(point=(0.0, 0.0, L))
137 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
138 r1 = a.referencePoints
139 refPoints1=(r1[7], )
140 region1=a.Set(referencePoints=refPoints1, name='m Set-3')
141 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
142 e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
143 edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=(
144     '[#92492491 #24924924 #24924926 #9249249 ]', ), )
145 v1 = a.instances['Part-1-1'].vertices
146 verts1 = v1.getSequenceFromMask(mask=('[#55555553 #55554d55 #155555 ]', ), )
147 region2=a.Set(vertices=verts1, edges=edges1, name='s Set-3')
148
149 #Creating the Coupling restrictions from the Reference Points to the Profile edge
150
151 mdb.models[str(L)].Coupling(name='Constraint-1', controlPoint=region1,
152     surface=region2, influenceRadius=WHOLE_SURFACE,
153     couplingType=STRUCTURAL, weightingMethod=UNIFORM, localCsys=None,
154     u1=ON, u2=ON, u3=ON, ur1=ON, ur2=ON, ur3=ON)
155 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
156 r1 = a.referencePoints
157 refPoints1=(r1[6], )
158 region1=a.Set(referencePoints=refPoints1, name='m Set-5')
159 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
160 e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
161 edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=(
162     '[#49249244 #92492492 #92492491 #24924924 ]', ), )
163 v1 = a.instances['Part-1-1'].vertices
164 verts1 = v1.getSequenceFromMask(mask=('[#aaaaaaac #aaaab2aa #2aaaaa ]', ), )
165 r2 = a.referencePoints
166 refPoints2=(r2[6], )
167 region2=a.Set(vertices=verts1, edges=edges1, referencePoints=refPoints2,
168     name='s_Set-5')
169 mdb.models[str(L)].Coupling(name='Constraint-2', controlPoint=region1,
170     surface=region2, influenceRadius=WHOLE_SURFACE,
171     couplingType=STRUCTURAL, weightingMethod=UNIFORM, localCsys=None,
172     u1=ON, u2=ON, u3=ON, ur1=ON, ur2=ON, ur3=ON)
173 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Step-1')
174 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(loads=ON, bcs=ON,
175     predefinedFields=ON, interactions=OFF, constraints=OFF,
176     engineeringFeatures=OFF)
177 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
178 r1 = a.referencePoints
179 refPoints1=(r1[7], )
180 region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-7')
181
182 #Applying the Moments at the RF
183
184 mdb.models[str(L)].Moment(name='Load-1', createStepName='Step-1', region=region,
185     cml=-1.0, distributionType=UNIFORM, field='', localCsys=None)
186 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
187 r1 = a.referencePoints
188 refPoints1=(r1[6], )
189 region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-8')
190 mdb.models[str(L)].Moment(name='Load-2', createStepName='Step-1', region=region,
191     cml=1.0, distributionType=UNIFORM, field='', localCsys=None)
192 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON, loads=OFF,
193     bcs=OFF, predefinedFields=OFF, connectors=OFF)
194 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
195     meshTechnique=ON)
196 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
197 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
198 session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=OFF,
199     engineeringFeatures=OFF, mesh=ON)
200 session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(
201     meshTechnique=ON)

```

```

202
203 #Meshing the models
204
205 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
206 p.seedPart(size=5.0, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
207 p = mdb.models[str(L)].parts['Part-1']
208 p.generateMesh()
209 a = mdb.models[str(L)].rootAssembly
210 a.regenerate()
211 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
212 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF)
213 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
214     meshTechnique=OFF)
215
216 #Creating the Job and Writing the Input to do the analysis
217
218 mdb.Job(name=str(L), model=str(L), description='', type=ANALYSIS, atTime=None,
219     waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
220     memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,
221     explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
222     modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='',
223     scratch='', resultsFormat=ODB, numThreadsPerMpiProcess=1,
224     multiprocessingMode=DEFAULT, numCpus=1, numGPUs=1)
225 mdb.jobs[str(L)].writeInput(consistencyChecking=OFF)
226 L = L +300
227
228
229

```

Figura H.6.1 – Exemplo do Script em Python que realiza as Análises no ABAQUS