



DIOGO CARVALHO IVO

Aluno finalista, Universidade NOVA de Lisboa.

ENCURVADURA POR DISTORÇÃO: AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DO EC3-1-3

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023



ENCURVADURA POR DISTORÇÃO: AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DO EC3-1-3

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL

DIOGO CARVALHO IVO

Aluno finalista, Universidade NOVA de Lisboa.

Orientador: Doutor André Rafael Dias Martins

Investigador, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Coorientador: Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves

Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

*Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa, FCT-NOVA*

Arguente: Doutor João Carlos G. Rocha de Almeida

*Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa, FCT-NOVA*

Encurvadura por distorção: avaliação dos métodos do EC3-1-3
Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Copyright © Diogo Carvalho Ivo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Se agora como engenheiro aprendi a arte da construção civil, outrora, ao longo do percurso da vida, fui aprendendo a me construir como indivíduo; contudo não cheguei a essa fase da obra sozinho. Diversas pessoas ajudaram nesta empreitada, sendo assim, este espaço foi reservado a elas.

Portanto, agradeço a aqueles que chamo de fundações, que me passaram muitos dos valores que carrego comigo hoje e que sempre estiveram presentes nesta eterna obra que é a vida, a minha família. Meu pai, Hielson, e minha mãe, Meyre, que sempre acreditaram nas minhas escolhas, me educaram, e cuidaram de mim. Meus irmãos, Alceu e Maíra, com quem aprendi a conviver e compartilhar. Amo vocês todos!

Aos meus primos e primas, tios e tias, falecidos avôs e avós e agregados familiares que construíram alegres e nostálgicas memórias. Um especial abraço para Levi e Yuri, os primos mais cabriocários e estrogonoficamente sensíveis que tenho, minha tia Lu e tio Abel, por quem sempre tive um carinho especial. Minha vó Nita, de quem, apesar de não estar presente fisicamente, guardo inúmeras boas lembranças.

Aos amigos de longa data, Felipe, Isabela, Alex, João, Dentinho, Deda, Saroca, Aninha, com quem partilhei tantas aventuras, bons momentos e alguns blackouts. Aos amigos da UFS, Luis, Hiegor, Burita, Gui, aos copos brindados, pedras batidas e karaminós cantados. A todos os amigos feitos em terras lusitanas, sobretudo Luis e Mafuca com quem já dividi tantas jolas e papos despreziosos. À minha parceira da vida, Mariana, que me apoiou em diversas situações difíceis, com quem partilhei momentos incríveis e com quem posso sempre contar.

A todos os professores que já tive, especialmente, ao Professor Eduardo Cavaco, que me incentivou em um momento particularmente difícil do curso. Ao meu orientador e co-orientador, Professor André Martins e Professor Rodrigo Gonçalves, que tiveram total disponibilidade e me auxiliaram brilhantemente durante a execução dessa dissertação. Sou-vos muito grato.

Enfim, tenho gosto em agradecer a todos que participaram à sua maneira desta construção e espero que ao passar dos anos todos nós possamos olhar para baixo e ver o quão alto alcançamos.

RESUMO

Na presente dissertação estuda-se o efeito da distorção na resistência de perfis metálicos enformados a frio de secção transversal em C com reforço na extremidade (Classe 4), sob compressão. Em primeira instância analisa-se a tensão crítica distorcional por duas abordagens: (i) pelo método computacional, através do software GBTUL (ii) e pelo método das larguras efetivas do Eurocódigo 3 Parte-1-3 (CEN, 2005a), após isso faz-se o comparativo de resultados. Em seguida determina-se a resistência última também por duas abordagens: (i) pelo método do Eurocódigo 3 Parte-1-3 (CEN, 2005a) (ii) e pelo método de elementos finitos de casca, incluindo efeitos materialmente e geometricamente não-lineares e imperfeições geométricas. Desenvolveu-se para o efeito um programa em GNU Octave que permite obter automaticamente as propriedades efetivas da secção e a respetiva resistência última. A comparação entre os resultados obtidos com os dois métodos mostra que o efeito da distorção é relevante e que a resistência última fornecida pelo método das larguras efetivas está quase sempre do lado da segurança, mas em alguns casos é maior que a resistência última determinada pelo método dos elementos finitos.

Palavras-chave: Distorção, Perfis metálicos enformados a frio, Secção transversal em C com reforço na extremidade, Eurocódigo 3 Parte 1-3, Tensão crítica distorcional.

ABSTRACT

This work addresses the effect of distortion on the buckling resistance of cold formed steel profiles with C-section with edge reinforcement (Class 4) under compression. In the first instance, the critical distortional stress is analyzed by two approaches: (i) by the computational method, through the GBTUL software (ii) and by the effective width method of Eurocode 3 Part-1-3 (CEN, 2005a), after that results are compared. Then, the ultimate resistance is also determined by two approaches: (i) by the method of Eurocode 3 Part-1-3 (CEN, 2005a) (ii) and by the finite element method, including materially and geometrically non-linear effects and geometric imperfections. A program in GNU Octave was developed for this purpose, which automatically obtains the effective properties of the cross-section and the respective ultimate resistance. The comparison between the results obtained with the two methods shows that the effect of distortion is relevant, and that the ultimate resistance provided by the effective width method is almost always on the safety side, but in some cases, it is higher than the ultimate resistance determined by the finite element method.

Keywords: Distortion, Cold formed steel, C-section with edge reinforcement, Eurocode 3 Part 1-3, Distortional stress.

ÍNDICE

Índice	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Siglas	xii
Símbolos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e objetivo	1
1.2 Estabilidade de perfis enformados a frio	1
1.3 Organização da dissertação	3
2 Determinação da tensão crítica distorcional	5
2.1 Introdução	5
2.2 Determinação da tensão crítica distorcional com o GBTUL	5
2.2.1 Primeira análise	6
2.2.2 Segunda análise	9
2.3 O método aproximado do EC3-1-3	12
2.3.1 Cálculo das propriedades essenciais ao problema em estudo	12
2.3.2 Influência dos cantos	15
2.3.3 Proporções geométricas	16
2.3.4 Modelo estrutural para análise	17
2.3.5 Procedimento de cálculo da área efetiva da secção transversal submetida a compressão uniforme	18
2.4 Estudo paramétrico	22
2.4.1 Âmbito	22
2.4.2 Resultados	24

3	Determinação da resistência última	35
3.1	Introdução	35
3.2	Estudo paramétrico	35
3.2.1	Âmbito e metodologia	35
3.2.2	Determinação da resistência última pelo EC3-1-3	36
3.2.3	Resultados	42
3.2.4	Determinação da resistência última com base em modelos de elementos finitos de casca	51
3.2.5	Resultados da resistência calculada pelo Abaqus e comparação com os métodos simplificados do EC3-1-3	56
4	Considerações finais e desenvolvimentos futuros	61
	Bibliografia	63
	Anexos	
I	ANEXO I - Tensões críticas distorcionais para diversas relações t/b	66
II	ANEXO II - Resistências últimas para diversas relações t/b	78

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Modos de instabilidade: a) Local, b) Distorcional, c) Global [7].	2
1.2	Modos de deformação, retirados do software GBTUL, para uma secção em C com reforço na extremidade [9].	2
1.3	Curva de assinatura para uma secção em C com reforços de extremidade, sujeita à compressão pura.	3
2.1	Curvas de assinatura com mínimo distorcional definido (esquerda) e indefinido (direita).	6
2.2	Primeira etapa da primeira análise: Propriedade dos materiais e geometria da secção média.	7
2.3	Segunda etapa da primeira análise: Seleção do modo distorcional 'puro'.	8
2.4	Terceira etapa da primeira análise: Tipo de análise e carregamento.	8
2.5	Quarta etapa da primeira análise: Resultados da análise.	9
2.6	Segunda etapa da segunda análise: Seleção de todos os modos convencionais atuantes.	10
2.7	Terceira etapa da segunda análise: Informar o comprimento da barra a analisar, L_{crD}	10
2.8	Quarta etapa da segunda análise: Carga crítica distorcional.	11
2.9	Plot 3D de uma coluna suscetível a encurvadura distorcional (várias perspectivas).	11
2.10	Secção genérica [7].	12
2.11	Obtenção das constantes de empenamento e torção pelo GBTUL.	14
2.12	Secção real vs. secção idealizada.	16
2.13	Modelo estrutural referente a uma secção em C com reforço na extremidade [7].	17
2.14	Modelo estrutural equivalente [7].	17
2.15	Secção efetiva com conexão banzo-reforço de espessura reduzida.	21
2.16	Superfície comparativa mais refinada.	28
2.17	Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0225$	29

2.18	Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0475$	30
2.19	Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0575$	31
2.20	Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0675$	32
3.1	Secção transversal efetiva proveniente de um momento fletor em torno do eixo fraco (comprimindo a alma).	38
3.2	Gerador de ficheiros .inp para Abaqus com dados do perfil 'p1', ver Tabela 3.1 e 3.11.	52

ÍNDICE DE TABELAS

2.1 Elementos comprimidos interiores [8].	18
2.2 Quatro secções efetivas obtidas para um perfil genérico.	22
2.3 Valores referentes às dimensões geométricas dos perfis idealizados.	23
2.4 Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0225$	24
2.5 Resultados para a relação $t/b = 0.0225$	33
2.6 Resultados para a relação $t/b = 0.0475$	33
2.7 Resultados para a relação $t/b = 0.0575$	33
2.8 Resultados para a relação $t/b = 0.0675$	33
2.9 Diferenças máximas e mínimas para cada relação t/b	34
3.1 Geometria dos perfis para aplicação do MEF	36
3.2 Tipo de curva de encurvadura associada ao tipo de Secção [7].	39
3.3 Fator de imperfeição das curvas de encurvadura associadas a uma determinada secção transversal [7]	40
3.4 Resistências últimas para $t/b = 0.0225$	43
3.5 Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0225$	47
3.6 Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0475$	48
3.7 Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0575$	49
3.8 Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0675$	50
3.9 Diferença máxima e mínima entre as resistências últimas para cada relação t/b	51
3.10 Tensão aplicada a cada estrutura analisada.	53
3.11 Entradas relativas à discretização dos perfis.	54
3.12 Parâmetros de carga última dos perfis.	56
3.13 Resultados da resistência de todos os métodos aplicados para os 13 perfis	57
3.14 Diferença percentual entre os métodos utilizados e o MEF.	58
3.15 Precisão dos métodos utilizados para cada perfil analisado.	58
I.1 Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0475$	66
I.2 Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0575$	70
I.3 Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0675$	74

II.1	Resistências últimas para $t/b = 0.0475$	78
II.2	Resistências últimas para $t/b = 0.0575$	82
II.3	Resistências últimas para $t/b = 0.0675$	86

SIGLAS

EC3-1993	Eurocódigo3-1993 (<i>p. 1</i>)
GBT	Generalised Beam Theory (<i>p. 5</i>)
GMNIA	Análise geometricamente e materialmente não linear com imperfeições, em inglês Geometrically and Materially Nonlinear with Imperfections Analysis (<i>p. 51</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos (<i>p. 12</i>)
MTF	Método das Faixas Finitas (<i>p. 12</i>)
MLE	Método da Largura Efetiva (<i>p. 12</i>)
TGV	Teoria Generalizada de Vigas (<i>p. 5</i>)

SÍMBOLOS

A_g	Área total da secção (p. 12)
α	Fator de imperfeição para curvas de encurvadura (p. 40)
A_s	Área efetiva da conexão banzo-reforço (p. 20)
$A_{s,red}$	Área efetiva reduzida da conexão banzo-reforço (p. 21)
b	Largura do banzo da secção bruta (p. 15)
b_c	Altura do reforço da secção bruta (p. 16)
$b_{c,p}$	Altura do reforço da secção média (p. 16)
b_p	Largura do banzo da secção média (p. 16)
χ_z	Fator de redução para o modo de encurvadura relevante (p. 40)
χ_d	Factor de redução para a resistência a encurvadura distorcional do reforço de borda (p. 20)
d_y	Distância do ponto mais afastado da seção ao eixo y (p. 13)
δ	Deflexão do reforço devido a carregamento unitário (p. 17)
$\Delta M_{y,Ed}$	Momento criado devido a excentricidade, no eixo y, do centro de gravidade (p. 39)
$\Delta M_{z,Ed}$	Momento criado devido a excentricidade, no eixo z, do centro de gravidade (p. 39)
d_z	Distância do ponto mais afastado da seção ao eixo z (p. 14)
E	Módulo de elasticidade do aço (p. 23)
G	Módulo de distorção do aço (p. 23)
γ_{m0}	Coefficiente parciais de segurança (p. 15)
γ_{m1}	Coefficiente parciais de segurança (p. 15)
h	Altura da alma da secção bruta (p. 15)

h_p	Altura da alma da secção média (p. 16)
i_y	Raio de giração em torno do eixo y (p. 13)
i_o	Parâmetro para cálculo da força crítica elástica para a encurvadura por torção (p. 15)
I_t	Constante de torção (p. 14)
I_w	Constante de empenamento (p. 14)
I_y	Inércia aproximada da secção em torno de y (p. 13)
I_{y0}	Inércia da secção em torno de y_0 (p. 13)
I_z	Inércia aproximada da secção em torno de z (p. 13)
i_z	Raio de giração em torno do eixo z (p. 14)
I_{z0}	Momento de inércia da secção em torno de z_0 (p. 13)
K	Rigidez da mola (p. 17)
k_{σ}	Coefficiente de encurvadura de placa (p. 18)
λ_d	Esbelteza para encurvadura distorcional (p. 20)
$\lambda_{d,red}$	Esbelteza reduzida para encurvadura distorcional (p. 21)
λ_f	Esbelteza para encurvadura por flexão segundo o eixo mais fraco de secções de classe 4 (p. 40)
λ_{LT}	Esbelteza para encurvadura devido a torção lateral em elementos sob o efeito de flexão (p. 42)
$\overline{\lambda}_p$	Esbelteza para encurvadura de placa (p. 19)
$M_{b,Rd}$	Momento resistente de projeto devido a encurvadura por torção lateral em elementos sob o efeito de flexão para secção de classe 4 (p. 42)
M_{cr}	Momento crítico elástico para encurvadura por torção lateral em elementos sob o efeito de flexão (p. 42)
$M_{cz,Rd,com}$	Momento resistente para a máxima tensão compressiva em uma secção transversal que está sujeita apenas ao momento sobre o eixo relevante (p. 39)
$M_{y,Ed}$	Momento atuante em torno do eixo y (p. 39)
$M_{z,Ed}$	Momento atuante em torno do eixo z (p. 39)
$N_{b,Rd}$	Resistência à encurvadura por flexão, torção e torção-flexão segundo o eixo mais fraco de um membro à compressão (p. 41)
$N_{b,Rd,f}$	Resistência à encurvadura por flexão segundo o eixo mais fraco de um membro à compressão (p. 40)
$N_{b,Rd,FT}$	Resistência à encurvadura por torção e torção-flexão segundo o eixo mais fraco de um membro à compressão (p. 41)
$N_{c,Rd}$	Resistência de projeto da secção à compressão (p. 39)

$N_{cr,TF}$	Esforço axial crítico para encurvadura por torção-flexão (p. 41)
$N_{cr,y}$	Esforço axial crítico para encurvadura por flexão em torno do eixo de maior inércia (p. 41)
$N_{Ed,c}$	Resistência da coluna devido a interação flexão e compressão (p. 42)
ϕ	Valor para determinar o fator de redução χ (p. 40)
ψ	Razão das tensões aplicadas no extremo do banzo (p. 37)
r	Raio interno da secção (p. 15)
ρ	Coefficiente de redução para encurvadura de placa (p. 19)
S_{z0}	Momento estático da secção em torno de z_0 (p. 13)
$\sigma_{cr,d,ec3}$	Tensão crítica distorcional calculada, segundo o EC3-1993, pelo MLE (p. 20)
$\sigma_{cr,d,gbtul}$	Tensão crítica distorcional calculada, segundo a GBT, pelo GBTUL (p. 9)
S_{y0}	Momento estático da secção em torno de y_0 (p. 13)
t	Espessura da secção (p. 15)
t_{red}	Espessura reduzida da conexão banzo-reforço (p. 21)
ν	Coefficiente de Poisson (p. 23)
W_y	Módulo de resistência a flexão em relação ao eixo y (pp. 13, 42)
$W_{eff,z}$	Módulo de flexão da secção efetiva (p. 39)
W_z	Módulo de resistência a flexão em relação ao eixo z (p. 13)
y_{cc}	Coordenada y do centro de corte (p. 14)
$y_{cc,cg}$	Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em relação ao eixo y (p. 15)
y_{cg}	Coordenada y do centro de gravidade (p. 13)
$y_{cg,eff}$	Coordenada y do centro de gravidade de uma secção efetiva submetida a compressão (p. 22)
y_{ec}	Excentricidade causada pelo deslocamento do centro de gravidade em uma secção efetiva submetida a compressão (p. 22)
z_{cc}	Coordenada z do centro de corte (p. 14)
$z_{cc,cg}$	Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em relação ao eixo z (p. 15)
z_{cg}	Coordenada z do centro de gravidade (p. 13)

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e objetivo

O presente estudo encontra-se na área da análise e dimensionamento de perfis de aço enformados a frio, com ênfase em secções em C com reforço na extremidade. Este tipo de secção foi escolhido devido à sua grande utilização na indústria da construção e ao facto de serem suscetíveis a fenómenos de encurvadura local e distorcional. Acresce referir que, conforme se demonstra no presente texto, os dois métodos preconizados na parte 1-3 do [Eurocódigo3-1993 \(EC3-1993\)](#) para a determinação da resistência à encurvadura local e distorcional podem conduzir a valores significativamente diferentes, pelo que os principais objetivos deste trabalho consistem em (i) quantificar as diferenças entre os dois métodos e (ii) comparar os resultados com os obtidos por meio de análises fisicamente e geometricamente não-lineares com imperfeições, realizadas utilizando modelos de elementos finitos de casca, para aferir a precisão de cada um dos métodos.

1.2 Estabilidade de perfis enformados a frio

Antes de prosseguir, é conveniente apresentar uma breve revisão dos fenómenos de encurvadura que afetam os perfis enformados a frio. Em termos gerais, os modos de instabilidade que afetam estes perfis podem ser divididos em três grupos: modo de instabilidade (i) global, (ii) local e (iii) distorcional, conforme demonstra a Figura 1.1.

- *modos globais*, os quais envolvem flexão e/ou torção da barra;
- *modos locais (de placa)*, com flexão transversal das paredes da secção transversal, sem deslocamentos dos cantos da secção (com exceção dos bordos livres das paredes) e sem alteração do eixo longitudinal da barra;
- *modos distorcionais*, em que ocorre flexão transversal das paredes, tal como no caso anterior, mas os cantos da secção podem sofrer deslocamentos no plano da secção transversal e ocorre empenamento.

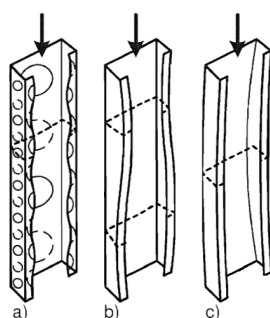


Figura 1.1: Modos de instabilidade: a) Local, b) Distorcional, c) Global [7].

Esses modos de instabilidade também são caracterizados pelos modos de deformação pertencente a cada tipo de fenômeno de encurvadura. A Figura 1.2 ilustra os principais modos de deformação atuantes em uma secção em C com reforço na extremidade.

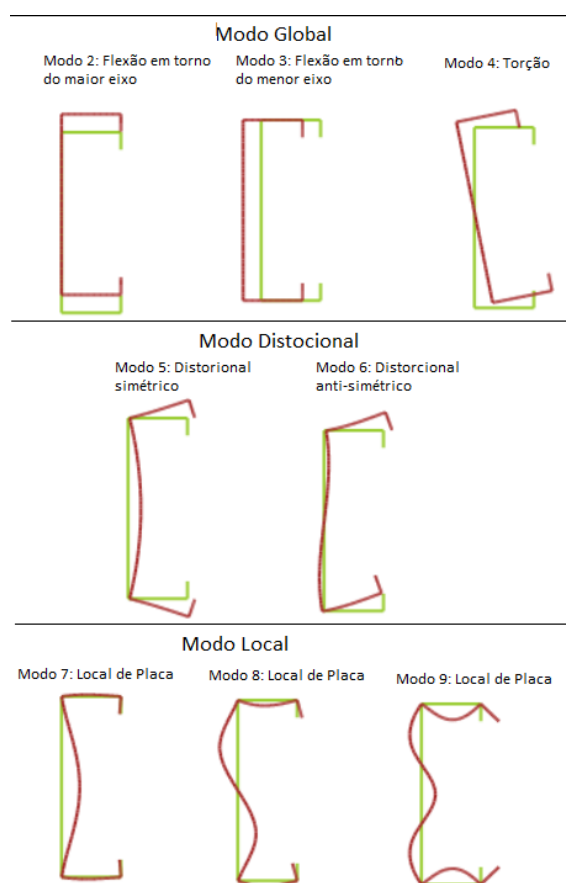


Figura 1.2: Modos de deformação, retirados do software GBTUL, para uma secção em C com reforço na extremidade [9].

Uma vez que o objetivo do presente trabalho é estudar a resistência local e distortional de secções em C com reforços, os efeitos da encurvadura global não serão tidos em conta. Assim, as secções consideradas são suscetíveis à encurvadura local (secções “de classe 4”

na designação do EC3) e distorcional.

A suscetibilidade à encurvadura (local, distorcional e global) de perfis enformados a frio depende naturalmente das suas características geométricas, condições de apoio e carregamento. A caracterização desta suscetibilidade é normalmente efetuada com base na “curva de assinatura”, que representa a carga crítica de bifurcação em função do semi-comprimento de onda. A figura calculada com recurso ao programa GBTUL [9], mostra a curva de assinatura para uma secção em C com reforços, sujeita à compressão pura. O primeiro mínimo da curva corresponde a semi-comprimentos de onda curtos e instabilidade local de placa. O segundo mínimo ocorre para semi-comprimentos de onda intermédios e instabilidade distorcional. Finalmente, para maiores semi-comprimentos de onda, a instabilidade é global (flexão-torção, seguida de flexão).

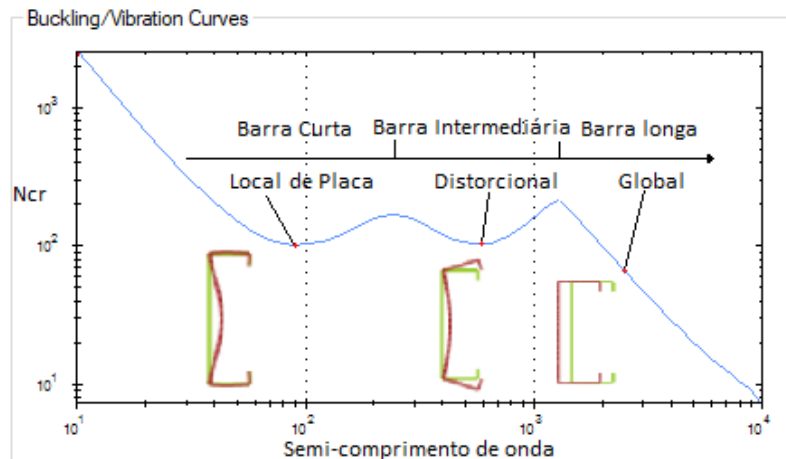


Figura 1.3: Curva de assinatura para uma secção em C com reforços de extremidade, sujeita à compressão pura.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos, o primeiro dos quais é a presente introdução, que apresenta a motivação e o objetivo do estudo e como este está organizado, além de abordar os conceitos fundamentais de estabilidade de perfis enformados a frio. O segundo capítulo, ‘Determinação da tensão crítica distorcional’, explica as duas abordagens utilizadas para determinar a tensão crítica distorcional, descreve o estudo paramétrico realizado e compara os resultados das tensões obtidas pelos dois métodos utilizados. No terceiro capítulo, ‘Determinação da resistência última’, são introduzidas as duas abordagens para o cálculo da resistência última, para então descrever o estudo paramétrico e explicar mais detalhadamente o procedimento de cada uma das duas abordagens utilizadas. Por fim analisam-se os resultados e compara-se os métodos usados. Finalmente, no quarto e último capítulo, apresentam-se as principais conclusões do trabalho efetuado e propõem-se alguns desenvolvimentos futuros.

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTRORCIONAL

2.1 Introdução

A determinação da tensão crítica distorcional é um passo fundamental no processo de verificação da segurança de perfis enformados a frio. Neste capítulo efetua-se um estudo paramétrico para aferir a precisão das fórmulas do método simplificado do EC3-1-3 para a determinação desta tensão crítica, para o caso particular de perfis com secção em C com reforços, sujeitos à compressão simples. Os valores obtidos com as fórmulas do método aproximado do EC3-1-3 são comparados com resultados “exatos”, calculados com o programa GBTUL (acrónimo para “GBT at the University of Lisbon”) [9], baseado na Teoria generalizada de vigas.

A *Teoria Generalizada de Vigas (TGV)* ou, em inglês, *Generalised Beam Theory (GBT)* foi proposta originalmente por Richard Schardt [16], em 1966, e desde então, promoveu uma vasta quantidade de atividade de pesquisa [3]. Hoje em dia, é tida como um instrumento numérico muito valioso e eficiente para analisar o comportamento linear de encurvadura, de pós-encurvadura e de vibração de barras de parede fina com secção deformável [11]. A TGV é uma teoria de barras prismáticas de parede fina que fornece, de forma extremamente eficiente, uma representação vantajosa do campo de deformação, como uma combinação dos modos de deformação de secção transversal no seu plano e fora deste (empenamento) [10] [9].

2.2 Determinação da tensão crítica distorcional com o GBTUL

O GBTUL possui uma interface gráfica que permite inserir todos os parâmetros relevantes (geometria da linha média da secção, propriedades do material, condições de apoio e carregamento). O programa calcula a curva de assinatura, o que permite identificar a tensão crítica distorcional. Para alguns dos perfis considerados, o modo de instabilidade distorcional pode ser de difícil identificação, uma vez que a curva de assinatura pode não apresentar um mínimo distorcional evidente.

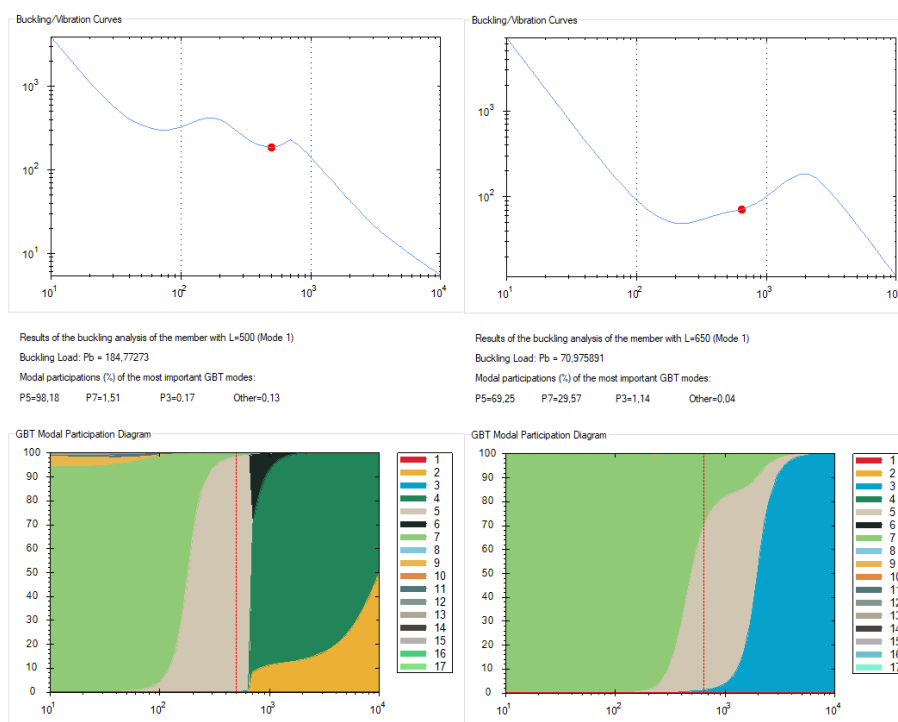


Figura 2.1: Curvas de assinatura com mínimo distorcional definido (esquerda) e indefinido (direita).

Na Figura 2.1 mostram-se duas curvas de assinatura para dois perfis em C com reforços na extremidade. O perfil da esquerda tem a geometria da secção média definida por: altura da alma, $h_p = 72\text{mm}$, largura do banzo, $b_p = 72\text{mm}$, altura do reforço extremo, $b_{c,p} = 14.4\text{mm}$ e espessura, $t = 2\text{mm}$. Por sua vez, o perfil da direita apresenta a seguinte geometria referente à sua secção média: altura da alma, $h_p = 288\text{mm}$, largura do banzo, $b_p = 72\text{mm}$, altura do reforço extremo, $b_{c,p} = 14.4\text{mm}$ e espessura, $t = 2\text{mm}$. Observa-se que do lado esquerdo o segundo mínimo da curva, correspondente à carga crítica distorcional, está bem definido; já para o caso da figura do lado direito, não ocorre o mesmo.

Para resolver este problema foram feitas duas análises para qualquer que seja o perfil estudado: (i) a primeira análise é feita para identificar o comprimento crítico distorcional 'puro', L_{crD} - 'puro', que leva em conta apenas o efeito do modo de deformação distorcional, no GBTUL, o modo 5; (ii) a segunda análise tem por objetivo obter a carga crítica distorcional para uma barra com o comprimento igual ao comprimento crítico distorcional 'puro', L_{crD} , de forma que essa carga crítica, também leva em conta o efeito de todos os modos de deformação atuantes. O procedimento para a realização destas duas análises é detalhado nas duas próximas subsecções, 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 Primeira análise

Esta primeira análise é dividida em quatro etapas:

2.2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTORCIONAL COM O GBTUL

1. Na primeira etapa é preciso definir a geometria da secção média e as propriedades dos materiais conforme mostra a Figura 2.2.
2. Como foi dito anteriormente, essa análise tem por objetivo obter o comprimento crítico distorcional, L_{crD} , que tem em conta apenas o efeito do modo distorcional, ou modo 5 no GBTUL. Portanto, a segunda etapa consiste em informar, através da aba Mode Selection, que será analisado apenas o modo 5. Além disso, é possível obter algumas propriedades geométricas da secção, tal como a área, A , o momento de inércia da secção em torno do eixo horizontal, $I1$, o momento de inércia da secção em torno do eixo vertical, $I2$, a constante de empenamento, Γ , a constante de torção, J , as coordenadas do centro de gravidade e do centro de corte, X_{cg} , Y_{cg} , X_{sc} , Y_{sc} , indicadas no quadro Cross-Section Geometrical Properties, da Figura 2.3.
3. Nesta terceira etapa, na aba Member Analysis, ver Figura 2.4, é preciso informar: (i) o tipo de solução da análise (Solução analítica, em inglês Analytical Solution), (ii) os fatores de carregamento (para compressão pura, $N=1$), (iii) o número de semi-ondas (apenas uma semi-onda analisada), (iv) o número de modos de encurvadura (apenas um modo analisado), (v) quais os comprimentos a serem analisados e (vi) o tipo de análise (Análise de encurvadura, em inglês Buckling).
4. A quarta e última etapa da primeira análise consiste na apresentação dos resultados. Na aba Results, ver Figura 2.5, é possível identificar o comprimento crítico 'puro', L_{crD} , através do ponto mínimo da curva de encurvadura.

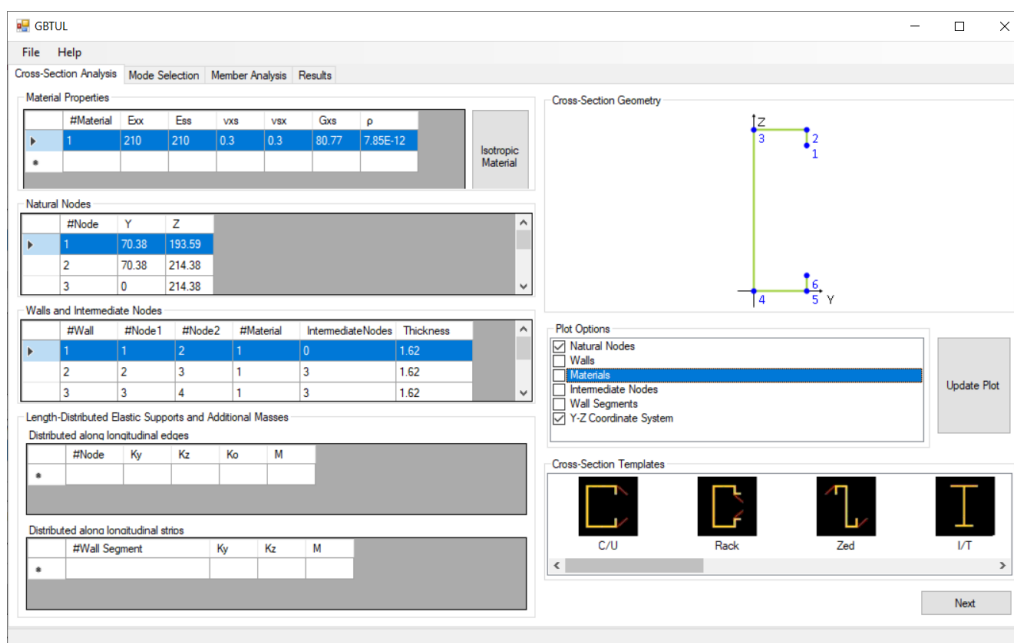


Figura 2.2: Primeira etapa da primeira análise: Propriedade dos materiais e geometria da secção média.

CAPÍTULO 2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTORCIONAL

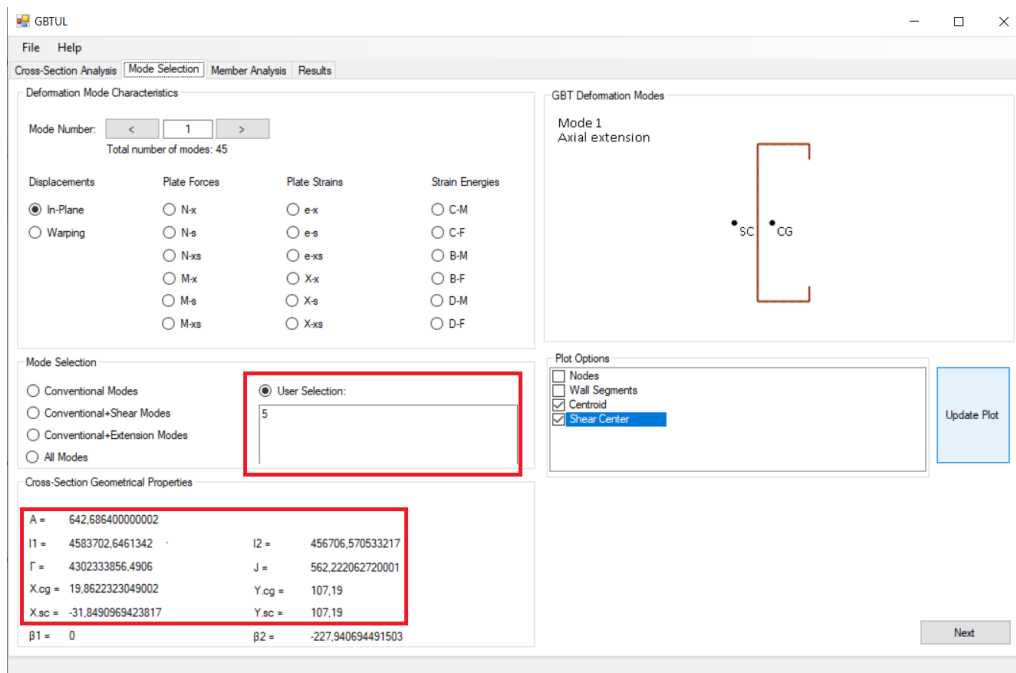


Figura 2.3: Segunda etapa da primeira análise: Seleção do modo distorcional 'puro'.

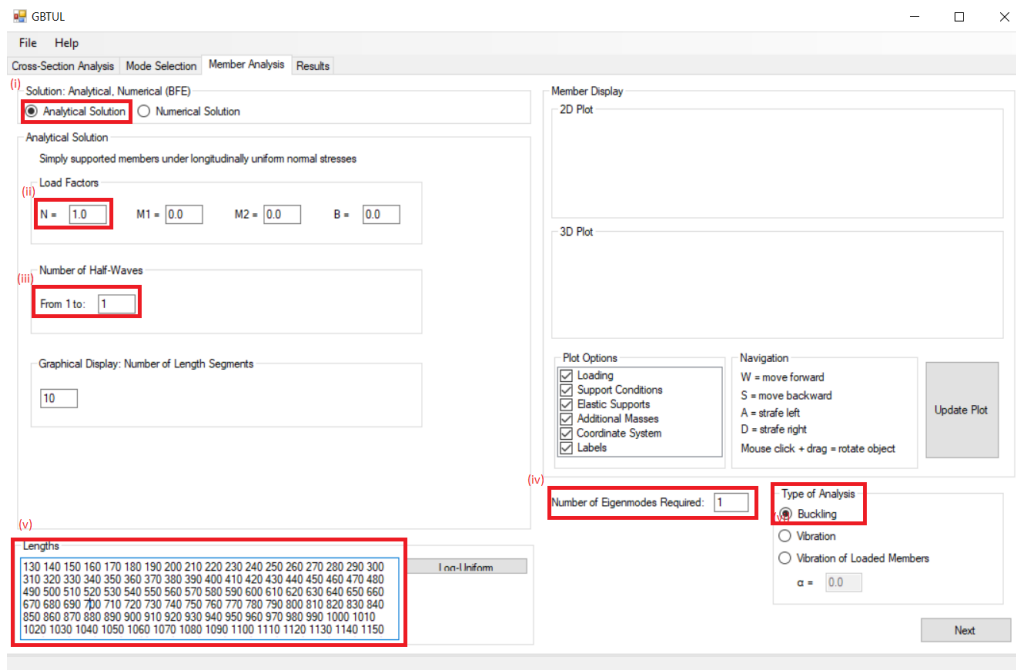


Figura 2.4: Terceira etapa da primeira análise: Tipo de análise e carregamento.

2.2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTORCIONAL COM O GBTUL

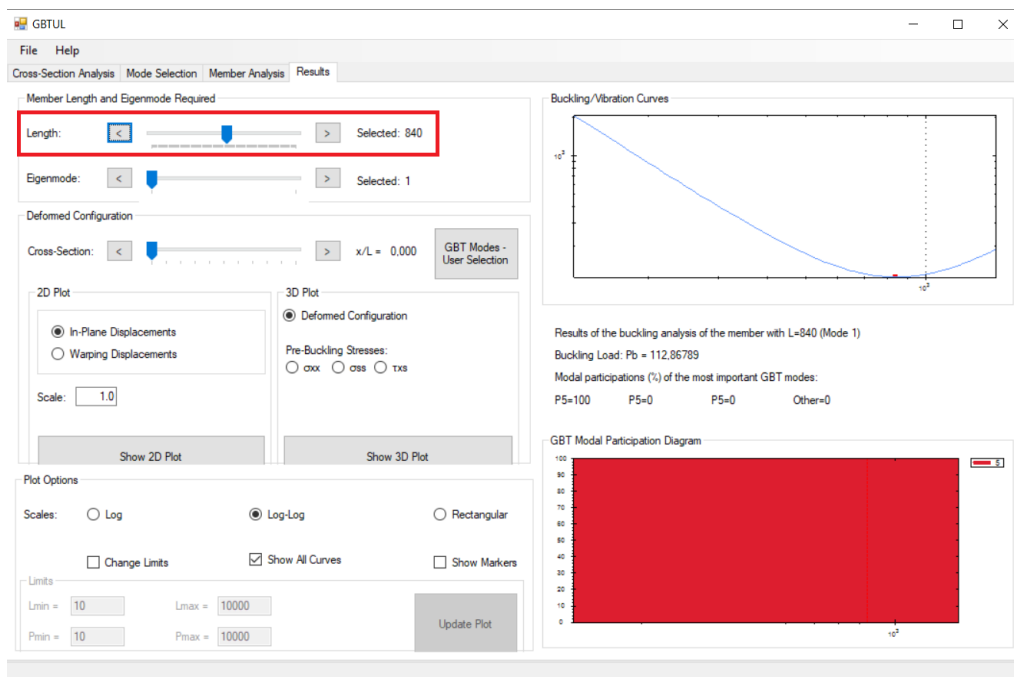


Figura 2.5: Quarta etapa da primeira análise: Resultados da análise.

2.2.2 Segunda análise

A segunda análise também é dividida em quatro etapas:

1. Repete-se a primeira etapa da primeira análise, uma vez que se não se alteram a geometria e as propriedades dos materiais.
2. Na segunda etapa da segunda análise, é preciso ter em conta todos os modos convencionais atuantes na secção, o que reflete em uma alteração na seleção dos modos analisados, ver Figura 2.6.
3. Na terceira etapa da segunda análise, ver Figura 2.7, é feita a análise para apenas o comprimento crítico 'puro', L_{crD} , obtido na primeira análise.
4. Por fim, na quarta e última etapa da segunda análise, é possível obter a carga crítica distorcional, ver Figura 2.8, agora com todos os modos convencionais atuantes tidos em conta, e não apenas o modo distorcional. Para calcular a tensão crítica distorcional obtida pelo GBTUL, $\sigma_{cr,d,gbtul}$, basta dividir esta carga pela área da secção.

CAPÍTULO 2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTORCIONAL

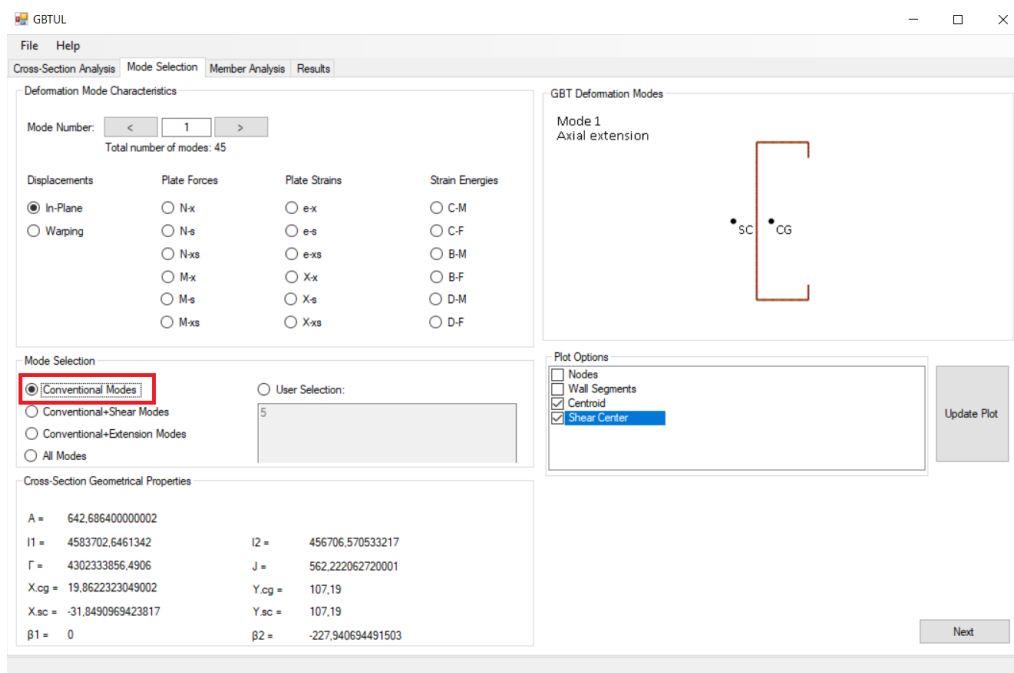


Figura 2.6: Segunda etapa da segunda análise: Seleção de todos os modos convencionais atuantes.

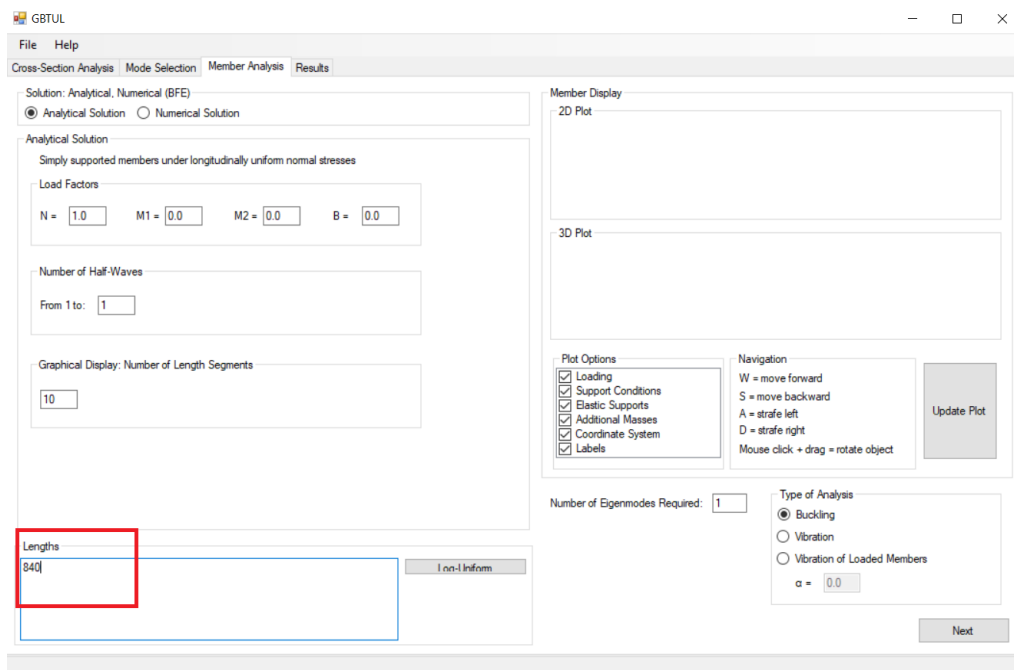


Figura 2.7: Terceira etapa da segunda análise: Informar o comprimento da barra a analisar, L_{crD} .

2.2. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA DISTORCIONAL COM O GBTUL

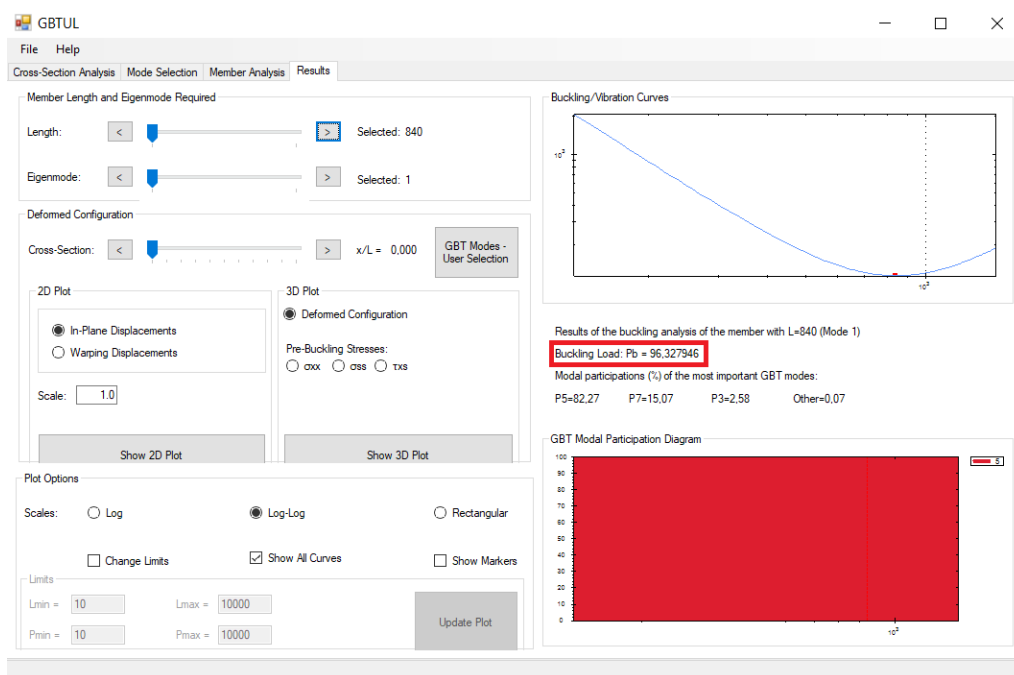


Figura 2.8: Quarta etapa da segunda análise: Carga crítica distorcional.

É possível ainda plotar a coluna analisada, ver Figura 2.9, o que permite visualizar o modo de instabilidade distorcional.

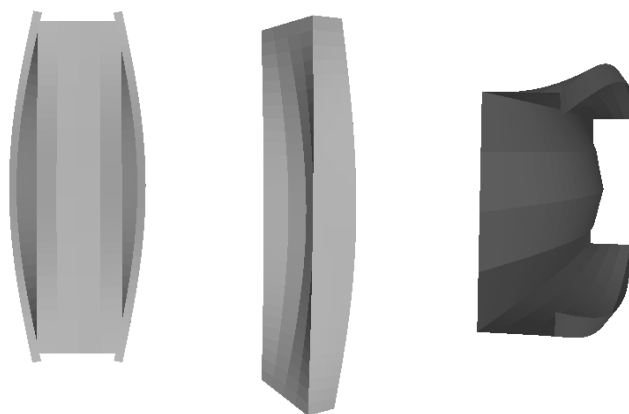


Figura 2.9: Plot 3D de uma coluna suscetível a encurvadura distorcional (várias perspectivas).

Devido à grande quantidade de perfis a serem analisados, foram realizadas algumas alterações a um script, previamente implementado em Matlab desenvolvido na FCT-NOVA, para efetuar estas duas análises do GBTUL a partir do programa Octave, sem ser necessário o uso da interface gráfica do GBTUL. Isto permitiu a determinação da tensão crítica distorcional de um conjunto alargado de perfis com um esforço muito reduzido (quando comparado com a utilização da interface gráfica do GBTUL).

2.3 O método aproximado do EC3-1-3

No EC3-1-3, as tensões críticas distorcionais podem ser obtidas de uma forma rigorosa (usando Método dos Elementos Finitos (MEF), Método das Faixas Finitas (MFF) ou a TGV) ou aproximada, com base no Método da Largura Efetiva (MLE) e em modelos estruturais simples. O MLE, introduzido por Von Kármán em 1932 [18] e posteriormente modificado por Winter [19] assume que o carregamento é suportado por uma largura efetiva fictícia, que está sujeita a uma tensão distribuída uniforme; a partir dessa largura efetiva obtém-se a área efetiva da secção. Além disso, é necessário realizar a redução da espessura da conexão banzo-reforço, submetida a encurvadura distorcional, através do cálculo da tensão crítica distorcional. Neste estudo essa tensão foi obtida por duas abordagens, (i) pelo GBTUL e (ii) pelo método aproximado do EC3-1-3. A primeira forma de obter a tensão crítica distorcional, $\sigma_{cr,d,gbtul}$, já foi explicada anteriormente, portanto, neste capítulo apenas se referirá ao cálculo da tensão crítica distorcional pelo método simplificado do EC3-1-3, $\sigma_{cr,d,ec3}$. Para aplicar este método o EC3-1-3 admite algumas hipóteses.

2.3.1 Cálculo das propriedades essenciais ao problema em estudo

Segundo o anexo C do EC3-1-3, é possível calcular, através de expressões simplificadas os valores das propriedades de uma secção genérica, como a da Figura 2.10.

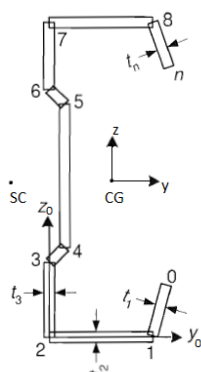


Figura 2.10: Secção genérica [7].

Área de cada parte da secção transversal

$$dA_i = [t_i \cdot \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}] \quad (2.1)$$

Área total da secção transversal

$$A_g = \sum_{i=1}^n dA_i \quad (2.2)$$

Momento estático da secção em torno de y_0 e coordenada z do centro de gravidade

$$S_{y0} = \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{2} \quad (2.3)$$

$$z_{cg} = \frac{S_{y0}}{A_g} \quad (2.4)$$

Momento de inércia da secção em torno de y_0 e inércia aproximada da secção em torno de y (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$I_{y0} = \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}^2 + z_i \cdot z_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{3} \quad (2.5)$$

$$I_y = I_{y0} - A_g \cdot z_{cg}^2 \quad (2.6)$$

Módulo de flexão em relação ao eixo y (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$W_y = \frac{I_y}{d_y} \quad (2.7)$$

onde:

d_y é a distância do ponto mais afastado da secção ao eixo y (eixo passando pelo centro de gravidade).

Raio de giração em torno do eixo y (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} \quad (2.8)$$

Momento estático da secção em torno de z_0 e coordenada y do centro de gravidade

$$S_{z0} = \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{2} \quad (2.9)$$

$$y_{cg} = \frac{S_{z0}}{A_g} \quad (2.10)$$

Momento de inércia da secção em torno de z_0 e inércia aproximada da secção em torno de z (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$I_{z0} = \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i-1}^2 + z_i \cdot y_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{3} \quad (2.11)$$

$$I_z = I_{z0} - A_g \cdot y_{cg}^2 \quad (2.12)$$

Módulo de flexão em relação ao eixo z (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$W_z = \frac{I_z}{d_z} \quad (2.13)$$

onde:

d_z é a distância do ponto mais afastado da seção ao eixo z (eixo passando pelo centro de gravidade).

Raio de giração em torno do eixo z (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_g}} \tag{2.14}$$

Coordenadas dos centro de corte

Ambas as coordenadas do centro de corte y_{cc} e z_{cc} foram obtidas numericamente através do programa GBTUL, ver Figura 2.11.

Constante de empenamento e torção

Ambas as constantes de empenamento e de torção, I_w e I_t foram obtidas numericamente através do programa GBTUL, ver Figura 2.11.

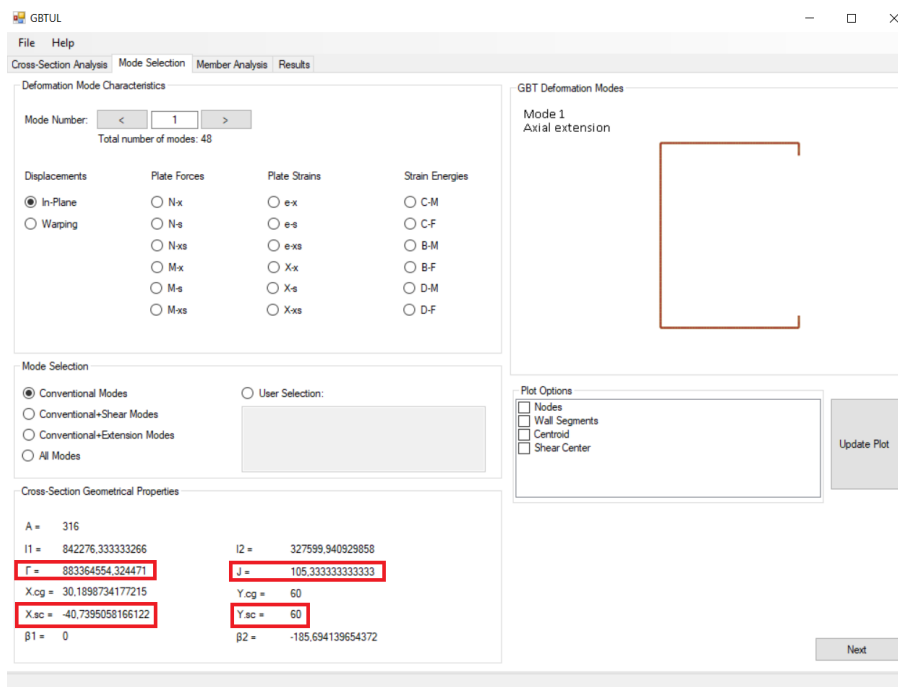


Figura 2.11: Obtenção das constantes de empenamento e torção pelo GBTUL.

onde:

Γ é a constante de empenamento, I_w .

J é a constante de torção, I_t .

$X_{.sc}$ é a coordenada do centro de corte, y_{cc} , relativamente ao eixo y da Figura 2.10.

Y_{sc} é a coordenada do centro de corte, z_{cc} , relativamente ao eixo z da Figura 2.10.

Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em relação ao eixo y (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$y_{cc,cg} = |y_{cg} - y_{cc}| \quad (2.15)$$

Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em relação ao eixo z (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$z_{cc,cg} = |z_{cg} - z_{cc}| \quad (2.16)$$

Raio de giração da secção em relação ao centro de corte

$$i_o^2 = i_z^2 + i_y^2 + z_{cc,cg}^2 + y_{cc,cg}^2 \quad (2.17)$$

Importa ainda salientar que os coeficientes de segurança adotados para esse estudo, em conformidade com o EC3-1-3 cláusula 2(3), são:

$$\gamma_{m0} = 1.00$$

$$\gamma_{m1} = 1.00$$

2.3.2 Influência dos cantos

Para realização de uma análise estrutural, a parte 1-3 do EC3-1993 leva em conta a influência dos cantos arredondados. Contudo, esse efeito pode ser negligenciado caso o raio interno da secção, r , obedeça às seguintes condições [7].

$$r \leq 5 \cdot t \quad (2.18)$$

$$r \leq 0.10 \cdot \min(b, h) \quad (2.19)$$

onde:

h é a altura da alma da secção.

b é a largura do banzo da secção.

t é a espessura da secção.

r é o raio interno da secção.

Considerando que para os perfis em estudo estas condições são satisfeitas, a secção a ser analisada não será a real de cantos arredondados, mas sim uma secção idealizada, formada por cantos retos e pelas linhas médias de cada elemento da secção transversal. A Figura 2.12 ilustra a simplificação citada acima.

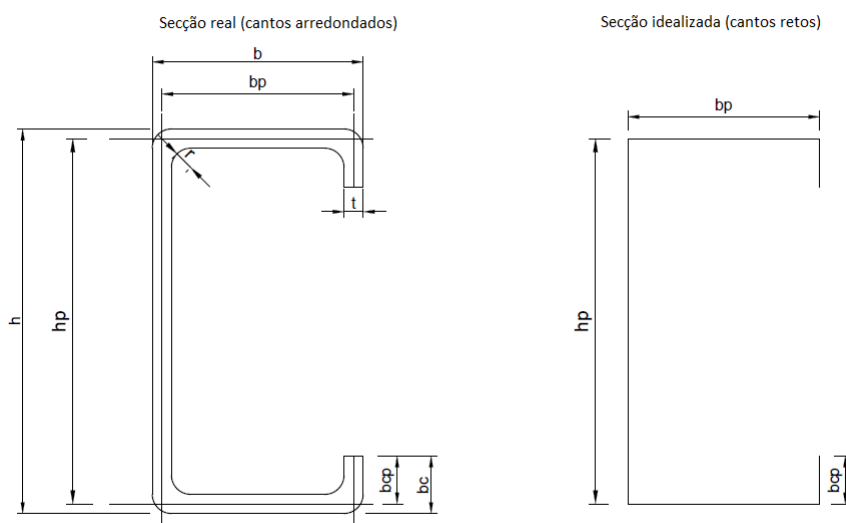


Figura 2.12: Seção real vs. seção idealizada.

onde:

$$h_p = h - t$$

$$b_p = b - t$$

$$b_{c,p} = b_c - t/2$$

2.3.3 Proporções geométricas

As disposições relativas à concepção por cálculo, previstas na parte 1-3 do EC3-1993, não devem ser aplicadas a seções transversais em C com reforço na extremidade caso as seguintes condições não sejam cumpridas.

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad (2.20)$$

$$\frac{b_c}{t} \leq 50 \quad (2.21)$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 \quad (2.22)$$

A fim de fornecer rigidez suficiente e de evitar a encurvadura do próprio reforço, as dimensões dos reforços devem estar dentro do seguinte intervalo:

$$0.2 \leq \frac{b_c}{b} \leq 0.6 \quad (2.23)$$

Em relação ao ângulo, ϕ_r , entre o reforço da extremidade e o banzo adjacente, a condição a ser respeitada é:

$$45 \leq \phi_r \leq 135 \quad (2.24)$$

2.3.4 Modelo estrutural para análise

Os elementos de uma secção transversal em C com reforço na extremidade devem ser modelados para análise conforme indicado na Figura 2.13 [7].

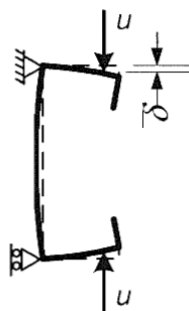


Figura 2.13: Modelo estrutural referente a uma secção em C com reforço na extremidade [7].

onde:

δ é a deflexão do reforço devido a um carregamento unitário, u , que atua no centróide da parte efetiva da secção transversal.

Contudo esse modelo pode ser representado por um modelo equivalente, ver Figura 2.14. Este modelo de secções transversais em C com reforços na extremidade submetidas à compressão pura deve supor que o reforço se comporta como um elemento em compressão e é restringido de forma parcial e contínua, através de uma rigidez de mola que depende das condições de fronteira e da rigidez à flexão dos elementos planos adjacentes [7].

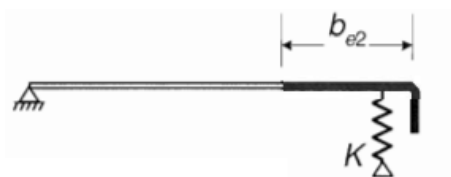


Figura 2.14: Modelo estrutural equivalente [7].

No caso deste tipo de secções, o EC3-1-3 ainda determina a rigidez da mola, K , para um dos banzos, de acordo com a equação a seguir:

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0.5 \cdot b_1^2 \cdot h_p \cdot k_f} \quad (2.25)$$

onde:

b_1 é a distância da junção alma-banzo ao centro de gravidade da área efetiva do conjunto banzo-reforço de extremidade, ver Figura 2.13.

h_p é a altura da alma da secção idealizada.

$k_f = 1$ para uma secção comprimida e simétrica.

Agora conhecendo o modelo da secção transversal e o carregamento aplicado dá-se início ao procedimento de cálculo da área efetiva da secção transversal submetida a compressão uniforme.

2.3.5 Procedimento de cálculo da área efetiva da secção transversal submetida a compressão uniforme

Este procedimento é dividido em três passos, conforme indicado na cláusula 5.5.3.2(3) do EC3-1-3.

1. Obtenção de uma secção efetiva inicial para um carregamento de compressão uniforme, $\sigma_{com,ed} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{m0}}$.

Para essa etapa é necessário consultar a seguinte tabela:

Tabela 2.1: Elementos comprimidos interiores [8].

Distribuição de tensões (compressão positiva)			Largura efetiva ^p b_{eff}			
			$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$			
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1-\psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coefficiente de encurvadura k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

O parâmetro ψ , é definido como a razão das tensões extremas aplicadas a uma parede da secção transversal.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{2.26}$$

Quando todas as paredes da secção transversal estão em compressão uniforme, tem-se que $\psi = 1$; logo o coeficiente de encurvadura de placa é $k_{sigma} = 4$ para os elementos interiores, nomeadamente alma e banzo.

Já para o reforço extremo, é necessário consultar o EC3-1-3, cláusula 5.5.3.2(5), que impõe as seguintes condições para o reforço de extremidade:

$$\text{Se } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.35, \text{ então } k_\sigma = 0.5; \quad (2.27)$$

$$\text{Se } 0.35 < \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.6, \text{ então } k_\sigma = 0.5 + 0.83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0.35\right)^2}. \quad (2.28)$$

Cálculo da esbelteza

Para o cálculo da esbelteza é necessário calcular o parâmetro, ϵ .

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \quad (2.29)$$

Com base no coeficiente de encurvadura, k_σ , e no parâmetro ϵ definidos anteriormente, é possível calcular a esbelteza, $\bar{\lambda}_p$:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}}{t \cdot 28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (2.30)$$

onde:

\bar{b} é uma largura que varia consoante a parede da secção transversal (alma, banzo ou reforço de extremidade), podendo ser, para esta geometria de secção, h_p , b_p e $b_{c,p}$; t é a espessura da secção.

Cálculo do coeficiente de redução para a encurvadura de placa

Segundo o EC3-1-3 cláusula 5.5.3.2(5), o coeficiente de redução para a encurvadura de placa, ρ , deve ser retirado do EC3-1-5, cláusula 4.4(2), onde se distingue várias situações segundo a tipologia do elemento em estudo, conforme as condições a seguir:

Elementos comprimidos internos (alma e banzo):

$$\rho = 1 \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi} \quad (2.31)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi} \quad (2.32)$$

Elementos comprimidos em consola (reforço de extremidade):

$$\rho = 1 \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0.748 \quad (2.33)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_p > 0.748 \quad (2.34)$$

Cálculo das dimensões efetivas de cada parede da secção

Dimensões efetiva de cada parede:

$$h_{p,eff} = h_p \cdot \rho \quad (2.35)$$

$$b_{p,eff} = b_p \cdot \rho \quad (2.36)$$

$$b_{p,c,eff} = b_{p,c} \cdot \rho \quad (2.37)$$

2. Redução da espessura da conexão banzo-reforço e cálculo da tensão crítica, $\sigma_{cr,d,ec3}$.

Segundo a cláusula 5.5.3.2(6) do EC3-1-3, a área efetiva da conexão banzo-reforço é dada por:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + b_{p,c,eff}), \quad \text{onde} \quad b_{e2} = 0.5 \cdot b_{p,eff} \quad (2.38)$$

A tensão crítica distorcional, conforme a cláusula 5.5.3.2(7) do EC3-1-3, é dada por:

$$\sigma_{cr,d,ec3} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s} \quad (2.39)$$

onde:

K é a rigidez da mola por unidade de comprimento, calculada conforme a Equação 2.25.

$I_s = \frac{b_{p,eff} \cdot t^3}{2 \cdot 12} + \frac{b_{p,eff} \cdot t \cdot e_s^2}{2} + \frac{t \cdot b_{p,c,eff}^3}{12} + t \cdot b_{p,c,eff} \cdot \left(\frac{b_{p,c,eff}}{2} - e_s\right)^2$ é o momento de inércia do conjunto banzo-reforço em relação ao centróide do conjunto.

Sendo $e_s = \frac{(b_{p,c,eff} \cdot t \cdot b_{p,c,eff})}{2 \cdot A_s}$, a distância entre a linha média do banzo e o centróide do conjunto.

A seguir determina-se o fator de redução, χ_d , para a resistência a encurvadura distorcional do reforço de extremidade, consoante a cláusula 5.5.3.1(7) do EC3-1-3:

$$\chi_d = 1 \quad \text{se} \quad \lambda_d \leq 0.65 \quad (2.40)$$

$$\chi_d = 1.47 - 0.723 \cdot \lambda_d \quad \text{se} \quad 0.65 < \lambda_d < 1.38 \quad (2.41)$$

$$\chi_d = \frac{0.66}{\lambda_d} \quad \text{se} \quad 1.38 \leq \lambda_d \quad (2.42)$$

onde:

$$\lambda_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,d,ec3}}$$

Em seguida, obtém-se a nova área reduzida:

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{m0} \cdot \sigma_{com,ed}} \quad (2.43)$$

onde:

$\sigma_{com,ed} = f_{yb}/\gamma_{m0}$ é a tensão de compressão aplicada.

Calcula-se então a espessura reduzida do conjunto banzo-reforço:

$$t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} \quad (2.44)$$

3. Processo iterativo opcional, com intuito de refinar os resultados.

O terceiro passo consiste em repetir o processo anterior apenas para o cálculo da nova espessura do conjunto banzo-reforço de extremidade. Sendo assim, calcula-se a nova área efetiva do conjunto através da seguinte fórmula da nova esbelteza:

$$\lambda_{d,red} = \lambda_d \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (2.45)$$

Depois repete-se o processo da redução da espessura da conexão e de cálculo da tensão crítica distorcional. Para controlar a quantidade de iterações realizadas, criou-se uma tolerância, admitindo-se que enquanto $\frac{|\chi_d - \chi_{d,antigo}|}{\chi_d} > 0.001$, a iteração é repetida. Note-se que em poucas iterações o procedimento converge, normalmente após entre uma e três iterações.

Com esse procedimento é possível obter a tensão crítica distorcional, $\sigma_{cr,d,ec3}$, assim como a secção efetiva representada na Figura 2.15.

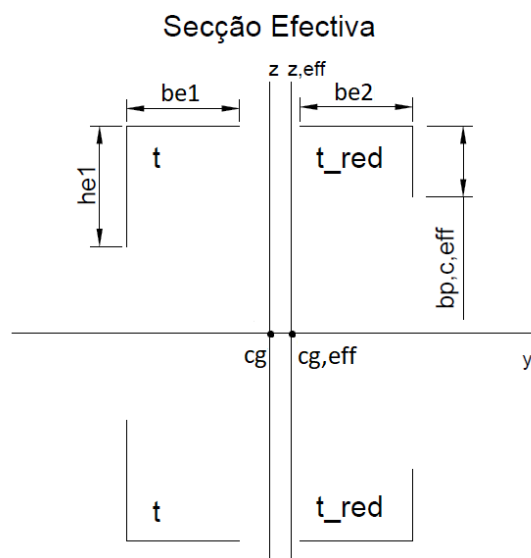


Figura 2.15: Secção efetiva com conexão banzo-reforço de espessura reduzida.

onde:

$$b_{e1} = b_{e2} = 0.5 \cdot b_{p,eff}$$

$$h_{e1} = 0.5 \cdot h_{p,eff}$$

$A_{eff,com}$ e $y_{cg,eff}$ são calculados conforme 2.3.1.

A distância entre o centro de gravidade de secção idealizada e o centro de gravidade da secção efetiva submetida a compressão uniforme é dada por:

$$y_{ec} = y_{cg,eff} - y_{cg} \quad (2.46)$$

É importante ressaltar que para este estudo consideraram-se duas abordagens para determinar a tensão crítica distorcional: (i) o método utilizado no EC31-1-3 e (ii) o método computacional, que utilizou o software GBTUL. Contudo, a secção efetiva obtida pelo MLE, pode ser calculada (i) pelo processo iterativo opcional, (ii) ou pelo processo não iterativo. Dessa forma, para um perfil genérico foram obtidas quatro secções efetivas diferentes, conforme demonstra o esquema da Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Quatro secções efetivas obtidas para um perfil genérico.

	Método de cálculo da tensão crítica distorcional	Método de cálculo da secção efetiva submetida a compressão uniforme
Perfil genérico	EC3-1-3	Processo iterativo
	EC3-1-3	Processo não iterativo
	GBTUL	Processo iterativo
	GBTUL	Processo não iterativo

Para cada uma das quatro secções efetivas obtidas, o centro de gravidade desloca-se do seu ponto original da secção inicial, no sentido da alma ou do reforço de extremidade, podendo ainda nem se deslocar (no caso da secção ser toda efetiva). Contudo, caso exista deslocamento, este é sempre sobre o eixo y, devido à mono simetria da secção. Esse fato influenciará o cálculo da resistência da coluna que será abordado mais a frente.

Importa referir que ao script anteriormente citado para o cálculo da tensão crítica distorcional pelo GBTUL também foram introduzidas subrotinas do Octave com intuito de calcular não somente a tensão crítica distorcional conforme o método simplificado do EC3-1-3, mas também poder comparar os resultados de ambas as metodologias. Além disso, todo o processo de calculo foi validado com base em exemplos presentes na publicação do "ECCS 123 - Worked examples according to EN1993-1-3"[5] e no livro "Design of cold-formed steel structures" de Dan Dubina, Viorel Ungureanu e Raffaele Landolfo [4].

2.4 Estudo paramétrico

2.4.1 Âmbito

No presente estudo, para a escolha dos perfis analisados foram tidos em conta os catálogos de perfis comerciais dos fabricantes OFeliz, Barraferros e Prefisa. A partir destes catálogos,

foram criados perfis teóricos com características próximas dos perfis comerciais, de modo a se obter uma maior amostragem. Além disso os perfis idealizados satisfizeram todas as condições impostas pelo EC3-1-3, de forma a se desprezar a influência dos cantos arredondados e respeitar as condições das proporções geométricas. Para criar o conjunto de perfis a ser estudado, foram seguidos os seguintes passos:

1. Definiram-se 4 relações entre espessura e a largura do banzo, $\frac{t}{b}$: 0.0225, 0.0475, 0.0575 e 0.0675.
2. Para cada uma das relações acima foram atribuídos 3 tensões de cedência, f_{yb} , diferentes: 220, 280 e 350 N/mm^2 , uma vez que essas são as tensões de cedências dos perfis comerciais tidos em conta.
3. Para cada relação $\frac{t}{b}$ fixou-se um valor b da largura do banzo e calculou-se a espessura t da secção.
4. Para a relação entre altura da alma e largura do banzo, $\frac{h}{b}$, foi pré determinado que esta varia de 1 a 6, de acordo com as relações máximas e mínimas exibidas pelas geometrias dos perfis comerciais considerados.
5. Para a relação entre altura do reforço e largura do banzo, $\frac{b_c}{b}$, foi pré determinado que esta varia de 0.2 a 0.5, de acordo com as relações máximas e mínimas exibidas pelas geometrias dos perfis comerciais considerados.

Tabela 2.3: Valores referentes às dimensões geométricas dos perfis idealizados.

		$f_{yb} = 220$ ou $f_{yb} = 280$ ou $f_{yb} = 350(N/mm^2)$			
		t/b			
		0.0225	0.0475	0.0575	0.0675
		b [mm]			
		72	43	44	44
		t [mm]			
		1.62	2.045	2.53	2.97
		h [mm]			
$\frac{h}{b}$	1	72	43	44	44

	6	432	258	264	264
		b_c [mm]			
$\frac{b_c}{b}$	0.2	14.4	8.6	8.8	8.8

	0.5	36	21.5	22	22

Além disso as propriedades referentes ao material dos perfis (aço) tem as seguintes características:

Módulo de elasticidade: $E = 210\,000\, N/mm^2$.

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0.3$.

Módulos de distorção: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80\,769\, N/mm^2$.

2.4.2 Resultados

A Tabela 2.4 apresenta os resultados das tensões críticas distorcionais para a relação $t/b = 0.0225$ de todos os perfis. Os resultados para as outras três relações encontram-se no Anexo I. Apresentam-se ainda uma coluna com a diferença entre os métodos iterativos e não iterativos, dada pela fórmula:

$$dif(\%) = \frac{\sigma_{cr,d,ec3,n-it} - \sigma_{cr,d,ec3,it}}{\sigma_{cr,d,ec3,it}} \quad (2.47)$$

Tabela 2.4: Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0225$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb} [MPa]	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença entre IT vs N-IT	$\sigma_{cr,d,gbtul}$ GBTUL IT
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]		EC3 N-IT	EC3 IT		
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
1	70,38	70,38	13,59	220	260,60	256,65	1,52%	296,28
2	70,38	70,38	17,19	220	329,41	326,42	0,91%	352,13
3	70,38	70,38	20,79	220	393,69	391,96	0,44%	397,76
4	70,38	70,38	24,39	220	453,51	452,72	0,17%	432,56
5	70,38	70,38	27,99	220	507,28	507,96	0,13%	456,22
6	70,38	70,38	31,59	220	538,95	538,95	0,00%	469,46
7	70,38	70,38	35,19	220	565,14	565,14	0,00%	472,95
8	142,38	70,38	13,59	220	202,37	199,11	1,61%	198,36
9	142,38	70,38	17,19	220	256,07	252,56	1,37%	234,75
10	142,38	70,38	20,79	220	306,30	303,31	0,98%	265,22
11	142,38	70,38	24,39	220	353,12	351,08	0,58%	289,15
12	142,38	70,38	27,99	220	395,24	395,44	0,05%	306,74
13	142,38	70,38	31,59	220	420,07	425,20	1,22%	318,28
14	142,38	70,38	35,19	220	440,61	444,85	0,96%	324,55
15	214,38	70,38	13,59	220	171,22	168,39	1,66%	108,73
16	214,38	70,38	17,19	220	216,75	213,69	1,41%	130,52
17	214,38	70,38	20,79	220	259,37	256,26	1,20%	149,88
18	214,38	70,38	24,39	220	299,11	296,42	0,90%	166,68
19	214,38	70,38	27,99	220	334,88	334,21	0,20%	180,31
20	214,38	70,38	31,59	220	355,97	364,12	2,29%	191,03
21	214,38	70,38	35,19	220	373,43	381,00	2,03%	198,82
22	286,38	70,38	13,59	220	151,10	148,56	1,68%	55,90
23	286,38	70,38	17,19	220	191,32	188,58	1,43%	67,35
24	286,38	70,38	20,79	220	228,98	226,19	1,22%	78,59
25	286,38	70,38	24,39	220	264,12	261,37	1,04%	88,86
26	286,38	70,38	27,99	220	295,75	294,53	0,41%	98,25

Tabela 2.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT %	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos							
27	286,38	70,38	31,59	220	314,41	324,37	3,17%	106,32
28	286,38	70,38	35,19	220	329,85	339,44	2,91%	113,28
29	358,38	70,38	13,59	220	136,72	134,41	1,69%	30,79
30	358,38	70,38	17,19	220	173,15	170,64	1,45%	37,01
31	358,38	70,38	20,79	220	207,26	204,71	1,23%	43,42
32	358,38	70,38	24,39	220	239,09	236,58	1,05%	49,32
33	358,38	70,38	27,99	220	267,76	266,37	0,52%	55,04
34	358,38	70,38	31,59	220	284,67	294,50	3,45%	60,45
35	358,38	70,38	35,19	220	298,66	309,63	3,67%	65,29
36	430,38	70,38	13,59	220	125,80	123,66	1,71%	18,83
37	430,38	70,38	17,19	220	159,33	157,01	1,46%	22,28
38	430,38	70,38	20,79	220	190,75	188,38	1,24%	25,94
39	430,38	70,38	24,39	220	220,06	217,72	1,06%	29,55
40	430,38	70,38	27,99	220	246,45	245,16	0,53%	33,02
41	430,38	70,38	31,59	220	262,03	270,84	3,36%	36,42
42	430,38	70,38	35,19	220	274,92	286,88	4,35%	39,70
43	70,38	70,38	13,59	280	266,52	258,63	2,96%	296,28
44	70,38	70,38	17,19	280	335,66	329,96	1,70%	352,13
45	70,38	70,38	20,79	280	399,94	395,98	0,99%	397,76
46	70,38	70,38	24,39	280	436,34	447,66	2,59%	432,56
47	70,38	70,38	27,99	280	479,00	488,42	1,97%	456,22
48	70,38	70,38	31,59	280	507,97	516,19	1,62%	469,46
49	70,38	70,38	35,19	280	531,79	538,96	1,35%	472,95
50	142,38	70,38	13,59	280	207,24	199,11	3,92%	198,36
51	142,38	70,38	17,19	280	261,25	254,16	2,72%	234,75
52	142,38	70,38	20,79	280	311,53	306,12	1,74%	265,22
53	142,38	70,38	24,39	280	340,04	354,14	4,15%	289,15
54	142,38	70,38	27,99	280	373,47	387,54	3,77%	306,74
55	142,38	70,38	31,59	280	396,18	409,67	3,40%	318,28
56	142,38	70,38	35,19	280	414,87	427,82	3,12%	324,55
57	214,38	70,38	13,59	280	175,44	168,39	4,02%	108,73
58	214,38	70,38	17,19	280	221,26	213,69	3,42%	130,52
59	214,38	70,38	20,79	280	263,93	257,80	2,32%	149,88
60	214,38	70,38	24,39	280	288,14	298,76	3,69%	166,68
61	214,38	70,38	27,99	280	316,54	332,85	5,15%	180,31

Tabela 2.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT %	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos							
62	214,38	70,38	31,59	280	335,83	351,86	4,77%	191,03
63	214,38	70,38	35,19	280	351,71	367,47	4,48%	198,82
64	286,38	70,38	13,59	280	154,86	148,56	4,07%	55,90
65	286,38	70,38	17,19	280	195,36	188,58	3,47%	67,35
66	286,38	70,38	20,79	280	233,08	226,53	2,81%	78,59
67	286,38	70,38	24,39	280	254,49	262,88	3,30%	88,86
68	286,38	70,38	27,99	280	279,60	296,54	6,06%	98,25
69	286,38	70,38	31,59	280	296,67	314,24	5,92%	106,32
70	286,38	70,38	35,19	280	310,72	328,18	5,62%	113,28
71	358,38	70,38	13,59	280	140,16	134,41	4,11%	30,79
72	358,38	70,38	17,19	280	176,84	170,64	3,50%	37,01
73	358,38	70,38	20,79	280	211,01	204,71	2,99%	43,42
74	358,38	70,38	24,39	280	230,41	237,23	2,96%	49,32
75	358,38	70,38	27,99	280	253,16	267,82	5,79%	55,04
76	358,38	70,38	31,59	280	268,63	287,23	6,92%	60,45
77	358,38	70,38	35,19	280	281,36	299,98	6,62%	65,29
78	430,38	70,38	13,59	280	128,98	123,66	4,13%	18,83
79	430,38	70,38	17,19	280	162,75	157,01	3,52%	22,28
80	430,38	70,38	20,79	280	194,22	188,38	3,01%	25,94
81	430,38	70,38	24,39	280	212,08	217,72	2,66%	29,55
82	430,38	70,38	27,99	280	233,04	245,97	5,55%	33,02
83	430,38	70,38	31,59	280	247,29	266,64	7,83%	36,42
84	430,38	70,38	35,19	280	259,01	278,47	7,51%	39,70
85	70,38	70,38	13,59	350	272,81	260,74	4,42%	296,28
86	70,38	70,38	17,19	350	342,26	333,14	2,67%	352,13
87	70,38	70,38	20,79	350	396,86	399,71	0,72%	397,76
88	70,38	70,38	24,39	350	413,15	433,69	4,97%	432,56
89	70,38	70,38	27,99	350	453,33	472,29	4,18%	456,22
90	70,38	70,38	31,59	350	480,07	498,24	3,79%	469,46
91	70,38	70,38	35,19	350	501,95	519,45	3,49%	472,95
92	142,38	70,38	13,59	350	212,38	199,11	6,25%	198,36
93	142,38	70,38	17,19	350	266,70	255,94	4,03%	234,75
94	142,38	70,38	20,79	350	309,44	308,54	0,29%	265,22
95	142,38	70,38	24,39	350	322,20	346,03	7,40%	289,15
96	142,38	70,38	27,99	350	353,70	376,55	6,46%	306,74

Tabela 2.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos							
97	142,38	70,38	31,59	350	374,66	397,24	6,03%	318,28
98	142,38	70,38	35,19	350	391,83	414,17	5,70%	324,55
99	214,38	70,38	13,59	350	179,89	168,39	6,39%	108,73
100	214,38	70,38	17,19	350	225,98	214,44	5,10%	130,52
101	214,38	70,38	20,79	350	262,27	259,41	1,09%	149,88
102	214,38	70,38	24,39	350	273,11	298,52	9,30%	166,68
103	214,38	70,38	27,99	350	299,87	324,60	8,25%	180,31
104	214,38	70,38	31,59	350	317,68	342,40	7,78%	191,03
105	214,38	70,38	35,19	350	332,27	356,97	7,43%	198,82
106	286,38	70,38	13,59	350	158,84	148,56	6,47%	55,90
107	286,38	70,38	17,19	350	199,58	188,58	5,51%	67,35
108	286,38	70,38	20,79	350	231,67	227,58	1,77%	78,59
109	286,38	70,38	24,39	350	241,26	264,35	9,57%	88,86
110	286,38	70,38	27,99	350	264,92	290,79	9,76%	98,25
111	286,38	70,38	31,59	350	280,68	306,70	9,27%	106,32
112	286,38	70,38	35,19	350	293,59	319,73	8,90%	113,28
113	358,38	70,38	13,59	350	143,78	134,41	6,52%	30,79
114	358,38	70,38	17,19	350	180,69	170,64	5,56%	37,01
115	358,38	70,38	20,79	350	209,77	204,82	2,36%	43,42
116	358,38	70,38	24,39	350	218,45	238,30	9,09%	49,32
117	358,38	70,38	27,99	350	239,90	266,52	11,10%	55,04
118	358,38	70,38	31,59	350	254,18	281,08	10,58%	60,45
119	358,38	70,38	35,19	350	265,88	292,99	10,20%	65,29
120	430,38	70,38	13,59	350	132,33	123,66	6,56%	18,83
121	430,38	70,38	17,19	350	166,32	157,01	5,59%	22,28
122	430,38	70,38	20,79	350	193,09	188,38	2,44%	25,94
123	430,38	70,38	24,39	350	201,09	218,48	8,65%	29,55
124	430,38	70,38	27,99	350	220,84	247,01	11,85%	33,02
125	430,38	70,38	31,59	350	234,00	261,54	11,77%	36,42
126	430,38	70,38	35,19	350	244,77	272,61	11,37%	39,70

Desta tabela é possível inferir que para uma mesma tensão de cedência, o aumento da altura da alma faz com que a tensão crítica distorcional diminua, ao passo que o aumento do reforço de extremidade implica um aumento da tensão crítica distorcional. Comparando esses valores com os obtidos pelas tabelas do Anexo I, é possível inferir que o aumento da espessura também resulta no aumento da tensão crítica distorcional.

Para a relação $t/b = 0.0225$, é possível constatar que ao variar a tensão de cedência, altera-se o valor da tensão crítica distorcional calculada pelo método simplificado do EC3-1-3. Porém, para as demais relações, ao variar a tensão de cedência, a tensão crítica distorcional não é alterada; isso ocorre porque o aumento da espessura faz a esbelteza (ver Equação 2.30) diminuir ao ponto do banzo e do reforço de extremidade serem totalmente efetivos. Dessa forma os parâmetros K , I_s e A_s não se alteram, logo a tensão crítica distorcional (ver Equação 2.39) também não.

A influência do método iterativo no cálculo tensão crítica distorcional obtida pelo método simplificado do EC3-1-3, só tem significado para a relação $t/b = 0.0225$ e apresenta uma diferença máxima absoluta de 10,59%.

Com o intuito de comparar os resultados das tensões críticas distorcionais pelos dois métodos abordados, foi criada uma superfície que fornece, para cada perfil, a diferença entre a tensão crítica obtida pela GBTUL e pelo método aproximado do EC3-1-3. O espaço tridimensional onde esta superfície está localizada é definido por um eixo vertical, que fornece a diferença da tensão crítica distorcional entre os dois métodos utilizados, um eixo horizontal que indica a razão entre a altura da alma e a largura do banzo, $\frac{h}{b}$, e outro eixo horizontal que indica a razão entre a altura do reforço de extremidade e a largura do banzo, $\frac{b_c}{b}$.

Para um primeiro estudo sobre a forma da superfície, foram criados perfis de modo que a malha fosse bem refinada. Para isso foi escolhida a relação $\frac{t}{b} = 0.0225$, $f_{yb} = 280 \text{ N/mm}^2$ e usou-se o método iterativo de cálculo da tensão crítica distorcional pelo método aproximado do EC3-1-3, $\sigma_{cr,d,ec3}$, ver Figura 2.16. É importante ressaltar que com apenas perfis comerciais não seria possível obter uma superfície tão detalhada para análise, o que realça a importância dos perfis considerados.

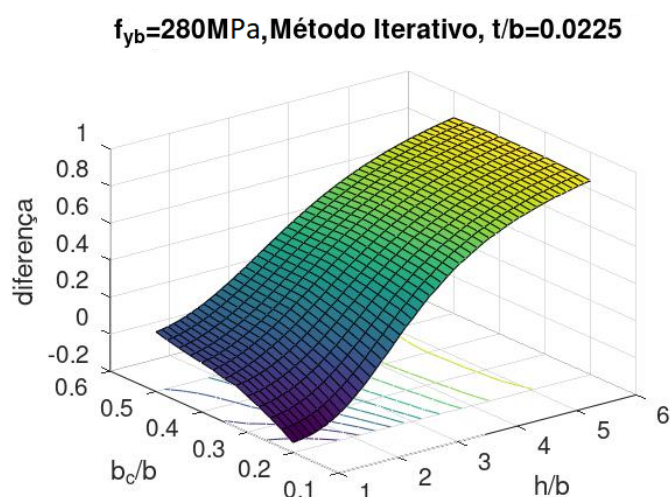


Figura 2.16: Superfície comparativa mais refinada.

onde:
$$\text{diferença} = \frac{\sigma_{cr,d,ec3} - \sigma_{cr,d,gbtul}}{\sigma_{cr,d,ec3}}$$

Devido à suavidade da superfície e ao seu comportamento regular, foi possível diminuir a quantidade de perfis analisados, com o intuito de abrandar o esforço computacional. Por consequência foi obtida uma malha menos refinada para cada relação $\frac{t}{b}$. As Figuras 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 ilustram as superfícies comparativas para cada conjunto $\frac{t}{b}$ analisado.

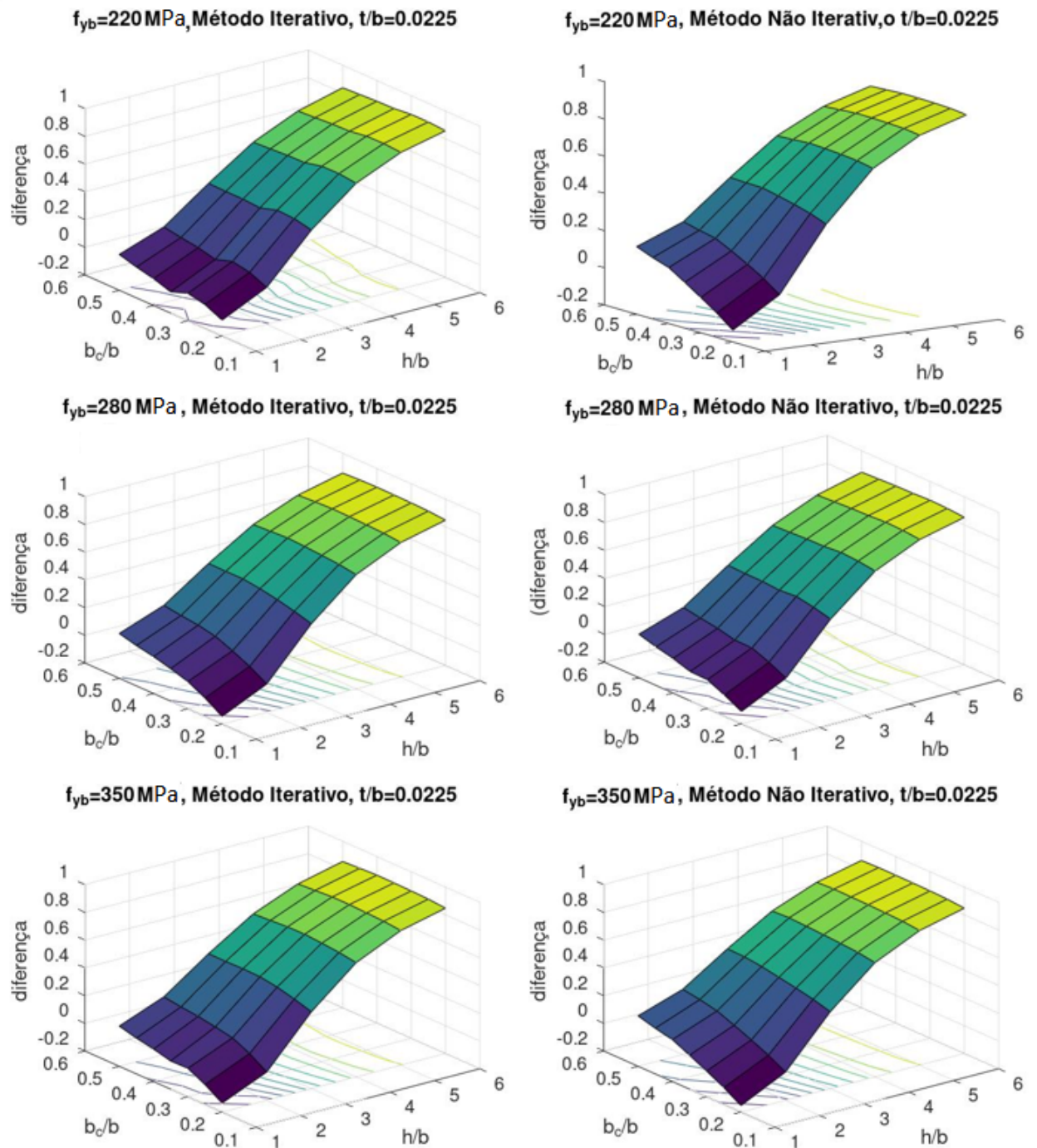


Figura 2.17: Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0225$.

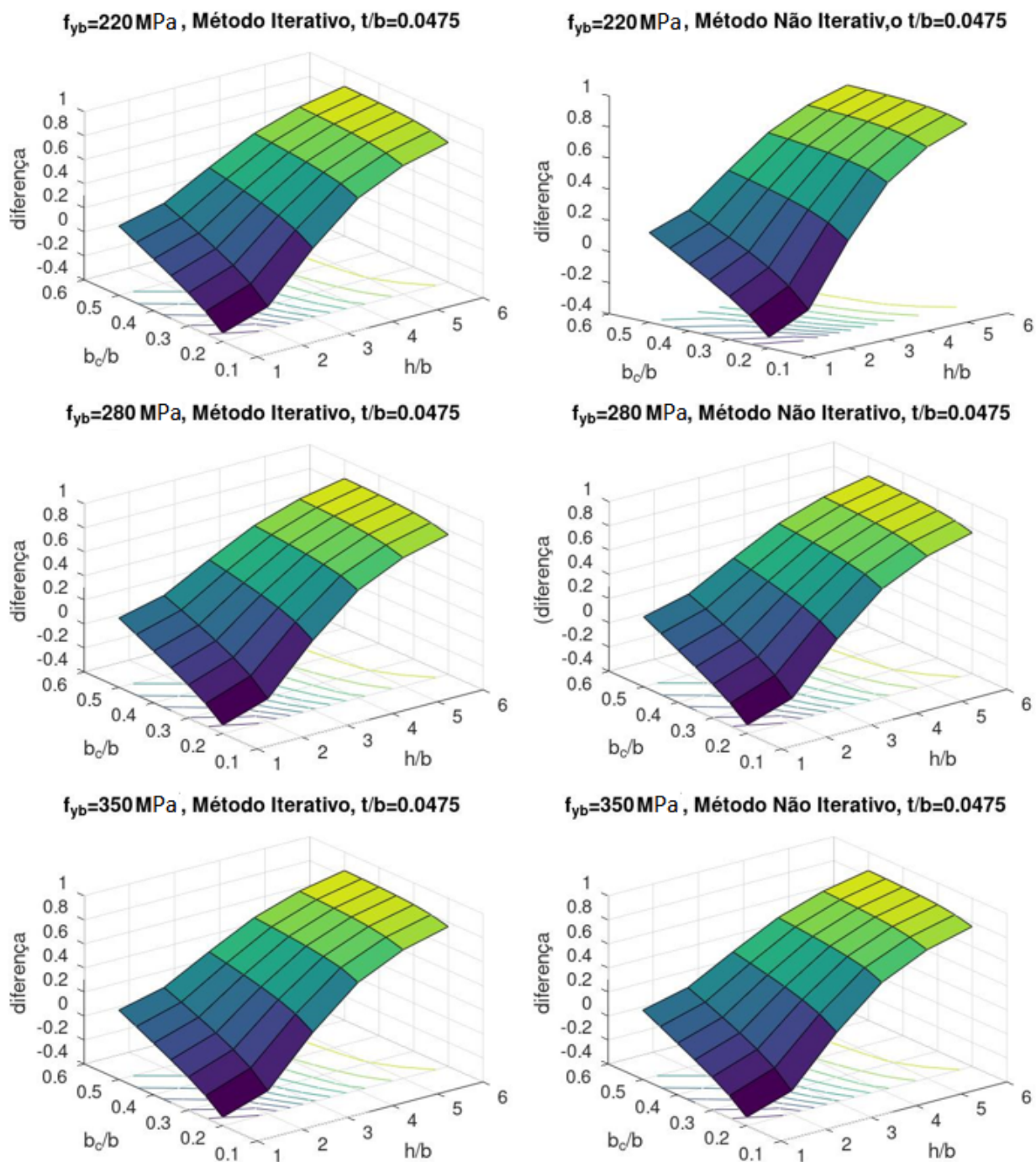


Figura 2.18: Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0475$.

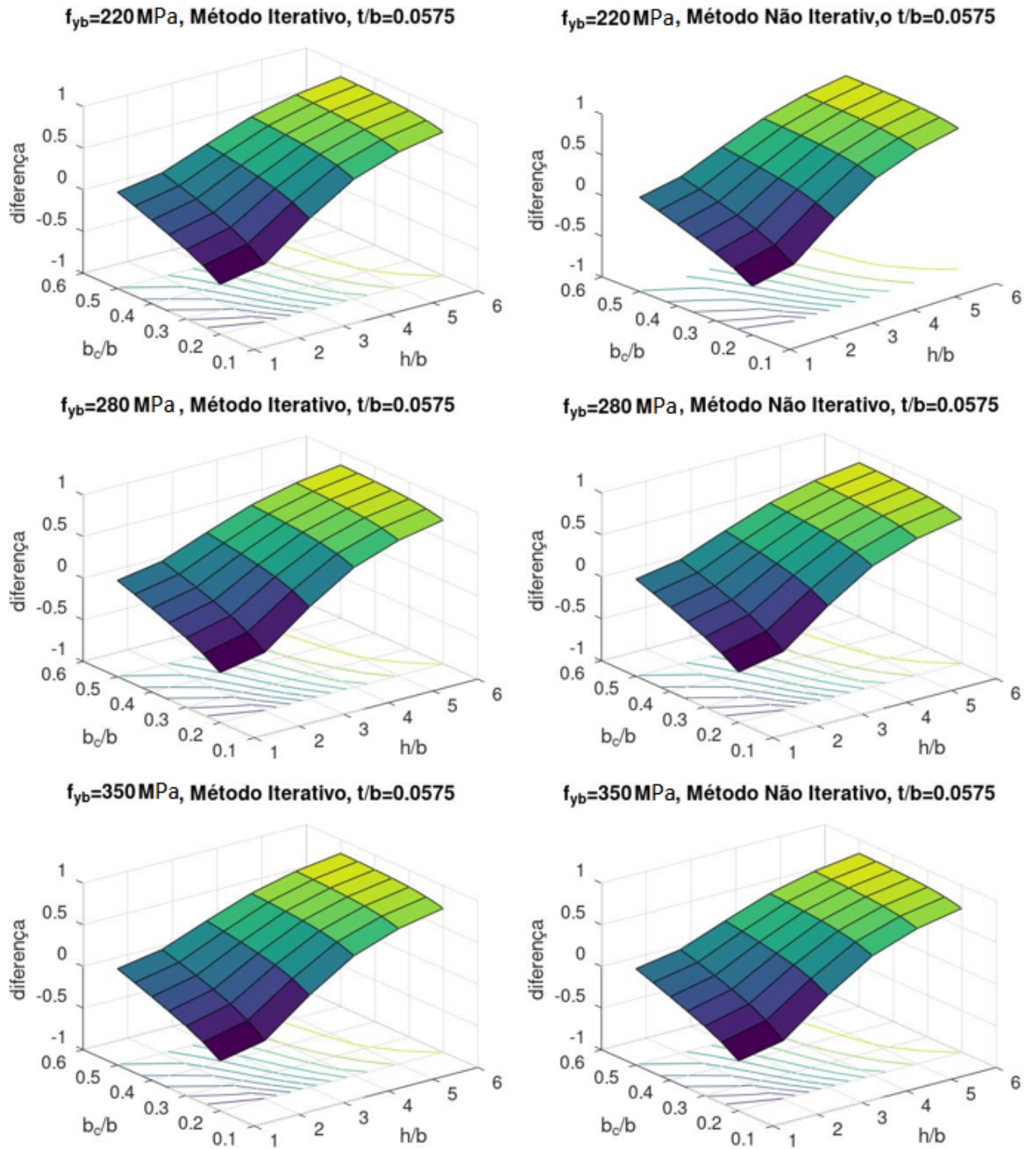


Figura 2.19: Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0575$.

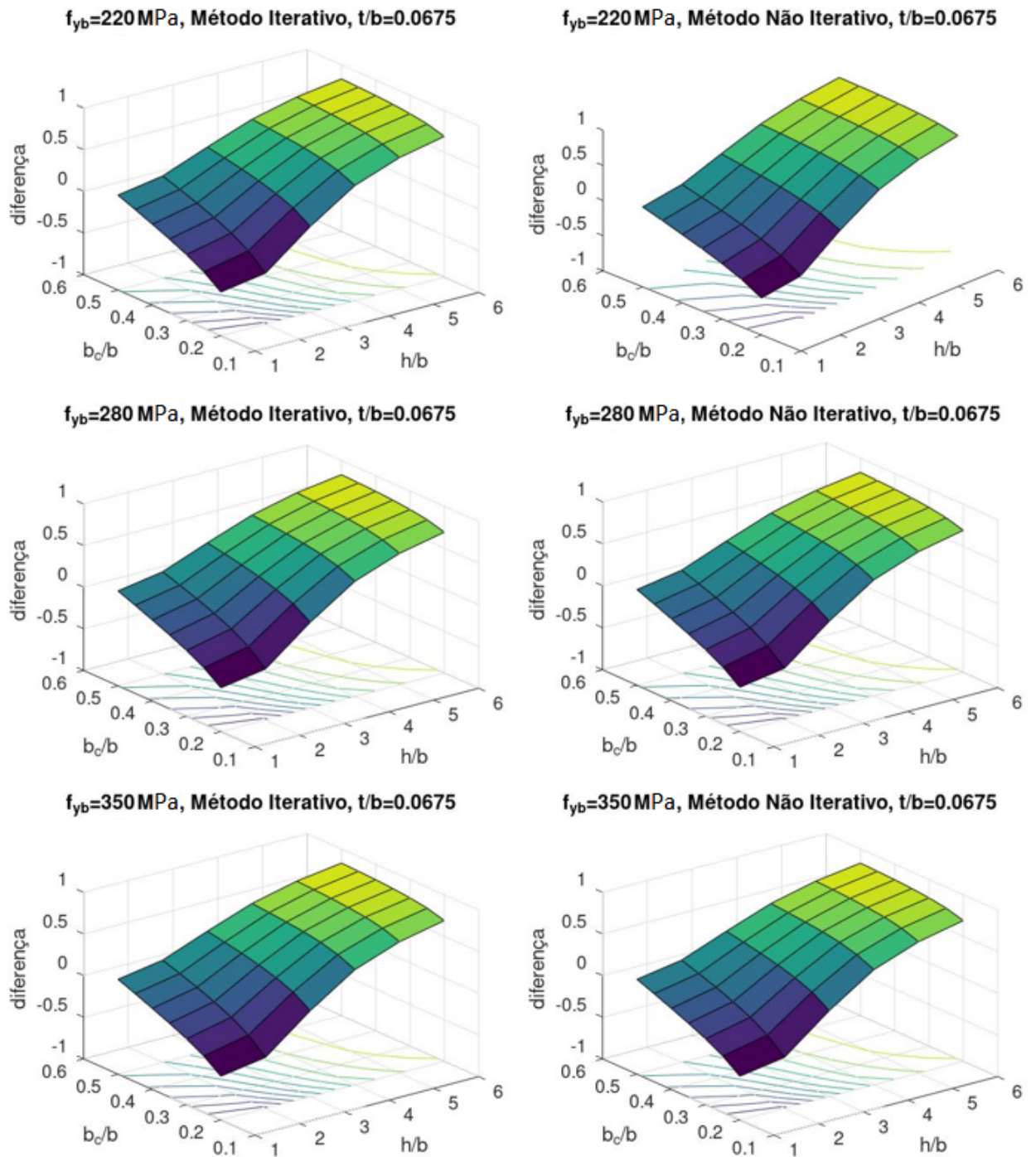


Figura 2.20: Grupo de superfícies para $\frac{t}{b} = 0.0675$.

Esses mesmos resultados são exibidos nas Tabelas 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.

Tabela 2.5: Resultados para a relação $t/b = 0.0225$.

		$t/b=0,0225$																							
Não Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,14	-0,07	-0,01	0,05	0,10	0,13	0,16	-0,11	-0,05	0,01	0,01	0,05	0,08	0,11	-0,09	-0,03	0,00	-0,05	-0,01	0,02	0,06			
	2,00	0,02	0,08	0,13	0,18	0,22	0,24	0,26	0,04	0,10	0,15	0,15	0,18	0,20	0,22	0,07	0,12	0,14	0,10	0,13	0,15	0,17			
	3,00	0,36	0,40	0,42	0,44	0,46	0,46	0,47	0,38	0,41	0,43	0,42	0,43	0,43	0,43	0,40	0,42	0,43	0,39	0,40	0,40	0,40			
	4,00	0,63	0,65	0,66	0,66	0,67	0,66	0,66	0,64	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,65	0,66	0,66	0,63	0,63	0,62	0,61			
	5,00	0,77	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,79	0,79	0,79	0,78	0,77	0,77	0,79	0,80	0,79	0,77	0,77	0,76	0,75			
	6,00	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,86	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,85	0,85	0,84	0,84			
Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,15	-0,08	-0,01	0,04	0,10	0,13	0,16	-0,15	-0,07	0,00	0,03	0,07	0,09	0,12	-0,14	-0,06	0,00	0,00	0,03	0,06	0,09			
	2,00	0,00	0,07	0,13	0,18	0,22	0,25	0,27	0,00	0,08	0,13	0,18	0,21	0,22	0,24	0,00	0,08	0,14	0,16	0,19	0,20	0,22			
	3,00	0,35	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48	0,48	0,35	0,39	0,42	0,44	0,46	0,46	0,46	0,35	0,39	0,42	0,44	0,44	0,44	0,44			
	4,00	0,62	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,67	0,62	0,64	0,65	0,66	0,67	0,66	0,65	0,62	0,64	0,65	0,66	0,66	0,65	0,65			
	5,00	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78			
	6,00	0,85	0,86	0,86	0,86	0,87	0,87	0,86	0,85	0,86	0,86	0,86	0,87	0,86	0,86	0,85	0,86	0,86	0,86	0,87	0,86	0,85			

Tabela 2.6: Resultados para a relação $t/b = 0.0475$.

		$t/b=0,0475$																							
Não Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18			
	2,00	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27			
	3,00	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47			
	4,00	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65			
	5,00	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77			
	6,00	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85			
Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18	-0,33	-0,22	-0,12	-0,04	0,03	0,10	0,18			
	2,00	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27	-0,21	-0,08	0,01	0,08	0,15	0,21	0,27			
	3,00	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47	0,18	0,27	0,32	0,37	0,40	0,43	0,47			
	4,00	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,50	0,56	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65			
	5,00	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,67	0,71	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77			
	6,00	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,76	0,80	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85			

Tabela 2.7: Resultados para a relação $t/b = 0.0575$.

		$t/b=0,0575$																							
Não Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16			
	2,00	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25			
	3,00	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45			
	4,00	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64			
	5,00	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76			
	6,00	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84			
Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16	-0,40	-0,27	-0,17	-0,08	0,00	0,08	0,16			
	2,00	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25	-0,30	-0,15	-0,04	0,04	0,12	0,18	0,25			
	3,00	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45	0,11	0,21	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45			
	4,00	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64	0,44	0,51	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64			
	5,00	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,63	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76			
	6,00	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,84			

Tabela 2.8: Resultados para a relação $t/b = 0.0675$.

		$t/b=0,0675$																							
Não Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14			
	2,00	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23			
	3,00	0,03	0,16	0,24	0,31	0,35	0,40	0,43	0,03	0,16	0,24	0,31	0,35	0,40	0,43	0,03	0,16	0,24	0,31	0,35	0,40	0,43			
	4,00	0,38	0,47	0,53	0,56	0,59	0,61	0,63	0,38	0,47	0,53	0,56	0,59	0,61	0,63	0,38	0,47	0,53	0,56	0,59	0,61	0,63			
	5,00	0,58	0,65	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75	0,58	0,65	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75	0,58	0,65	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75			
	6,00	0,69	0,75	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,69	0,75	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,69	0,75	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83			
Iterativo	f_{yb}	220								280								350							
	$h/b \parallel b_c/b$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50			
	1,00	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14	-0,48	-0,32	-0,21	-0,11	-0,03	0,06	0,14			
	2,00	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23	-0,39	-0,21	-0,09	0,00	0,09	0,16	0,23			
	3,00	0,03	0,16	0,24	0,31	0																			

implica uma maior diferença entre as tensões críticas distorcionais calculadas pelo método simplificado do EC3-1-3 e pelo GBTUL. O mesmo ocorre para a relação entre altura do reforço de extremidade e largura do banzo, quanto maior b_c/b , maior é a diferença entre as tensões críticas distorcionais. Contudo, ao comparar o efeito causado pelo aumento da duas relações, h/b e b_c/b , constata-se que h/b tem maior relevância no valor da diferença. Por disso, as maiores diferenças, que estão entre 83% e 87%, pertencem aos perfis com $h/b = 6$. Já as menores diferenças situam-se entre 0.20% e 0.80% e pertencem a perfis com $h/b = 1$ ou $h/b = 2$. A Tabela 2.9 indica as diferenças máximas e mínimas, em percentagem, para cada relação t/b .

Tabela 2.9: Diferenças máximas e mínimas para cada relação t/b

Diferença	Relação t/b			
	$t/b = 0,0225$	$t/b = 0,0475$	$t/b = 0,0575$	$t/b = 0,0675$
Mínima	0,23%	0,79%	0,15%	0,47%
Máxima	86,64%	84,65%	83,80%	83,02%

Para a relação $t/b = 0.0225$ é possível constatar que a variação da tensão de cedência altera a diferença entre as tensões críticas distorcionais calculadas em alguns perfis, apesar dessa influência ser muito baixa e não padronizada, ou seja, caso a tensão de cedência aumente, a diferença pode tanto aumentar como diminuir. Para as demais relações, a tensão de cedência do aço não teve qualquer efeito sob a diferença entre as tensões críticas distorcionais, uma vez que a tensão crítica distorcional calculada pelo método simplificado do EC3-1-3, $\sigma_{cr,d,ec3}$, não se altera com a mudança da tensão de cedência.

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA ÚLTIMA

3.1 Introdução

No âmbito do cálculo da resistência das colunas, foram aplicadas duas metodologias diferentes. A primeira consiste em determinar a resistência através do método simplificado do EC3-1-3, que por sua vez, conforme a Tabela 2.2, deu origem a quatro secções efetivas diferentes. Portanto, para cada perfil podem ser obtidas quatro resistências diferentes, uma para cada secção efetiva. A segunda metodologia consiste em aplicar o MEF, através do programa de elementos finitos Abaqus [1]. Esse método se baseia em um modelo de elementos finitos de casca que tem em conta as imperfeições geométricas presentes. Por ser um método mais preciso, os resultados foram usados para aferir a precisão do método aproximado do EC3-1-3. Contudo, o MEF requer um maior esforço computacional, o que acabou por reduzir a quantidade de perfis selecionados para a análise.

3.2 Estudo paramétrico

3.2.1 Âmbito e metodologia

No âmbito do cálculo da resistência pelo EC3-1-3, os perfis analisados foram os mesmos usados para a determinação da tensão crítica distorcional pelo métodos aproximado do EC3-1-3, portanto a geometria e as características dos material se mantêm as mesmas.

Já no âmbito da determinação da resistência pelo MEF, como anteriormente mencionado, é necessário um maior esforço computacional e, portanto, mais tempo para as análises, por isso apenas alguns perfis foram selecionados para esse método. A tabela 3.1 referencia a geometria dos perfis utilizados para aplicação do MEF.

Tabela 3.1: Geometria dos perfis para aplicação do MEF

t/b	perifs	$t[mm]$	Alma, $h_p[mm]$	Banzo, $b_p[mm]$	Reforço, $b_{cp}[mm]$	$L_{crD}[mm]$
0,0225	p1	1,62	142,38	70,38	13,59	580
	p2	1,62	142,38	70,38	35,19	1100
	p3	1,62	358,38	70,38	13,59	710
	p4	1,62	358,38	70,38	35,19	1340
0,0475	p5	2,04	126,96	40,96	7,58	250
	p6	2,04	169,96	40,96	7,58	270
	p7	2,04	126,97	40,96	20,48	480
	p8	2,04	212,96	40,96	20,48	540
0,0575	p9	2,53	129,47	41,47	7,54	230
	p10	2,53	173,47	41,47	7,54	250
	p11	2,53	129,47	41,47	20,74	440
0,0675	p12	2,97	129,03	41,03	20,52	400
	p13	2,97	217,03	41,03	20,52	450

Estes perfis também estão indicados a cor verde nas Tabelas 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8, de forma a evidenciá-los.

3.2.2 Determinação da resistência última pelo EC3-1-3

No âmbito da determinação da resistência pelo método simplificado do EC3-1-3 é necessário, como já dito, calcular uma nova secção efetiva correspondente a um momento em torno do eixo fraco que comprime a alma. Após isso, é preciso verificar o estado limite último para então calcular a resistência última da coluna. Além disso, é necessário ressaltar que após se calcular as secções transversais efetivas de acordo com a Secção 2.3.5, podem ocorrer três situações:

1. O centro de gravidade da secção efetiva se distancia da alma.
2. O centro de gravidade da secção efetiva se aproxima da alma.
3. O centro de gravidade da secção efetiva não se desloca.

Apenas o primeiro caso foi alvo de estudo neste trabalho. Nessa situação, gera-se um momento adicional em torno do eixo fraco, conforme mostra a Figura 2.15, devido ao deslocamento do centro de gravidade da secção efetiva para a direita, que é responsável por deixar a alma sujeita à compressão e o reforço da extremidade à tração. Torna-se assim necessário calcular uma nova secção efetiva correspondente a um momento em torno do eixo fraco que comprime a alma.

3.2.2.1 Determinação da secção efetiva para o momento em torno do eixo fraco

Para a obtenção da área efetiva de um elemento, o procedimento de cálculo será o mesmo aplicado em 2.3.5. A alma, uma vez que está comprimida, continua com a área efetiva calculada anteriormente. Já o reforço de extremidade, por ser um elemento tracionado, é

totalmente efetivo ($\rho = 1$), conseqüentemente $b_{cp,eff} = b_{cp}$. O banzo está sujeito tanto a compressão como a tração, pelo que é preciso calcular a sua área efetiva. A Figura 3.1 ilustra o diagrama de tensões devido ao momento em torno do eixo fraco, na secção efetiva.

Procedimento para cálculo da área efetiva do banzo

Uma vez que o banzo não se encontra sob compressão uniforme é preciso calcular a razão das tensões extremas aplicadas, ψ , para então, através da tabela 2.1, obter o valor do coeficiente k_σ .

A tensão de compressão é dada por:

$$\sigma_1 = \sigma_{com,ed} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{m0}} \quad (3.1)$$

A tensão de tração é calculada pela semelhança do triângulo do terceiro diagrama da distribuição de tensão da Tabela 2.1, uma vez que o centro de gravidade da secção é conhecido, e é dada por:

$$\sigma_2 = -\frac{\sigma_1 \cdot (b_p - y_{cg})}{y_{cg}} \quad (3.2)$$

O sinal negativo advém do fato de σ_2 ser uma tensão de tração. Com isso, calcula-se ψ :

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\frac{b_p - y_{cg}}{y_{cg}} \quad (3.3)$$

Consoante o valor de ψ , aplica-se a fórmula referente ao intervalo indicado na Tabela 2.1 para calcular o fator de encurvadura, k_σ . Depois, basta seguir os passos do procedimento aplicado na Secção 2.3.5 para cálculo da esbelteza e do coeficiente de redução. Em seguida, calcula-se a largura efetiva do banzo:

$$b_{p,eff} = \frac{\rho \cdot b_p}{1 - \psi} \quad (3.4)$$

Obtém-se assim uma secção efetiva ilustrada na Figura 3.1.

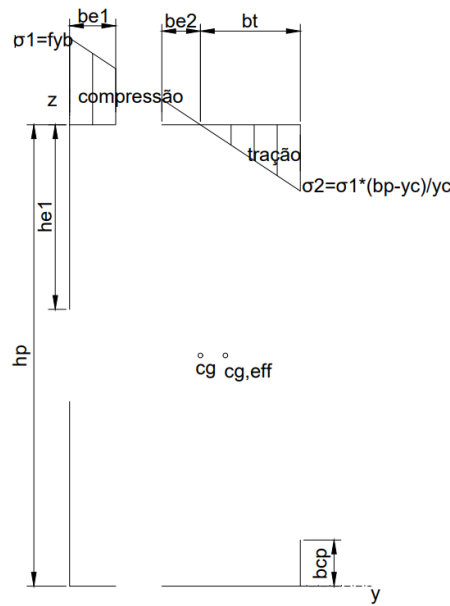


Figura 3.1: Secção transversal efetiva proveniente de um momento fletor em torno do eixo fraco (comprimindo a alma).

onde:

$$b_{e2} = 0.6 \cdot b_{p,eff} \quad (3.5)$$

$$b_{e1} = 0.4 \cdot b_{p,eff} \quad (3.6)$$

$$b_t = b_{p,eff} - b_{e1} - b_{e2} \quad (3.7)$$

Foi aplicado um método iterativo opcional para o cálculo da secção efetiva, pois o centro de gravidade ao se deslocar para a direita da alma, faz com que a tensão de tração diminua, o que acaba por mudar o valor de ψ . Portanto, repete-se todo o procedimento anterior com o novo valor de ψ e do centro de gravidade da secção efetiva, $y_{cg,eff}$, até que seja respeitada a tolerância adotada, dada por: $\frac{|y_{cg,eff} - y_{cg,antigo}|}{y_{cg,eff}} > 0.0001$. Vale a pena referir que este processo converge em poucas iterações.

3.2.2.2 Verificação do estado limite último e cálculo da resistência da coluna

Para esta etapa é necessário efetuar duas verificações: (i) resistência da secção transversal e (ii) resistência do elemento.

Resistência da secção transversal

Segundo o EC3-1-3 cláusula 6.1.9(1), secções transversais sujeitas tanto a compressão como a flexão devem satisfazer a seguinte condição [7]:

$$\frac{N_{Ed,s}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (3.8)$$

onde:

$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff,com} \cdot f_{yb}}{\gamma_{m0}}$, é a resistência de dimensionamento da secção à compressão e $A_{eff,com}$ é a área da secção efetiva submetida a compressão uniforme, ver Secção 2.3.5

$M_{z,Ed} = 0$ pois é o momento atuante em torno do eixo z.

$M_{y,Ed} = 0$ pois é o momento atuante em torno do eixo y.

$\Delta M_{y,Ed} = 0$ pois não existe excentricidade em y (secção com um eixo de simetria).

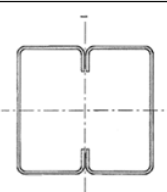
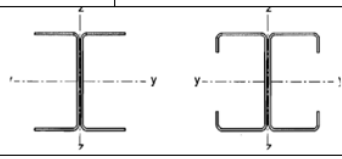
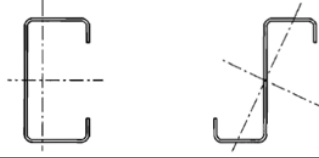
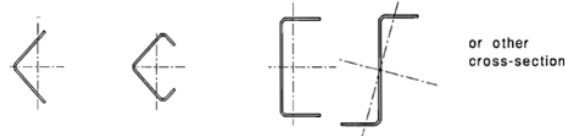
$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed,s} \cdot y_{ec}$ sendo a excentricidade, y_{ec} , calculada segundo a equação 2.46 .

$M_{cz,Rd,com} = \frac{W_{eff,z} \cdot f_{yb}}{\gamma_{m0}}$ é o momento resistente para a máxima tensão compressiva em uma secção transversal que está sujeita apenas ao momento sobre o eixo relevante, e o módulo de flexão da secção efetiva que esta sob efeito de um momento fletor, $W_{eff,z}$, pode ser obtido a partir da Equação 2.13 aplicada à Figura 3.1.

Resistência à encurvadura da coluna

De acordo com a cláusula 6.2.3 do EC3-1-3 , a resistência a encurvadura de uma secção transversal efetiva submetida a compressão tem de ser determinada tendo em conta a encurvadura por flexão (em torno do eixo de menor inércia - modo 3 da GBTUL) e por flexão (em torno do eixo de maior inércia)-torção (modo 2+4 da GBTUL, respetivamente). Para isso é preciso utilizar a curva tipo b de encurvadura que esta associada ao tipo de secção transversal em estudo, ver Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Tipo de curva de encurvadura associada ao tipo de Secção [7].

Type of cross-section	Buckling about axis	Buckling cuve
	If f_{yb} is used	b
	If f_{ya} is used	c
	y-y z-z	a b
	Any	b
 or other cross-section	Any	c

O fator de imperfeição, α , pode ser obtido através da Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Fator de imperfeição das curvas de encurvadura associadas a uma determinada secção transversal [7]

Curva de encurvadura	a_0	a	b	c	d
Fator de imperfeição	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Dessa forma é possível calcular a resistência à encurvadura por flexão e flexão-torção de uma barra à compressão, uma vez que $\alpha = 0.34$.

Resistência à encurvadura por flexão segundo o eixo fraco de uma barra à compressão uniforme

Segundo a cláusula 6.3.1.3 do EC3-1-1 [6], a esbelteza para a encurvadura por flexão segundo o eixo fraco de secções de classe 4, λ_f , é dada por:

$$\lambda_f = \sqrt{\frac{A_{eff,com} \cdot f_{yb}}{N_{cr}}} = \frac{L_{crD} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff,com}}{A_g}}}{i \cdot \lambda_1} \quad (3.9)$$

onde:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yb}}}$$

L_{crD} é o comprimento crítico, que será admitido como o obtido pelo software GBTUL, ver Secção 2.2.1.

$A_{eff,com}$ é a área efetiva da secção submetida a compressão uniforme.

A_g é a área total da secção bruta em análise.

i é o raio de giração em torno do eixo mais fraco, ver Secção 2.3.1.

A cláusula 6.3.1.2 do EC3-1-1 fornece o parâmetro ϕ e o fator de redução para encurvadura por flexão, χ_z :

$$\phi = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_f - 0.2) + \lambda_f^2] \quad (3.10)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_f^2}} \leq 1 \quad (3.11)$$

A cláusula 6.3.1.1 do EC3-1-1 permite calcular a resistência à encurvadura por flexão segundo eixo fraco de uma barra à compressão através da seguinte equação:

$$N_{b,Rd,f} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff,com} \cdot f_{yb}}{\gamma_{m1}} \quad (3.12)$$

Resistência à encurvadura por flexão-torção de uma barra à compressão

Para barras com secções transversais abertas mono-simétricas, o EC3-1-3 exige que seja averiguada a possibilidade da resistência do elemento à encurvadura por flexão-torção ser menor que sua resistência à encurvadura por flexão. Para o cálculo da resistência

à encurvadura por flexão-torção é preciso, primeiro, obter o esforço axial crítico para encurvadura por torção, dado por:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \cdot \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{cr}^2} \right) \quad (3.13)$$

com:

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_{cc,cg}^2 + z_{cc,cg}^2 \quad (3.14)$$

onde:

G é módulo de distorção.

I_t é constante de torção da seção, ver Secção 2.3.1.

I_w é a constante de empenamento da seção, ver Secção 2.3.1.

i_y e i_z são os raios de giração em torno de ambos os eixos y e z , ver Secção 2.3.1.

$y_{cc,cg}$, $z_{cc,cg}$ são as distâncias do centro de corte ao centro de gravidade. Tendo em conta que a seção é simétrica em torno do eixo y , $z_{cc,cg} = 0$, ver Secção 2.3.1.

Em seguida, é preciso calcular o esforço axial crítico para a encurvadura por flexão-torção, $N_{cr,TF}$, que é determinado a partir da seguinte equação:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \left(1 - \left(\frac{y_o}{i_o}\right)^2\right)} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \cdot \frac{y_o^2}{i_o^2} \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (3.15)$$

onde:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \quad (3.16)$$

É o esforço axial crítico para encurvadura por flexão em torno do eixo de maior inércia.

Agora é possível calcular a esbelteza para encurvadura por flexão-torção:

$$\lambda_{FT} = \sqrt{\frac{A_{eff,com} \cdot f_{yb}}{N_{cr,FT}}} \quad (3.17)$$

Com o valor dessa esbelteza e do coeficiente de imperfeição, $\alpha = 0.34$, calculam-se os parâmetros, ϕ_{FT} e χ_{FT} , com as Equações 3.10 e 3.11, para determinar a resistência de dimensionamento da coluna à encurvadura por flexão-torção:

$$N_{b,Rd,FT} = \frac{\chi_{FT} \cdot A_{eff,com} \cdot f_{yb}}{\gamma_{m1}} \quad (3.18)$$

O valor de dimensionamento da resistência da coluna à encurvadura corresponde a:

$$N_{b,Rd} = \min(N_{b,Rd,FT}; N_{b,Rd,f}) \quad (3.19)$$

Contudo, tem ainda que se levar em conta a resistência à encurvadura lateral por torção sob o efeito de flexão, que é obtida conforme se explica em seguida.

Resistência de vigas à encurvadura lateral

Segundo o EC3-1-3, a esbelteza normalizada para encurvadura lateral, λ_{LT} , é determinada pela cláusula 6.3.2.2 do EC3-1-1, conforme a seguinte equação:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yb}}{M_{cr}}} \quad (3.20)$$

onde:

M_{cr} é o momento crítico elástico para encurvadura lateral. Esse momento é calculado levando em conta as condições de carregamento, a distribuição do diagrama de momento fletor e os travamentos laterais da estrutura.

O valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral para uma secção de classe 4 é calculado por:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{lt} \cdot W_{eff,z} \cdot f_{yb}}{\gamma_{m1}} \quad (3.21)$$

No presente trabalho, tendo em conta que o objetivo é avaliar a precisão do método simplificado do EC3-1-3 para determinar a resistência à distorção, optou-se por contraven-
tar lateralmente os perfis, pelo que este modo de encurvadura não é considerado.

Resistência do elemento devido a interação flexão e compressão

Segundo a cláusula 6.2.5(2) do EC3-1-3, a resistência à encurvadura devido a interação entre flexão e compressão axial, $N_{Ed,c}$, é dada por:

$$\frac{N_{Ed,c}^{0.8}}{N_{b,Rd}^{0.8}} + \frac{M_{Ed}^{0.8}}{M_{b,Rd}^{0.8}} \leq 1 \quad (3.22)$$

onde:

$M_{Ed} = N_{Ed,c} \cdot y_{ec}$ uma vez que, segundo o EC3-1-3, este momento deve incluir o efeito da excentricidade causada pelo deslocamento do centro de gravidade.

Com isso é possível calcular o valor da resistência última, sendo ela:

$$N_{Rd,ultimo} = \min(N_{Ed,c}; N_{Ed,s}) \quad (3.23)$$

3.2.3 Resultados

Conforme foi visto na Secção 2.3.5, a Tabela 2.2 mostra que para um único perfil analisado existem quatro secções efetivas; conseqüentemente a análise da resistência última também apresentará quatro valores, um para cada secção efetiva obtida. A Tabela 3.4 faz referência aos valores das resistências calculadas para os perfis com a relação $\frac{t}{b} = 0.0225$. Os resultados para as outras três relações de t/b podem ser encontrados no Anexo II.

Tabela 3.4: Resistências últimas para $t/b = 0.0225$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
1	70,38	70,38	13,59	220	-	-	-	-
2	70,38	70,38	17,19	220	-	-	-	-
3	70,38	70,38	20,79	220	-	-	-	-
4	70,38	70,38	24,39	220	-	-	-	-
5	70,38	70,38	27,99	220	-	-	75053,6	74978,1
6	70,38	70,38	31,59	220	-	-	-	-
7	70,38	70,38	35,19	220	-	-	-	-
8	142,38	70,38	13,59	220	68185,9	68301,5	67924,4	68254,1
9	142,38	70,38	17,19	220	67114,3	67359	66376	66752,9
10	142,38	70,38	20,79	220	66868,8	67186,5	65915,2	66258,7
11	142,38	70,38	24,39	220	67214,9	67555,1	66088,6	66341,5
12	142,38	70,38	27,99	220	67757,9	68026,5	66475,3	66584,2
13	142,38	70,38	31,59	220	69133,4	68800,9	67735,7	67595
14	142,38	70,38	35,19	220	70827,1	70444,9	69238,6	69116,4
15	214,38	70,38	13,59	220	66023	65968,8	60736,1	61009
16	214,38	70,38	17,19	220	64318,8	64397	59909,8	60208
17	214,38	70,38	20,79	220	63374,8	63537,5	59775,7	60100,6
18	214,38	70,38	24,39	220	63094,3	63310,2	59931,1	60235,8
19	214,38	70,38	27,99	220	63274,7	63486	60343	60537,8
20	214,38	70,38	31,59	220	64070	63858,7	61267,2	61130,8
21	214,38	70,38	35,19	220	65127,2	64425,9	62336,3	62206,4
22	286,38	70,38	13,59	220	62947,9	62862,1	56546,7	56790,2
23	286,38	70,38	17,19	220	62653,8	62631,5	55893,8	56145,4
24	286,38	70,38	20,79	220	62282,2	62314,1	55730,6	56003,3
25	286,38	70,38	24,39	220	62149,7	62222,3	55841,6	56133,4
26	286,38	70,38	27,99	220	62171,2	62236,6	56107,7	56345,6
27	286,38	70,38	31,59	220	62740	62404,9	56803,3	56678,1
28	286,38	70,38	35,19	220	63436,6	62638,5	57551,2	57430,1
29	358,38	70,38	13,59	220	60715,9	60633	53886,6	54094,3
30	358,38	70,38	17,19	220	60693,4	60644,2	53182,8	53404,4
31	358,38	70,38	20,79	220	60423,6	60411,5	52955,8	53195
32	358,38	70,38	24,39	220	60363,5	60381,2	53019,3	53274,9
33	358,38	70,38	27,99	220	60378,2	60387,5	53223,3	53463
34	358,38	70,38	31,59	220	60767,6	60432,8	53758,5	53679,4
35	358,38	70,38	35,19	220	61315,4	60579	54375,5	54261

Tabela 3.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
36	430,38	70,38	13,59	220	58737,5	58676,6	52014,8	52205,1
37	430,38	70,38	17,19	220	58923,9	58875,4	51296,8	51497,8
38	430,38	70,38	20,79	220	58862,4	58835,3	51039,1	51255,6
39	430,38	70,38	24,39	220	58849,7	58842,5	51023,7	51254,7
40	430,38	70,38	27,99	220	58927,2	58909,2	51176,9	51393,7
41	430,38	70,38	31,59	220	59291,8	58975,9	51627,9	51590,9
42	430,38	70,38	35,19	220	59717	59049,7	52118,1	52007,4
43	70,38	70,38	13,59	280	-	-	-	-
44	70,38	70,38	17,19	280	-	-	-	-
45	70,38	70,38	20,79	280	-	-	-	-
46	70,38	70,38	24,39	280	-	-	-	-
47	70,38	70,38	27,99	280	-	-	-	-
48	70,38	70,38	31,59	280	-	-	-	-
49	70,38	70,38	35,19	280	-	-	-	-
50	142,38	70,38	13,59	280	-	82573,6	81653,5	82465,8
51	142,38	70,38	17,19	280	79627,1	79948,2	78039,1	78776,7
52	142,38	70,38	20,79	280	78546,8	79011,9	76842,4	77428,7
53	142,38	70,38	24,39	280	79454,7	79031,6	77889,3	77151,6
54	142,38	70,38	27,99	280	80192,4	79341,2	78464,6	77803,5
55	142,38	70,38	31,59	280	81767,8	80850,6	79851,9	79223,1
56	142,38	70,38	35,19	280	83819	82768,5	81578,8	80955,1
57	214,38	70,38	13,59	280	-	78474,9	72003,8	72756,5
58	214,38	70,38	17,19	280	77126,2	76982,8	70192,6	70968,5
59	214,38	70,38	20,79	280	76317,8	76448,5	69622,9	70261,6
60	214,38	70,38	24,39	280	75748,3	75381,1	70334,5	70074,6
61	214,38	70,38	27,99	280	75725,4	75166,1	70898,3	70413,9
62	214,38	70,38	31,59	280	76446,9	75337,9	71898,2	71440
63	214,38	70,38	35,19	280	77607,1	75978,4	73096,8	72648,2
64	286,38	70,38	13,59	280	-	74691,2	66918	67573,9
65	286,38	70,38	17,19	280	74052,5	73762,4	65431,9	66090
66	286,38	70,38	20,79	280	73272,9	73202,7	64887	65549,6
67	286,38	70,38	24,39	280	73566,4	72970,4	65417,2	65353,4
68	286,38	70,38	27,99	280	73711	72886,8	65769,5	65384,9
69	286,38	70,38	31,59	280	74378,2	73004,9	66501,7	66113,8
70	286,38	70,38	35,19	280	75223,6	73206,6	67309,4	66934,3

Tabela 3.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
71	358,38	70,38	13,59	280	72361,4	71782,2	63356	63729,9
72	358,38	70,38	17,19	280	71574,2	71250,4	62245,9	62827,4
73	358,38	70,38	20,79	280	70988,7	70819,9	61646,6	62263,5
74	358,38	70,38	24,39	280	71306,7	70678,2	62049,6	62094
75	358,38	70,38	27,99	280	71435,4	70596,1	62310,6	62076,3
76	358,38	70,38	31,59	280	71888,6	70570,3	62852,6	62497,8
77	358,38	70,38	35,19	280	72560,2	70676,3	63509,6	63169,4
78	430,38	70,38	13,59	280	69448,5	69099,5	60782,9	61122,7
79	430,38	70,38	17,19	280	69272,2	69008,5	60052	60581,4
80	430,38	70,38	20,79	280	69035,7	68852,8	59425,5	59982,7
81	430,38	70,38	24,39	280	69350,5	68770,9	59687	59800,2
82	430,38	70,38	27,99	280	69557,9	68774,3	59875,1	59735,6
83	430,38	70,38	31,59	280	70001	68783,2	60320,3	59979,2
84	430,38	70,38	35,19	280	70529	68804,6	60825,2	60501,2
85	70,38	70,38	13,59	350	-	-	-	-
86	70,38	70,38	17,19	350	-	-	-	-
87	70,38	70,38	20,79	350	-	-	-	-
88	70,38	70,38	24,39	350	-	-	-	-
89	70,38	70,38	27,99	350	-	-	-	-
90	70,38	70,38	31,59	350	-	-	-	-
91	70,38	70,38	35,19	350	-	-	-	-
92	142,38	70,38	13,59	350	-	-	-	-
93	142,38	70,38	17,19	350	-	94822,7	91341,6	92392,4
94	142,38	70,38	20,79	350	92610,2	92324	89594,4	89642,4
95	142,38	70,38	24,39	350	94204,3	91754,8	92057,2	89677,5
96	142,38	70,38	27,99	350	94620,5	92389,5	92189,6	90259,7
97	142,38	70,38	31,59	350	96431,3	94033,5	93639,5	91777,1
98	142,38	70,38	35,19	350	99092,1	96258,9	95602,3	93709,1
99	214,38	70,38	13,59	350	-	-	84914,2	85529,7
100	214,38	70,38	17,19	350	-	89803,7	81723,3	82956,2
101	214,38	70,38	20,79	350	89522,7	88769,2	80911,8	81356
102	214,38	70,38	24,39	350	90919,6	88354,1	82430,2	80876,2
103	214,38	70,38	27,99	350	91239,3	88429,6	82765,9	81484,1
104	214,38	70,38	31,59	350	92260,3	88586,8	83776,8	82569,1
105	214,38	70,38	35,19	350	93417,1	89244,2	85074	83891

Tabela 3.4 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
106	286,38	70,38	13,59	350	-	-	77479,7	78102,3
107	286,38	70,38	17,19	350	-	85853,4	76133,9	77293,7
108	286,38	70,38	20,79	350	85876,5	84874,6	75342	75932,2
109	286,38	70,38	24,39	350	86935,2	84421,8	76467,9	75339
110	286,38	70,38	27,99	350	86835	84188,6	76592,3	75516,2
111	286,38	70,38	31,59	350	87632,2	84221,7	77295,7	76297,6
112	286,38	70,38	35,19	350	88751,4	84362,9	78119,6	77161,6
113	358,38	70,38	13,59	350	-	-	73010,8	73582,1
114	358,38	70,38	17,19	350	-	82802,3	72221,5	72943,2
115	358,38	70,38	20,79	350	83150,8	82005,8	71564,7	72238,4
116	358,38	70,38	24,39	350	-	81673,7	72449,5	71614,1
117	358,38	70,38	27,99	350	84134	81449,3	72485,9	71491,8
118	358,38	70,38	31,59	350	84676,2	81311,5	72966,3	72055,9
119	358,38	70,38	35,19	350	85639,5	81347,6	73618,5	72755,1
120	430,38	70,38	13,59	350	-	80338,4	69949,8	70475,5
121	430,38	70,38	17,19	350	-	79994,8	69291,5	69945,3
122	430,38	70,38	20,79	350	80626,6	79623,4	69010,3	69628,6
123	430,38	70,38	24,39	350	-	79385,1	69668,8	69007,3
124	430,38	70,38	27,99	350	-	79277,3	69625,6	68705,6
125	430,38	70,38	31,59	350	-	79189,4	69995,4	69117
126	430,38	70,38	35,19	350	-	79125,3	70465,5	69641,6

Comparação entre as resistências últimas obtidas

Como já foi dito anteriormente, os perfis que são do interesse para esse trabalho são aqueles onde há deslocamento do centro de gravidade da secção efetiva para direita. Porém, em alguns perfis isso não ocorreu, a exemplo dos perfis que têm uma relação $\frac{h}{b}$ ou muito baixa ou muito alta. Por isso, os perfis com $\frac{h}{b} = 1$ e $\frac{h}{b} = 6$ não fizeram parte da amostra comparativa, bem como, também por esse motivo, alguns perfis não apresentam valores, como se pode ver nas Tabelas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8. Note-se que para calcular a diferença percentual entre as resistências dos métodos usados, usou-se a seguinte equação:

$$dif = \frac{N_{ed,ultimo,gbtul} - N_{ed,ultimo,ec3}}{N_{ed,ultimo,ec3}} \quad (3.24)$$

3.2. ESTUDO PARAMÉTRICO

Tabela 3.5: Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0225$

f_{yb} [MPa]	b_c/b	NÃO ITERATIVO				ITERATIVO			
		h/b				h/b			
		2,00	3,00	4,00	5,00	2,00	3,00	4,00	5,00
220	0,20	0,38%	8,70%	11,32%	12,67%	0,07%	8,13%	10,69%	12,09%
	0,25	1,11%	7,36%	12,09%	14,12%	0,91%	6,96%	11,55%	13,56%
	0,30	1,45%	6,02%	11,76%	14,10%	1,40%	5,72%	11,27%	13,57%
	0,35	1,70%	5,28%	11,30%	13,85%	1,83%	5,10%	10,85%	13,34%
	0,40	1,93%	4,86%	10,81%	13,44%	2,17%	4,87%	10,46%	12,95%
	0,45	2,06%	4,57%	10,45%	13,04%	1,78%	4,46%	10,10%	12,58%
	0,50	2,29%	4,48%	10,23%	12,76%	1,92%	3,57%	9,07%	11,64%
280	0,20	-	-	-	14,21%	0,13%	7,86%	10,53%	12,64%
	0,25	2,03%	9,88%	13,17%	14,99%	1,49%	8,47%	11,61%	13,41%
	0,30	2,22%	9,62%	12,92%	15,15%	2,04%	8,81%	11,68%	13,74%
	0,35	2,01%	7,70%	12,46%	14,92%	2,44%	7,57%	11,66%	13,82%
	0,40	2,20%	6,81%	12,07%	14,64%	1,98%	6,75%	11,47%	13,72%
	0,45	2,40%	6,33%	11,84%	14,38%	2,05%	5,46%	10,42%	12,92%
	0,50	2,75%	6,17%	11,76%	14,25%	2,24%	4,58%	9,37%	11,88%
350	0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,25	-	-	-	-	2,63%	8,25%	11,07%	13,52%
	0,30	3,37%	10,64%	13,98%	16,19%	2,99%	9,11%	11,78%	13,52%
	0,35	2,33%	10,30%	13,69%	-	2,32%	9,25%	12,06%	14,05%
	0,40	2,64%	10,24%	13,37%	16,07%	2,36%	8,52%	11,48%	13,93%
	0,45	2,98%	10,13%	13,37%	16,05%	2,46%	7,29%	10,39%	12,85%
	0,50	3,65%	9,81%	13,61%	16,33%	2,72%	6,38%	9,33%	11,81%

Tabela 3.6: Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0475$

f_{yb} [MPa]	b_c/b	NÃO ITERATIVO				ITERATIVO			
		h/b				h/b			
		2,00	3,00	4,00	5,00	2,00	3,00	4,00	5,00
220	0,20	-	2,13%	8,64%	-	-	2,13%	8,64%	-
	0,25	0,00%	2,62%	7,87%	-	0,00%	2,62%	7,87%	-
	0,30	0,00%	2,59%	7,29%	-	0,00%	2,59%	7,29%	-
	0,35	0,00%	1,86%	6,42%	14,09%	0,00%	1,86%	6,42%	14,09%
	0,40	0,00%	1,35%	5,50%	12,06%	0,00%	1,35%	5,50%	12,06%
	0,45	0,00%	1,02%	4,88%	10,53%	0,00%	1,02%	4,88%	10,53%
	0,50	0,00%	0,80%	4,36%	9,39%	0,00%	0,80%	4,36%	9,39%
280	0,20	-	2,63%	-	-	-	2,63%	-	-
	0,25	-1,22%	3,23%	10,71%	-	-1,22%	3,23%	10,71%	-
	0,30	0,09%	3,36%	9,20%	-	0,09%	3,36%	9,20%	-
	0,35	0,00%	3,41%	8,29%	16,06%	0,00%	3,41%	8,29%	16,06%
	0,40	0,00%	3,06%	7,63%	15,39%	0,00%	3,06%	7,63%	15,39%
	0,45	0,00%	2,68%	7,03%	14,77%	0,00%	2,68%	7,03%	14,77%
	0,50	0,00%	2,42%	6,36%	13,48%	0,00%	2,42%	6,36%	13,48%
350	0,20	-	3,47%	-	-	-	3,47%	-	-
	0,25	-1,46%	3,94%	-	-	-1,46%	3,94%	-	-
	0,30	0,10%	4,00%	12,37%	-	0,10%	4,00%	12,37%	-
	0,35	0,92%	4,00%	10,65%	16,52%	0,92%	4,00%	10,65%	16,52%
	0,40	1,33%	4,03%	9,57%	16,01%	1,33%	4,03%	9,57%	16,01%
	0,45	1,06%	4,13%	8,95%	15,51%	1,06%	4,13%	8,95%	15,51%
	0,50	0,96%	4,05%	8,42%	15,05%	0,96%	4,05%	8,42%	15,05%

3.2. ESTUDO PARAMÉTRICO

Tabela 3.7: Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0575$

f_{yb} [MPa]	b_c/b	NÃO ITERATIVO				ITERATIVO			
		h/b				h/b			
		2,00	3,00	4,00	5,00	2,00	3,00	4,00	5,00
220	0,20	-	1,21%	6,24%	-	-	1,21%	6,24%	-
	0,25	-	1,62%	6,27%	-	-	1,62%	6,27%	-
	0,30	-	0,80%	5,62%	12,18%	-	0,80%	5,62%	12,18%
	0,35	-	0,14%	4,77%	10,42%	-	0,14%	4,77%	10,42%
	0,40	-	0,00%	4,00%	9,25%	-	0,00%	4,00%	9,25%
	0,45	-	0,00%	3,47%	8,18%	-	0,00%	3,47%	8,18%
	0,50	-	0,00%	3,03%	7,44%	-	0,00%	3,03%	7,44%
280	0,20	-	1,42%	8,04%	-	-	1,42%	8,04%	-
	0,25	-	2,39%	7,79%	-	-	2,39%	7,79%	-
	0,30	-	2,83%	7,50%	-	-	2,83%	7,50%	-
	0,35	-	2,06%	7,04%	14,81%	-	2,06%	7,04%	14,81%
	0,40	-	1,56%	6,07%	13,14%	-	1,56%	6,07%	13,14%
	0,45	-	1,21%	5,42%	11,51%	-	1,21%	5,42%	11,51%
	0,50	-	1,00%	4,88%	10,45%	-	1,00%	4,88%	10,45%
350	0,20	-	1,73%	-	-	-	1,73%	-	-
	0,25	-	2,80%	10,39%	-	-	2,80%	10,39%	-
	0,30	-0,61%	3,27%	9,31%	-	-0,61%	3,27%	9,31%	-
	0,35	0,00%	3,44%	8,70%	-	0,00%	3,44%	8,70%	-
	0,40	0,00%	3,32%	8,08%	-	0,00%	3,32%	8,08%	-
	0,45	0,00%	2,91%	7,60%	16,46%	0,00%	2,91%	7,60%	16,46%
	0,50	0,00%	2,68%	6,91%	14,79%	0,00%	2,68%	6,91%	14,79%

Tabela 3.8: Diferença entre as resistências para $\frac{t}{b} = 0.0675$

f_{yb} [MPa]	b_c/b	NÃO ITERATIVO				ITERATIVO			
		h/b				h/b			
		2,00	3,00	4,00	5,00	2,00	3,00	4,00	5,00
220	0,20	-	-	0,00%	1,79%	-	-	0,00%	1,79%
	0,25	-	0,37%	4,82%	9,76%	-	0,37%	4,82%	9,76%
	0,30	-	0,00%	4,72%	10,02%	-	0,00%	4,72%	10,02%
	0,35	-	0,00%	3,88%	9,16%	-	0,00%	3,88%	9,16%
	0,40	-	0,00%	3,25%	8,07%	-	0,00%	3,25%	8,07%
	0,45	-	0,00%	2,59%	7,22%	-	0,00%	2,59%	7,22%
	0,50	-	0,00%	2,13%	6,50%	-	0,00%	2,13%	6,50%
280	0,20	-	-	0,00%	3,63%	-	-	0,00%	3,63%
	0,25	-	0,41%	5,82%	-	-	0,41%	5,82%	-
	0,30	-	1,78%	6,22%	-	-	1,78%	6,22%	-
	0,35	-	1,06%	6,26%	12,89%	-	1,06%	6,26%	12,89%
	0,40	-	0,42%	5,37%	11,38%	-	0,42%	5,37%	11,38%
	0,45	-	0,00%	4,57%	10,18%	-	0,00%	4,57%	10,18%
	0,50	-	0,00%	4,04%	9,22%	-	0,00%	4,04%	9,22%
350	0,20	-	-	1,33%	5,53%	-	-	1,33%	5,53%
	0,25	-	0,47%	7,43%	-	-	0,47%	7,43%	-
	0,30	-	2,07%	7,78%	-	-	2,07%	7,78%	-
	0,35	-	2,67%	7,71%	-	-	2,67%	7,71%	-
	0,40	-	2,38%	7,48%	-	-	2,38%	7,48%	-
	0,45	-	1,88%	6,66%	14,24%	-	1,88%	6,66%	14,24%
	0,50	-	1,54%	6,02%	12,76%	-	1,54%	6,02%	12,76%

Assim como ocorreu com as tensões críticas distorcionais, o método de cálculo iterativo ou não iterativo tem influência apenas sobre as diferenças entre as resistências somente para a relação $t/b = 0.0225$. Isso já era esperado, uma vez que o método iterativo conduz a resistências diferentes do método não iterativo apenas para $t/b = 0.0225$. Para as demais relações, essa influência deixa de existir.

Para uma mesma relação t/b é possível inferir que o aumento da tensão de cedência ou da relação h/b leva ao aumento da diferença entre as resistências últimas. Já o aumento da relação t/b reduz essa diferença. A Tabela 3.9 apresenta os valores máximos e mínimos da diferença entre as resistências últimas para cada relação t/b .

Tabela 3.9: Diferença máxima e mínima entre as resistências últimas para cada relação t/b .

Diferença	$t/b = 0,0225$	$t/b = 0,0475$	$t/b = 0,0575$	$t/b = 0,0675$
Máxima	16,33%	16,52%	16,46%	14,24%
Mínima	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%

Os resultados mostram que quase todas as diferenças entre as resistências últimas foram positivas, ou seja, para maioria dos perfis $N_{ed,ultimo,gbtul} > N_{ed,ultimo,ec3}$. Isso evidencia que a resistência relativa a $\sigma_{cr,d,gbtul}$ é normalmente superior e pode chegar a 16.52%, raramente sendo inferior a 2%.

3.2.4 Determinação da resistência última com base em modelos de elementos finitos de casca

O MEF é responsável pela grande maioria das análises estruturais efetuadas atualmente pela comunidade técnico-científica [14], e é implementado em diversos programas de análise estrutural, como é o caso do usado neste trabalho, o Abaqus. A fiabilidade desse método é representada pela sólida fundamentação matemática do método e pela capacidade de fazer uma *Análise geometricamente e materialmente não linear com imperfeições, em inglês Geometrically and Materially Nonlinear with Imperfections Analysis (GMNIA)*. Esse tipo de análise requer um maior esforço computacional, porém permite uma análise mais próxima da realidade, contabilizando também os efeitos de imperfeições geométricas e de plastificação do aço [2].

No programa selecionado para correr a análise, Abaqus, há uma biblioteca com três elementos finitos de casca com 4 nós, nomeadamente S4R5, S4R e S4, que diferem no número de pontos de integração e no número de graus de liberdade por nó. Para a análise feita neste trabalho o elemento usado foi o S4, que tem uma integração completa e possui seis graus de liberdade por nó, três em translação e três em rotação [2]. Os parâmetros necessários para correr a análise serão abordados mais adiante.

3.2.4.1 Modelo de elementos finitos de casca e o gerador de ficheiros para o Abaqus

O modelo tridimensional preconizado é constituído por uma barra simplesmente apoiada, com um perfil transversal em C com reforço na extremidade e sujeita a um carregamento axial (compressão), que será discretizada em elementos finitos de 4 nós. As secções transversais analisadas foram as idealizadas, de cantos retos, de maneira a desprezar a influência dos cantos arredondados.

De forma a simplificar o processo de criação do modelo, foi usado um gerador de ficheiros, criado pelo Dr. André Dias Martins. O ficheiro input (.inp) gerado tem toda informação necessária para efetuar as análises no Abaqus. O objetivo do gerador de ficheiros é evitar a construção manual do modelo da estrutura no programa (Abaqus Cae) e ganhar tempo ao criar apenas o ficheiro necessário para a análise. A Figura 3.2 ilustra a interface do gerador de ficheiros.

É necessário referir que a metodologia aplicada para obtenção dos resultados, incluindo o estudo sobre convergência de malhas, foi validada com resultados existentes na literatura, nomeadamente o artigo [17].

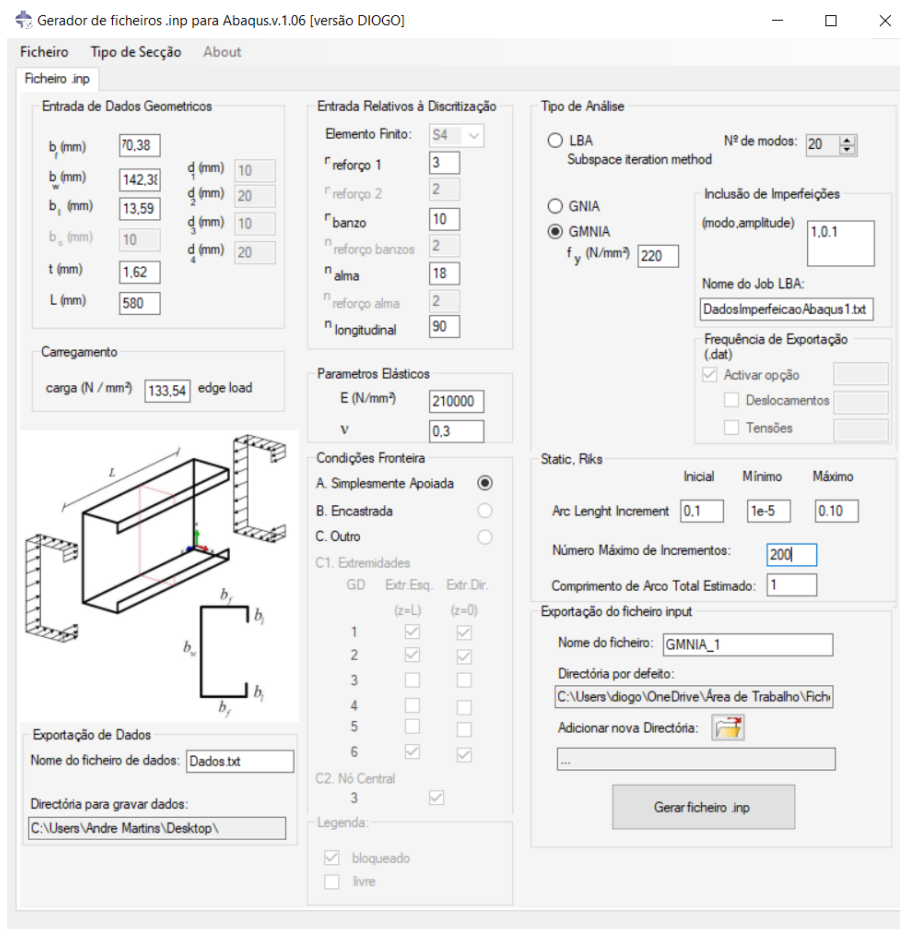


Figura 3.2: Gerador de ficheiros .inp para Abaqus com dados do perfil 'p1', ver Tabela 3.1 e 3.11.

Para a criação do ficheiro input é necessário introduzir os seguintes dados:

- Entrada de dados geométricos
- Carregamento
- Entradas relativa à discretização
- Parâmetros elásticos
- Condições de fronteira
- Tipo de análise
- Parâmetros para o método do comprimento de arco
- Inclusão das imperfeições geométricas iniciais

3.2.4.2 Entrada de dados geométricos

As geometrias das secções transversais seleccionadas estão apresentadas na Tabela 3.1.

3.2.4.3 Carregamento

Para a análise GMNIA foi aplicada uma tensão axial de compressão na duas extremidades da coluna com o valor de sua carga crítica, retirada da análise linear de estabilidade feita pelo GBTUL. Após dividir esta carga pela área da secção transversal em estudo, obtém-se a tensão crítica para o carregamento exigida pelo gerador de ficheiros para a análise. A Tabela 3.10 fornece as tensões críticas usadas para cada perfil analisado.

Tabela 3.10: Tensão aplicada a cada estrutura analisada.

t/b	Perfis	Carga crítica [N]	Tensão crítica [N/mm^2]
0,0225	p1	67135,11	133,54
	p2	76733,34	133,98
	p3	19692,66	23,09
	p4	21295,96	23,08
0,0475	p5	124527,78	272,14
	p6	81504,44	149,43
	p7	142156,73	278,58
	p8	71484,46	104,21
0,0575	p9	221307,66	384,53
	p10	145813,95	212,29
	p11	263408,7	410,09
0,0675	p12	424852,1	567,38
	p13	210659,84	208,54

3.2.4.4 Entradas relativas à discretização

A malha de elementos finitos aplicada em todos os modelos é longitudinalmente e transversalmente uniforme, o que faz com que os elementos de 4 nós se adaptem bem ao modelo. A dimensão e, conseqüentemente, a quantidade de elementos finitos, variam para cada perfil, sendo a discretização feita para cada elemento da secção transversal (alma, banzo e reforço). A estratégia adotada para esta etapa foi dividir a largura de um elemento por 10mm e aumentar ligeiramente esse número, essa estratégia foi adotada depois de diversos testes resultando na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Entradas relativas à discretização dos perfis.

t/b	Perfis	Discr. reforço	Discr. banzo	Discr. alma	Discr. longitudinal
0,0225	p1	3	10	18	90
	p2	4	10	18	150
	p3	3	10	30	90
	p4	4	10	30	160
0,0475	p5	3	8	16	40
	p6	3	8	20	40
	p7	5	8	16	80
	p8	5	8	26	90
0,0575	p9	3	8	18	40
	p10	3	8	22	40
	p11	4	8	18	80
0,0675	p12	5	8	18	80
	p13	5	8	28	80

3.2.4.5 Tipo de análise

Para esta etapa do estudo foi feita a análise geométrica e materialmente não-linear com imperfeições (GMNIA). A GMNIA foi utilizada com o objetivo de determinar a carga de colapso das colunas e avaliar o seu comportamento estrutural levando em conta as imperfeições existentes. Esta análise foi realizada recorrendo ao método do comprimento de arco, onde é possível manejar tanto o passo (comprimento do arco), quanto o número máximo de incrementos.

3.2.4.6 Propriedades dos materiais

Para o material constituinte das colunas, considerou-se um aço com 220 N/mm^2 de tensão de cedência. No modelo numérico, o material foi definido como elástico-perfeitamente plástico com as propriedades já mencionadas anteriormente, ver 2.4.1.

3.2.4.7 Parâmetros para o método do Comprimento de Arco

O procedimento incremental considerado é por controle de "comprimento de arco" e o gerador de ficheiros permite definir valores máximos para este valor de modo a (i)

evitar um número excessivo de incrementos de carga (valores reduzidos) e (ii) evitar problemas de convergência (valores excessivos). Naturalmente, este procedimento envolve um procedimento de tentativa-erro para definir um valor adequado para o "comprimento de arco" máximo.

3.2.4.8 Imperfeições geométricas

Todos os perfis metálicos enformados a frio apresentam imperfeições geométricas, i.e., os elementos não possuem uma linearidade perfeita; essas imperfeições resultam do processo de fabricação, transporte, armazenamento e construção e tendem a diminuir a rigidez e a resistência dos perfis [13].

Além das imperfeições geométricas existem também as imperfeições materiais, associadas às tensões residuais de membrana resultantes do processo de fabrico. Contudo, Schafer e Peköz [15] em um estudo sobre imperfeições, concluíram que para aços produzidos por quinagem se podem desprezar as tensões de membrana, sendo então apenas as imperfeições geométricas relevantes para os perfis em estudo.

Para serem tidas em conta as imperfeições geométricas, foi aplicada a metodologia do Anexo C do EC3-1-14. Primeiramente foi necessário obter, através do GBTUL e com base num script em Matlab criado pelo Prof. Rodrigo Gonçalves, a forma dos modos críticos locais (L), distorcionais (D) e globais (G). Da metodologia apresentada no EC3-1-14 resultaram 8 combinações [20]:

- G+D+0.7L (D dominante)
- G+D-0.7L (D dominante)
- G+0.7D+L (L dominante)
- G-0.7D+L (L dominante)
- -G+D+0.7L (D dominante)
- -G+D-0.7L (D dominante)
- -G+0.7D+L (L dominante)
- -G-0.7D+L (L dominante)

As amplitudes utilizadas foram calculadas com base nos seguintes valores::

$$\text{Local : } \frac{b_w}{200} \quad (3.25)$$

$$\text{Distorcional : } 0.3 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,d}}} \quad (3.26)$$

$$\text{Global} : \frac{L}{1000} \quad (3.27)$$

Esses modos críticos dão origem a 8 formas de imperfeições iniciais da coluna, cada uma com sua configuração tridimensional. Com as coordenadas dos pontos que caracterizam as formas de imperfeição obtidas foi possível, para cada um dos 13 perfis em estudo, fazer 8 análises (uma para cada forma de imperfeição geométrica inicial obtida pela combinação linear) com o intuito de obter 8 parâmetros de carga, para então selecionar a menor delas. Esse parâmetro mínimo multiplicado pelo valor da carga crítica, retirada da análise linear de estabilidade do GBTUL, corresponde ao valor da resistência última da coluna. A Tabela 3.12 apresenta os parâmetros de carga última obtidos.

Tabela 3.12: Parâmetros de carga última dos perfis.

<i>t/b</i>	Perfis	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Mínimo
0,0225	p1	1,094	1,094	1,072	1,068	1,084	1,084	1,067	1,067	1,067
	p2	1,079	1,079	1,062	1,042	1,077	1,077	1,057	1,057	1,042
	p3	2,570	2,570	2,578	2,653	2,535	2,535	2,531	2,578	2,531
	p4	2,658	2,658	2,655	2,674	2,634	2,634	2,623	2,630	2,623
0,0475	p5	0,656	0,656	0,644	0,632	0,632	0,632	0,622	0,649	0,622
	p6	0,929	0,929	0,916	0,941	0,903	0,903	0,891	0,917	0,891
	p7	0,682	0,682	0,659	0,664	0,655	0,655	0,634	0,648	0,634
	p8	1,200	1,180	1,200	1,210	1,160	1,153	1,160	1,200	1,153
0,0575	p9	0,508	0,508	0,497	0,483	0,489	0,489	0,480	0,503	0,480
	p10	0,890	0,769	0,872	0,771	0,789	0,720	0,853	0,812	0,720
	p11	0,508	0,507	0,500	0,490	0,487	0,501	0,479	0,498	0,479
0,0675	p12	0,357	0,282	0,360	0,302	0,362	0,273	0,368	0,297	0,273
	p13	0,820	0,819	0,791	0,79	0,766	0,773	0,755	0,777	0,755

3.2.5 Resultados da resistência calculada pelo Abaqus e comparação com os métodos simplificados do EC3-1-3

A Tabela 3.13 mostra os resultados da resistência última obtida pelas várias abordagens adotadas para os 13 perfis que foram analisados com o Abaqus.

Tabela 3.13: Resultados da resistência de todos os métodos aplicados para os 13 perfis

t/b	Perfis	Resistência com $\sigma_{cr,d,gbtul}$ (N-Iterativo) [N]	Resistência com $\sigma_{cr,d,ec3}$ (N-Iterativo) [N]	Resistência com $\sigma_{cr,d,gbtul}$ (Iterativo) [N]	Resistência com $\sigma_{cr,d,ec3}$ (Iterativo) [N]	Resistência Abaqus (MEF) [N]
0,0225	p1	68185,9	67924,4	68301,5	68254,1	71633,2
	p2	70827,1	69238,6	70444,9	69116,4	79956,1
	p3	60715,9	53886,6	60633	54094,3	49842,1
	p4	61315,4	54375,5	60579,0	54261,0	55859,3
0,0475	p5	75653,4	74074,9	75653,4	74074,9	77456,3
	p6	76115,4	70063,1	76115,4	70063,1	72620,5
	p7	78781,4	78154,8	78781,4	78154,8	90127,4
	p8	75666,9	69170,6	75666,9	69170,6	82421,6
0,0575	p9	107282,0	106000,0	107282,0	106000,0	106227,7
	p10	107546,0	101234,0	107546,0	101234,0	104986,0
	p11	113748,0	113748,0	113748,0	113748,0	126172,8
0,0675	p12	148080,0	148080,0	148080,0	148080,0	115984,6
	p13	142799,0	134827,0	142799,0	134827,0	159048,2

Como já referido anteriormente, as resistências relativas à tensão crítica distorcional calculadas conforme o método simplificado do EC3-1-3 são sempre menores que as resistências relativas à tensão crítica distorcional calculadas utilizando o GBTUL. Isso à primeira instância mostra que os valores da resistência última relativos à tensão crítica calculada conforme o método simplificado do EC3-1-3 estão a favor da segurança. Porém, ao comparar com as resistências obtidas pelo MEF, isso nem sempre ocorre, como é o exemplo dos perfis 'p3' e 'p12', onde a resistência calculada pelo MEF é menor que a do método simplificado.

A diferença percentual entre o MEF e os valores dos outro métodos é dada por:

$$diferenca(\%) = \frac{Resistencia_{MEF} - Resistencia_n}{Resistencia_{MEF}} \quad (3.28)$$

onde:// $Resistencia_n$ pode ser a resistência relativa à tensão crítica calculada pelo método simplificado, de forma iterativa ou não iterativa, bem como pode ser a resistência relativa à tensão crítica calculada pelo GBTUL, de forma iterativa ou não.

A Tabela 3.14 mostra os valores relativos à diferença percentual entre o método aproximado do EC3-1-3 e o MEF.

Tabela 3.14: Diferença percentual entre os métodos utilizados e o MEF.

t/b	Perfis	Diferença entre GBTUL e MEF (N-ITERATIVO)	Diferença entre EC3 e MEF (N-ITERATIVO)	Diferença entre GBTUL e MEF (ITERATIVO)	Diferença entre EC3 e MEF (ITERATIVO)
0.0225	1	4,81%	5,18%	4,65%	4,72%
	2	11,42%	13,40%	11,90%	13,56%
	3	-21,82%	-8,11%	-21,65%	-8,53%
	4	-9,77%	2,66%	-8,45%	2,86%
0.0475	5	2,33%	4,37%	2,33%	4,37%
	6	-4,81%	3,52%	-4,81%	3,52%
	7	12,59%	13,28%	12,59%	13,28%
	8	8,20%	16,08%	8,20%	16,08%
0.0575	9	-0,99%	0,21%	-0,99%	0,21%
	10	-2,44%	3,57%	-2,44%	3,57%
	11	9,85%	9,85%	9,85%	9,85%
0.0675	12	-27,67%	-27,67%	-27,67%	-27,67%
	13	10,22%	15,23%	10,22%	15,23%

Em comparação com a resistência última relativa a $\sigma_{cr,d,ec3}$ (método simplificado do EC3-1-3), a resistência obtida com o MEF é maior em 11 dos 13 perfis analisados, estando assim do lado da segurança e com uma diferença relativa máxima de 16.08%. Já em comparação com a resistência última relativa a $\sigma_{cr,d,gbtul}$ (método computacional que utiliza o GBTUL), a resistência obtida com o MEF é maior em apenas 7 dos 13 perfis, com uma diferença relativa máxima de 12.59%. Houve ainda 2 casos em que a resistência última relativa a $\sigma_{cr,d,ec3}$ foi maior que a resistência obtida pelo MEF e o diferença máxima foi de 27.67%, bem como houve 6 casos em que a a resistência última relativa a $\sigma_{cr,d,gbtul}$ foi maior que a resistência obtida com o MEF, com o valor máximo da diferença igual a 27.67%. Nestes casos os valores são contra a segurança.

A Tabela 3.15 referencia o método que foi mais preciso, ou seja, aquele cuja resistência última mais se aproximou da resistência última obtida pelo MEF.

Tabela 3.15: Precisão dos métodos utilizados para cada perfil analisado.

t/b	Perfil	Método mais 'preciso'
0,0225	1	GBTUL Iterativo
	2	GBTUL Não-iterativo
	3	EC3-1-3 Não-iterativo
	4	EC3-1-3 Não-iterativo
0,0475	5	GBTUL
	6	EC3-1-3
	7	GBTUL
	8	GBTUL
0,0575	9	EC3-1-3
	10	GBTUL
	11	-
0,0675	12	-
	13	GBTUL

É possível observar, assim como já foi referido anteriormente, que o processo iterativo de cálculo só teve influência nos resultados dos perfis com $t/b = 0.0225$. Vale a pena referir que os perfis 11 e 12 tiveram a mesma resistência para os dois métodos utilizados, por isso não há um método mais preciso.

Para a amostra de resultados obtida, pode-se dizer que o método do GBTUL fornece resultados mais próximos do MEF, porém o método aproximado do EC3-1-3 é mais conservativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente estudo tem o objetivo de questionar o método aproximado do EC3-1-3 para o dimensionamento de perfis enformados a frio em C com reforço na extremidade. Para isso, inicialmente foi aplicado o método computacional que utiliza o GBTUL e o método simplificado do EC3-1-3 para cálculo da tensão crítica distorcional. Já aí foi observado uma diferença entre as duas abordagens de 83% a 87% para perfis muito esbeltos (relação h/b e b_c/b muito altas).

O passo seguinte consistiu em calcular a resistência última de um perfil pelo método simplificado do EC3-1-3 e pelo método do GBTUL. Constatou-se que a resistência relativa a $\sigma_{cr,d,gbtul}$ é normalmente superior à resistência relativa a $\sigma_{cr,d,ec3}$ e esse aumento pode chegar a 16.52%, sendo raramente ser inferior a 2%.

Por último, foi também aplicado o MEF em 13 perfis selecionados da amostra total com a finalidade de aferir os resultados obtidos pelos outros métodos. Em comparação com $N_{ed,ultimo,ec3}$, a resistência ao aplicar o MEF é maior em 11 dos 13 perfis analisados e com uma diferença relativa máxima de 27.67%. Já em comparação com $N_{ed,ultimo,gbtul}$, a resistência ao aplicar o MEF é maior em 7 dos 13 perfis, com uma diferença relativa máxima de 27.67%. Isso evidencia que o método simplificado do EC3-1-3 é mais conservativo que o método do GBTUL. Porém, as resistências últimas obtidas pelo método do GBTUL foram mais próximas das obtidas com o MEF, o que revela que a metodologia que aplica a TGV é mais precisa.

Apesar de, na maioria dos casos, o método simplificado do EC3-1-3 estar a favor da segurança, houve casos em que ambas as metodologias utilizadas apresentaram resistências muito superiores às resistências calculadas pelo MEF. Isso evidencia tanto um sobredimensionamento que pode elevar o custo de uma obra como um subdimensionamento que pode pôr a estrutura em risco.

Para desenvolvimentos futuros, os resultados obtidos podem ser complementados com os casos onde o deslocamento do centro de gravidade da secção efetiva à compressão ocorre para a esquerda, ou simplesmente não ocorre. Além disso, uma maior quantidade

de perfis podem ser analisados pelo MEF, de forma a ter uma maior amostra de resultados.

Pode ser feito também um estudo semelhante, mas com colunas com secções em Z, uma vez que o método do EC3-1-3 é válido tanto para secções em C como em Z. Ou ainda um estudo envolvendo barras sujeitas a outros esforços atuantes, e.g., vigas com secções em C e Z.

Outra possibilidade de estudo é a determinação de fatores parciais de segurança (γ) adequados com base na metodologia estabelecida na ISO 2394 (General principles on reliability for structures - Anexo E), usando o modelo de resistência do EC3-1-3 com $\sigma_{cr,d}$ obtida tanto pelo modelo preconizado no EC3-1-3 como determinada numericamente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *ABAQUS/Standard User's Manual*. Version 6.7.5. Dassault Systèmes, Simulia Corp, 2008 (ver p. 35).
- [2] D. C. Braga. «Avaliação de métodos numéricos de análise linear de estabilidade para perfis de aço formados a frio.» Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, 2015 (ver p. 51).
- [3] D. Camotim et al. «GBT-based Structural Analysis of Thin-walled members: Overview, Recent Progress and Future Developments». Em: *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*. Ed. por M. Pandey, W.-C. Xie e L. Xu. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006, pp. 187–204. ISBN: 978-1-4020-4891-3 (ver p. 5).
- [4] D. Dubina, V. Ungureanu e R. Landolfo. «Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 Design of cold-formed Steel Structures». Em: *Eurocode*. Vol. 3. 2012 (ver p. 22).
- [5] «ECCS TC7 TWG 7.5 Practical Improvement of Design Procedures Worked Examples According to EN 1993-1-3 Eurocode 3, Part 1.3». Em: 1.123 (2008), pp. 143–165 (ver p. 22).
- [6] *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels, Belgium: CEN, 2004 (ver p. 40).
- [7] *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. Incorporating corrigendum November 2009. Rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels, Belgium: CEN, 2006 (ver pp. 2, 12, 15, 17, 38–40).
- [8] *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements*. Incorporating corrigendum November 2009. Avenue Marnix, 17 B-1000 Brussels Belgium: CEN, 2006 (ver p. 18).
- [9] *Generalised Beam Theory Research Group at Lisbon, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Portugal*. url <http://www.civil.ist.utl.pt/gbt/>. 2023 (ver pp. 2, 3, 5).

- [10] R. Gonçalves et al. «Latest developments on the analysis of thin-walled structures using Generalised Beam Theory (GBT)». Em: *Journal of Constructional Steel Research* 204 (2023), p. 107858. ISSN: 0143-974X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107858>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X23000858> (ver p. 5).
- [11] D. Henriques, R. Gonçalves e D. Camotim. «Formulação da Teoria Generalizada de Vigas para calcular cargas de bifurcação lateral-distorcional em vigas mistas aço-betão». Em: (2017) (ver p. 5).
- [12] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/master/template.pdf> (ver p. ii).
- [13] L. McAnallen et al. «Initial geometric imperfection measurement and characterization of cold-formed steel C-section structural members with 3D non-contact measurement techniques». Em: *Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2014, SSRC 2014* (2014-01), pp. 566–590 (ver p. 55).
- [14] K. Nagahama, D. Camotim e E. Batista. «“Flambagem, Pós-Flambagem e Interação Local de Perfis de Aço Formados a Frio: Utilização do MEF” (“Local Buckling, Post-Buckling and Mode Interaction Behavior in Cold-Formed Steel Members: Application of the FEM)». Em: () (ver p. 51).
- [15] B. Schafer e T. Peköz. «Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses». Em: *Journal of Constructional Steel Research* 47.3 (1998), pp. 193–210. ISSN: 0143-974X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X98000078> (ver p. 55).
- [16] R. Schardt. «Eine Erweiterung der Technischen Biegetheorie zur Berechnung prismatischer Falwerke. Der Stahlbau 35 (1966), pp. 161–171 (in German).» Em: () (ver p. 5).
- [17] N. Silvestre, D. Camotim e P. B. Dinis. «Post-buckling behaviour and direct strength design of lipped channel columns experiencing local/distortional interaction». Em: *Journal of Constructional Steel Research* 73 (2012), pp. 12–30. ISSN: 0143-974X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.01.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X12000077> (ver p. 52).
- [18] T. Von Kármán. «Strength of thin plates in compression». Em: *Trans. ASME* 54 (1932), p. 53 (ver p. 12).
- [19] G. Winter. «Strength of thin steel compression flanges». Em: *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 112.1 (1947), pp. 527–554 (ver p. 12).

- [20] *Working Group 22 for Eurocode 3 CEN/TC 250/SC3/WG22. prEN 1993-1-14. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.* Brussels, Belgium (under development).: CEN (ver p. 55).

ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTRORCIONAIS PARA DIVERSAS RELAÇÕES T / B

Este anexo faz referência aos resultados das tensões críticas distorcionais para as relações $t/b = 0.0475$, $t/b = 0.0575$ e $t/b = 0.0675$, os quais, devido à extensão das tabelas, não foram referenciados na Secção 2.4.2.

Tabela I.1: Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0475$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	EC3	EC3	entre	GBTUL
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	IT vs N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
1	40,96	40,96	7,58	220	544,43	544,43	0,0%	724,41
2	40,96	40,96	9,73	220	693,75	693,75	0,0%	842,97
3	40,96	40,96	11,88	220	835,34	835,34	0,0%	938,78
4	40,96	40,96	14,03	220	968,06	968,06	0,0%	1011,49
5	40,96	40,96	16,18	220	1092,04	1092,04	0,0%	1059,51
6	40,96	40,96	18,33	220	1207,90	1207,90	0,0%	1083,07
7	40,96	40,96	20,48	220	1316,39	1316,39	0,0%	1083,99
8	83,96	40,96	7,58	220	420,10	420,10	0,0%	507,82
9	83,96	40,96	9,73	220	535,92	535,92	0,0%	580,01
10	83,96	40,96	11,88	220	645,93	645,93	0,0%	640,80
11	83,96	40,96	14,03	220	749,18	749,18	0,0%	687,53
12	83,96	40,96	16,18	220	845,76	845,76	0,0%	721,41
13	83,96	40,96	18,33	220	936,10	936,10	0,0%	740,55
14	83,96	40,96	20,48	220	1020,77	1020,77	0,0%	748,58
15	126,96	40,96	7,58	220	354,46	354,46	0,0%	290,42
16	126,96	40,96	9,73	220	452,41	452,41	0,0%	330,88
17	126,96	40,96	11,88	220	545,50	545,50	0,0%	368,45

Tabela I.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
18	126,96	40,96	14,03	220	632,93	632,93	0,0%	401,08
19	126,96	40,96	16,18	220	714,75	714,75	0,0%	427,68
20	126,96	40,96	18,33	220	791,32	791,32	0,0%	447,22
21	126,96	40,96	20,48	220	863,11	863,11	0,0%	461,19
22	169,96	40,96	7,58	220	312,33	312,33	0,0%	157,08
23	169,96	40,96	9,73	220	398,73	398,73	0,0%	177,14
24	169,96	40,96	11,88	220	480,89	480,89	0,0%	199,53
25	169,96	40,96	14,03	220	558,07	558,07	0,0%	219,15
26	169,96	40,96	16,18	220	630,32	630,32	0,0%	237,17
27	169,96	40,96	18,33	220	697,96	697,96	0,0%	251,78
28	169,96	40,96	20,48	220	761,39	761,39	0,0%	265,44
29	212,96	40,96	7,58	220	282,35	282,35	0,0%	93,11
30	212,96	40,96	9,73	220	360,52	360,52	0,0%	103,94
31	212,96	40,96	11,88	220	434,87	434,87	0,0%	114,71
32	212,96	40,96	14,03	220	504,73	504,73	0,0%	125,72
33	212,96	40,96	16,18	220	570,14	570,14	0,0%	136,54
34	212,96	40,96	18,33	220	631,38	631,38	0,0%	146,86
35	212,96	40,96	20,48	220	688,81	688,81	0,0%	156,42
36	255,96	40,96	7,58	220	259,62	259,62	0,0%	61,19
37	255,96	40,96	9,73	220	331,54	331,54	0,0%	66,26
38	255,96	40,96	11,88	220	399,95	399,95	0,0%	72,09
39	255,96	40,96	14,03	220	464,24	464,24	0,0%	78,33
40	255,96	40,96	16,18	220	524,44	524,44	0,0%	84,72
41	255,96	40,96	18,33	220	580,81	580,81	0,0%	91,09
42	255,96	40,96	20,48	220	633,69	633,69	0,0%	97,29
43	40,96	40,96	7,58	280	544,43	544,43	0,0%	724,41
44	40,96	40,96	9,73	280	693,75	693,75	0,0%	842,97
45	40,96	40,96	11,88	280	835,34	835,34	0,0%	938,78
46	40,96	40,96	14,03	280	968,06	968,06	0,0%	1011,49
47	40,96	40,96	16,18	280	1092,04	1092,04	0,0%	1059,51
48	40,96	40,96	18,33	280	1207,90	1207,90	0,0%	1083,07
49	40,96	40,96	20,48	280	1316,39	1316,39	0,0%	1083,99
50	83,96	40,96	7,58	280	420,10	420,10	0,0%	507,82
51	83,96	40,96	9,73	280	535,92	535,92	0,0%	580,01
52	83,96	40,96	11,88	280	645,93	645,93	0,0%	640,80

ANEXO I. ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTORCIONAIS PARA DIVERSAS
 RELAÇÕES T/B

Tabela I.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
53	83,96	40,96	14,03	280	749,18	749,18	0,0%	687,53
54	83,96	40,96	16,18	280	845,76	845,76	0,0%	721,41
55	83,96	40,96	18,33	280	936,10	936,10	0,0%	740,55
56	83,96	40,96	20,48	280	1020,77	1020,77	0,0%	748,58
57	126,96	40,96	7,58	280	354,46	354,46	0,0%	290,42
58	126,96	40,96	9,73	280	452,41	452,41	0,0%	330,88
59	126,96	40,96	11,88	280	545,50	545,50	0,0%	368,45
60	126,96	40,96	14,03	280	632,93	632,93	0,0%	401,08
61	126,96	40,96	16,18	280	714,75	714,75	0,0%	427,68
62	126,96	40,96	18,33	280	791,32	791,32	0,0%	447,22
63	126,96	40,96	20,48	280	863,11	863,11	0,0%	461,19
64	169,96	40,96	7,58	280	312,33	312,33	0,0%	157,08
65	169,96	40,96	9,73	280	398,73	398,73	0,0%	177,14
66	169,96	40,96	11,88	280	480,89	480,89	0,0%	199,53
67	169,96	40,96	14,03	280	558,07	558,07	0,0%	219,15
68	169,96	40,96	16,18	280	630,32	630,32	0,0%	237,17
69	169,96	40,96	18,33	280	697,96	697,96	0,0%	251,78
70	169,96	40,96	20,48	280	761,39	761,39	0,0%	265,44
71	212,96	40,96	7,58	280	282,35	282,35	0,0%	93,11
72	212,96	40,96	9,73	280	360,52	360,52	0,0%	103,94
73	212,96	40,96	11,88	280	434,87	434,87	0,0%	114,71
74	212,96	40,96	14,03	280	504,73	504,73	0,0%	125,72
75	212,96	40,96	16,18	280	570,14	570,14	0,0%	136,54
76	212,96	40,96	18,33	280	631,38	631,38	0,0%	146,86
77	212,96	40,96	20,48	280	688,81	688,81	0,0%	156,42
78	255,96	40,96	7,58	280	259,62	259,62	0,0%	61,19
79	255,96	40,96	9,73	280	331,54	331,54	0,0%	66,26
80	255,96	40,96	11,88	280	399,95	399,95	0,0%	72,09
81	255,96	40,96	14,03	280	464,24	464,24	0,0%	78,33
82	255,96	40,96	16,18	280	524,44	524,44	0,0%	84,72
83	255,96	40,96	18,33	280	580,81	580,81	0,0%	91,09
84	255,96	40,96	20,48	280	633,69	633,69	0,0%	97,29
85	40,96	40,96	7,58	350	544,43	544,43	0,0%	724,41
86	40,96	40,96	9,73	350	693,75	693,75	0,0%	842,97
87	40,96	40,96	11,88	350	835,34	835,34	0,0%	938,78

Tabela I.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT	EC3 IT	entre IT vs N-IT	GBTUL IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
88	40,96	40,96	14,03	350	968,06	968,06	0,0%	1011,49
89	40,96	40,96	16,18	350	1092,04	1092,04	0,0%	1059,51
90	40,96	40,96	18,33	350	1207,90	1207,90	0,0%	1083,07
91	40,96	40,96	20,48	350	1316,39	1316,39	0,0%	1083,99
92	83,96	40,96	7,58	350	420,10	420,10	0,0%	507,82
93	83,96	40,96	9,73	350	535,92	535,92	0,0%	580,01
94	83,96	40,96	11,88	350	645,93	645,93	0,0%	640,80
95	83,96	40,96	14,03	350	749,18	749,18	0,0%	687,53
96	83,96	40,96	16,18	350	845,76	845,76	0,0%	721,41
97	83,96	40,96	18,33	350	936,10	936,10	0,0%	740,55
98	83,96	40,96	20,48	350	1020,77	1020,77	0,0%	748,58
99	126,96	40,96	7,58	350	354,46	354,46	0,0%	290,42
100	126,96	40,96	9,73	350	452,41	452,41	0,0%	330,88
101	126,96	40,96	11,88	350	545,50	545,50	0,0%	368,45
102	126,96	40,96	14,03	350	632,93	632,93	0,0%	401,08
103	126,96	40,96	16,18	350	714,75	714,75	0,0%	427,68
104	126,96	40,96	18,33	350	791,32	791,32	0,0%	447,22
105	126,96	40,96	20,48	350	863,11	863,11	0,0%	461,19
106	169,96	40,96	7,58	350	312,33	312,33	0,0%	157,08
107	169,96	40,96	9,73	350	398,73	398,73	0,0%	177,14
108	169,96	40,96	11,88	350	480,89	480,89	0,0%	199,53
109	169,96	40,96	14,03	350	558,07	558,07	0,0%	219,15
110	169,96	40,96	16,18	350	630,32	630,32	0,0%	237,17
111	169,96	40,96	18,33	350	697,96	697,96	0,0%	251,78
112	169,96	40,96	20,48	350	761,39	761,39	0,0%	265,44
113	212,96	40,96	7,58	350	282,35	282,35	0,0%	93,11
114	212,96	40,96	9,73	350	360,52	360,52	0,0%	103,94
115	212,96	40,96	11,88	350	434,87	434,87	0,0%	114,71
116	212,96	40,96	14,03	350	504,73	504,73	0,0%	125,72
117	212,96	40,96	16,18	350	570,14	570,14	0,0%	136,54
118	212,96	40,96	18,33	350	631,38	631,38	0,0%	146,86
119	212,96	40,96	20,48	350	688,81	688,81	0,0%	156,42
120	255,96	40,96	7,58	350	259,62	259,62	0,0%	61,19
121	255,96	40,96	9,73	350	331,54	331,54	0,0%	66,26
122	255,96	40,96	11,88	350	399,95	399,95	0,0%	72,09

ANEXO I. ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTORCIONAIS PARA DIVERSAS
 RELAÇÕES T/B

Tabela I.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	EC3	EC3	entre	GBTUL
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	IT vs N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
123	255,96	40,96	14,03	350	464,24	464,24	0,0%	78,33
124	255,96	40,96	16,18	350	524,44	524,44	0,0%	84,72
125	255,96	40,96	18,33	350	580,81	580,81	0,0%	91,09
126	255,96	40,96	20,48	350	633,69	633,69	0,0%	97,29

Tabela I.2: Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0575$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	EC3	EC3	entre	GBTUL
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	IT vs N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
1	41,47	41,47	7,54	220	663,99	663,99	0,0%	931,39
2	41,47	41,47	9,74	220	845,59	845,59	0,0%	1072,84
3	41,47	41,47	11,94	220	1019,24	1019,24	0,0%	1189,76
4	41,47	41,47	14,14	220	1182,55	1182,55	0,0%	1277,13
5	41,47	41,47	16,34	220	1335,35	1335,35	0,0%	1333,38
6	41,47	41,47	18,54	220	1478,22	1478,22	0,0%	1358,78
7	41,47	41,47	20,74	220	1612,01	1612,01	0,0%	1361,04
8	85,47	41,47	7,54	220	511,22	511,22	0,0%	663,63
9	85,47	41,47	9,74	220	651,79	651,79	0,0%	746,81
10	85,47	41,47	11,94	220	786,42	786,42	0,0%	818,09
11	85,47	41,47	14,14	220	913,22	913,22	0,0%	872,95
12	85,47	41,47	16,34	220	1031,99	1031,99	0,0%	911,41
13	85,47	41,47	18,54	220	1143,17	1143,17	0,0%	933,50
14	85,47	41,47	20,74	220	1247,37	1247,37	0,0%	940,37
15	129,47	41,47	7,54	220	430,95	430,95	0,0%	385,22
16	129,47	41,47	9,74	220	549,72	549,72	0,0%	432,12
17	129,47	41,47	11,94	220	663,54	663,54	0,0%	473,28
18	129,47	41,47	14,14	220	770,81	770,81	0,0%	511,70
19	129,47	41,47	16,34	220	871,34	871,34	0,0%	541,30
20	129,47	41,47	18,54	220	965,48	965,48	0,0%	564,56
21	129,47	41,47	20,74	220	1053,76	1053,76	0,0%	579,52
22	173,47	41,47	7,54	220	379,52	379,52	0,0%	212,29
23	173,47	41,47	9,74	220	484,24	484,24	0,0%	235,16
24	173,47	41,47	11,94	220	584,65	584,65	0,0%	259,11
25	173,47	41,47	14,14	220	679,30	679,30	0,0%	280,10

Tabela I.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT	EC3 IT	entre IT vs N-IT	GBTUL IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
26	173,47	41,47	16,34	220	768,03	768,03	0,0%	301,63
27	173,47	41,47	18,54	220	851,15	851,15	0,0%	318,96
28	173,47	41,47	20,74	220	929,10	929,10	0,0%	335,03
29	217,47	41,47	7,54	220	342,98	342,98	0,0%	128,42
30	217,47	41,47	9,74	220	437,69	437,69	0,0%	139,10
31	217,47	41,47	11,94	220	528,52	528,52	0,0%	151,36
32	217,47	41,47	14,14	220	614,17	614,17	0,0%	164,21
33	217,47	41,47	16,34	220	694,47	694,47	0,0%	175,59
34	217,47	41,47	18,54	220	769,70	769,70	0,0%	187,83
35	217,47	41,47	20,74	220	840,27	840,27	0,0%	198,03
36	261,47	41,47	7,54	220	315,30	315,30	0,0%	85,71
37	261,47	41,47	9,74	220	402,42	402,42	0,0%	90,98
38	261,47	41,47	11,94	220	485,97	485,97	0,0%	96,76
39	261,47	41,47	14,14	220	564,77	564,77	0,0%	103,85
40	261,47	41,47	16,34	220	638,67	638,67	0,0%	111,28
41	261,47	41,47	18,54	220	707,90	707,90	0,0%	117,92
42	261,47	41,47	20,74	220	772,85	772,85	0,0%	125,23
43	41,47	41,47	7,54	280	663,99	663,99	0,0%	931,39
44	41,47	41,47	9,74	280	845,59	845,59	0,0%	1072,84
45	41,47	41,47	11,94	280	1019,24	1019,24	0,0%	1189,76
46	41,47	41,47	14,14	280	1182,55	1182,55	0,0%	1277,13
47	41,47	41,47	16,34	280	1335,35	1335,35	0,0%	1333,38
48	41,47	41,47	18,54	280	1478,22	1478,22	0,0%	1358,78
49	41,47	41,47	20,74	280	1612,01	1612,01	0,0%	1361,04
50	85,47	41,47	7,54	280	511,22	511,22	0,0%	663,63
51	85,47	41,47	9,74	280	651,79	651,79	0,0%	746,81
52	85,47	41,47	11,94	280	786,42	786,42	0,0%	818,09
53	85,47	41,47	14,14	280	913,22	913,22	0,0%	872,95
54	85,47	41,47	16,34	280	1031,99	1031,99	0,0%	911,41
55	85,47	41,47	18,54	280	1143,17	1143,17	0,0%	933,50
56	85,47	41,47	20,74	280	1247,37	1247,37	0,0%	940,37
57	129,47	41,47	7,54	280	430,95	430,95	0,0%	385,22
58	129,47	41,47	9,74	280	549,72	549,72	0,0%	432,12
59	129,47	41,47	11,94	280	663,54	663,54	0,0%	473,28
60	129,47	41,47	14,14	280	770,81	770,81	0,0%	511,70

ANEXO I. ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTORCIONAIS PARA DIVERSAS
 RELAÇÕES T/B

Tabela I.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos							
61	129,47	41,47	16,34	280	871,34	871,34	0,0%	541,30
62	129,47	41,47	18,54	280	965,48	965,48	0,0%	564,56
63	129,47	41,47	20,74	280	1053,76	1053,76	0,0%	579,52
64	173,47	41,47	7,54	280	379,52	379,52	0,0%	212,29
65	173,47	41,47	9,74	280	484,24	484,24	0,0%	235,16
66	173,47	41,47	11,94	280	584,65	584,65	0,0%	259,11
67	173,47	41,47	14,14	280	679,30	679,30	0,0%	280,10
68	173,47	41,47	16,34	280	768,03	768,03	0,0%	301,63
69	173,47	41,47	18,54	280	851,15	851,15	0,0%	318,96
70	173,47	41,47	20,74	280	929,10	929,10	0,0%	335,03
71	217,47	41,47	7,54	280	342,98	342,98	0,0%	128,42
72	217,47	41,47	9,74	280	437,69	437,69	0,0%	139,10
73	217,47	41,47	11,94	280	528,52	528,52	0,0%	151,36
74	217,47	41,47	14,14	280	614,17	614,17	0,0%	164,21
75	217,47	41,47	16,34	280	694,47	694,47	0,0%	175,59
76	217,47	41,47	18,54	280	769,70	769,70	0,0%	187,83
77	217,47	41,47	20,74	280	840,27	840,27	0,0%	198,03
78	261,47	41,47	7,54	280	315,30	315,30	0,0%	85,71
79	261,47	41,47	9,74	280	402,42	402,42	0,0%	90,98
80	261,47	41,47	11,94	280	485,97	485,97	0,0%	96,76
81	261,47	41,47	14,14	280	564,77	564,77	0,0%	103,85
82	261,47	41,47	16,34	280	638,67	638,67	0,0%	111,28
83	261,47	41,47	18,54	280	707,90	707,90	0,0%	117,92
84	261,47	41,47	20,74	280	772,85	772,85	0,0%	125,23
85	41,47	41,47	7,54	350	663,99	663,99	0,0%	931,39
86	41,47	41,47	9,74	350	845,59	845,59	0,0%	1072,84
87	41,47	41,47	11,94	350	1019,24	1019,24	0,0%	1189,76
88	41,47	41,47	14,14	350	1182,55	1182,55	0,0%	1277,13
89	41,47	41,47	16,34	350	1335,35	1335,35	0,0%	1333,38
90	41,47	41,47	18,54	350	1478,22	1478,22	0,0%	1358,78
91	41,47	41,47	20,74	350	1612,01	1612,01	0,0%	1361,04
92	85,47	41,47	7,54	350	511,22	511,22	0,0%	663,63
93	85,47	41,47	9,74	350	651,79	651,79	0,0%	746,81
94	85,47	41,47	11,94	350	786,42	786,42	0,0%	818,09
95	85,47	41,47	14,14	350	913,22	913,22	0,0%	872,95

Tabela I.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
96	85,47	41,47	16,34	350	1031,99	1031,99	0,0%	911,41
97	85,47	41,47	18,54	350	1143,17	1143,17	0,0%	933,50
98	85,47	41,47	20,74	350	1247,37	1247,37	0,0%	940,37
99	129,47	41,47	7,54	350	430,95	430,95	0,0%	385,22
100	129,47	41,47	9,74	350	549,72	549,72	0,0%	432,12
101	129,47	41,47	11,94	350	663,54	663,54	0,0%	473,28
102	129,47	41,47	14,14	350	770,81	770,81	0,0%	511,70
103	129,47	41,47	16,34	350	871,34	871,34	0,0%	541,30
104	129,47	41,47	18,54	350	965,48	965,48	0,0%	564,56
105	129,47	41,47	20,74	350	1053,76	1053,76	0,0%	579,52
106	173,47	41,47	7,54	350	379,52	379,52	0,0%	212,29
107	173,47	41,47	9,74	350	484,24	484,24	0,0%	235,16
108	173,47	41,47	11,94	350	584,65	584,65	0,0%	259,11
109	173,47	41,47	14,14	350	679,30	679,30	0,0%	280,10
110	173,47	41,47	16,34	350	768,03	768,03	0,0%	301,63
111	173,47	41,47	18,54	350	851,15	851,15	0,0%	318,96
112	173,47	41,47	20,74	350	929,10	929,10	0,0%	335,03
113	217,47	41,47	7,54	350	342,98	342,98	0,0%	128,42
114	217,47	41,47	9,74	350	437,69	437,69	0,0%	139,10
115	217,47	41,47	11,94	350	528,52	528,52	0,0%	151,36
116	217,47	41,47	14,14	350	614,17	614,17	0,0%	164,21
117	217,47	41,47	16,34	350	694,47	694,47	0,0%	175,59
118	217,47	41,47	18,54	350	769,70	769,70	0,0%	187,83
119	217,47	41,47	20,74	350	840,27	840,27	0,0%	198,03
120	261,47	41,47	7,54	350	315,30	315,30	0,0%	85,71
121	261,47	41,47	9,74	350	402,42	402,42	0,0%	90,98
122	261,47	41,47	11,94	350	485,97	485,97	0,0%	96,76
123	261,47	41,47	14,14	350	564,77	564,77	0,0%	103,85
124	261,47	41,47	16,34	350	638,67	638,67	0,0%	111,28
125	261,47	41,47	18,54	350	707,90	707,90	0,0%	117,92
126	261,47	41,47	20,74	350	772,85	772,85	0,0%	125,23

ANEXO I. ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTORCIONAIS PARA DIVERSAS
 RELAÇÕES T/B

Tabela I.3: Tensões críticas distorcionais para $t/b = 0.0675$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos							
1	41,03	41,03	7,32	220	788,312	788,312	0,0%	1163,16
2	41,03	41,03	9,52	220	1001,33	1001,33	0,0%	1325,97
3	41,03	41,03	11,72	220	1207,27	1207,27	0,0%	1461,12
4	41,03	41,03	13,92	220	1401,85	1401,85	0,0%	1561,95
5	41,03	41,03	16,12	220	1584,28	1584,28	0,0%	1628,25
6	41,03	41,03	18,32	220	1755,02	1755,02	0,0%	1653,55
7	41,03	41,03	20,52	220	1914,97	1914,97	0,0%	1650,70
8	85,03	41,03	7,32	220	605,564	605,564	0,0%	840,89
9	85,03	41,03	9,52	220	770,113	770,113	0,0%	933,67
10	85,03	41,03	11,72	220	929,444	929,444	0,0%	1013,45
11	85,03	41,03	13,92	220	1080,2	1080,2	0,0%	1075,08
12	85,03	41,03	16,12	220	1221,72	1221,72	0,0%	1116,70
13	85,03	41,03	18,32	220	1354,3	1354,3	0,0%	1138,40
14	85,03	41,03	20,52	220	1478,62	1478,62	0,0%	1141,59
15	129,03	41,03	7,32	220	509,994	509,994	0,0%	494,54
16	129,03	41,03	9,52	220	648,898	648,898	0,0%	542,66
17	129,03	41,03	11,72	220	783,486	783,486	0,0%	592,51
18	129,03	41,03	13,92	220	910,907	910,907	0,0%	632,82
19	129,03	41,03	16,12	220	1030,58	1030,58	0,0%	665,73
20	129,03	41,03	18,32	220	1142,75	1142,75	0,0%	690,23
21	129,03	41,03	20,52	220	1247,97	1247,97	0,0%	706,10
22	173,03	41,03	7,32	220	448,898	448,898	0,0%	277,08
23	173,03	41,03	9,52	220	571,318	571,318	0,0%	301,97
24	173,03	41,03	11,72	220	689,977	689,977	0,0%	325,92
25	173,03	41,03	13,92	220	802,355	802,355	0,0%	349,64
26	173,03	41,03	16,12	220	907,929	907,929	0,0%	374,25
27	173,03	41,03	18,32	220	1006,91	1006,91	0,0%	393,61
28	173,03	41,03	20,52	220	1099,78	1099,78	0,0%	409,97
29	217,03	41,03	7,32	220	405,542	405,542	0,0%	171,36
30	217,03	41,03	9,52	220	516,228	516,228	0,0%	181,42
31	217,03	41,03	11,72	220	623,538	623,538	0,0%	193,29
32	217,03	41,03	13,92	220	725,19	725,19	0,0%	207,66
33	217,03	41,03	16,12	220	820,704	820,704	0,0%	220,46
34	217,03	41,03	18,32	220	910,268	910,268	0,0%	232,84
35	217,03	41,03	20,52	220	994,31	994,31	0,0%	244,43

Tabela I.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
36	261,03	41,03	7,32	220	372,726	372,726	0,0%	115,39
37	261,03	41,03	9,52	220	474,512	474,512	0,0%	119,60
38	261,03	41,03	11,72	220	573,21	573,21	0,0%	126,26
39	261,03	41,03	13,92	220	666,717	666,717	0,0%	133,15
40	261,03	41,03	16,12	220	754,589	754,589	0,0%	140,46
41	261,03	41,03	18,32	220	836,996	836,996	0,0%	147,90
42	261,03	41,03	20,52	220	914,33	914,33	0,0%	155,26
43	41,03	41,03	7,32	280	788,312	788,312	0,0%	1163,16
44	41,03	41,03	9,52	280	1001,33	1001,33	0,0%	1325,97
45	41,03	41,03	11,72	280	1207,27	1207,27	0,0%	1461,12
46	41,03	41,03	13,92	280	1401,85	1401,85	0,0%	1561,95
47	41,03	41,03	16,12	280	1584,28	1584,28	0,0%	1628,25
48	41,03	41,03	18,32	280	1755,02	1755,02	0,0%	1653,55
49	41,03	41,03	20,52	280	1914,97	1914,97	0,0%	1650,70
50	85,03	41,03	7,32	280	605,564	605,564	0,0%	840,89
51	85,03	41,03	9,52	280	770,113	770,113	0,0%	933,67
52	85,03	41,03	11,72	280	929,444	929,444	0,0%	1013,45
53	85,03	41,03	13,92	280	1080,2	1080,2	0,0%	1075,08
54	85,03	41,03	16,12	280	1221,72	1221,72	0,0%	1116,70
55	85,03	41,03	18,32	280	1354,3	1354,3	0,0%	1138,40
56	85,03	41,03	20,52	280	1478,62	1478,62	0,0%	1141,59
57	129,03	41,03	7,32	280	509,994	509,994	0,0%	494,54
58	129,03	41,03	9,52	280	648,898	648,898	0,0%	542,66
59	129,03	41,03	11,72	280	783,486	783,486	0,0%	592,51
60	129,03	41,03	13,92	280	910,907	910,907	0,0%	632,82
61	129,03	41,03	16,12	280	1030,58	1030,58	0,0%	665,73
62	129,03	41,03	18,32	280	1142,75	1142,75	0,0%	690,23
63	129,03	41,03	20,52	280	1247,97	1247,97	0,0%	706,10
64	173,03	41,03	7,32	280	448,898	448,898	0,0%	277,08
65	173,03	41,03	9,52	280	571,318	571,318	0,0%	301,97
66	173,03	41,03	11,72	280	689,977	689,977	0,0%	325,92
67	173,03	41,03	13,92	280	802,355	802,355	0,0%	349,64
68	173,03	41,03	16,12	280	907,929	907,929	0,0%	374,25
69	173,03	41,03	18,32	280	1006,91	1006,91	0,0%	393,61
70	173,03	41,03	20,52	280	1099,78	1099,78	0,0%	409,97

ANEXO I. ANEXO I - TENSÕES CRÍTICAS DISTORCIONAIS PARA DIVERSAS
 RELAÇÕES T/B

Tabela I.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	EC3	EC3	entre	GBTUL
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	IT vs N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
71	217,03	41,03	7,32	280	405,542	405,542	0,0%	171,36
72	217,03	41,03	9,52	280	516,228	516,228	0,0%	181,42
73	217,03	41,03	11,72	280	623,538	623,538	0,0%	193,29
74	217,03	41,03	13,92	280	725,19	725,19	0,0%	207,66
75	217,03	41,03	16,12	280	820,704	820,704	0,0%	220,46
76	217,03	41,03	18,32	280	910,268	910,268	0,0%	232,84
77	217,03	41,03	20,52	280	994,31	994,31	0,0%	244,43
78	261,03	41,03	7,32	280	372,726	372,726	0,0%	115,39
79	261,03	41,03	9,52	280	474,512	474,512	0,0%	119,60
80	261,03	41,03	11,72	280	573,21	573,21	0,0%	126,26
81	261,03	41,03	13,92	280	666,717	666,717	0,0%	133,15
82	261,03	41,03	16,12	280	754,589	754,589	0,0%	140,46
83	261,03	41,03	18,32	280	836,996	836,996	0,0%	147,90
84	261,03	41,03	20,52	280	914,33	914,33	0,0%	155,26
85	41,03	41,03	7,32	350	788,312	788,312	0,0%	1163,16
86	41,03	41,03	9,52	350	1001,33	1001,33	0,0%	1325,97
87	41,03	41,03	11,72	350	1207,27	1207,27	0,0%	1461,12
88	41,03	41,03	13,92	350	1401,85	1401,85	0,0%	1561,95
89	41,03	41,03	16,12	350	1584,28	1584,28	0,0%	1628,25
90	41,03	41,03	18,32	350	1755,02	1755,02	0,0%	1653,55
91	41,03	41,03	20,52	350	1914,97	1914,97	0,0%	1650,70
92	85,03	41,03	7,32	350	605,564	605,564	0,0%	840,89
93	85,03	41,03	9,52	350	770,113	770,113	0,0%	933,67
94	85,03	41,03	11,72	350	929,444	929,444	0,0%	1013,45
95	85,03	41,03	13,92	350	1080,2	1080,2	0,0%	1075,08
96	85,03	41,03	16,12	350	1221,72	1221,72	0,0%	1116,70
97	85,03	41,03	18,32	350	1354,3	1354,3	0,0%	1138,40
98	85,03	41,03	20,52	350	1478,62	1478,62	0,0%	1141,59
99	129,03	41,03	7,32	350	509,994	509,994	0,0%	494,54
100	129,03	41,03	9,52	350	648,898	648,898	0,0%	542,66
101	129,03	41,03	11,72	350	783,486	783,486	0,0%	592,51
102	129,03	41,03	13,92	350	910,907	910,907	0,0%	632,82
103	129,03	41,03	16,12	350	1030,58	1030,58	0,0%	665,73
104	129,03	41,03	18,32	350	1142,75	1142,75	0,0%	690,23
105	129,03	41,03	20,52	350	1247,97	1247,97	0,0%	706,10

Tabela I.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$\sigma_{cr,d,ec3}$	$\sigma_{cr,d,ec3}$	Diferença	$\sigma_{cr,d,gbtul}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	EC3 N-IT [MPa]	EC3 IT [MPa]	entre IT vs N-IT	GBTUL IT [MPa]
	Secção de cantos retos				[MPa]	[MPa]		[MPa]
106	173,03	41,03	7,32	350	448,898	448,898	0,0%	277,08
107	173,03	41,03	9,52	350	571,318	571,318	0,0%	301,97
108	173,03	41,03	11,72	350	689,977	689,977	0,0%	325,92
109	173,03	41,03	13,92	350	802,355	802,355	0,0%	349,64
110	173,03	41,03	16,12	350	907,929	907,929	0,0%	374,25
111	173,03	41,03	18,32	350	1006,91	1006,91	0,0%	393,61
112	173,03	41,03	20,52	350	1099,78	1099,78	0,0%	409,97
113	217,03	41,03	7,32	350	405,542	405,542	0,0%	171,36
114	217,03	41,03	9,52	350	516,228	516,228	0,0%	181,42
115	217,03	41,03	11,72	350	623,538	623,538	0,0%	193,29
116	217,03	41,03	13,92	350	725,19	725,19	0,0%	207,66
117	217,03	41,03	16,12	350	820,704	820,704	0,0%	220,46
118	217,03	41,03	18,32	350	910,268	910,268	0,0%	232,84
119	217,03	41,03	20,52	350	994,31	994,31	0,0%	244,43
120	261,03	41,03	7,32	350	372,726	372,726	0,0%	115,39
121	261,03	41,03	9,52	350	474,512	474,512	0,0%	119,60
122	261,03	41,03	11,72	350	573,21	573,21	0,0%	126,26
123	261,03	41,03	13,92	350	666,717	666,717	0,0%	133,15
124	261,03	41,03	16,12	350	754,589	754,589	0,0%	140,46
125	261,03	41,03	18,32	350	836,996	836,996	0,0%	147,90
126	261,03	41,03	20,52	350	914,33	914,33	0,0%	155,26

ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES T / B

Esse Anexo faz referência aos resultados da resistência última para as relações $t/b = 0.0475$, $t/b = 0.0575$, $t/b = 0.0675$, os quais, devido a extensão das tabelas, não foram apresentados na secção abordada, ver 3.2.3.

Tabela II.1: Resistências últimas para $t/b = 0.0475$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
1	40,96	40,96	7,58	220	-	-	-	-
2	40,96	40,96	9,73	220	-	-	-	-
3	40,96	40,96	11,88	220	-	-	-	-
4	40,96	40,96	14,03	220	-	-	-	-
5	40,96	40,96	16,18	220	-	-	-	-
6	40,96	40,96	18,33	220	-	-	-	-
7	40,96	40,96	20,48	220	-	-	-	-
8	83,96	40,96	7,58	220	-	-	-	-
9	83,96	40,96	9,73	220	79507,7	79507,7	79507,7	79507,7
10	83,96	40,96	11,88	220	80589,9	80589,9	80589,9	80589,9
11	83,96	40,96	14,03	220	81935,0	81935,0	81935,0	81935,0
12	83,96	40,96	16,18	220	83298,7	83298,7	83298,7	83298,7
13	83,96	40,96	18,33	220	84441,5	84441,5	84441,5	84441,5
14	83,96	40,96	20,48	220	85843,6	85843,6	85843,6	85843,6
15	126,96	40,96	7,58	220	75653,4	75653,4	74074,9	74074,9
16	126,96	40,96	9,73	220	76023,9	76023,9	74080,9	74080,9
17	126,96	40,96	11,88	220	76351,4	76351,4	74420,8	74420,8
18	126,96	40,96	14,03	220	76710,0	76710,0	75310,4	75310,4

Tabela II.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
19	126,96	40,96	16,18	220	77233,3	77233,3	76204,4	76204,4
20	126,96	40,96	18,33	220	78038,1	78038,1	77249,6	77249,6
21	126,96	40,96	20,48	220	78781,4	78781,4	78154,8	78154,8
22	169,96	40,96	7,58	220	76115,4	76115,4	70063,1	70063,1
23	169,96	40,96	9,73	220	75693,5	75693,5	70170,1	70170,1
24	169,96	40,96	11,88	220	75417,6	75417,6	70291,2	70291,2
25	169,96	40,96	14,03	220	75279,5	75279,5	70735,4	70735,4
26	169,96	40,96	16,18	220	75341,2	75341,2	71412,4	71412,4
27	169,96	40,96	18,33	220	75718,4	75718,4	72196,1	72196,1
28	169,96	40,96	20,48	220	76020,1	76020,1	72846,4	72846,4
29	212,96	40,96	7,58	220	-	-	67416,5	67416,5
30	212,96	40,96	9,73	220	-	-	67418,3	67418,3
31	212,96	40,96	11,88	220	-	-	67435,2	67435,2
32	212,96	40,96	14,03	220	77146,3	77146,3	67617,4	67617,4
33	212,96	40,96	16,18	220	76312,6	76312,6	68097,4	68097,4
34	212,96	40,96	18,33	220	75870,4	75870,4	68639,5	68639,5
35	212,96	40,96	20,48	220	75666,9	75666,9	69170,6	69170,6
36	255,96	40,96	7,58	220	-	-	65547,6	65547,6
37	255,96	40,96	9,73	220	-	-	65357,6	65357,6
38	255,96	40,96	11,88	220	-	-	65336,4	65336,4
39	255,96	40,96	14,03	220	-	-	65465,8	65465,8
40	255,96	40,96	16,18	220	77234,3	77234,3	65695,3	65695,3
41	255,96	40,96	18,33	220	77137,5	77137,5	66151,2	66151,2
42	255,96	40,96	20,48	220	77099,3	77099,3	66597,7	66597,7
43	40,96	40,96	7,58	280	-	-	-	-
44	40,96	40,96	9,73	280	-	-	-	-
45	40,96	40,96	11,88	280	-	-	-	-
46	40,96	40,96	14,03	280	-	-	-	-
47	40,96	40,96	16,18	280	-	-	-	-
48	40,96	40,96	18,33	280	-	-	-	-
49	40,96	40,96	20,48	280	-	-	-	-
50	83,96	40,96	7,58	280	-	-	-	-
51	83,96	40,96	9,73	280	93649,2	93649,2	94805,8	94805,8
52	83,96	40,96	11,88	280	93670,5	93670,5	93586,7	93586,7
53	83,96	40,96	14,03	280	94817,8	94817,8	94817,8	94817,8

ANEXO II. ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES
T/B

Tabela II.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
54	83,96	40,96	16,18	280	96327,6	96327,6	96327,6	96327,6
55	83,96	40,96	18,33	280	97551,9	97551,9	97551,9	97551,9
56	83,96	40,96	20,48	280	99103,9	99103,9	99103,9	99103,9
57	126,96	40,96	7,58	280	90188,5	90188,5	87879,5	87879,5
58	126,96	40,96	9,73	280	90102,8	90102,8	87286,6	87286,6
59	126,96	40,96	11,88	280	90052,6	90052,6	87127,8	87127,8
60	126,96	40,96	14,03	280	90330,2	90330,2	87354,9	87354,9
61	126,96	40,96	16,18	280	90838,2	90838,2	88139,4	88139,4
62	126,96	40,96	18,33	280	91721,8	91721,8	89328,6	89328,6
63	126,96	40,96	20,48	280	92529,1	92529,1	90338,9	90338,9
64	169,96	40,96	7,58	280	-	-	82495,9	82495,9
65	169,96	40,96	9,73	280	91064,3	91064,3	82251,9	82251,9
66	169,96	40,96	11,88	280	89549,5	89549,5	82007,1	82007,1
67	169,96	40,96	14,03	280	89007,9	89007,9	82192,1	82192,1
68	169,96	40,96	16,18	280	88824,0	88824,0	82524,2	82524,2
69	169,96	40,96	18,33	280	89110,6	89110,6	83254,4	83254,4
70	169,96	40,96	20,48	280	89317,5	89317,5	83976,7	83976,7
71	212,96	40,96	7,58	280	-	-	79090,0	79090,0
72	212,96	40,96	9,73	280	-	-	78525,6	78525,6
73	212,96	40,96	11,88	280	-	-	78419,2	78419,2
74	212,96	40,96	14,03	280	91162,3	91162,3	78545,4	78545,4
75	212,96	40,96	16,18	280	90925,5	90925,5	78800,2	78800,2
76	212,96	40,96	18,33	280	90820,8	90820,8	79130,8	79130,8
77	212,96	40,96	20,48	280	90329,4	90329,4	79601,0	79601,0
78	255,96	40,96	7,58	280	-	-	76542,5	76542,5
79	255,96	40,96	9,73	280	-	-	75970,8	75970,8
80	255,96	40,96	11,88	280	-	-	75827,8	75827,8
81	255,96	40,96	14,03	280	-	-	75898,3	75898,3
82	255,96	40,96	16,18	280	89819,4	89819,4	76087,6	76087,6
83	255,96	40,96	18,33	280	89769,1	89769,1	76347,6	76347,6
84	255,96	40,96	20,48	280	89760,0	89760,0	76651,2	76651,2
85	40,96	40,96	7,58	350	-	-	-	-
86	40,96	40,96	9,73	350	-	-	-	-
87	40,96	40,96	11,88	350	-	-	-	-
88	40,96	40,96	14,03	350	-	-	-	-

Tabela II.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
89	40,96	40,96	16,18	350	-	-	-	-
90	40,96	40,96	18,33	350	-	-	-	-
91	40,96	40,96	20,48	350	-	-	-	-
92	83,96	40,96	7,58	350	-	-	-	-
93	83,96	40,96	9,73	350	110267,0	110267,0	111901,0	111901,0
94	83,96	40,96	11,88	350	110005,0	110005,0	109892,0	109892,0
95	83,96	40,96	14,03	350	110767,0	110767,0	109756,0	109756,0
96	83,96	40,96	16,18	350	111881,0	111881,0	110410,0	110410,0
97	83,96	40,96	18,33	350	112892,0	112892,0	111706,0	111706,0
98	83,96	40,96	20,48	350	114502,0	114502,0	113414,0	113414,0
99	126,96	40,96	7,58	350	106740,0	106740,0	103163,0	103163,0
100	126,96	40,96	9,73	350	105551,0	105551,0	101548,0	101548,0
101	126,96	40,96	11,88	350	105156,0	105156,0	101109,0	101109,0
102	126,96	40,96	14,03	350	105257,0	105257,0	101205,0	101205,0
103	126,96	40,96	16,18	350	105689,0	105689,0	101596,0	101596,0
104	126,96	40,96	18,33	350	106624,0	106624,0	102398,0	102398,0
105	126,96	40,96	20,48	350	107470,0	107470,0	103286,0	103286,0
106	169,96	40,96	7,58	350	-	-	96274,2	96274,2
107	169,96	40,96	9,73	350	-	-	95215,8	95215,8
108	169,96	40,96	11,88	350	106431,0	106431,0	94712,3	94712,3
109	169,96	40,96	14,03	350	104888,0	104888,0	94789,7	94789,7
110	169,96	40,96	16,18	350	104170,0	104170,0	95069,0	95069,0
111	169,96	40,96	18,33	350	104219,0	104219,0	95654,5	95654,5
112	169,96	40,96	20,48	350	104212,0	104212,0	96116,4	96116,4
113	212,96	40,96	7,58	350	-	-	91829,9	91829,9
114	212,96	40,96	9,73	350	-	-	90643,1	90643,1
115	212,96	40,96	11,88	350	-	-	90337,4	90337,4
116	212,96	40,96	14,03	350	105289,0	105289,0	90361,0	90361,0
117	212,96	40,96	16,18	350	105063,0	105063,0	90562,4	90562,4
118	212,96	40,96	18,33	350	104963,0	104963,0	90866,3	90866,3
119	212,96	40,96	20,48	350	104966,0	104966,0	91231,2	91231,2
120	255,96	40,96	7,58	350	-	-	88524,9	88524,9
121	255,96	40,96	9,73	350	-	-	87553,8	87553,8
122	255,96	40,96	11,88	350	-	-	87215,8	87215,8
123	255,96	40,96	14,03	350	-	-	87182,5	87182,5

ANEXO II. ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES T/B

Tabela II.1 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	GBTUL N-IT	GBTUL IT	EC3 N-IT	EC3 IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
124	255,96	40,96	16,18	350	103189,0	103189,0	87314,7	87314,7
125	255,96	40,96	18,33	350	103208,0	103208,0	87543,2	87543,2
126	255,96	40,96	20,48	350	103242,0	103242,0	87829,9	87829,9

Tabela II.2: Resistências últimas para $t/b = 0.0575$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p [mm]	b_p [mm]	b_{cp} [mm]	[MPa]	GBTUL N-IT	GBTUL IT	EC3 N-IT	EC3 IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
1	41,47	41,47	7,54	220	-	-	-	-
2	41,47	41,47	9,74	220	-	-	-	-
3	41,47	41,47	11,94	220	-	-	-	-
4	41,47	41,47	14,14	220	-	-	-	-
5	41,47	41,47	16,34	220	-	-	-	-
6	41,47	41,47	18,54	220	-	-	-	-
7	41,47	41,47	20,74	220	-	-	-	-
8	85,47	41,47	7,54	220	-	-	-	-
9	85,47	41,47	9,74	220	-	-	-	-
10	85,47	41,47	11,94	220	-	-	-	-
11	85,47	41,47	14,14	220	-	-	-	-
12	85,47	41,47	16,34	220	-	-	-	-
13	85,47	41,47	18,54	220	-	-	-	-
14	85,47	41,47	20,74	220	-	-	-	-
15	129,47	41,47	7,54	220	107282	107282	106000	106000
16	129,47	41,47	9,74	220	108018	108018	106293	106293
17	129,47	41,47	11,94	220	109111	109111	108248	108248
18	129,47	41,47	14,14	220	109646	109646	109492	109492
19	129,47	41,47	16,34	220	110976	110976	110976	110976
20	129,47	41,47	18,54	220	112244	112244	112244	112244
21	129,47	41,47	20,74	220	113748	113748	113748	113748
22	173,47	41,47	7,54	220	107546	107546	101234	101234
23	173,47	41,47	9,74	220	107743	107743	101382	101382
24	173,47	41,47	11,94	220	108181	108181	102422	102422
25	173,47	41,47	14,14	220	108498	108498	103560	103560
26	173,47	41,47	16,34	220	108668	108668	104492	104492

Tabela II.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
27	173,47	41,47	18,54	220	109260	109260	105595	105595
28	173,47	41,47	20,74	220	109718	109718	106493	106493
29	217,47	41,47	7,54	220	-	-	97924,9	97924,9
30	217,47	41,47	9,74	220	-	-	98065,2	98065,2
31	217,47	41,47	11,94	220	110230	110230	98265,6	98265,6
32	217,47	41,47	14,14	220	109353	109353	99030,9	99030,9
33	217,47	41,47	16,34	220	109194	109194	99950,6	99950,6
34	217,47	41,47	18,54	220	108918	108918	100686	100686
35	217,47	41,47	20,74	220	109131	109131	101577	101577
36	261,47	41,47	7,54	220	-	-	95516,9	95516,9
37	261,47	41,47	9,74	220	-	-	95335,9	95335,9
38	261,47	41,47	11,94	220	-	-	95430,5	95430,5
39	261,47	41,47	14,14	220	-	-	95830,9	95830,9
40	261,47	41,47	16,34	220	-	-	96453,7	96453,7
41	261,47	41,47	18,54	220	-	-	97219,4	97219,4
42	261,47	41,47	20,74	220	112071	112071	97817,2	97817,2
43	41,47	41,47	7,54	280	-	-	-	-
44	41,47	41,47	9,74	280	-	-	-	-
45	41,47	41,47	11,94	280	-	-	-	-
46	41,47	41,47	14,14	280	-	-	-	-
47	41,47	41,47	16,34	280	-	-	-	-
48	41,47	41,47	18,54	280	-	-	-	-
49	41,47	41,47	20,74	280	-	-	-	-
50	85,47	41,47	7,54	280	-	-	-	-
51	85,47	41,47	9,74	280	-	-	-	-
52	85,47	41,47	11,94	280	-	-	-	-
53	85,47	41,47	14,14	280	-	-	-	-
54	85,47	41,47	16,34	280	-	-	-	-
55	85,47	41,47	18,54	280	-	-	-	-
56	85,47	41,47	20,74	280	-	-	-	-
57	129,47	41,47	7,54	280	127766	127766	125980	125980
58	129,47	41,47	9,74	280	128364	128364	125362	125362
59	129,47	41,47	11,94	280	128848	128848	125308	125308
60	129,47	41,47	14,14	280	129299	129299	126686	126686
61	129,47	41,47	16,34	280	130366	130366	128359	128359

ANEXO II. ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES
T/B

Tabela II.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
62	129,47	41,47	18,54	280	131327	131327	129757	129757
63	129,47	41,47	20,74	280	132766	132766	131449	131449
64	173,47	41,47	7,54	280	128674	128674	119095	119095
65	173,47	41,47	9,74	280	128251	128251	118979	118979
66	173,47	41,47	11,94	280	127700	127700	118793	118793
67	173,47	41,47	14,14	280	127759	127759	119358	119358
68	173,47	41,47	16,34	280	127699	127699	120390	120390
69	173,47	41,47	18,54	280	128231	128231	121634	121634
70	173,47	41,47	20,74	280	128603	128603	122618	122618
71	217,47	41,47	7,54	280	-	-	114645	114645
72	217,47	41,47	9,74	280	-	-	114234	114234
73	217,47	41,47	11,94	280	-	-	114039	114039
74	217,47	41,47	14,14	280	131077	131077	114164	114164
75	217,47	41,47	16,34	280	129976	129976	114876	114876
76	217,47	41,47	18,54	280	129010	129010	115689	115689
77	217,47	41,47	20,74	280	128891	128891	116693	116693
78	261,47	41,47	7,54	280	-	-	111330	111330
79	261,47	41,47	9,74	280	-	-	110549	110549
80	261,47	41,47	11,94	280	-	-	110523	110523
81	261,47	41,47	14,14	280	-	-	110576	110576
82	261,47	41,47	16,34	280	-	-	110794	110794
83	261,47	41,47	18,54	280	-	-	111532	111532
84	261,47	41,47	20,74	280	-	-	112189	112189
85	41,47	41,47	7,54	350	-	-	-	-
86	41,47	41,47	9,74	350	-	-	-	-
87	41,47	41,47	11,94	350	-	-	-	-
88	41,47	41,47	14,14	350	-	-	-	-
89	41,47	41,47	16,34	350	-	-	-	-
90	41,47	41,47	18,54	350	-	-	-	-
91	41,47	41,47	20,74	350	-	-	-	-
92	85,47	41,47	7,54	350	-	-	-	-
93	85,47	41,47	9,74	350	-	-	-	-
94	85,47	41,47	11,94	350	155390	155390	156351	156351
95	85,47	41,47	14,14	350	157442	157442	157442	157442
96	85,47	41,47	16,34	350	159806	159806	159806	159806

Tabela II.2 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
97	85,47	41,47	18,54	350	162206	162206	162206	162206
98	85,47	41,47	20,74	350	164639	164639	164639	164639
99	129,47	41,47	7,54	350	150458	150458	147905	147905
100	129,47	41,47	9,74	350	149955	149955	145866	145866
101	129,47	41,47	11,94	350	150247	150247	145496	145496
102	129,47	41,47	14,14	350	150533	150533	145523	145523
103	129,47	41,47	16,34	350	151632	151632	146757	146757
104	129,47	41,47	18,54	350	152604	152604	148283	148283
105	129,47	41,47	20,74	350	154195	154195	150171	150171
106	173,47	41,47	7,54	350	-	-	138661	138661
107	173,47	41,47	9,74	350	151771	151771	137488	137488
108	173,47	41,47	11,94	350	149772	149772	137017	137017
109	173,47	41,47	14,14	350	149312	149312	137358	137358
110	173,47	41,47	16,34	350	148807	148807	137684	137684
111	173,47	41,47	18,54	350	149162	149162	138621	138621
112	173,47	41,47	20,74	350	149342	149342	139684	139684
113	217,47	41,47	7,54	350	-	-	132866	132866
114	217,47	41,47	9,74	350	-	-	131536	131536
115	217,47	41,47	11,94	350	-	-	131083	131083
116	217,47	41,47	14,14	350	-	-	131069	131069
117	217,47	41,47	16,34	350	-	-	131560	131560
118	217,47	41,47	18,54	350	153644	153644	131930	131930
119	217,47	41,47	20,74	350	152344	152344	132713	132713
120	261,47	41,47	7,54	350	-	-	128262	128262
121	261,47	41,47	9,74	350	-	-	127001	127001
122	261,47	41,47	11,94	350	-	-	126778	126778
123	261,47	41,47	14,14	350	-	-	126692	126692
124	261,47	41,47	16,34	350	-	-	126829	126829
125	261,47	41,47	18,54	350	-	-	127340	127340
126	261,47	41,47	20,74	350	-	-	127688	127688

ANEXO II. ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES
T/B

Tabela II.3: Resistências últimas para $t/b = 0.0675$

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
1	41,03	41,03	7,32	220	-	-	-	-
2	41,03	41,03	9,52	220	-	-	-	-
3	41,03	41,03	11,72	220	-	-	-	-
4	41,03	41,03	13,92	220	-	-	-	-
5	41,03	41,03	16,12	220	-	-	-	-
6	41,03	41,03	18,32	220	-	-	-	-
7	41,03	41,03	20,52	220	-	-	-	-
8	85,03	41,03	7,32	220	-	-	-	-
9	85,03	41,03	9,52	220	-	-	-	-
10	85,03	41,03	11,72	220	-	-	-	-
11	85,03	41,03	13,92	220	-	-	-	-
12	85,03	41,03	16,12	220	-	-	-	-
13	85,03	41,03	18,32	220	-	-	-	-
14	85,03	41,03	20,52	220	-	-	-	-
15	129,03	41,03	7,32	220	-	-	-	-
16	129,03	41,03	9,52	220	137554,0	137554,0	137052,0	137052,0
17	129,03	41,03	11,72	220	139361,0	139361,0	139361,0	139361,0
18	129,03	41,03	13,92	220	141978,0	141978,0	141978,0	141978,0
19	129,03	41,03	16,12	220	144202,0	144202,0	144202,0	144202,0
20	129,03	41,03	18,32	220	146133,0	146133,0	146133,0	146133,0
21	129,03	41,03	20,52	220	148080,0	148080,0	148080,0	148080,0
22	173,03	41,03	7,32	220	150044,0	150044,0	150044,0	150044,0
23	173,03	41,03	9,52	220	138747,0	138747,0	132362,0	132362,0
24	173,03	41,03	11,72	220	139510,0	139510,0	133218,0	133218,0
25	173,03	41,03	13,92	220	140530,0	140530,0	135287,0	135287,0
26	173,03	41,03	16,12	220	141400,0	141400,0	136943,0	136943,0
27	173,03	41,03	18,32	220	141673,0	141673,0	138101,0	138101,0
28	173,03	41,03	20,52	220	142487,0	142487,0	139510,0	139510,0
29	217,03	41,03	7,32	220	143416,0	143416,0	140900,0	140900,0
30	217,03	41,03	9,52	220	141384,0	141384,0	128813,0	128813,0
31	217,03	41,03	11,72	220	141930,0	141930,0	129009,0	129009,0
32	217,03	41,03	13,92	220	142411,0	142411,0	130465,0	130465,0
33	217,03	41,03	16,12	220	141996,0	141996,0	131398,0	131398,0
34	217,03	41,03	18,32	220	142124,0	142124,0	132559,0	132559,0
35	217,03	41,03	20,52	220	142396,0	142396,0	133702,0	133702,0

Tabela II.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
36	261,03	41,03	7,32	220	142799,0	142799,0	134827,0	134827,0
37	261,03	41,03	9,52	220	-	-	126098,0	126098,0
38	261,03	41,03	11,72	220	-	-	126131,0	126131,0
39	261,03	41,03	13,92	220	-	-	126433,0	126433,0
40	261,03	41,03	16,12	220	-	-	127429,0	127429,0
41	261,03	41,03	18,32	220	146303,0	146303,0	128404,0	128404,0
42	261,03	41,03	20,52	220	145568,0	145568,0	129362,0	129362,0
43	41,03	41,03	7,32	280	145193,0	145193,0	130303,0	130303,0
44	41,03	41,03	9,52	280	-	-	-	-
45	41,03	41,03	11,72	280	-	-	-	-
46	41,03	41,03	13,92	280	-	-	-	-
47	41,03	41,03	16,12	280	-	-	-	-
48	41,03	41,03	18,32	280	-	-	-	-
49	41,03	41,03	20,52	280	-	-	-	-
50	85,03	41,03	7,32	280	-	-	-	-
51	85,03	41,03	9,52	280	-	-	-	-
52	85,03	41,03	11,72	280	-	-	-	-
53	85,03	41,03	13,92	280	-	-	-	-
54	85,03	41,03	16,12	280	-	-	-	-
55	85,03	41,03	18,32	280	-	-	-	-
56	85,03	41,03	20,52	280	-	-	-	-
57	129,03	41,03	7,32	280	-	-	-	-
58	129,03	41,03	9,52	280	164295,0	164295,0	163627,0	163627,0
59	129,03	41,03	11,72	280	165603,0	165603,0	162701,0	162701,0
60	129,03	41,03	13,92	280	166418,0	166418,0	164676,0	164676,0
61	129,03	41,03	16,12	280	167503,0	167503,0	166807,0	166807,0
62	129,03	41,03	18,32	280	168952,0	168952,0	168952,0	168952,0
63	129,03	41,03	20,52	280	171114,0	171114,0	171114,0	171114,0
64	173,03	41,03	7,32	280	173292,0	173292,0	173292,0	173292,0
65	173,03	41,03	9,52	280	164940,0	164940,0	155870,0	155870,0
66	173,03	41,03	11,72	280	165493,0	165493,0	155796,0	155796,0
67	173,03	41,03	13,92	280	165985,0	165985,0	156211,0	156211,0
68	173,03	41,03	16,12	280	166310,0	166310,0	157839,0	157839,0
69	173,03	41,03	18,32	280	166371,0	166371,0	159100,0	159100,0
70	173,03	41,03	20,52	280	167160,0	167160,0	160671,0	160671,0

ANEXO II. ANEXO II - RESISTÊNCIAS ÚLTIMAS PARA DIVERSAS RELAÇÕES
T/B

Tabela II.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
71	217,03	41,03	7,32	280	168110,0	168110,0	162214,0	162214,0
72	217,03	41,03	9,52	280	-	-	150740,0	150740,0
73	217,03	41,03	11,72	280	-	-	150331,0	150331,0
74	217,03	41,03	13,92	280	169679,0	169679,0	150303,0	150303,0
75	217,03	41,03	16,12	280	168098,0	168098,0	150926,0	150926,0
76	217,03	41,03	18,32	280	167732,0	167732,0	152231,0	152231,0
77	217,03	41,03	20,52	280	167661,0	167661,0	153510,0	153510,0
78	261,03	41,03	7,32	280	167825,0	167825,0	154764,0	154764,0
79	261,03	41,03	9,52	280	-	-	146527,0	146527,0
80	261,03	41,03	11,72	280	-	-	146120,0	146120,0
81	261,03	41,03	13,92	280	-	-	145745,0	145745,0
82	261,03	41,03	16,12	280	-	-	146050,0	146050,0
83	261,03	41,03	18,32	280	-	-	147149,0	147149,0
84	261,03	41,03	20,52	280	-	-	148224,0	148224,0
85	41,03	41,03	7,32	350	-	-	149277,0	149277,0
86	41,03	41,03	9,52	350	-	-	-	-
87	41,03	41,03	11,72	350	-	-	-	-
88	41,03	41,03	13,92	350	-	-	-	-
89	41,03	41,03	16,12	350	-	-	-	-
90	41,03	41,03	18,32	350	-	-	-	-
91	41,03	41,03	20,52	350	-	-	-	-
92	85,03	41,03	7,32	350	-	-	-	-
93	85,03	41,03	9,52	350	-	-	-	-
94	85,03	41,03	11,72	350	-	-	-	-
95	85,03	41,03	13,92	350	-	-	-	-
96	85,03	41,03	16,12	350	-	-	-	-
97	85,03	41,03	18,32	350	-	-	-	-
98	85,03	41,03	20,52	350	-	-	-	-
99	129,03	41,03	7,32	350	-	-	-	-
100	129,03	41,03	9,52	350	193389,0	193389,0	192478,0	192478,0
101	129,03	41,03	11,72	350	194407,0	194407,0	190456,0	190456,0
102	129,03	41,03	13,92	350	194271,0	194271,0	189218,0	189218,0
103	129,03	41,03	16,12	350	195343,0	195343,0	190794,0	190794,0
104	129,03	41,03	18,32	350	196795,0	196795,0	193167,0	193167,0
105	129,03	41,03	20,52	350	198564,0	198564,0	195556,0	195556,0

Tabela II.3 Continuação da tabela

Perfil	Alma	Banzo	Reforço	f_{yb}	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$	$N_{Rd,ultimo}$
	h_p	b_p	b_{cp}	[MPa]	GBTUL	GBTUL	EC3	EC3
	[mm]	[mm]	[mm]		N-IT	IT	N-IT	IT
	Secção de cantos retos				[N]	[N]	[N]	[N]
106	173,03	41,03	7,32	350	200603,0	200603,0	197961,0	197961,0
107	173,03	41,03	9,52	350	194873,0	194873,0	181394,0	181394,0
108	173,03	41,03	11,72	350	194136,0	194136,0	180116,0	180116,0
109	173,03	41,03	13,92	350	193678,0	193678,0	179814,0	179814,0
110	173,03	41,03	16,12	350	193635,0	193635,0	180156,0	180156,0
111	173,03	41,03	18,32	350	193307,0	193307,0	181230,0	181230,0
112	173,03	41,03	20,52	350	193974,0	193974,0	182965,0	182965,0
113	217,03	41,03	7,32	350	194871,0	194871,0	184660,0	184660,0
114	217,03	41,03	9,52	350	-	-	174174,0	174174,0
115	217,03	41,03	11,72	350	-	-	172891,0	172891,0
116	217,03	41,03	13,92	350	-	-	172614,0	172614,0
117	217,03	41,03	16,12	350	-	-	172488,0	172488,0
118	217,03	41,03	18,32	350	197695,0	197695,0	173046,0	173046,0
119	217,03	41,03	20,52	350	196649,0	196649,0	174402,0	174402,0
120	261,03	41,03	7,32	350	196204,0	196204,0	175786,0	175786,0
121	261,03	41,03	9,52	350	-	-	168410,0	168410,0
122	261,03	41,03	11,72	350	-	-	167593,0	167593,0
123	261,03	41,03	13,92	350	-	-	166907,0	166907,0
124	261,03	41,03	16,12	350	-	-	167064,0	167064,0
125	261,03	41,03	18,32	350	-	-	167488,0	167488,0
126	261,03	41,03	20,52	350	-	-	168135,0	168135,0



