

ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE AÇO: ÊNFASE EM PERFIS SOLDADOS

Eng^o Geraldo Donizetti de Paula

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins Gonçalves

São Carlos
2002

À minha esposa Marcela Paula Grobério
e à minha filha Nayara Grobério de Paula
dedico, com carinho, este trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto, À CAPES, por meio do programa PICDT, pelo o apoio financeiro.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo o incentivo à realização deste trabalho.

Aos Professores e funcionários do Departamento de Estruturas da EESC-USP que colaboraram, de forma direta e indireta, para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, pela brilhante contribuição na realização dos ensaios.

À Empresa USIMINAS pelo apoio financeiro na compra dos perfis metálicos para os ensaios de laboratório.

Aos colegas de pós-graduação, especificamente ao Reginaldo, Ângelo, Faustino e Valério, que sempre si dispuseram a me ajudar nos momentos difíceis.

Aos meus amigos de Ouro Preto, Erivelto e Edezio pelo apoio em todos as situações adversas.

A todos os meus familiares pelo apoio e carinho recebido.

SUMÁRIO

	Pg.
1 – INTRODUÇÃO	01
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 – GENERALIDADES.....	03
2.2 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PESQUISAS.....	03
2.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
3 – ASPECTOS GERAIS SOBRE A INSTABILIDADE DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS	19
3.1 – GENERALIDADES.....	19
3.2 – FLAMBAGEM NO REGIME ELÁSTICO.....	19
3.2.1 – Flambagem por flexão.....	20
3.2.1.1 – Elementos com extremidades articuladas.....	20
3.2.1.2 – Elementos com outras condições de extremidades.....	23
3.2.1.3 – Comprimento efetivo de flambagem.....	23
3.2.2 – Flambagem por torção e flambagem por flexo-torção.....	27
3.2.2.1 – Flambagem por torção.....	27
3.2.2.2 – Flambagem por flexo-torção.....	27
3.3 – FLAMBAGEM NO REGIME INELÁSTICO.....	34
3.3.1 – Teoria do módulo tangente.....	34
3.3.2 – Teoria do módulo reduzido ou duplo módulo.....	37
3.3.3 – Modelo de Shanley.....	39
3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
4 – FATORES QUE ALTERAM A RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE AÇO	43
4.1 – GENERALIDADES.....	43
4.2 – TENSÕES RESIDUAIS.....	43
4.2.1 – Tensões residuais em perfis laminados.....	44

.....	59
4.7 – PARÂMETROS QUE CONDUZEM À DETERMINAÇÃO DA FORÇA NORMAL RESISTENTE.....	61
4.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5 – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	65
5.1 – GENERALIDADES.....	65
5.2 – MODELOS ENSAIADOS.....	65
5.3 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	66
5.4 – ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO	67
5.5 – MEDIÇÃO DAS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAS.....	69
5.6 – ENSAIO DOS MODELOS À COMPRESSÃO.....	74
5.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
6 – ANÁLISE TEÓRICA.....	82
6.1 – GENERALIDADES.....	82
6.2 – APRESENTAÇÃO DOS MODELOS.....	82

	Pg.
6.2.1 – Seção Transversal.....	84
6.2.2 – Características dos Modelos.....	85
6.3 – ANÁLISE VIA FORMULAÇÃO ANALÍTICA.....	86
6.4 – ANÁLISE VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	87
6.4.1 – Elemento Considerado.....	88
6.4.2 – Condições de Contorno dos Modelos.....	88
6.4.3 – Solicitação Aplicada aos Modelos.....	88
6.4.4 – Características da Análise.....	89
6.4.5 – Processamento dos Modelos.....	91
6.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
7 – RESULTADOS DA ANÁLISE TEÓRICA.....	94
7.1 – GENERALIDADES.....	94
7.2 – FORÇA CRÍTICA DETERMINADA ANALITICAMENTE E NUMERICAMENTE.....	94
7.3 – FORÇA CRÍTICA DETERMINADA POR MEIO DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	98
7.3.1 – Força crítica obtida segundo as prescrições do Eurocode 3.....	99
7.3.2 – Força crítica obtida segundo as prescrições da NBR 8800.....	103
7.3.3 – Força crítica admitindo a flambagem por flexo-torção.....	107
7.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
8 – RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	114
8.1 – GENERALIDADES.....	114
8.2 – PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	114
8.3 – IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS.....	116
8.4 – RESULTADOS DO ENSAIO À COMPRESSÃO.....	118
8.4.1 – Diagrama força-deslocamento.....	119
8.4.2 – Diagrama força-deformação.....	125
8.4.3 – Deslocamentos laterais.....	130

ANEXO VI – DESLOCAMENTOS LATERAIS DOS MODELOS DA SÉRIE PS 225x29.....	XVI
ANEXO VII – DEFORMAÇÕES MEDIDAS EM MODELOS DAS SÉRIES CS 150x25, PS 200x25 E PS 225x29.....	LXXVIII

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A - Área dos corpos-de-prova;

A_g - Área bruta da seção transversal;

C_w - Momento de inércia setorial ou constante de empenamento;

D - Centro de torção;

E - Módulo de elasticidade;

E' - Módulo efetivo;

E_r - Módulo reduzido;

E_T - Módulo tangente;

$(EI)_{ef}$ - Rigidez efetiva à flexão;

G - Módulo transversal de elasticidade ($G = 0,385 E$);

I - Momento de inércia;

I_e - Momento de inércia da parte elástica da seção transversal;

I_t - Momento de inércia à torção;

I_x e I_y - Momentos principais de inércia da seção;

L - Comprimento do elemento;

M - Momento fletor;

M_{int} - Momento interno resistente;

M_x - Momento fletor em relação ao eixo x;

M_y - Momento fletor em relação ao eixo y;

N - Força normal em geral;

N_{cr} - Força crítica de flambagem;

N_e - Força crítica de Euler;

N_r - Força normal crítica do módulo reduzido;

N_T - Força normal crítica do módulo tangente;

$N_v = N_{ex}$ - Força crítica de flambagem elástica, segundo o eixo x;

$N_w = N_{ey}$ - Força crítica de flambagem elástica, segundo o eixo y ;

$N_\phi = N_{ez}$ - Força crítica de flambagem elástica, segundo o eixo z ;

N_E - Força normal crítica experimental;

N_T - Força normal crítica teórica determinada por meio da análise via expressões

N_{TA} - Força normal crítica teórica determinada por meio da análise via método dos elementos finitos;

N_{Eb} - Força normal crítica determinada segundo a curva **b** do Eurocode;

N_{Ec} - Força normal crítica determinada segundo a curva **c** do Eurocode;

N_{Nb} - Força normal crítica determinada segundo a curva **b** da NBR 8800;

N_{Nc} - Força normal crítica determinada segundo a curva **c** da NBR 8800;

W - Módulo de resistência elástico;

W_x, W_y - Módulo de resistência elástico relativos aos eixos x e y .

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

b_f - Largura de mesa;

d - Altura do perfil;

f - Tensão crítica em geral;

f_{cr} - Tensão crítica de flambagem;

f_e - Tensão crítica de Euler;

f_p - Tensão de proporcionalidade;

f_r - Tensão residual;

f_T - Tensão crítica do módulo tangente;

f_u - Tensão de ruptura;

f_y - Tensão de escoamento;

h - Comprimento da alma;

k - Fator comprimento efetivo de flambagem;

k_x, k_y - Fator comprimento efetivo de flambagem relativos aos eixos x e y ;
 k_z - Fator comprimento efetivo de flambagem referente a flambagem por torção;
 r - Raio de giração;
 r_x, r_y - Raio de giração relativos aos eixos x e y ;
 r_0 - Raio de giração polar em relação ao centro de torção;
 t_f - Espessura de mesa;
 t_w - Espessura de alma;
 v - Deslocamento lateral na direção y ;
 v_D - Deslocamento do centro de torção D na direção do eixo y ;
 v_0 - Deslocamento inicial;
 v_T - Deslocamento lateral total;
 w - Deslocamento lateral na direção x ;
 w_D - Deslocamento do centro de torção D na direção do eixo x ;
 x, y - Eixos principais de inércia;
 x_0, y_0 - Coordenadas do centro de torção;
 z - Eixo longitudinal.

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α - Coeficiente;
 α - Coeficiente de dilatação térmica;
 γ - Número definido em função da seção transversal e dos eixos considerados;
 ε - Deformação
 η - Parâmetro das imperfeições iniciais;
 λ - índice de esbeltez;
 $\bar{\lambda}$ - índice de esbeltez reduzido;
 $\bar{\lambda}_0$ - Índice de esbeltez reduzido no patamar de escoamento;
 λ_p - Índice de esbeltez correspondente a plastificação;

- ν - Coeficiente de Poisson;
 ρ - fator de redução da resistência;
 ρ - Massa específica;
 σ - Tensão normal;
 ϕ - Coeficiente de resistência na compressão;
 ϕ - Rotação em torno do centro de torção.

LISTA DE SIGLAS

- AISC - American Institute of Steel Construction;
ASD - Allowable Stress Design
CG - Centro de gravidade;
CRC - Column Research Council;
CSA - Canadian Standards;
ECCS - European Convention for Constructional Steelwork;
EUROCODE - Norma Européia
FC - flame cut plates - chapa com as bordas cortadas a maçarico;
I–FC - Perfil I soldado formados por chapas cortadas a maçarico;
LRFD - Load and Resistance Factor Design;
NBR 8800 - Norma brasileira “*Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*”
NDSS - Numerical Data-Base for Steel Structures;
SSRC - Structural Stability Research Council;
UM - universal mill plates - chapa com as bordas laminadas.

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 2.1 - Curva de resistência à compressão a	15
Figura 2.2 - Curva de resistência à compressão b	16
Figura 2.3 - Curva de resistência à compressão c	16
Figura 2.4 - Curva de resistência à compressão d	17
Figura 3.1 – Elemento comprimido em sua posição deslocada.....	20
Figura 3.2 – Condição de equilíbrio.....	22
Figura 3.3 – Seção transversal assimétrica.....	28
Figura 3.4 - Seção transversal aberta, formada por chapa delgada.....	28
Figura 3.5 – Elementos comprimidos com vínculos de garfo.....	30
Figura 3.6 – Seção duplamente simétrica.....	30
Figura 3.7 – Seção monossimétrica.....	31
Figura 3.8 – Seção assimétrica.....	32
Figura 3.9 – Diagrama tensão-deformação do material.....	34
Figura 3.10 – Comportamento do material no regime inelástico.....	35
Figura 3.11 – Teoria do módulo tangente.....	36
Figura 3.12 – Curva de resistência pela teoria do módulo tangente.....	37
Figura 3.13 – Carregamento e descarregamento do material.....	37
Figura 3.14 – Teoria do módulo reduzido.....	38
Figura 3.15 – Modelo de Shanley.....	40
Figura 3.16 – Força – deslocamento.....	41
Figura 4.1 – Distribuição de tensão residual em perfis laminados.....	44
Figura 4.2 – Tensões residuais no perfil laminado W 14 x 730.....	45
Figura 4.3 – Tensões residuais em chapas UM e FC.....	46
Figura 4.4 – Tensões residuais no perfil PS 584x1015.....	47
Figura 4.5 – Distribuição de tensões num perfil I de abas planas.....	48
Figura 4.6 – Influência das tensões residuais na resistência à compressão de um perfil estrutural de aço.....	49
Figura 4.7 – Curvas de flambagem para um perfil com e sem tensões residuais.....	52
Figura 4.8 – Elemento com um deslocamento inicial.....	53
Figura 4.9 – Representação da distância y ao eixo $x - x$	57

	Pg.
Figura 5.1 – Dimensões nominais do corpo-de-prova para o ensaio à tração.....	67
Figura 5.2 – Foto do corpo-de-prova.....	68
Figura 5.3 – Dispositivo para leitura das imperfeições geométricas transversais....	70
Figura 5.4 – Detalhe da realização de medida da deslocada inicial do perfil I.....	70
Figura 5.5 – Posições para medidas das deslocadas longitudinais.....	71
Figura 5.6 – Imperfeições geométricas para o perfil PS 200x25.....	71
Figura 5.7 – Ajuste da imperfeição longitudinal na linha H do perfil PS 225x29, com L = 1600 mm.....	72
Figura 5.8 – Ajuste da imperfeição longitudinal na linha H do perfil PS 225x29, com L = 2000 mm.....	72
Figura 5.9 – Ajuste da imperfeição longitudinal na linha H do perfil PS 225x29, com L = 2500 mm.....	73
Figura 5.10 – Ajuste da imperfeição longitudinal na linha H do perfil PS 225x29, com L = 3500 mm.....	73
Figura 5.11 – Modelo instrumentado com transdutores de deslocamento.....	74
Figura 5.12 – Máquina INSTRON, com o modelo na posição do ensaio.....	77
Figura 5.13 – Modelo 3 do perfil CS 150x25 de L = 1800 mm.....	78
Figura 5.14 – Deformações elevadas na alma do modelo 3 do perfil CS 150x25, de L = 1800 mm.....	79
Figura 5.15 – Modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	80
Figura 5.16 – Posição dos extensômetros na seção I, perfil PS 200x25.....	81
Figura 6.1 – Modelo teórico.....	86
Figura 6.2 – Modelo solicitado à compressão.....	89
Figura 6.3 – Diagrama tensão-deformação.....	90
Figura 8.1 – Diagrama tensão-deformação do corpo-de-prova A2.....	115
Figura 8.2 – Diagrama tensão-deformação do corpo-de-prova B2.....	115
Figura 8.3 – Posições dos transdutores de deslocamento.....	118
Figura 8.4 – Diagrama força-deslocamento lateral.....	119
Figura 8.5 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 1 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	120
Figura 8.6 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 2 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	120

	Pg.
Figura 8.7 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 3 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	121
Figura 8.8 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 4 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	121
Figura 8.9 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 5 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	122
Figura 8.10 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 6 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	122
Figura 8.11 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 7 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	123
Figura 8.12 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 8 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	123
Figura 8.13 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 9 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	124
Figura 8.14 – Diagrama força-deslocamento do transdutor 10 para o modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	124
Figura 8.15 – Posições dos extensômetros na altura média do modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	125
Figura 8.16 – Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa superior do modelo.....	126
Figura 8.17 – Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo.....	126
Figura 8.18 – Posição dos extensômetros no modelo deformado.....	127
Figura 8.19 – Posições dos extensômetros na altura média do modelo 1, de L = 1600 mm, do perfil PS 225x29.....	128
Figura 8.20 – Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa superior do modelo.....	129
Figura 8.21 – Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo.....	129
Figura 8.22 – Elástica modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200x25.....	132
Figura 8.23 – Modelo de flambagem de uma coluna com as extremidades engastadas.....	133

	Pg.
Figura 9.1 – Força normal reduzida experimental, perfil CS 150x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	153
Figura 9.2 – Força normal reduzida experimental média, para o perfil CS 150x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	154
Figura 9.3 – Força normal reduzida experimental, perfil PS 200x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	155
Figura 9.4 – Força normal reduzida experimental média, para o perfil PS 200x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	156
Figura 9.5 – Força normal reduzida experimental, perfil PS 225x29. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	157
Figura 9.6 – Força normal reduzida experimental média, para o perfil PS 225x29. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	158
Figura 9.7 – Força normal reduzida numérica, perfil CS 150x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	159
Figura 9.8 – Força normal reduzida numérica, perfil PS 200x25. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	160
Figura 9.9 – Força normal reduzida numérica, perfil PS 225x29. Curvas b e c – Eurocode 3: 1992.....	160
Figura 9.10 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil CS 150x25. Curvas b e c do Eurocode 3: 1992.....	161
Figura 9.11 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil PS 200x25. Curvas b e c do Eurocode 3: 1992.....	162
Figura 9.11 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil PS 225x29. Curvas b e c do Eurocode 3: 1992.....	162

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 2.1 – Fatos históricos sobre a resistência dos elementos comprimidos.....	4
Tabela 2.2 – Principais pesquisas sobre a resistência dos elementos comprimidos..	7
Tabela 2.3 – Expressões mais recentes para as curvas de resistência à compressão	11
Tabela 2.4 – Principais formulações para as curvas de resistência à compressão....	13
Tabela 3.1 – Força normal crítica por flexão.....	24
Tabela 3.2 – Valores teóricos e normalizados de k para elementos ideais.....	26
Tabela 4.1 – Valores da tensão crítica f para um perfil I de aço A36.....	51
Tabela 4.2 – Valores da relação r/y para as séries CS e PS.....	59
Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para o cálculo da força normal crítica N_T	60
Tabela 4.4 – Expressões para o parâmetro ρ	62
Tabela 5.1 – Distância dos transdutores às extremidades dos modelos.....	66
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio à tração, dos corpos-de-prova retirados das mesas dos perfis.....	68
Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio à tração, dos corpos-de-prova retirados da alma dos perfis.....	73
Tabela 5.4 – Cotas dos transdutores posicionados na alma dos modelos.....	75
Tabela 5.5 – Cotas dos transdutores posicionados na mesa dos modelos.....	76
Tabela 6.1 – Relação dos modelos para análise.....	83
Tabela 6.2a – Seções transversais analisadas (dimensões nominais).....	84
Tabela 6.2b – Seções transversais analisadas. (dimensões médias).....	85
Tabela 6.3 – Propriedades geométricas dos perfis.....	85
Tabela 6.4 – Valores de σ e ϵ para o diagrama considerado.....	90
Tabela 6.5 – Valores da força normal crítica para o perfil CS 150x25.....	91
Tabela 6.6 – Valores da força normal crítica para o perfil PS 200x25.....	92
Tabela 6.7 – Valores da força normal crítica para o perfil PS 225x29.....	92
Tabela 7.1 – Valores das forças críticas N_T e N_{TA} para o perfil CS 150x25.....	96
Tabela 7.2 – Valores das forças críticas N_T e N_{TA} para o perfil PS 200x25.....	96
Tabela 7.3 – Valores das forças críticas N_T e N_{TA} para o perfil PS 225x29.....	97
Tabela 7.4 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil CS 150x25 – Eurocode 3.....	100

	Pg.
Tabela 7.5 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 200x25 – Eurocode 3.....	101
Tabela 7.6 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 225x29 – Eurocode 3.....	102
Tabela 7.7 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil CS 150x25 – NBR 8800.....	104
Tabela 7.8 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 200x25 – NBR 8800.....	105
Tabela 7.9 – Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 225x29 – NBR 8800.....	106
Tabela 7.10 – Força crítica por FLT para $v_0^* = L / 1000$ – curvas do Eurocode 3...	108
Tabela 7.11 – Força crítica por FLT para $v_0^* = L / 1000$ – curvas do NBR 8800....	109
Tabela 7.12 – Força crítica por FLT, perfil CS 150x25 - curvas do Eurocode 3.....	110
Tabela 7.13 – Força crítica por FLT, perfil PS 200x25 - curvas do Eurocode 3.....	110
Tabela 7.14 – Força crítica por FLT, perfil PS 225x29 - curvas do Eurocode 3.....	111
Tabela 7.15 – Força crítica por FLT, perfil CS 150x25 - curvas do NBR 8800.....	112
Tabela 7.16 – Força crítica por FLT, perfil PS 200x25 - curvas do NBR 8800.....	112
Tabela 7.17 – Força crítica por FLT, perfil PS 225x29 - curvas do NBR 8800.....	113
Tabela 8.1 – Valores da imperfeição inicial para o perfil CS 150x25.....	116
Tabela 8.2 – Valores da imperfeição inicial para o perfil PS 200x25.....	117
Tabela 8.3 – Valores da imperfeição inicial para o perfil PS 225x29.....	117
Tabela 8.4 – Deslocamentos laterais máximos para a série CS 150x25.....	130
Tabela 8.5 – Deslocamentos laterais máximos para a série PS 200x25.....	131
Tabela 8.6 – Deslocamentos laterais máximos para a série PS 225x29.....	131
Tabela 8.7 – Expressões das elásticas para os modelos da série CS 150x25.....	134
Tabela 8.8 – Expressões das elásticas para os modelos da série PS 200x25.....	135
Tabela 8.9 – Expressões das elásticas para os modelos da série PS 225x29.....	136
Tabela 8.10 – Principais valores experimentais para os modelos da série CS 150x25.....	137
Tabela 8.11 – Principais valores experimentais para os modelos da série PS 200x25.....	138
Tabela 8.12 – Principais valores experimentais para os modelos da série PS 225x29.....	138

	Pg.
Tabela 9.1 – Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil CS 150x25.....	141
Tabela 9.2 – Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil PS 200x25.....	142
Tabela 9.3 – Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil PS 225x29.....	142
Tabela 9.4 – Comparação entre os valores da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil CS 150x25.....	144
Tabela 9.5 – Comparação entre os valores da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil PS 200x25.....	145
Tabela 9.6 – Comparação entre os valores da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil CVS 225x29.....	145
Tabela 9.7 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil CS 150x25.....	146
Tabela 9.8 – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil CS 150x25.....	146
Tabela 9.9 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil PS 200x25.....	147
Tabela 9.10 – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil PS 200x25.....	147
Tabela 9.11 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil PS 225x29.....	148
Tabela 9.12 – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil PS 225x29.....	148
Tabela 9.13 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pelo Eurocode) – perfil CS 150x25.....	149
Tabela 9.14 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil CS 150x25.....	149
Tabela 9.15 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 200x25.....	150
Tabela 9.16 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 200x25.....	150
Tabela 9.17 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 225x29.....	151
Tabela 9.18 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 225x29.....	151

RESUMO

DE PAULA, G. D. Estudo teórico-experimental de elementos comprimidos de aço: ênfase em perfis soldados. São Carlos, 2002. 156p. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta resultados de uma análise teórico-experimental sobre a resistência à compressão de perfis **I** soldados de aço, formados por chapas cortadas a maçarico. A construção metálica no Brasil utiliza os perfis **I** soldados formados por chapas cortadas a maçarico em virtude da pouca disponibilidade no mercado dos perfis laminados. Os perfis soldados brasileiros apresentam dimensões (altura, largura de mesa e espessura) diferentes das encontradas nos perfis laminados e soldados, fabricados em outros países. Apresentam-se os principais parâmetros envolvidos na formulação das curvas de resistência à compressão para perfis soldados de pequenas dimensões, tais como: tensões residuais, imperfeições geométricas iniciais e seus efeitos no cálculo da resistência à compressão dos perfis soldados compostos por chapas cortadas a maçarico.

séries PS 200x25, PS 225x29 e CS 150x25, sendo que foram obtidos resultados experimentais da força normal crítica e das imperfeições geométricas iniciais para três modelos de cada série com quatro índices de esbeltez diferente.

Palavras-chaves: Perfis soldados de aço, resistência à compressão e imperfeições iniciais.

ABSTRACT

DE PAULA, G. D. Theoretical and experimental study of compressed steel elements: emphasis in welded shapes. São Carlos, 2002. 156p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents results of theoretical and experimental analysis about the compressive strength of steel welded I-shapes manufactured from flame-cut plates. Steel construction in Brazil uses these welded I-shapes because of the limited availability of hot-rolled shapes in the market. The Brazilian welded shapes have dimensions (height, flange width and thickness) that differ from steel welded shapes manufactured in other countries. It presents the main parameters in the formulation of the compressive strength curves for welded shapes of small dimensions as: residual stresses, geometrical initial crookedness and their effects in the evaluation of the compressive strength of the welded shapes manufactured from flame-cut plates. The tested shapes are of PS 200x25, PS 225x29 and CS 150x25 series. Test results were obtained for the critical axial load and the geometrical initial crookedness to three models with four different slenderness ratio in each series.

Keys words: steel welded shapes, compressive strength and initial crookedness.

1 - INTRODUÇÃO

A construção metálica no Brasil utiliza em grande escala os perfis I soldados formados por chapas cortadas a maçarico - tipo FC* e com pequenas dimensões para a altura **d**, largura de mesa **b** e espessura **t**. Salienta-se ainda que os perfis **I - FC**, de fabricação nacional, tem dimensões bem diferentes dos perfis laminados e dos perfis soldados fabricados em outros países.

As normas de cálculo e projeto de estruturas de aço, inclusive a brasileira - NBR 8800: 1986, adotam para a determinação da resistência última à compressão dos perfis **I - FC** uma curva de flambagem semelhante a dos perfis laminados.

A definição **curva de flambagem** apresentada pela literatura técnica não é adequada, pois esse problema não corresponde ao da bifurcação de equilíbrio. Neste trabalho, tal definição será substituída por **curva de resistência à compressão**.

A curva de resistência à compressão adotada para os perfis laminados não corresponde à dos perfis soldados, em virtude de os fatores que alteram a resistência desses perfis, como por exemplo, as tensões residuais que apresentam forma de distribuição e valores diferentes.

Justifica-se a realização de uma investigação sobre o tema, objetivando determinar a resistência última à compressão para os perfis **I - FC** de pequeno porte, fabricados pela indústria nacional, uma vez que esses são bastante utilizados pela construção metálica no Brasil e apresentam dimensões diferentes das encontradas nos perfis laminados e soldados fabricados em outros países.

Em razão da não realização de estudos teórico-experimentais, visando o cálculo da resistência dos perfis de aço estrutural fabricados no Brasil, a norma brasileira NBR 8800: 1986 adotou as curvas de resistência à compressão, utilizadas no Eurocode: 1978 (DRAFT), para perfis com dimensões diferentes das apresentadas

*Neste trabalho, o termo perfis I soldados formados por chapas cortadas a maçarico - tipo FC será representado por perfis **I - FC**.

pelos perfis de fabricação nacional, no caso dos perfis soldados. Necessita-se, então, verificar a adequação das curvas de resistência à compressão para as diversas famílias de perfis de aço estrutural recomendadas pela norma NBR 8800: 1986.

Objetiva-se neste trabalho apresentar informações mais adequadas que possibilitam o cálculo da resistência última à compressão dos perfis **I – FC** de pequeno porte fabricados pela indústria brasileira.

Propõe-se o cálculo da resistência última por meio de uma análise teórico-experimental de elementos comprimidos de aço compostos por perfis **I – FC** pertencentes às séries CS 150 x 25, PS 200 x 25 e PS 225 x 29.

Utiliza-se a nomenclatura PS para representar as séries de perfis **I** soldados de aço duplamente simétricos, não relacionados na Tabela B da norma NBR 5884: 2000, atendendo uma recomendação da própria norma.

Os perfis foram ensaiados à compressão centrada em modelos que representam o comportamento de colunas com as extremidades articuladas visando à determinação experimental da força normal crítica.

Os modelos foram ensaiados na máquina de ensaio servo-hidráulica INSTRON, com capacidade de 3000 kN e altura de 4000 mm, do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Os resultados obtidos experimentalmente da força normal crítica de compressão serão utilizados para possibilitar a comparação de alguns pontos pertencentes aos modelos ensaiados com a curva de resistência adotada pela normalização atual para os perfis **I – FC**.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - GENERALIDADES

Neste trabalho, a revisão bibliográfica abrangerá os tópicos necessários ao adequado embasamento para alcançar os objetivos mencionados no capítulo 1.

Este capítulo apresenta um levantamento sucinto envolvendo a evolução das pesquisas relativas ao estudo dos elementos comprimidos de aço, ressaltando aqueles referentes aos principais fatores que alteram a resistência destes elementos, tais como as tensões residuais e as imperfeições iniciais. Apresenta-se ainda, alguns comentários a respeito do surgimento das curvas de resistência à compressão dos perfis de aço estrutural: a curva única de resistência do CRC^a e as curvas múltiplas de resistência do SSRC^b e da ECCS^c.

2.2 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PESQUISAS

A história referente ao estudo dos elementos axialmente comprimidos teve seu início a partir da publicação do trabalho de Euler, em 1744, que apresenta a primeira expressão para o cálculo da força normal crítica de flambagem no regime

be-se que o estudo deste assunto prolongou-se por um período superior a 250 anos, uma vez que o mesmo continua sendo rediscutido até os nossos dias.

O estudo dos elementos comprimidos sempre esteve presente no centro dos interesses de muitos pesquisadores. Na seqüência deste item estão registradas algumas das contribuições bibliográficas referentes ao objetivo específico do presente trabalho, verifica-se também que algumas das obras apresentadas na Tabela 2.2 não se restringem apenas ao estudo de elementos comprimidos de aço.

^a Column Research Council;

^b Structural Stability Research Council;

^c European Convention for Constructional Steelwork.

A Tabela 2.1 ilustra alguns fatos históricos sobre o estudo dos elementos comprimidos, organizados segundo uma ordem cronológica dos acontecimentos.

Apresenta-se na Tabela 2.2, a evolução histórica das principais pesquisas referentes à resistência dos elementos comprimidos, às tensões residuais, às imperfeições geométricas iniciais e às curvas de resistência à compressão, respectivamente, numa tentativa de melhor organizar a ordem dos acontecimentos que contribuíram para o desenvolvimento do estudo dos elementos comprimidos.

As expressões para as curvas de resistência à compressão, apresentadas na Tabela 2.3 foram desenvolvidas com o objetivo de adequar as curvas adotadas pelas normas de cálculo para as diversas famílias de perfis de

Na Tabela 2.4 estão citadas as principais formulações para as curvas de resistência à compressão, as quais encontram-se organizadas numa ordem cronológica de publicação.

Tabela 2.1 - Fatos históricos sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Ano ou década	Fatos históricos apresentados
1744	Proposição da fórmula geral para a força normal crítica de flambagem de um elemento axialmente comprimido, no regime elástico: $N_{cr} = \pi^2 EI / L^2$, onde EI é o produto de rigidez à flexão do elemento.
1759	Publicação da fórmula clássica de Euler para a força normal crítica: $N_e = \pi^2 EI / L^2$.
1889	Engesser apresentou a teoria do módulo tangente, no regime inelástico. Esta teoria consiste na substituição do módulo de elasticidade E pelo módulo tangente E_T na expressão para a força normal crítica de Euler N_e .
1890	Considère propôs a utilização de um módulo reduzido E_r , intermediário entre E e E_T .
1895	Jasinsky salientou que do ponto de vista da estabilidade clássica a teoria do módulo tangente estava incorreta.
1899	Engesser corrigiu a teoria do módulo tangente, inicialmente proposta, apresentando a teoria do módulo reduzido ou duplo módulo.

Tabela 2.1 (continuação) - Fatos históricos sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Ano ou década	Fatos históricos apresentados
Década de 50	Publicação da primeira curva básica de resistência à compressão, curva do CRC - Column Research Council.
1954	A norma alemã DIN 4114 percebe a necessidade de se utilizar mais uma curva de resistência à compressão e introduz uma curva especial para os perfis formados por seção tubular.
Década de 60	Início das pesquisas para o desenvolvimento das curvas múltiplas de resistência, na Universidade de Lehigh e na ECCS.
1961	A norma americana AISC/ASD - Allowable Stress Design (baseada no método das tensões admissíveis) adotou a curva do CRC, como sendo a curva básica de resistência compressão dos perfis estruturais de aço.
Década de 70	Foram apresentadas as múltiplas curvas de resistência para as diversas famílias de perfis de aço estrutural, a partir de resultados de ensaios ajustados por análises estatística e probabilística: as curvas do SSRC e da ECCS.
1974	A norma canadense CSA - Canadian Standards Association, pelo método dos estados limites, adotou a curva 2 do SSRC como uma curva básica de projeto.
1976	A partir de diversas críticas feitas às primeiras curvas de resistência europeias, a comissão 8 da ECCS propôs uma família de cinco novas curvas, as quais foram adotadas pelas recomendações da ECCS (1978).
1978	O Eurocode 3 adotou as curvas múltiplas de resistência determinadas por meio de simulações numéricas, considerando resultados experimentais de 1067 barras ensaiadas como pilares. Cabe salientar que estas curvas encontram registradas na referência BALLIO & MAZZOLANI (1983).
Década de 80	Estudos sobre a resistência dos elementos comprimidos esbeltos, tais como as cantoneiras. Ocorrendo-se ainda alguns trabalhos sobre os efeitos de pequenas restrições de extremidades na resistência dos elementos comprimidos
1980	A Norma Canadense - CSA incluiu a curva 1 do SSRC para os perfis tubulares formados a quente ou a frio com alívio de tensão.

Tabela 2.1 (continuação) - Fatos históricos sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Ano ou década	Fatos históricos apresentados
1983	O Eurocode 3 adotou as expressões de RONDAL & MAQUOI (1979) em substituição às curvas apresentadas em 1978.
1986	Publicação da nova versão do AISC / LRFD Load and Resistance Factor Design - baseada no método dos estados limites. Esta norma adotou a curva 2P do SSRC, com as expressões matemáticas modificadas.
1986	Publicação da norma brasileira NBR 8800: 1986 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios, baseada no método dos estados limites.

Partindo do princípio que este trabalho busca registrar os fatos históricos referentes à resistência dos elementos comprimidos de aço, enfatizando basicamente os efeitos da flambagem global, interrompe-se o estado da arte, em 1986, por considerar que a partir desta data, as eventuais publicações ocorridas sobre o assunto não apresentam importantes conclusões.

Tabela 2.2 - Principais pesquisas sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Pesquisador(es)	Observações sobre os trabalhos realizados
SHANLEY (1947)	Determinou a força normal crítica, no regime pós-crítico, por meio de um modelo matemático, verificando que os elementos comprimidos atingem a força normal crítica próxima à força crítica do módulo tangente.
BLEICH (1952)	Propôs uma expressão parabólica para a tensão crítica de flambagem de elementos comprimidos de aço, no regime $f_{cr} = f_y - (f_p / \pi^2 E)(f_y - f_p)(kL/r)^2$.
HUBER & BEEDLE (1954)	Discutiram as causas das tensões residuais e seus efeitos na resistência dos elementos comprimidos de aço, enfatizando os seguintes ensaios de laboratório: ensaios para a caracterização do aço, ensaios para medir imperfeições geométricas iniciais e ensaios de pilares submetidos à compressão centrada. Verificaram que o efeito das tensões residuais na resistência dos elementos comprimidos de aço é mais pronunciado na faixa de $\lambda = 40$ até $\lambda = 90$ e que a maior influência das tensões residuais na resistência dos perfis metálicos ocorre quando encontram-se localizadas em suas mesas.
BEEDLE & TALL (1960)	Discutiram as aproximações utilizadas no cálculo da resistência de elementos comprimidos de aço, levando em consideração o valor e a distribuição de tensões residuais nos perfis estruturais. Verificaram que as tensões residuais são decorrentes de deformação $f_p \cong 62\%f_y$; $f_r = f_y - f_p$ e que as tensões residuais reduzem a resistência dos elementos comprimidos na faixa correspondente a $40 \leq \lambda \leq 120$.
NAGARAJA RAO et alli (1964)	Determinaram experimentalmente o valor e a distribuição de tensões residuais longitudinais em perfis soldados formados por chapas cortadas a maçarico. Concluindo que o valor e a distribuição de tensões residuais nos perfis soldados podem ser estimados a partir da distribuição de tensões em chapas isoladas; o corte a maçarico introduz tensões residuais nas bordas das chapas; os perfis H soldados apresentam distribuições de tensões residuais similares àquelas nos perfis H laminados a quente.
BATTERMAN & JOHNSTON (1967)	Verificaram que devem ser considerados em combinação os efeitos das tensões residuais e das imperfeições geométricas iniciais, no cálculo da resistência dos elementos comprimidos de aço.

Tabela 2.2 (continuação) - Principais pesquisas sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Pesquisador(es)	Observações sobre os trabalhos realizados
McFAALS & TALL (1969)	Investigaram o efeito das tensões residuais na resistência à compressão das seções 12H79 e 14H202 - séries CS 306x118 e CS 394x298, pertencentes aos perfis I - FC. Concluíram que o efeito das tensões residuais é mais significativo, quando flexão ocorrer em torno do eixo de menor inércia e na faixa correspondente a $50 \leq \lambda \leq 90$. Apresentaram ainda valores experimentais do parâmetro de resistência ρ para alguns modelos pertencentes a estas duas seções.
ALPSTEN & TALL (1970)	Investigaram experimentalmente a influência das tensões residuais na resistência dos perfis H soldados de aço, analisando os perfis soldados 15H290 e 23H681 - séries CS 306x118 e CS 394x298, com espessura das chapas variando de 38,1 mm a 88,9 mm. Concluíram que: as tensões residuais resultam do resfriamento das chapas, do corte a maçarico e da soldagem; o tipo de solda e a classe do aço pouco influenciam na distribuição das tensões residuais; a geometria das chapas e dos perfis constitui uma importante variável na distribuição de tensões residuais; o corte a maçarico introduz tensões residuais de tração nas bordas da chapa.
JACQUET (1970)	Apresentou um estudo estatístico dos resultados de 1067 ensaios de pilares de aço comprimidos axialmente realizados na Europa. Os ensaios citados, foram distribuídos da seguinte forma: 57 na Alemanha, 111 na Bélgica, 414 na França, 46 na Grã-Betanha, 29 na Itália, 41 na Holanda e 369 na Iugoslávia.
BJORHOVED et alli (1972)	Investigaram experimentalmente a distribuição de tensões residuais em vinte seis (26) chapas de aço. Sendo vinte (20) chapas com as bordas cortadas a maçarico FC e seis (6) chapas com as bordas laminadas - UM, com as seguintes dimensões: largura da ordem de 228,6 mm e 609,6 mm e espessura da ordem de 38,1 mm e 152,4 mm. Concluíram que: a distribuição de tensões residuais nas chapas UM depende de suas dimensões; o calor induzido devido ao corte a maçarico altera as propriedades do material nas proximidades das bordas; o efeito da solda altera a distribuição de tensões residuais nas chapas cortadas a maçarico.

Tabela 2.2 (continuação) - Principais pesquisas sobre a resistência dos elementos comprimidos.

Pesquisador(es)	Observações sobre os trabalhos realizados
BJORHOVED (1972), segundo GALAMBOS (1988)	Determinou a partir de uma análise estatística, admitindo a amplitude da curvatura inicial igual L/1000, uma série de curvas de resistência. Depois da verificação de alguma semelhança entre as diversas famílias de curvas, estas foram divididas em três subgrupos. Cada grupo foi representado por uma curva média, de tal forma que cada uma destas curvas foi devidamente ajustada e a partir daí surgiram às curvas múltiplas de resistência do SSRC. Posteriormente, foram desenvolvidas, por meio de análises probabilísticas, outras três curvas de res utilizando a amplitude da curvatura inicial igual ao valor médio de L/1500, as quais foram denominadas por 1P, 2P e 3P, respectivamente.
MAQUOI & RONDAL (1978)	Apresentaram uma formulação para novas curvas - ECCS, admitindo-se a fórmula adimensional de Ayrton-Perry: $(1 - \bar{N})(1 - \bar{N}\bar{\lambda}^2) = \eta\bar{N}$ com $\eta = \alpha\sqrt{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0^2}$, de tal forma que o fator η represente as imperfeições generalizadas e as curvas sejam caracterizadas por um patamar de escoamento, na faixa $\bar{\lambda} \leq 0,2$.
MAQUOI & RONDAL (1979)	Mostraram que a forma de representar a imperfeição generalizada depende do tipo de material utilizado e que a representação deve ser diferente para o aço e para o alumínio. A fórmula adimensional de Ayrton-Perry continuou sendo utilizada para a determinação das novas curvas de flambagem européias, porém com o parâmetro η igual a $\eta_1 = \alpha_1(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$ para o aço e $\eta_2 = \alpha_2\sqrt{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0^2}$ para o alumínio.
FUKUMOTO & ITOH (1983)	Coletaram os resultados de ensaios realizados durante o decorrer de 25 anos, em diversos países da Europa, América do Norte e Japão. Os resultados de 1665 ensaios foram armazenados no chamado NDSS “Numerical Data-Base for Steel Structures” registrando-se 282 ensaios em perfis I soldados, assim distribuídos: 229 no Japão, 31 nos Estados Unidos e 22 na Europa. Verificaram que apenas 10 tipos diferentes de perfis foram ensaiados. Os autores propuseram uma fórmula múltipla de resistência para as diversas famílias de perfis de aço estrutural, a partir de uma avaliação estatística.

Tabela 2.2 (continuação) -

Pesquisador(es)	
CHERNENKO & KENNEDY (1991)	de uma curva de resistência à compressão mais adequada aos perfis I - FC , a ser utilizada pela norma canadense CAN-CSA-S16.1-M89. A realização deste estudo tornou-se importante, pois a norma canadense classifica os perfis I - FC na mesma curva de resistência dos perfis I laminados a quente, tal procedimento torna-se conservativo em virtude dos diferentes processos de fabricação dos perfis.
RODRIGUES (1993)	Propôs uma curva de resistência ajustada por meio de um método probabilístico e um modelo -linearidade geométrica nos modelos do “Método dos Elementos Finitos” para verificar o comportamento em estado de serviço de perfis tipo U enrijecido submetidos a flexo-compressão. Registrou-se ainda, um levantamento das imperfeições iniciais para os perfis submetidos a ensaios de laboratório, sendo tais imperfeições oriundas de características mecânicas: tensões residuais e relativas à geometria do perfil.
POPOVIC et alli (1996)	Discutiram os resultados de ensaios a compressão em cantoneiras “DuraGal” formadas a frio, fabricadas pela indústria Australiana. O objetivo do trabalho foi apresentar resultados de ensaios a serem utilizados pela norma “Australiana AS4100/1990” para o cálculo de estruturas de aço pelo método dos estados limites. Os principais ensaios realizados foram: ensaios de propriedades do material (ensaio a tração de corpo-de-prova, ensaio para medir deformações residuais); ensaios a compressão de pilares curtos e ensaios a compressão de pilares longos.
PIMENTA (1997)	Propôs uma curva de resistência à compressão para representar a resistência dos perfis I - FC . Admitiu-se nesta proposição, as tensões residuais medidas em perfis fabricados em outros países, ou seja, perfis com as relações largura/espessura b/t diferentes das encontradas nos perfis fabricados no Brasil. Comenta-se ainda que o parâmetro $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$ recomendado por MAQUOI & RONDAL (1979) apresenta melhores resultados.

Tabela 2.3 - Expressões mais recentes para as curvas de resistência à compressão.

Pesquisador(es)	Curva proposta
MAQUOI & RONDAL (1978)¹	$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} (1 + \eta + \bar{\lambda}^2)$ <p>Onde: $\eta = \alpha \sqrt{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0^2} \quad \rightarrow \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2$</p> <p>curva a₀ → $\alpha = 0,093$</p> <p>curva a → $\alpha = 0,158$</p> <p>curva b → $\alpha = 0,281$</p> <p>curva c → $\alpha = 0,384$</p> <p>curva d → $\alpha = 0,587$</p>
MAQUOI & RONDAL (1979)²	$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} (1 + \eta + \bar{\lambda}^2)$ <p>Onde: $\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad \rightarrow \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2$</p> <p>curva a₀ → $\alpha = 0,125$</p> <p>curva a → $\alpha = 0,206$</p> <p>curva b → $\alpha = 0,339$</p> <p>curva c → $\alpha = 0,489$</p> <p>curva d → $\alpha = 0,756$</p>
FUKUMOTO & ITOH (1983)³	<p>Curva proposta para os perfis I - FC:</p> <p>$\rho = 1,031 - 0,0969\bar{\lambda} - 0,292\bar{\lambda}^2$ para $0,2 \leq \bar{\lambda} \leq 1,25$;</p> <p>$\rho =$ curva 2* do SSRC para $\bar{\lambda} \geq 1,25$.</p>

Nota: * A curva 2 do SSRC encontra-se apresentada na Tabela 2.4.

¹ MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1978). Mise en equation des novellas courbes européennes de flambement. *Construction Métallique*, n.1, Paris;

² MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1979). Formulations d' Airton - Perry pour flambement de barres métalliques. *Construction Métallique*, n.4, Paris;

³ Fukumoto, Y.; ITOH, Y. (1983). Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach. *Journal of Constructional Steel Research*, v.3, n.3, p.2-19.

Tabela 2.3 (continuação) - Expressões mais recentes para as curvas de resistência à compressão.

Pesquisador(es)	Curva proposta
CHERNENKO & KENNEDY (1991)⁴	Proposições para correção da curva adotada pela norma canadense para os perfis I - FC: 1 ^a) manter a expressão do item 13.3.1 da norma $\rho = 1,035 - 0,202\bar{\lambda} - 0,222\bar{\lambda}^2$ para $0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,00$ e adotar o fator de correção $\phi = 1,07$; 2 ^a) multiplicar a expressão anterior por 1,19, obtendo $\rho = 1,232 - 0,240\bar{\lambda} - 0,264\bar{\lambda}^2$ e alterar o fator de correção para $\phi = 0,9$.
PIMENTA (1997)⁵	Expressão da curva proposta para os perfis I - FC: $\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \rightarrow \quad \beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} (1 + \eta + \bar{\lambda}^2)$ Onde: $\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$ \rightarrow $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ e $\alpha = 0,385$.

Comentários sobre a proposição de Pimenta (1997): A curva proposta foi determinada por meio de ajuste dos valores médios da resistência, obtidos numericamente, com a expressão de MAQUOI & RONDAL (1979). Cabe ainda salientar que o valor de $\alpha = 0,385$ encontra-se compreendido entre os valores recomendados para as atuais curvas **b** e **c** do Eurocode 3: 1992.

⁴ CHERNENKO, D.E.; KENNEDY, D.J.L. (1991). Analysis of the performance of welded wide flange columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.18, n.4, p.537-555;

⁵ PIMENTA, R.J. (1997). *Proposição de uma curva de flambagem para perfis I soldados formados*. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte (MG).

Tabela 2.4 - Principais formulações para as curvas de resistência à compressão.

Curvas	Expressões	
Curva do CRC	expressões	esbeltez
	$\rho = 1 - 0,25 \bar{\lambda}^2$ $\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$\bar{\lambda} \leq \sqrt{2}$ $\bar{\lambda} > \sqrt{2}$
Curva do AISC (ASD)**	expressões	esbeltez
	$\rho = (1 - 0,25 \bar{\lambda}^2) / FS^*$ $\rho = (12 / 23) \bar{\lambda}^{-2}$	$\bar{\lambda} \leq \sqrt{2}$ $\bar{\lambda} > \sqrt{2}$
	* $FS = 5 / 3 + 3 / 8 \left(\bar{\lambda} / \sqrt{2} \right) - 1 / 8 \left(\bar{\lambda} / \sqrt{2} \right)^3$	
Curvas do SSRC (determinísticas)	curva	esbeltez
	(1) $\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
	$\rho = 0,99 + 0,122 \bar{\lambda} - 0,36 \bar{\lambda}^2$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,20$
	$\rho = 0,051 + 0,801 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,20 \leq \bar{\lambda} \leq 1,80$
	$\rho = 0,008 + 0,94 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,80 \leq \bar{\lambda} \leq 2,80$
	$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$2,80 \leq \bar{\lambda}$
	(2) $\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
	$\rho = 1,035 - 0,202 \bar{\lambda} - 0,222 \bar{\lambda}^2$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,00$
	$\rho = -0,111 + 0,636 \bar{\lambda}^{-1} + 0,087 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,00 \leq \bar{\lambda} \leq 2,00$
	$\rho = 0,009 + 0,877 \bar{\lambda}^{-2}$	$2,00 \leq \bar{\lambda} \leq 3,60$
	$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$3,60 \leq \bar{\lambda}$
	(3) $\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
	$\rho = 1,093 - 0,622 \bar{\lambda}$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 0,80$
	$\rho = -0,128 + 0,707 \bar{\lambda}^{-1} - 0,102 \bar{\lambda}^{-2}$	$0,80 \leq \bar{\lambda} \leq 2,20$
	$\rho = 0,008 + 0,792 \bar{\lambda}^{-2}$	$2,20 \leq \bar{\lambda} \leq 5,00$
$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$5,00 \leq \bar{\lambda}$	

Nota: ** A norma AISC – ASD (baseada no método das tensões admissíveis) adotou a mesma curva do CRC, com a introdução de um fator de segurança.

Tabela 2.4 (continuação) - Principais formulações para as curvas de resistência à

Curvas	Expressões		
Curvas do SSRC (probabilísticas)	Curva	esbeltez	
	(1P)	$\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
		$\rho = 0,979 + 0,205 \bar{\lambda} - 0,423 \bar{\lambda}^2$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,20$
		$\rho = 0,030 + 0,842 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,20 \leq \bar{\lambda} \leq 1,80$
		$\rho = 0,018 + 0,881 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,80 \leq \bar{\lambda} \leq 2,60$
		$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$2,60 \leq \bar{\lambda}$
	(2P)	$\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
		$\rho = 1,030 - 0,158 \bar{\lambda} - 0,206 \bar{\lambda}^2$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,00$
		$\rho = -0,193 + 0,803 \bar{\lambda}^{-1} + 0,056 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,00 \leq \bar{\lambda} \leq 1,80$
		$\rho = 0,018 + 0,815 \bar{\lambda}^{-2}$	$1,80 \leq \bar{\lambda} \leq 3,20$
		$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$3,20 \leq \bar{\lambda}$
	(3P)	$\rho = 1,00$	$0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$
		$\rho = 1,091 - 0,608 \bar{\lambda}$	$0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 0,80$
		$\rho = 0,021 + 0,385 \bar{\lambda}^{-1} + 0,066 \bar{\lambda}^{-2}$	$0,80 \leq \bar{\lambda} \leq 2,00$
		$\rho = 0,005 + 0,900 \bar{\lambda}^{-2}$	$2,00 \leq \bar{\lambda} \leq 4,50$
	$\rho = \bar{\lambda}^{-2}$	$4,50 \leq \bar{\lambda}$	
Curvas da norma canadense – CSA (1984)	<ul style="list-style-type: none"> • curva 1 do SSRC; • curva 2 do SSRC. 		
Curvas do AISC/LRFD* (1986)	Expressões	esbeltez	
	$\rho = 0,658 \bar{\lambda}^2$	$\bar{\lambda} \leq 1,5$	
	$\rho = 0,877 \bar{\lambda}^{-2}$	$\bar{\lambda} > 1,5$	
Curvas do Eurocode 3 (1992)	Expressões de MAQUOI & RONDAL (1979), na Tabela 2.3.		
Curvas da NBR 8800 (1986)	Expressões de MAQUOI & RONDAL (1978), na Tabela 2.3.		

Nota: * A norma AISC – LRFD (baseada no método dos estados limites) foi publicada em 1986.

As informações contidas nas Tabelas 2.1 a 2.4 são referências da dos trabalhos de pesquisa desenvolvidos no sentido de se melhorar o conhecimento do comportamento dos perfis estruturais de aço. Indicam também a falta de ensaios de laboratório para a determinação da resistência à compressão dos perfis **I - FC** fabricados no Brasil.

Com isto, espera-se deixar evidenciado que o trabalho aqui apresentado contribui para preencher, parcialmente, uma lacuna muito ampla no que se refere à

I - FC.

2.3 – CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Apresenta-se nesta seção, uma análise comparativa das curvas de resistência à compressão adotadas pelas normas NBR 8800, Eurocode 3, canadense e americana.

A figura 2.1 apresenta as curvas de resistência à compressão “a” adotadas pelas normas NBR 8800: 1986, Eurocode 3: 1992 e canadense CAN: 1989 (Curva 1 do SSRC) e a curva única adotada pela norma americana AISC/LRFD: 1986.

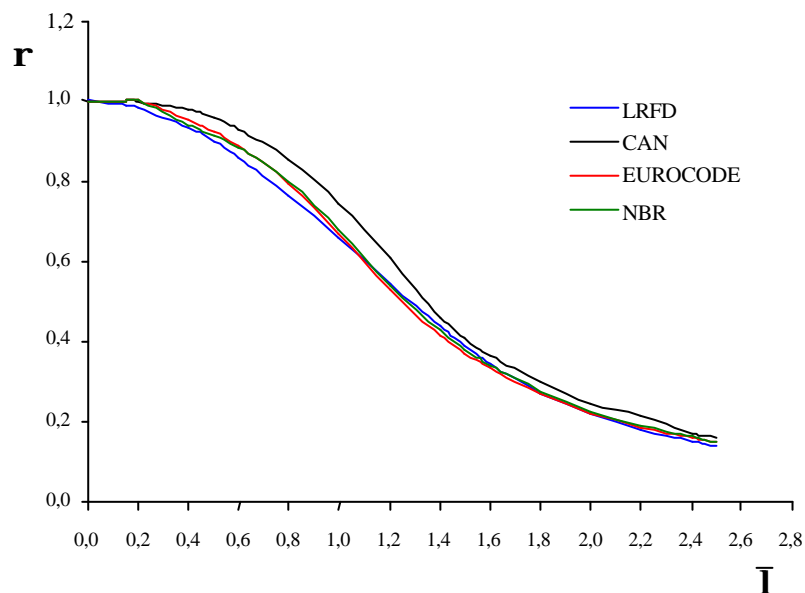


Figura 2.1 - Curva de resistência à compressão “a”.

A figura 2.2 apresenta as curvas de resistência à compressão “b” adotadas pelas normas NBR 8800: 1986, Eurocode 3: 1992 e canadense CAN: 1989 (Curva 2 do SSRC) e a curva única adotada pela norma americana AISC/LRFD: 1986.

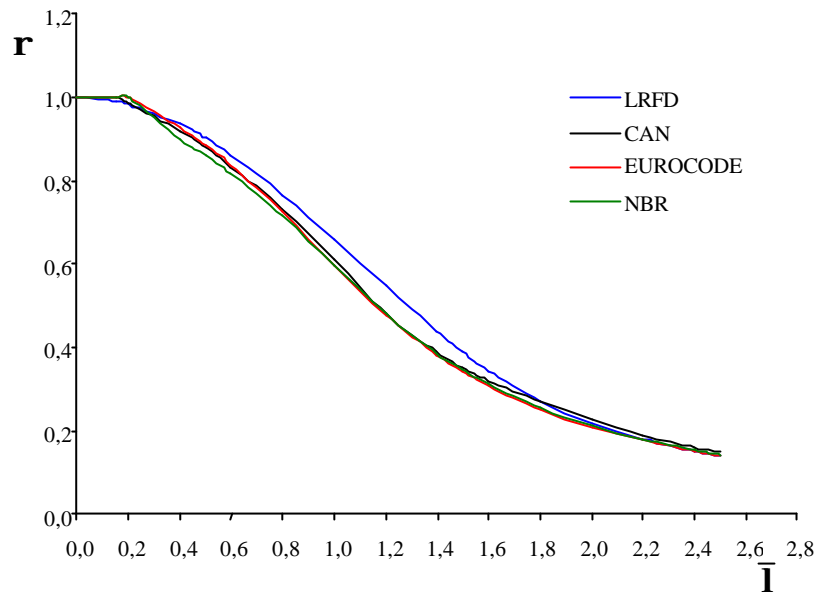


Figura 2.2 - Curva de resistência à compressão “b”.

A figura 2.3 apresenta as curvas de resistência à compressão “c” adotadas pelas normas NBR 8800: 1986, Eurocode 3: 1992 e canadense CAN: 1989, bem como a curva única adotada pela norma americana AISC/LRFD: 1986.

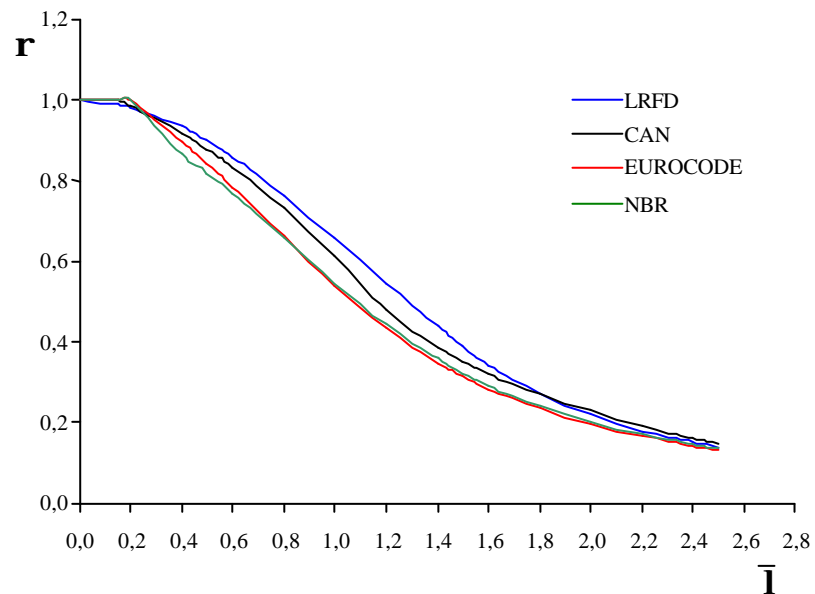


Figura 2.3 - Curva de resistência à compressão “c”.

A figura 2.4 apresenta as curvas de resistência à compressão “**d**” adotadas pelas normas NBR 8800: 1986, Eurocode 3: 1992 e canadense CAN: 1989, bem como a curva única adotada pela norma americana AISC/LRFD: 1986.

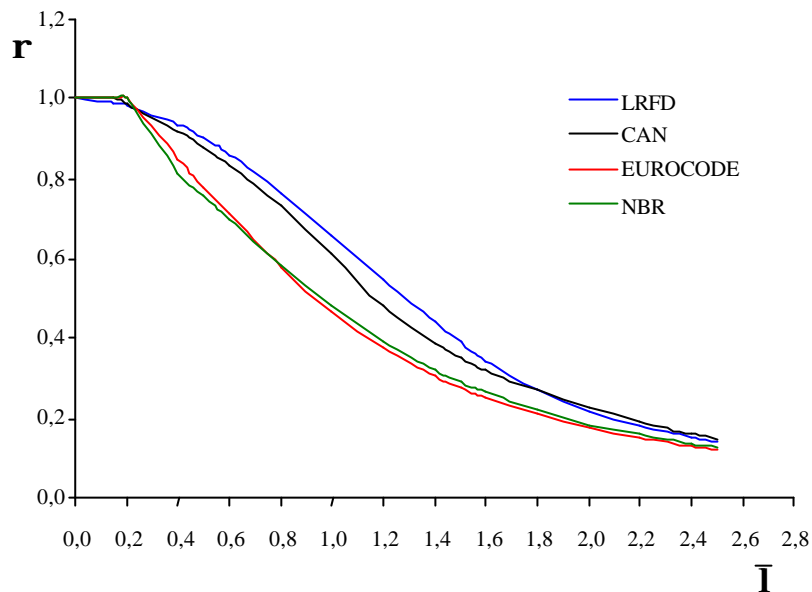


Figura 2.4 - Curva de resistência à compressão “**d**”.

Verifica-se a partir dos gráficos apresentados nas figuras 2.1 a 2.4, uma aproximação entre as curvas de resistência à compressão adotada pelas normas NBR 8800: 1986, Eurocode 3: 1992.

Para a seção transversal vazada, a curva de resistência à compressão “**a**” adotada pela norma NBR 8800: 1986 encontra-se acima da curva da norma americana e inferior à curva da norma canadense.

Para os perfis **I** ou **H** laminados, a curva de resistência à compressão “**b**” adotada pela norma NBR 8800: 1986 é praticamente coincidente com a curva da norma canadense.

Para os perfis **U**, **L**, **T** e perfis de seção cheia, a curva de resistência à compressão “**c**” adotada pela norma NBR 8800: 1986 é inferior às curvas adotadas pelas normas canadense e americana.

Para perfis **I** ou **H** laminados ou soldados, com relações especiais de dimensões, a curva de resistência à compressão “**d**” adotada pela norma NBR 8800: 1986 é inferior às curvas adotadas pelas normas canadense e americana.

A norma canadense adota apenas duas curvas de resistência à compressão, **a**” para os perfis tubulares e a curva “**b**” para os demais perfis, entretanto, para fins ilustrativos esta curva foi designada por “**b**”, “**c**” e “**d**” nos gráficos das figuras 2.2, 2.3 e 2.4.

Percebe-se a partir do exposto anteriormente, que a norma americana adota uma curva única de resistência à compressão, pois esta parte do pressuposto que os perfis mais utilizados nas construções metálicas enquadram-se na curva considerada.

Como no Brasil, os perfis soldados **I - FC** são bastante utilizados nas edificações correntes torna-se importante o ajuste de uma curva de resistência à compressão adequada a estes perfis.

2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A síntese bibliográfica apresentada permite não somente deixar registrados aspectos relevantes do comportamento dos perfis **I - FC** submetidos à compressão, mas também para evidenciar a importância da realização de ensaios de laboratório visando a determinação de parâmetros importantes na verificação da resistência dos perfis utilizados pela construção metálica no Brasil.

As recomendações contidas no texto da seção 2.2 deste trabalho se constituíram nos pontos básicos a partir dos quais se processou todo o estudo da resistência à compressão dos perfis estruturais de aço, com o intuito de serem propostas suas aplicações mais convenientes na construção metálica.

A curva de resistência à compressão adotada pelo Eurocode 3: 1992, expressão de MAQUOI & RONDAL (1979) será utilizada, posteriormente, para fins de comparações com os resultados experimentais da força normal crítica, obtidos para os modelos ensaiados.

3 - ASPECTOS GERAIS SOBRE A INSTABILIDADE DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS

3.1 - GENERALIDADES

Entende-se por estabilidade de uma estrutura, como sendo sua capacidade de suportar um determinado carregamento sem ocorrer nenhuma alteração significativa em sua configuração de equilíbrio. Ao fenômeno da passagem de uma forma de equilíbrio para outra é denominado por instabilidade.

Neste trabalho, o termo instabilidade será substituído por flambagem, pois esta é a nomenclatura adotada pelas atuais normas de cálculo de estruturas de aço.

Apresenta-se neste capítulo, o fenômeno de flambagem global de elementos comprimidos axialmente nos regimes de comportamento elástico e inelástico, levando em consideração os fenômenos de flambagem por flexão, por torção e por flexão-torção, no regime elástico. No regime inelástico será discutido apenas a flambagem por flexão.

3.2 - FLAMBAGEM NO REGIME ELÁSTICO

Determina-se a força normal crítica de flambagem para elementos comprimidos, no regime elástico, considerando a teoria de 2ª ordem e algumas hipóteses, tais como: elemento prismático e perfeitamente reto; material elástico (lei de Hooke); força aplicada lentamente e perfeitamente centrada; seções planas permanecem planas (lei de Navier); teoria dos pequenos deslocamentos; ausência de imperfeições iniciais e tensões residuais. Cabe ainda salientar que na teoria de 2ª ordem, considera-se o equilíbrio na posição deslocada do elemento, com as simplificações introduzidas pela teoria dos pequenos deslocamentos.

3.2.1 - Flambagem por flexão

Admite-se um elemento comprimido axialmente, em sua posição inicial e deslocada, para o estudo do fenômeno de flambagem por flexão.

3.2.1.1 - Elementos com as extremidades articuladas

A figura 3.1 mostra um elemento comprimido axialmente, com as extremidades articuladas, em sua posição deslocada. Considera-se neste trabalho, apenas o efeito da flexão no cálculo da força normal crítica de flambagem, pois a literatura mostra que para seções em alma cheia, o efeito da força cortante pode ser desprezado.

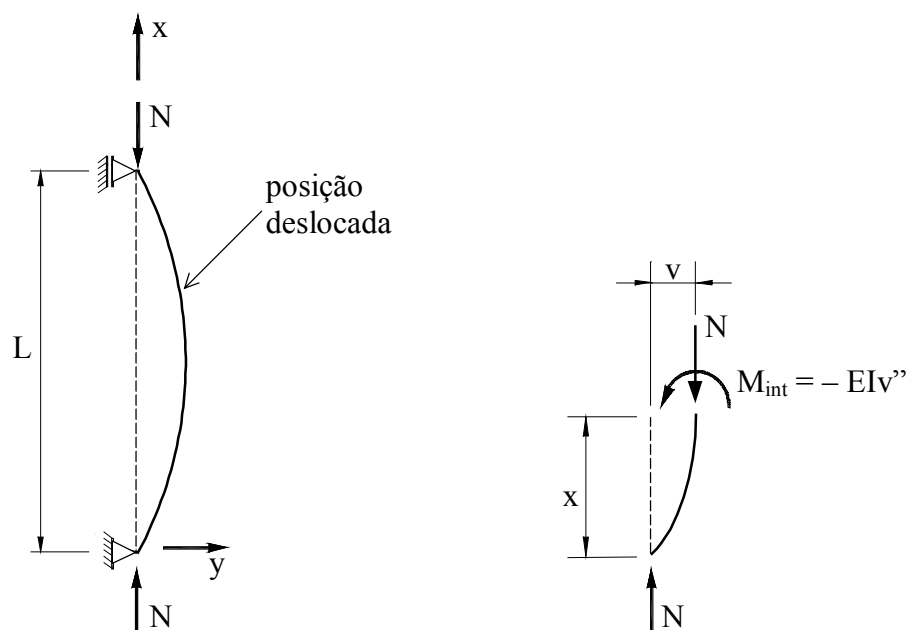


Figura 3.1 - Elemento comprimido em sua posição deslocada.

Admitindo-se o equilíbrio dos momentos na posição deslocada, figura 3.1.b, a expressão aproximada para a curvatura inicial e as simplificações convenientes, obtém-se a equação diferencial da elástica.

$$-M_{int} + Nv = 0 \quad (3.1)$$

Com a expressão aproximada da curvatura, teoria de 2ª ordem, tem-se:

$$\frac{1}{r} = v'' = -\frac{M_{int}}{EI} \quad (3.2)$$

Substituindo a expressão (3.2) em (3.1), tem-se:

$$EI v'' + N v = 0 \quad (3.3)$$

Admitindo na expressão (3.3) $k^2 = N / EI$ e rearranjando, obtém-se:

$$v'' + k^2 v = 0 \quad (3.4)$$

A expressão (3.4) é uma equação diferencial homogênea de 2ª ordem com coeficientes constantes, cuja solução geral é:

$$v(x) = A \operatorname{sen}(kx) + B \operatorname{cos}(kx) \quad (3.5)$$

As condições de contorno para este elemento, são: $v = 0$ para $x = 0$ e $x = L$, respectivamente. Substituindo as condições de contorno na expressão (3.5), obtém-se: $B = 0$ e a expressão (3.6).

$$v(L) = 0 = A \operatorname{sen}(kL) = 0 \quad (3.6)$$

Admite-se da expressão (3.6) as seguintes igualdades:

- $A = 0 \rightarrow$ solução trivial, o elemento permanece reto;
- $k = 0 \rightarrow$ não há força aplicada;
- $\operatorname{sen}(kL) = 0 \rightarrow$ solução não trivial.

A solução não trivial, $\operatorname{sen}(kL) = 0$, descreve o equilíbrio do elemento na posição deslocada. Percebe-se que: $kL = n\pi$, sendo n inteiro e igual a $n = 1, 2, \dots$

Admitindo $n = 1$, obtém-se a força normal crítica de Euler:

$$N_e = \pi^2 EI / L^2 \quad (3.7)$$

Substituindo o valor de $B = 0$ na expressão (3.5), obtém-se a equação da elástica.

$$v(x) = A \operatorname{sen}(kx) \quad (3.8)$$

A expressão (3.8) é indeterminada, confirmando que este é um problema de 1ª espécie. Denomina-se problema de 1ª espécie ou de auto-valor, flambagem, como sendo o instante de determinação da força normal crítica.

Quando o problema do equilíbrio é tratado em teoria de 3ª ordem, além do ponto de bifurcação, há possibilidade de se acompanhar o comportamento pós-crítico.

As teorias de 2ª e 3ª ordem estudam o equilíbrio do elemento em sua posição deslocada, com as fórmulas exatas para os deslocamentos. Neste caso, não será mais permitido a superposição dos efeitos e a expressão de Euler (3.7) constitui a base fundamental para o estudo de elementos comprimidos.

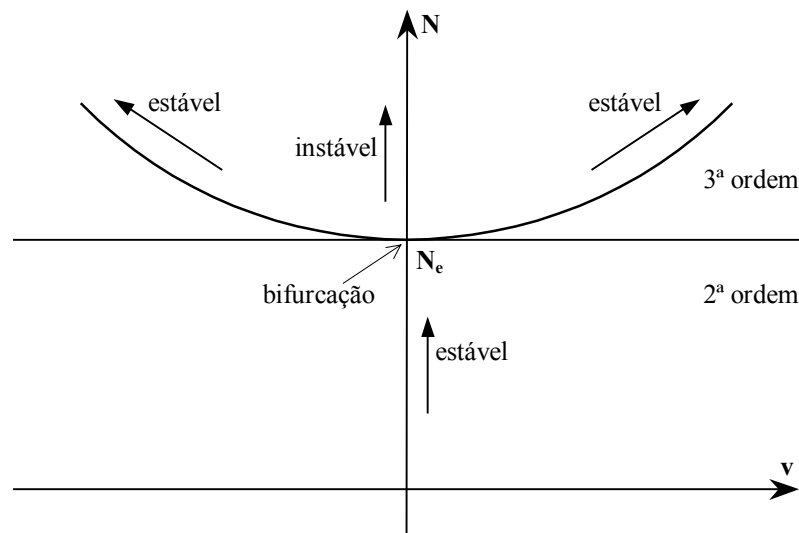


Figura 3.2 - Condição de Equilíbrio.

Dividindo ambos os termos da expressão (3.7) por A_g e rearranjando, obtém-se a tensão crítica de Euler f_e :

$$f_e = \frac{\pi^2 E I}{\lambda^2} \quad (3.9)$$

Analisando a expressão da tensão crítica de Euler, conclui-se que a flambagem é um problema de equilíbrio e não de resistência do material. Portanto, a flambagem ocorre quando o elemento está submetido a uma força de compressão superior à força crítica e há alguma perturbação no equilíbrio, a qual provocará algum tipo de deslocamento lateral no elemento.

3.2.1.2 - Elementos com outras condições de extremidades

Determina-se a força normal crítica de flambagem de elementos comprimidos com outras condições de extremidades, admitindo as mesmas hipóteses consideradas no item anterior, porém com outras condições de contorno.

Neste trabalho, será apresentado apenas um resumo das principais etapas referentes ao cálculo da força normal crítica de flambagem para elementos com várias condições de extremidades, conforme ilustra a Tabela 3.1.

3.2.1.3 - Comprimento efetivo de flambagem

Define-se comprimento efetivo de flambagem kL como sendo a distância entre dois pontos de curvatura nula, pontos de inflexão, na posição deslocada de um elemento. O coeficiente k denominado por fator comprimento efetivo de flambagem varia conforme as condições de extremidades dos elementos comprimidos, ou seja, este é um fator de correção que será aplicado sobre um padrão, elemento com as extremidades articuladas.

Pode-se então determinar o fator comprimento efetivo k por meio de uma comparação entre a condição padrão e os elementos com outras condições de extremidades, ou seja, pela expressão (3.10).

$$k = \sqrt{N_e / N_{cr}} \quad (3.10)$$

Utilizando a expressão (3.10) e os valores de N_e^* e N_{cr}^{**} da Tabela 3.1, obtém-se os valores teóricos de k para os elementos idealizados, conforme ilustra a Tabela 3.2.

Como os valores teóricos de k não correspondem aos valores experimentais, as normas de cálculo passaram a recomendar valores normalizados de k , conforme aos registrados na Tabela 3.2.

* N_e corresponde a força normal crítica de Euler para um elemento comprimido com as extremidades articuladas;

** N_{cr} corresponde a força normal crítica de Euler para elementos comprimidos com outras condições de extremidades.

Tabela 3.1 – Força normal crítica por flexão

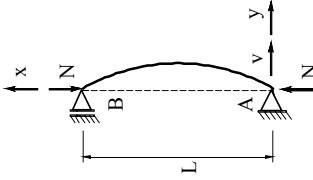
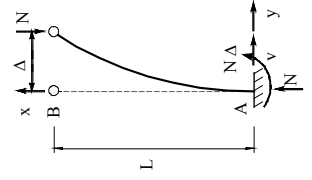
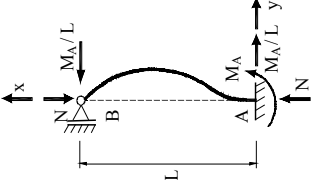
Elemento considerado	Equação diferencial de equilíbrio	Solução geral	Condições de contorno	Força crítica	Observações
	$v'' + k^2 v = 0$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx$	$v(0) = 0$ $v(L) = 0$	$N_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $v' = \text{giro}.$
	$v'' + k^2 v = k^2 \Delta$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \Delta$	$v(0) = 0$ $v(L) = \Delta$ $v'(0) = 0$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $\Delta = \text{desloc. lateral em B}.$
	$v'' + k^2 v - \frac{M_A}{EIL} x = 0$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \frac{M_A}{NL} x$	$v(0) = 0$ $v(L) = 0$ $v'(0) = 0$ $v'(L) = 0$	$N_{cr} = 2,05 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $M_A = \text{mom. em A}.$

Tabela 3.1 (continuação) – Força normal crítica por flexão

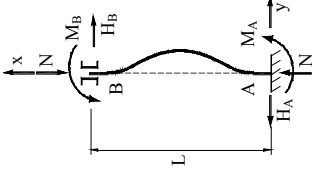
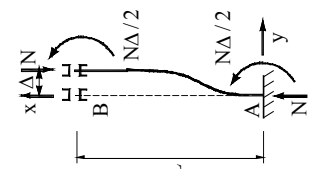
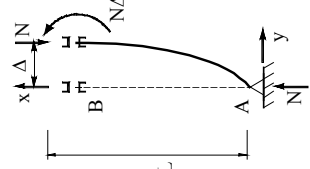
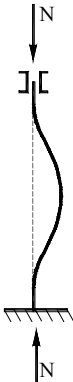

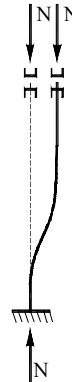

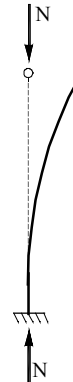


Elemento considerado	Equação diferencial de equilíbrio	Solução geral	Condições de contorno	Força crítica	Observações
	$v'' + k^2 v = -\frac{H_A}{EI} x + \frac{M_A}{EI}$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx - \frac{H_A}{N} x + \frac{M_A}{N}$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v(L) &= 0 \\ v'(0) &= 0 \\ v'(L) &= 0 \end{aligned}$	$N_{\text{cr}} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$\begin{aligned} v &= \text{desloc. lateral;} \\ M_A &= \text{mom. em A;} \\ M_B &= \text{mom. em B.} \end{aligned}$
	$v'' + k^2 v = \frac{N\Delta}{2EI}$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \frac{\Delta}{2}$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v(L) &= \Delta \\ v'(0) &= 0 \end{aligned}$	$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$\begin{aligned} v &= \text{desloc. lateral;} \\ \Delta &= \text{desloc. lateral em B.} \end{aligned}$
	$v'' + k^2 v = 0$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v'(L) &= 0 \end{aligned}$	$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$\begin{aligned} v &= \text{desloc. lateral;} \\ \Delta &= \text{desloc. lateral em B.} \end{aligned}$

Tabela 3.2 - Valores teóricos e normalizados de **k** para elementos ideais.

<p>A linha contínua representa a elástica de flambagem.</p>	<p>(1)</p> 	<p>(2)</p> 	<p>(3)</p> 	<p>(4)</p> 	<p>(5)</p> 	<p>(6)</p> 
<p>Valores teóricos de k.</p>	<p>0,50</p>	<p>0,70</p>	<p>1,00</p>	<p>1,00</p>	<p>2,00</p>	<p>2,00</p>
<p>Valores normalizados de k.</p>	<p>0,60</p>	<p>0,80</p>	<p>1,20</p>	<p>1,00</p>	<p>2,10</p>	<p>2,00</p>
<p>Vinculações.</p>		<p>Rotação e translação impedidas;</p> <p>Rotação livre e translação impedida;</p> <p>Rotação impedida e translação em x livre;</p> <p>Rotação impedida e translação em y livre;</p> <p>Rotação livre e translação em x impedida;</p> <p>Rotação e translação livres.</p>				

O fator k corresponde um número que multiplicado pelo comprimento L de um elemento em sua posição inicial, define o comprimento efetivo de flambagem kL , distância entre os pontos de inflexão de um elemento comprimido na posição deslocada.

Os valores teóricos de k podem ser obtidos por meio da expressão (3.10), enquanto que, os valores normalizados são determinados a partir da distância entre os pontos de inflexão da elástica de flambagem de elementos comprimidos experimentalmente.

-torção, no regime elástico. No regime inelástico será discutido apenas a

3.2 - FLAMBAGEM NO REGIME ELÁSTICO

Determina-se a força normal crítica de flambagem para elementos comprimidos, no regime elástico, considerando a teoria de 2ª ordem e algumas hipóteses, tais como: elemento prismático e perfeitamente reto; material elástico (lei de Hooke); força aplicada lentamente e perfeitamente centrada; seções planas permanecem planas (lei de Navier); teoria dos pequenos deslocamentos; ausência de imperfeições iniciais e tensões residuais. Cabe ainda salientar que na teoria de 2ª ordem, considera-se o equilíbrio na posição deslocada do elemento, com as simplificações introduzidas pela teoria dos pequenos deslocamentos.

3.2.1 - Flambagem por flexão

Admite-se um elemento comprimido axialmente, em sua posição inicial e deslocada, para o estudo do fenômeno de flambagem por flexão.

3.2.1.1 - Elementos com as extremidades articuladas

A figura 3.1 mostra um elemento comprimido axialmente, com as extremidades articuladas, em sua posição deslocada. Considera-se neste trabalho, apenas o efeito da flexão no cálculo da força normal crítica de flambagem, pois a literatura mostra que para seções em alma cheia, o efeito é desprezado.

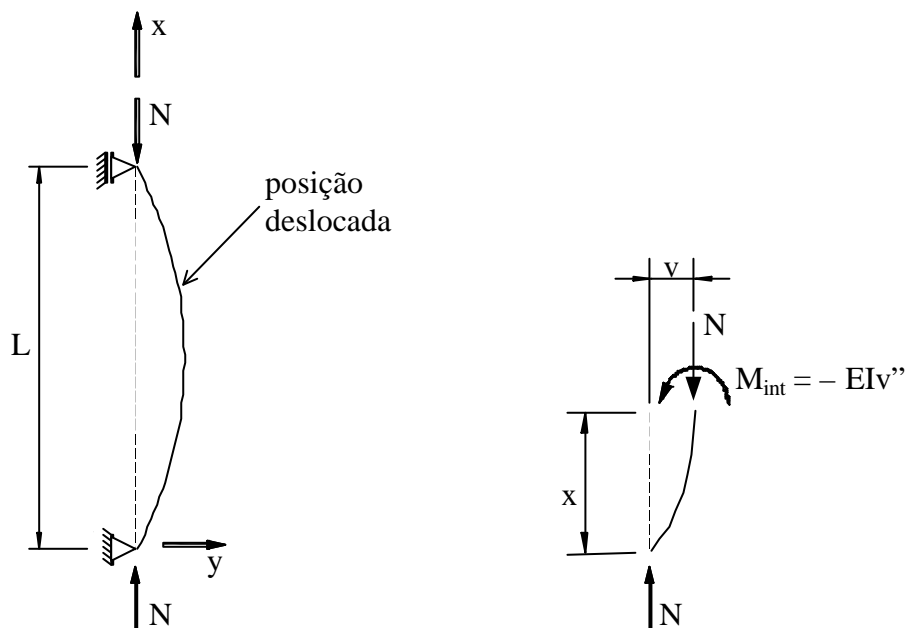


Figura 3.1 - Elemento comprimido em sua posição deslocada.

Admitindo-se o equilíbrio dos momentos na posição deslocada, figura 3.1.b, a expressão aproximada para a curvatura inicial e as simplificações convenientes, -se a equação diferencial da elástica.

$$-M_{int} + Nv = 0 \quad (3.1)$$

Com a expressão aproximada da curvatura, teoria de 2ª ordem, tem-se:

$$\frac{1}{r} = v'' = -\frac{M_{\text{int}}}{EI} \quad (3.2)$$

Substituindo a expressão (3.2) em (3.1), tem-se:

$$EI v'' + N v = 0 \quad (3.3)$$

Admitindo na expressão (3.3) $k^2 = N / EI$ e rearranjando, obtém-se:

$$v'' + k^2 v = 0 \quad (3.4)$$

A expressão (3.4) é uma equação diferencial homogênea de 2ª ordem com coeficientes constantes, cuja solução geral é:

$$v(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad (3.5)$$

As condições de contorno para este elemento, são: $v = 0$ para $x = 0$ e $x = L$, respectivamente. Substituindo as condições de contorno na expressão (3.5), obtém-se: $B = 0$ e a expressão (3.6).

$$v(L) = 0 = A \sin(kL) = 0 \quad (3.6)$$

Admite-se da expressão (3.6) as seguintes igualdades:

- $A = 0 \rightarrow$ solução trivial, o elemento permanece reto;
- $k = 0 \rightarrow$ não há força aplicada;
- $\sin(kL) = 0 \rightarrow$ solução não trivial.

A solução não trivial, $\sin(kL) = 0$, descreve o equilíbrio do elemento na posição deslocada. Percebe-se que: $kL = n\pi$, sendo n inteiro e igual a $n = 1, 2, \dots$

Admitindo $n = 1$, obtém-se a força normal crítica de Euler:

$$N_e = \pi^2 EI / L^2 \quad (3.7)$$

Substituindo o valor de $B = 0$ na expressão (3.5), obtém-se a equação da elástica.

$$v(x) = A \sin(kx) \quad (3.8)$$

A expressão (3.8) é indeterminada, confirmando que este é um problema de 1ª espécie. Denomina-se problema de 1ª espécie ou de auto-valor, flambagem, como sendo o instante de determinação da força normal

Quando o problema do equilíbrio é tratado em teoria de 3ª ordem, além do ponto de bifurcação, há possibilidade de se acompanhar o comportamento pós-crítico.

As teorias de 2ª e 3ª ordem estudam o equilíbrio do elemento em sua posição deslocada, com as fórmulas exatas para os deslocamentos. Neste caso, não será mais permitido a superposição dos efeitos e a expressão de Euler (3.7) constitui a base fundamental para o estudo de elementos comprimidos.

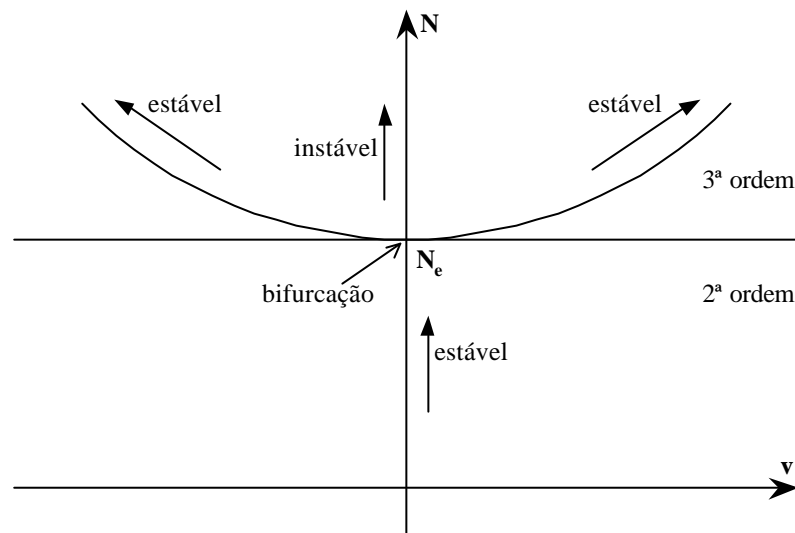


Figura 3.2 - Condição de Equilíbrio.

Dividindo ambos os termos da expressão (3.7) por A_g e rearranjando, obtém-se a tensão crítica de Euler f_e :

$$f_e = \frac{\pi^2 EI}{\lambda^2} \tag{3.9}$$

Analisando a expressão da tensão crítica de Euler, conclui-se que a flambagem é um problema de equilíbrio e não de resistência do material. Portanto, a flambagem ocorre quando o elemento está submetido a uma força de compressão orça crítica e há alguma perturbação no equilíbrio, a qual provocará algum tipo de deslocamento lateral no elemento.

3.2.1.2 - Elementos com outras condições de extremidades

Determina-se a força normal crítica de flambagem de elementos comprimidos com outras condições de extremidades, admitindo as mesmas hipóteses consideradas no item anterior, porém com outras condições de contorno.

Neste trabalho, será apresentado apenas um resumo das principais etapas referentes ao cálculo da força normal crítica de flambagem para elementos com várias condições de extremidades, conforme ilustra a Tabela 3.1.

3.2.1.3 - Comprimento efetivo de flambagem

Define-se comprimento efetivo de flambagem kL como sendo a distância entre dois pontos de curvatura nula, pontos de inflexão, na posição deslocada de um elemento. O coeficiente k denominado por fator comprimento efetivo de flambagem varia conforme as condições de extremidades dos elementos comprimidos, ou seja, este é um fator de correção que será aplicado sobre um par de extremidades articuladas.

Pode-se então determinar o fator comprimento efetivo k por meio de uma comparação entre a condição padrão e os elementos com outras condições de extremidades, ou seja, pela expressão (3.10).

$$k = \sqrt{N_e / N_{cr}} \quad (3.10)$$

Utilizando a expressão (3.10) e os valores de N_e^* e N_{cr}^{**} da Tabela 3.1, obtém-se os valores teóricos de k para os elementos idealizados, conforme ilustra a Tabela 3.2.

Como os valores teóricos de k não correspondem aos valores experimentais, as normas de cálculo passaram a recomendar valores normalizados de k , conforme aos registrados na Tabela 3.2.

* N_e corresponde a força normal crítica de Euler para um elemento comprimido com as extremidades articuladas;

** N_{cr} corresponde a força normal crítica de Euler para elementos comprimidos com outras condições de extremidades.

Tabela 3.1 – Força normal crítica por flexão

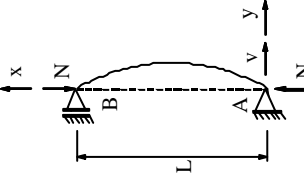
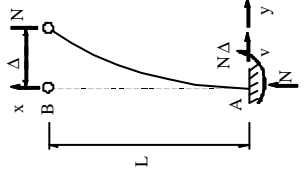
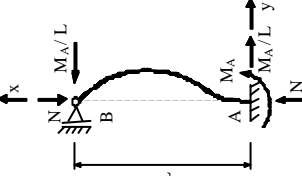
Elemento considerado	Equação diferencial de equilíbrio	Solução geral	Condições de contorno	Força crítica	Observações
	$v'' + k^2 v = 0$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx$	$v(0) = 0$ $v(L) = 0$	$N_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $v' = \text{giro}.$
	$v'' + k^2 v = k^2 \Delta$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \Delta$	$v(0) = 0$ $v(L) = \Delta$ $v'(0) = 0$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $\Delta = \text{desloc. lateral em B}.$
	$v'' + k^2 v - \frac{M_A}{EIL} x = 0$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \frac{M_A}{NL} x$	$v(0) = 0$ $v(L) = 0$ $v'(L) = 0$	$N_{cr} = 2,05 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$v = \text{desloc. lateral};$ $M_A = \text{mom. em A}.$

Tabela 3.1 (continuação) – Força normal crítica por flexão

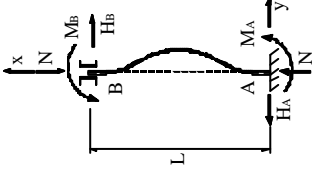
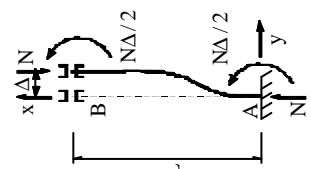
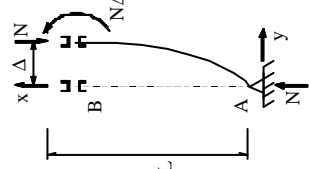







Elemento considerado	Equação diferencial de equilíbrio	Solução geral	Condições de contorno	Força crítica	Observações
	$v'' + k^2 v = -\frac{H_A}{EI} x + \frac{M_A}{EI}$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx - \frac{H_A}{N} x + \frac{M_A}{N}$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v(L) &= 0 \\ v'(0) &= 0 \\ v'(L) &= 0 \end{aligned}$	$N_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$v =$ desloc. lateral; $M_A =$ mom. em A; $M_B =$ mom. em B.
	$v'' + k^2 v = \frac{N\Delta}{2EI}$	$v = A \operatorname{sen} kx + B \cos kx + \frac{\Delta}{2}$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v(L) &= \Delta \\ v'(0) &= 0 \end{aligned}$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$v =$ desloc. lateral; $\Delta =$ desloc. lateral em B.
	$v'' + k^2 v = 0$	$v = A \operatorname{sem} kx + B \cos kx$	$\begin{aligned} v(0) &= 0 \\ v'(L) &= 0 \end{aligned}$	$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$v =$ desloc. lateral; $\Delta =$ desloc. lateral em B.

Tabela 3.2 - Valores teóricos e normalizados de **k** para elementos ideais.

<p>A linha contínua representa a elástica de flambagem.</p>						
<p>Valores teóricos de k.</p>	0,50	0,70	1,00	1,00	2,00	2,00
<p>Valores normalizados de k.</p>	0,60	0,80	1,20	1,00	2,10	2,00
		<p>Rotação e translação impedidas;</p> <p>Rotação livre e translação impedida;</p> <p>Rotação impedida e translação em x livre;</p> <p>Rotação impedida e translação em y livre;</p> <p>Rotação livre e translação em x impedida;</p> <p>Rotação e translação livres.</p>				

O fator k corresponde um número que multiplicado pelo comprimento L de um elemento em sua posição inicial, define o comprimento efetivo de flambagem kL , distância entre os pontos de inflexão de um elemento deslocada.

Os valores teóricos de k podem ser obtidos por meio da expressão (3.10), enquanto que, os valores normalizados são determinados a partir da distância entre os pontos de inflexão da elástica de flambagem de elementos comprimidos experimentalmente.

particular do problema de flambagem por flexo-torção.

3.2.2.2 - Flambagem por flexo - torção

A flambagem por flexão-torção de um elemento comprimido é caracterizada pela translação do centro de cisalhamento, definida pelos deslocamentos w e v nas direções x e y e por uma rotação ϕ da seção transversal em relação ao centro de cisalhamento, respectivamente.

A figura 3.3 mostra uma seção transversal assimétrica, a qual exemplifica as translações e rotações que caracterizam a flambagem por flexo-torção. Durante a translação da seção transversal o centro de cisalhamento D desloca-se para a posição D' e o centro de gravidade CG desloca-se para a posição CG' . Entretanto, após rotação, a posição final do centro de gravidade será CG'' .

$$E I_x v_D^{iv} - N v_D'' + (N x_0 - M_y) \phi'' = 0 \quad (3.11)$$

$$E I_y w_D^{iv} - N w_D'' - (N y_0 - M_x) \phi'' = 0 \quad (3.12)$$

$$E C_w \phi^{iv} - [N r_0^2 + 2M_y (k_x - x_0) + 2M_x (k_y y_0) + G I_t] \phi'' - (M_y - N x_0) v_D'' + (M_x - N y_0) w_D'' = 0 \quad (3.13)$$

Onde:

$$k_y = \frac{1}{2I_x} \int_{A_g} y (y^2 + x^2) dA_g ;$$

$$k_x = \frac{1}{2I_y} \int_{A_g} x (y^2 + x^2) dA_g ;$$

$$r_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} .$$

Considera-se para as expressões anteriores a seguinte convenção de sinais:

$$y > 0 - \text{tração nas regiões em que } x > 0 \text{ e } M_x > 0 -$$

tração nas regiões em que $y > 0$. Se y for o eixo de simetria, tem-se $k_x = 0$ e vice-versa.

No caso geral da estabilidade, um elemento composto por uma seção delgada poderá perder sua forma reta quando ocorrer: deslocamentos $v(z)$ no eixo y , deslocamentos $w(z)$ no eixo x e rotação $\phi(z)$ das seções em torno do centro de torção D . Ocorrendo: os deslocamentos $v(z)$ ou $w(z)$ a flambagem será por flexão; a rotação $\phi(z)$ a flambagem será por torção; os deslocamentos $v(z)$ ou $w(z)$ com a rotação $\phi(z)$ e os deslocamentos $v(z)$ e $w(z)$ com a rotação $\phi(z)$ a flambagem será por flexo-torção.

Admite-se um elemento axialmente comprimido, conforme a figura 3.5, para o cálculo da força normal crítica de flambagem (por flexão, por torção e por flexo-torção) em três 3 tipos de seções transversais: (a) seções duplamente simétricas, (b) seções monossimétricas e (c) seções assimétricas.

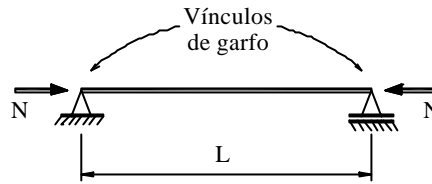


Figura 3.5 - Elemento comprimido com vínculos de garfo.

(a) - Seções duplamente simétricas, com a força N aplicada no CG

A figura 3.6 representa uma seção duplamente simétrica com a força normal N aplicada no CG. Para este caso, tem-se as seguintes igualdades: $N = -N$, $M_x = M_y = 0$, $k_x = k_y = 0$. Substituindo estas igualdades nas expressões (3.11) a (3.13), -se:

$$EI_x v_D^{iv} + N v_D'' = 0 \quad (3.14)$$

$$EI_y w_D^{iv} + N w_D'' = 0 \quad (3.15)$$

$$EC_w \phi^{iv} + (Nr_0^2 - GI_t) \phi'' = 0 \quad (3.16)$$

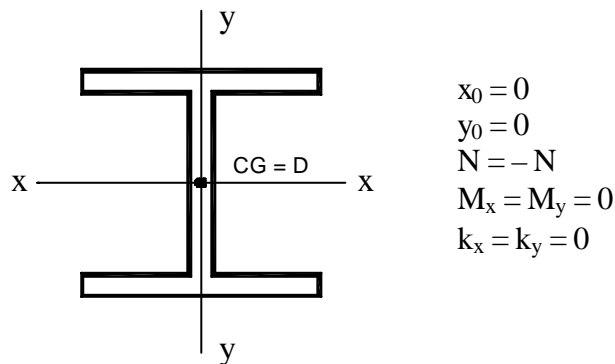


Figura 3.6 - Seção duplamente simétrica.

Verifica-se que as expressões (3.14) a (3.16) são desacopladas e neste caso a flambagem será por flexão em torno de um dos eixos principais de inércia ou por torção. Resolvendo separadamente as equações diferenciais (3.14) e (3.15), obtém-se as expressões para o cálculo da força normal crítica de flambagem por flexão em torno dos eixos principais x e y, respectivamente.

$$p^2 = \frac{N r_0^2 - G I_t}{E C_w}, \text{ obtém-se:}$$

$$\phi^{iv} + p^2 \phi'' = 0 \quad (3.20)$$

Resolvendo a equação diferencial (3.20), obtém-se a expressão para a força normal crítica de flambagem por torção em torno do eixo z:

$$N_\phi = N_{ez} = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + G I_t \right] \frac{1}{r_0^2} \quad (3.21)$$

Cabe salientar que a expressão (3.21) é conhecida como regra de Wagner e sua validade estende para qualquer perfil com dupla simetria.

A força normal crítica de flambagem será a menor entre as forças N_x , N_y e N_ϕ , expressões (3.17), (3.18) e (3.21).

(b) - Seções monossimétricas, com a força N aplicada no CG

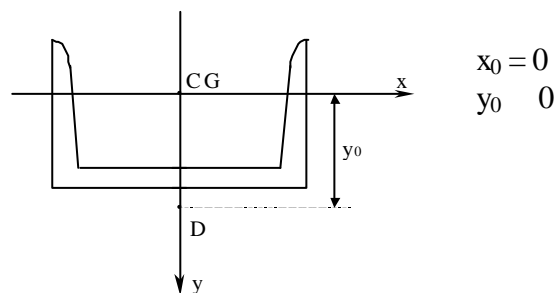


Figura 3.7 - Seção monossimétrica.

A figura 3.7 representa uma seção monossimétrica com a força normal N aplicada no CG. Considerando que y seja o eixo de simetria, as equações diferenciais de equilíbrio (3.11) a (3.13) resultam em:

$$E I_x v_D^{iv} + N v_D'' = 0 \quad (3.22)$$

$$E I_y w_D^{iv} + N w_D'' + (N y_0) \phi'' = 0 \quad (3.23)$$

$$E C_w \phi^{iv} + (N r_0^2 - G I_t) \phi'' + N y_0 w_D'' = 0 \quad (3.24)$$

A equação (3.22) é desacoplada das demais, indicando a ocorrência de flambagem por flexão em torno do eixo x . Por outro lado, as expressões (3.23) e (3.24) encontram-se acopladas, neste caso, a flambagem será por flexo-torção.

Da equação (3.22), tem-se a força normal crítica expressa como:

$$N_v = N_{ex} = \pi^2 E I_x / L_x^2 \quad (3.25)$$

Resolvendo o sistema de equações composto pelas expressões (3.23) e (3.24), -se uma equação quadrática em $N_{w\phi}$, cujas raízes são dadas por:

$$N_{w\phi} = N_{eyz} = \frac{r_0^2 (N_w + N_\phi) \pm r_0 \sqrt{r_0^2 (N_w + N_\phi)^2 - 4(r_0^2 - y_0^2) N_w N_\phi}}{2(r_0^2 - y_0^2)} \quad (3.26)$$

A força normal crítica é igual ao menor valor entre N_v e $N_{w\phi}$, expressões (3.25) e (3.26).

(c) - Seções assimétricas, com a força N aplicada no CG

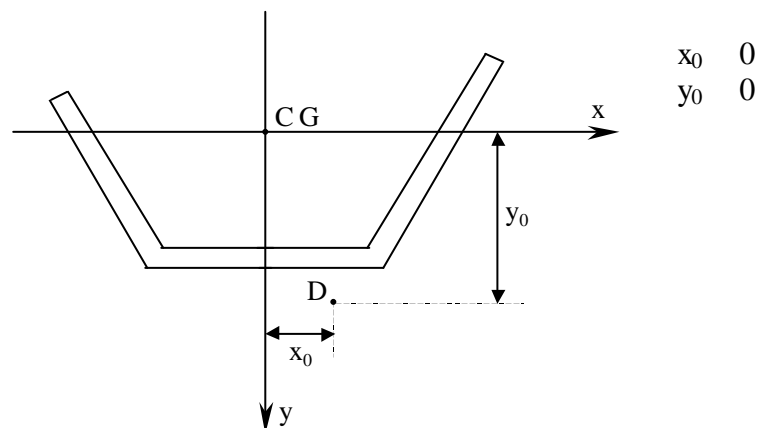


Figura 3.8 - Seção assimétrica.

A figura 3.8 representa uma seção assimétrica com a força normal N aplicada no CG. Neste caso, as equações diferenciais de equilíbrio, (3.11) a (3.13), resultam em:

$$EI_x v_D^{iv} + N v_D'' - (Nx_0) \phi'' = 0 \quad (3.27)$$

$$EI_y w_D^{iv} + N w_D'' + (Ny_0) \phi'' = 0 \quad (3.28)$$

$$EC_w \phi^{iv} + (Nr_0^2 - GI_t) \phi'' - (Nx_0) v_D'' + (Ny_0) w_D'' = 0 \quad (3.29)$$

Verifica-se que as equações diferenciais (3.27), (3.28) e (3.29) encontram-se acopladas, portanto, a flambagem dar-se à por torção e por flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente. Resolvendo este sistema de equações diferenciais, obtém-se uma equação cúbica em N:

$$r_0^2 [N - N_v] [N - N_w] [N - N_\phi] - N^2 y_0^2 [N - N_v] - N^2 x_0^2 [N - N_w] = 0 \quad (3.30)$$

As expressões para N_v , N_w e N_ϕ correspondem àquelas das equações (3.17), (3.18) e (3.21), respectivamente. A força normal crítica será a menor das três raízes

Dividindo-se por A_g as expressões da força normal crítica, apresentadas nesta -se as equações da tensão crítica de flambagem elástica adotadas pela norma NBR 8800: 1986, em seu anexo j, denominado flambagem por flexo-torção.

3.3 - FLAMBAGEM NO REGIME INELÁSTICO

Discute-se nesta seção, o fenômeno de flambagem de elementos comprimidos no regime inelástico, considerando as teorias do módulo tangente, do módulo reduzido e o modelo de Shanley.

Estas teorias explicam o comportamento do material, no instante em que algumas fibras da seção transversal atingem a tensão correspondente a plastificação, enquanto que, outras encontram no regime elástico.

As tensões residuais presentes nos perfis estruturais de aço provocam o comportamento inelástico do material e em consequência disto, ocorre uma perda da linearidade de parte do diagrama tensão-deformação, no trecho entre f_p e f_y , conforme ilustra a figura 3.9.

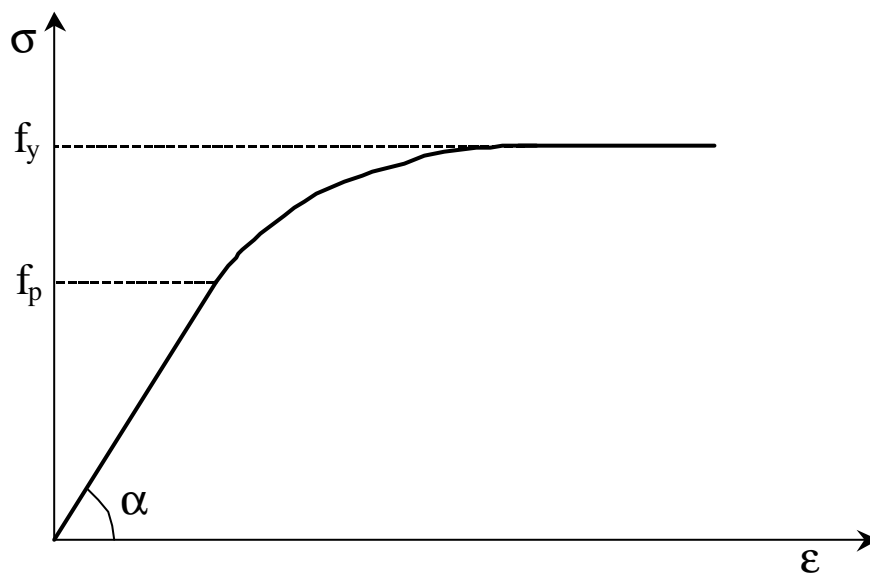


Figura 3.9 - Diagrama tensão-deformação do material.

3.3.1 - Teoria do módulo tangente

A teoria do módulo tangente descreve o comportamento dos elementos comprimidos no regime inelástico, ou seja, para tensões superiores à tensão de proporcionalidade do material.

A figura 3.10 esquematiza o comportamento tensão-deformação da seção transversal, mostrando que o módulo tangente E_T governará o comportamento durante a flambagem e corresponde à inclinação da curva em cada ponto específico, como: $E_T = df / d\varepsilon$.

Deve-se considerar cinco hipóteses fundamentais para a análise desta teoria, as quais são: elemento perfeitamente reto, elemento com as extremidades articuladas, força de compressão centrada, teoria dos pequenos deslocamentos e hipótese de NAVIER.

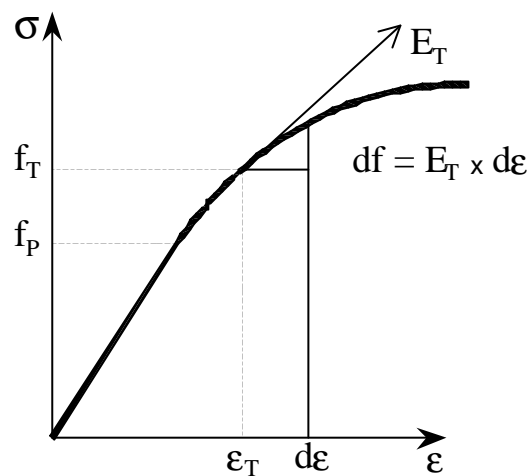


Figura 3.10 - Diagrama tensão-deformação → Teoria do módulo tangente.

A figura 3.11a, apresenta um elemento submetido à força do módulo tangente N_T em sua posição deslocada. Os aumentos combinados da força axial dN_T e do momento fletor dM durante a flexão provocam um aumento na deformação axial da seção no lado côncavo da curvatura. As distribuições das deformações e tensões encontram-se esquematizadas na figura 3.11b.

Admitindo-se o equilíbrio dos momentos na posição deslocada do elemento com o momento interno M_{int} igual a $\int_{A_g} f v_1 dA_g$ e fazendo as simplificações convenientes, obtém-se a equação diferencial da elástica para um elemento axialmente comprimido pela teoria do módulo tangente:

$$E_T I v'' + N_T v = 0 \tag{3.31}$$

A expressão (3.31) é uma equação diferencial de equilíbrio para um elemento axialmente comprimido, com as extremidades articuladas, no regime inelástico. Esta equação é semelhante à expressão (3.3) da flambagem elástica, cuja solução foi apresentada anteriormente. Portanto, a força normal crítica no regime inelástico adotando a teoria do módulo tangente poderá ser expressar, como:

$$N_T = \frac{\pi^2 E_T I}{L^2} = \frac{E_T}{E} N_e \quad (3.32)$$

Dividindo ambos os termos da expressão (3.32) por A_g e rearranjando, obtém-se a fórmula da tensão crítica do módulo tangente:

$$f_T = \frac{\pi^2 E_T}{\lambda^2} \quad (3.33)$$

A tensão crítica f_T não pode ser calculada diretamente, pois existe uma correlação entre o módulo tangente E_T e a tensão σ .

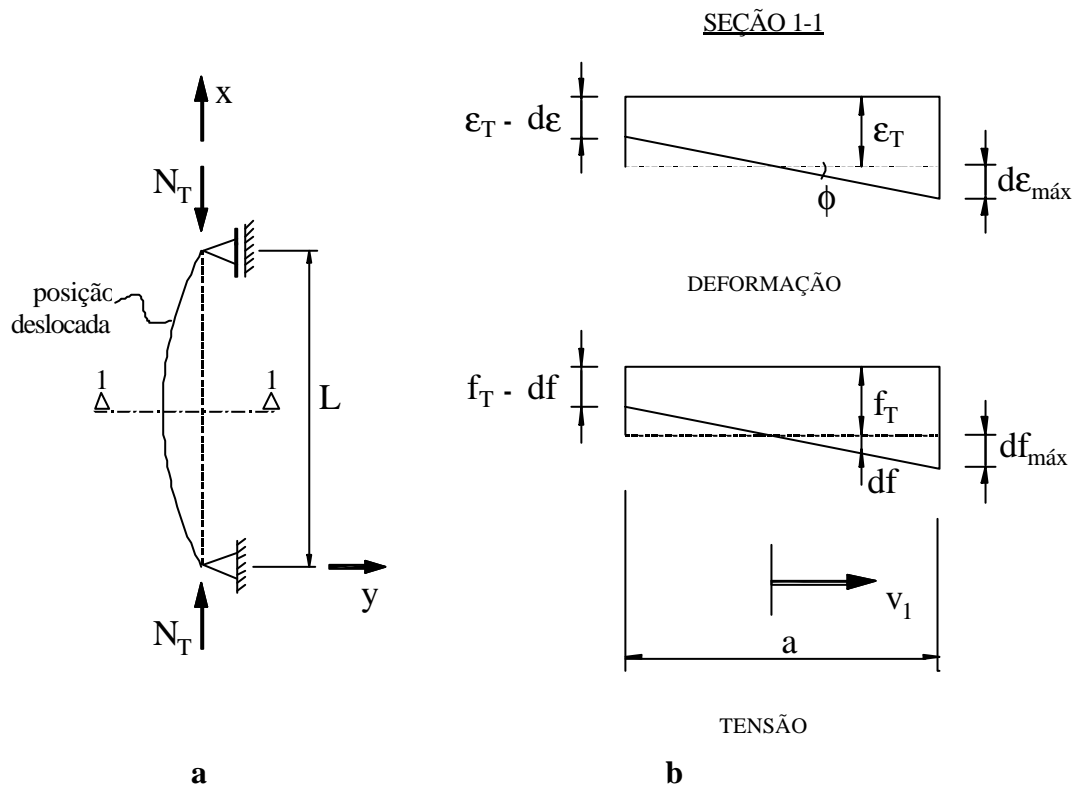


Figura 3.11 - Teoria do módulo tangente, adaptação de Chen (1987).

A figura 3.12 mostra a construção da curva de resistência à compressão, pela e. Tal construção ocorre da seguinte forma: determina-se experimentalmente a curva $\sigma - \varepsilon$ da figura 3.12a, obtendo-se o valor do módulo E_T para cada ponto tangente à curva; com o valor E_T pode-se determinar a curva $\sigma - E$ da figura 3.12b; posteriormente, obtém-se a curva $\sigma - \lambda$ pela teoria do módulo tangente, nos regimes elástico e inelástico, conforme a figura 3.12c.

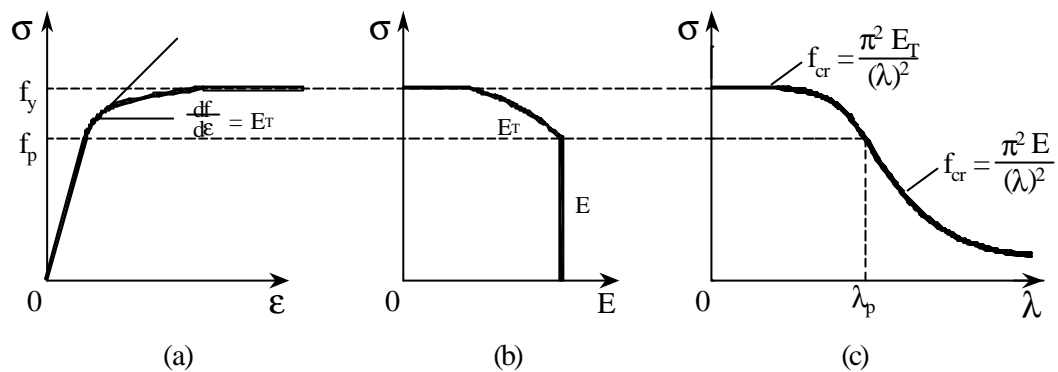


Figura 3.12 - Curva de resistência à compressão, pela teoria do módulo tangente, adaptada de Salmon & Johnson (1996).

3.3.2 - Teoria do módulo reduzido ou duplo módulo

Na teoria do módulo reduzido o carregamento e o descarregamento das fibras são governados pelo módulo tangente E_T e pelo módulo elástico E , respectivamente, conforme ilustra a figura 3.13.

E_T

Figura 3.13 - Carregamento e descarregamento do material.

A figura 3.14a, mostra um elemento em sua posição deslocada submetido a uma força de compressão do módulo reduzido, enquanto que, as figura 3.14b e 3.14c representam os diagramas de tensão e de deformação.

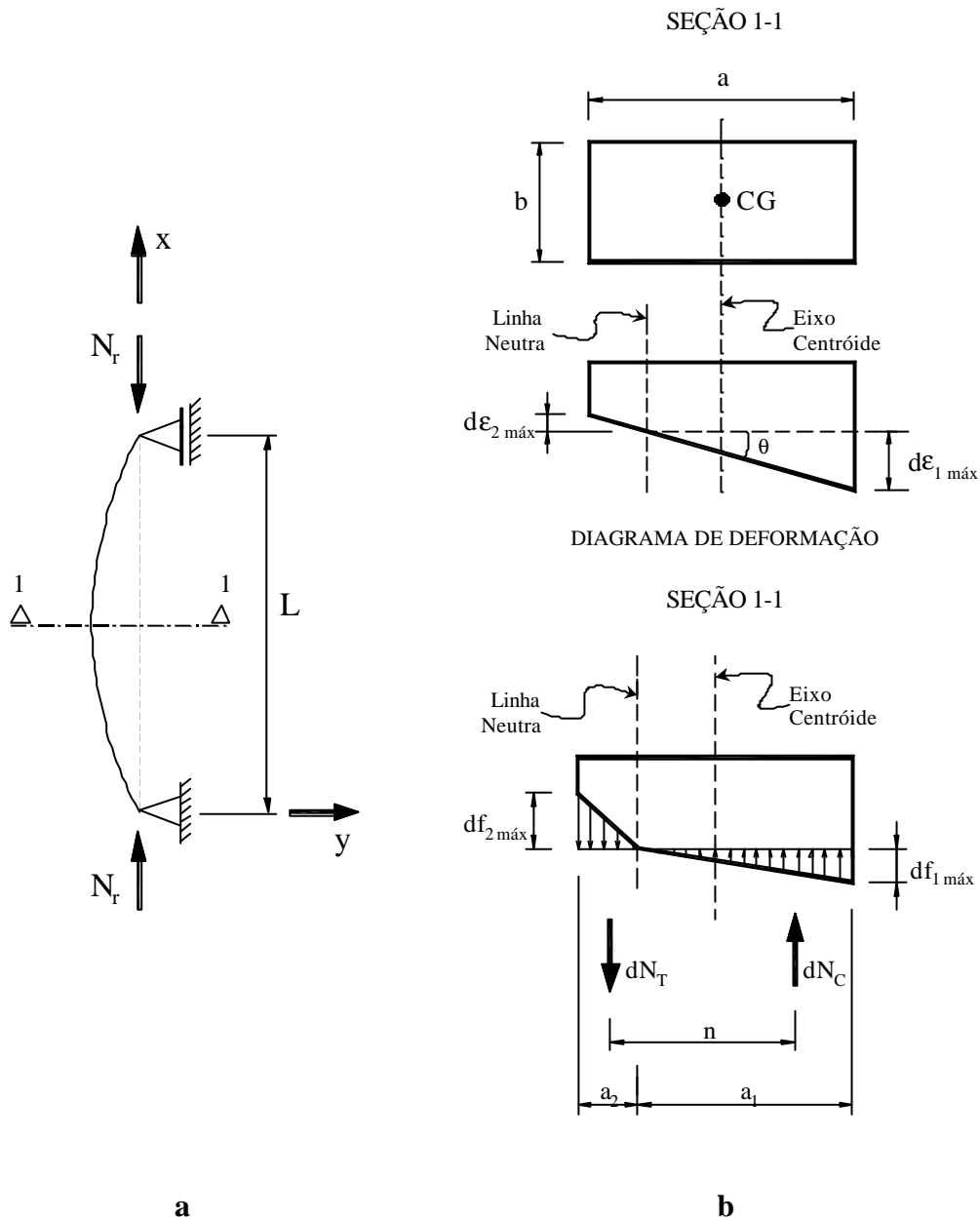


Figura 3.14 - Teoria do módulo reduzido, adaptação de Chen (1987).

Por equilíbrio dos momentos num segmento dx , do elemento comprimido na posição deslocada, obtém-se:

$$-M_{int} + N_r v = 0 \quad (3.34)$$

Considerando o equilíbrio dos esforços e a geometria da seção, obtém-se a expressão para o momento interno:

$$M_{\text{int}} = -E_r I v'' \quad (3.35)$$

Substituindo a expressão (3.35) em (3.34), obtém-se:

$$E_r I v'' + N_r v = 0 \quad (3.36)$$

A solução da expressão (3.36) é conhecida e pode ser expressa, como:

$$N_r = \pi^2 E_r I / L^2 = (E_r / E) N_e \quad (3.37)$$

A força N_r corresponde a força normal crítica de flambagem, de um elemento bi-articulado axialmente comprimido, no regime inelástico adotando a teoria do . Como $E_r > E_T$ a força N_r será sempre superior à força N_T .

O conceito teórico da estabilidade clássica indica que a teoria do módulo reduzido representa melhor o comportamento de flambagem no regime inelástico. Entretanto, os resultados de ensaios mostram que os elementos comprimidos apresentam forças normais críticas aproximadamente iguais àquelas obtidas pela

Shanley (1947)² solucionou este paradoxo, demonstrando teórica e experimentalmente que a força normal crítica de flambagem depende essencialmente de como o ensaio é realizado.

3.3.3 - Modelo de Shanley

As discrepâncias entre o conceito do módulo reduzido e os resultados de ensaios originam-se na curvatura inicial do elemento e na excentricidade de aplicação das forças, as quais não eram totalmente evitadas durante a execução dos ensaios.

² SHANLEY, F.R. (1947). Inelastic column theory. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v.14, n.5, p.261-268, May.

Para confirmar esta suposição, Shanley ensaiou pequenos elementos formados por ligas alumínio, onde pôde ser verificado que os deslocamentos laterais iniciaram-se com as forças próximas aos valores teóricos obtidos pela teoria do módulo tangente, porém em nenhum caso atingiu-se os valores teóricos baseados na teoria do módulo reduzido.

Shanley adotou um modelo matemático para explicar o comportamento pós-flambagem de um elemento no regime inelástico.

Este modelo é constituído por dois elementos infinitamente rígidos, ligados por uma rótula plástica, conforme ilustra a figura 3.15, sendo ϵ_1 e ϵ_2 as deformações ocorridas após o início da flexão.

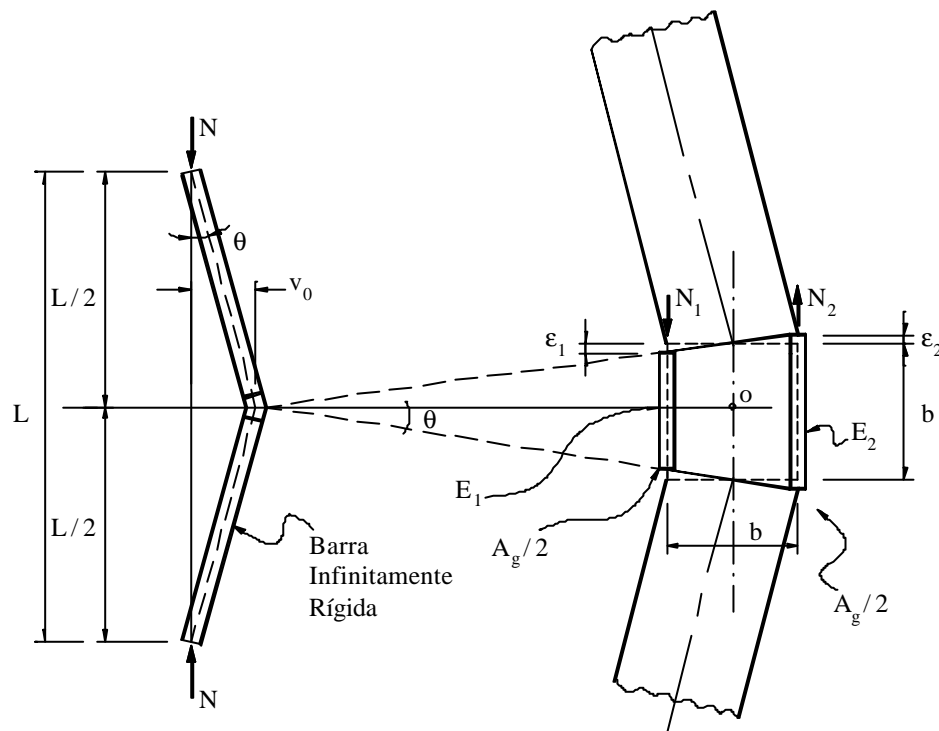


Figura 3.15 - Modelo de Shanley, adaptação de Shanley (1947).

Considerando este modelo, Shanley deduziu analiticamente uma expressão

$$N = N_T \left[1 + \frac{1}{(b/2v_0) + (1 + E_T/E) / (1 - E_T/E)} \right] \quad (3.38)$$

-flambagem do elemento, ou seja, quando a força normal N é maior que a força crítica do módulo tangente N_T .

Conclui-se do modelo de Shanley que: (a) a teoria do módulo tangente fornece a força máxima na qual um elemento inicialmente reto, permanecerá reto; (b) a força normal crítica geralmente é superior a do módulo tangente N_T , porém é inferior a do módulo reduzido N_r e (c) a força normal $N > N_T$ provoca deslocamentos laterais nos elementos.

A figura 3.16 representa o comportamento força normal x deslocamento de um elemento bi-articulado axialmente comprimido, nos regimes elástico e inelástico.

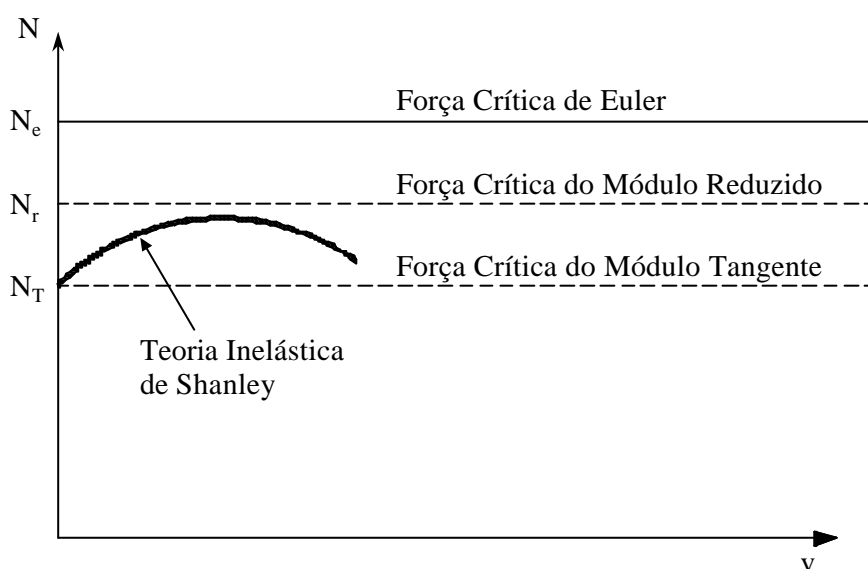


Figura 3.16 - Força-deslocamento, adaptada de Galambos (1988).

Ensaio realizados em elementos comprimidos no regime inelástico indicam que as resistências, normalmente, aproximam-se da força crítica do módulo tangente. As imperfeições iniciais e as excentricidades acidentais na aplicação da força, justificam estes resultados.

Estes efeitos combinados correspondem a uma solicitação tipo flexo-compressão, na qual a força normal varia nas proximidades do valor crítico, atingindo valores próximos aos obtidos pela teoria do módulo tangente.

3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se como aspectos importantes neste capítulo: os valores teóricos do fator comprimento efetivo de flambagem k ; as expressões da força normal crítica de flambagem por flexão e por flexo-torção no regime elástico e as expressões da força normal crítica de flambagem por flexão no regime inelástico, por

A teoria de equilíbrio foi adotada para determinar a força normal crítica de -torção, por meio das equações diferenciais, de um elemento axialmente comprimido no regime de comportamento elástico.

Utilizando-se a expressão (3.10) e os valores de N_{cr} da Tabela 3.1, obtém-se valores teóricos do fator comprimento efetivo de flambagem k apresentados na Tabela 3.2 para elementos comprimidos ideais.

Adota-se a teoria do módulo tangente para determinar a força normal crítica de flambagem, no regime inelástico, de elementos axialmente comprimidos livres de imperfeições iniciais, ou seja, quando a não linearidade ocorrer apenas devido às

A teoria do módulo reduzido é considerada para determinar a força normal crítica, no regime inelástico, de elementos com imperfeições iniciais e ou com excentricidades acidentais na aplicação da força de compressão.

A figura 3.16 mostra por meio da teoria inelástica de Shanley, que os elementos comprimidos livres de imperfeições iniciais apresentam a força normal crítica do módulo tangente, enquanto que, para os elementos com imperfeições iniciais ou com excentricidades acidentais, a força normal crítica é próxima da força normal crítica do módulo reduzido.

No capítulo 4 serão apresentadas as curvas de resistência à compressão, as quais passam a ser utilizadas para a determinação da resistência dos elementos comprimidos de aço, nos regimes de comportamento elástico e in

4 - FATORES QUE ALTERAM A RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE AÇO

4.1 - GENERALIDADES

Discute-se neste capítulo os fenômenos de tensões residuais e imperfeições iniciais, bem como suas causas e efeitos na resistência dos elementos comprimidos de aço.

Apresentam-se também as curvas de resistência à compressão, adotadas pelas normas: brasileira (NBR 8800: 1986), européia (Eurocode 3: 1992), americana (AISC – LRFD: 1986) e canadense (CAN3 – S16.1 – M89), bem como uma comparação entre estas curvas para as diversas famílias de perfis de aço estrutural.

4.2 - TENSÕES RESIDUAIS

Entende-se por tensões residuais como sendo aquelas presentes nos perfis estruturais e chapas de aço, as quais surgem e permanecem durante a transformação do duto acabado. Tais tensões originam-se de deformações resultantes dos efeitos térmicos: o resfriamento após a laminação, efeitos da soldagem, operações de corte a maçarico e efeitos mecânicos (laminação a frio, dobramento e).

Verifica-se, a partir da literatura técnica, que a tensão residual constitui a principal causa do comportamento inelástico do material e que o valor e a distribuição de tensões residuais dependem basicamente da geometria da seção transversal e dos processos envolvidos na fabricação dos perfis.

4.2.1 - Tensões residuais em perfis laminados

As tensões residuais existentes nos perfis laminados a quente são provenientes do processo de resfriamento não uniforme das peças após a laminação.

essencialmente de origem térmica, embora suas distribuições possam ser alteradas por meio de algum tipo de procedimento mecânico.

O valor e a distribuição de tensões residuais nos perfis laminados a quente dependem de vários fatores, tais como: seção transversal do elemento estrutural, temperatura de laminação, condições de resfriamento, procedimentos de desempenamento e das propriedades físicas do material.

Nos perfis laminados a quente, as mesas resfriam-se mais lentamente que a alma por apresentarem maior espessura. Entretanto, as partes mais expostas ao ar resfriam-se mais rapidamente, como as extremidades das mesas e a parte central da alma. Nas regiões de resfriamento mais lento as tensões residuais são de tração, enquanto que, nas regiões de resfriamento mais rápido são de compressão.

A figura 4.1 ilustra a distribuição de tensões residuais em vários perfis* laminados a quente, de diferentes tamanhos.

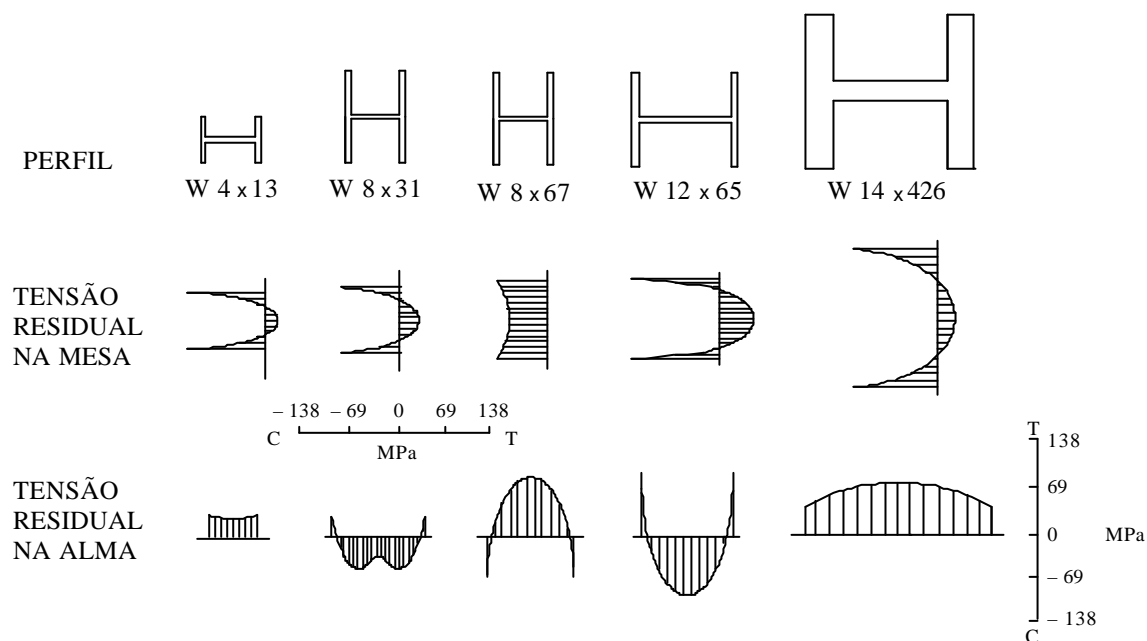


Figura 4.1 - Distribuição de tensão residual em perfis laminados, Galambos (1988).

* Os perfis apresentados na figura 4.1 referem aos perfis I americano de abas paralelas, conforme especifica o AISC (1989) – Manual of steel: allowable stress.

O valor das tensões residuais varia significativamente, ao longo da espessura nos perfis pesados (perfis “jumbo”, não laminados no Brasil), conforme ilustra a figura 4.2, com a distribuição de tensões residuais em curvas de isotensões, medidas (em MPa) no perfil laminado W 14 x 730*.

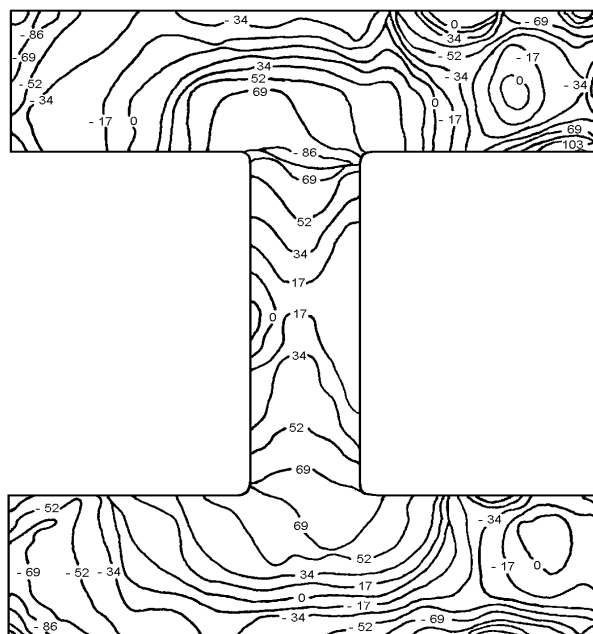


Figura 4.2 - Tensões residuais no perfil laminado W 14 x 730, Galambos (1988).

4.2.2 - Tensões residuais em perfis soldados

As tensões residuais existentes nos perfis soldados resultam basicamente, das operações de corte e dos processos de soldagem. Estas tensões apresentam uma influência significativa na resistência dos elementos comprimidos de aço compostos por perfis soldados.

O fenômeno da soldagem altera o valor das tensões residuais iniciais, provenientes tanto das operações de corte a maçarico, quanto do resfriamento das chapas. A figura 4.3 apresenta uma comparação qualitativa da distribuição de tensões residuais entre as chapas UM - “universal mill plates” e as chapas FC - “flame cut plates”, respectivamente.

*Perfil I americano de abas paralelas, conforme especifica o AISC (1989) – Manual of steel: allowable stress.

O corte a maçarico das chapas constituintes dos perfis **I - FC** introduzem tensões residuais de tração nas bordas. Além disto, a solda produz também tensões residuais de tração nas regiões próximas à soldagem das mesas com a alma. Estes aumentos de tensão de tração favorecem a resistência à compressão dos perfis, mencionados anteriormente.

O tipo de solda utilizada (entalhe ou filete) e o tipo de aço não são fatores significativos no processo de formação das tensões residuais, segundo ALPSTEN & TALL (1970). Entretanto, o efeito da soldagem na distribuição de tensões residuais está relacionado ao tamanho da seção transversal, por exemplo: nos perfis maiores o calor induzido por unidade de volume é menor e em consequência, os valores das tensões residuais serão reduzidos.

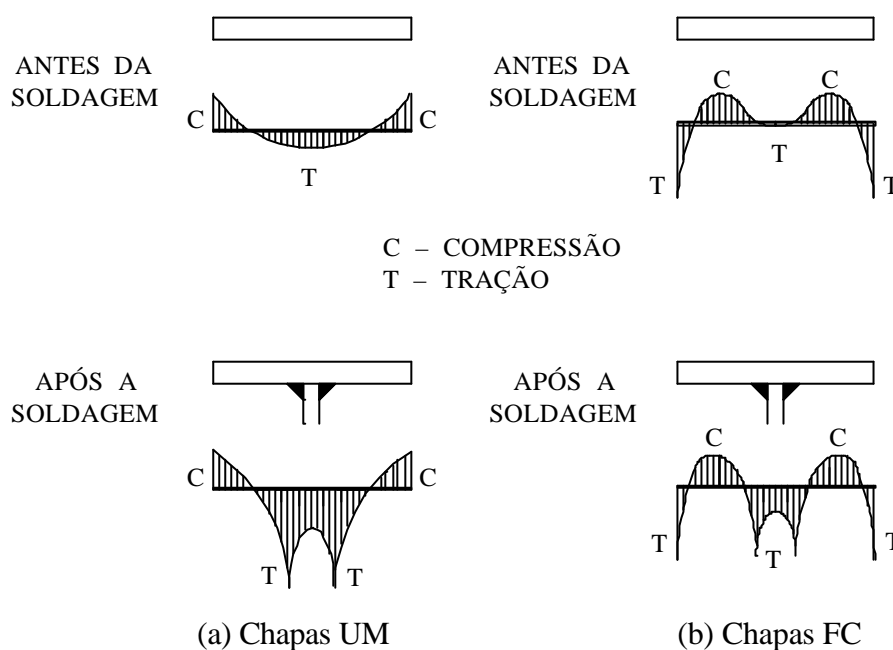


Figura 4.3 - Tensões residuais em chapas UM e FC, Galambos (1988).

A distribuição de tensões residuais em perfis e chapas pesadas não é uniforme ao longo da espessura. À medida que a espessura aumenta, a diferença das tensões residuais entre duas faces aumenta também, conforme ilustra a figura 4.4. Esta figura mostra uma distribuição de tensões residuais em MPa, medidas em curvas de 4×1015 - **I - FC**.

representados por um deslocamento inicial no meio do vão do elemento, correspondente a uma fração do comprimento, definida como $v_0 = L / \gamma$ (por exemplo: $\gamma = 500, 1000, 2000$).

4.4 - EFEITO DE TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES INICIAIS NA RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS COMPRIMIDOS

4.4.1 - Efeito de tensões residuais

O desenvolvimento desta seção baseou-se no modelo proposto, inicialmente, por HUBER & BEEDLE (1954) e adotado posteriormente por Salmon & Johnson (1996). Este modelo admite a distribuição linear triangular de tensões residuais para perfis I laminados de aço, de abas planas, conforme mostra a figura 4.5.

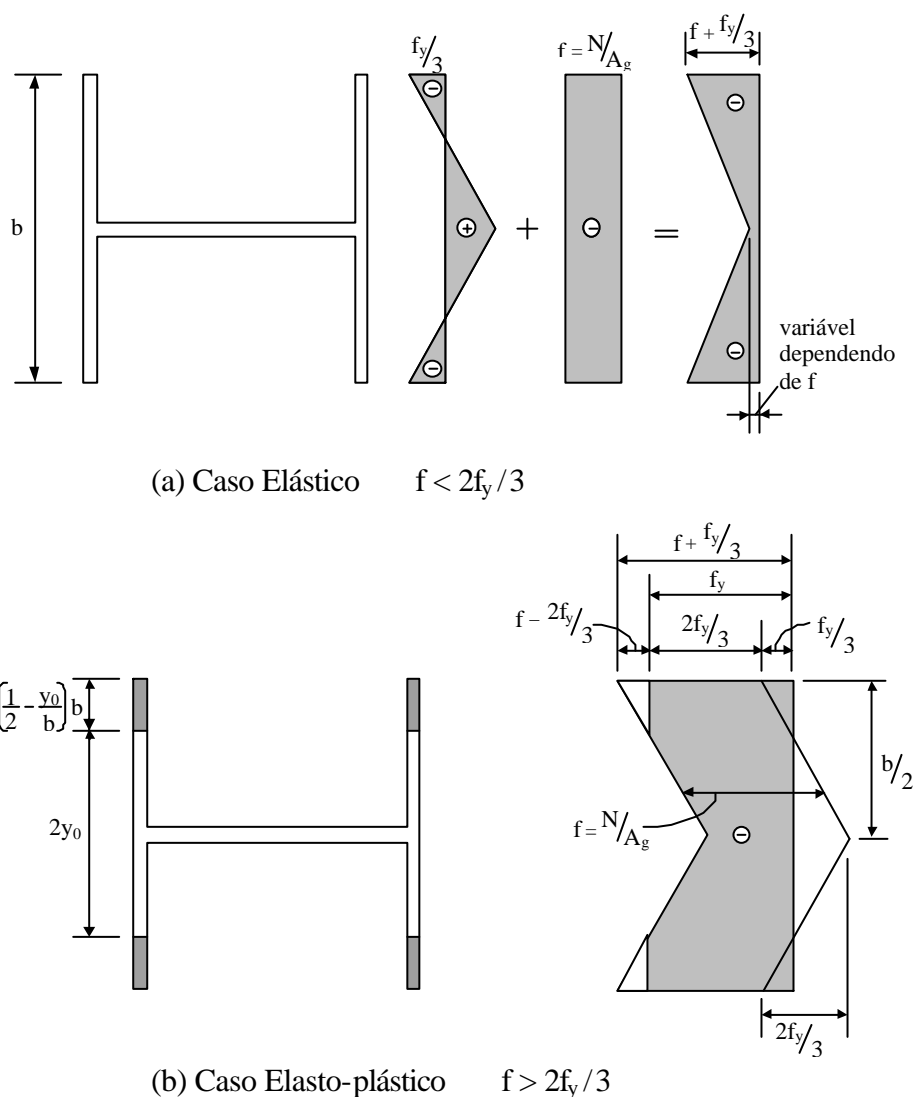


Figura 4.5 - Distribuição de tensões num perfil I de abas planas, Salmon & Johnson (1996).

A figura 4.6 mostra a influência das tensões residuais na resistência à compressão de um perfil de aço estrutural, bem como a tensão numa fibra situada a y do eixo neutro à flexão.

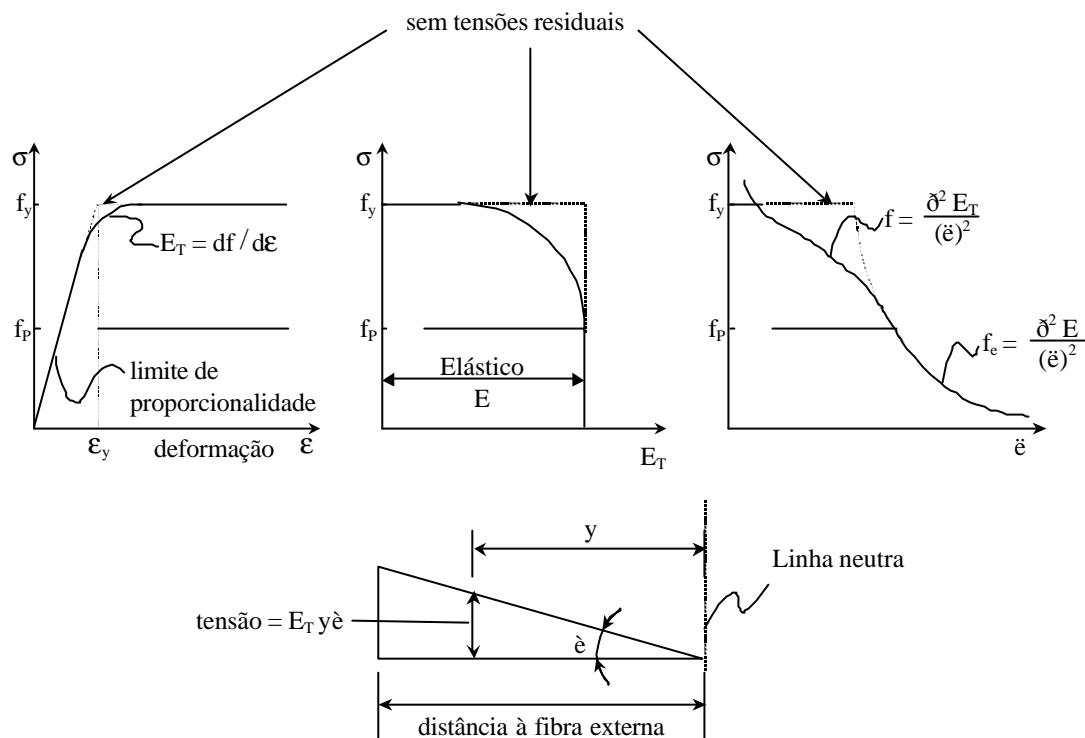


Figura 4.6 - Influência das tensões residuais na resistência à compressão de um perfil estrutural de aço, adaptado de Salmon & Johnson (1996).

A contribuição da fibra, situada à distância y do eixo neutro, ao momento fletor pode ser expressa, como:

$$dM = \theta E_T y (dA_g) y \quad (4.1)$$

Considerando toda a seção, a expressão (4.1) resulta em:

$$M = \int_{A_g} \theta E_T y^2 dA_g = \theta \int_{A_g} E_T y^2 dA_g \quad (4.2)$$

Da resistência dos materiais, tem-se:

$$\theta = \frac{M}{(EI)_{ef}} = \frac{M}{E'I} \quad (4.3)$$

Onde: $(EI)_{ef}$ = rigidez efetiva à flexão.

Substituindo a expressão (4.3) em (4.2) e rearranjando, tem-se:

$$E' = \frac{1}{I} \int_{A_g} E_T y^2 dA_g \quad (4.4)$$

Denomina-se E' por módulo efetivo e pode-se considerar este na expressão (3.32) como um valor equivalente para E_T .

Caso seja considerada a curva tensão-deformação elastoplástica idealizada, curva tracejada da figura 4.6, a resistência à flexão das partes escoadas torna-se nula. Para a parte que permanece elástica, a expressão (4.4) resulta em:

$$E' = \frac{E}{I} \int_{A_g} y^2 dA_g = E \frac{I_e}{I} \quad (4.5)$$

onde: $I_e = \int_{A_g} y^2 dA_g$ é o momento de inércia da parte da seção que permanece

Substituindo a expressão (4.5) em (3.33), tem-se:

$$f = \frac{\pi^2 E (I_e / I)}{\lambda^2} \quad (4.6)$$

Para a distribuição de tensões residuais, dada na figura 4.5, e a flexão em torno do eixo de menor inércia, desprezando-se a contribuição da alma, obtém-se a relação (I_e / I) apresenta na expressão (4.7):

$$\frac{I_e}{I} = \frac{2(2y_0)^3 t}{12} \left(\frac{12}{2b^3 t} \right) = \frac{8y_0^3}{b^3} \quad (4.7)$$

Substituindo a expressão (4.7) em (4.6), tem-se:

$$f = \frac{8\pi^2 E (y_0 / b)^3}{\lambda^2} \quad (4.8)$$

Pode-se representar a força resultante durante o estágio elastoplástico, correspondente à área hachurada do diagrama de tensões da figura 4.5b, pela expressão:

$$N = 2 \left[f b t - 2 \left(\frac{1}{2} \right) \left(f - \frac{2 f_y}{3} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{y_0}{b} \right) b t \right] \quad (4.9)$$

Por semelhança de triângulos, tem-se:

$$\frac{f - \frac{2 f_y}{3}}{\left(\frac{1}{2} - \frac{y_0}{b}\right)b} = \frac{\frac{2}{3} f_y}{\frac{b}{2}} \quad (4.10)$$

Isolando f na expressão (4.10), tem-se:

$$f = \left(1 - \frac{y_0}{b}\right) \left(\frac{4}{3} f_y\right) \quad (4.11)$$

Substituindo a expressão (4.11) em (4.9) e rearranjando, tem-se:

$$N = A_g f_y \left(1 - \frac{4}{3}\right) \left(\frac{y_0}{b}\right)^2 \quad (4.12)$$

Dividindo-se a expressão (4.12) pela área A_g , tem-se:

$$f = f_y \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{y_0}{b}\right)^2\right] \quad (4.13)$$

A partir das expressões (4.8) e (4.13), obtém-se os valores da tensão crítica f no regime de comportamento inelástico para o aço A36 com $f_y = 250$ MPa e $E = 205000$ MPa, conforme apresentados na Tabela 4.1. Salienta-se que a redução da tensão f no regime inelástico ocorre devido apenas à presença de tensões residuais.

Atribui-se valores de y_0 / b na expressão (4.13) e obtém-se a tensão f , posteriormente, substituindo-se f e y_0 / b na expressão (4.8), tem-se a esbelteza \bar{e} .

Tabela 4.1 - Valores da tensão crítica f para um perfil **I** de aço A36

y_0 / b	f	f (MPa)	\bar{e}
0,50	$0,67 f_y$	166,68	110,18
0,45	$0,73 f_y$	182,50	89,90
0,40	$0,79 f_y$	196,75	72,56
0,35	$0,84 f_y$	209,25	57,59
0,30	$0,88 f_y$	220,00	44,57
0,25	$0,92 f_y$	229,25	33,21
0,20	$0,95 f_y$	236,75	23,39
0,10	$0,99 f_y$	246,75	8,10

O trecho AB' da curva 2 apresentada no gráfico da Figura 4.7 foi obtido a partir dos valores ilustrado na Tabela 4.1, representando um material com tensões residuais. Os trechos AB e BB' da curva 1 representam o comportamento de um material sem tensões residuais. O trecho B'C representa o comportamento elástico do material.

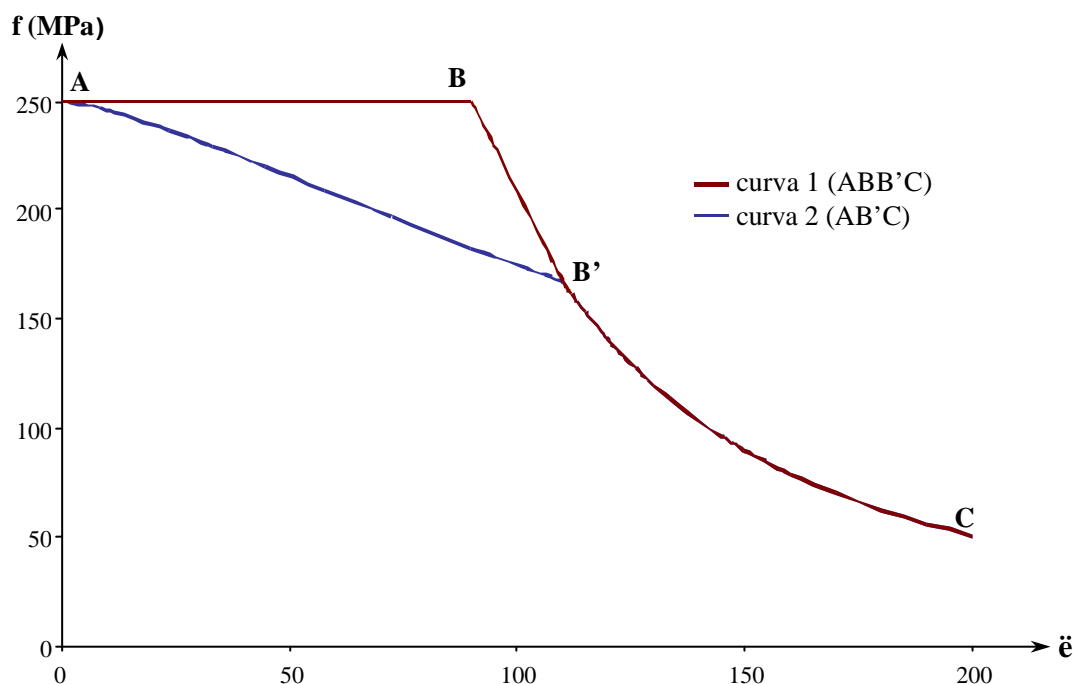


Figura 4.7 – Curvas de flambagem para um perfil com e sem tensões residuais.

Determina-se a tensão elástica, por meio da expressão 4.14, cuja dedução foi apresentada, anteriormente, no capítulo 3.

$$f = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (4.14)$$

Substituindo $\lambda = 110,18$ e $E = 205000$ MPa, respectivamente, na expressão -se $f = 166,67$ MPa. Portanto, para $\lambda = 110,18$ ocorre o limite entre os regimes elástico e inelástico, de um elemento comprimido formado pelo aço com $E = 205000$ MPa e o fator comprimento efetivo de flambagem $k = 1,0$.

4.4.2 - Efeito de imperfeições iniciais

A partir da existência de tais imperfeições não será mais possível considerar a hipótese de elementos estruturais perfeitamente retos, ou seja, o problema de bifurcação do equilíbrio transforma-se num problema do tipo força-deslocamento.

Admite-se o modelo de 2ª espécie apresentada na figura 4.8, no regime elástico, para verificar este fenômeno.

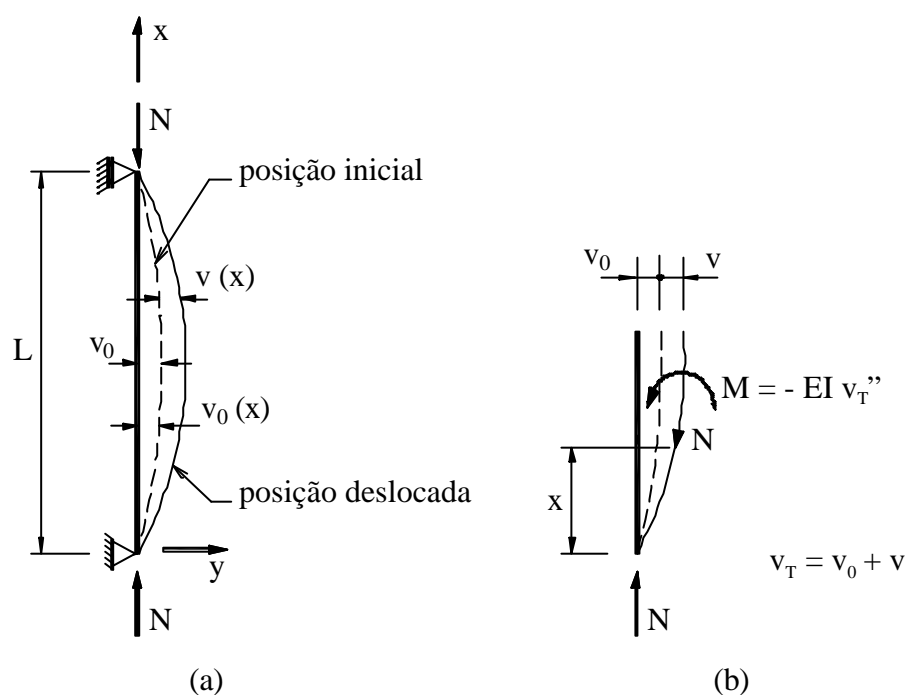


Figura 4.8 - Elemento com um deslocamento inicial.

Em 1807, **Young** propôs representar o deslocamento inicial como uma função senoidal, tal como:

$$v_0(x) = v_0 \operatorname{sen}(\pi x / L) \quad \text{e} \quad v(x) = v \operatorname{sen}(\pi x / L) \quad (4.15)$$

Admitindo o equilíbrio do elemento na posição deslocada, obtém-se o momento num ponto qualquer:

$$M = N v_T \quad (4.16)$$

EI v_T'' e substituindo

este valor na expressão (4.16), tem-se:

$$N v = -EI (v'' + v_0'') \quad (4.17)$$

Substituindo a derivada segunda da expressão (4.15) em (4.17), obtém-se:

$$EI v'' + N v = -v_0 \left(\frac{\pi^2}{L^2} \right) \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) EI \quad (4.18)$$

Admitindo $k^2 = N / EI$ e substituindo na expressão (4.18), tem-se:

$$v'' + k^2 v = -v_0 \left(\frac{\pi^2}{L^2} \right) \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (4.19)$$

A expressão (4.19) é uma equação diferencial regente do problema, cuja solução geral é:

$$v = A \text{sen} k x + B \text{cos} k x + \frac{v_0}{\left(1 - \frac{k^2 L^2}{\pi^2} \right)} \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (4.20)$$

As condições de contorno são: $v = 0$ para $x = 0$ e $x = L$, respectivamente.

Substituindo as condições de contorno na expressão (4.20) e rearranjando os termos, obtém-se:

$$v_T = \frac{v_0}{\left(1 - \frac{k^2 L^2}{\pi^2} \right)} \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (4.21)$$

Reescrevendo a expressão (4.21), obtém-se:

$$v_T = \frac{v_0}{\left(1 - N / N_e \right)} \text{sen} \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (4.22)$$

Considerando $x = L / 2$ na expressão (4.22), obtém-se a expressão do deslocamento lateral total (flecha ampliada) no meio do vão:

$$v_T = v_0 \left(\frac{1}{1 - N / N_e} \right) \quad (4.23)$$

Substituindo a expressão (4.23) em (4.16), obtém-se a expressão para o momento de segunda ordem:

$$M = Nv_0 \left[\frac{1}{1 - (N / N_e)} \right] \quad (4.24)$$

A expressão (4.23) da flecha ampliada (v_T) tornou-se importante para a determinação dos parâmetros que regem as curvas de resistência à compressão.

4.5 – ANÁLISE DO MODELO DE 2ª ESPÉCIE

Para análise de um modelo de 2ª espécie, pode-se admitir a verificação da resistência na seção mais solicitada de um elemento comprimido na sua configuração deformada.

Admitindo que a máxima tensão num elemento comprimido seja igual à tensão de escoamento do material f_y , tem-se a expressão da flexão composta, definida como:

$$\frac{N}{A_g} + \frac{M}{W} = f_y \quad (4.25)$$

Substituindo a expressão (4.24) em (4.25) e introduzindo A_g , obtém-se:

$$\frac{N}{A_g} + \frac{N}{W} \left(\frac{A_g}{A_g} \right) v_0 \left(\frac{1}{1 - N / N_e} \right) = f_y \quad (4.26)$$

Rearranjando a equação (4.26), tem-se:

$$\frac{N}{A_g} + \frac{N}{A_g} \eta \left(\frac{1}{1 - N / N_e} \right) = f_y \quad (4.27)$$

Onde:

$$\eta = \frac{A_g v_0}{W} \quad (4.28)$$

Reescrevendo a expressão (4.27), tem-se:

$$\eta \left(\frac{N}{A_g} \right) = \left(f_y - \frac{N}{A_g} \right) \left(1 - \frac{N}{N_e} \right) \quad (4.29)$$

Dividindo os dois termos da equação (4.29) por f_y e reescrevendo, tem-se:

$$\eta \bar{N} = (1 - \bar{N}) \left(1 - \frac{N}{N_e} \right) \quad (4.30)$$

Onde:

$$\frac{N}{A_g f_y} = \frac{N}{N_y} = \bar{N} = \rho \quad (4.31)$$

Rearranjando a expressão (4.30), obtém-se:

$$\eta \bar{N} = (1 - \bar{N}) \left(1 - \bar{N} \bar{\lambda}^2 \right) \quad (4.32)$$

Onde:

$$\frac{N}{N_e} = \rho \quad \frac{N_y}{N_e} = \rho \quad \frac{f_y}{f_e} \quad (4.33)$$

$$f_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (4.34)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}} \quad (4.35)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_p} \quad (4.36)$$

A expressão (4.32) é conhecida como fórmula adimensional de “**Ayrton-Perry**”. Rearranjando esta, obtém-se:

$$\left(\bar{\lambda}^2 \right) \rho^2 - \left(1 + \eta + \bar{\lambda}^2 \right) \rho + 1 = 0 \quad (4.37)$$

O valor de ρ possibilita o cálculo da força normal crítica, cuja solução é:

$$\rho = \frac{\left(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1 \right) \pm \sqrt{\left(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1 \right)^2 - 4 \bar{\lambda}^2}}{2 \bar{\lambda}^2} \quad (4.38)$$

Deve-se desprezar a maior raiz da equação (4.38), para obter-se a menor força normal crítica de compressão. O parâmetro η representa matematicamente a influência das imperfeições iniciais e os efeitos das tensões residuais.

Determina-se a partir do parâmetro η , um coeficiente γ que representa um número definido em função do tipo da seção transversal e dos eixos considerados.

Dividindo o segundo termo da expressão (4.28) por y/y , obtém-se:

$$\eta = \frac{A_g v_0}{(y/y) W} \quad (4.39)$$

Define-se y como a distância da fibra mais comprimida em relação ao eixo considerado, conforme o esquema da figura 4.9.

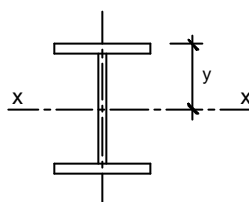


Figura 4.9 - Representação da distância y ao eixo x .

Considerando-se que $W \cdot y = I$, tem-se da expressão (4.40):

$$\eta = \frac{A_g v_0}{I/y} \quad (4.40)$$

Substituindo $r = \sqrt{I/A_g}$ na expressão (4.40), obtém-se:

$$\eta = \frac{v_0}{r^2/y} \quad (4.41)$$

O fator v_0 representa as imperfeições geométricas iniciais, o qual pode ser expresso em função de uma imperfeição padrão.

$$v_0 = \frac{L}{\gamma} \quad (4.42)$$

Onde γ é um número definido para cada tipo de seção e dos eixos considerados.

Substituindo a expressão (4.42) na equação (4.41), tem-se:

$$\eta = \frac{L}{\gamma(r^2/y)} \quad (4.43)$$

Admitindo por definição $\lambda = L/r$ e rearranjando a expressão (4.43), tem-se:

$$\eta = \frac{\lambda}{\gamma(r/y)} \quad (4.44)$$

Isolando γ na expressão (4.44), tem-se:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\eta(r/y)} \quad (4.45)$$

Substituindo (4.35) e (4.36) na expressão (4.45) e rearranjando, obtém-se:

$$\gamma = \frac{\bar{\lambda} (\pi \sqrt{E/f_y})}{\eta(r/y)} \quad (4.46)$$

Considerando o índice de esbeltez reduzido $\bar{\lambda}$ a partir do patamar de escoamento, $\rho = 1,0$ para $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$, a expressão (4.46) resulta em:

$$\gamma = \frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0 (\pi \sqrt{E/f_y})}{\eta(r/y)} \quad (4.47)$$

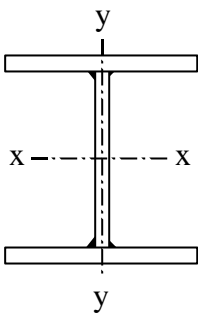
Substituindo η da expressão (4.47) por $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)^*$, tem-se:

$$\gamma = \frac{\pi \sqrt{E/f_y}}{\alpha(r/y)} \quad (4.48)$$

A Tabela 4.2 apresenta valores da relação r/y para os perfis **I – FC** ensaiados à compressão no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos.

* Parâmetro utilizado pela normalização europeia - Eurocode 3.

Tabela 4.2 - Valores da relação r/y para as séries CS e PS.

Perfil	Séries	Eixo	Valor de r/y
	CS 150 x 26	x – x	0,85
		y – y	0,50
	PS 200 x 26*	x – x	0,83
		y – y	0,46
	PS 225 x 30*	x – x	0,83
		y – y	0,46

* Esta série não consta nas Tabelas do anexo B da norma NBR 5884: 2000.

4.6 – CONSIDERAÇÕES DAS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS E TENSÕES RESIDUAIS NOS MODELOS PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O parâmetro α considerado na expressão (4.48) representa as contribuições das tensões residuais α_1 e da imperfeição geométrica α_2 , respectivamente, como:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.49)$$

Admitindo na expressão (4.48) $\alpha = \alpha_2$ e $\gamma = 1000$, tem-se que:

$$\alpha_2 = \frac{\pi \sqrt{E / f_y}}{1000 (r / y)} \quad (4.50)$$

A partir das expressões (4.48), (4.49) e (4.50) pode-se estabelecer um parâmetro α^* para determinar o fator de redução da força normal crítica ρ de um perfil de aço estrutural contendo tensões residuais e uma imperfeição geométrica inicial igual a L/γ , como:

$$\alpha^* = \alpha + \frac{\pi \sqrt{E / f_y}}{(r / y)} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{1000} \right) \quad (4.51)$$

Onde:

$\alpha \Rightarrow$ coeficiente que representa a contribuição das tensões residuais;

$\gamma \Rightarrow$ número correspondente ao denominador da fração que representa uma imperfeição geométrica inicial (por exemplo: 500, 1000, 2000).

MAQUOI & RONDAL (1979)¹ recomendam considerar o valor de α da expressão (4.51) em função da curva de resistência à compressão correspondente ao perfil considerado.

Por exemplo, utilizando o Eurocode para a determinação da resistência à **I – FC** em estudo, os valores de α para as curvas **b** e **c** são 0,339 e 0,489, respectivamente.

Adotando-se a curva **b** do Eurocode, obtém-se a partir da expressão (4.51) os valores de α^* , apresentados na Tabela 4.3. Admitiu-se o módulo de elasticidade $E = 20500 \text{ kN} / \text{cm}^2$ e $f_y = 30 \text{ kN} / \text{cm}^2$ como sendo os valores médios obtidos no ensaio à tração dos corpos-de-prova. Os valores de (r / y) para os perfis considerados encontram-se ilustrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para o cálculo da força normal crítica N_T

Perfil	L (cm)	Mod.	k	A_g (cm^2)	r_y (cm)	γ^*	α^*	η	ρ	N_T (kN)	N_E (kN)	N_E/N_T
CS150	290	3	0,85	33,72	3,75	1629	0,276	0,165	0,757	766	783	1,02
PS200	240	2	0,85	33,83	3,03	938	0,351	0,217	0,707	718	769	1,07
PS225	350	2	0,85	38,75	3,50	1563	0,275	0,229	0,605	704	751	1,07

Os valores de ρ foram determinados por meio da expressão (4.38) com $\eta = \alpha^* (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$. A força normal crítica teórica N_T pode ser determinada pela expressão (4.52), enquanto que a força normal crítica N_E foi obtida experimentalmente a partir de ensaios à compressão dos modelos.

$$N_T = \rho N_y = \rho A_g f_y \quad (4.52)$$

O valor do fator comprimento efetivo $k = 0,85$ foi considerado como sendo a média dos valores obtidos a partir elástica de cada modelo. A elástica foi determinada por meio dos deslocamentos laterais medidos pelos transdutores de deslocamento nos pontos considerados, durante a execução do ensaio à compressão dos modelos.

Ao comparar os valores das forças críticas N_T e N_E apresentados na Tabela 4.3, verifica-se que os resultados obtidos teoricamente são satisfatórios.

¹ MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1979). Formulations D'Ayrton-Perry pour flambement des barres métalliques. *Construction Métallique*, n.4, Paris.

4.7 – PARÂMETROS QUE CONDUZEM À DETERMINAÇÃO DA FORÇA NORMAL RESISTENTE

Apresenta-se nesta seção, uma comparação dos valores adotados para os diversos parâmetros utilizados para a determinação da força normal resistente pelas NBR 8800: 1986, americana AISC-LRFD: 1986, canadense CAN 3-S16.1-M89 e européia EUROCODE 3: 1992.

As normas brasileira, canadense e européia utilizam as curvas múltiplas de resistência à compressão para a determinação da força normal resistente, enquanto que a norma americana adota uma curva única.

A Tabela 4.4 apresenta as expressões equivalentes para as normas analisadas ρ , coeficiente correspondente à força normal reduzida, o qual é utilizado no cálculo da força normal resistente. Cabe salientar que cada norma adota um coeficiente de minoração da resistência.

A norma européia está baseada em prescrições teóricas utilizando resultados de ensaios para ajustar as curvas de resistência à compressão, cujas expressões foram desenvolvidas por MAQUOI & RONDAL (1979), ilustradas na Tabela 2.3 do capítulo 2.

A norma americana utilizou resultados de ensaios, a partir dos quais, com um tratamento estatístico, foi ajustada uma curva única de resistência à compressão.

A norma canadense está baseada em resultados de ensaios realizados na Europa e no Canadá para ajustar suas curvas de resistência à compressão.

A norma brasileira adotou as curvas de resistência à compressão desenvolvidas por MAQUOI & RONDAL (1978), ilustradas na Tabela 2.3 do capítulo 2.

Cada norma apresenta uma maneira diferente para dimensionar os elementos esbeltos comprimidos, seções classe 4, portanto, tais seções não foram utilizadas para efeito de comparação de resultados, ou seja, considerou-se neste item, apenas seções classe 1, 2 e 3. Para estas seções os coeficientes que levam em consideração a flambagem local de elementos não enrijecidos (Q_s) e enrijecidos (Q_a) são iguais a 1,0, procedimento adotado pelas normas analisadas. Pode-se então expressar o coeficiente Q como $Q = Q_s \times Q_a = 1,0$.

Tabela 4.4 - Expressões para o parâmetro ρ

	Coeficiente de Resistência ϕ_c	Expressões do Parâmetro ρ
NBR 8800: 1986	0,90	$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \Rightarrow \beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} (1 + \eta + \bar{\lambda}^2)$ $\eta = \alpha \sqrt{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0^2} \rightarrow \bar{\lambda}_0 = 0,2$ <p>Curvas: a $\alpha = 0,158$ b $\alpha = 0,281$ c $\alpha = 0,384$ d $\alpha = 0,572$</p>
AISC-LRFD: 1986	0,85	$\rho = 0,658 \bar{\lambda}^2 \quad \bar{\lambda} \leq 1,5$ $\rho = 0,877 \bar{\lambda}^{-2} \quad \bar{\lambda} > 1,5$
CAN3-S16.1-M89	0,90	<p>Para curvas b, c e d</p> $\rho = 1,00 \quad 0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$ $\rho = 1,035 - 0,202 \bar{\lambda} - 0,222 \bar{\lambda}^2 \quad 0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,00$ $\rho = -0,111 + 0,636 \bar{\lambda}^{-1} + 0,087 \bar{\lambda}^{-2} \quad 1,00 \leq \bar{\lambda} \leq 2,00$ $\rho = 0,009 + 0,877 \bar{\lambda}^{-2} \quad 2,00 \leq \bar{\lambda} \leq 3,60$ <p>Para perfis tubulares – curva a</p> $\rho = 1,00 \quad 0,00 \leq \bar{\lambda} \leq 0,15$ $\rho = 0,99 + 0,122 \bar{\lambda} - 0,36 \bar{\lambda}^2 \quad 0,15 \leq \bar{\lambda} \leq 1,20$ $\rho = 0,051 + 0,801 \bar{\lambda}^{-2} \quad 1,20 \leq \bar{\lambda} \leq 1,80$ $\rho = 0,008 + 0,94 \bar{\lambda}^{-2} \quad 1,80 \leq \bar{\lambda} \leq 2,80$
EUROCODE 3: 1992	0,95	$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \Rightarrow \beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} (1 + \eta + \bar{\lambda}^2)$ <p>Onde: $\eta = \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \rightarrow \bar{\lambda}_0 = 0,2$</p> <p>Curvas: a₀ $\alpha = 0,13$ a $\alpha = 0,21$ b $\alpha = 0,34$ c $\alpha = 0,49$ d $\alpha = 0,76$</p>

$\bar{\lambda}$.

A literatura técnica indica que foram considerados poucos ensaios nos perfis **I** soldados para traçar as curvas de resistência à compressão, ilustradas na Tabela 4.4.

O cálculo da força normal resistente pela norma brasileira conduz a valores com as normas de outros países, desde que os perfis utilizados nas edificações correntes apresentem propriedades geométricas semelhantes aos perfis ensaiados para obter as curvas de resistência à compressão, ou seja, perfis no padrão europeu.

Os perfis **I** soldados utilizados no Brasil apresentam propriedades geométricas diferentes das encontradas nos perfis fabricados em outros países, portanto, deve-se adequar os parâmetros utilizados na determinação da resistência à compressão destes perfis, a partir de resultados de ensaios.

No capítulo 5 deste trabalho será apresentada uma análise experimental de **I** soldados, fabricados pela indústria brasileira, com a finalidade de obter parâmetros que serão utilizados para adequar uma curva de resistência a estes perfis.

5 – ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1 - GENERALIDADES

Apresenta-se neste capítulo, a metodologia empregada na execução dos ensaios de laboratório. Os ensaios foram executados com as seguintes finalidades: caracterização do aço, medição das imperfeições e determinação da força normal crítica dos modelos ensaiados à compressão.

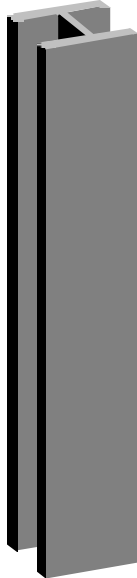
A execução dos ensaios foi realizada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Os perfis utilizados nesta análise são os denominados perfis **I - FC**, formados por chapas de aço A36, pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

5.2 - MODELOS ENSAIADOS

Os modelos ensaiados à compressão pertencem às séries CS e PS, conforme ilustra a Tabela 5.1. Esta tabela apresenta também o número de modelos para cada série de perfis ensaiados, com os respectivos valores do comprimento L.

Tabela 5.1 - Distância dos transdutores às extremidades dos modelos.

Perfil	Série	Comprimento (mm)	Nº de Modelos
	CS150x25	1800	3
		2200	3
		2900	3
		3600	3
	PS200x25	1500	3
		2000	3
		2400	3
		3000	3
	PS225x29	1600	3
		2000	3
		2500	3
		3500	3

5.3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os principais equipamentos utilizados nesta pesquisa são relacionados para cada tipo de ensaio, da seguinte forma:

- **Ensaio de caracterização do aço:** máquina de ensaio servo-hidráulica INSTRON, um extensômetro específico para este ensaio e o sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000;
- **Ensaio para medir as imperfeições geométricas iniciais:** Um transdutor de deslocamento da marca Kyowa com curso de 50 mm e um indicador digital para extensometria da marca Measurements Group (modelo 2100);
- **Ensaio à compressão:** dez (10) transdutores de deslocamento com curso de 100 mm, máquina de ensaio servo-hidráulica INSTRON e o sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000.

5.4 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

As propriedades mecânicas de interesse do aço ASTM A36, empregado na fabricação dos perfis, foram determinadas por meio de ensaios à tração em oito (08) corpos-de-prova. A partir destes ensaios determinou-se as resistências ao escoamento f_y e à ruptura f_u .

Os corpos-de-prova foram retirados de três (03) perfis I - FC, pertencentes ao lote de perfis destinados ao ensaio à compressão. Retirou-se destes perfis quatro (04) corpos-de-prova das mesas e quatro (04) da alma, totalizando-se oito (08), cujas dimensões encontram-se ilustradas na figura 5.1. Onde t corresponde a espessura da chapa constituinte do perfil.

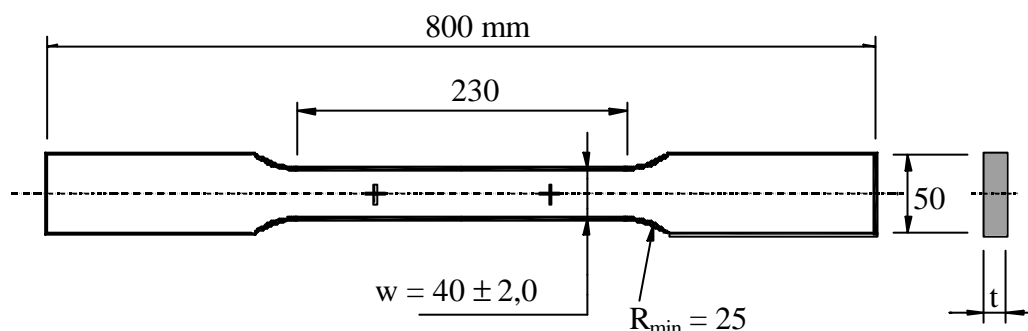


Figura 5.1 - Dimensões nominais do corpo-de-prova para o ensaio à tração.

As dimensões dos corpos-de-prova foram consideradas segundo as recomendações da norma ASTM A370 - 96.

Os corpos-de-prova foram ensaiados à tração na máquina de ensaio servo-hidráulica INSTRON, conforme ilustra a Figura 5.2.

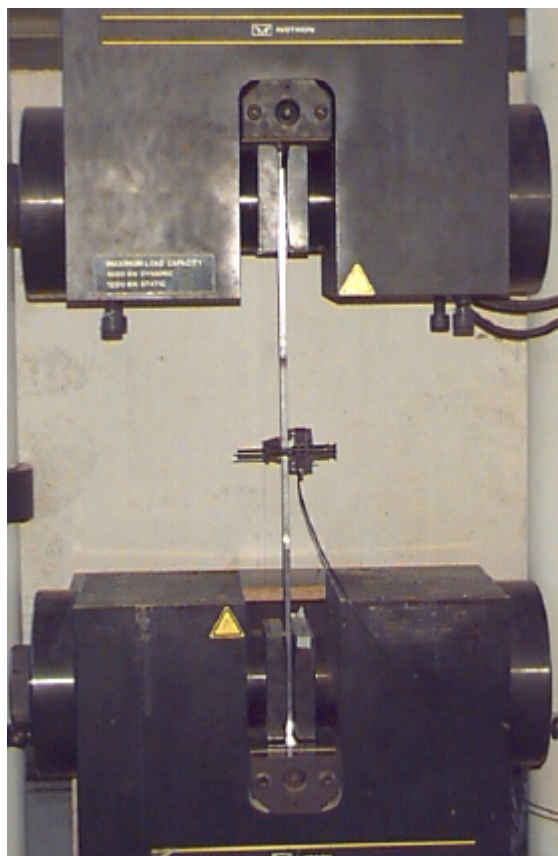


Figura 5.2 - Foto do corpo-de-prova.

As propriedades mecânicas dos corpos-de-prova retirados das mesas dos perfis encontram-se ilustradas na Tabela 5.2. A Tabela 5.3 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para os corpos-de-prova retirados das almas dos perfis.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas obtidas no ensaio à tração, dos corpos-de-prova retirados das mesas dos perfis.

C.P.	A (mm ²)	Along. (%)	E (MPa)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	f _u / f _y
A1	326,36	25,8	206466	295	469	1,59
A2	321,57	28,9	203415	297	476	1,60
A3	322,38	26,5	205283	302	477	1,58
A4	323,19	29,6	205544	299	475	1,59
Média		27,7	205177	298	474	1,59
Desvio Padrão		1,83	1280	2,72	3,41	0,01

a, composta por um mancal devidamente ajustado sobre um perfil U laminado de 200 mm de altura construída para esta finalidade no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de

A Figura 5.3 mostra um dispositivo, utilizando a bancada citada anteriormente, para a leitura das imperfeições geométricas transversais medidas ao longo do comprimento longitudinal dos perfis.

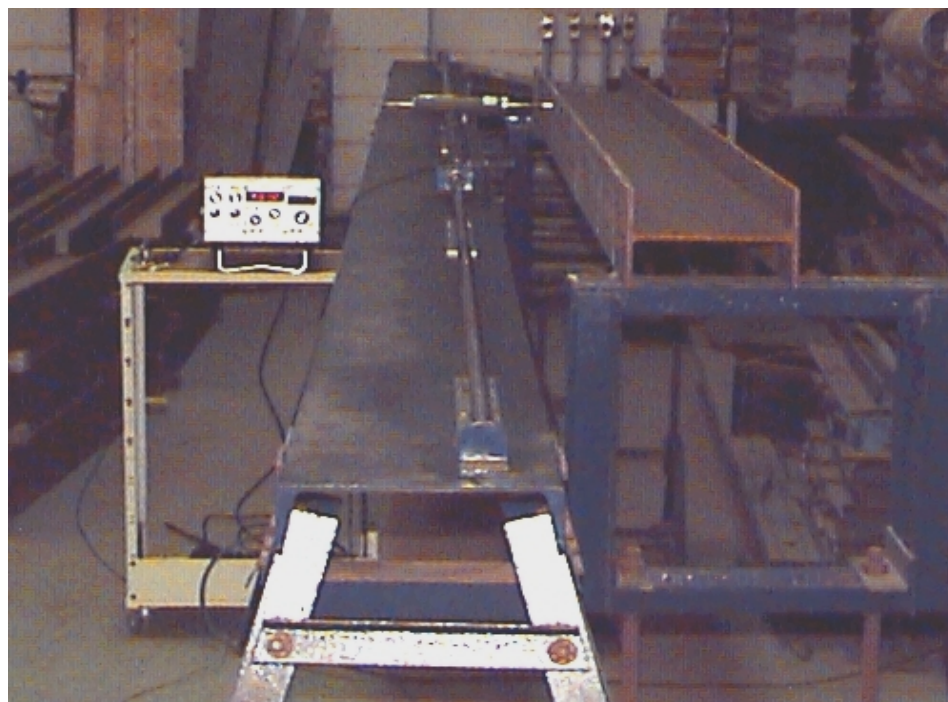


Figura 5.3 - Dispositivo para leitura das imperfeições geométricas transversais.

As imperfeições geométricas do perfil foram obtidas por meio de um transdutor de deslocamento linear. Desloca-se com o mancal, o transdutor de deslocamento a fim de se obter as leituras nos pontos desejados, conforme ilustra a Figura 5.4.

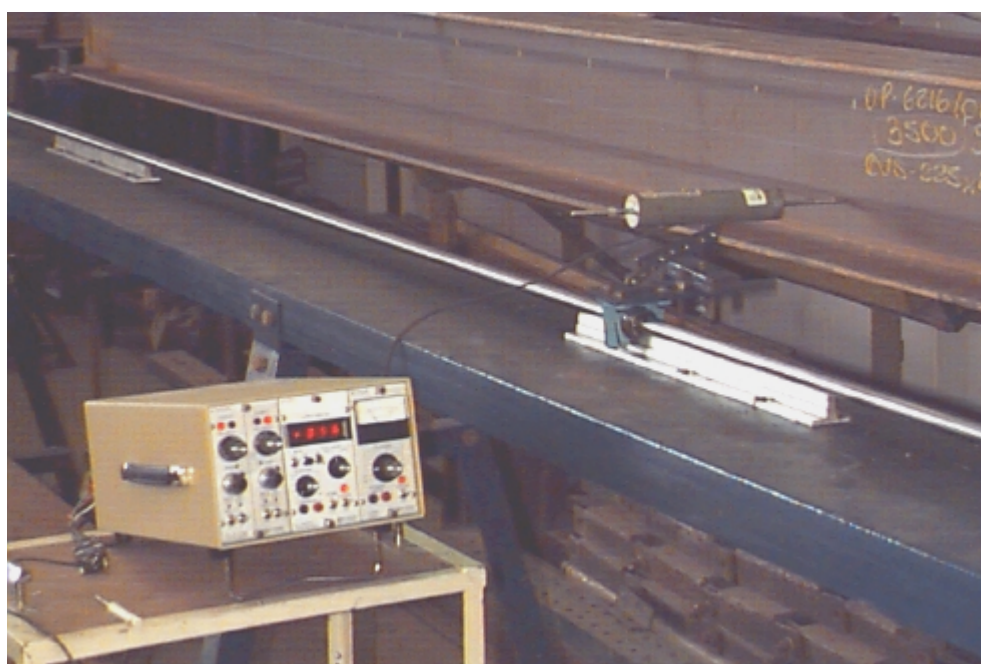


Figura 5.4 - Detalhe da realização de medida da deslocada inicial do perfil I.

As imperfeições geométricas foram medidas na alma e nas mesas dos perfis, em três linhas, conforme ilustra a Figura 5.5. As medidas foram realizadas a cada 200 mm, com o transdutor de deslocamento posicionado manualmente ao longo de cada ponto.

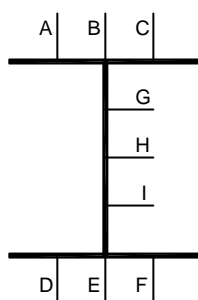


Figura 5.5 - Posições para medidas das deslocadas transversais.

A Figura 5.6 apresenta as formas deslocadas referentes ao perfil PS 200x25, de comprimento $L = 2400$ mm \rightarrow modelo 3.

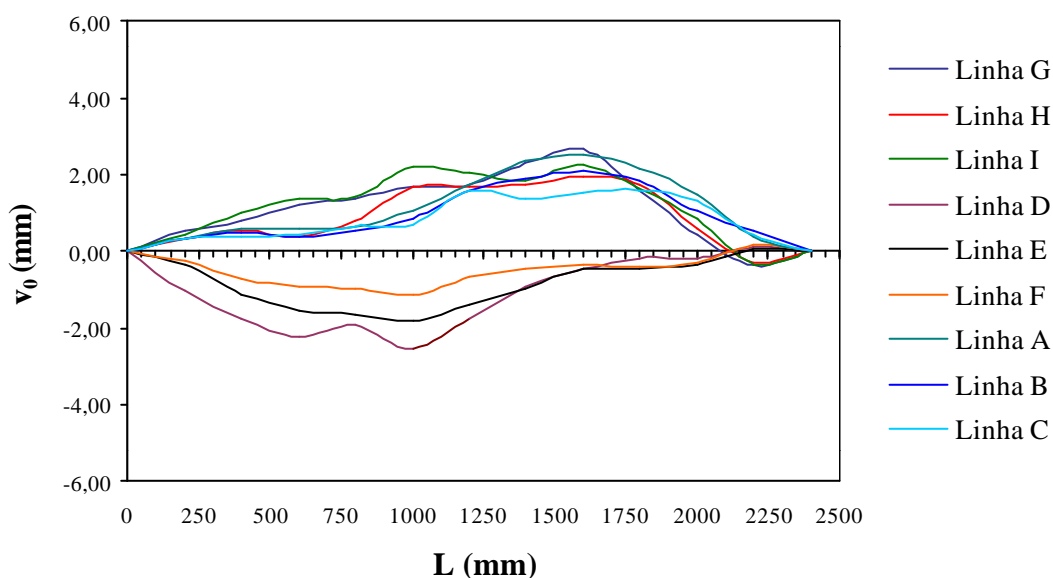


Figura 5.6 - Imperfeições geométricas para o perfil PS 200x25.

Cabe ainda salientar que previamente à realização dos ensaios foram medidas as dimensões nominais da seção transversal do pe com uma sensibilidade de 0,01 mm.

As figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam um ajuste da imperfeições transversais medidas ao longo da linha média da alma, linha H, para os comprimentos iguais a 1600 mm, 2000 mm, 2500 mm e 3500 mm, respectivamente, do perfil PS 225x29.

O ajuste foi feito por meio da função senoidal, proposta por Young (1807),

$$v_0(x) = v_0 \text{ sen } (\pi x/L) \quad (5.1)$$

Onde v_0 é o valor da imperfeição inicial no meio do vão do modelo.

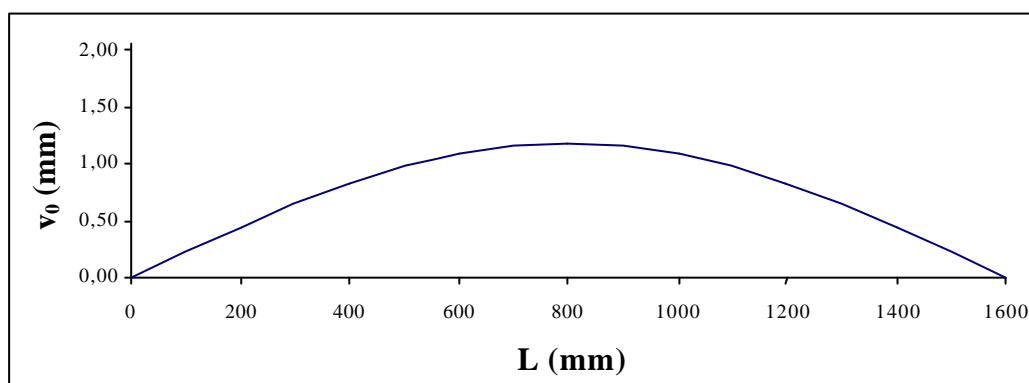


Figura 5.7 – Ajuste da imperfeição transversal na linha H do perfil PS 225x29 com $L = 1600$ mm.

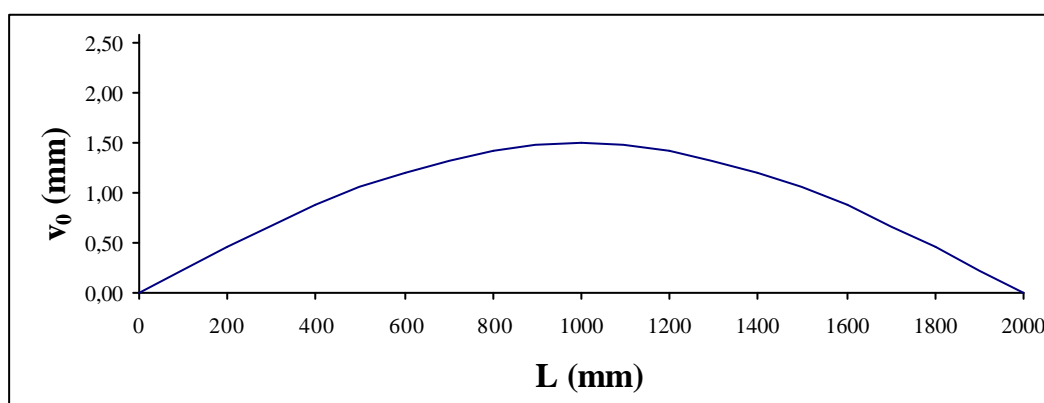


Figura 5.8 – Ajuste da imperfeição transversal na linha H do perfil PS 225x29 com $L = 2000$ mm.

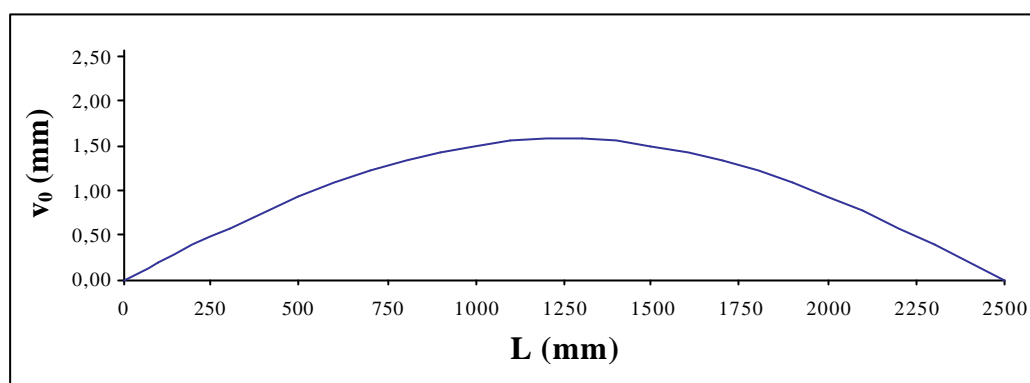


Figura 5.9 – Ajuste da imperfeição transversal na linha H do perfil PS 225x29 com $L = 2500$ mm.

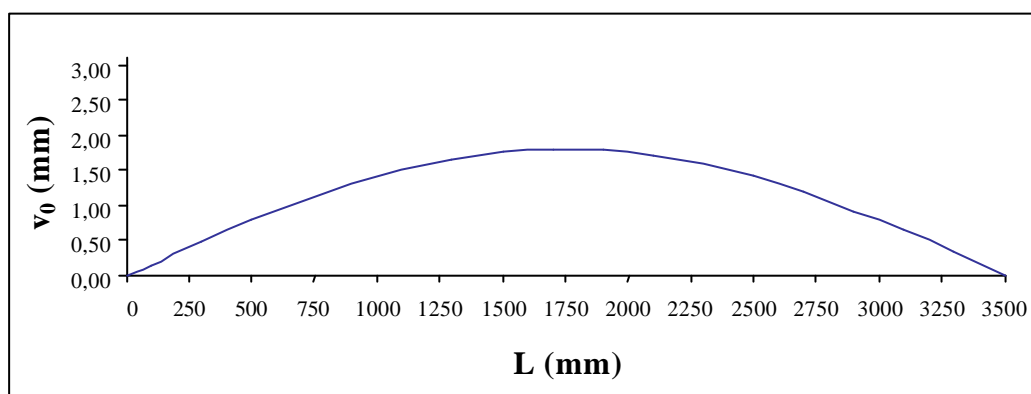


Figura 5.10 – Ajuste da imperfeição transversal na linha H do perfil PS 225x29 com $L = 3500$ mm.

A partir de análise dos resultados obtidos pode-se estabelecer um valor da imperfeição geométrica inicial sob a forma de deslocamento inicial v_0 , para os modelos analisados. Os valores dos deslocamentos iniciais v_0 serão utilizados nos capítulos 6 e 7 para a determinação da força normal crítica teórica e numérica dos modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

5.6 - ENSAIO DOS MODELOS À COMPRESSÃO

Os elementos comprimidos foram ensaiados em modelos que se aproximam de pilares com articulações nas extremidades e a instabilidade prevista para o eixo de menor inércia $y - y$.

Os ensaios de 36 modelos pertencentes às séries em estudo foram realizados de ensaio servo-hidráulica INSTRON, com capacidade de 3000 kN e altura de 4000 mm, do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Os modelos foram instrumentados com transdutores de deslocamento, posicionados nas linhas médias da alma e de uma das mesas do perfil, para se obter os deslocamentos laterais nas posições indicadas, conforme ilustra a figura 5.11.

A figura 5.11a ilustra a posição dos transdutores 1 a 7 na alma e 8 a 10 na mesa do modelo, numerados a partir da extremidade superior do perfil. A figura 5.11b mostra uma foto ilustrativa de um modelo instrumentado.

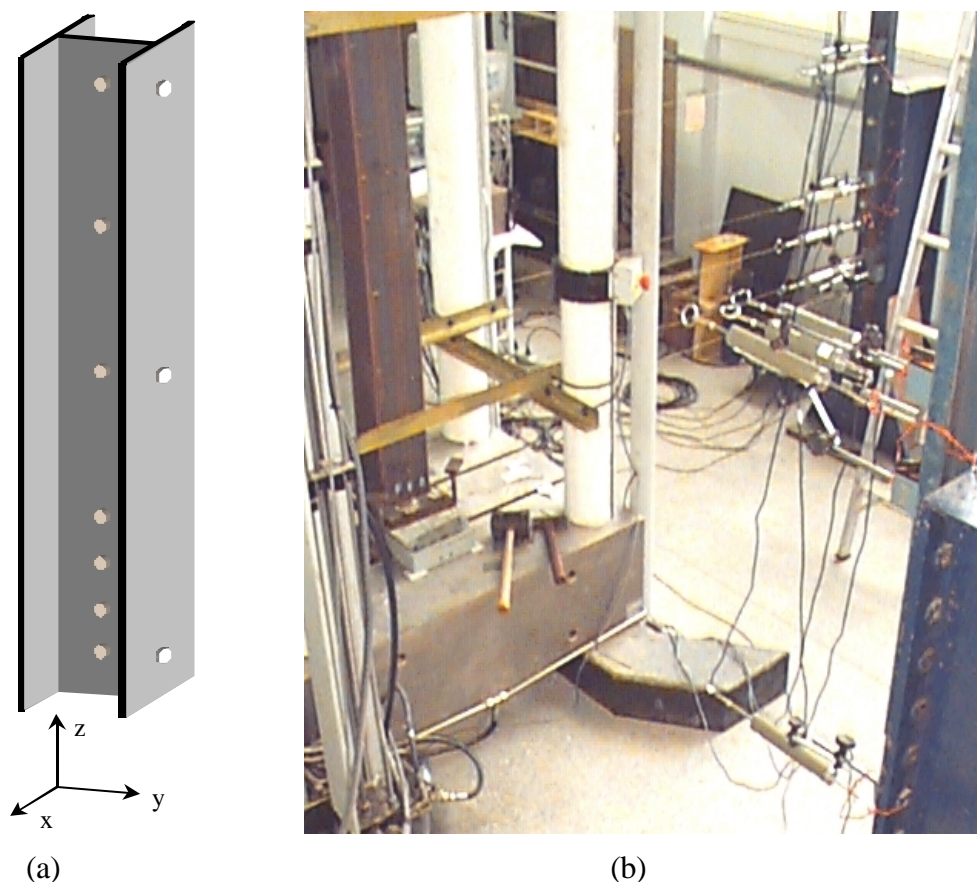


Figura 5.11 – Modelo instrumentado com transdutores de deslocamento.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam as cotas dos transdutores de deslocamento posicionados na alma e na mesa, respectivamente, para os modelos pertencentes às

Tabela 5.4 - Cotas dos transdutores posicionados na alma dos modelos.

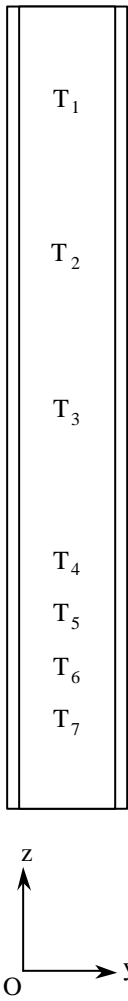
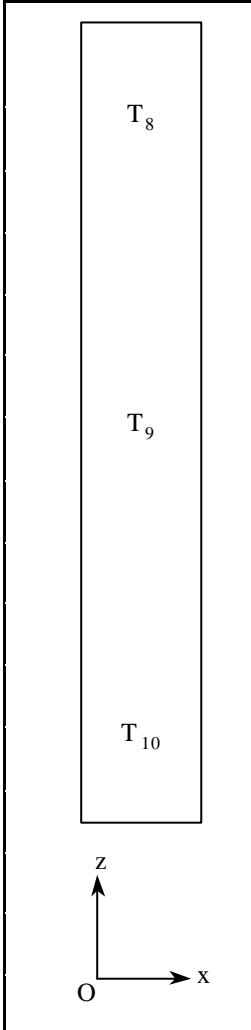
	Perfil	L (mm)	Cotas dos Transdutores (mm)						
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
CS 150x25		1800	1700	1300	900	500	367	233	100
		2200	2100	1600	1100	600	433	267	100
		2900	2800	2125	1450	775	550	325	100
		3600	3500	2650	1800	950	667	383	100
PS 200x25		1500	1400	1075	750	425	317	208	100
		2000	1900	1450	1000	550	400	250	100
		2400	2300	1750	1200	650	467	283	100
		3000	2900	2200	1500	800	567	333	100
PS 225x29		1600	1500	1150	800	450	333	217	100
		2000	1900	1450	1000	550	400	250	100
		2500	2400	1825	1250	675	483	292	100
		3500	3400	2575	1750	925	650	375	100

Tabela 5.5 - Cotas dos transdutores posicionados na mesa dos modelos.

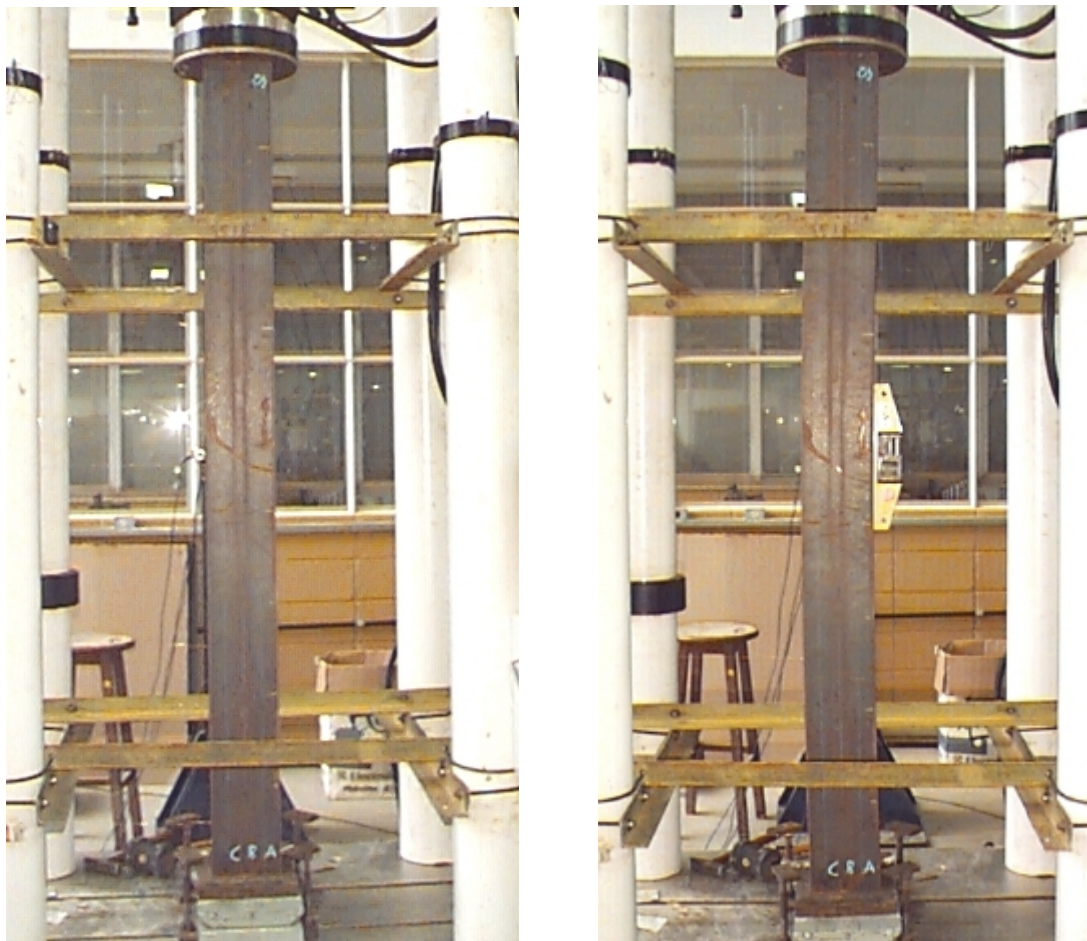
	Perfil	L (mm)	Cotas dos Transdutores (mm)		
			T₈	T₉	T₁₀
	CS 150x25	1800	1700	900	100
		2200	2100	1100	100
		2900	2800	1450	100
		3600	3500	1800	100
	PS 200x25	1500	1400	750	100
		2000	1900	1000	100
		2400	2300	1200	100
		3000	2900	1500	100
	PS 225x29	1600	1500	800	100
		2000	1900	1000	100
		2500	2400	1250	100
		3500	3400	1750	100

A Figura 5.12 ilustra a máquina de ensaio servo-hidráulica INSTRON, com o modelo 3, de comprimento $L = 3500$ mm, do perfil PS 225x29 na posição para a



Figura 5.12 - Máquina INSTRON, com o modelo na posição do ensaio.

As figuras 5.13a e 5.13b representam o modelo 3 do perfil CS 150x25, de $L = 1800$ mm, antes e após a execução do ensaio à compressão, respectivamente.



(a) Posição inicial

(b) Posição deslocada

Figura 5.13 – Modelo 3 do perfil CS 150x25 de $L = 1800$ mm.

Verifica-se a partir da figura 5.13 que a perda de estabilidade ocorre em torno do eixo de menor inércia $y - y$, conforme a previsão inicial.

A figura 5.14 mostra deformações elevadas na alma do modelo 3, de comprimento $L = 1800$ mm, do perfil CS 150x25, após a perda de estabilidade.

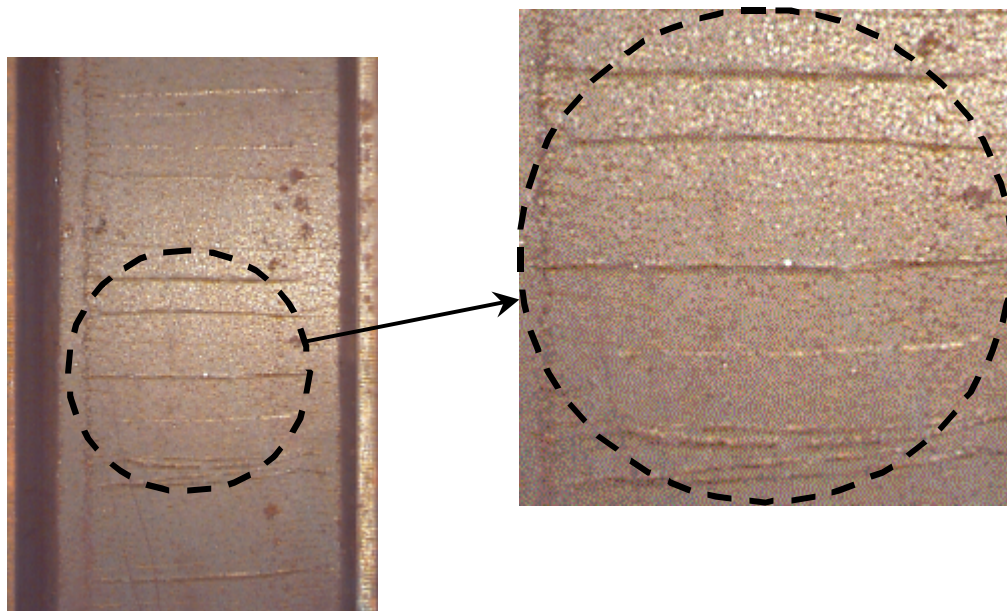


Figura 5.14 – Deformações elevadas na alma do modelo 3 do perfil CS 150x25 de $L = 1800$ mm.

(b) Posição deslocada

Figura 5.15 - Modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

A figura 5.16 ilustra a seção transversal, situada na altura média do modelo apresentado na figura 5.15, com os extensômetros elétricos de resistência (Kyowa de 5 mm), os quais foram utilizados para obter-se a relação força-deformação de alguns modelos ensaiados.

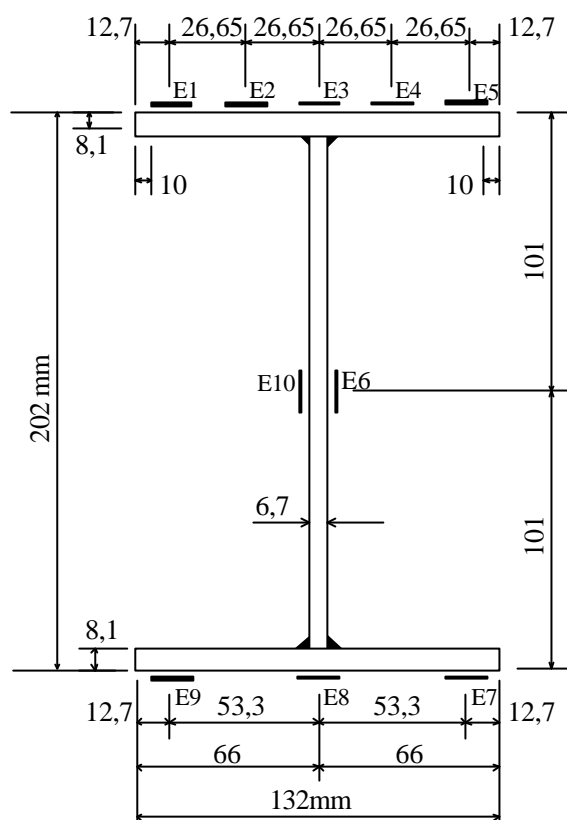


Figura 5.16 - Posição dos extensômetros na seção I, perfil PS 200x25.

5.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizam-se os valores da imperfeição geométrica inicial v_0 e os valores médios do módulo de elasticidade E e da tensão de escoamento f_y , obtidos do ensaio de caracterização dos corpos-de-prova retirados das mesas dos perfis, para a determinação da força normal crítica teórica, conforme apresenta o capítulo 6 deste trabalho.

Os resultados da força normal crítica experimental N_E e os valores dos deslocamentos laterais v dos modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 serão apresentados no capítulo 8 deste trabalho.

Discute-se também no capítulo 8, os diagramas força-deslocamento, força-deformação e a linha elástica para o modelo 2, de comprimento $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

Adotou-se para o aço empregado nas chapas constituintes dos perfis utilizados nessa análise uma tensão de escoamento $f_y = 300$ MPa e o módulo de elasticidade $E = 205000$ MPa. Estes valores foram obtidos a partir da média -de-prova retirados das mesas dos perfis pertencentes às séries em estudo.

6.2 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS

A Tabela 6.1 apresenta a relação dos modelos para as análises teórica e experimental. Salienta-se que a análise experimental foi apresentada anteriormente no capítulo 5 deste trabalho.

Tabela 6.1 – Relação dos modelos para análise

Série	L (cm)	I	\bar{I}	Modelos	v_0 (cm)
CS 150x25	180	48,00	0,58	1	0,114
				2	0,129
				3	0,196
	220	52,80	0,64	1	0,202
				2	0,237
				3	0,226
	290	73,33	0,94	1	0,199
				2	0,268
				3	0,235
	360	96,00	1,17	1	0,286
				2	0,198
				3	0,370
PS 200x25	150	49,51	0,60	1	0,109
				2	0,096
				3	0,111
	200	66,00	0,80	1	0,196
				2	0,144
				3	0,096
	240	79,21	0,96	1	0,138
				2	0,188
				3	0,182
	300	99,00	1,21	1	0,288
				2	0,149
				3	0,238
PS 225x29	160	45,71	0,56	1	0,120
				2	0,114
				3	0,119
	200	57,14	0,70	1	0,183
				2	0,218
				3	0,204
	250	71,43	0,87	1	0,249
				2	0,175
				3	0,209
	350	100,00	1,22	1	0,180
				2	0,223
				3	0,227

Nota: Foi utilizado $k = 1,00$ para o cálculo de λ e $\bar{\lambda}$.

Nesta análise será adotada como imperfeição inicial máxima v_0 , a imperfeição transversal medida ao longo da linha média da alma dos modelos e ajustada por meio da função senoidal, proposta por Young (1807), conforme foi apresentado anteriormente no capítulo 5. A imperfeição inicial v_0 apresentada na Tabela 6.1 será utilizada para o cálculo da força normal crítica teórica, tanto pela análise via formulação analítica quanto pela análise via método dos elementos finitos.

6.2.1 - Seção transversal

As seções transversais estudadas neste trabalho e suas respectivas dimensões encontram-se ilustradas na Tabela 6.2a. As dimensões para as três séries em estudo correspondem aos valores médios obtidos por meio de medições realizadas no laboratório com um paquímetro de sensibilidade 0,01 mm e estão apresentadas na Tabela 6.2b.

Tabela 6.2a - Seções transversais analisadas - dimensões nominais.

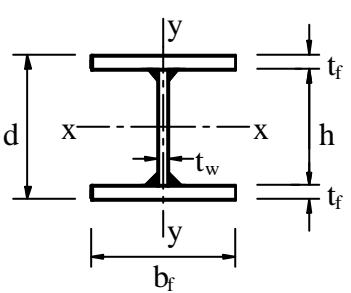
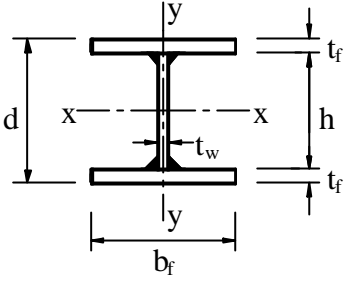
Seção Transversal	Perfil	Dimensões médias (mm)				
		d	h	b_f	t_f	t_w
	CS 150x25	150	134	150	8,0	6,3
	PS 200x25	200	184	130	8,0	6,3
	PS 225x29	225	209	150	8,0	6,3

Tabela 6.2b - Seções transversais analisadas - dimensões médias.

Seção Transversal	Perfil	Dimensões médias (mm)				
		d	h	b _f	t _f	t _w
	CS 150x25	152,00	135,80	152,00	8,10	6,70
	PS 200x25	202,00	185,80	132,00	8,10	6,70
	PS 225x29	227,00	210,80	152,00	8,10	6,70

Apresenta-se na Tabela 6.3 as principais propriedades geométricas das seções transversais ilustradas na Tabela 6.2.

Tabela 6.3 - Propriedades geométricas dos perfis.

Perfil	A _g (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	I _t (cm ⁴)	W _x (cm ³)	W _y (cm ³)	r _x (cm)	r _y (cm)	r ₀ ² (cm ²)	C _w (cm ⁶)
CS 150	33,72	1415,91	474,43	6,75	186,30	62,43	6,48	3,75	56,06	24542,91
PS 200	33,83	2369,24	310,96	6,54	234,58	47,12	8,37	3,03	79,23	29184,43
PS 225	38,75	3474,13	474,62	7,50	306,09	62,45	9,47	3,50	101,90	56793,16

6.2.2 - Características dos modelos

Admitiu-se nesta análise, um modelo teórico que representa um elemento comprimido com articulações nas extremidades e um deslocamento inicial v_0 no meio do vão, conforme ilustra a figura 6.1.

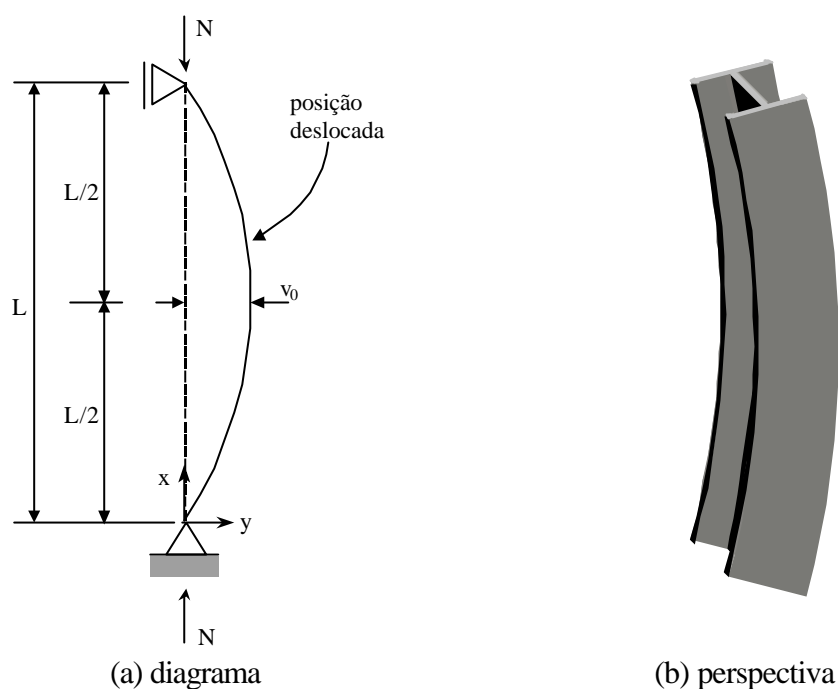


Figura 6.1 - Modelo teórico.

O deslocamento inicial v_0 corresponde às imperfeições geométricas iniciais médias, as quais foram medidas em Laboratório com dispositivo baseado em transdutores de deslocamento.

Considerando as equações (4.35) e (4.36) apresentadas anteriormente no capítulo 4, obtém-se a expressão para o cálculo de $\bar{\lambda}$, como:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{kL}{r} \right)_y \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (6.1)$$

6.3 - ANÁLISE VIA FORMULAÇÃO ANALÍTICA

Esta análise é feita baseada na formulação do tipo Ayrton-Perry, anteriormente apresentada no capítulo 4 deste trabalho.

A partir da expressão de (4.38) deduzida na seção 4.5, obtém-se a formulação para a curva de resistência à compressão, representada pela equação (6.2).

$$\rho = \frac{(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1) - \sqrt{(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1)^2 - 4\bar{\lambda}^2}}{2\bar{\lambda}^2} \quad (6.2)$$

N_T , definida como:

$$N_T = \rho N_y \quad (6.5)$$

onde:

$$N_y = A_g f_y \quad (6.6)$$

Admitindo-se na expressão (6.3) os valores de v_0 apresentados na Tabela 6.1, obtém-se o parâmetro η para cada modelo ensaiado. Posteriormente, introduzindo η na expressão (6.2), tem-se o fator ρ .

Substituindo o fator ρ na expressão (6.5), obtém-se os valores da força normal crítica teórica N_T para os modelos considerados. O valor de $\bar{\lambda}$ é obtido a partir da expressão (6.1).

As Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam os valores da força crítica teórica N_T e dos parâmetros mencionados anteriormente, para as séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Apresenta-se ainda nestas Tabelas os valores numéricos da força crítica N_{TA} e a comparação N_T / N_{TA} para os modelos analisados.

6.4 - ANÁLISE VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise via método dos elementos finitos, apresentada neste trabalho foi realizada por meio da utilização do software ANSYS, versão 6.4. Esta análise foi realizada para efeito de comparação com a análise via formulação analítica, anteriormente apresentada, para modelos com fator comprimento efetivo $k = 1,0$.

Para esta análise os modelos foram construídos com um elemento de viga BEAM 24 na forma de arco, a partir da imperfeição inicial v_0 no meio vão. Admitiram-se também os efeitos da não linearidade física.

6.4.1 - Elemento considerado

Para a realização desta análise foi escolhido o elemento de viga BEAM 24 da biblioteca de elementos do programa ANSYS.

O elemento BEAM 24, denominado *3-D Thin-Walled Plastic Beam* encontra-se na lista dos elementos indicados para a realização de análise não linear

Este elemento atende as condições estabelecidas ao modelo teórico, ou seja, coluna com as extremidades articuladas e uma imperfeição inicial v_0 no meio do vão, conforme ilustra a figura 6.1, apresentada na seção 6.2.

6.4.2 - Condições de contorno dos modelos

O modelo utilizado nesta análise apresenta as seguintes condições de contorno:

- Na extremidade inferior: translações impedidas em x , y e z , rotação impedida em x e livres em y e z ;
- Na extremidade superior: translação impedida em x e z e livre em y , rotação impedida em x e livres em y e z .

6.4.3 - Solicitação aplicada aos modelos

A figura 6.2 mostra o elemento com as vinculações nas extremidades e a força normal de compressão N , em kN, aplicada na extremidade superior.

A figura 6.2 foi desenhada com uma imperfeição inicial v_0 no meio do vão. Salienta-se ainda que a imperfeição foi distribuída ao longo do vão, ou seja, a construção do elemento comprimido ocorreu sob a forma de um arco.

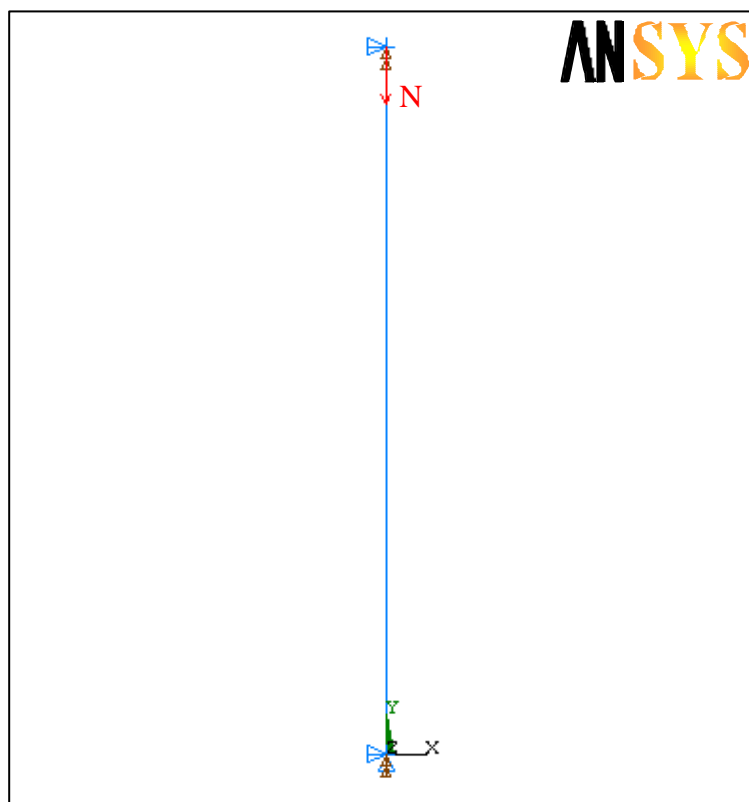


Figura 6.2 - Modelo solicitado à compressão.

6.4.4 - Características da análise

A análise realizada levou em consideração os efeitos das não linearidades geométrica e física. A não linearidade geométrica foi atribuída à presença da P_0 , enquanto que, a análise física ocorreu devido à utilização de um diagrama tensão-deformação, contendo trechos não lineares, conforme ilustra a figura 6.3.

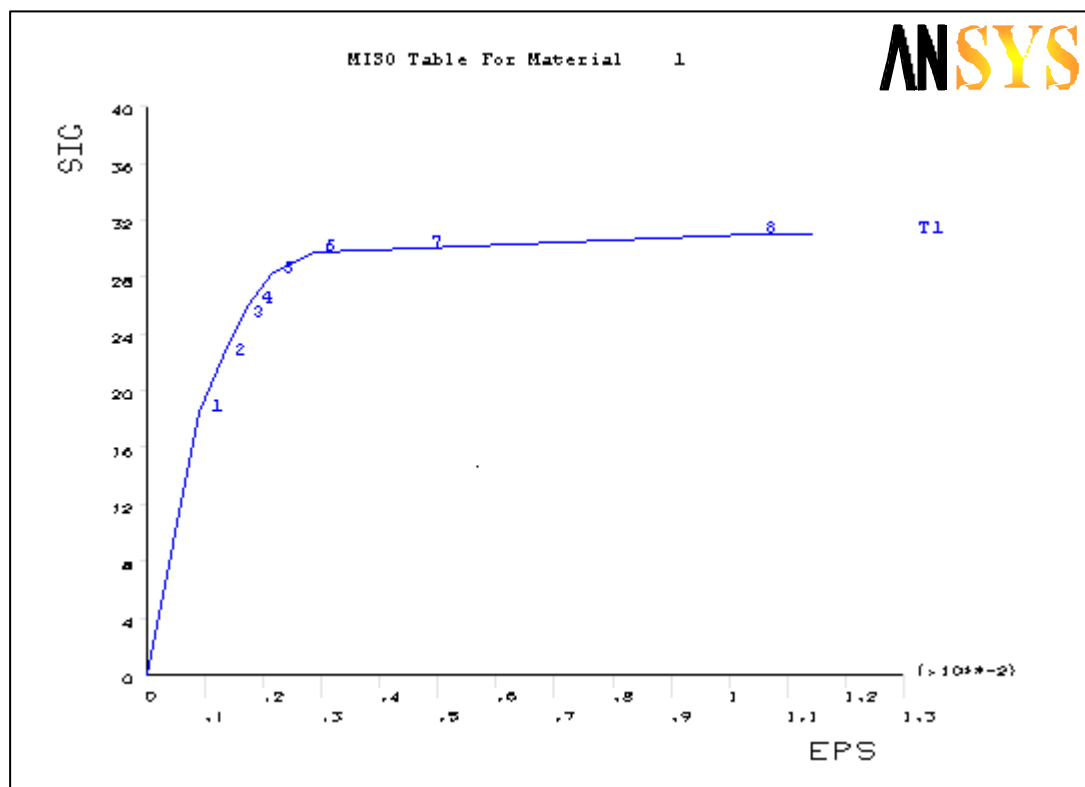


Figura 6.3 - Diagrama tensão-deformação.

O diagrama tensão-deformação da figura 6.3 foi obtido a partir de uma aproximação do diagrama real do aço utilizado, obtido pelo ensaio à tração de corpos-de-prova normalizados pela ASTM A370 – 96.

A Tabela 6.4 ilustra os valores da tensão σ e da deformação ϵ para os pontos 1 a 8, respectivamente, do diagrama apresentado na figura 6.3. Verifica-se que o trecho entre os pontos 0 e 1 é linear, com módulo de elasticidade $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$.

Tabela 6.4 - Valores de σ e ϵ para o diagrama considerado.

Ponto	ϵ	σ (kN / cm ²)
1	0,0009024	18,5000
2	0,0013280	22,3760
3	0,0016086	26,0450
4	0,0017580	26,0996
5	0,0021500	28,1122
6	0,0028610	29,7409
7	0,0047000	30,0000
8	0,0104190	31,0000

6.4.5 - Processamento dos modelos

Os modelos foram divididos em 20 elementos de igual tamanho e processados por meio de análises não lineares, por um processo iterativo até obter-se a força normal crítica numérica N_{TA} .

Os resultados da força N_{TA} para cada modelo encontram-se ilustrados nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7, para as séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

As forças críticas N_T e N_{TA} apresentadas nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 representam as forças determinadas pelas análises via formulação analítica e via método dos elementos finitos.

As flechas iniciais foram obtidas em medições de imperfeições, as quais foram discutidas anteriormente no capítulo 5.

Tabela 6.5 - Valores da força normal crítica para o perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	λ	$\bar{\lambda}$	v_0/L	η	ρ	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_T/N_{TA}
1	180	48,00	0,58	1/1579	0,061	0,919	930	924	1,006
2	180	48,00	0,58	1/1395	0,051	0,931	941	927	1,015
3	180	48,00	0,58	1/918	0,057	0,923	934	926	1,009
1	220	52,80	0,64	1/1089	0,094	0,872	883	865	1,020
2	220	52,80	0,64	1/928	0,128	0,837	847	861	0,983
3	220	52,80	0,64	1/973	0,099	0,867	877	863	1,016
1	290	73,33	0,94	1/1457	0,102	0,762	771	698	1,104
2	290	73,33	0,94	1/1082	0,069	0,806	816	799	1,021
3	290	73,33	0,94	1/1234	0,096	0,769	778	684	1,138
1	360	96,00	1,17	1/1259	0,114	0,603	610	626	0,975
2	360	96,00	1,17	1/1818	0,107	0,609	616	632	0,975
3	360	96,00	1,17	1/973	0,137	0,588	595	621	0,958

Nota: Foi adotado $k = 1,0$ para o de λ e $\bar{\lambda}$.

Tabela 6.6 - Valores da força normal crítica para o perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	λ	$\bar{\lambda}$	v_0/L	η	ρ	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_T/N_{TA}
1	150	49,51	0,60	1/1376	0,078	0,897	910	915	0,995
2	150	49,51	0,60	1/1563	0,076	0,899	912	916	0,996
3	150	49,51	0,60	1/1351	0,083	0,891	905	914	0,990
1	200	66,00	0,80	1/1020	0,132	0,789	801	774	1,034
2	200	66,00	0,80	1/1389	0,116	0,807	819	810	1,011
3	200	66,00	0,80	1/1563	0,127	0,795	807	806	1,001
1	240	79,21	0,96	1/1739	0,134	0,717	728	740	0,983
2	240	79,21	0,96	1/1062	0,184	0,673	683	675	1,012
3	240	79,21	0,96	1/1319	0,143	0,709	719	731	0,984
1	300	99,00	1,21	1/1042	0,274	0,497	505	599	0,843
2	300	99,00	1,21	1/2013	0,128	0,568	576	630	0,915
3	300	99,00	1,21	1/1260	0,174	0,542	550	625	0,880

Nota: Foi adotado $k = 1,0$ para o de λ e $\bar{\lambda}$.

Tabela 6.7 - Valores da força normal crítica para o perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	λ	$\bar{\lambda}$	v_0/L	η	ρ	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_T/N_{TA}
1	160	45,71	0,56	1/1333	0,077	0,903	1049	1049	1,000
2	160	45,71	0,56	1/1404	0,059	0,924	1074	1082	0,993
3	160	45,71	0,56	1/1345	0,279	0,734	854	1079	0,977
1	200	57,14	0,70	1/1093	0,063	0,899	1045	1015	1,030
2	200	57,14	0,70	1/917	0,102	0,851	990	1012	0,978
3	200	57,14	0,70	1/980	0,093	0,861	1001	1013	0,988
1	250	71,43	0,87	1/1004	0,120	0,775	901	874	1,030
2	250	71,43	0,87	1/1429	0,099	0,800	930	876	1,062
3	250	71,43	0,87	1/1196	0,122	0,773	898	871	1,031
1	350	100,00	1,22	1/1944	0,112	0,572	665	713	0,932
2	350	100,00	1,22	1/1567	0,139	0,555	646	673	0,959
3	350	100,00	1,22	1/1542	0,137	0,556	647	699	0,925

Nota: Foi adotado $k = 1,0$ para o de λ e $\bar{\lambda}$.

O modelo de 2^a espécie será utilizado no capítulo 7 para a determinação da força normal crítica de elementos comprimidos formados por perfis **I – FC**, em modelos com o valor do fator comprimento efetivo de flambagem $k = 0,85$.

No capítulo 7 a força normal crítica será determinada a partir das análises teórica “via formulações analíticas” e numérica “via método dos elementos finitos” e por meio da utilização das curvas de resistência à compressão **b** e **c** das normas de cálculo NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992.

7 – RESULTADOS DA ANÁLISE TEÓRICA

7.1 - GENERALIDADES

Apresenta-se neste capítulo, os resultados da força normal crítica teórica N_T e N_{TA} , considerando a flambagem por flexão em torno do eixo $y - y$, para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

A força crítica N_T é determinada por meio da análise via formulação analítica, enquanto que, a força N_{TA} é obtida via método dos elementos finitos. Estas análises foram discutidas, anteriormente, no capítulo 6 deste trabalho.

Apresentam-se ainda, os valores da força normal crítica determinada a partir das recomendações das normas NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992, para as imperfeições iniciais $v_0 / L = 1 / \gamma$ e $v_0^* / L = 1 / 1000$, admitindo a flambagem por flexão em torno do eixo $y - y$ e a flambagem por flexo-torção.

7.2 - FORÇA CRÍTICA DETERMINADA ANALITICAMENTE E NUMERICAMENTE

Admite-se para o cálculo da força crítica teórica e numérica, o módulo de elasticidade do aço $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$ e a tensão de escoamento $f_y = 30 \text{ kN/cm}^2$, enquanto que, as dimensões dos perfis e suas propriedades geométricas encontram-se ilustradas nas Tabelas 6.2 e 6.3, apresentadas no capítulo 6.

Determina-se a força normal crítica teórica N_T , para os modelos ensaiados à compressão, por meio da expressão (7.1).

$$N_T = \rho A_g f_y \quad (7.1)$$

Os valores da área bruta da seção transversal A_g para os modelos das séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustrados na Tabela 6.3, apresentada no capítulo 6.

O fator de redução da resistência ρ da expressão (7.1) é determinado a partir da expressão (7.2).

$$\rho = \frac{(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1) - \sqrt{(\bar{\lambda}^2 + \eta + 1)^2 - 4\bar{\lambda}^2}}{2\bar{\lambda}^2} \quad (7.2)$$

Onde:

$$\eta = \frac{A_g v_0}{W_y} \quad (7.3)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{kL}{r} \right)_y \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (7.4)$$

Utilizando as expressões (7.1) a (7.4), obtém-se os valores da força normal crítica teórica N_T apresentados nas Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Ilustra-se também nestas tabelas, os valores obtidos numericamente da força normal crítica teórica N_{TA} , conforme a análise apresentada no capítulo 6.

Admite-se para o cálculo da força normal crítica teórica um fator comprimento efetivo de flambagem $k = 0,85$, valor médio determinado por meio da elástica dos modelos ensaiados.

Tabela 7.1 – Valores das forças críticas N_T e N_{TA} para o perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	η	ρ	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_T/N_{TA}
1	180	0,85	0,50	1/1593	0,0610	0,9262	937	943	0,994
2	180	0,85	0,50	1/1895	0,0513	0,9370	948	950	0,998
3	180	0,85	0,50	1/1698	0,0572	0,9304	942	943	0,999
1	220	0,85	0,61	1/1264	0,0940	0,8768	887	854	1,039
2	220	0,85	0,61	1/928	0,1280	0,8420	852	849	1,004
3	220	0,85	0,61	1/1196	0,0994	0,8710	881	859	1,026
1	290	0,85	0,81	1/1534	0,1021	0,8191	829	789	1,051
2	290	0,85	0,81	1/2266	0,0691	0,8625	873	798	1,094
3	290	0,85	0,81	1/1629	0,0961	0,8263	836	792	1,056
1	360	0,85	1,01	1/1698	0,1145	0,7105	719	670	1,073
2	360	0,85	1,01	1/1818	0,1069	0,7185	727	672	1,082
3	360	0,85	1,01	1/1423	0,1366	0,6890	697	670	1,040

NOTAS:

- N_T = força crítica obtida analiticamente;
- N_{TA} = força crítica obtida numericamente.

Tabela 7.2 - Valores das forças críticas N_T e N_{TA} para o perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	η	ρ	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_T/N_{TA}
1	150	0,85	0,52	1/1389	0,0778	0,9067	920	964	0,954
2	150	0,85	0,52	1/1420	0,0763	0,9083	922	954	0,967
3	150	0,85	0,52	1/1304	0,0828	0,9015	915	964	0,949
1	200	0,85	0,69	1/1087	0,1325	0,8209	833	845	0,986
2	200	0,85	0,69	1/1242	0,1159	0,8379	850	858	0,991
3	200	0,85	0,69	1/1136	0,1267	0,8267	839	851	0,986
1	240	0,85	0,83	1/1290	0,1339	0,7764	788	748	1,054
2	240	0,85	0,83	1/938	0,1843	0,7296	741	745	0,995
3	240	0,85	0,83	1/1212	0,1426	0,7677	779	748	1,041
1	300	0,85	1,04	1/787	0,2743	0,5788	587	661	0,888
2	300	0,85	1,04	1/1685	0,1282	0,6781	688	677	1,016
3	300	0,85	1,04	1/1240	0,1742	0,6405	650	675	0,963

NOTAS:

- N_T = força crítica obtida analiticamente;
- N_{TA} = força crítica obtida numericamente.

T_A são da mesma ordem de grandeza, pois tanto a análise teórica quanto a análise numérica foram baseadas no modelo de 2ª espécie.

Conclui-se a partir do exposto anteriormente, que ocorre uma influência significativa das imperfeições iniciais nos resultados da força normal crítica à compressão dos modelos considerados.

7.3 - FORÇA CRÍTICA DETERMINADA POR MEIO DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Apresenta-se nesta seção, os valores da força normal crítica teórica N_T e N_T^* determinados a partir das curvas **b** e **c** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986. Admitem-se as imperfeições $v_0/L = 1/\gamma$ e $v_0^*/L = 1/1000$.

Utilizam-se as expressões (7.1) e (7.2), apresentadas na seção 7.2, para a determinação da força crítica teórica segundo as prescrições das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986.

Substitui-se a expressão (7.3) pelas expressões (7.5) e (7.6) para o cálculo de η , segundo as normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986.

$$\eta = \alpha^* (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (7.5)$$

Ou,

$$\eta = \alpha^* \sqrt{\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0^2} \quad (7.6)$$

Onde:

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2 \quad (7.7)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{kL}{r} \right)_y \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (7.8)$$

$$\alpha^* = \alpha + \frac{\pi \sqrt{E/f_y}}{(r/y)} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{1000} \right) \quad (7.9)$$

α = coeficiente em função da curva de resistência à compressão correspondente ao perfil;

γ = número correspondente ao denominador da fração que representa uma imperfeição geométrica inicial, por exemplo: 500, 1000, 2000.

O parâmetro α^* representa os efeitos das tensões residuais e da flecha inicial $v_0/L = 1/\gamma$.

A expressão (7.6) para o cálculo de η foi publicada por MAQUOI & RONDAL (1978)¹, enquanto que, as expressões (7.5) (7.9) para a determinação de η e α^* foram apresentadas por MAQUOI & RONDAL (1979)².

Os valores da relação r / y para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustrados na Tabela 4.2, apresentada no capítulo 4 deste trabalho.

Admite-se uma imperfeição inicial $v_0^* = L / 1000$, ou seja, $\alpha^* = \alpha$, para a determinação da força crítica N_T^* . Cabe salientar que esta é a imperfeição considerada para a obtenção das curvas de resistência à compressão, adotadas pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986.

7.3.1 - Força crítica obtida segundo as prescrições do Eurocode 3

A norma Eurocode 3: 1992, adota-se os valores de α iguais 0,34 e 0,49 para as curvas **b** e **c**, conforme ilustra a Tabela 4.4 apresentada no capítulo 4.

Para a determinação do parâmetro η , o Eurocode 3: 1992 adota a expressão (7.5) com uma imperfeição inicial $v_0^* = L / 1000$, ou seja, $\alpha^* = \alpha$.

Substituindo os valores de α citados, anteriormente, na expressão (7.9) com os respectivos valores γ , obtém-se o parâmetro α^* . Adotando os valores de α^* na expressão (7.5), tem-se o parâmetro η para cada modelo ensaiado à compressão.

Admitindo o parâmetro η na expressão (7.2), obtém-se o fator de redução da resistência ρ . Os valores de ρ serão considerados na expressão (7.1) para a determinação da força normal crítica N_T e N_T^* segundo as recomendações do Eurocode 3: 1992.

Tabelas 7.4, 7.5 e 7.6 ilustram os valores de N_T e N_T^* considerando as curvas **b** e **c** do Eurocode 3: 1992, para os modelos das séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

¹ MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1978). Mise en équation des nouvelles courbes européennes de flambement. *Construction Métallique*, n.1.

² MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1979). Formulations D' Ayrton-Perry pour flambement des barres métalliques. *Construction Métallique*, n.4, Paris.

Tabela 7.4 - Valores da força normal crítica teórica para o perfil CS 150x25 Eurocode 3

M	L (cm)	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Eb}$ (kN)	$(N_T^*)_{Eb}$ (kN)	$(N_T)_{Ec}$ (kN)	$(N_T^*)_{Ec}$ (kN)	$(N_T)_{Eb}/(N_T^*)_{Eb}$	$(N_T)_{Ec}/(N_T^*)_{Ec}$
1	180	0,50	1/1593	915	893	871	851	1,025	1,024
2	180	0,50	1/1895	920	893	876	851	1,030	1,029
3	180	0,50	1/1698	916	893	873	851	1,026	1,026
1	220	0,61	1/1264	858	840	803	786	1,021	1,022
2	220	0,61	1/928	839	840	786	786	0,999	1,000
3	220	0,61	1/1196	854	840	799	786	1,017	1,017
1	290	0,80	1/1534	762	727	692	664	1,048	1,042
2	290	0,80	1/2266	782	727	707	664	1,076	1,065
3	290	0,80	1/1629	766	727	695	664	1,054	1,047
1	360	1,00	1/1698	642	600	574	543	1,070	1,057
2	360	1,00	1/1818	645	600	577	543	1,075	1,063
3	360	1,00	1/1423	632	600	567	543	1,053	1,044

Notas:

- M = Modelo
- $(N_T)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ – curva **b** do Eurocode;
- $(N_T^*)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0^*/L = 1/1000$ – curva **b** do Eurocode;
- $(N_T)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ – curva **c** do Eurocode;
- $(N_T^*)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0^*/L = 1/1000$ – curva **c** do Eurocode.

Percebe-se a partir da Tabela 7.4 que para uma imperfeição inicial $v_0/L = 1/\gamma$ $v_0^*/L = 1/1000$, quanto maior for o número γ maior será a força normal crítica e para um número γ inferior a 1000 ocorrerá uma diminuição da força normal crítica, caracterizando o efeito das imperfeições iniciais na resistência à

I – FC.

Os valores da força normal crítica N_T determinada para uma imperfeição inicial $v_0/L = 1/\gamma$ são da ordem de 7,6 % superior e 0,1 % inferior quando comparados com os resultados da força normal crítica N_T^* , determinada para a imperfeição inicial $v_0^*/L = 1/1000$ utilizando a curva **b** do Eurocode 3: 1992. Para a curva **c**, a maior diferença entre os valores de N_T e N_T^* é da ordem 6,5 %.

$\delta_0^* / L = 1 / 1000$, portanto, o modelo referido deve ser desprezado.

Tabela 7.6 - Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 225x29 Eurocode 3

M	L (cm)	$\bar{\lambda}$	v_0 / L	$(N_T)_{Eb}$ (kN)	$(N_T^*)_{Eb}$ (kN)	$(N_T)_{Ec}$ (kN)	$(N_T^*)_{Ec}$ (kN)	$(N_T)_{Eb} / (N_T^*)_{Eb}$	$(N_T)_{Ec} / (N_T^*)_{Ec}$
1	160	0,47	1/1282	1054	1039	1009	994	1,014	1,015
2	160	0,47	1/1695	1065	1039	1019	994	1,025	1,025
3	160	0,47	1/1356	1057	1039	1011	994	1,017	1,017
1	200	0,59	1/1980	1018	974	953	914	1,045	1,043
2	200	0,59	1/1220	993	974	931	914	1,020	1,019
3	200	0,59	1/1328	998	974	936	914	1,025	1,024
1	250	0,74	1/1289	907	879	832	808	1,032	1,030
2	250	0,74	1/1572	922	879	843	808	1,049	1,043
3	250	0,74	1/1269	906	879	831	808	1,031	1,029
1	350	1,04	1/1944	717	659	639	596	1,088	1,072
2	350	1,04	1/1563	704	659	630	596	1,068	1,057
3	350	1,04	1/1584	704	659	631	596	1,068	1,059

Notas:

- M = Modelo
- $(N_T)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **b** do Eurocode;
- $(N_T^*)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **b** do Eurocode;
- $(N_T)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **c** do Eurocode;
- $(N_T^*)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **c** do Eurocode.

Os valores da força normal crítica N_T determinada para uma imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / \gamma$ são da ordem de 8,8 % superior quando comparados com os resultados da força crítica N_T^* determinada para a imperfeição inicial padrão $v_0^* / L = 1 / 1000$, considerando a curva **b** do Eurocode 3: 1992. Para a curva **c**, a maior diferença entre N_T e N_T^* é da ordem 7,2%.

Percebe-se que para esta série, como não existe nenhum modelo com imperfeição inicial superior à imperfeição padrão $v_0^* / L = 1 / 1000$, a força normal crítica N_T será sempre superior à força normal crítica N_T^* .

7.3.2 - Força crítica obtida segundo as prescrições da NBR 8800

A norma NBR 8800: 1986 recomenda os valores de α iguais 0,281 e 0,384 para as curvas **b** e **c**, conforme ilustra a Tabela 4.4 do capítulo 4.

Para a determinação do parâmetro η , a NBR 8800: 1986 adota a expressão (7.6) com uma imperfeição inicial $v_0^* = L/1000$, ou seja, $\alpha^* = \alpha$.

Substituindo os valores de α citados, anteriormente, na expressão (7.9) com os respectivos valores γ , obtém-se o parâmetro α^* . Adotando os valores de α^* na expressão (7.6), tem-se o parâmetro η para cada modelo ensaiado à compressão.

Admitindo o parâmetro η na expressão (7.2), obtém-se o fator de redução da resistência ρ . Os valores de ρ serão considerados na expressão (7.1) para a determinação da força normal crítica N_T e N_T^* segundo as recomendações da norma NBR 8800: 1986.

Os valores de N_T e N_T^* considerando as curvas **b** e **c** da norma NBR 8800: 1986, para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustrados nas Tabelas 7.7, 7.8 e 7.9.

Tabela 7.7 - Valores da força normal crítica teórica para o perfil CS 150x25 NBR 8800

M	L (cm)	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nc}$ (kN)	$(N_T)_{Nb} / (N_T^*)_{Nb}$	$(N_T)_{Nc} / (N_T^*)_{Nc}$
1	180	0,50	1/1593	897	868	853	827	1,033	1,031
2	180	0,50	1/1895	904	868	860	827	1,042	1,040
3	180	0,50	1/1698	900	868	856	827	1,037	1,035
1	220	0,61	1/1264	842	819	791	771	1,028	1,026
2	220	0,61	1/928	816	819	769	771	0,996	0,997
3	220	0,61	1/1196	836	819	786	771	1,021	1,020
1	290	0,80	1/1534	758	717	696	662	1,057	1,051
2	290	0,80	1/2266	784	717	715	662	1,093	1,080
3	290	0,80	1/1629	763	717	700	662	1,064	1,057
1	360	1,00	1/1698	647	599	587	550	1,080	1,067
2	360	1,00	1/1818	651	599	591	550	1,087	1,075
3	360	1,00	1/1423	635	599	578	550	1,060	1,051

Notas:

- M = Modelo
- $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0^*/L = 1/1000$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ – curva **c** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0^*/L = 1/1000$ – curva **c** da NBR 8800.

Os valores da força normal crítica N_T calculada por meio de uma imperfeição inicial $v_0/L = 1/\gamma$ são da ordem de 9,3 % superior e 0,4 % inferior, quando comparados com os resultados da força crítica N_T^* , os quais foram obtidos com a utilização da imperfeição inicial padrão $v_0^*/L = 1/1000$ considerando a curva **b** da norma NBR 8800: 1986. Para a curva **c**, a maior diferença entre os valores de N_T e N_T^* é da ordem 8,0 % e da ordem de 0,3% inferior para o modelo de imperfeição $v_0/L = 1/928$.

Tabela 7.8 - Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 200x25 NBR 8800

M	L (cm)	$\bar{\lambda}$	v_0 / L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nc}$ (kN)	$(N_T)_{Nb} / (N_T^*)_{Nb}$	$(N_T)_{Nc} / (N_T^*)_{Nc}$
1	150	0,51	1/1389	889	864	845	822	1,029	1,028
2	150	0,51	1/1420	890	864	846	822	1,030	1,029
3	150	0,51	1/1304	885	864	841	822	1,024	1,023
1	200	0,68	1/1087	796	784	743	731	1,015	1,016
2	200	0,68	1/1242	808	784	752	731	1,031	1,029
3	200	0,68	1/1136	800	784	746	731	1,020	1,021
1	240	0,82	1/1290	738	707	678	653	1,044	1,038
2	240	0,82	1/938	706	707	653	653	0,999	1,000
3	240	0,82	1/1212	732	707	674	653	1,035	1,032
1	300	1,02	1/787	565	581	522	534	0,973	0,978
2	300	1,02	1/1685	632	581	573	534	1,088	1,073
3	300	1,02	1/1240	608	581	556	534	1,047	1,041

Notas:

- M = Modelo
- $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **c** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **c** da NBR 8800.

Os valores da força normal crítica N_T determinada para uma imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / \gamma$ são da ordem de 8,8 % superior e 2,7 % inferior quando comparados com os resultados da força normal crítica N_T^* determinada para a imperfeição inicial padrão $v_0^* / L = 1 / 1000$, considerando a curva **b** da NBR 8800: 1986.

Para a curva **c**, a maior diferença entre N_T e N_T^* é da ordem 7,3 %, enquanto que, o único valor de N_T inferior a N_T^* é da ordem de 2,2 %.

Tabela 7.9 - Valores da força normal crítica teórica para o perfil PS 225x29 NBR 8800

M	L (cm)	$\bar{\lambda}$	v_0 / L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	$(N_T^*)_{Nc}$ (kN)	$(N_T)_{Eb} / (N_T^*)_{Eb}$	$(N_T)_{Ec} / (N_T^*)_{Ec}$
1	160	0,47	1/1282	1029	1009	983	964	1,020	1,020
2	160	0,47	1/1695	1046	1009	998	964	1,040	1,035
3	160	0,47	1/1356	1033	1009	986	964	1,024	1,023
1	200	0,59	1/1980	1007	950	945	895	1,060	1,056
2	200	0,59	1/1220	972	950	915	895	1,023	1,022
3	200	0,59	1/1328	979	950	921	895	1,031	1,029
1	250	0,74	1/1289	897	863	830	801	1,039	1,036
2	250	0,74	1/1572	915	863	844	801	1,060	1,054
3	250	0,74	1/1269	895	863	828	801	1,037	1,034
1	350	1,04	1/1944	727	659	658	605	1,103	1,088
2	350	1,04	1/1563	710	659	645	605	1,077	1,066
3	350	1,04	1/1584	711	659	646	605	1,079	1,068

Notas:

- M = Modelo
- $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **b** da NBR 8800;
- $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ – curva **c** da NBR 8800;
- $(N_T^*)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0^* / L = 1 / 1000$ – curva **c** da NBR 8800.

O valor da força normal crítica N_T obtido por meio de uma imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / \gamma$ supera 10,3 % quando comparado com o resultado da força N_T^* , determinada utilizando a imperfeição inicial padrão $v_0^* = L / 1000$, admitindo a curva **b** da norma NBR 8800: 1986. Para a curva **c**, a maior diferença entre N_T e N_T^* é da ordem 8,8 %.

Percebe-se que para esta série, como não existe nenhum modelo com imperfeição inicial superior à imperfeição inicial padrão $v_0^* / L = 1 / 1000$, a força normal crítica N_T será sempre superior à força normal crítica N_T^* .

7.3.3 - Força crítica admitindo a flambagem por flexo-torção

Apresenta-se nesta seção, os valores da força normal crítica teórica admitindo a flambagem por flexo-torção.

Determina-se a força normal crítica pela expressão (7.1) apresentada na seção 7.2, enquanto que, o índice de esbeltez reduzido $\bar{\lambda}$ é calculado pela expressão (7.10).

$$\bar{\lambda} = \sqrt{f_y/f_e} \quad (7.10)$$

Onde f_e é a tensão crítica de flambagem por flexão pura, torção ou flexo-torção.

Para os modelos analisados, formados por um perfil **I** com dupla simetria, a tensão crítica de flambagem elástica f_e é o menor dos valores entre f_{ey} , f_{ex} e f_{ez} .

As tensões f_y , f_x e f_z correspondem à flambagem por flexão em relação ao eixo $y - y$, à flambagem por flexão em relação ao eixo $x - x$ e à flambagem por torção, cujas expressões são:

$$f_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left[k_y \frac{L}{r_y} \right]^2} \quad (7.11)$$

$$f_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left[k_x \frac{L}{r_x} \right]^2} \quad (7.12)$$

$$f_{ez} = \frac{1}{A_g (r_0)^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(k_z L)^2} + G I_t \right] \quad (7.13)$$

Considera-se neste trabalho, as curvas **b** e **c** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986 para a determinação da força normal crítica admitindo a flambagem por flexo-torção (FLT). Determinam-se os valores de α^* , η e ρ , por meio das expressões apresentadas anteriormente nas seções 7.3.1 e 7.3.2.

Os resultados da força normal crítica admitindo a flambagem por flexo-torção (FLT) para os perfis CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29, com uma imperfeição inicial padrão $v_0^* = L / 1000$, pelas as normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986 encontram-se ilustrados nas Tabelas 7.10 e 7.11. Neste caso, $\alpha^* = \alpha$ e os valores de α são os adotados pelas normas citadas anteriormente.

Tabela 7.10 – Força crítica por FLT para $v_0^* = L / 1000$ – curvas do Eurocode 3.

Perfil	L (cm)	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_x$	$\bar{\lambda}_z$	Curva b			Curva c		
					$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
CS 150x25	180	0,50	0,29	0,46	893	979	912	851	965	875
	220	0,61	0,35	0,54	840	956	876	786	934	830
	290	0,80	0,46	0,65	727	912	821	664	875	764
	360	0,99	0,58	0,73	600	857	775	543	806	714
PS 200x25	150	0,51	0,19	0,44	889	1015	923	845	1015	889
	200	0,68	0,25	0,56	800	997	869	741	989	821
	240	0,82	0,30	0,64	716	978	829	653	963	773
	300	1,02	0,37	0,75	582	952	766	526	927	704
PS 225x29	160	0,47	0,17	0,42	1039	1163	1067	994	1163	1031
	200	0,59	0,22	0,51	974	1154	1023	914	1151	973
	250	0,74	0,27	0,61	879	1133	967	808	1121	906
	350	1,04	0,38	0,79	659	1086	849	596	1055	777

Notas:

$k_y = k_x = k_z = 0,85$;

$(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN;

$(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y;

$(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x;

$(N_T)_z$ = força crítica por torção.

Verifica-se que para os dois menores valores do comprimento **L** de cada perfil, ou seja, $\bar{\lambda}_y < 0,70$, a diferença entre a força crítica por torção $(N_T)_z$ e a força crítica por flexão em torno do eixo de menor inércia y – y é inferior a 10%, atingindo um valor máximo de 33,8 % para o comprimento $L = 300$ cm do perfil PS 200x25. Conclui-se então que perfis com as propriedades geométricas da ordem de grandeza daqueles apresentados na Tabela 7.10 estão sujeitos ao fenômeno de flambagem por torção quando ensaiados à compressão.

Tabela 7.11 – Força crítica por FLT para $v_0^* = L/1000$ – curvas da NBR 8800.

Perfil	L (cm)	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_x$	$\bar{\lambda}_z$	Curva b			Curva c		
					$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
CS 150x25	180	0,50	0,29	0,46	869	951	885	828	930	848
	220	0,61	0,35	0,54	821	927	852	773	900	809
	290	0,80	0,46	0,65	722	885	802	668	848	752
	360	0,99	0,58	0,73	608	835	761	559	788	708
PS 200x25	150	0,51	0,19	0,44	868	1015	896	826	1015	860
	200	0,68	0,25	0,56	790	971	846	738	956	801
	240	0,82	0,30	0,64	713	950	809	658	928	759
	300	1,02	0,37	0,75	592	923	753	543	894	699
PS 225x29	160	0,47	0,17	0,42	1013	1163	1035	969	1163	996
	200	0,59	0,22	0,51	954	1132	994	900	1121	946
	250	0,74	0,27	0,61	868	1102	944	807	1082	888
	350	1,04	0,38	0,79	664	1053	836	610	1018	774

Notas:

$k_y = k_x = k_z = 0,85$;

$(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN;

$(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y;

$(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x;

$(N_T)_z$ = força crítica por torção.

As Tabelas 7.12, 7.13 e 7.14 ilustram os valores da força normal crítica admitindo a flambagem por flexo-torção (FLT) para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29, com as imperfeições iniciais iguais a $v_0/L = 1/\gamma$, considerando as curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

Foi adotado o fator comprimento efetivo de flambagem $k_y = k_x = k_z = 0,85$ para a determinação da esbeltez reduzida $\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_x$ e $\bar{\lambda}_z$.

Tabela 7.12 - Força crítica por FLT, perfil CS 150x25 - curvas do Eurocode 3.

Modelo	L (cm)	v_0 / L	Curva b			Curva c		
			$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
1	180	1/1593	915	986	928	871	972	889
2		1/1895	920	987	932	876	974	893
3		1/1698	916	986	929	873	973	890
1	220	1/1264	858	962	889	803	939	842
2		1/928	839	954	873	786	932	827
3		1/1196	854	960	886	799	938	839
1	290	1/1534	762	926	847	692	887	786
2		1/2266	782	936	863	707	896	799
3		1/1629	766	928	849	695	889	788
1	360	1/1698	642	885	809	574	831	740
2		1/1818	645	887	812	577	833	743
3		1/1423	632	878	799	567	825	733

Notas:

 $(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN; $(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y; $(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x; $(N_T)_z$ = força crítica por torção.**Tabela 7.13** - Força crítica por FLT, perfil PS 200x25 - curvas do Eurocode 3.

Modelo	L (cm)	v_0 / L	Curva b			Curva c		
			$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
1	150	1/1389	908	1015	936	863	1015	900
2		1/1420	909	1015	936	863	1015	901
3		1/1304	905	1015	934	860	1015	898
1	200	1/1087	812	999	874	751	991	825
2		1/1242	821	1000	882	759	992	831
3		1/1136	815	999	877	754	992	827
1	240	1/1290	744	984	844	675	969	784
2		1/938	718	979	822	655	964	766
3		1/1212	739	983	840	672	968	781
1	300	1/787	570	943	744	519	919	686
2		1/1685	625	964	802	559	938	732
3		1/1240	606	958	782	545	932	716

Notas:

 $(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN; $(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y; $(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x; $(N_T)_z$ = força crítica por torção.

CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29, com as imperfeições iniciais $v_0 / L = 1 / \gamma$, considerando as curvas **b** e **c** da norma NBR 8800: 1986.

Foi adotado o fator comprimento efetivo de flambagem $k_y = k_x = k_z = 0,85$ para a determinação da esbeltez reduzida $\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_x$ e $\bar{\lambda}_z$.

Tabela 7.15 - Força crítica por FLT, perfil CS 150x25 - curvas da NBR 8800.

Modelo	L (cm)	v_0 / L	Curva b			Curva c		
			$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
1	180	1/1593	897	964	909	853	943	868
2		1/1895	904	967	915	860	947	875
3		1/1698	900	965	911	856	945	871
1	220	1/1264	842	937	870	791	909	824
2		1/928	816	923	847	769	896	804
3		1/1196	836	934	865	786	906	820
1	290	1/1534	758	907	835	696	867	779
2		1/2266	784	921	856	715	880	797
3		1/1629	763	909	839	700	869	782
1	360	1/1698	647	871	803	587	820	741
2		1/1818	651	875	807	591	823	744
3		1/1423	635	862	790	578	812	731

Notas:

 $(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN; $(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y; $(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x; $(N_T)_z$ = força crítica por torção.**Tabela 7.16** - Força crítica por FLT, perfil PS 200x25 - curvas da NBR 8800.

Modelo	L (cm)	v_0 / L	Curva b			Curva c		
			$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
1	150	1/1389	868	1015	915	845	1015	877
2		1/1420	875	1015	916	846	1015	878
3		1/1304	871	1015	911	841	1015	874
1	200	1/1087	824	975	853	743	960	807
2		1/1242	804	978	863	752	963	815
3		1/1136	820	976	856	746	961	810
1	240	1/1290	779	960	829	678	938	775
2		1/938	797	949	801	653	927	752
3		1/1212	782	958	824	674	936	771
1	300	1/787	741	908	725	522	880	676
2		1/1685	744	944	798	573	913	735
3		1/1240	731	933	773	556	903	715

Notas:

 $(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN; $(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y; $(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x; $(N_T)_z$ = força crítica por torção.

Tabela 7.17 - Força crítica por FLT, perfil PS 225x29 curvas da NBR 8800.

Modelo	L (cm)	v_0/L	Curva b			Curva c		
			$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$	$(N_T)_y$	$(N_T)_x$	$(N_T)_z$
1	160	1/1282	1029	1163	1052	983	1163	1012
2		1/1695	1046	1163	1066	998	1163	1025
3		1/1356	1033	1163	1055	986	1163	1015
1	200	1/1980	1007	1142	1040	945	1132	987
2		1/1220	972	1136	1010	915	1126	961
3		1/1328	979	1138	1017	921	1127	966
1	250	1/1289	897	1109	965	830	1088	906
2		1/1572	915	1114	982	844	1093	919
3		1/1269	895	1108	964	828	1087	905
1	350	1/1944	727	1083	901	658	1046	824
2		1/1563	710	1075	883	645	1038	810
3		1/1584	711	1075	884	646	1039	811

Notas:

$(N_T)_y$, $(N_T)_x$ e $(N_T)_z$ em kN;

$(N_T)_y$ = força crítica por flexão em torno do eixo y-y;

$(N_T)_x$ = força crítica por flexão em torno do eixo x-x;

$(N_T)_z$ = força crítica por torção.

7.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se a partir dos valores apresentados nas tabelas anteriores, uma influência significativa das imperfeições geométricas iniciais v_0 na determinação da força normal crítica teórica para os modelos ensaiados à compressão.

Os valores da força normal crítica obtida analiticamente N_T e da força normal crítica obtida numericamente N_{TA} serão utilizados no capítulo 9 para fins de comparação com os resultados experimentais da força normal crítica N_E .

Os resultados da força normal crítica teórica determinados, admitindo as $v_0 / L = 1 / \gamma$, a partir das curvas **b** e **c** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986 serão considerados no capítulo 9 para análise comparativa com os valores da força normal crítica experimental N_E dos modelos ensaiados à compressão.

8 - RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

8.1 - GENERALIDADES

Os resultados experimentais que se apresentam neste capítulo correspondem às propriedades mecânicas do material, as imperfeições geométricas iniciais v_0 , força normal crítica experimental N_E e os deslocamentos laterais v dos modelos ensaiados à compressão.

A força normal crítica experimental N_E foi determinada por meio do ensaio à compressão, na máquina de ensaio INSTRON do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, dos modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

8.2 - PROPRIEDADES DO MATERIAL

As propriedades mecânicas do material foram determinadas a partir do ensaio o à tração na máquina INSTRON, apresentado no

Admitiu-se na análise teórica, apresentada no capítulo 6 deste trabalho, o $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$ e a tensão de escoamento $f_y = 30 \text{ kN/cm}^2$. Estes valores de E e f_y correspondem à media, aproximada, dos resultados obtidos no ensaio à tração dos corpos-de-prova retirados das mesas dos perfis.

Apresenta-se nas figuras 8.1 e 8.2, os diagramas tensão – deformação ($\sigma \times \epsilon$) dos corpos-de-prova A2 e B2 retirados das mesas e da alma dos perfis.

Os perfis utilizados para a retirada dos corpos-de-prova foram escolhidos aleatoriamente de um lote de 40 perfis adquiridos para a realização desta pesquisa.

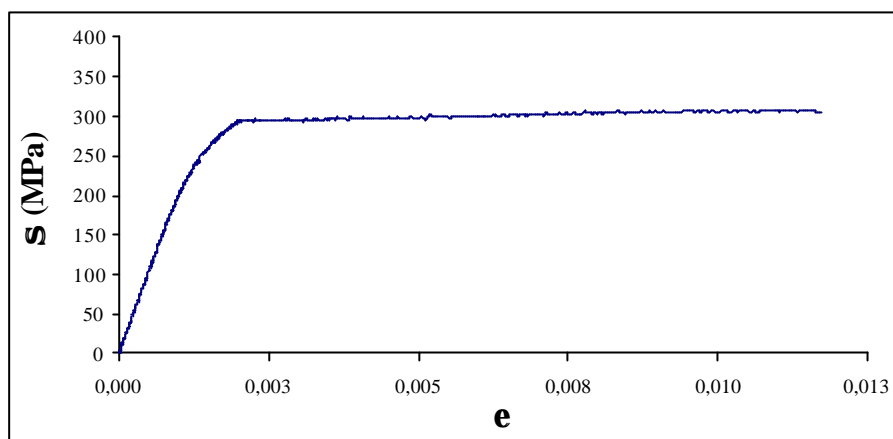


Figura 8.1 - Diagrama tensão-deformação do corpo-de-prova A2 (retirado da mesa do perfil).

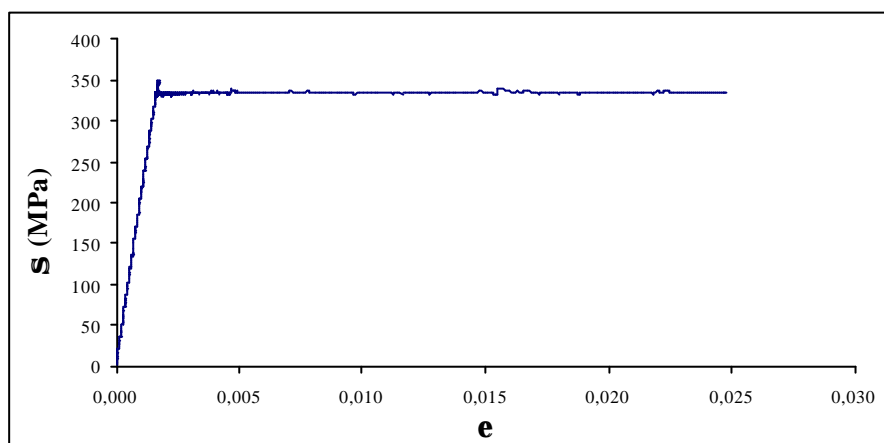


Figura 8.2 - Diagrama tensão-deformação do corpo-de-prova B2 (retirado da alma do perfil).

O diagrama tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$) da figura 8.1 representa o comportamento do aço utilizado nas mesas dos perfis **I-FC** ensaiados à compressão, enquanto que, o diagrama tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$) da figura 8.2 representa o comportamento do aço empregado na alma dos perfis.

Os diagramas tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$) das figuras 8.1 e 8.2 mostram um comportamento diferente do aço utilizado nas mesas e na alma dos perfis, o que caracteriza o emprego de materiais diferentes na fabricação dos perfis metálicos.

8.3 - IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS

As imperfeições geométricas iniciais dos modelos foram determinadas por meio de um ensaio específico para esta finalidade, apresentado no capítulo 5 deste trabalho. Representam-se tais imperfeições por um deslocamento inicial v_0 no meio do vão do perfil metálico, de tal forma que $v_0 = L / \gamma$, ou seja, $v_0 / L = 1 / \gamma$ (por exemplo: $\gamma = 500, 1000, 2000$).

As Tabelas 8.1, 8.2 e 8.3 ilustram os valores da imperfeição geométrica inicial v_0 para cada modelo pertencente aos perfis das séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

Nas Tabelas 8.1, 8.2 e 8.3, o termo $\overline{(v_0 / L)}$ representa a média aritmética dos valores de v_0 / L correspondentes aos modelos de mesmo comprimento.

Tabela 8.1 - Valores da imperfeição inicial para o perfil CS 150x25.

Perfil	L (mm)	Modelo	Eixo ^a	v_0 (mm) ^b	v_0 / L	$\overline{(v_0 / L)}$
CS 150x25	1800	1	y-y	1,13	1/1593	1/1729
		2	y-y	0,95	1/1895	
		3	y-y	1,06	1/1698	
	2200	1	y-y	1,74	1/1264	1/1129
		2	y-y	2,37	1/928	
		3	y-y	1,84	1/1196	
	2900	1	y-y	1,89	1/1534	1/1371
		2	y-y	1,28	1/2266	
		3	y-y	1,78	1/1629	
	3600	1	y-y	2,12	1/1698	1/1646
		2	y-y	1,98	1/1818	
		3	y-y	2,53	1/1423	

Notas:

(a) Eixo principal de menor inércia (y-y) – paralelo à alma do perfil;

(b) A imperfeição inicial v_0 corresponde o deslocamento transversal médio medido ao longo do comprimento do perfil, na direção do eixo de menor inércia.

Tabela 8.2 - Valores da imperfeição inicial para o perfil PS 200x25.

Perfil	L (mm)	Modelo	Eixo ^a	v_0 (mm) ^b	v_0 / L	$\overline{(v_0 / L)}$
PS 200x25	1500	1	y-y	1,08	1/1389	1/1371
		2	y-y	1,06	1/1420	
		3	y-y	1,15	1/1304	
	2000	1	y-y	1,84	1/1087	1/1155
		2	y-y	1,61	1/1242	
		3	y-y	1,76	1/1136	
	2400	1	y-y	1,86	1/1290	1/1147
		2	y-y	2,56	1/938	
		3	y-y	1,98	1/1212	
	3000	1	y-y	3,81	1/787	1/1237
		2	y-y	1,78	1/1685	
		3	y-y	2,42	1/1240	

Notas:

(a) Eixo principal de menor inércia (y-y) – paralelo à alma do perfil;

(b) A imperfeição inicial v_0 corresponde o deslocamento transversal médio medido ao longo do comprimento do perfil, na direção do eixo de menor inércia.

Tabela 8.3 - Valores da imperfeição inicial para o perfil PS 225x29.

Perfil	L (mm)	Modelo	Eixo ^a	v_0 (mm) ^b	v_0 / L	$\overline{(v_0 / L)}$
PS 225x29	1600	1	y-y	1,25	1/1282	1/1444
		2	y-y	0,97	1/1695	
		3	y-y	1,18	1/1356	
	2000	1	y-y	1,01	1/1980	1/1509
		2	y-y	1,64	1/1220	
		3	y-y	1,51	1/1328	
	2500	1	y-y	1,94	1/1289	1/1377
		2	y-y	1,59	1/1572	
		3	y-y	1,97	1/1269	
	3500	1	y-y	1,80	1/1944	1/1697
		2	y-y	2,24	1/1563	
		3	y-y	2,21	1/1584	

Notas:

(a) Eixo principal de menor inércia (y-y) – paralelo à alma do perfil;

(b) A imperfeição inicial v_0 corresponde o deslocamento transversal médio medido ao longo do comprimento do perfil, na direção do eixo de menor inércia.

8.4 – RESULTADOS DO ENSAIO À COMPRESSÃO

O ensaio à compressão dos modelos foi realizado na máquina INSTRON do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenheiros.

Para a realização do ensaio à compressão, os modelos foram instrumentados com transdutores de deslocamentos, conforme ilustra a figura 8.3.

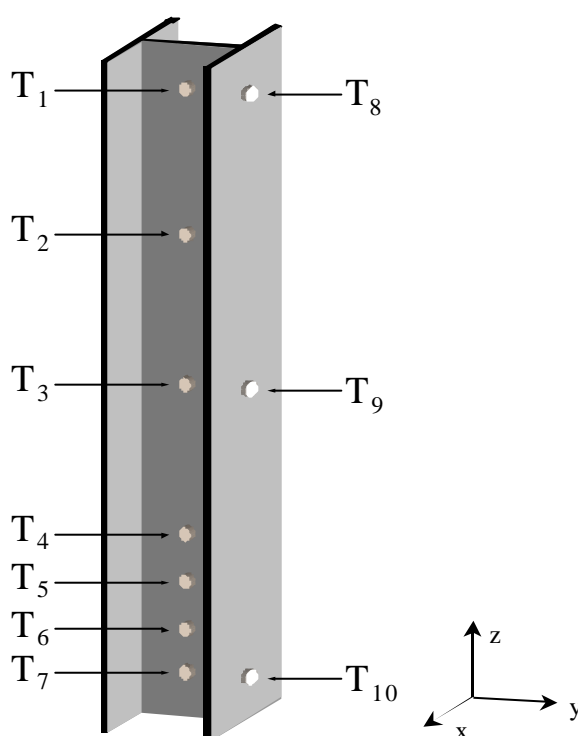


Figura 8.3 – Posições dos transdutores de deslocamento.

A figura 8.3 mostra as posições e numeração dos transdutores de deslocamentos, os quais foram utilizados para medir os deslocamentos laterais \mathbf{v} nas direções y e x , de menor e maior inércia, dos modelos ensaiados à compressão.

Salienta-se ainda que as cotas dos transdutores T_1 a T_{10} para cada modelo encontram-se apresentadas nas Tabelas 5.7 e 5.8 do capítulo 5.

Os principais resultados obtidos do ensaio à compressão foram a força normal E e os deslocamentos laterais \mathbf{v} .

Durante a execução do ensaio à compressão na máquina INSTRON, o modelo é submetido a um carregamento crescente até que se atinja um valor -se automaticamente o descarregamento. Salientando que a força normal de compressão é aplicada com controle de deformação.

Em modelos com imperfeição inicial v_0 , à medida que se aumenta o valor da força aplicada aumenta-se também o deslocamento lateral v , conforme ilustra a figura 8.4.

Denomina-se força normal crítica experimental N_E , à máxima força medida durante a execução do ensaio do modelo, conforme mostra a figura 8.4.

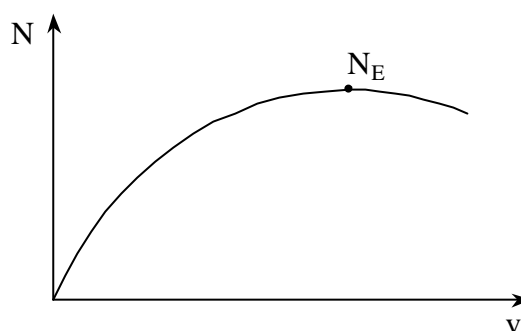


Figura 8.4 – Diagrama força-deslocamento lateral.

Os valores da força normal crítica experimental N_E dos modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustrados nas Tabelas 8.10, 8.11 e 8.12, as quais serão apresentadas na seção 8.5 deste capítulo.

8.4.1 – Diagrama força-deslocamento

Apresenta-se nesta seção os diagramas força-deslocamento para o modelo 2, de comprimento $L = 2400\text{mm}$, do perfil PS 200x25.

Os diagramas força-deslocamento para cada transdutor de deslocamento são plotados a partir dos resultados experimentais da força de compressão e dos deslocamentos laterais v medidos.

As figuras 8.5 a 8.11 apresentam os diagramas força-deslocamento nas posições dos transdutores 1 a 7. Os transdutores 1 a 7 encontram-se posicionados na alma do perfil, conforme ilustra a figura 8.3.

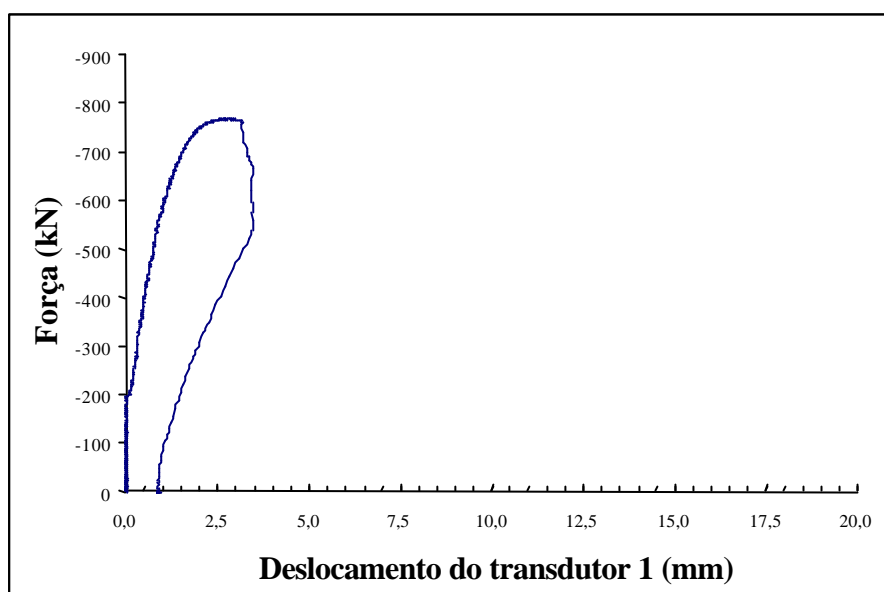


Figura 8.5 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 1 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

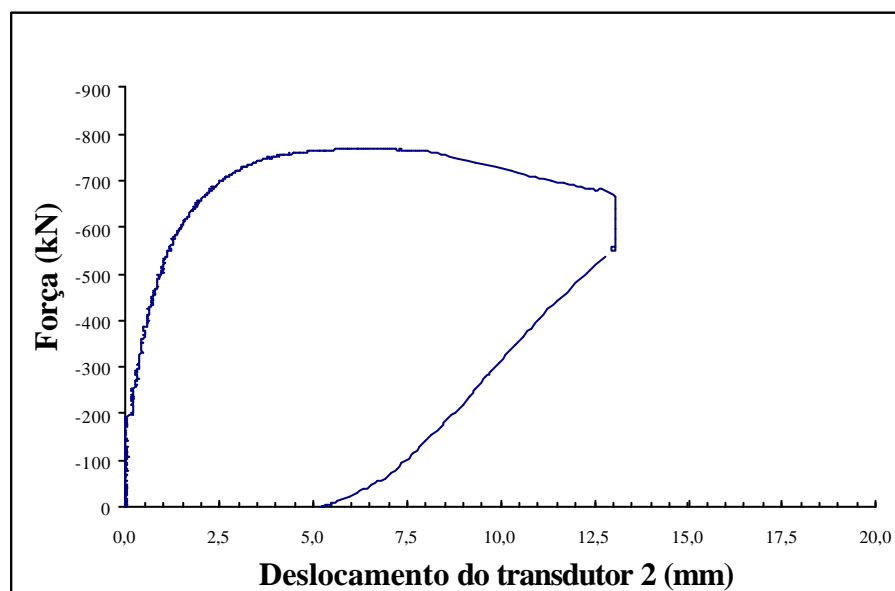


Figura 8.6 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 2 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

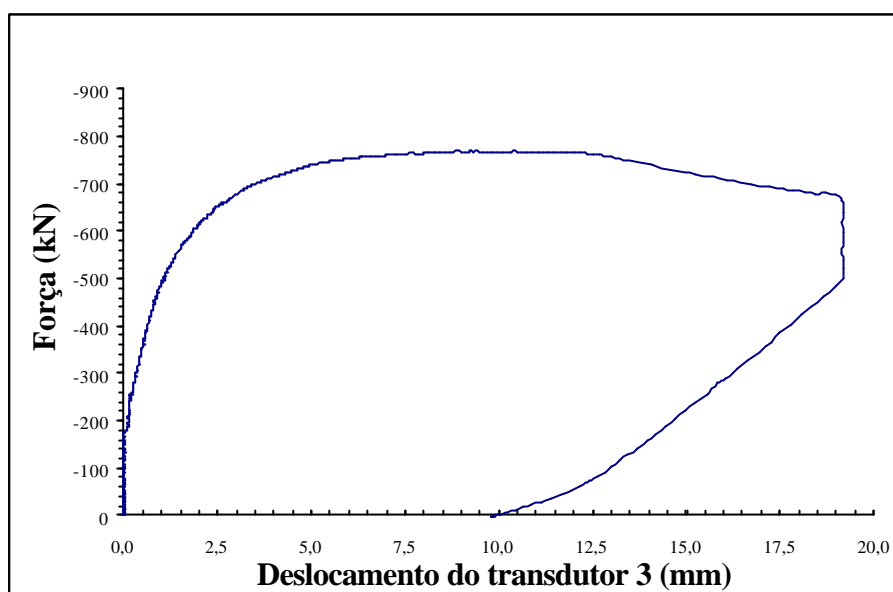


Figura 8.7 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 3 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

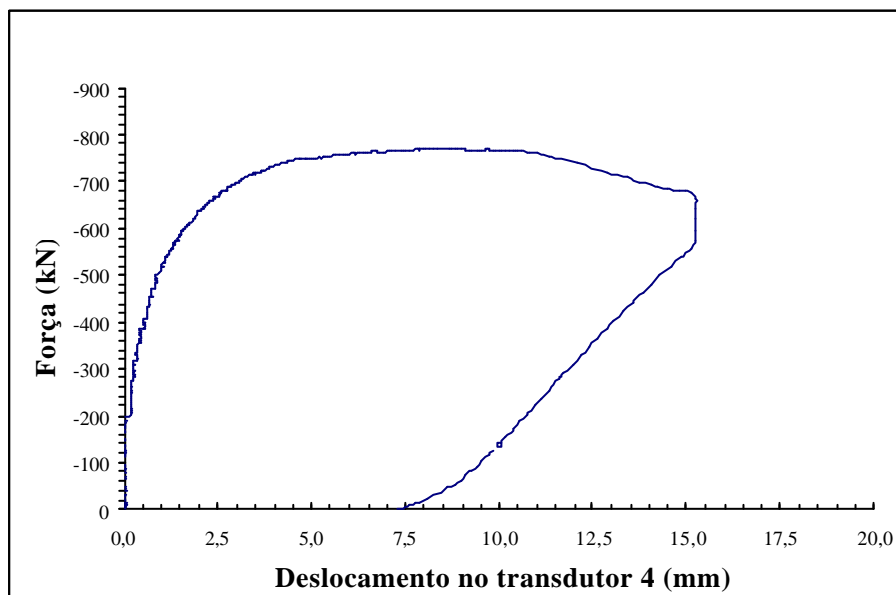


Figura 8.8 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 4 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

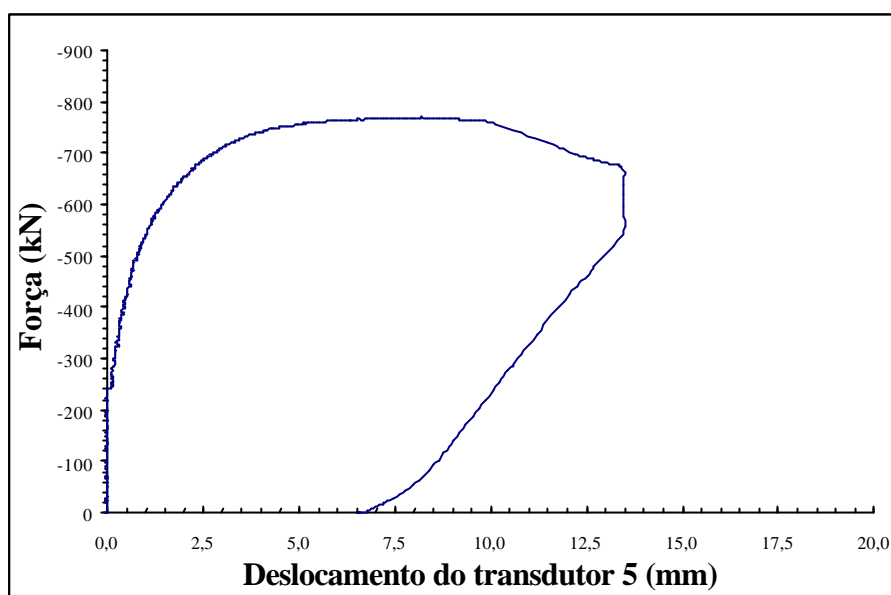


Figura 8.9 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 5 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

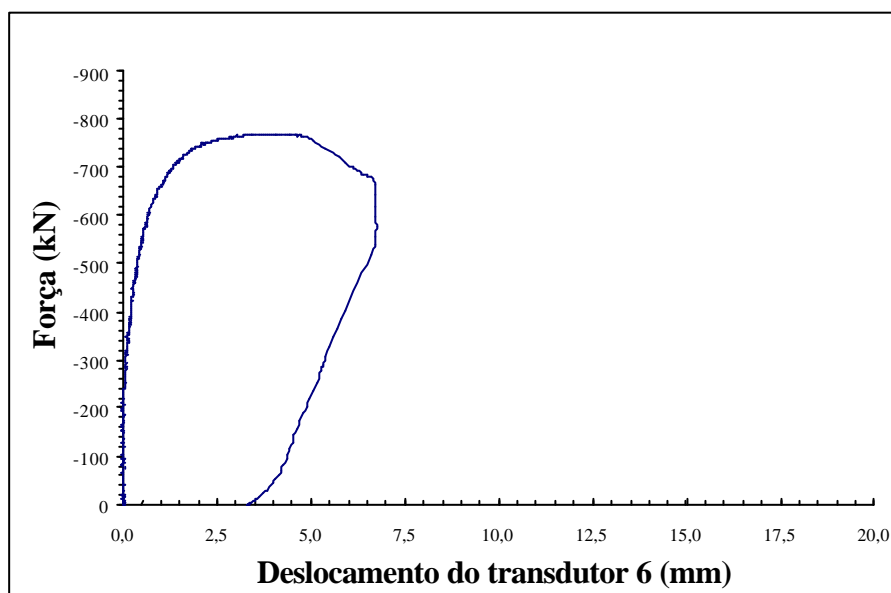


Figura 8.10 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 6 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

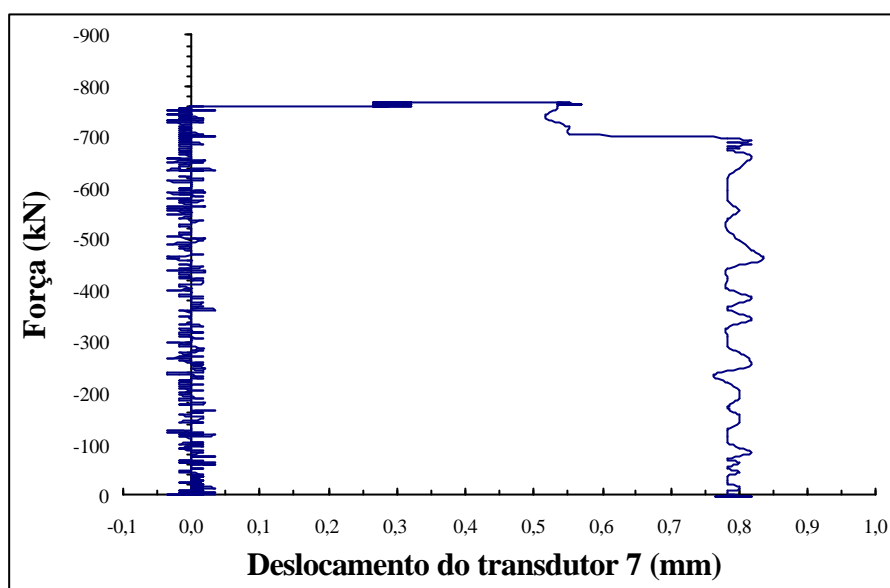


Figura 8.11 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 7 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

As figuras 8.12, 8.13 e 8.14 ilustram os diagramas força-deslocamento dos transdutores 8, 9 e 10, respectivamente, para o modelo 2, de comprimento $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25. Os transdutores 8, 9 e 10 estão posicionados na mesa do perfil, conforme ilustra a figura 8.3.

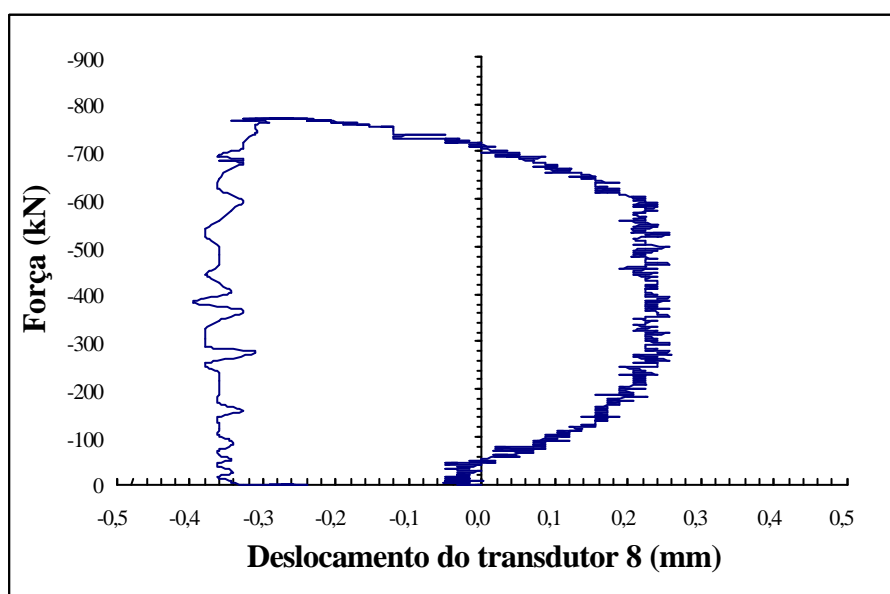


Figura 8.12 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 8 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

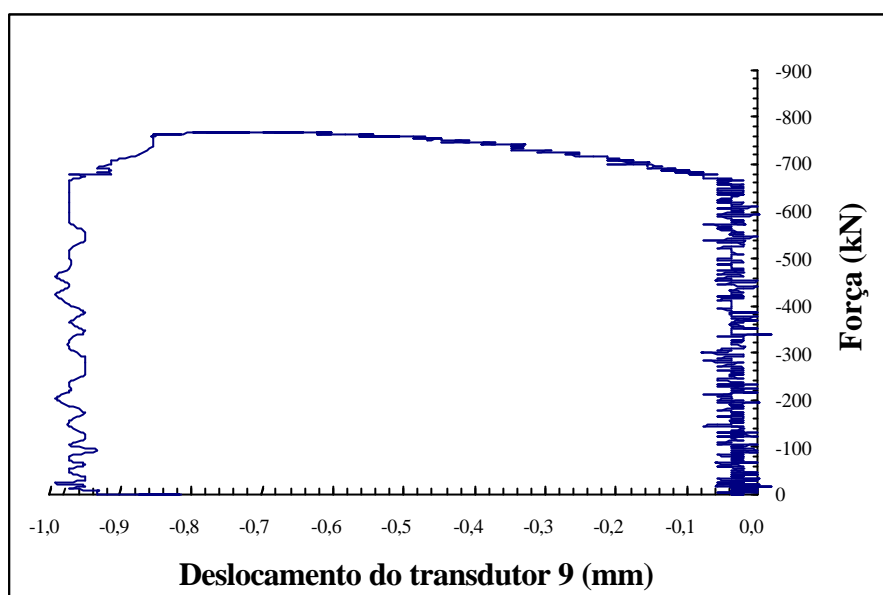


Figura 8.13 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 9 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

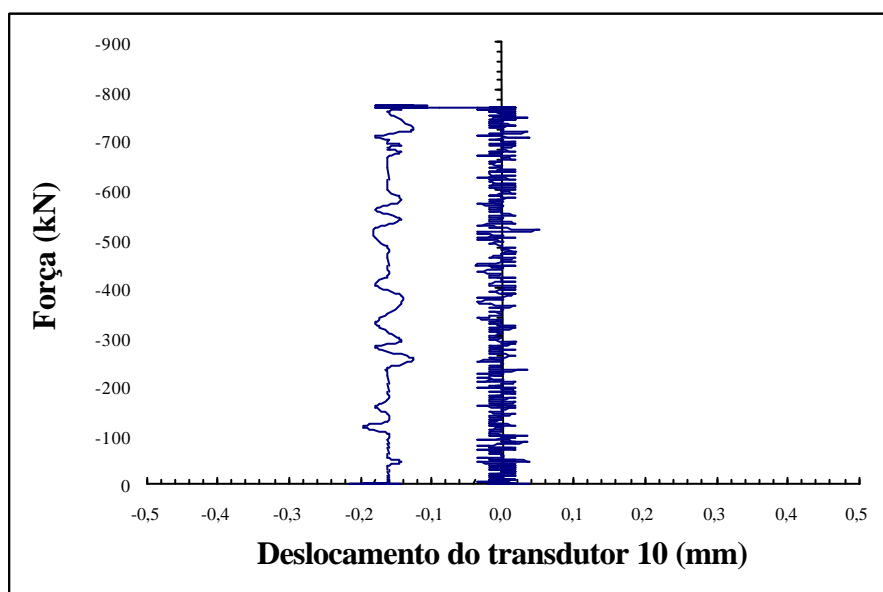


Figura 8.14 - Diagrama força-deslocamento do transdutor 10 para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

As figuras 8.5 a 8.14 mostram que a força normal crítica experimental de E para o modelo 2, de comprimento $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25 é igual a 769 kN.

8.4.2 – Diagrama força-deformação

A figura 8.15 ilustra os extensômetros elétricos de resistência, posicionados em todos os modelos na seção da altura média do perfil, figura 8.15a, localizados nas mesas e na alma do perfil PS 200x25, figura 8.15b.

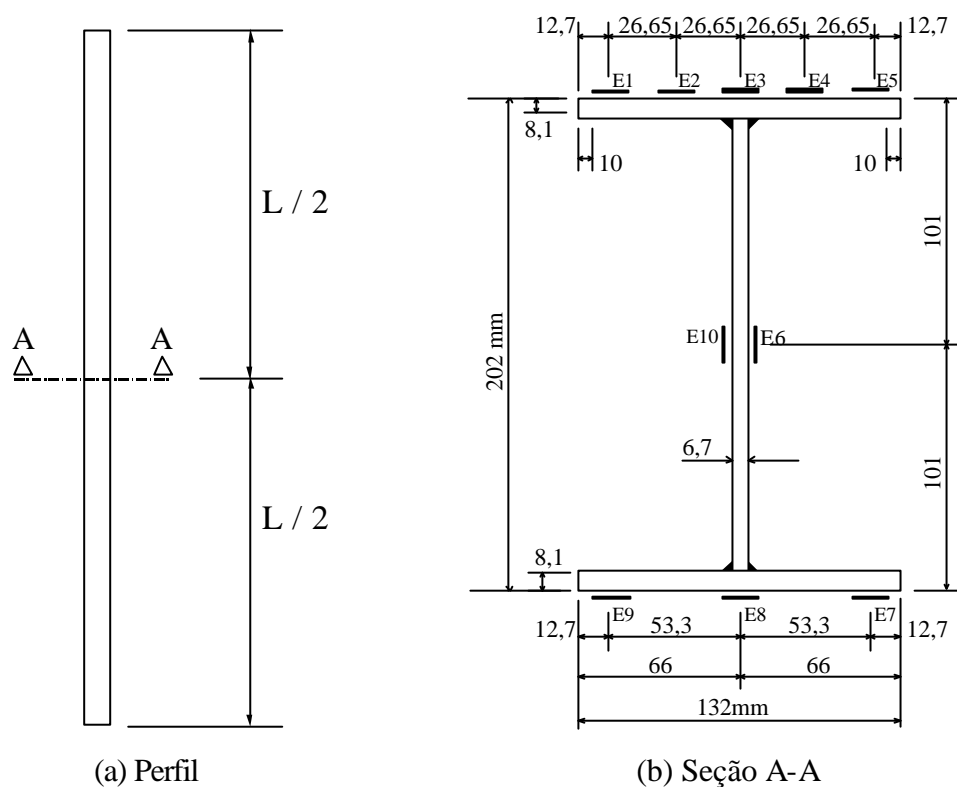


Figura 8.15 - Posições dos extensômetros na altura média do modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

Como exemplo, a figura 8.16 apresenta o diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa superior do modelo analisado.

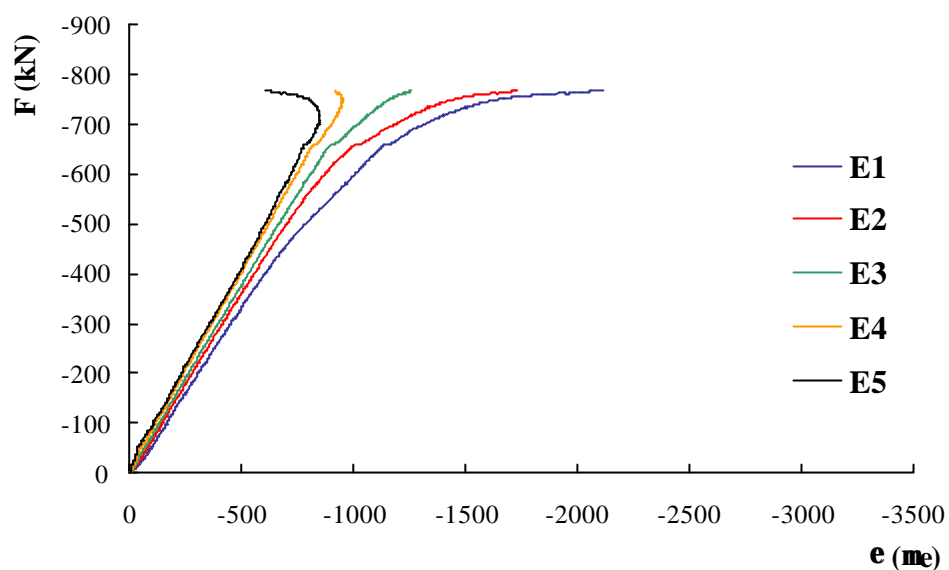


Figura 8.16 - Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa superior do modelo.

A figura 8.17 apresenta o diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo analisado.

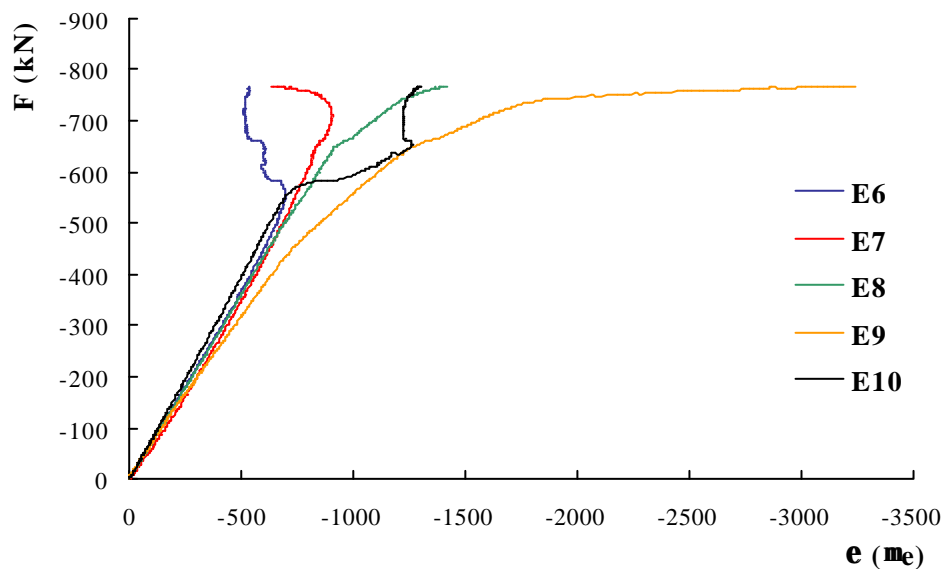


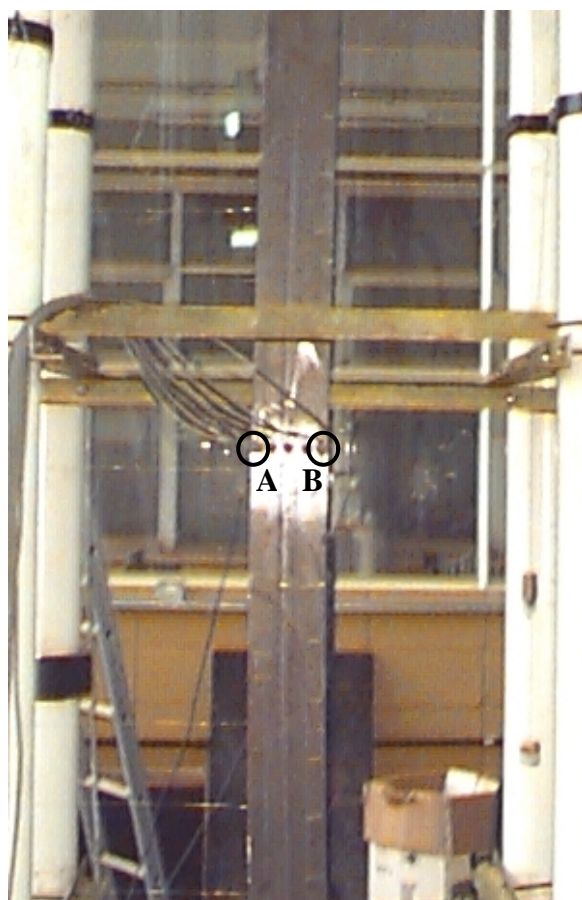
Figura 8.17 - Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo.

Analisando os gráficos das figuras 8.16 e 8.17 pode-se verificar que as regiões mais comprimidas localizam-se nas posições dos extensômetros E_1 e E_9 , posicionados simetricamente, enquanto que, as posições dos extensômetros E_5 e E_7 , também simétricos, representam as regiões menos comprimidas, conforme ilustra a figura 8.18.

O resultado observado no extensômetro E_9 evidencia que na região da mesa onde se localiza este extensômetro, ocorreu uma maior compressão das fibras durante o fenômeno de flexão do modelo.

A alteração do comportamento nos extensômetros E_6 e E_{10} após a força aplicada atingir o valor de 550 kN, indica que ocorreu algum efeito local durante a compressão do modelo.

Salienta-se que o modelo apresentado na figura 8.18 corresponde ao modelo 2, de comprimento $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.



A – E_5 → menor compressão

B – E_1 → maior compressão

Figura 8.18 – Posição dos extensômetros no modelo deformado.

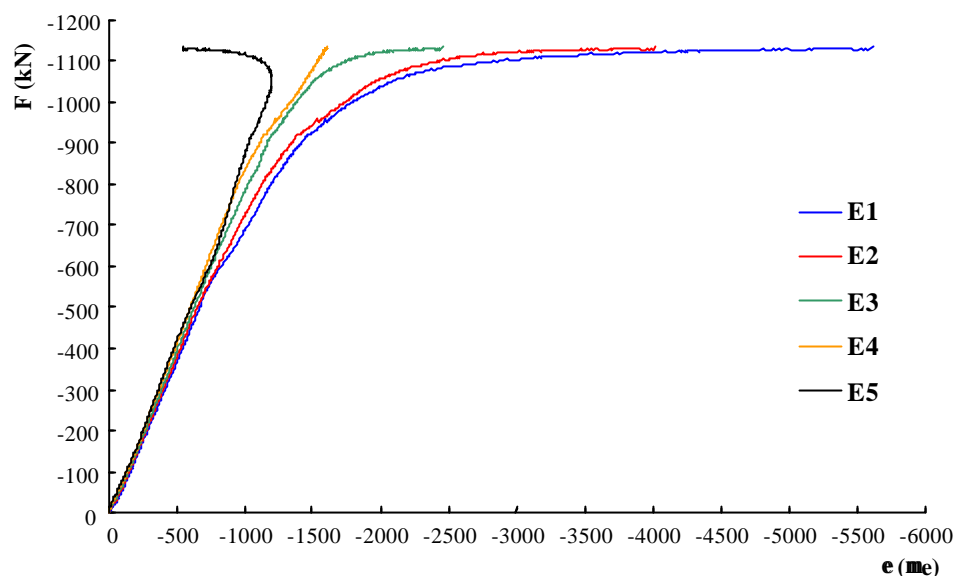


Figura 8.20 - Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa superior do modelo.

A figura 8.21 apresenta o diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo analisado.

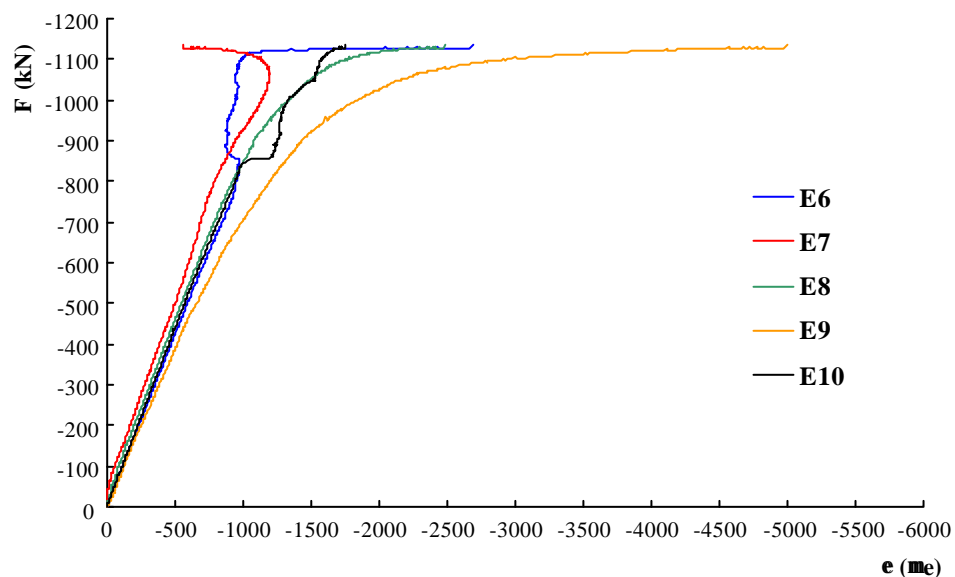


Figura 8.21 - Diagrama força-deformação para os extensômetros localizados na mesa inferior e na alma do modelo.

A alteração do comportamento nos extensômetros E_6 e E_{10} após a força aplicada ter atingido o valor de 850 kN, caracteriza que ocorreu algum efeito local durante a compressão do modelo.

8.4.3 – Deslocamentos laterais

Apresenta-se nesta seção, os valores dos deslocamentos laterais máximos, medidos por meio dos transdutores de deslocamento 1 a 7 posicionados na alma do perfil (direção y – menor inércia) e 8 a 10 posicionados na mesa (direção x – maior inércia), conforme ilustra a figura 8.3.

As Tabelas 8.4, 8.5 e 8.6 ilustram os deslocamentos laterais máximos para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Os deslocamentos laterais máximos apresentados nestas Tabelas correspondem aos deslocamentos medidos para a força máxima de cada modelo.

Nos Anexos IV, V e VI serão apresentados, para as séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29, os deslocamentos laterais v (mm) medidos durante a execução do ensaio à compressão, admitindo a faixa de aplicação da força variando de 50 kN em 50 kN até atingir o valor crítico.

Tabela 8.4 – Deslocamentos laterais máximos para a série CS 150x25.

L (cm)	Modelo	Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
180	1	951	3	7	11	8	7	4	1	0	-1	0
	2	1044	-1	0	2	2	1	1	0	0	-3	0
	3	959	1	5	8	6	6	3	1	0	1	1
220	1	916	2	4	7	6	4	3	0	0	-5	0
	2	849	-2	-5	-8	-6	-4	-2	0	-1	-1	0
	3	924	-1	-2	-4	-3	-2	-1	0	0	0	0
290	1	788	1	4	10	6	5	2	0	0	2	0
	2	894	0	2	3	2	1	1	0	0	-2	1
	3	783	1	5	10	8	7	4	0	0	3	0
360	1	699	-1	-6	-11	-8	-7	-3	0	0	3	0
	2	708	1	5	10	8	7	3	0	-1	-4	0
	3	676	1	7	11	9	8	4	1	0	3	0

Tabela 8.5 – Deslocamentos laterais máximos para a série PS 200x25.

L (cm)	Modelo	Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
150	1	1029	-1	-3	-2	-3	-3	-1	0	0	1	0
	2	985	1	2	5	4	3	1	0	1	3	1
	3	964	2	6	4	8	7	3	1	1	1	0
200	1	836	2	7	11	10	7	5	1	0	0	0
	2	1011	0	1	4	2	1	0	0	-1	0	0
	3	859	2	6	8	7	5	3	1	1	0	0
240	1	936	0	1	2	2	1	1	0	0	1	0
	2	769	3	6	9	8	7	4	0	0	-1	0
	3	850	1	2	3	4	3	2	0	0	3	1
300	1	573	-3	-13	-18	-14	-10	-6	-1	-2	-14	-1
	2	813	0	-11	-6	-3	-1	-1	0	-3	-5	0
	3	785	-1	-6	-8	-4	-3	-2	0	1	0	0

Tabela 8.6 – Deslocamentos laterais máximos para a série PS 225x29

L (cm)	Modelo	Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
160	1	1135	3	6	9	8	8	4	1	0	1	0
	2	1162	1	5	7	6	5	3	1	0	*	1
	3	1144	3	6	4	7	6	3	1	0	0	0
200	1	1155	-1	-4	-4	-2	-1	0	0	0	1	0
	2	978	4	9	13	12	9	6	1	0	0	0
	3	1055	3	7	10	8	6	4	1	0	0	0
250	1	953	3	8	11	10	7	4	1	0	-2	0
	2	917	3	9	13	11	8	5	1	0	0	0
	3	845	3	10	15	13	9	5	1	0	-1	0
350	1	850	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
	2	752	1	9	14	10	8	4	0	0	0	0
	3	763	-2	-8	-15	-12	-11	-5	-1	0	-2	0

* Devido a problemas com o transdutor 9, suas medidas foram desprezadas para este modelo.

A partir dos deslocamentos laterais v , apresentados nos Anexos IV a VI, pode-se determinar a posição deformada, elástica, para os modelos ensaiados à

A figura 8.22 ilustra um exemplo de posição deformada do modelo 2, de comprimento $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25, salientando que este aspecto foi utilizado para justificar a impossibilidade de se aplicar, nos modelos teórico, a hipótese dos apoios com extremidades articuladas.

A elástica dos demais modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustradas nos Anexos I, II e III deste trabalho.

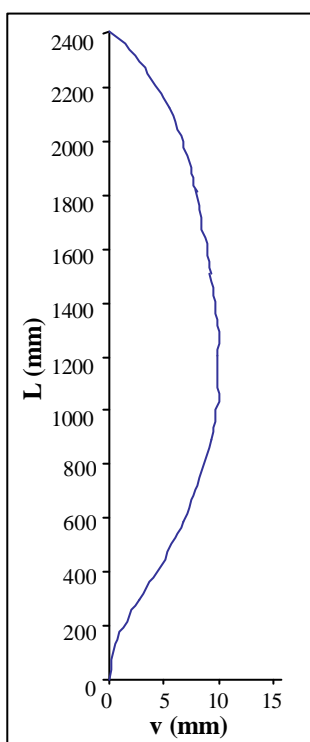


Figura 8.22 – Elástica modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25.

Obtém-se a partir do modelo de flambagem, apresentado na figura 8.22, uma equação do quarto grau que representa sua elástica:

$$y = 2.10^{-13}z^4 + 1.10^{-9}z^3 - 1.10^{-5}z^2 + 0,0212z - 0,7694 \quad (8.1)$$

Os pontos onde a segunda derivada da equação que representa a elástica do enominados pontos de inflexão. À distância entre os pontos de inflexão é definida como comprimento efetivo de flambagem L_{fl} , conforme ilustra figura 8.23.

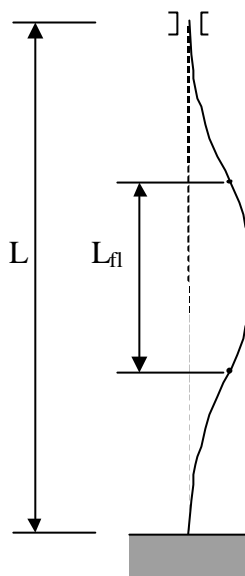


Figura 8.23 - Modelo de flambagem de uma coluna com as extremidades engastadas.

Considerando $L_{fl} = kL$, tem-se:

$$k = L_{fl} / L \quad (8.2)$$

Onde k é denominado fator comprimento efetivo de flambagem.

Para o modelo 2, de $L = 2400$ mm, do perfil PS 200x25, tem-se a partir da expressão (8.1), $L_{fl} = 1920$ mm. Substituindo-se $L_{fl} = 1920$ mm na expressão (8.2), obtém-se o fator $k = 0,80$.

As Tabelas 8.7, 8.8 e 8.9 apresentam as expressões que representam as los pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Nestas Tabelas, as expressões $y = f(z)$ correspondem à elástica na direção do eixo $y - y$ (de menor inércia) e as expressões $x = f(z)$ representam a elástica na direção do eixo $x - x$ (de maior inércia).

Tabela 8.7 - Expressões das elásticas para os modelos da série CS 150x25.

SÉRIE	L (mm)	MODELO	EXPRESSÕES DA ELÁSTICA
CS150	1800	1	$y = 6.10^{-12}z^4 - 2.10^{-08}z^3 + 4.10^{-06}z^2 + 0,0212z - 0,5433$ $x = -2.10^{-12}z^4 + 8.10^{-09}z^3 - 8.10^{-06}z^2 + 0,0005z - 3.10^{-12}$
		2	$y = 3.10^{-12}z^4 - 1.10^{-08}z^3 + 7.10^{-06}z^2 - 0,0012z + 0,02$ $x = -5.10^{-12}z^4 + 2.10^{-08}z^3 - 1.10^{-05}z^2 - 0,002z - 6.10^{-12}$
		3	$y = 4.10^{-12}z^4 - 1.10^{-08}z^3 - 5.10^{-06}z^2 + 0,0217z - 0,4455$ $x = -1.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 - 8.10^{-06}z^2 + 0,0071z - 1.10^{-12}$
	2200	1	$y = 7.10^{-13}z^4 - 2.10^{-09}z^3 - 5.10^{-06}z^2 + 0,0117z - 0,3419$ $x = -5.10^{-12}z^4 + 2.10^{-08}z^3 - 2.10^{-05}z^2 + 0,0043z + 2.10^{-12}$
		2	$y = -1.10^{-12}z^4 + 6.10^{-09}z^3 - 6.10^{-06}z^2 - 0,0003z + 0,0852$ $x = 1.10^{-12}z^4 - 4.10^{-09}z^3 + 2.10^{-06}z^2 - 0,0003z + 1.10^{-12}$
		3	$y = -9.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 + 1.10^{-06}z^2 - 0,0072z + 0,2706$ $x = 5.10^{-13}z^4 - 2.10^{-09}z^3 + 1.10^{-06}z^2 + 8.10^{-05}z + 2.10^{-13}$
	2900	1	$y = 1.10^{-13}z^4 - 7.10^{-10}z^3 + 4.10^{-07}z^2 + 0,0013z - 0,0871$ $x = 1.10^{-13}z^4 - 1.10^{-09}z^3 + 2.10^{-06}z^2 - 0,0002z + 1.10^{-12}$
		2	$y = 5.10^{-13}z^4 - 3.10^{-09}z^3 + 3.10^{-06}z^2 + 0,0019z - 0,0671$ $x = -7.10^{-13}z^4 + 5.10^{-09}z^3 - 1.10^{-05}z^2 + 0,0068z + 3.10^{-12}$
		3	$y = 1.10^{-12}z^4 - 6.10^{-09}z^3 + 4.10^{-08}z^2 + 0,0169z - 0,6821$ $x = 4.10^{-13}z^4 - 2.10^{-09}z^3 + 2.10^{-06}z^2 + 0,0025z + 1.10^{-12}$
	3600	1	$y = -3.10^{-13}z^4 + 2.10^{-09}z^3 - 1.10^{-06}z^2 - 0,0055z + 0,237$ $x = 4.10^{-13}z^4 - 3.10^{-09}z^3 + 5.10^{-06}z^2 - 0,0006z + 3.10^{-13}$
		2	$y = 3.10^{-13}z^4 - 2.10^{-09}z^3 + 1.10^{-06}z^2 + 0,0046z - 0,2091$ $x = -8.10^{-14}z^4 + 9.10^{-10}z^3 - 2.10^{-06}z^2 - 0,002z + 5.10^{-13}$
		3	$y = 7.10^{-14}z^4 - 3.10^{-10}z^3 - 8.10^{-07}z^2 + 0,0041z - 0,2059$ $x = 1.10^{-13}z^4 - 1.10^{-09}z^3 + 3.10^{-06}z^2 - 0,0006z - 6.10^{-14}$

Tabela 8.8 - Expressões das elásticas para os modelos da série PS 200x25.

SÉRIE	L (mm)	MODELO	EQUAÇÃO DA ELÁSTICA
PS 200	1500	1	$y = 9.10^{-12}z^4 - 3.10^{-08}z^3 + 3.10^{-05}z^2 - 0,0189z + 0,5218$ $x = -2.10^{-12}z^4 + 7.10^{-09}z^3 - 9.10^{-06}z^2 + 0,0042z + 1.10^{-12}$
		2	$y = 7.10^{-12}z^4 - 2.10^{-08}z^3 + 1.10^{-05}z^2 - 0,002z - 0,0514$ $x = -7.10^{-12}z^4 + 2.10^{-08}z^3 - 1.10^{-05}z^2 + 0,007z + 3.10^{-12}$
		3	$y = -7.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 - 4.10^{-06}z^2 + 0,0025z - 0,0855$ $x = -4.10^{-12}z^4 + 9.10^{-09}z^3 - 6.10^{-06}z^2 + 0,0034z + 2.10^{-12}$
	2000	1	$y = 4.10^{-12}z^4 - 1.10^{-08}z^3 - 2.10^{-06}z^2 + 0,0225z - 0,6244$ $x = -2.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 - 8.10^{-06}z^2 + 0,0052z - 3.10^{-13}$
		2	$y = 7.10^{-12}z^4 - 3.10^{-08}z^3 + 3.10^{-05}z^2 - 0,0053z + 0,1245$ $x = 2.10^{-12}z^4 - 7.10^{-09}z^3 + 5.10^{-06}z^2 - 0,0005z - 1.10^{-12}$
		3	$y = 2.10^{-12}z^4 - 4.10^{-09}z^3 - 6.10^{-06}z^2 + 0,018z - 0,5365$ $x = -2.10^{-12}z^4 + 8.10^{-09}z^3 - 6.10^{-06}z^2 + 0,0005z + 1.10^{-12}$
	2400	1	$y = 1.10^{-12}z^4 - 6.10^{-09}z^3 + 7.10^{-06}z^2 - 0,0003z + 0,0469$ $x = 7.10^{-13}z^4 - 3.10^{-09}z^3 + 4.10^{-06}z^2 + 2.10^{-05}z + 3.10^{-13}$
		2	$y = 2.10^{-13}z^4 + 1.10^{-09}z^3 - 1.10^{-05}z^2 + 0,0212z - 0,7694$ $x = 1.10^{-12}z^4 - 6.10^{-09}z^3 + 8.10^{-06}z^2 - 0,0032z - 4.10^{-12}$
		3	$y = -3.10^{-13}z^4 + 2.10^{-09}z^3 - 3.10^{-06}z^2 + 0,0014z - 0,0132$ $x = 8.10^{-13}z^4 - 3.10^{-09}z^3 + 8.10^{-07}z^2 + 0,0058z + 4.10^{-12}$
	3000	1	$y = -7.10^{-13}z^4 + 4.10^{-09}z^3 + 3.10^{-06}z^2 - 0,0221z + 0,6685$ $x = -7.10^{-13}z^4 + 5.10^{-09}z^3 - 5.10^{-06}z^2 - 0,0102z + 6.10^{-12}$
		2	$y = 1.10^{-12}z^4 - 4.10^{-09}z^3 + 1.10^{-06}z^2 - 0,0022z + 0,0206$ $x = 1.10^{-12}z^4 - 6.10^{-09}z^3 + 7.10^{-06}z^2 - 0,0043z + 2.10^{-11}$
		3	$y = -4.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 - 5.10^{-06}z^2 - 0,0007z - 0,0212$ $x = -7.10^{-13}z^4 + 3.10^{-09}z^3 - 3.10^{-06}z^2 + 0,0001z - 7.10^{-12}$

Tabela 8.9 - Expressões das elásticas para os modelos da série PS 225x29.

SÉRIE	L (mm)	MODELO	EQUAÇÃO DA ELÁSTICA
PS 225	1600	1	$y = 3.10^{-13}z^4 + 4.10^{-09}z^3 - 2.10^{-05}z^2 + 0,0295z - 0,7031$ $x = 2.10^{-12}z^4 - 5.10^{-09}z^3 + 3.10^{-06}z^2 + 6.10^{-05}z + 4.10^{-13}$
		2	$y = 6.10^{-12}z^4 - 2.10^{-08}z^3 + 7.10^{-06}z^2 + 0,0072z - 0,1849$ *
		3	$y = -1.10^{-11}z^4 + 4.10^{-08}z^3 - 4.10^{-05}z^2 + 0,0191z - 0,3967$ $x = 9.10^{-15}z^4 + 6.10^{-11}z^3 - 1.10^{-07}z^2 + 1.10^{-05}z - 4.10^{-14}$
	2000	1	$y = -2.10^{-12}z^4 + 1.10^{-08}z^3 - 1.10^{-05}z^2 - 6.10^{-05}z + 0,1027$ $x = -1.10^{-12}z^4 + 5.10^{-09}z^3 - 6.10^{-06}z^2 + 0,0033z + 8.10^{-13}$
		2	$y = 6.10^{-13}z^4 + 7.10^{-10}z^3 - 2.10^{-05}z^2 + 0,0295z - 0,7343$ $x = -3.10^{-14}z^4 - 4.10^{-10}z^3 + 2.10^{-06}z^2 - 0,0014z + 9.10^{-14}$
		3	$y = 2.10^{-12}z^4 - 6.10^{-09}z^3 - 4.10^{-06}z^2 + 0,0183z - 0,3989$ $x = -3.10^{-13}z^4 + 2.10^{-09}z^3 - 3.10^{-06}z^2 + 0,0015z - 2.10^{-14}$
	2500	1	$y = 5.10^{-13}z^4 - 1.10^{-09}z^3 - 8.10^{-06}z^2 + 0,0201z - 0,5601$ $x = -1.10^{-12}z^4 + 5.10^{-09}z^3 - 7.10^{-06}z^2 + 0,0005z - 2.10^{-12}$
		2	$y = 3.10^{-13}z^4 - 7.10^{-10}z^3 - 5.10^{-06}z^2 + 0,014z - 0,5099$ $x = -8.10^{-13}z^4 + 5.10^{-09}z^3 - 9.10^{-06}z^2 + 0,0051z - 1.10^{-12}$
		3	$y = 9.10^{-13}z^4 - 4.10^{-09}z^3 - 5.10^{-07}z^2 + 0,0111z - 0,4339$ $x = 2.10^{-13}z^4 - 9.10^{-10}z^3 + 1.10^{-06}z^2 - 1.10^{-04}z + 3.10^{-13}$
	3500	1	$y = 4.10^{-13}z^4 - 3.10^{-09}z^3 + 6.10^{-06}z^2 - 0,0011z + 0,0212$ $x = -6.10^{-14}z^4 + 6.10^{-10}z^3 - 1.10^{-06}z^2 - 0,0002z + 3.10^{-12}$
		2	$y = 2.10^{-13}z^4 - 2.10^{-09}z^3 + 2.10^{-06}z^2 + 0,0034z - 0,1467$ $x = -7.10^{-15}z^4 + 3.10^{-11}z^3 - 3.10^{-08}z^2 + 3.10^{-06}z - 1.10^{-13}$
		3	$y = -2.10^{-13}z^4 + 1.10^{-09}z^3 + 2.10^{-06}z^2 - 0,0096z + 0,4309$ $x = -1.10^{-13}z^4 + 8.10^{-10}z^3 - 1.10^{-06}z^2 - 5.10^{-05}z + 2.10^{-12}$

* As leituras foram desprezadas, devido a problemas no transdutor T₉.

E superior à força normal de escoamento teórica N_y , caracterizando que o modelo atingiu o escoamento total da seção transversal.

Deve-se verificar a flambagem por torção, para o modelo 2, de comprimento $L = 2900$ mm, do perfil CS 150x25, com pequenos deslocamentos laterais v nas direções dos eixos $y - y$ (de menor inércia) e $x - x$ (de maior inércia).

Tabela 8.11 – Principais valores experimentais para os modelos da série PS 200x25.

Modelo	L (mm)	v_0/L	N_E (kN)	v (mm) T_3	v (mm) T_9	k_y	k_x
1	1500	1/1389	1029	2	1	0,50	0,17
2	1500	1/1420	985	5	3	0,70	0,70
3	1500	1/1304	964	4	1	0,58	0,34
1	2000	1/1087	836	11	0	0,66	0,49
2	2000	1/1242	1011	4	0	0,66	0,59
3	2000	1/1136	859	7	0	0,68	0,71
1	2400	1/1290	936	2	1	0,81	0,37
2	2400	1/938	769	9	1	0,79	0,77
3	2400	1/1212	850	3	3	0,75	0,70
1	3000	1/787	573	18	14	1,00	0,88
2	3000	1/1685	813	6	5	0,61	0,69
3	3000	1/1240	785	8	0	0,77	0,44

Tabela 8.12 – Principais valores experimentais para os modelos da série PS 225x29.

Modelo	L (mm)	v_0/L	N_E (kN)	v (mm) T_3	v (mm) T_9	k_y	k_x
1	1600	1/1282	1135	9	1	0,86	0,47
2	1600	1/1695	1162	7	*	0,88	*
3	1600	1/1356	1144	4	0	0,72	0,30
1	2000	1/1980	1155	4	1	0,80	0,75
2	2000	1/1220	978	13	0	1,00	0,69
3	2000	1/1328	1055	10	0	0,85	0,69
1	2500	1/1289	953	11	2	0,88	0,50
2	2500	1/1572	917	13	0	0,94	0,60
3	2500	1/1269	845	15	1	0,91	0,53
1	3500	1/1944	850	0	1	0,77	0,82
2	3500	1/1563	752	14	0	0,90	0,38
3	3500	1/1584	763	15	2	0,87	0,87

* As leituras foram desprezadas, devido a problemas no transdutor T_9 .

O modelo 1, de $L = 1500$ mm, do perfil PS 200x25 apresenta uma força N_E superior à força normal de escoamento teórica N_y , caracterizando que o modelo atingiu o escoamento total da seção transversal.

Deve-se verificar a flambagem por torção, para os modelos 1 e 3, de comprimento $L = 2400$ mm, e o modelo 2, de comprimento $L = 3000$ mm, do perfil PS 200x25, com pequenos deslocamentos nas direções dos eixos $y - y$ (menor inércia) e $x - x$ (maior inércia).

A flambagem por torção deverá ser verificada, para os modelos de número 1, de comprimentos $L = 2000$ mm e $L = 3500$ mm, do perfil PS 225x29, com pequenos deslocamentos nas direções dos eixos $y - y$ (menor inércia) e $x - x$ (maior inércia).

8.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A imperfeição geométrica inicial v_0 mostrada nas Tabelas 8.1, 8.2 e 8.3 foi utilizada para o cálculo da força normal crítica teórica de compressão N_T , apresentada no capítulo 7.

Os valores da força normal crítica experimental N_E serão utilizados no capítulo 9 para fins de comparação com a força normal crítica teórica N_T e numérica N_{TA} , para os modelos analisados, bem como para a verificação de pontos isolados da curva de resistência à compressão adotada para os perfis **I – FC**.

A força normal crítica experimental N_E também será utilizada no capítulo 9 para comparação com a força normal crítica obtida pelas normas de cálculo NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992, para os modelos em análise.

Analisando os gráficos das figuras 8.5 a 8.11 e 8.12 a 8.14 para os transdutores posicionados na alma dos perfis (direção do eixo $y - y$) e na mesa (direção do eixo $x - x$) verifica-se que os deslocamentos na direção $x - x$ são insignificantes em relação aos deslocamentos na direção $y - y$. Justifica-se, portanto, que a perda de estabilidade ocorre na direção do eixo de menor inércia do eixo $y - y$.

As figuras correspondentes às elásticas dos modelos citados nas Tabelas 8.7, 8.8 e 8.9 encontram-se apresentados nos Anexos I, II e III deste trabalho.

9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

9.1 - GENERALIDADES

Apresenta-se neste capítulo, uma análise comparativa entre os resultados teórico e experimental da força normal crítica dos trinta e seis (36) modelos ensaiados à compressão, formados pelo perfil **I – FC** de pequenas dimensões. Os modelos ensaiados pertencem às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

Os resultados da força normal crítica teórica N_T e numérica N_{TA} , apresentados nas Tabelas 9.1 a 9.3, foram obtidos por meio das análises via formulação via método dos elementos finitos, discutidas no capítulo 6.

Os resultados da força normal crítica experimental N_E foram determinados por meio da realização de ensaios à compressão dos modelos na máquina de ensaio INSTRON do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, conforme análise experimental

A força normal crítica experimental N_E e a força normal crítica obtida segundo as recomendações das normas NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992 são comparadas com a finalidade de se determinar uma correlação entre os resultados obtidos e as prescrições normativas.

Discute-se também, alguns pontos isolados das curvas de flambagem **b** e **c** do Eurocode 3: 1992, a partir da média dos valores da força normal crítica experimental e dos valores da força normal crítica teórica, para os modelos analisados.

9.2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA FORÇA CRÍTICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL

Apresenta-se nesta seção, uma análise comparativa entre os resultados da força normal crítica experimental N_E e os valores da força normal crítica teórica N_T (determinada via formulação analítica) e numérica N_{TA} (obtida via método dos elementos finitos).

As Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3 ilustram os valores da força normal crítica experimental N_E e teóricas N_T e N_{TA} para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Admitiu-se para esta análise um fator comprimento efetivo de flambagem $k = 0,85$.

Tabela 9.1 – Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{TA}	N_E/N_T
1	180	0,85	0,50	1/1593	937	943	951	1,008	1,015
2	180	0,85	0,50	1/1895	948	950	1044	1,099	1,106
3	180	0,85	0,50	1/1698	942	943	959	1,017	1,018
1	220	0,85	0,61	1/1264	887	854	916	1,073	1,033
2	220	0,85	0,61	1/928	852	849	849	1,000	0,996
3	220	0,85	0,61	1/1196	881	859	924	1,076	1,049
1	290	0,85	0,81	1/1534	829	789	788	0,999	0,951
2	290	0,85	0,81	1/2266	873	798	894	1,120	1,024
3	290	0,85	0,81	1/1629	836	792	783	0,989	0,937
1	360	0,85	1,01	1/1698	719	670	699	1,043	0,972
2	360	0,85	1,01	1/1818	727	672	708	1,054	0,974
3	360	0,85	1,01	1/1423	697	670	676	1,009	0,970

NOTAS:

N_T = força crítica teórica, obtida via formulação analítica;

N_{TA} = força crítica numérica, obtida via método dos elementos finitos;

N_E = força crítica experimental.

A influência das imperfeições iniciais v_0 na resistência à compressão dos perfis **I - FC** é caracterizada pelo aumento da força normal crítica teórica N_T quando comparada com a força normal crítica experimental N_E , para os modelos ensaiados mais esbeltos.

Tabela 9.2 - Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{TA}	N_E/N_T
1	150	0,85	0,52	1/1389	920	964	1029	1,067	1,119
2	150	0,85	0,52	1/1420	922	954	985	1,032	1,068
3	150	0,85	0,52	1/1304	915	964	964	1,000	1,054
1	200	0,85	0,69	1/1087	833	845	836	0,989	1,004
2	200	0,85	0,69	1/1242	850	858	900	1,049	1,059
3	200	0,85	0,69	1/1136	839	851	859	1,009	1,024
1	240	0,85	0,83	1/1290	788	748	850	1,136	1,079
2	240	0,85	0,83	1/938	741	745	769	1,032	1,038
3	240	0,85	0,83	1/1212	779	748	850	1,136	1,091
1	300	0,85	1,04	1/787*	587	661	573	0,867	0,976
2	300	0,85	1,04	1/1685	688	677	813	1,201	1,182
3	300	0,85	1,04	1/1240	650	675	785	1,163	1,208

NOTAS:

 N_T = força crítica teórica, obtida via formulação analítica; N_{TA} = força crítica numérica, obtida via método dos elementos finitos; N_E = força crítica experimental;

* Imperfeição superior à permitida pela norma NBR 5884.

Tabela 9.3 - Valores das forças críticas N_T , N_{TA} e N_E para o perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	N_T (kN)	N_{TA} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{TA}	N_E/N_T
1	160	0,85	0,48	1/1282	1059	1090	1135	1,041	1,072
2	160	0,85	0,48	1/1695	1080	1097	1162	1,059	1,076
3	160	0,85	0,48	1/1356	1064	1091	1144	1,049	1,075
1	200	0,85	0,60	1/1980	1064	991	1155	1,166	1,086
2	200	0,85	0,60	1/1220	1013	965	978	1,013	0,965
3	200	0,85	0,60	1/1328	1023	972	1055	1,085	1,031
1	250	0,85	0,75	1/1289	952	914	953	1,043	1,001
2	250	0,85	0,75	1/1572	980	920	917	0,997	0,936
3	250	0,85	0,75	1/1269	949	911	845	0,928	0,890
1	350	0,85	1,05	1/1944	799	774	850	1,098	1,064
2	350	0,85	1,05	1/1563	770	749	752	1,004	0,977
3	350	0,85	1,05	1/1584	772	749	763	1,019	0,988

NOTAS:

 N_T = força crítica teórica, obtida via formulação analítica; N_{TA} = força crítica numérica, obtida via método dos elementos finitos; N_E = força crítica experimental.

N_E e os valores obtidos pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, admitindo $v_0 / L = 1 / \gamma$, para os modelos pertencentes ao perfil CS 150x25.

Para os modelos pertencentes ao perfil PS 200x25, a comparação entre os resultados da força normal crítica experimental N_E e os valores obtidos pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, admitindo $v_0 / L = 1 / \gamma$, encontram-se ilustrados nas Tabelas 9.9 e 9.10.

Para os modelos pertencentes ao perfil PS 225x29, a comparação entre os resultados da força normal crítica experimental N_E e os valores obtidos pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, admitindo $v_0 / L = 1 / \gamma$, encontram-se ilustrados nas Tabelas 9.11 e 9.12.

Foi utilizado um fator $k = 0,85$, média dos valores obtidos a partir da deformada dos modelos, para a determinação da força normal crítica segundo as normas citadas anteriormente.

Nas Tabelas 9.4, 9.5 e 9.6 as forças críticas N_{Nb} e N_{Nc} são determinadas por meio das curvas **b** e **c** da norma NBR 8800: 1986, enquanto que, as forças críticas N_{Eb} e N_{Ec} são obtidas a partir das curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

Tabela 9.4 – Comparação entre os resultados da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	N_{Nb} (kN)	N_{Nc} (kN)	N_{Eb} (kN)	N_{Ec} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{Nb}	N_E/N_{Nc}	N_E/N_{Eb}	N_E/N_{Ec}
1	180	868	827	893	851	951	1,096	1,150	1,065	1,118
2	180	868	827	893	851	1044	1,203	1,262	1,169	1,227
3	180	868	827	893	851	959	1,105	1,160	1,074	1,127
1	220	819	771	840	786	916	1,118	1,188	1,090	1,165
2	220	819	771	840	786	849	1,037	1,101	1,011	1,080
3	220	819	771	840	786	924	1,128	1,198	1,100	1,176
1	290	717	662	727	664	788	1,099	1,190	1,084	1,187
2	290	717	662	727	664	894	1,247	1,350	1,230	1,346
3	290	717	662	727	664	783	1,092	1,183	1,077	1,179
1	360	599	550	600	543	699	1,167	1,271	1,165	1,287
2	360	599	550	600	543	708	1,182	1,287	1,180	1,304
3	360	599	550	600	543	676	1,129	1,229	1,127	1,245

NOTAS:

N_E = força crítica experimental;

N_{Nb} = força crítica obtida pela curva **b** da norma NBR 8800;

N_{Nc} = força crítica obtida pela curva **c** da norma NBR 8800;

N_{Eb} = força crítica obtida pela curva **b** da norma Eurocode 3;

N_{Ec} = força crítica obtida pela curva **c** da norma Eurocode 3.

Cabe salientar que as forças N_{Nb} , N_{Nc} , N_{Eb} e N_{Ec} , apresentadas nas Tabelas 9.4, 9.5 e 9.6 correspondem às forças N_T^* determinadas no capítulo 7 pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, com a imperfeição inicial padrão $v_0^*/L = 1/1000$.

A influência das imperfeições iniciais v_0 na resistência à compressão dos perfis **I - FC** é evidenciada pela diminuição da força normal crítica teórica N_T , obtida pelas normas de cálculo, quando comparada com a força normal crítica experimental N_E para os modelos mais esbeltos. Isto ocorre porque os modelos ensaiados mais esbeltos situam-se na faixa de esbeltez com maior influência das imperfeições iniciais.

Tabela 9.5 – Comparação entre os resultados da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	N_{Nb} (kN)	N_{Nc} (kN)	N_{Eb} (kN)	N_{Ec} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{Nb}	N_E/N_{Nc}	N_E/N_{Eb}	N_E/N_{Ec}
1	150	864	822	889	845	1029	1,191	1,252	1,157	1,218
2	150	864	822	889	845	985	1,140	1,198	1,108	1,166
3	150	864	822	889	845	964	1,116	1,173	1,084	1,141
1	200	784	731	800	741	836	1,066	1,144	1,045	1,128
2	200	784	731	800	741	900	1,148	1,231	1,125	1,215
3	200	784	731	800	741	859	1,096	1,175	1,074	1,159
1	240	707	653	716	653	850	1,202	1,302	1,187	1,302
2	240	707	653	716	653	769	1,088	1,178	1,074	1,178
3	240	707	653	716	653	850	1,202	1,302	1,187	1,302
1	300	581	534	582	526	573	0,986	1,073	0,985	1,089
2	300	581	534	582	526	813	1,399	1,522	1,397	1,546
3	300	581	534	582	526	785	1,351	1,470	1,349	1,492

Tabela 9.6 – Comparação entre os resultados da força crítica N_E e os valores obtidos pelas normas de cálculo, para o perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	N_{Nb} (kN)	N_{Nc} (kN)	N_{Eb} (kN)	N_{Ec} (kN)	N_E (kN)	N_E/N_{Nb}	N_E/N_{Nc}	N_E/N_{Eb}	N_E/N_{Ec}
1	160	1009	964	1039	994	1135	1,125	1,177	1,092	1,142
2	160	1009	964	1039	994	1162	1,152	1,205	1,118	1,169
3	160	1009	964	1039	994	1144	1,134	1,187	1,101	1,151
1	200	950	895	974	914	1155	1,216	1,291	1,186	1,264
2	200	950	895	974	914	978	1,029	1,093	1,004	1,070
3	200	950	895	974	914	1055	1,111	1,179	1,083	1,154
1	250	863	801	879	808	953	1,104	1,190	1,084	1,179
2	250	863	801	879	808	917	1,063	1,145	1,043	1,135
3	250	863	801	879	808	845	0,979	1,055	0,961	1,046
1	350	659	605	659	596	850	1,290	1,405	1,290	1,426
2	350	659	605	659	596	752	1,141	1,243	1,141	1,262
3	350	659	605	659	596	763	1,158	1,261	1,158	1,280

Tabela 9.7 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Eb}$ (kN)	$(N_T)_{Ec}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{Eb}$	$N_E / (N_T)_{Ec}$
1	180	0,85	0,50	1/1593	915	871	951	1,039	1,092
2	180	0,85	0,50	1/1895	920	876	1044 ^(a)	1,135	1,192
3	180	0,85	0,50	1/1698	916	873	959	1,047	1,099
1	220	0,85	0,61	1/1264	858	803	916	1,068	1,141
2	220	0,85	0,61	1/928	839	786	849	1,012	1,080
3	220	0,85	0,61	1/1196	854	799	924	1,082	1,156
1	290	0,85	0,81	1/1534	762	692	788	1,034	1,139
2	290	0,85	0,81	1/2266	782	707	894 ^(b)	1,143	1,265
3	290	0,85	0,81	1/1629	766	695	783	1,022	1,127
1	360	0,85	1,01	1/1698	642	574	699	1,088	1,218
2	360	0,85	1,01	1/1818	645	577	708	1,098	1,227
3	360	0,85	1,01	1/1423	632	567	676	1,069	1,192

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** do Eurocode 3; $(N_T)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** do Eurocode 3;**(a)** A força crítica N_E atingiu a força de escoamento N_y ;**(b)** Verificar a flambagem por torção.**Tabela 9.8** – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{Nb}$	$N_E / (N_T)_{Nc}$
1	180	0,85	0,50	1/1593	897	853	951	1,060	1,115
2	180	0,85	0,50	1/1895	904	860	1044	1,155	1,214
3	180	0,85	0,50	1/1698	900	856	959	1,066	1,120
1	220	0,85	0,61	1/1264	842	791	916	1,088	1,158
2	220	0,85	0,61	1/928	816	769	849	1,040	1,104
3	220	0,85	0,61	1/1196	836	786	924	1,127	1,199
1	290	0,85	0,81	1/1534	758	696	788	1,040	1,132
2	290	0,85	0,81	1/2266	784	715	894	1,083	1,187
3	290	0,85	0,81	1/1629	763	700	783	1,026	1,119
1	360	0,85	1,01	1/1698	647	587	699	1,080	1,191
2	360	0,85	1,01	1/1818	651	591	708	1,088	1,198
3	360	0,85	1,01	1/1423	635	578	676	1,065	1,152

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** da NBR 8800; $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** da NBR 8800.

Tabela 9.9 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Eb}$ (kN)	$(N_T)_{Ec}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E/(N_T)_{Eb}$	$N_E/(N_T)_{Ec}$
1	150	0,85	0,52	1/1389	908	863	1029 ^(a)	1,133	1,192
2	150	0,85	0,52	1/1420	909	863	985	1,084	1,141
3	150	0,85	0,52	1/1304	905	860	964	1,065	1,121
1	200	0,85	0,69	1/1087	812	751	836	1,030	1,113
2	200	0,85	0,69	1/1242	821	759	900	1,096	1,186
3	200	0,85	0,69	1/1136	815	754	859	1,054	1,139
1	240	0,85	0,83	1/1290	744	675	850 ^(b)	1,143	1,259
2	240	0,85	0,83	1/938	718	655	769	1,071	1,174
3	240	0,85	0,83	1/1212	739	672	850 ^(b)	1,150	1,265
1	300	0,85	1,04	1/787	570	519	573 (c)	1,005	1,104
2	300	0,85	1,04	1/1685	625	559	813 ^(b)	1,301	1,454
3	300	0,85	1,04	1/1240	606	545	785 ^(b)	1,295	1,440

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** do Eurocode 3; $(N_T)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** do Eurocode 3;**(a)** A força crítica N_E atingiu a força de escoamento N_y ;**(b)** Verificar a flambagem por torção.**(c)** Modelo desprezado - $v_0/L = 1/787 > v_0/L = 1/1000$ (imperfeição padrão).**Tabela 9.10** – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E/(N_T)_{Nb}$	$N_E/(N_T)_{Nc}$
1	150	0,85	0,52	1/1389	889	845	1029	1,158	1,218
2	150	0,85	0,52	1/1420	890	846	985	1,107	1,164
3	150	0,85	0,52	1/1304	885	841	964	1,089	1,146
1	200	0,85	0,69	1/1087	796	743	836	1,050	1,125
2	200	0,85	0,69	1/1242	808	752	900	1,114	1,197
3	200	0,85	0,69	1/1136	800	746	859	1,074	1,152
1	240	0,85	0,83	1/1290	738	678	850	1,152	1,254
2	240	0,85	0,83	1/938	706	653	769	1,089	1,178
3	240	0,85	0,83	1/1212	732	674	850	1,161	1,261
1	300	0,85	1,04	1/787	565	522	573	1,020	1,098
2	300	0,85	1,04	1/1685	632	573	813	1,286	1,419
3	300	0,85	1,04	1/1240	608	556	785	1,291	1,412

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** da NBR 8800; $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** da NBR 8800.

Tabela 9.11 – Valores da força crítica N_E e N_T (pelo Eurocode) – perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Eb}$ (kN)	$(N_T)_{Ec}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{Eb}$	$N_E / (N_T)_{Ec}$
1	160	0,85	0,48	1/1282	1054	1009	1135	1,077	1,125
2	160	0,85	0,48	1/1695	1065	1019	1162 ^(a)	1,091	1,140
3	160	0,85	0,48	1/1356	1057	1011	1144	1,082	1,132
1	200	0,85	0,60	1/1980	1018	953	1155 ^(b)	1,135	1,212
2	200	0,85	0,60	1/1220	993	931	978	0,985	1,051
3	200	0,85	0,60	1/1328	998	936	1055	1,057	1,127
1	250	0,85	0,75	1/1289	907	832	953	1,051	1,145
2	250	0,85	0,75	1/1572	922	843	917	0,995	1,088
3	250	0,85	0,75	1/1269	906	831	845	0,933	1,017
1	350	0,85	1,05	1/1944	717	639	850 ^(b)	1,186	1,330
2	350	0,85	1,05	1/1563	704	630	752	1,068	1,194
3	350	0,85	1,05	1/1584	704	631	763	1,084	1,209

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Eb}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **b** do Eurocode 3; $(N_T)_{Ec}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **c** do Eurocode 3;**(a)** A força crítica N_E atingiu a força de escoamento N_y ;**(b)** Verificar a flambagem por torção.**Tabela 9.12** – Valores da força crítica N_E e N_T (pela NBR 8800) – perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	k	$\bar{\lambda}$	v_0/L	$(N_T)_{Nb}$ (kN)	$(N_T)_{Nc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{Nb}$	$N_E / (N_T)_{Nc}$
1	160	0,85	0,48	1/1282	1029	983	1135	1,103	1,155
2	160	0,85	0,48	1/1695	1046	998	1162	1,111	1,164
3	160	0,85	0,48	1/1356	1033	986	1144	1,108	1,160
1	200	0,85	0,60	1/1980	1007	945	1155	1,147	1,222
2	200	0,85	0,60	1/1220	972	915	978	1,006	1,069
3	200	0,85	0,60	1/1328	979	921	1055	1,078	1,146
1	250	0,85	0,75	1/1289	897	830	953	1,062	1,148
2	250	0,85	0,75	1/1572	915	844	917	1,002	1,087
3	250	0,85	0,75	1/1269	895	828	845	0,944	1,021
1	350	0,85	1,05	1/1944	727	658	850	1,169	1,292
2	350	0,85	1,05	1/1563	710	645	752	1,059	1,166
3	350	0,85	1,05	1/1584	711	646	763	1,073	1,181

NOTAS:

 N_E = força normal crítica experimental; $(N_T)_{Nb}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **b** da NBR 8800; $(N_T)_{Nc}$ = força normal crítica teórica para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **c** da NBR 8800.

Apresenta-se a seguir uma comparação entre a força normal crítica experimental N_E e força normal crítica teórica por torção $(N_T)_z$, determinada pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, para os modelos que apresentaram a perda de estabilidade caracterizada por torção, das séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

As Tabelas 9.13 e 9.14 ilustram os valores da força normal crítica experimental N_E e da força normal crítica por torção $(N_T)_z$, determinada por meio das curvas **b** e **c** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, para o modelo 2 de comprimento $L = 290$ cm do perfil CS 150x25.

Tabela 9.13 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pelo Eurocode) – perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zEb}$ (kN)	$(N_T)_{zEc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{zEb}$	$N_E / (N_T)_{zEc}$
2	290	0,85	0,65	1/2266	863	799	894	1,036	1,119

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zEb}$ = força crítica por torção para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **b** do Eurocode 3;

$(N_T)_{zEc}$ = força crítica por torção para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **c** do Eurocode 3.

Tabela 9.14 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil CS 150x25.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zNb}$ (kN)	$(N_T)_{zNc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{zNb}$	$N_E / (N_T)_{zNc}$
2	290	0,85	0,65	1/2266	856	797	894	1,044	1,122

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zNb}$ = força crítica por torção para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **b** do NBR 8800;

$(N_T)_{zNc}$ = força crítica por torção para $v_0 / L = 1 / \gamma$ - curva **c** do NBR 8800.

A curva **b** apresenta uma força normal crítica por torção que se ajusta melhor com a força normal crítica experimental N_E , 3,6 % inferior quando calculada pelo Eurocode 3: 1992 e 4,4 % menor quando obtida pela norma NBR 8800: 1986.

As Tabelas 9.15 e 9.16 ilustram os valores da força normal crítica experimental N_E e da força crítica por torção $(N_T)_z$, determinada por meio das curvas

b e **c** das Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, para os modelos 1 e 3 de comprimento $L = 240$ cm e os modelos 2 e 3 de comprimento $L = 300$ cm do perfil PS 200x25.

Tabela 9.15 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pelo Eurocode) – perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zEb}$ (kN)	$(N_T)_{zEc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E/(N_T)_{zEb}$	$N_E/(N_T)_{zEc}$
1	240	0,85	0,64	1/1290	844	784	850	1,007	1,084
3	240	0,85	0,64	1/1212	822	766	850	1,034	1,109
2	300	0,85	0,75	1/1685	802	732	813	1,014	1,111
3	300	0,85	0,75	1/1240	782	716	785	1,004	1,096

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zEb}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** do Eurocode 3;

$(N_T)_{zEc}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** do Eurocode 3.

Tabela 9.16 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 200x25.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zNb}$ (kN)	$(N_T)_{zNc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E/(N_T)_{zNb}$	$N_E/(N_T)_{zNc}$
1	240	0,85	0,64	1/1290	829	775	850	1,025	1,097
3	240	0,85	0,64	1/1212	824	771	850	1,032	1,103
2	300	0,85	0,75	1/1685	798	735	813	1,019	1,106
3	300	0,85	0,75	1/1240	773	715	785	1,016	1,098

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zNb}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** da NBR 8800;

$(N_T)_{zNc}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** da NBR 8800.

A curva **b** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986 ajusta-se melhor a força normal crítica por torção quando comparada com a força crítica normal experimental N_E .

As Tabelas 9.17 e 9.18 ilustram os valores da força normal crítica experimental N_E e da força crítica por torção $(N_T)_z$ para o modelo número 1, de comprimentos $L = 240$ cm e $L = 350$ cm, do perfil PS 225x29 determinada por meio das curvas **b** e **c** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986.

Tabela 9.17 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pelo Eurocode) – perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zEb}$ (kN)	$(N_T)_{zEc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{zEb}$	$N_E / (N_T)_{zEc}$
1	200	0,85	0,51	1/1980	1055	1002	1155	1,095	1,153
1	350	0,85	0,79	1/1944	901	816	850	0,943	1,042

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zEb}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** do Eurocode 3;

$(N_T)_{zEc}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** do Eurocode 3.

Tabela 9.18 – Valores da força crítica N_E e $(N_T)_z$ (pela NBR 8800) – perfil PS 225x29.

Modelo	L (cm)	k_z	$\bar{\lambda}_z$	v_0/L	$(N_T)_{zNb}$ (kN)	$(N_T)_{zNc}$ (kN)	N_E (kN)	$N_E / (N_T)_{zNb}$	$N_E / (N_T)_{zNc}$
1	200	0,85	0,51	1/1980	1040	987	1155	1,111	1,170
1	350	0,85	0,79	1/1944	901	824	850	0,943	1,032

Notas:

N_E = força crítica experimental;

$(N_T)_{zNb}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **b** da NBR 8800;

$(N_T)_{zNc}$ = força crítica por torção para $v_0/L = 1/\gamma$ - curva **c** da NBR 8800.

Percebe-se que para os modelo 1 do perfil PS 225x29, de comprimentos $L = 200$ cm e $L = 350$ cm, a curva **b** das normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986 ajusta-se melhor a força normal crítica experimental N_E quando comparada com a força normal crítica por torção.

9.4 – FORÇA NORMAL REDUZIDA PARA OS MODELOS ENSAIADOS

Apresenta-se nesta seção, uma comparação entre os resultados da força normal reduzida experimental e numérica com as curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

A força normal reduzida ρ é definida como sendo a razão entre a força normal crítica N e a força de escoamento $N_y = A_g \cdot f_y$, conforme a expressão (9.1).

$$\rho = \frac{N}{N_y} \quad (9.1)$$

Os resultados experimentais dos modelos ensaiados à compressão são representados pelo fator ρ , determinado a partir da expressão (9.1), de tal forma que a força normal crítica N seja substituída pela força normal crítica experimental N_E .

Os valores da força normal crítica numérica N_{TA} também são representados pelo fator ρ para a de comparação com as curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

Os valores de N_E e N_{TA} para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29 encontram-se ilustrados nas Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3.

Apresenta-se ainda, uma comparação entre a média dos resultados da força normal reduzida experimental e a média dos valores da força normal reduzida

9.4.1 - Força normal reduzida experimental

Apresenta-se nesta seção, uma correlação entre a força normal reduzida experimental e a esbeltez reduzida $\bar{\lambda}$ para os modelos ensaiados à compressão, das séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

A figura 9.1 ilustra um gráfico com os valores da força normal reduzida experimental de todos os modelos pertencentes à série CS 150x25. Este gráfico apresenta também a média dos resultados e as curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

Para a determinação da força normal reduzida, apresentada na figura 9.1 foi admitido um fator comprimento efetivo $k = 0,85$ e a flambagem em torno do eixo de menor inércia $y - y$.

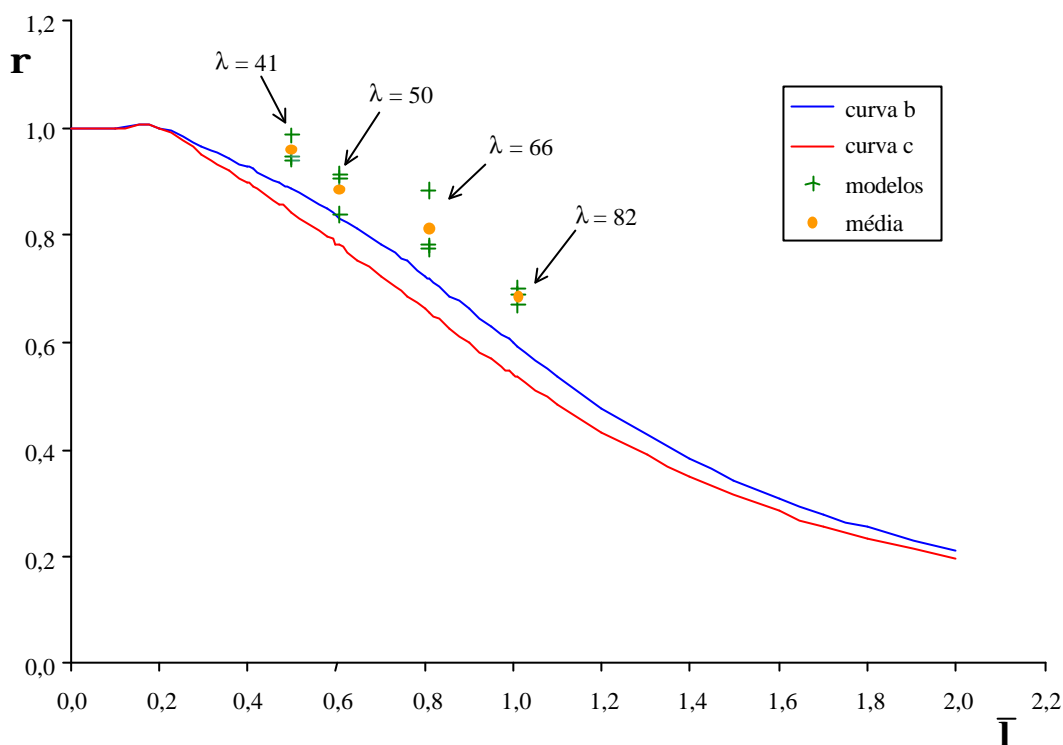


Figura 9.1 – Força normal reduzida experimental, perfil CS 150x25.

Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

No gráfico da figura 9.1, o modelo 2 pertencente ao índice de esbeltez $\lambda = 41$ apresenta uma força crítica experimental que caracteriza o escoamento do material e o modelo 2, de maior força normal resistente ρ , pertencente ao índice de esbeltez $\lambda = 66$ apresenta uma força crítica experimental que caracteriza a perda de

Justifica-se para o índice de esbeltez $\lambda = 50$, o modelo 2 com um fator ρ da ordem de grandeza de ρ determinado pela curva **b** da norma Eurocode 3: 1992, pois este modelo apresenta uma imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / 928$ superior à imperfeição padrão $v_0^* / L = 1 / 1000$ adotada pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986.

Devido ao escoamento do material do modelo 2 de comprimento $L = 180$ cm ($\lambda = 41$) e à perda de estabilidade por torção do modelo 2 de comprimento $L = 290$ cm ($\lambda = 66$), estes modelos foram desprezados na determinação dos valores da força normal reduzida média para a série CS 150x25, apresentados no gráfico da figura 9.2.

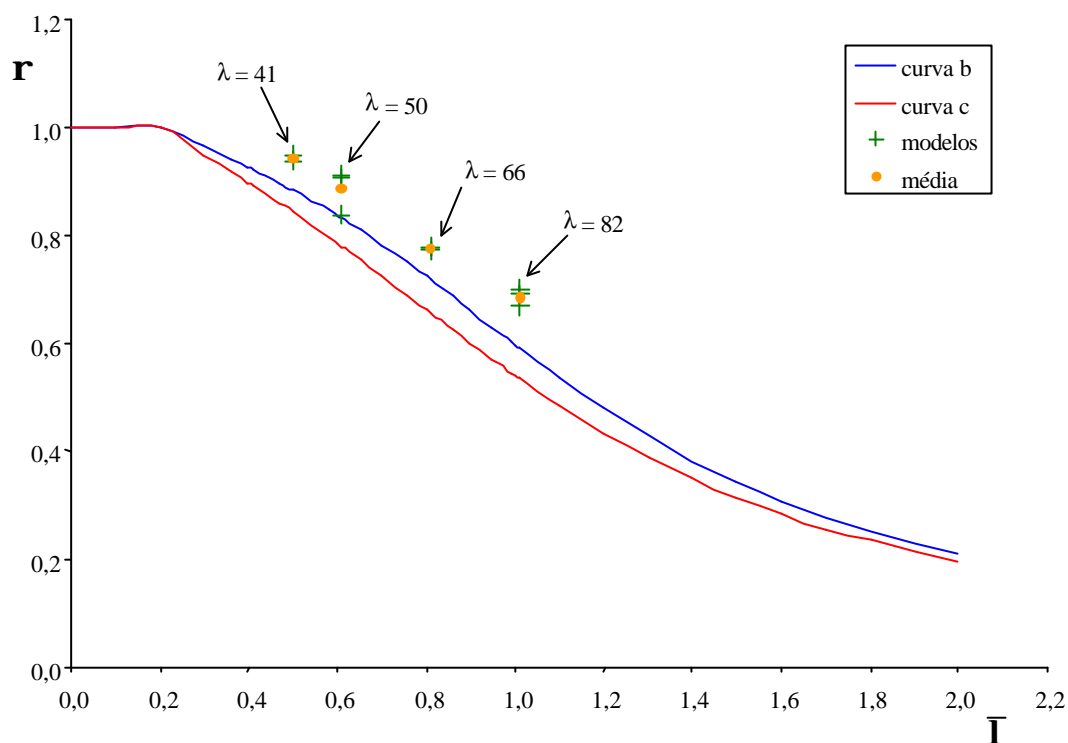


Figura 9.2 – Força normal reduzida experimental média, para o perfil CS 150x25. Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

A figura 9.3 ilustra um gráfico com os valores da força normal reduzida experimental de todos os modelos pertencentes à série PS 200x25, admitido um fator comprimento efetivo $k = 0,85$ e a flambagem em torno do eixo de menor inércia $y - y$. Este gráfico apresenta também a média dos resultados e as curvas **b** e **c** da norma Eurocode 3: 1992.

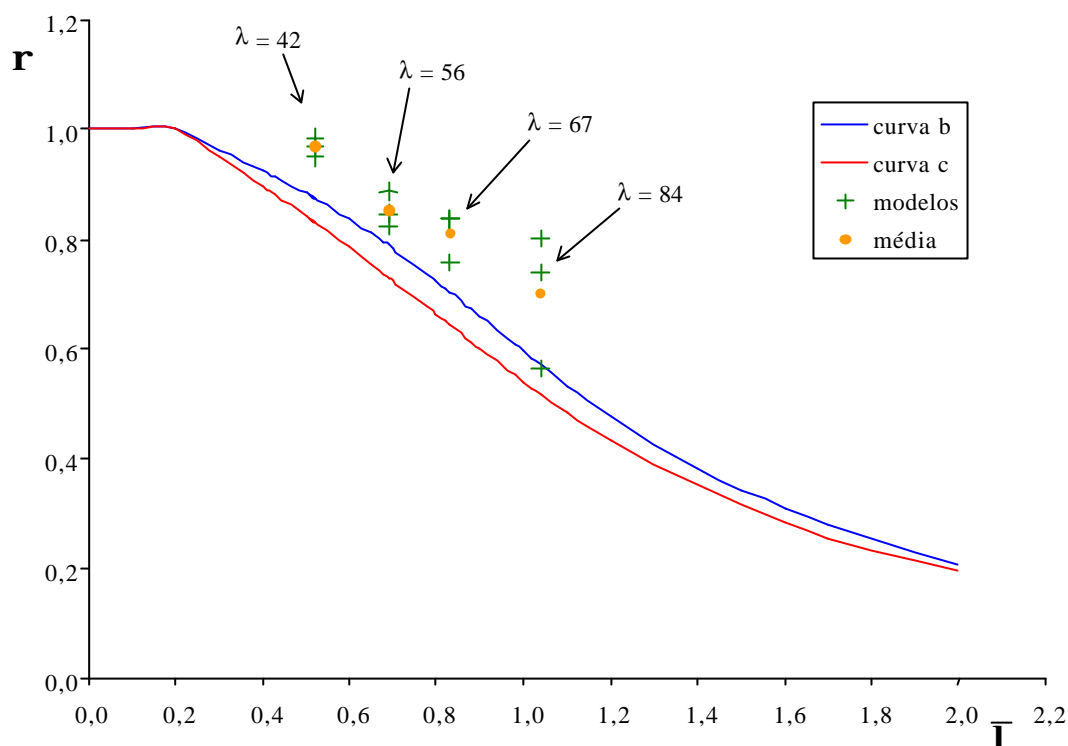


Figura 9.3 – Força normal reduzida experimental, perfil PS 200x25.

Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

No gráfico da figura 9.3, o modelo 1 de comprimento $L = 150$ cm ($\lambda = 42$) apresentou uma força normal crítica experimental igual a força normal de escoamento, ou seja, o material atingiu o escoamento, enquanto que, os modelos 1 e 3 de comprimento $L = 240$ cm ($\lambda = 67$) e os modelos 2 e 3 de comprimento $L = 300$ cm ($\lambda = 84$) apresentam a força normal crítica experimental da ordem de grandeza da força normal crítica por torção, caracterizando a perda de estabilidade

Justifica-se para o índice de esbeltez $\lambda = 84$, o modelo 1 com um fator ρ da ordem de grandeza de ρ determinado pela curva **b** da norma Eurocode 3: 1992, pois este apresenta uma imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / 787$ superior à imperfeição $v_0^* / L = 1 / 1000$ adotada pela normalização.

Devido ao escoamento do material do modelo 1 de comprimento $L = 150$ cm ($\lambda = 42$) e à perda de estabilidade por torção dos modelos 1 e 3 de comprimento $L = 240$ cm ($\lambda = 67$) e dos modelos 2 e 3 de comprimento $L = 300$ cm ($\lambda = 84$), estes

modelos foram desprezados na determinação dos valores da força normal reduzida média para a série PS 200x25, apresentados no gráfico da figura 9.4.

Salienta-se ainda que o modelo 1 de comprimento $L = 300$ cm do perfil PS 200x25 também foi desprezado, por apresentar um deslocamento inicial no meio δ_0 maior que o permitido pela norma NBR 5884: 2000.

Considerando que para o comprimento $L = 240$ cm ($\lambda = 67$) existe apenas um modelo com perda de estabilidade por flexão em torno do eixo de menor inércia $y - y$ e para $L = 300$ cm ($\lambda = 84$) não existe nenhum modelo com flambagem em torno do eixo de menor inércia, verifica-se então que para os dois (02) maiores modelos da série PS 200x25 não existe média dos resultados experimentais, conforme ilustra o gráfico da figura 9.4.

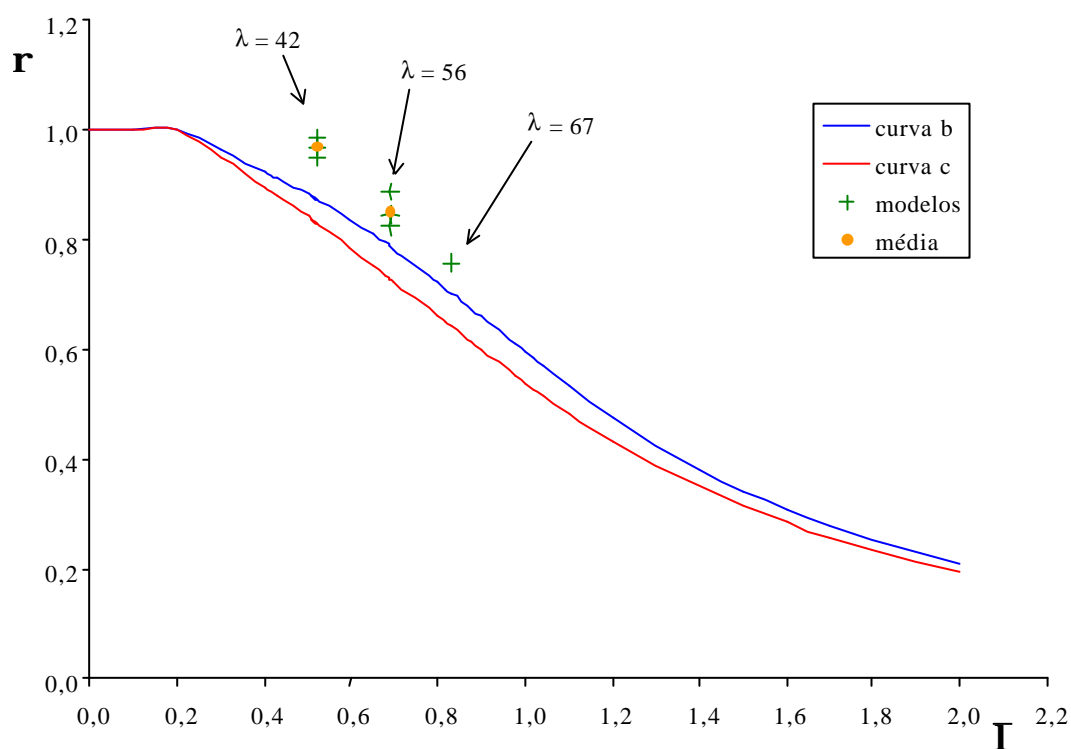


Figura 9.4 – Força normal reduzida experimental média, perfil PS 200x25.

Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

Devido à perda de estabilidade por torção, os modelos número 1, de comprimento $L = 200$ cm ($\lambda = 49$) e $L = 350$ cm ($\lambda = 85$), foram desprezados na determinação dos valores da força normal reduzida média para a série PS 225x29, da figura 9.6.

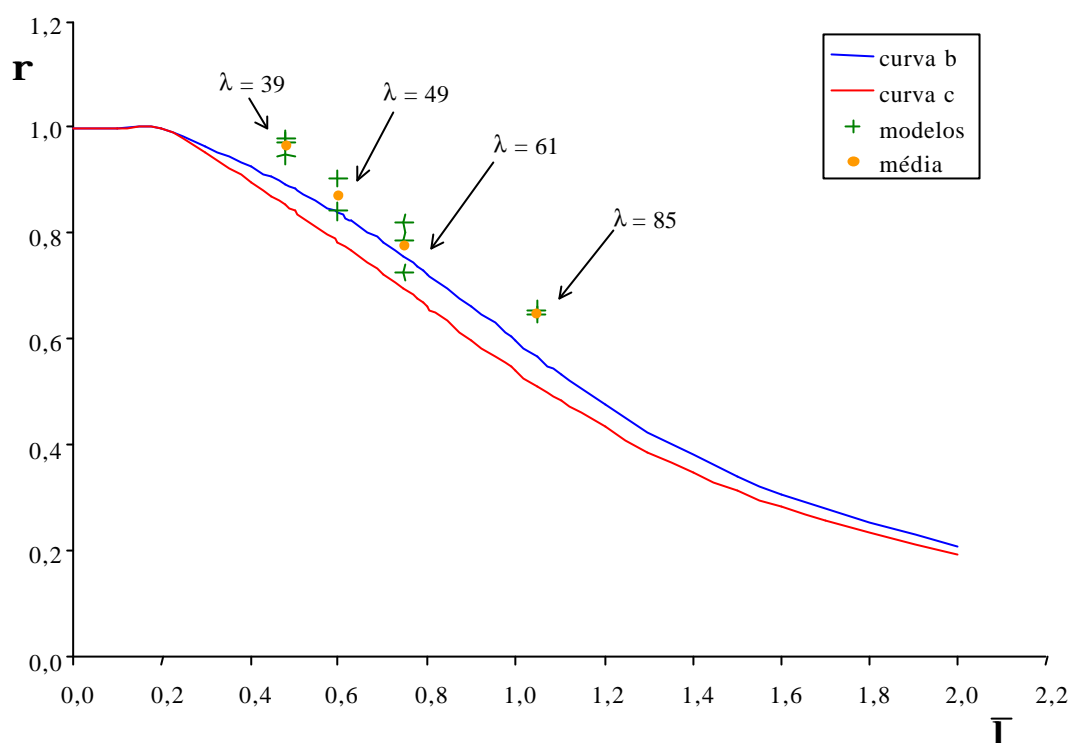


Figura 9.6 – Força normal reduzida experimental média, perfil PS 225x29.
Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

9.4.2 – Força normal reduzida numérica

Apresenta-se nesta seção, uma correlação entre a força normal reduzida numérica e a esbelteza reduzida $\bar{\lambda}$ para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

Utiliza-se para o cálculo da força normal crítica numérica, a força N_{TA} obtida por meio da análise via método dos elementos finitos, discutida no capítulo 6, com os resultados apresentados nas Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3 para as séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29.

Determina-se a força normal resistente por meio da expressão $\rho = N_{TA} / N_y$, onde $N_y = A_g \times f_y$.

Admitiu-se também, neste caso, o fator comprimento efetivo de flambagem $k = 0,85$ para a determinação da esbelteza λ e da esbelteza reduzida $\bar{\lambda}$.

Os gráficos das figuras 9.7, 9.8 e 9.9 ilustram os valores da força normal σ , bem como a média destes valores para os modelos pertencentes às series CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29. Nestes gráficos, as curvas **b** e **c** correspondem às curvas adotadas pela norma Eurocode 3: 1992.

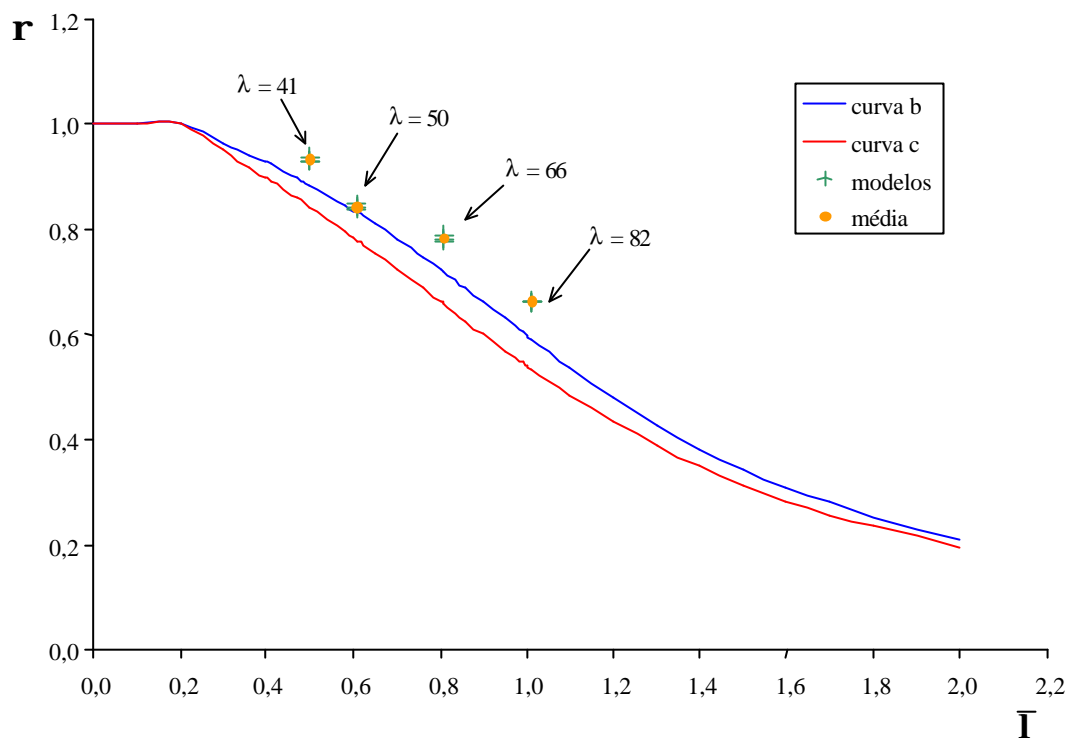


Figura 9.7 – Força normal reduzida numérica, para os modelos da série CS 150x25.
Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

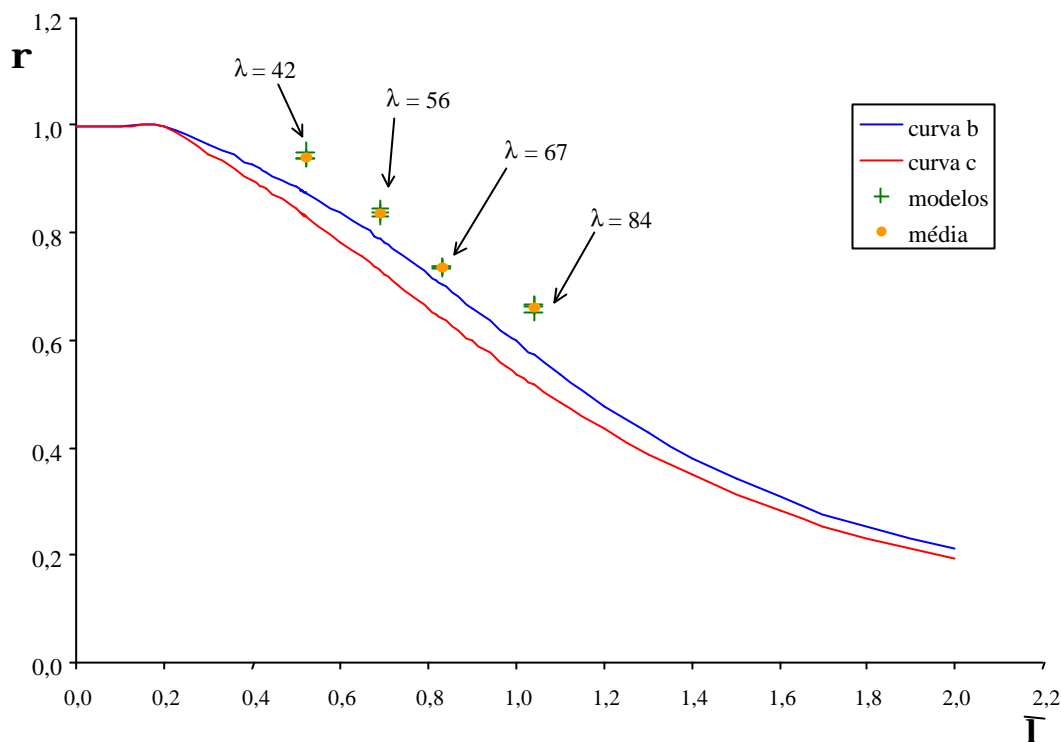


Figura 9.8 – Força normal reduzida numérica, para os modelos da série PS 200x25.

Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

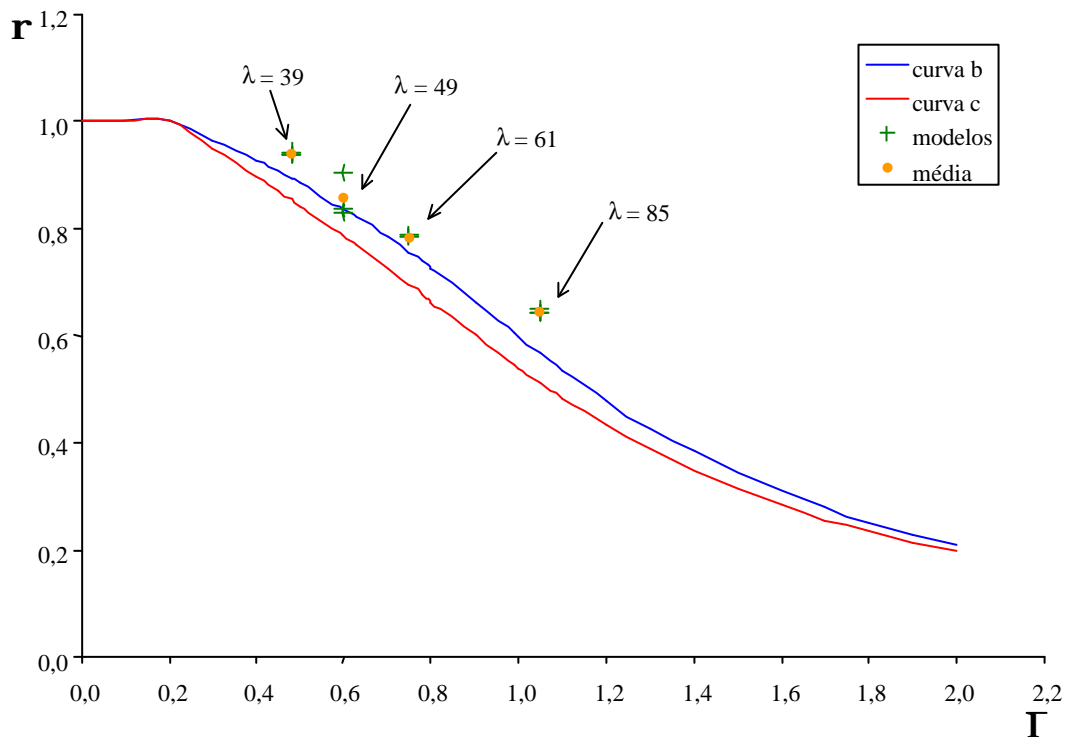


Figura 9.9 – Força normal reduzida numérica, para os modelos da série PS 225x29.

Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

9.4.3 - Comparação entre as médias da força normal reduzida experimental e numérica

Apresenta-se nesta seção, uma análise comparativa entre as médias dos resultados experimentais e numéricos da força normal resistente para os modelos pertencentes às séries CS 150x25, PS 200x25 e PS 225x29, conforme ilustram os gráficos das figuras 9.10, 9.11 e 9.12.

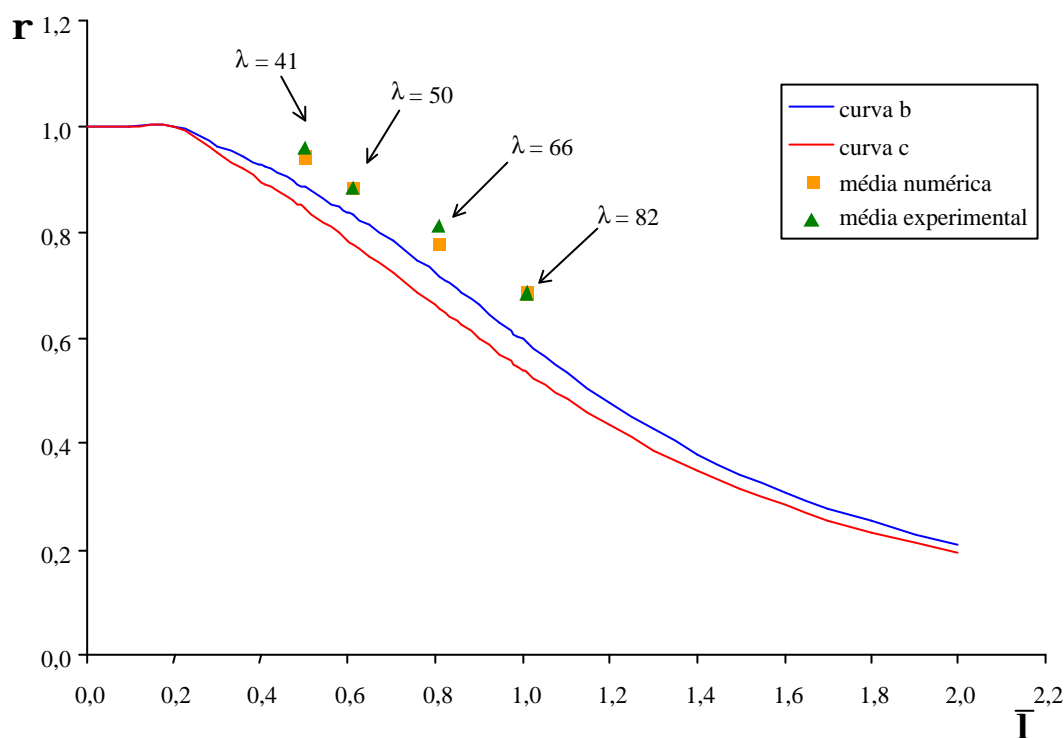


Figura 9.10 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil CS 150x25. Curvas **b** e **c** – Eurocode 3: 1992.

Para a série CS 150x25, figura 9.10, a média experimental da força normal reduzida distancia mais das curvas de resistê **b** e **c**, nos pontos de esbeltez $\lambda = 66$ e $\lambda = 82$, isto ocorre porque nesta faixa de esbeltez há uma maior influência das imperfeições iniciais e das tensões residuais.

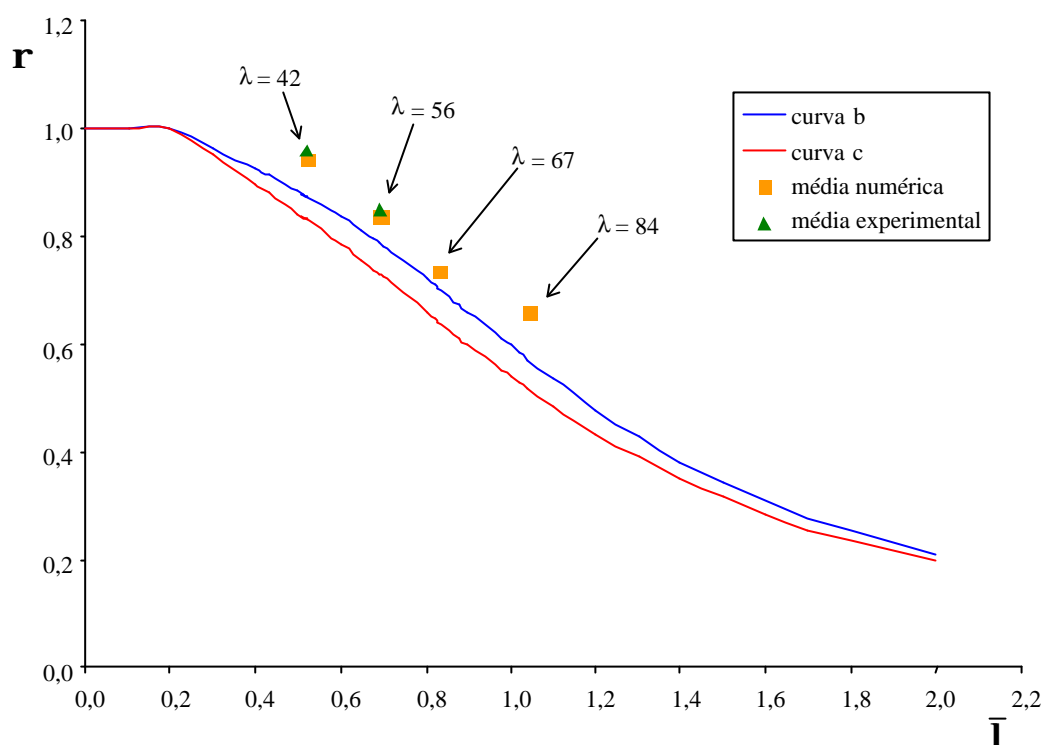


Figura 9.11 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil PS 200x25. Curvas **b** e **c** do Eurocode 3:1992.

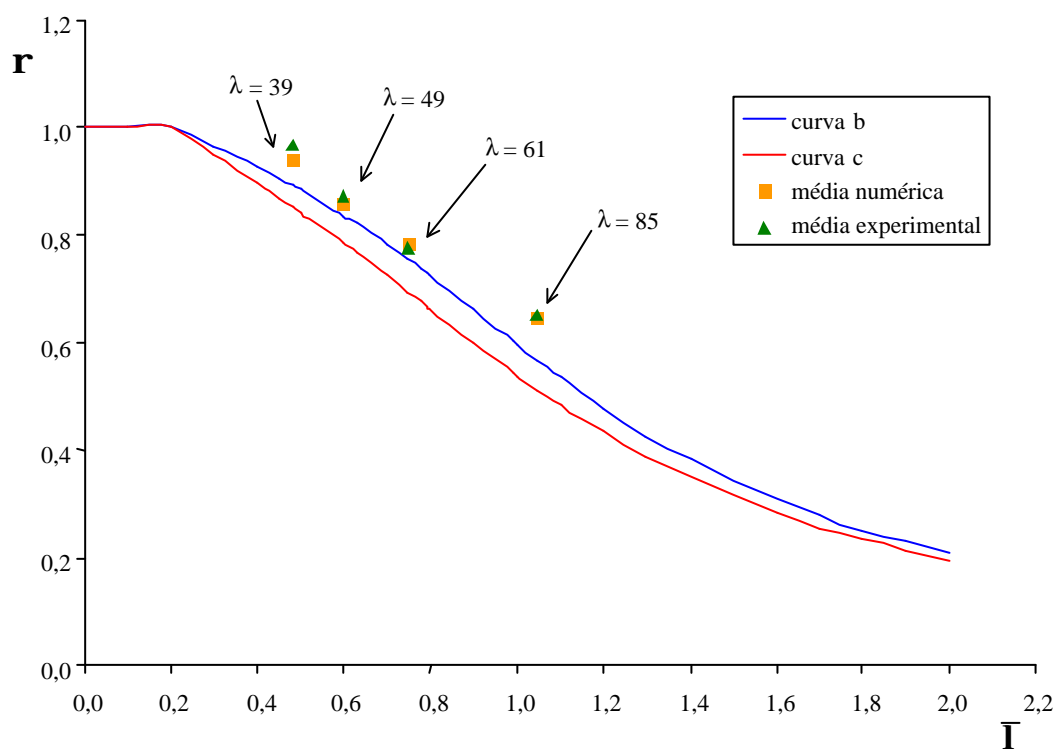


Figura 9.12 – Valores médios da força normal reduzida numérica e experimental para o perfil PS 225x29. Curvas **b** e **c** do Eurocode 3: 1992.

Percebe-se uma influência significativa das imperfeições iniciais na resistência à compressão dos modelos ensaiados, na faixa de esbeltez $40 < \lambda < 70$ correspondente ao regime inelástico.

A média da resistência numérica e experimental dos modelos analisados superior às curvas de resistência à compressão, pois para o ajuste destas curvas foi adotada uma imperfeição inicial padrão $v_0 / L = 1 / 1000$ superior à imperfeição média dos modelos ensaiados.

9.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados pode ser iniciada com os resultados observados na Tabela 9.1. A formulação analítica e a simulação dos modelos via método dos elementos finitos indica resultados próximos aos obtidos experimentalmente.

Os valores obtidos teoricamente são da ordem de 5% inferior e 10% superior quando comparados com os resultados experimentais.

A boa correlação entre os resultados experimentais e teóricos da força normal crítica permite concluir que o efeito das imperfeições iniciais v_0 é significativo na verificação da resistência à compressão dos elementos comprimidos de aço.

Comparando a força normal crítica experimental com a força normal crítica teórica, admitindo a imperfeição inicial $v_0 / L = 1 / \gamma$, obtida pelas normas Eurocode 3: 1992 e NBR 8800: 1986, verifica-se que a curva **b** apresenta praticamente os mesmos resultados para as duas normas e que estes são bem ajustados com os experimentais.

A partir do exposto anteriormente, fica clara a grande influência das imperfeições iniciais na resistência à compressão dos perfis **I – FC** de pequenas dimensões.

Verifica-se por meio da comparação entre os valores experimentais e teóricos da força normal crítica para as três séries ensaiadas, que a série CS 150x25 apresenta-se resultados teóricos mais ajustados com os experimentais. Entre as demais séries, a de maior seção (PS 225x29) é a que apresenta um melhor ajuste entre a força normal crítica teórica e experimental, além disto, percebe-se uma tendência dos modelos da série PS 200x25 flambarem por torção.

10 - CONCLUSÕES

^a espécie, fundamentam a verificação da resistência na seção mais solicitada do elemento comprimido na sua configuração deformada e indica resultados com boa correlação quando comparados com os obtidos experimentalmente.

Comparando a força normal crítica experimental N_E com a força normal crítica teórica N_T e numérica N_{TA} , pode-se verificar a partir das Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3 que os resultados obtidos experimentalmente são coerentes e satisfatórios.

A comparação da força normal crítica experimental N_E com a força normal crítica obtida pelas normas NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992, conforme apresentada nas Tabelas 9.4, 9.5 e 9.6, indica que a curva **b** do Eurocode aproxima-se mais dos resultados experimentais. Estes resultados cobrem um dos objetivos do trabalho e, verifica-se que mesmo o número de modelos ensaiados não seja o ideal para uma conclusão definitiva, pode-se perceber que a curva **b** realmente é a que melhor representa o comportamento de perfis do tipo **I – FC**.

Comparando a força normal crítica experimental N_E com a força normal crítica determinada pelas normas NBR 8800: 1986 e Eurocode 3: 1992, admitindo as imperfeições geométricas iniciais $v_0 / L = 1 / \gamma$, apresentada nas Tabelas 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11 e 9.12, pode-se perceber a grande influência das imperfeições iniciais na resistência à compressão dos elementos comprimidos de aço e que a curva **b** é a que melhor representa a resistência dos perfis ensaiados.

Analisando a comparação da força normal crítica experimental N_E com a força normal crítica obtida pelas normas de cálculo, apresentada nas Tabelas 9.4, 9.5 e 9.6, pode-se verificar uma a maior influência das imperfeições iniciais v_0 para os modelos com maiores índices de esbeltez λ , pois os modelos mais esbeltos situam na

faixa de esbeltez onde os efeitos das imperfeições iniciais na resistência à compressão são mais significantes.

Comparando os valores experimentais e teóricos da força normal crítica para as ensaiadas, verifica-se que a série CS 150 x 25 apresenta resultados teóricos mais ajustados com os experimentais. Entre as outras duas séries ensaiadas, a de maior seção OS 225x29 é a que apresenta um melhor ajuste entre a força normal T e a força normal crítica experimental N_E , percebe-se que há uma tendência dos modelos da série PS 200x25 perderem a estabilidade por torção.

Para a execução de ensaios à compressão de perfis estruturais de aço **I – FC** com o objetivo de se verificar os efeitos da flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia é importante consultar as Tabelas do anexo B da norma NBR 5884: 2000, para que a escolha seja sempre por perfis mais adequados ao uso como pilares, ou seja, seções pertencentes às séries CS e CVS.

Os modelos de menor esbeltez λ próximo de 40 tendem a atingir o escoamento da seção transversal em virtude da pouca influência das imperfeições iniciais na resistência à compressão de modelos curtos.

Os modelos intermediários com esbeltez λ na faixa compreendida entre 50 e 70 apresentaram valores teóricos da força normal crítica à compressão mais ajustados, quando comparados com os resultados experimentais.

Para a maior esbeltez λ , da ordem de 80, a média dos resultados da força a experimental apresenta-se um maior afastamento das curvas de resistência à compressão, adotadas pelas normas de cálculo. Isto ocorre em virtude de uma maior influência das imperfeições iniciais nesta faixa de esbeltez e também, porque a maioria dos modelos esbeltos, ensaiados, constam-se com uma imperfeição inferior à imperfeição inicial padrão $\vartheta = L / 1000$, adotada para a determinação das curvas de resistência à compressão.

Levando em consideração a posição da média dos resultados da força normal dos modelos ensaiados a compressão, em relação às curvas **b** e **c**, conclui-se que a curva **b** é a mais adequada, quando a flambagem ocorre por flexão em torno do eixo de menor inércia $y - y$, para o cálculo da resistência à compressão dos perfis **I - FC** de pequenas dimensões.

Finalizando este trabalho, é interessante ressaltar que há a necessidade de ampliar o número de modelos a serem ensaiados e avaliar as condições e resultados quando a flambagem não ocorre no eixo de menor inércia e que seja realizado um trabalho efetivo de caracterização de tensões residuais, que por problemas de ordem técnica não foram realizadas neste trabalho, para permitir uma conclusão definitiva sobre os procedimentos adotados quanto ao dimensionamento de perfis I soldados de aço comprimidos.

BIBLIOGRAFIA

- ALPSTEN, G.A.; TALL, L. (1970). Residual stresses in heavy welded shapes. *Welding Journal*, v.49, n.3, Research Suppl., p. 93s-105s, Mar.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (1989). *Manual of steel construction: allowable stress design*. 9th ed. Chicago.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). A-370 – *Standart test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. Philadelphia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1986). *NBR 8800/86 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro.
- AUGUSTI, G.; BARATTA, A. (1971). Teoria probabilistica della resistenza delle aste compresse. *Costruzioni Metalliche*, v.23, n.1, p.44–58, gen.-feb.
- BATTERMAN, R.H.; JOHNSTON, B.G. (1967). Behavior and maximum strength of metal columns. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.93, n.2, p.205-230, Apr.
- BEEDLE, L.S.; TALL, L. (1960). Basic column strength. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 86, ST7, p.139–173, July. Also *Transactions*, ASCE, 127, (1962), part II, pp. 138 - 179.
- BEER, H. (1970). Nuove curve per il calcolo di aste compresse. *Costruzioni Metalliche*, v.22, n.5, p.338–344, set.- ott.
- BEER, H.; SCHULZ, G. (1970). Bases théoriques des courbes européennes de flambement. *Costruzioni Metalliche*, v.22, n.6, p.436-452, nov.-dic.
- BJORHOVDE, R., et alli. (1972). Residual stresses in thick welded plates. *Welding Journal*, v.51, n.8, Research Suppl., p. 392s-405s, Aug.
- BJORHOVDE, R. (1978). The safety of steel columns. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.104, n.ST3, p.463-477, Mar.

- BJORHOVDE, R. (1980). Research needs in stability of metal structures. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.106, n.12, p.2425-2442, Dec.
- BJORHOVDE, R. (1984). Effect of end restraint on column strength: practical applications. *Engineering Journal*, AISC, first quarter, p.1-13.
- BJORHOVDE, R. (1988). Columns: from theory to practice. *Engineering Journal*, AISC, first quarter, p. 21-34.
- BJORHOVDE, R. (1991). Strength of heavy columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v.19, n.4, p.313-320.
- BLEICH, F. (1952). *Buckling strength of metal structures*. New York: McGraw-Hill.
- BROZZETTI, J.; ALPSTEN, G.A.; TALL. (1971). Welding parameters, thick plates and column strength. *The Welding Journal*, v.50, p.331s-342s.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA). (1984). CAN3-S16.1-M84-*Steel structures for buildings (limit states design)*. Toronto.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA) (1989). CAN/CSA - S16.1 - M89: Limit states design of steel structures. In:_____ *Handbook of steel construction*. 15.ed. Ontario. pt.1.
- CHEN, W.F.; LUI; E.M. (1985). Columns with end restraint and bending in load and resistance design factor. *Engineering Journal*, AISC, third quarter, p.105-132.
- CHEN, W.F.; LUI, E.M. (1987). *Structural stability: theory and implementation*. New York: Elsevier.
- CHERNENKO, D.E.; KENNEDY, D.J.L. (1991). Analysis of the performance of welded wide flange columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.18, n.4, p.537-555, Aug.
- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (1992). *Eurocódigo 3 Proyecto de estructuras de acero*. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Bruxelles, CEN. (ENV 1993-1-1).
- DJALAY, H. (1977). Étude de la résistance ultime des barres comprimées - flambement simple. *Construction Métallique*, n.1.
- FUKUMOTO, Y.; ITOH, Y. (1983). Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach. *Journal of Constructional Steel Research*, v.3, n.3, p.2-19.

- experimental. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São, Universidade de São Paulo. São Carlos (SP).
- JOHNSTON, B.G. (ed.), (1976). *Guide to stability design criteria for metal structures*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons.
- JOHNSTON, B.G. (1983). Column buckling theory: historical highlights. *Journal of Structural Engineering*, v.109, n.9, p.2086-2096, Sept.
- LUI, E.M.; CHEN, W.F. (1983). End restraint and column design using LRFD AISC. *Engineering Journal*, v.20, n.1, 1st Qtr., p.29-39.
- LUI, E.M.; CHEN, W.F. (1983a). Strength of H-columns with small end-restraints. *Structural Engineering*, v.61B, n.1, Part B, London, p.17-26.
- LUI, E.M.; CHEN, W.F. (1984). Simplified approach to the analysis and design of columns with imperfections. *Engineering Journal*, AISC, v.21, n.2, Second Quarter, p.99-117.
- MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1978). Analytical formulation of the new European buckling curves. *Acier Stahl Steel*, n.1, p.23-28.
- MAQUOI, R.; RONDAL, J. (1978). Mise en équation des nouvelles courbes européennes de flambement. *Construction Métallique*, n.1.
- McFALLS, R.K.; TALL, L. (1969). A study of welded columns manufactured from flame-cut plates. *Welding Journal*, v.48, n.4, Research Suppl, p.141s-153s, Apr.
- NAGARAJA RAO, N.R.; ESTUAR, F.R.; TALL, L. (1964). Residual stresses in welded shapes. *Welding Journal*, v.43, n.7, Research Suppl, p.295s-306s, July.

- PIMENTA, R.J. (1997). *Proposição de uma curva de flambagem para perfis I soldados formados por chapas cortadas a maçarico*. Dissertação de mestrado. UFMG. Belo Horizonte (MG).
- POPOVIC, D.; HANCOCK, G.J; RASMUSSEN, JR, K. (1996). *Axial compression tests of DuraGal angles*. Sydney, University of Sydney, School of civil and Mining Engineering. 106 p. (Research Report n.R730).
- QUEIROZ, G. (1988). *Elementos das estruturas de aço*. 2.ed. Belo Horizonte.
- RACHID, M.; MORI, D.D. (1989). *Instabilidade: conceitos - aplicação na flambagem por flexão*. Escola de Engenharia de São, Universidade de São Paulo.
- RACHID, M.; MORI, D.D. (1993). *Instabilidade: flambagem de barras de seções delgada por torção e flexão*. Escola de Engenharia de São, Universidade de São Paulo. São Carlos (SP).
- RODRIGUES, F.C. (1993). *Estudo teórico-experimental de perfis de chapa dobrada submetidos à compressão*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro (RJ).
- RONDAL, J.; MAQUOI, R. (1979). Single equation for SSRC column-strength curves. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.105, n.ST1, p.247-250, Jan.
- RONDAL, J.; MAQUOI, R. (1979). Formulations d' Airton - Perry pour flambement de barres métalliques. *Construction Métallique*, n.4, Paris.
- SALMON, C.G.; JOHNSON, J.E. (1996). *Steel Structures: design and behavior*. 4.ed. New York, HarperCollins.
- SFINTESCO, D. (1970). Fondement expérimental des courbes européennes de flambement. *Costruzioni Metalliche*, n.22, n.6, p.409-415, nov.-dic.
- SHANLEY, F.R. (1946). The column paradox. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v.13, n.12, p.678, Dec.
- SHANLEY, F.R. (1947). Inelastic column theory. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v.14, n.5, p.261-268, May.
- TIMOSHENKO, S.P. (1953). *History of strength of materials*. New York: McGraw-Hill.
- TIMOSHENKO, S.P; GERE, J.M. (1961). *Theory of elastic stability*. 2.ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- ABDEL-SAYED, G. (1969). Effective width of thin plates in compression. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.95, n.ST10, p. 2183-2203. Oct.
- ADLURI, S.M.R.; MADUGULA, M.K.S. (1991). Factored axial compressive resistance of schifflerized angles. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.18, n.6, p.926-932, Dec.
- ADLURI, S.M.R.; MADUGULA, M.K.S. (1996). Development of column curve for steel angles. *Journal-of-Structural-Engineering*, v.122, n.3, p.318-325, Mar.
- AL-SAYED, S.H.; BJORHOVDE, R. (1989). Experimental study of single angle columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v.12, p.83-102.
- AL-SAYED, S.H.; BJORHOVDE, R. (1989). Inelastic behavior of single angle columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v.12, p.103-118.
- ALSLANI, F.; Goel, S.C. (1991). An analytical criterion for buckling strength of built-up compression members. *Engineering Journal*, AISC, v.28, n.4, 4th Quarter, p.159-168.
- ASLANI, F.; GOEL, S.C. (1992). Analytical criteria for stitch strength of built-up compression members. *Engineering Journal*, AISC, v.29, n.4, 4th Quarter, p.102-110.
- AZHARI, M.; BRADFORD, M.A. (1993). Inelastic initial local buckling of plates with and without residual stresses. *Engineering structures*, v.15, n.1, p.31-39.
- BALLIO, G.; MAZZOLANI, F. M.(1983). *Theory and design of steel structures*. London, Chapman and Hall.
- BRADFORD, M.A.; AZHARI, M. (1994). Local buckling of I-sections bent about the minor axis. *Journal-of-Constructional-Steel-Research*, v.31, n.1, p.73-89.

- BATHON, L.; MUELLER III, W.H.; KEMPNER Jr, L. (1993). Ultimate load capacity of single steel angles, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.119, n.1, p.279-300, Jan.
- BERNARD, A. (1978). Buckling tests on I - section beams rolled in high-yield steel. *Acier Stahl Steel*, n.4, p.157-160.
- BILD, S.;TRAHAIR, N.S. (1988). Steel column strength models, *Journal-Constr-Steel-Res*, v 11, n 1, p 13-26.
- BILD, S.; KULAK, G. L. (1991). Local buckling rules for structural steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, v.20, n.1, p. 1-52.
- BJORHOVDE, R.; BIRKEMOE, P.C. (1979). Limit states design of HSS columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.5, n.2, p.276-291, June.
- BJORHOVDE, R. (1987). Centrally loaded columns. In: CONGRESS ON MATERIALS AND MEMBER BEHAVIOR, Orlando, USA, 1987. *Proceedings*. New York, ASCE, p.147-163.
- BRADFORD, M.A. (1987). Inelastic local buckling of fabricated I-beams, *Journal of Constructional Steel Research*, v.7, n.5, p. 317-334.
- CALLADINE, C.R. (1973). Inelastic buckling of columns: the effect of imperfections. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.15, n.7, p.593-604.
- CARPENA, A. (1970). Détermination des limites élastiques pour l'analyse du flambement. *Costruzioni Metalliche*, v.22, n.6, p.453-457, nov.-dic.
- CHEN, W.F.; LUI, E.M. (1985). Stability design criteria for steel members and frames in the United States. *Journal of Constructional Steel Research*, v.5, n.1, p.31-74.
- CHEN, W.F.; SANTATHADAPORN, S. (1968). Review of column behavior under biaxial loading. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.94, n.12, p.2999-3021, Dec.
- CHEN, S.J.; CHANG, S.C (1993). Residual stresses in welded jumbo box columns. *Journal-of-Constructional-Steel-Research*, v.25, n.3, p.201-209.
- DADDI, I.; MAZZOLANI, F.M. (1972). Determinazione sperimentale delle imperfezioni strutturali nei profilati di acciaio. *Costruzioni Metalliche*, n.5, p.374-394.

- DADDI, I.; MAZZOLANI, F.M. (1974). Détermination expérimentale des imperfections structurales des profilés en acier, Article publié dans le cadre d'une collaboration avec la revue *Costruzioni Metalliche*. *Construction Métallique*, n.1.
- DAVIDS, A.J.; HANCOCK, G.J. (1986). Compression test of short welded I-section. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.112, n.ST5, p.960-976, May.
- DAWE, J.L.; KULAK, G.L. (1984). Plate instability of W shapes. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.110, n.6, p.1278-1291, June.
- DUBERG, J.E.; WILDER III; T.W. (1950). Column behavior in the plastic stress range. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v.17, n.6, p.323-327, June.
- DUTHEIL, J. (1966). Verifica delle aste compresse: principi fondamentali. *Costruzioni Metalliche*, v.18, n.4, p.266-275, iug.-ago.
- ELGAALY, M.; DAGHER, H.; DAVIDS, W. (1991). Behavior of single-angle-compression members. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.117, n.12, p.3720-3741, Dec.
- ELGAALY, M.; DAVIDS, W.; DAGHER, H. (1992). Non-slender single angle struts. *Engineering Journal*, AISC, v.29, n.2, 2nd Quarter, p.49-58.
- EUROCODE 3 (1983). *Common unified code of practice for steel structures*. Draft.
- FUKUMOTO, Y.; ITOH, Y. (1981). Statistical study of experiments on welded beams. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.107, n.ST1, p.89-103, Jan.
- FUKUMOTO, Y.; ITOH, Y.(1984). Exploitation de courbes multiples de flambement par une approche à base de données expérimentales. *Construction Métallique*, n.3.
- GALAMBOS, T.V. (1965). Strength of round steel columns. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.91, n.ST1, p.121-140, Feb.
- GALAMBOS, T.V. (1968). *Structural members and frames*. Englewood Cliffs: Prentice-hall.
- GALAMBOS, T.V.; LIN, F.J.; JOHNSTON, B.G. (1996). *Basic steel design with LRFD*. New Jersey, Prentice Hall.
- GESCHWINDNER, L. F., DISQUE, R. O., BJORHOVDE, R. (1995). *Load and resistance factor design of steel structures*. New Jersey, Prentice Hall.

- GONÇALVES, R. M. (1988). Estudo de barras solicitadas à compressão. *In: SEMINÁRIO “USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO”*, 3., Anais. São Paulo: CTCEM, p.173-186.
- GRAVES-SMITH, T.R. (1969). The ultimate strength of locally buckled columns of arbitrary length. *Thin Walled Steel Structures*, edited by Rockey, K. C., and Hill Crosby Lockood, London, p.35-60.
- GRIMAULT, J.P.; MAQUOI, R.; MOUTY, J.; PLUMIER, A.; RONDAL, J. (1984). Stabilité des poutres - poteaux en profils creux à parois minces. *Construction Métallique*, n.4, p.33-41.
- GUO, Y.L. (1992). Ultimate load behaviour of welded thin-walled stub columns under combined loading of axial compression and bending. *Computers and Structures*, v.42, n.4, p.591-597, Feb.
- GUO, Y.L.; FUKUMOTO, Y. (1995). Ultimate strength of thin-walled stub columns. *Technologym Reports of the Osaka University*, v.45, n.2217-2232, p.201-212, Oct.
- GUO, Y. L.; FUKUMOTO, Y. (1996). Theoretical study of ultimate load of locally buckled stub columns loaded eccentrically. *Journal of Constructional Steel Research*, v.38, n.3, p.239-255, July.
- GURFINKEL, G.; ROBINSON, A.R. (1965). Buckling of elastically restrained columns. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.91, n.ST6, p.159-183, Dec.
- HAAIJER, G. (1957). Plate buckling in the strain-hardening range. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, v.83, n.2, paper 1212, 47p., Apr.
- HAAIJER, G.; THÜRLIMANN, B. (1960). Inelastic buckling in steel. *Transactions, ASCE*, v.125, part 1, p.308-338
- HANCOCK, G.J. (1981). Interaction buckling in I-section columns. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.107, n.ST1, p.165-179, Jan.
- HANCOCK, G. (1981). Nonlinear analysis of thin sections in compression. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.107, n.ST3, p.455-471, Mar.
- HARICHANDRAN, R.S. (1991). Stiffness reduction factor for LRFD of columns. *Engineering Journal, AISC*, v.28, n.3, 3rd Quarter, p.129-130.

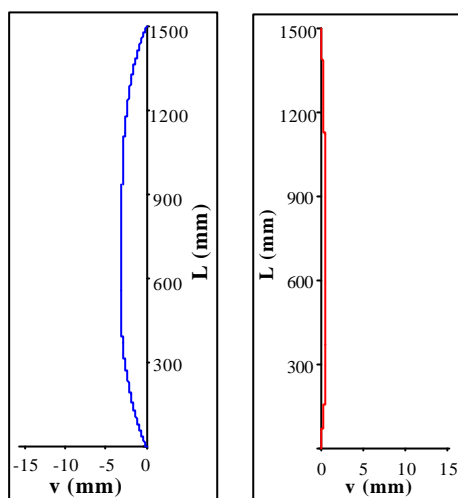
- IVÁNYI, M.; HEGEDÜS, L. (1992). Local buckling and flexural-torsional buckling with regard to residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, v.21, n.1-3, p.205-226.
- JOHNSTON, B.G. (1963). Buckling behavior above the tangent modulus load. *Transactions, ASCE*, v.128, part 1, p.819-839
- JOHNSTON, B.G. (1964). Inelastic buckling gradient. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, v.90, n.EM6, p.31-47, Dec.
- KALYANARAMAN, T.P.; WINTER, G. (1977). Unstiffened compression elements. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.103, n.ST9, p.1833-1848. Sept.
- KÁRMÁN, T.V.; SECHLER, E.E.; DONNELL, L.H. (1932). The strength of thin plates in compression. *Transactions, ASME*, v.54, n.APM-54-5, 53.
- KENNEDY, J.B.; MURTY, M.K.S. (1972). Buckling of steel angle and tee struts. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.98, n.ST11, p.2507-2522, nov.
- KENNEDY, J.B.; MURTY, M.K.S. (1982). Buckling of angles: state of the art. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.108, n.ST9, p.1967-1980, Sept.
- KENNEDY, D.J.L. (1994). Steel compression member design in the 1994 Canadian standard. In: Structures Congress '94,. Atlanta, USA, 1994. *Proceedings*. New York, ASCE. p.221-226,
- KITIPORNCHAI, S. (1983). Torsional - flexural buckling of angles: a parametric study. *Journal of Constructional Steel Research*, v.3, n.3, p.27-31.
- KITIPORNCHAI, S.; LEE, H.W. (1986). Inelastic buckling single - angle, tee and double - angle struts. *Journal of Constructional Steel Research*, v.6, n.1, p.3-20.
- KOROL, R.M.; SHERBOURNE, A.N. (1972). Strength predictions of plates in uniaxial compression. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.98, n.ST9, p.1965-1986, Sept.
- KOZÁK, J. (1966). Le dimensionnement économique des barres en acier a haute resistance, solícitees au flambage. *Acier Stahl Steel*, v.31, n.6, p.301-305, juin.
- LAMBOOY, W. (1974). Eléments soumis à un effort de compression excentré. *Acier Stahl Steel*, n.2, p.85-89.
- LANDOLFO, R.; MAZZOLANI, F.M. (1991). The influence of the variation through the thickness of residual stresses in tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v.19, n.1, p.49-57.

- LOOV, R. (1996). Simple equation for axially loaded steel column design curves. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.23, n.1, p.272-276, Feb.
- MALVICK, A.J.; LEE, L.H.N. (1965). Buckling behavior of an inelastic column. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, v.91, n.EM3, p.113-127, June.
- MAS, E.; MASSONNET, C. (1966). Part prise par la Belgique dans les recherches expérimentales de la Convention Européenne des Associations de la Construction Métallique sur le flambement centrique des barres en acier doux. *Acier Stahl Steel*, v.31, n.9, p.393-400, sept.
- MASSONNET, C. (1966). Etat actuel du probleme du flambement des barres en acier, a la lumiere des travaux de la Commission VIII (Instabilite) de la Convention Européenne de la Construction Métallique. *Acier Stahl Steel*, v.31, n.10, p.459-466, oct.
- MAXWELL, G.L. (1965). Flange local buckling in wide-flange shapes. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.91, n.ST6, p.95-116, Dec.
- MAZZOLANI, F.M. (1973). Influenza delle imperfezioni strutturali sulla instabilità delle colonne in acciaio. *Costruzioni Metalliche*, v.25, n.6, p.380-390, nov.-dic.
- McDERMOTT, J.F. (1969). Local plastic buckling of A514 steel members. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.95, n.ST9, p.1837-1850, Sept.
- MOLLER, M.; JOHANSSON, B.; COLLIN, P. (1997). New analytical model of inelastic local flange buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, v.43, n.1-3, p.43-63, July-Sept.
- MULLIGAN, G.P.; PEKOZ, T. (1984). Locally buckled thin - walled columns. *Journal of Structural Division*, ASCE, v.110, n.11, p.2635-2654.
- RASMUSSEN, K.J.R.; HANCOCK, G.J. (1989). Compression tests of welded channel section columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.115, n.4, p.789-808, Apr.
- RASMUSSEN, K.J.R.; DAVIDS, A.J.; HANCOCK, G.J. (1990). Design of columns fabricated from slender plates. *Journal of Constructional Steel Research*, v.17, n.4, p.283-303.

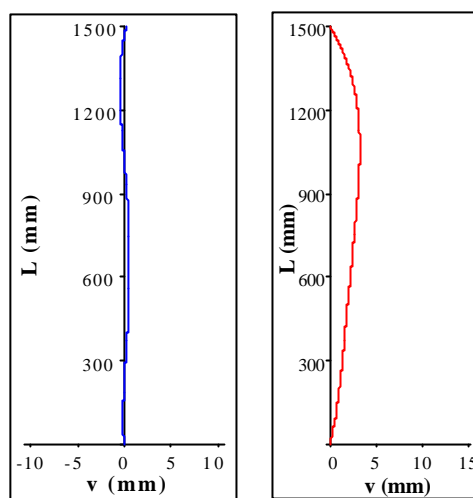
- RASMUSSEN, K.J.R.; HANCOCK, G.J. (1992). Plate slenderness limits for high strength steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, v.23, n.1-3, p.73-96.
- RASMUSSEN, JR. K.; HANCOCK, G.J. (1995). Tests of high strength steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v.34, n.1, p.27-52.
- RASMUSSEN, JR., K.; RONDAL, J. (1997). Strength curves for metal columns. *Journal of Structural Engineering*, v.123, n.6, p.721-728, June.
- RASMUSSEN, JR.,K.; RONDAL, J. (1997). Explicit approach to design of stainless steel columns. *Journal of Structural Engineering*, v.123, n.7, p.857-863, July.
- REN, W.X.; ZENG, Q.Y. (1997): Interactive buckling behavior and ultimate load of I-section steel columns. *Journal of Structural Engineering*, v.123, n.9, p.1210-1217, Sept.
- RODRIGUES, F.C.; BATISTA, E.M. (1991). Calibração de uma curva de flambagem para dimensionamento de colunas constituídas de perfis de chapa dobrada. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., Porto Alegre, 1991. *Anais*. Porto Alegre, CPGEC-UFRGS. v.2, p.301-312.
- ROTTER, J.M. (1982). Multiple column curves by modifying factors. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.108, n.ST7, p.1665–1669, July.
- SHANLY, F.R. (1950). Applied column theory. *Transactions*, ASCE, v.115.
- SHARP, M.L. (1966). Longitudinal stiffeners for compression members. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.92, n.ST5, p.187-211, Oct.
- SHERBOURNE, A.N.; KOROL, R.M. (1972). Post-buckling of axially compressed plates. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.98, n.ST10, p.2223-2234. Oct.
- SHERMAN, D.R. (1969). Residual stress measurement in tubular members. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.95, n.ST4, p.635–647, April.
- SHERMAN, D.R. (1971). Residual stress and tubular compression members. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.97, n.ST3, p.891–904, Mar.
- SMITH, Jr, C.V. (1976). On inelastic column buckling. *Engineering Journal*, AISC, v.13, n.3, Third Quarter, p.86-88.
- TEBEDGE, N.; CHEN, W.F. (1974). Design criteria for H - columns under biaxial loading. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v.100, n.3, p.579-598, Mar.

- THÜRLIMANN, B.(1962). New aspectos concerning elastic stability of steel structures. *Transactions*, ASCE, v.127.
- THÜRLIMANN, B. (1990). Column buckling: historical and actual notes. *Journal of Constructional Steel Research*, v.17, p.95-111.
- THOMPSON, J.M.T.; LEWIS, G.M. (1972). On the optimun design of thin - walled compression members. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.20, n.2, p.101-109.
- VAN DER NEUT, A. (1973). The sensitivity of thin - walled compression members to column axis imperfection. *International Journal of solids and Structures*, v.9, p.999-1011.
- YANG, C.H.; BEEDLE, L.S.; JOHNSTON, B.G. (1952). Residual stress and the yield strength of steel beams. *Welding Journal*, p.205s-229s, April.
- YU, C.K.; TALL, L. (1971). Significance and application of stub column test results. *Journal of the Structural Division*, v.97,n.ST7, July.
- WINTER, G. (1947). Strength of thin compression flanges. *Transactions*, ASCE, v.112, p.527-576.
- ZUREICK, A. (1993). Design strength of concentrically loaded single angle struts. *Engineering Journal*, AISC, v.30, n.1, 1st Quarter, p.17-30.

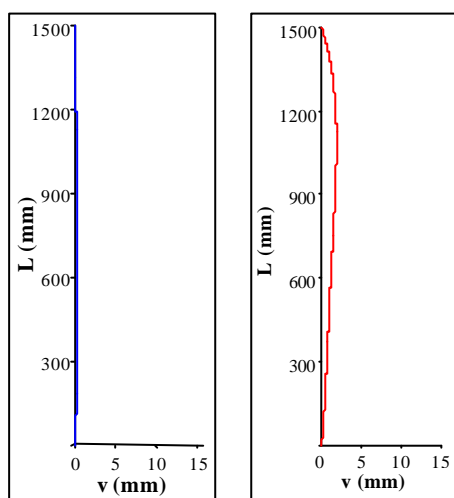
Nas Figuras II.1 a II.12, apresentadas nas páginas V e VI, a figura (a) corresponde a elástica do modelo considerando os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de menor inércia $y - y$, enquanto que a figura (b) ilustra a elástica do modelo admitindo os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de maior inércia $x - x$.



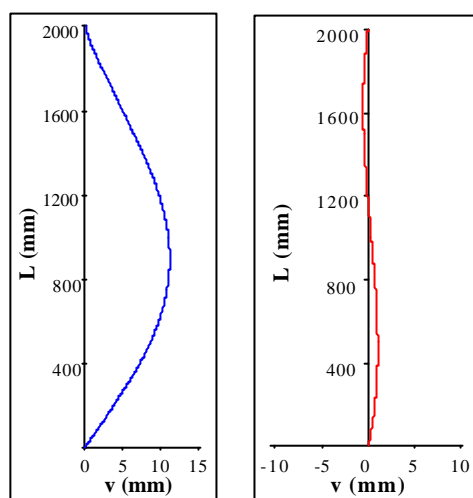
(a) (b)
Figura II.1 - Modelo 1 – L = 1500 mm.



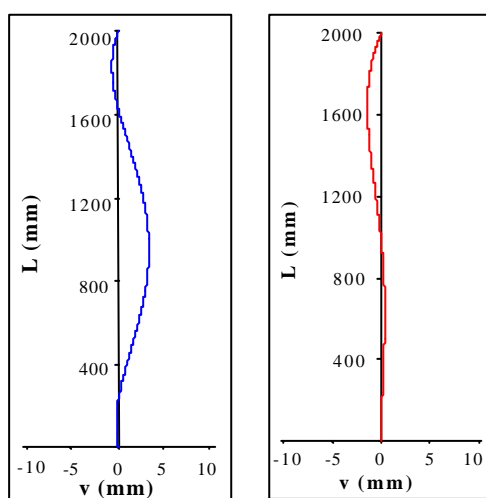
(a) (b)
Figura II.2 - Modelo 2 – L = 1500 mm.



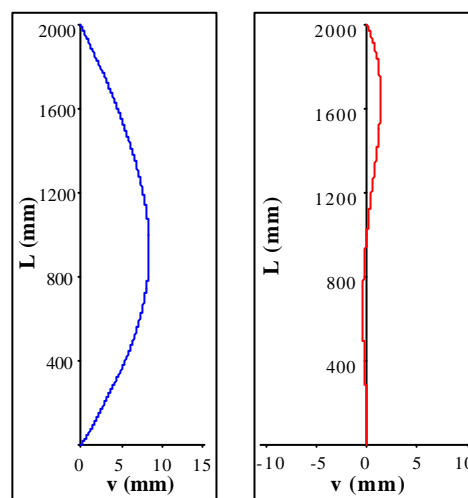
(a) (b)
Figura II.3 - Modelo 3 – L = 1500 mm.



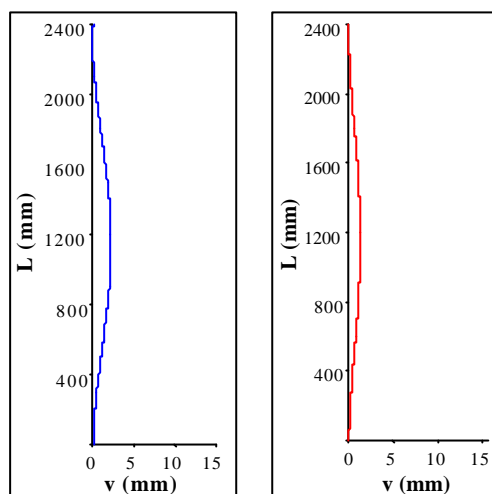
(a) (b)
Figura II.4 - Modelo 1 – L = 2000 mm.



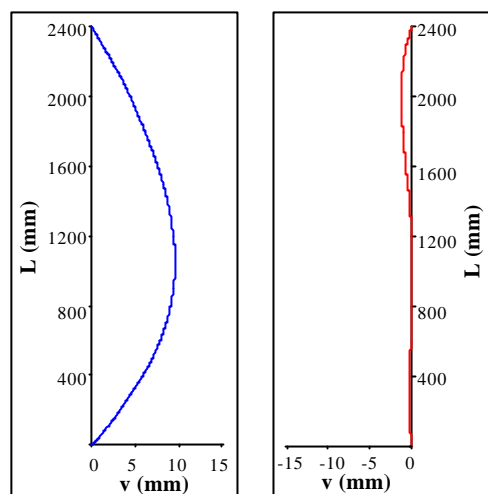
(a) (b)
Figura II.5 - Modelo 2 – L = 2000 mm.



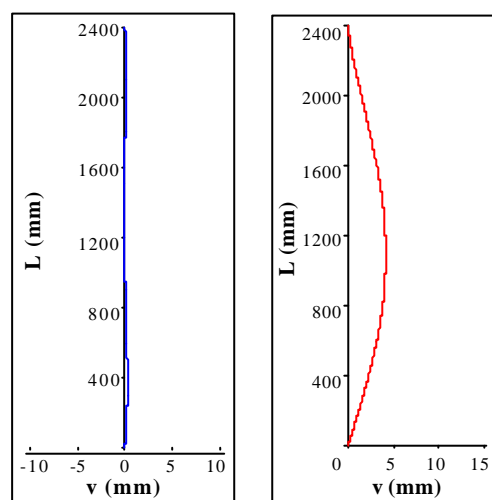
(a) (b)
Figura II.6 - Modelo 3 – L = 2000 mm.



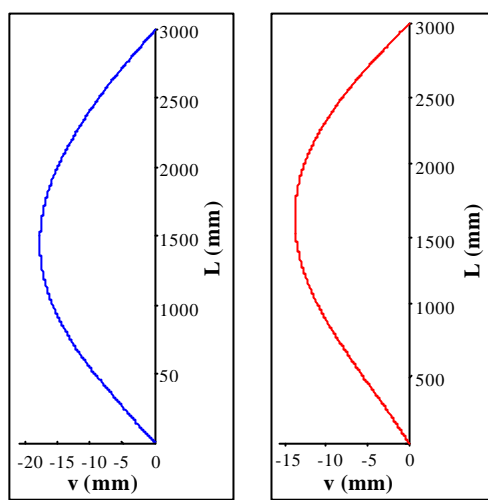
(a) (b)
Figura II.7 - Modelo 1 – L = 2400 mm.



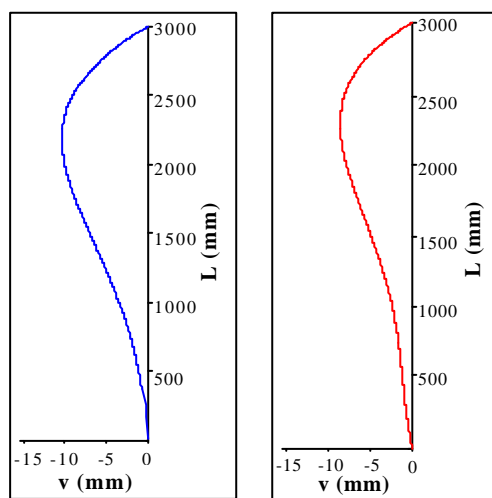
(a) (b)
Figura II.8 - Modelo 2 – L = 2400 mm.



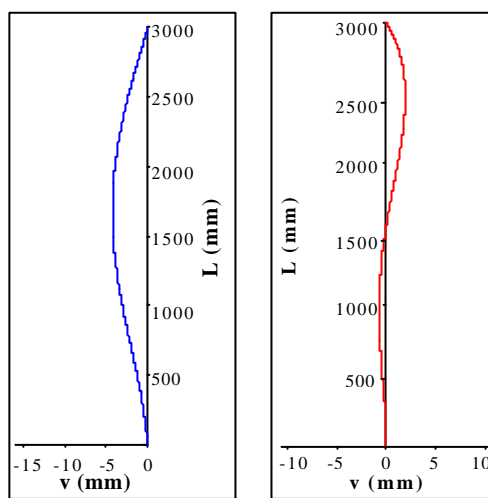
(a) (b)
Figura II.9 - Modelo 3 – L = 2400 mm.



(a) (b)
Figura II.10 - Modelo 1 – L = 3000 mm.



(a) (b)
Figura II.11 - Modelo 2 – L = 3000 mm.

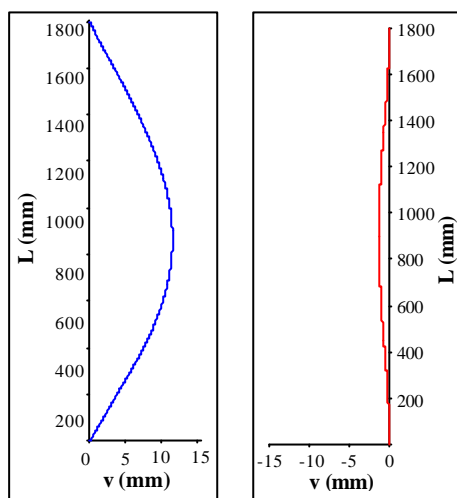


(a) (b)
Figura II.12 - Modelo 3 – L = 3000 mm.

ANEXO I

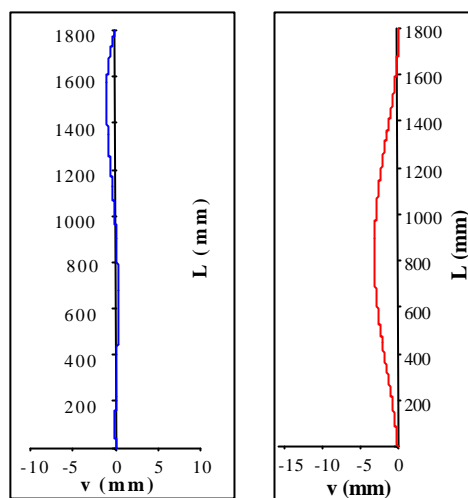
ELÁSTICA DOS MODELOS PERTENCENTES À

Nas Figuras I.1 a I.12, apresentadas nas páginas II e III, a figura (a) corresponde a elástica do modelo considerando os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de menor inércia $y - y$, enquanto que a figura (b) ilustra a elástica do modelo admitindo os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de maior inércia $x - x$.



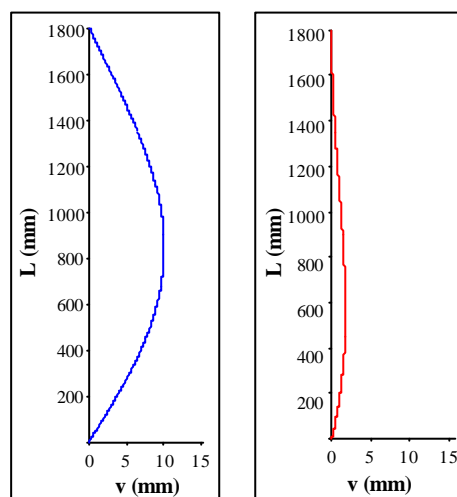
(a) (b)

Figura I.1 - Modelo 1 – L = 1800 mm.



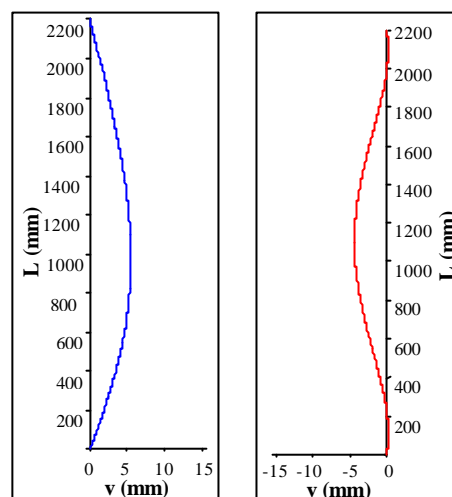
(a) (b)

Figura I.2 - Modelo 2 – L = 1800 mm.



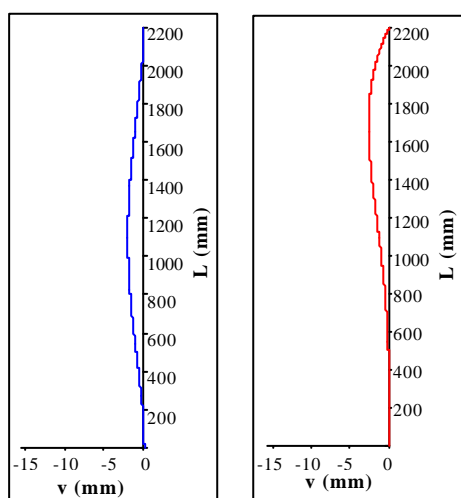
(a) (b)

Figura I.3 - Modelo 3 – L = 1800 mm.



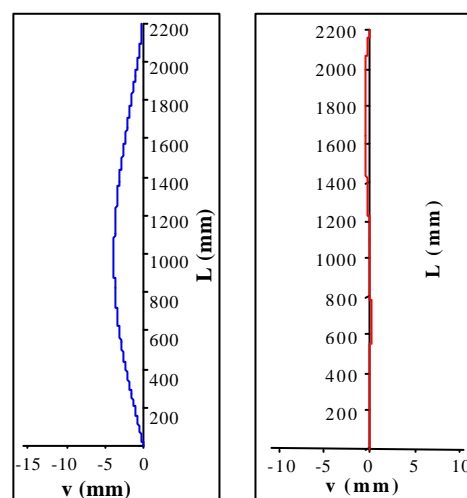
(a) (b)

Figura I.4 - Modelo 1 – L = 2200 mm.



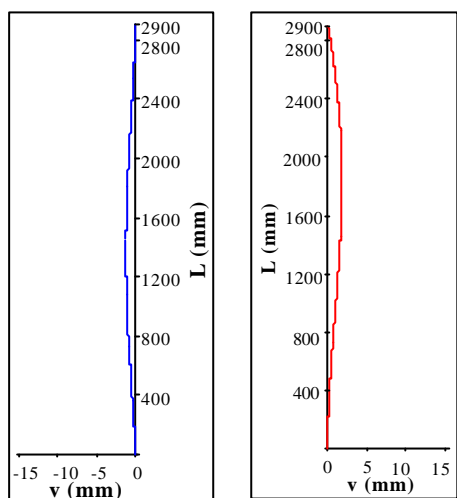
(a) (b)

Figura I.5 - Modelo 2 – L = 2200 mm.

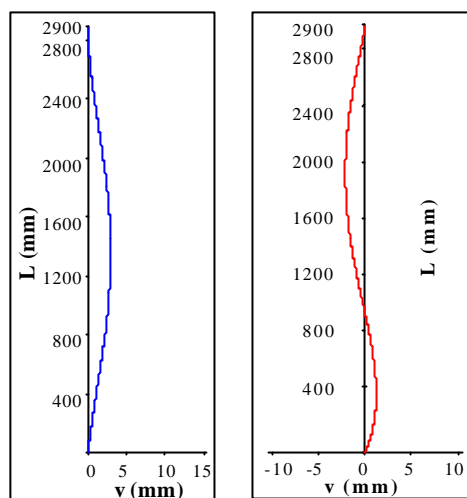


(a) (b)

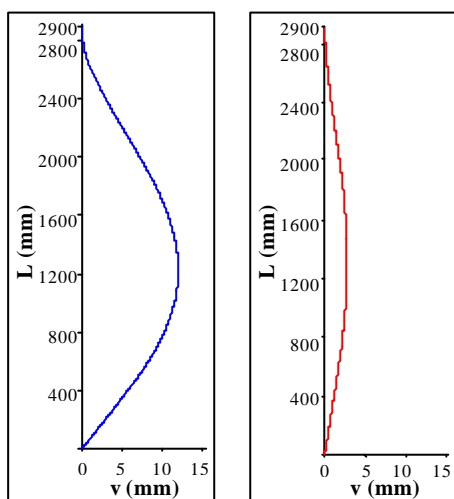
Figura I.6 - Modelo 3 – L = 2200 mm.



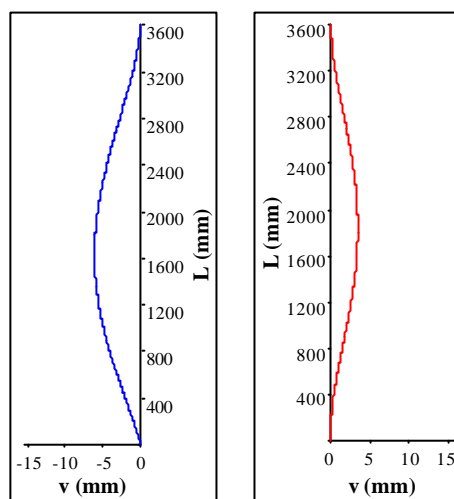
(a) (b)
Figura I.7 - Modelo 1 – L = 2900 mm.



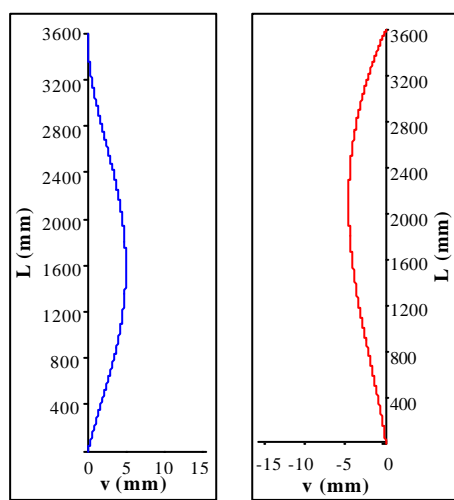
(a) (b)
Figura I.8 - Modelo 2 – L = 2900 mm.



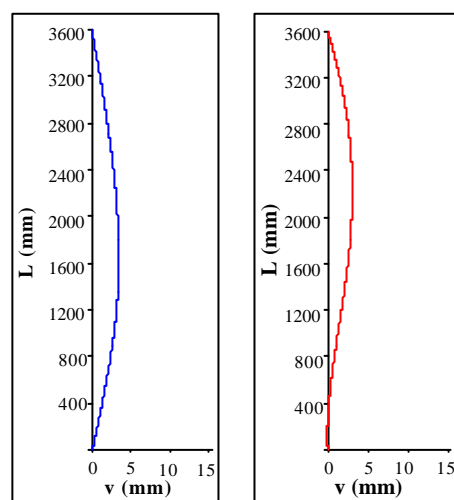
(a) (b)
Figura I.9 - Modelo 3 – L = 2900 mm.



(a) (b)
Figura I.10 - Modelo 1 – L = 3600 mm.

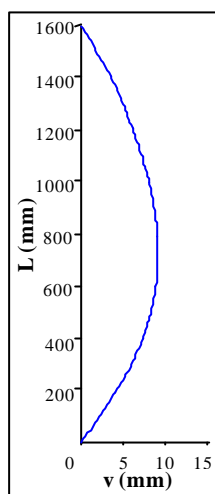


(a) (b)
Figura I.11 - Modelo 2 – L = 3600 mm.

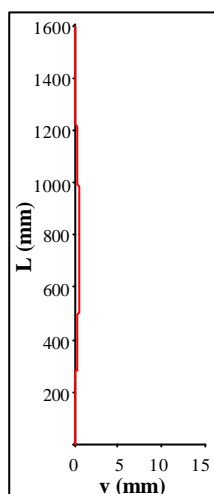


(a) (b)
Figura I.12 - Modelo 3 – L = 3600 mm.

Nas Figuras III.1 a III.12, apresentadas nas páginas VIII e IX, a figura (a) corresponde a elástica do modelo considerando os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de menor inércia $y - y$, enquanto que a figura (b) ilustra a elástica do modelo admitindo os deslocamentos laterais v medidos na direção do eixo de maior inércia $x - x$.

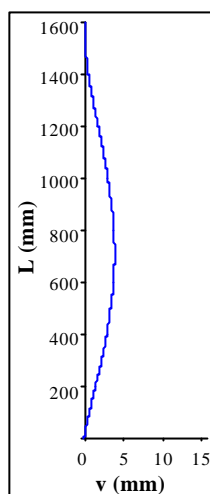


(a)



(b)

Figura III.1 - Modelo 1 – L = 1600 mm.

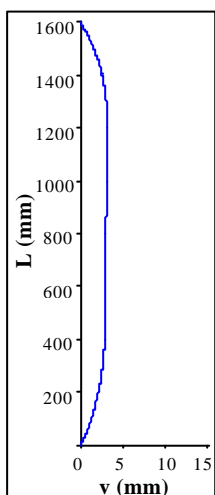


(a)

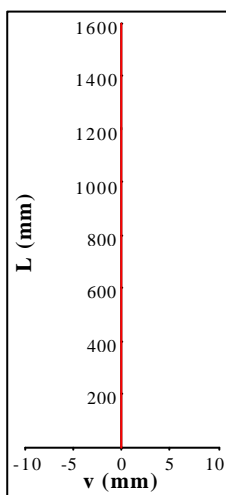
Os deslocamentos na direção $x - x$ foram desprezados

(b)

Figura III.2 - Modelo 2 – L = 1600 mm.

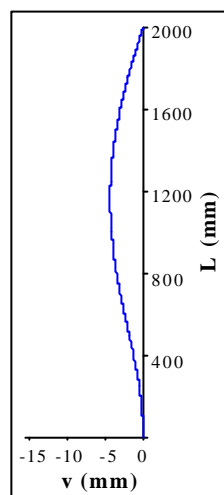


(a)

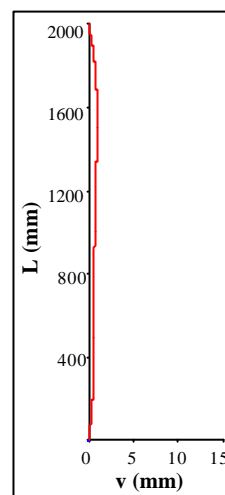


(b)

Figura III.3 - Modelo 3 – L = 1600 mm.

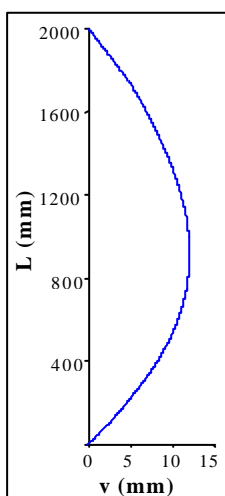


(a)

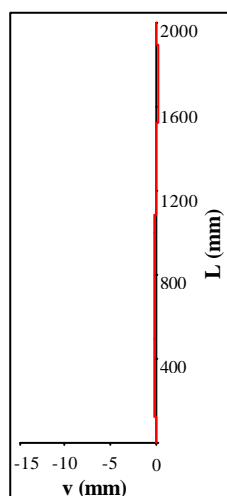


(b)

Figura III.4 - Modelo 1 – L = 2000 mm.

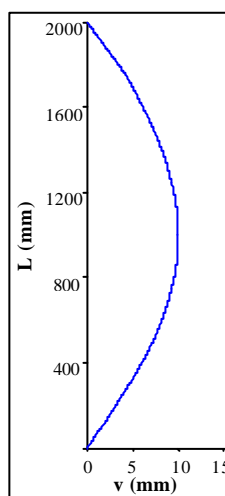


(a)

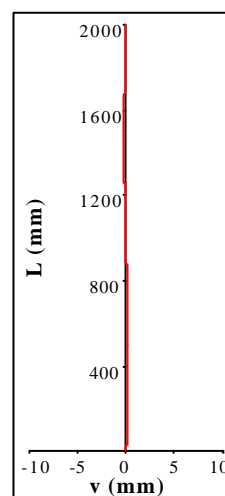


(b)

Figura III.5 - Modelo 2 – L = 2000 mm.

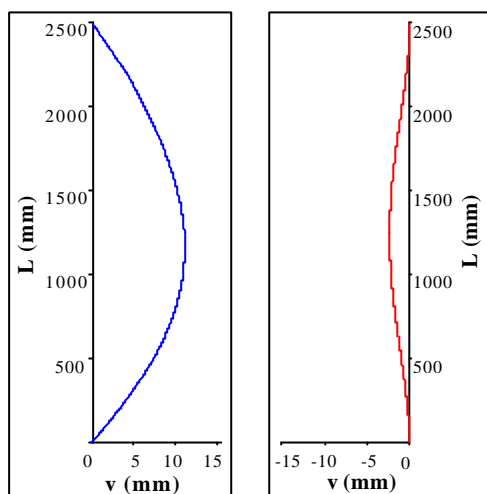


(a)

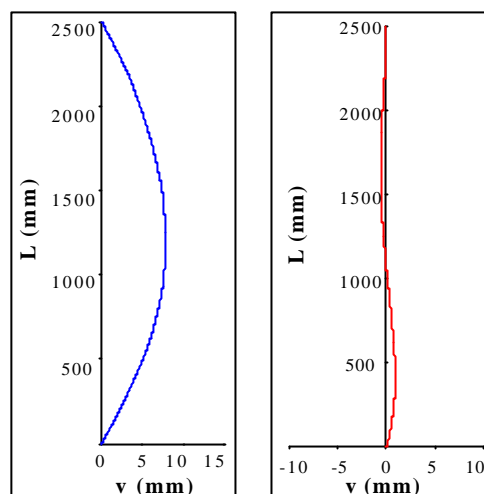


(b)

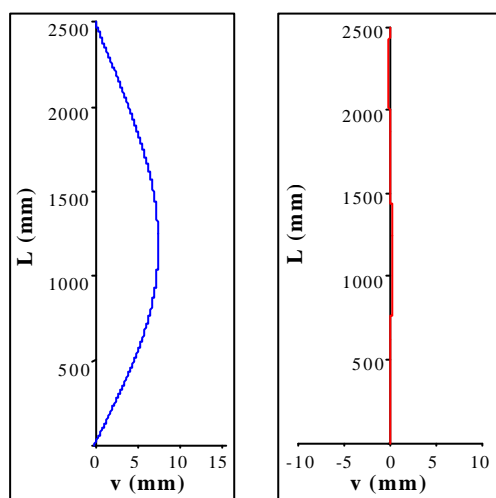
Figura III.6 - Modelo 3 – L = 2000 mm.



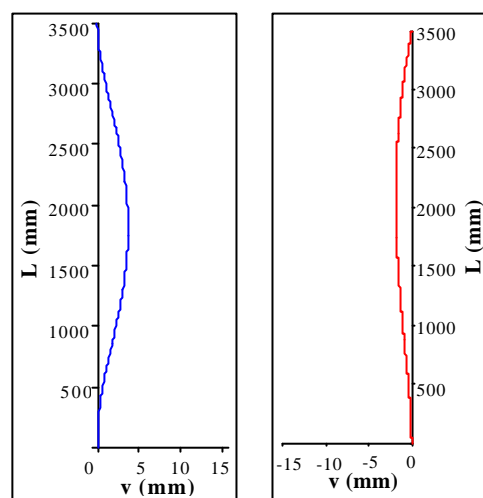
(a) (b)
Figura III.7 - Modelo 1 – L = 2500 mm.



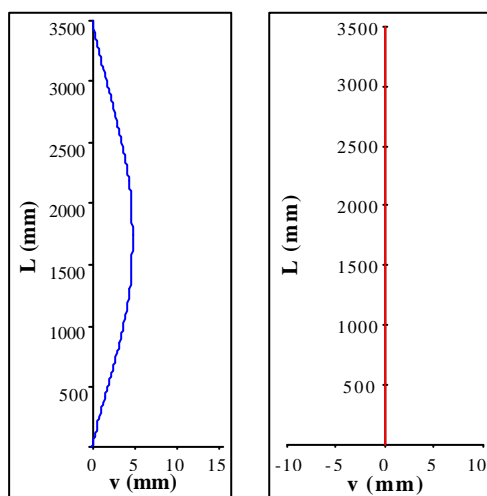
(a) (b)
Figura III.8 - Modelo 2 – L = 2500 mm.



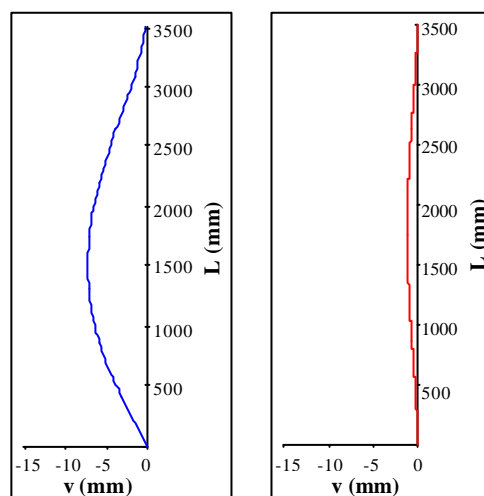
(a) (b)
Figura III.9 - Modelo 3 – L = 2500 mm.



(a) (b)
Figura III.10 - Modelo 1 – L = 3500 mm.



(a) (b)
Figura III.11 - Modelo 2 – L = 3500 mm.



(a) (b)
Figura III.12 - Modelo 3 – L = 3500 mm.

ANEXO IV

**DESLOCAMENTOS LATERAIS DOS MODELOS
PERTENCENTES À SÉRIE CS 150 x 25**

Tabela IV.1 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 1800 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-52	-0,02	-0,02	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,33	-0,04
-101	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	-0,02	0,02	-0,02	-0,02	-0,43	0,00
-150	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,52	-0,02
-200	-0,02	-0,02	-0,07	-0,03	-0,04	-0,02	0,00	-0,02	-0,56	0,00
-250	0,00	0,00	-0,04	-0,03	-0,04	0,00	-0,04	0,00	-0,62	-0,02
-302	-0,02	0,02	-0,04	-0,02	-0,04	0,02	-0,02	0,02	-0,66	-0,02
-350	0,00	-0,02	-0,04	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	-0,72	-0,04
-401	-0,02	-0,02	0,07	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	-0,78	-0,02
-454	-0,02	-0,02	0,14	0,00	0,02	-0,02	-0,02	0,02	-0,82	-0,04
-500	0,00	0,11	0,14	0,03	-0,02	0,00	0,00	-0,04	-0,89	-0,04
-551	0,02	0,21	0,25	0,12	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,95	-0,04
-602	-0,02	0,25	0,28	0,21	0,00	0,00	-0,02	0,00	-1,09	-0,04
-651	0,00	0,27	0,32	0,28	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-1,15	0,00
-700	0,07	0,36	0,39	0,38	-0,02	0,05	-0,02	0,00	-1,18	-0,02
-750	0,21	0,59	0,78	0,50	0,20	0,14	0,00	-0,02	-1,30	0,00
-800	0,38	0,82	1,09	0,83	0,50	0,26	0,00	-0,02	-1,30	0,00
-850	0,64	1,42	1,85	1,48	1,09	0,58	0,02	-0,04	-1,32	0,00
-900	1,07	2,60	3,53	2,82	2,36	1,26	0,12	0,04	-1,28	-0,02
-950	2,46	7,00	10,52	8,00	6,94	3,65	0,75	-0,02	-1,28	-0,02
-950	2,58	7,38	11,11	8,47	7,29	3,84	0,78	0,02	-1,30	-0,02
-951	2,56	7,40	11,18	8,48	7,36	3,89	0,80	0,00	-1,28	-0,02

Tabela IV.2 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 1800 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,02	-0,49	0,00
-102	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,72	0,00
-150	-0,02	-0,02	0,02	-0,05	-0,04	0,02	-0,04	0,00	-0,85	-0,07
-201	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	-0,02	-0,04	0,00	-0,93	-0,09
-250	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	-1,03	-0,11
-300	0,02	-0,02	0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,00	0,00	-1,09	-0,09
-350	0,00	-0,02	0,02	-0,05	-0,02	-0,02	0,00	0,02	-1,17	-0,18
-401	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	-1,24	-0,14
-452	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-1,42	-0,16
-501	-0,02	-0,02	0,00	-0,09	0,00	-0,03	0,02	0,00	-1,50	-0,16
-552	-0,02	-0,02	0,00	-0,12	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-1,63	-0,18
-600	0,00	-0,06	0,02	-0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,75	-0,20
-655	0,00	-0,13	0,02	-0,19	-0,04	-0,02	-0,02	0,04	-1,88	-0,21
-700	-0,07	-0,17	0,02	-0,22	-0,04	0,00	-0,02	0,02	-2,02	-0,28
-751	-0,12	-0,25	0,02	-0,26	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-2,20	-0,28
-800	-0,15	-0,25	0,02	-0,28	0,02	-0,02	-0,02	0,00	-2,31	-0,27
-855	-0,22	-0,40	0,02	-0,31	0,00	-0,02	0,00	0,00	-2,51	-0,27
-901	-0,28	-0,46	0,00	-0,33	-0,04	-0,02	0,00	-0,02	-2,64	-0,27
-950	-0,38	-0,57	-0,02	-0,31	-0,04	-0,03	0,00	0,00	-2,78	-0,27
-1000	-0,53	-0,75	0,04	-0,29	0,00	-0,03	0,02	-0,02	-2,95	-0,27
-1044	-0,67	-0,02	1,58	1,50	1,40	0,65	0,05	-0,02	-3,05	-0,28

Tabela IV.3 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 1800 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,03	-0,02	-0,02	0,00	-0,04	0,02	0,04	0,00	0,62	0,27
-101	-0,14	0,00	-0,04	0,00	-0,04	0,02	0,04	-0,02	0,87	0,32
-150	-0,21	-0,02	0,02	-0,03	-0,02	0,03	0,02	-0,02	1,01	0,39
-200	-0,24	-0,04	-0,02	-0,02	-0,02	0,03	0,02	-0,02	1,13	0,41
-251	-0,28	0,00	-0,02	-0,05	-0,02	0,03	0,05	-0,02	1,20	0,43
-302	-0,26	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,03	0,04	-0,02	1,28	0,48
-350	-0,29	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,03	0,05	0,00	1,34	0,48
-400	-0,28	-0,02	0,00	-0,05	0,00	0,05	0,05	-0,02	1,32	0,50
-451	-0,29	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,02	0,04	-0,02	1,32	0,50
-501	-0,28	0,00	-0,04	-0,05	-0,02	0,03	0,05	-0,04	1,38	0,50
-552	-0,31	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,03	0,04	-0,04	1,38	0,53
-600	-0,26	-0,02	0,00	0,03	0,00	0,03	0,04	0,00	1,40	0,53
-650	-0,29	0,06	-0,04	0,17	0,17	0,05	0,04	0,00	1,40	0,55
-700	-0,29	0,19	-0,02	0,26	0,18	0,09	0,04	-0,02	1,48	0,57
-751	-0,31	0,25	0,00	0,31	0,28	0,14	0,07	-0,04	1,44	0,55
-800	-0,31	0,46	0,09	0,45	0,46	0,21	0,04	0,00	1,46	0,66
-850	-0,21	0,73	0,36	0,76	0,68	0,41	0,05	-0,02	1,48	0,68
-900	0,07	1,47	1,44	1,46	1,35	0,67	0,20	-0,02	1,44	0,55
-950	1,13	4,59	6,20	5,21	4,63	2,49	0,64	0,00	1,44	0,61
-959	1,46	5,47	7,53	6,26	5,59	2,98	0,80	-0,06	1,44	0,66

Tabela IV.4 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2200 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,04	-0,02
-101	0,02	0,00	0,02	-0,02	-0,04	0,02	0,00	0,06	-0,02	0,07
-150	0,12	0,12	-0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,02	0,19	0,17	0,16
-200	0,22	0,16	0,13	0,09	0,00	0,03	0,02	0,28	0,11	0,20
-252	0,27	0,17	0,17	0,14	0,11	0,00	-0,02	0,35	0,18	0,20
-302	0,27	0,17	0,21	0,17	0,07	0,09	0,02	0,41	0,17	0,20
-353	0,29	0,19	0,25	0,21	0,11	0,10	-0,02	0,41	0,17	0,20
-402	0,31	0,31	0,27	0,21	0,09	0,09	0,00	0,39	0,20	0,20
-452	0,35	0,29	0,27	0,21	0,11	0,09	-0,02	0,39	0,22	0,20
-501	0,39	0,29	0,25	0,22	0,13	0,09	0,02	0,39	0,18	0,18
-550	0,37	0,31	0,25	0,21	0,15	0,10	0,02	0,43	0,18	0,18
-602	0,41	0,35	0,25	0,26	0,15	0,10	0,04	0,43	0,22	0,16
-650	0,41	0,33	0,31	0,26	0,15	0,07	0,02	0,41	0,20	0,20
-700	0,45	0,27	0,29	0,26	0,15	0,09	-0,02	0,43	0,18	0,20
-750	0,43	0,35	0,29	0,26	0,17	0,10	0,00	0,43	0,18	0,21
-800	0,43	0,29	0,31	0,28	0,18	0,09	0,00	0,41	-0,37	0,20
-852	0,45	0,33	0,31	0,45	0,30	0,22	0,00	0,35	-1,49	0,25
-900	0,82	1,03	1,74	1,79	1,35	0,83	0,12	0,30	-3,10	0,23
-916	1,78	3,90	6,47	5,80	4,35	2,60	0,41	0,15	-4,63	0,23

Tabela IV.5 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2200 mm, do perfil CS150 x 26.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	0,00	-0,06	-0,02	-0,04	-0,03	-0,02	-0,19	-0,04	-0,02
-100	-0,04	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,33	-0,02	-0,02
-151	0,14	0,00	-0,04	-0,02	-0,04	-0,02	-0,02	-0,43	-0,02	-0,02
-202	0,18	0,00	-0,04	-0,02	0,02	-0,03	0,05	-0,50	-0,04	-0,02
-250	0,14	0,02	-0,04	0,00	0,02	-0,03	0,09	-0,56	-0,11	-0,02
-300	0,16	0,00	-0,06	-0,03	0,04	-0,03	0,09	-0,67	-0,29	-0,02
-352	0,14	0,00	-0,08	-0,03	0,00	-0,03	0,11	-0,67	-0,48	-0,02
-401	0,16	0,00	-0,13	-0,02	-0,02	0,00	0,07	-0,76	-0,64	-0,02
-450	0,16	-0,02	-0,17	-0,05	0,00	-0,03	0,05	-0,80	-0,79	-0,02
-500	0,16	0,02	-0,21	-0,05	0,00	-0,03	0,07	-0,80	-0,77	-0,02
-550	0,14	0,02	-0,36	-0,14	0,02	-0,02	0,09	-0,81	-0,77	-0,02
-601	0,10	-0,08	-0,50	-0,28	0,00	-0,03	0,07	-0,87	-0,75	-0,02
-651	0,00	-0,27	-0,75	-0,43	-0,11	-0,02	0,09	-0,93	-0,97	-0,02
-701	-0,14	-0,56	-1,09	-0,71	-0,26	-0,03	0,07	-0,94	-1,14	-0,02
-750	-0,31	-0,97	-1,63	-1,12	-0,55	-0,17	0,07	-0,98	-1,28	-0,02
-800	-0,55	-1,71	-2,75	-1,94	-1,18	-0,53	0,09	-1,06	-1,28	-0,02
-849	-1,57	-5,11	-8,11	-6,02	-4,19	-2,31	-0,04	-1,09	-1,27	-0,02

Tabela IV.6 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2200 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,06	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,05	0,00	-0,02	-0,02	0,02
-103	0,00	0,00	-0,04	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,04
-152	-0,02	0,02	0,10	0,07	-0,02	-0,03	0,00	0,00	-0,02	0,02
-203	-0,04	-0,02	0,15	0,07	0,04	0,09	0,05	-0,04	0,00	-0,02
-250	-0,04	-0,02	0,19	0,09	0,04	0,03	0,07	-0,06	0,00	0,02
-301	-0,06	0,00	0,15	0,07	0,02	0,07	0,05	-0,02	0,00	0,02
-354	-0,12	-0,02	0,19	0,07	0,07	0,05	0,04	-0,07	0,00	0,02
-403	-0,12	0,00	0,15	0,07	0,04	0,05	0,04	0,00	-0,04	0,02
-453	-0,14	0,02	0,15	0,10	0,04	0,07	0,07	-0,04	-0,02	0,02
-504	-0,16	0,00	0,19	0,07	0,06	0,09	0,07	-0,06	0,00	0,00
-554	-0,20	0,00	0,11	0,05	0,04	0,07	0,05	-0,06	-0,02	0,02
-605	-0,24	0,00	0,10	0,05	0,06	0,05	0,04	-0,04	-0,02	0,00
-650	-0,24	0,02	0,02	0,00	0,06	0,07	0,07	-0,02	-0,04	0,02
-701	-0,29	0,00	0,00	-0,02	0,04	0,05	0,07	-0,06	0,00	0,00
-752	-0,35	-0,10	-0,08	-0,09	0,04	0,09	0,05	-0,04	-0,02	0,00
-801	-0,33	-0,17	-0,15	-0,12	0,06	0,09	0,07	-0,07	0,00	0,02
-850	-0,43	-0,21	-0,19	-0,21	0,02	0,07	0,09	-0,07	-0,02	0,00
-901	-0,39	-0,45	-0,69	-0,64	-0,37	-0,12	0,07	-0,17	-0,02	0,00
-924	-0,94	-2,21	-3,73	-3,41	-2,44	-1,41	-0,11	-0,24	-0,02	0,02

Tabela IV.7 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2900 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,00	-0,04	-0,03	0,00	0,00	0,07	0,22	0,76	-0,02
-101	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,04	0,26	0,97	-0,02
-150	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,02	0,04	0,26	1,03	0,02
-200	-0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	-0,03	-0,04	0,29	1,09	0,00
-252	0,02	-0,02	0,04	0,00	-0,04	-0,02	-0,04	0,31	1,13	0,00
-300	0,02	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,04	0,34	1,18	-0,02
-351	0,02	0,00	0,02	0,12	-0,02	-0,02	-0,04	0,34	1,22	-0,02
-402	-0,02	0,00	0,02	0,12	0,11	-0,03	0,04	0,33	1,26	0,00
-452	-0,02	0,17	0,04	0,22	0,20	-0,02	0,05	0,34	1,32	0,02
-501	0,03	0,27	0,34	0,36	0,30	0,00	-0,04	0,34	1,36	-0,02
-551	0,02	0,38	0,55	0,52	0,42	0,00	-0,04	0,34	1,48	-0,04
-602	0,00	0,55	0,87	0,74	0,68	0,14	0,04	0,33	1,55	0,02
-650	0,02	0,77	1,12	0,89	0,81	0,22	-0,04	0,33	1,61	0,00
-700	0,07	0,98	1,57	1,22	1,09	0,33	-0,04	0,33	1,73	0,00
-750	0,22	1,57	2,58	1,96	1,77	0,65	0,04	0,34	1,86	-0,02
-788	0,81	4,48	9,79	6,14	5,42	2,49	0,23	0,33	2,23	0,02

Tabela IV.8 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2900 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	-0,02	-0,04	0,02	0,00	-0,02	0,02	0,06	1,67	0,04
-101	0,00	0,00	-0,02	0,02	0,00	0,02	0,02	0,13	2,24	0,25
-150	0,02	0,00	-0,02	-0,03	0,02	0,00	0,04	0,17	2,22	0,27
-202	0,00	-0,14	-0,11	-0,14	-0,06	-0,02	0,00	0,17	2,18	0,27
-250	-0,02	-0,14	-0,10	-0,21	-0,07	0,00	0,00	0,17	2,18	0,28
-301	0,02	-0,17	-0,17	-0,22	-0,13	0,00	0,00	0,17	2,18	0,23
-351	0,00	-0,16	-0,19	-0,24	-0,17	0,00	0,02	0,17	2,20	0,34
-401	0,00	-0,19	-0,27	-0,26	-0,15	-0,02	-0,02	0,13	2,20	0,36
-450	-0,10	-0,21	-0,27	-0,24	-0,15	-0,02	-0,02	0,15	2,20	0,36
-500	-0,08	-0,21	-0,29	-0,28	-0,15	-0,03	-0,02	0,19	2,20	0,34
-550	-0,10	-0,23	-0,27	-0,26	-0,17	0,00	0,02	0,19	2,17	0,34
-600	-0,16	-0,23	-0,29	-0,28	-0,17	-0,03	0,00	0,19	2,17	0,34
-652	-0,16	-0,21	-0,23	-0,24	-0,17	-0,02	0,02	0,15	2,18	0,44
-701	-0,12	-0,21	-0,27	-0,19	-0,13	0,00	0,00	0,11	2,20	0,46
-750	-0,24	-0,19	-0,25	-0,05	-0,13	0,00	-0,02	0,07	1,85	0,46
-801	-0,25	-0,04	-0,08	0,03	0,00	0,00	-0,02	-0,04	1,03	0,44
-850	-0,29	0,19	0,31	0,41	0,24	0,12	-0,02	-0,17	0,17	0,48
-894	-0,27	1,69	2,72	2,19	1,44	0,79	0,05	-0,30	-1,62	0,57

Tabela IV.9 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2900 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	-0,04	-0,07	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,87	0,00
-100	0,00	0,00	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	1,26	0,02
-150	0,03	-0,02	0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,00	1,40	-0,02
-200	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,05	0,00	0,03	1,52	0,00
-252	0,00	-0,02	-0,07	0,03	-0,06	-0,07	0,00	0,03	1,61	-0,05
-301	0,00	-0,02	0,00	0,03	0,02	-0,07	0,02	0,03	1,69	-0,02
-351	0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,07	0,00	0,03	1,77	-0,04
-402	0,00	0,02	0,04	0,02	-0,02	-0,07	0,00	0,02	1,81	-0,04
-451	0,02	-0,02	0,04	0,02	-0,02	-0,09	0,00	0,02	1,88	0,28
-500	0,00	0,00	0,12	0,02	-0,02	-0,09	0,00	0,02	1,98	0,23
-552	0,00	-0,04	0,32	0,21	-0,02	-0,07	-0,02	0,00	2,04	0,25
-600	0,00	0,15	0,57	0,38	0,18	0,02	-0,02	0,03	2,14	0,27
-650	0,00	0,29	0,93	0,69	0,44	0,12	-0,02	0,03	2,25	0,27
-700	0,00	0,57	1,48	1,20	0,96	0,36	0,00	0,02	2,33	0,27
-751	-0,02	1,11	2,72	2,34	1,96	0,88	-0,02	0,03	2,41	0,27
-783	0,70	4,82	9,95	8,33	7,42	3,56	0,07	0,03	2,68	0,27

Tabela IV.10 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 3600 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,00	0,02	-0,02	0,00	1,40	-0,02
-101	0,00	-0,02	-0,02	0,02	-0,04	-0,03	-0,02	0,00	1,67	0,00
-150	-0,02	-0,02	-0,23	-0,19	-0,02	0,00	-0,02	0,05	1,88	0,00
-201	0,02	-0,08	-0,39	-0,38	-0,22	0,00	-0,02	0,05	2,02	0,04
-251	0,00	-0,23	-0,59	-0,50	-0,35	-0,02	-0,02	0,05	2,14	0,02
-300	0,02	-0,29	-0,71	-0,60	-0,44	-0,07	-0,02	0,12	2,31	0,00
-350	0,00	-0,33	-0,78	-0,65	-0,50	-0,09	-0,02	0,15	2,47	0,00
-400	-0,02	-0,40	-0,89	-0,72	-0,57	-0,12	-0,02	0,17	2,62	0,00
-450	0,02	-0,52	-1,03	-0,81	-0,63	-0,17	-0,02	0,10	2,76	0,00
-500	0,02	-0,63	-1,21	-0,93	-0,74	-0,22	-0,02	0,19	2,87	0,00
-550	0,02	-0,78	-1,46	-1,10	-0,90	-0,29	-0,02	0,14	3,13	0,00
-600	0,03	-1,45	-2,60	-2,00	-1,73	-0,65	-0,02	0,15	3,19	0,02
-650	-0,05	-2,51	-4,31	-3,30	-2,82	-1,24	-0,04	0,12	3,34	0,00
-699	-0,72	-6,20	-10,95	-8,19	-7,18	-3,30	-0,05	0,03	3,44	0,02

Tabela IV.11 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 3600 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	-0,70	-0,02
-101	-0,02	-0,02	0,02	0,00	0,02	0,02	0,07	-0,02	-1,18	-0,02
-151	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,09	0,00	-0,02	0,00	-1,48	-0,02
-201	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,15	0,02	-0,02	-0,02	-1,77	-0,04
-251	0,03	-0,04	0,00	-0,02	-0,17	0,00	-0,02	-0,03	-2,04	-0,02
-300	0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,15	0,00	-0,02	-0,05	-2,29	-0,23
-350	0,05	-0,02	0,02	-0,02	-0,17	0,00	-0,02	-0,14	-2,51	-0,20
-400	0,00	-0,02	0,02	0,09	-0,17	0,00	-0,02	-0,12	-2,68	-0,18
-450	0,02	-0,02	0,30	0,29	-0,18	0,14	-0,02	-0,26	-2,89	-0,18
-501	0,03	0,23	0,73	0,62	0,02	0,28	-0,02	-0,26	-3,07	-0,20
-551	0,00	0,59	1,28	1,15	0,48	0,48	-0,02	-0,36	-3,26	-0,20
-600	0,02	1,13	2,23	1,89	1,13	0,77	-0,02	-0,41	-3,59	-0,20
-650	0,02	1,74	3,45	2,92	2,01	1,27	-0,02	-0,50	-3,69	-0,20
-700	0,24	3,67	7,00	5,83	4,58	2,20	0,57	-0,57	-4,20	-0,20
-708	0,53	5,22	9,95	8,36	6,68	3,11	0,46	-0,58	-4,43	-0,21

Tabela IV.12 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 3600 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	0,02	0,02	-0,03	-0,02	0,00	-0,02	0,21	1,28	-0,02
-100	0,00	-0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	0,29	1,46	0,00
-150	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	-0,03	-0,02	0,33	1,59	-0,02
-200	-0,02	0,17	0,23	0,19	0,00	-0,03	-0,02	0,36	1,75	-0,02
-250	0,02	0,33	0,39	0,26	0,17	0,00	-0,02	0,38	1,96	-0,02
-301	0,02	0,44	0,55	0,43	0,28	0,12	-0,02	0,38	2,08	-0,02
-350	0,00	0,54	0,73	0,53	0,42	0,14	-0,02	0,41	2,23	-0,02
-401	-0,02	0,65	0,91	0,71	0,59	0,24	-0,02	0,41	2,35	-0,04
-451	0,15	0,88	1,19	0,93	0,72	0,31	-0,02	0,38	2,49	0,00
-500	0,22	1,17	1,58	1,24	1,01	0,48	-0,02	0,41	2,62	-0,04
-550	0,40	1,57	2,26	1,75	1,49	0,64	-0,02	0,41	2,72	-0,02
-600	0,53	2,28	3,40	2,74	2,31	1,07	-0,02	0,41	2,78	-0,04
-650	0,84	3,69	5,86	4,65	4,04	1,93	0,32	0,45	2,97	-0,02
-676	1,24	6,54	11,16	9,08	7,88	3,82	0,62	0,34	3,13	-0,02

ANEXO V

DESLOCAMENTOS LATERAIS DOS MODELOS
PERTENCENTES À SÉRIE PS 200 x 25

Tabela V.1 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 1500 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,10	0,00	0,04
-101	0,00	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,02	-0,02	0,27	0,17	0,00
-151	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	-0,02	0,37	0,37	0,12
-200	-0,02	-0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,41	0,41	0,16
-251	0,00	-0,04	0,01	-0,02	-0,02	0,00	-0,04	0,45	0,47	0,16
-301	0,00	-0,02	0,02	-0,05	0,00	-0,02	-0,02	0,51	0,51	0,27
-351	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,04	0,00	-0,02	0,55	0,56	0,23
-400	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,57	0,60	0,25
-450	0,00	-0,02	0,00	-0,05	0,00	0,00	-0,02	0,61	0,60	0,27
-500	-0,02	-0,02	0,00	-0,09	-0,02	-0,02	-0,04	0,65	0,66	0,39
-551	0,00	-0,04	-0,01	-0,05	0,00	0,00	-0,02	0,67	0,70	0,34
-600	-0,02	-0,04	-0,01	-0,07	-0,02	-0,02	-0,07	0,65	0,72	0,34
-650	0,02	-0,02	-0,01	-0,09	-0,04	0,00	-0,04	0,65	0,76	0,36
-700	0,02	-0,08	0,00	-0,14	-0,04	0,00	0,00	0,67	0,76	0,37
-751	0,02	-0,10	0,01	-0,17	-0,04	0,00	-0,04	0,65	0,74	0,25
-800	-0,02	-0,15	0,01	-0,17	-0,04	-0,02	-0,04	0,69	0,76	0,23
-850	0,02	-0,21	0,00	-0,22	0,00	0,00	-0,02	0,65	0,74	0,21
-902	0,02	-0,33	-0,04	-0,33	-0,02	0,00	-0,05	0,65	0,74	0,23
-951	-0,05	-0,50	-0,16	-0,52	-0,13	0,00	-0,02	0,55	0,74	0,25
-1000	-0,22	-0,84	-0,39	-0,91	-0,44	-0,14	-0,02	0,43	0,74	0,21
-1029	-0,93	-2,68	-1,81	-3,30	-2,51	-1,15	-0,21	0,22	0,66	0,34

Tabela V.2 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 1500 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,04	-0,03	0,00	0,53	0,68	0,00
-100	-0,03	0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,95	1,44	0,28
-150	-0,02	0,02	-0,04	-0,02	0,00	-0,02	0,02	1,13	1,81	0,34
-200	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,02	-0,02	1,26	2,02	0,32
-251	0,00	-0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,02	1,31	2,14	0,39
-300	0,00	-0,10	0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,02	1,39	2,23	0,39
-350	-0,02	0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,00	1,44	2,37	0,36
-400	0,02	-0,04	0,02	0,00	-0,02	-0,03	0,00	1,50	2,43	0,37
-450	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	1,51	2,47	0,41
-501	-0,03	0,00	0,00	-0,02	0,02	-0,02	0,00	1,53	2,56	0,39
-552	0,00	-0,10	0,00	-0,02	0,02	0,00	-0,02	1,55	2,53	0,45
-600	0,02	-0,15	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,04	1,56	2,56	0,45
-651	-0,02	-0,21	0,00	0,00	0,00	-0,09	0,00	1,55	2,60	0,45
-701	0,02	-0,27	0,00	0,00	-0,02	-0,17	-0,02	1,58	2,62	0,43
-750	0,00	-0,33	0,00	0,07	-0,02	-0,21	-0,07	1,58	2,56	0,41
-800	0,02	-0,36	0,11	0,09	0,00	-0,22	-0,07	1,53	2,60	0,41
-850	0,00	-0,34	0,20	0,17	-0,02	-0,21	-0,12	1,56	2,60	0,57
-900	0,00	-0,36	0,59	0,46	0,17	-0,22	-0,12	1,51	2,60	0,59
-950	0,02	0,00	1,66	1,27	0,92	-0,07	-0,14	1,34	2,58	0,55
-985	0,69	2,08	5,18	4,03	3,34	1,12	0,02	1,07	2,60	0,62

Tabela V.3 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 1500 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,03	-0,02	0,00	0,05	-0,02	-0,02	0,00	0,25	0,16	0,02
-100	0,00	-0,02	0,00	0,05	0,00	-0,02	0,00	0,51	0,70	-0,02
-151	-0,02	-0,02	-0,01	0,03	-0,02	-0,03	0,02	0,61	0,89	0,02
-200	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,00	0,02	0,67	1,03	0,09
-250	0,00	-0,02	0,00	0,07	0,00	-0,02	0,02	0,71	1,05	0,14
-302	-0,02	-0,04	-0,02	0,05	0,02	0,00	0,00	0,74	1,17	0,14
-352	-0,03	-0,04	0,00	0,03	-0,02	-0,02	0,00	0,80	1,18	0,16
-400	-0,02	-0,02	-0,02	0,09	0,00	-0,02	-0,02	0,80	1,22	0,18
-450	-0,02	-0,02	-0,01	0,05	0,00	0,00	0,02	0,84	1,24	0,25
-502	-0,02	-0,04	-0,01	0,03	-0,02	0,00	0,02	0,88	1,32	0,23
-552	-0,02	-0,02	-0,01	0,03	0,00	-0,02	0,00	0,90	1,36	0,23
-600	-0,02	-0,02	-0,02	0,03	-0,02	-0,02	0,00	0,92	1,36	0,25
-652	0,00	-0,02	-0,01	0,09	0,00	0,00	-0,02	0,92	1,42	0,21
-700	-0,02	-0,02	-0,01	0,14	0,00	0,00	0,00	0,92	1,48	0,28
-750	-0,02	0,10	-0,02	0,21	0,06	-0,02	0,00	0,92	1,44	0,27
-800	-0,02	0,11	-0,03	0,34	0,15	0,05	0,00	0,92	1,42	0,27
-850	-0,02	0,34	0,15	0,62	0,37	0,19	0,00	0,94	1,48	0,28
-900	0,21	0,88	0,59	1,29	0,92	0,50	0,00	0,94	1,42	0,28
-950	0,89	2,66	1,92	3,48	2,90	1,55	0,25	0,94	1,42	0,28
-964	2,08	6,01	4,43	7,67	6,59	3,49	0,85	0,90	1,44	0,34

Tabela V.4 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,00	-0,04	0,00	-0,04	0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,02
-102	0,00	0,00	-0,21	0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	-0,02	-0,02
-152	-0,08	-0,02	-0,19	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,02	-0,02
-203	-0,08	0,00	-0,23	0,00	-0,04	0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02
-250	-0,08	0,02	-0,21	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,02
-301	-0,08	0,00	-0,06	0,02	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02
-350	-0,08	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
-401	-0,08	0,06	0,11	0,10	0,09	0,02	0,02	0,02	0,26	0,21
-451	-0,12	0,17	0,29	0,24	0,18	0,07	0,00	0,04	0,46	0,21
-503	-0,08	0,27	0,44	0,38	0,26	0,12	0,00	0,06	0,61	0,23
-551	-0,10	0,43	0,65	0,55	0,39	0,26	-0,02	0,04	0,79	0,18
-602	-0,06	0,60	0,90	0,81	0,59	0,38	-0,02	0,06	0,33	0,20
-650	-0,04	0,80	1,26	1,10	0,77	0,53	-0,04	0,07	0,33	0,21
-702	0,12	1,05	1,74	1,50	1,09	0,71	-0,02	0,07	0,37	0,46
-751	0,27	1,50	2,52	2,17	1,62	1,07	0,00	0,07	0,33	0,44
-801	0,65	2,58	4,21	3,72	2,80	1,82	0,07	0,07	0,35	0,44
-836	2,10	6,68	11,02	9,70	7,32	4,66	0,66	-0,24	0,35	0,44

Tabela V.5 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,02	-0,04	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	-0,04	0,00	0,00
-101	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,02	-0,09	-0,02	0,02
-150	-0,02	-0,04	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,24	0,00	-0,02
-201	0,00	-0,08	-0,02	-0,02	-0,04	0,00	-0,02	-0,33	-0,06	0,02
-252	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,37	-0,02	0,00
-300	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,43	0,00	0,02
-352	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,02	-0,03	-0,02	-0,48	-0,02	-0,02
-400	0,00	-0,04	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	-0,52	0,00	0,00
-453	0,00	-0,06	0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,00	-0,57	-0,04	-0,02
-502	-0,08	-0,04	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,59	-0,04	0,00
-552	-0,04	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	-0,61	-0,04	-0,02
-602	-0,10	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,63	-0,02	-0,02
-652	-0,12	-0,06	0,00	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,69	-0,02	-0,02
-701	-0,12	-0,14	0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,00	-0,70	-0,02	0,02
-750	-0,16	-0,17	0,02	-0,02	0,02	0,00	0,02	-0,70	0,00	-0,02
-801	-0,22	-0,27	-0,04	-0,03	0,02	-0,03	-0,02	-0,74	0,00	-0,02
-851	-0,25	-0,37	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	-0,76	-0,02	-0,02
-901	-0,24	-0,43	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,76	-0,04	-0,02
-951	-0,27	-0,45	0,23	-0,03	-0,02	0,02	-0,02	-0,78	-0,04	0,02
-1000	-0,31	0,17	2,05	0,77	0,09	0,15	0,00	-0,76	-0,06	-0,02
-1011	-0,29	1,03	3,71	1,72	0,94	0,40	0,00	-0,76	-0,02	-0,02

Tabela V.6 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,04	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,04	0,30	-0,02	0,00
-100	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	-0,02	-0,04	0,44	0,00	-0,02
-153	0,02	0,06	-0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,02	0,52	-0,02	-0,02
-200	0,04	0,14	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,54	-0,02	-0,02
-252	0,02	0,17	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,02	0,59	-0,02	0,02
-301	0,12	0,19	-0,02	0,00	0,00	-0,03	0,00	0,63	0,00	-0,02
-350	0,16	0,27	0,11	0,00	-0,02	-0,03	0,00	0,67	-0,02	0,00
-403	0,20	0,35	0,17	0,07	0,00	-0,02	-0,02	0,65	0,00	0,00
-450	0,25	0,41	0,25	0,12	0,02	-0,02	0,00	0,65	0,00	-0,02
-501	0,35	0,52	0,34	0,21	0,04	-0,02	-0,02	0,69	-0,02	-0,04
-552	0,47	0,62	0,48	0,31	0,09	0,03	-0,04	0,69	0,00	0,02
-600	0,59	0,78	0,69	0,50	0,24	0,12	-0,02	0,76	0,00	-0,02
-651	0,74	1,05	0,96	0,76	0,39	0,19	-0,05	0,78	-0,04	0,00
-701	0,84	1,26	1,28	1,07	0,59	0,33	-0,02	0,74	-0,04	-0,04
-751	1,00	1,55	1,74	1,45	0,87	0,55	-0,04	0,74	-0,06	0,00
-801	1,23	2,14	2,58	2,25	1,48	0,91	0,00	0,78	-0,04	-0,02
-850	1,84	3,81	5,39	4,71	3,41	2,13	0,23	0,78	-0,02	-0,02
-859	2,37	5,50	8,26	7,36	5,41	3,34	0,50	0,72	-0,06	0,00

Tabela V.7 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2400 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	-0,04	0,04	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,02
-100	-0,04	-0,04	0,00	-0,02	0,00	-0,03	0,04	0,02	0,00	0,00
-150	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,02	0,02	0,00	0,04
-201	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02
-254	0,00	-0,06	0,00	0,05	0,09	0,03	0,02	-0,04	0,02	0,02
-302	0,00	-0,04	0,00	0,09	0,09	0,07	0,04	-0,02	0,02	-0,02
-350	-0,04	-0,04	-0,04	0,12	0,11	0,09	0,05	0,00	0,00	0,04
-401	-0,02	0,00	0,02	0,09	0,07	0,09	0,05	-0,06	0,02	-0,02
-452	-0,02	-0,02	0,00	0,14	0,11	0,10	0,11	0,00	0,00	0,02
-502	-0,02	-0,04	0,02	0,12	0,09	0,05	0,07	0,00	-0,02	0,02
-550	-0,02	-0,04	-0,02	0,14	0,11	0,10	0,07	-0,02	0,00	0,02
-601	0,00	-0,04	-0,02	0,14	0,09	0,14	0,05	-0,02	0,02	0,02
-650	-0,02	0,00	0,02	0,17	0,06	0,14	0,07	0,00	0,02	0,04
-701	0,00	-0,02	0,00	0,15	0,11	0,14	0,11	0,00	0,00	0,04
-754	0,02	-0,08	0,00	0,19	0,09	0,15	0,11	-0,02	0,02	0,00
-800	0,00	-0,10	0,00	0,21	0,13	0,15	0,09	0,02	0,35	0,00
-850	0,00	-0,10	0,00	0,28	0,09	0,22	0,09	0,00	0,61	0,00
-900	-0,02	-0,10	0,23	0,45	0,11	0,24	0,09	-0,04	0,73	0,00
-936	0,02	1,11	2,35	1,58	0,72	0,52	0,11	-0,02	1,30	0,02

Tabela V.8 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,02	-0,04	0,02
-100	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,10	-0,04	-0,02
-151	0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	0,17	-0,04	0,00
-201	0,09	0,15	0,11	0,19	-0,04	0,00	-0,02	0,22	-0,04	0,00
-254	0,19	0,19	0,14	0,17	0,13	0,05	0,00	0,24	-0,04	0,00
-300	0,28	0,33	0,32	0,28	0,13	0,09	0,00	0,22	-0,08	-0,02
-350	0,38	0,42	0,48	0,34	0,30	0,10	-0,02	0,21	-0,04	-0,02
-400	0,48	0,59	0,62	0,53	0,44	0,19	0,00	0,24	-0,04	0,02
-452	0,64	0,67	0,78	0,65	0,57	0,28	-0,02	0,22	0,00	0,02
-501	0,74	0,92	1,05	0,93	0,74	0,34	0,00	0,26	-0,04	0,02
-551	0,86	1,21	1,37	1,20	1,05	0,50	0,00	0,22	-0,04	0,00
-601	1,03	1,47	1,85	1,63	1,42	0,69	-0,02	0,22	-0,04	-0,02
-650	1,26	1,86	2,44	2,17	1,96	0,91	0,02	0,14	-0,02	-0,02
-700	1,56	2,58	3,51	3,08	2,79	1,32	-0,02	0,03	-0,17	0,00
-751	2,01	3,92	5,73	4,96	4,48	2,22	-0,02	-0,12	-0,41	0,02
-769	2,67	6,08	9,42	8,21	7,44	3,72	0,32	-0,26	-0,68	-0,14

Tabela V.9 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2400 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,04	0,00	0,21
-101	-0,04	-0,02	0,04	0,00	-0,04	-0,03	0,00	0,11	1,52	0,37
-150	-0,02	-0,04	0,06	-0,02	0,00	0,00	-0,02	0,30	2,92	0,48
-200	-0,06	-0,02	0,02	-0,02	-0,04	0,05	0,04	0,41	3,65	0,50
-250	-0,06	-0,04	0,02	0,00	0,00	0,09	0,05	0,46	4,00	0,48
-300	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,04	0,10	0,05	0,44	4,11	0,55
-350	0,00	-0,06	-0,02	0,00	-0,02	0,12	0,07	0,44	4,11	0,55
-400	-0,02	-0,04	0,00	0,00	-0,04	0,10	0,07	0,44	4,11	0,59
-451	0,00	-0,06	0,06	-0,02	-0,02	0,07	0,07	0,44	4,11	0,59
-501	-0,02	-0,10	0,02	0,00	0,00	0,07	0,04	0,44	4,09	0,57
-550	0,02	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,14	0,07	0,44	4,07	0,55
-603	-0,02	-0,06	0,04	0,00	-0,02	0,15	0,04	0,43	4,09	0,55
-652	-0,04	-0,10	0,00	0,00	0,06	0,19	0,07	0,46	4,11	0,60
-700	0,02	-0,08	0,02	0,02	0,11	0,28	0,07	0,37	4,11	0,57
-750	0,06	-0,02	0,02	0,00	0,22	0,34	0,02	0,28	4,11	0,59
-800	0,12	0,00	0,04	0,24	0,44	0,53	0,09	0,19	3,62	0,62
-850	0,69	1,92	3,48	3,58	3,08	2,20	0,39	0,06	3,29	0,76

Tabela V.10 – Deslocamentos do modelo1, de L = 3000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,00	-0,02	-0,05	0,00	-0,02	0,00	-0,41	-5,19	-0,14
-101	-0,02	0,02	0,00	-0,14	-0,04	-0,03	0,00	-0,96	-8,65	-0,59
-151	0,02	-0,06	0,02	-0,15	-0,04	-0,03	-0,02	-1,24	-10,08	-0,76
-200	0,04	-0,04	0,02	-0,15	-0,06	-0,03	0,00	-1,41	-11,12	-0,84
-251	-0,10	-0,14	0,00	-0,17	-0,06	-0,03	0,00	-1,56	-11,29	-0,87
-301	-0,18	-0,35	-0,21	-0,38	-0,22	-0,10	-0,02	-1,59	-11,82	-0,84
-350	-0,29	-0,64	-0,59	-0,71	-0,46	-0,24	0,00	-1,65	-11,73	-0,91
-400	-0,47	-1,15	-1,26	-1,24	-0,89	-0,48	-0,02	-1,61	-12,11	-0,92
-451	-0,67	-2,00	-2,37	-2,17	-1,51	-0,86	-0,05	-1,67	-12,48	-0,94
-500	-1,04	-3,67	-4,55	-3,80	-2,73	-1,55	-0,16	-1,65	-12,52	-1,00
-550	-1,76	-7,13	-9,26	-7,45	-5,35	-3,06	-0,39	-1,67	-12,92	-0,98
-573	-2,98	-12,67	-17,50	-14,30	-10,42	-5,87	-0,82	-1,69	-13,78	-1,07

Tabela V.11 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 3000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	-3,36	-2,60	-0,95	-0,72	-0,44	-0,12	-0,14	-0,84	-0,02
-101	-0,02	-4,70	-3,00	-1,11	-0,81	-0,54	-0,14	-0,74	-1,82	-0,07
-150	0,00	-5,71	-3,24	-1,22	-0,93	-0,59	-0,14	-1,43	-2,77	-0,12
-200	0,02	-6,57	-3,54	-1,38	-1,00	-0,66	-0,21	-2,25	-3,75	-0,25
-251	0,02	-6,98	-3,50	-1,38	-1,03	-0,66	-0,21	-2,88	-4,53	-0,32
-300	0,00	-6,99	-3,20	-1,28	-1,00	-0,66	-0,19	-3,10	-4,76	-0,36
-350	0,02	-7,01	-2,63	-1,05	-0,76	-0,59	-0,17	-3,13	-4,88	-0,37
-401	0,02	-6,98	-2,24	-0,87	-0,57	-0,48	-0,19	-3,12	-4,90	-0,39
-450	-0,02	-6,96	-1,81	-0,66	-0,43	-0,37	-0,17	-3,10	-4,95	-0,39
-501	0,00	-6,99	-1,62	-0,58	-0,31	-0,31	-0,12	-3,08	-4,99	-0,37
-551	0,04	-6,96	-1,58	-0,56	-0,26	-0,30	-0,10	-3,08	-4,97	-0,37
-600	0,00	-6,98	-1,58	-0,56	-0,26	-0,30	-0,10	-3,10	-4,97	-0,37
-651	0,02	-6,92	-2,06	-0,58	-0,28	-0,30	-0,10	-3,12	-4,97	-0,39
-701	0,02	-6,94	-2,99	-0,82	-0,33	-0,31	-0,09	-2,92	-4,97	-0,34
-750	0,00	-8,24	-4,13	-1,30	-0,62	-0,39	-0,09	-2,80	-4,95	-0,37
-801	-0,24	-10,13	-5,85	-2,23	-1,17	-0,65	-0,10	-2,66	-4,97	-0,37
-813	-0,28	-11,09	-6,31	-2,66	-1,39	-0,77	-0,05	-2,59	-4,97	-0,37

Tabela V.12 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 3000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	-0,25	-0,19	-0,12	-0,02	-0,03	0,02	-0,04	-0,02	-0,02
-101	-0,04	-0,49	-0,40	-0,21	-0,06	0,00	-0,02	-0,02	0,00	-0,02
-150	-0,02	-0,68	-0,71	-0,41	-0,24	-0,05	0,02	0,11	-0,04	0,00
-201	-0,02	-0,97	-1,03	-0,62	-0,37	-0,17	0,00	0,26	-0,02	0,02
-252	0,00	-1,20	-1,30	-0,79	-0,50	-0,26	-0,02	0,37	-0,02	-0,02
-301	-0,02	-1,40	-1,53	-0,93	-0,59	-0,31	-0,02	0,52	-0,02	0,00
-351	-0,02	-1,55	-1,72	-1,03	-0,66	-0,41	0,00	0,67	0,00	0,00
-400	0,00	-1,73	-1,89	-1,10	-0,72	-0,43	-0,02	0,70	-0,02	0,00
-450	0,00	-1,90	-2,12	-1,22	-0,79	-0,46	-0,04	0,74	0,00	-0,02
-500	0,02	-2,12	-2,37	-1,39	-0,87	-0,52	-0,05	0,72	-0,02	-0,02
-552	-0,04	-2,37	-2,68	-1,55	-1,01	-0,58	-0,11	0,74	0,00	0,00
-601	-0,04	-2,60	-3,02	-1,70	-1,09	-0,65	-0,12	0,74	0,00	-0,02
-651	-0,18	-2,93	-3,54	-1,94	-1,22	-0,74	-0,11	0,74	-0,02	0,00
-701	-0,31	-3,46	-4,17	-2,27	-1,44	-0,83	-0,11	0,74	-0,13	-0,02
-751	-0,53	-4,18	-5,26	-2,86	-1,79	-1,02	-0,12	0,72	-0,15	-0,02
-785	-0,86	-5,77	-7,61	-4,34	-2,77	-1,51	-0,14	0,56	-0,13	0,00

ANEXO VI

**DESLOCAMENTOS LATERAIS DOS MODELOS
PERTENCENTES À SÉRIE PS 225 x 29**

Tabela VI.1 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 1600 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,08	0,00
-101	0,00	0,00	-0,02	0,02	-0,02	-0,03	0,02	0,00	0,37	-0,02
-152	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,45	0,00
-200	0,02	-0,06	-0,04	-0,02	0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,51	0,02
-251	-0,02	-0,02	-0,04	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	-0,04
-301	0,02	-0,04	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	-0,02
-351	-0,02	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,52	-0,04
-400	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	-0,02
-451	0,00	-0,04	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,02	-0,02	0,51	-0,04
-501	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02	0,52	-0,02
-550	-0,02	-0,02	0,00	0,02	-0,02	-0,03	0,00	0,00	0,52	-0,04
-602	0,00	0,00	0,07	0,10	0,07	0,00	0,02	0,00	0,51	-0,02
-650	0,00	0,00	0,14	0,19	0,17	0,02	-0,02	0,00	0,52	-0,02
-703	0,07	0,15	0,23	0,24	0,26	0,03	0,00	0,02	0,52	-0,02
-751	0,14	0,27	0,43	0,34	0,31	0,07	0,02	0,00	0,54	0,00
-800	0,24	0,40	0,52	0,43	0,39	0,14	0,00	-0,02	0,52	-0,02
-853	0,29	0,44	0,66	0,53	0,50	0,17	0,00	0,00	0,52	-0,02
-900	0,43	0,67	0,82	0,64	0,65	0,24	0,00	-0,02	0,51	0,02
-951	0,55	0,86	1,00	0,81	0,81	0,40	-0,04	-0,02	0,54	0,00
-1004	0,70	1,07	1,30	1,07	1,03	0,52	-0,02	0,00	0,54	-0,04
-1050	0,96	1,49	1,91	1,57	1,55	0,79	-0,02	-0,02	0,51	0,04
-1100	1,48	2,56	3,51	2,99	2,93	1,62	0,20	-0,02	0,54	0,07
-1135	3,15	6,18	9,22	7,81	7,53	4,18	0,89	-0,02	0,51	0,04

Tabela VI.2 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 1600 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,01	-0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,03	0,00	-0,06	*	0,02
-100	-0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,04	*	0,46
-150	0,00	0,00	-0,04	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	*	0,50
-202	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,06	*	0,50
-250	-0,02	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	*	0,50
-302	-0,01	-0,02	0,00	-0,02	0,02	0,00	0,00	-0,06	*	0,50
-352	0,01	0,00	-0,02	0,00	0,02	-0,02	0,02	-0,06	*	0,48
-402	0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,05	-0,06	*	0,48
-451	-0,01	-0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	0,02	*	0,48
-501	-0,01	0,02	0,00	0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,06	*	0,46
-552	0,00	-0,02	0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,06	*	0,48
-600	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,06	0,02	0,00	-0,06	*	0,46
-650	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,02	*	0,50
-702	-0,03	0,02	0,00	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	*	0,48
-750	-0,03	-0,02	0,02	0,02	-0,04	0,00	0,00	-0,06	*	0,48
-800	-0,07	-0,02	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,04	*	0,50
-850	-0,08	-0,04	0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,06	*	0,50
-902	-0,08	0,00	0,02	0,02	-0,04	0,00	-0,04	-0,06	*	0,52
-952	-0,10	0,00	0,02	0,00	0,09	0,03	-0,02	-0,06	*	0,50
-1002	-0,09	0,02	0,00	0,10	0,13	0,09	-0,02	-0,06	*	0,50
-1051	-0,10	-0,04	0,04	0,26	0,28	0,21	-0,04	-0,06	*	0,50
-1100	-0,10	0,06	0,51	0,64	0,66	0,38	-0,02	-0,06	*	0,48
-1150	0,07	1,74	3,07	2,48	2,32	1,29	0,14	-0,06	*	0,48
-1162	0,52	4,57	7,32	5,71	5,18	2,84	0,53	-0,06	*	0,52

* Devido a problemas com o transdutor 9, suas leituras foram desprezadas para este modelo.

Tabela VI.3 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 1600 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,02
-101	0,02	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,02	0,16	-0,02	-0,04	-0,04
-150	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	-0,02	0,12	0,00	0,00	-0,02
-201	0,02	0,02	-0,01	0,00	-0,04	0,00	0,18	0,02	-0,02	0,00
-251	0,02	0,04	0,01	-0,02	-0,04	0,02	0,14	0,02	-0,02	-0,02
-302	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	-0,04	0,00
-353	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	-0,04	-0,06	-0,02
-403	0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	-0,02	0,00
-451	0,02	0,02	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,16	0,02	0,00	0,00
-500	-0,02	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,14	0,02	-0,02	-0,02
-552	0,02	0,04	0,08	0,03	0,00	0,02	0,14	-0,02	-0,02	-0,02
-600	0,02	0,13	0,08	0,07	0,02	0,00	0,12	0,00	-0,06	-0,04
-651	-0,02	0,15	0,12	0,10	0,02	0,00	0,14	-0,02	0,00	0,00
-703	0,00	0,23	0,17	0,14	0,06	0,03	0,18	0,02	-0,04	-0,02
-750	0,02	0,29	0,18	0,17	0,09	0,02	0,16	0,00	-0,06	0,00
-800	0,03	0,31	0,21	0,22	0,15	0,03	0,16	-0,02	-0,04	-0,04
-850	0,00	0,40	0,23	0,29	0,17	0,03	0,16	0,00	-0,04	-0,02
-900	0,02	0,54	0,28	0,34	0,20	0,10	0,16	0,00	-0,06	-0,04
-952	0,14	0,65	0,35	0,46	0,26	0,15	0,18	-0,04	-0,04	-0,02
-1000	0,26	0,84	0,46	0,62	0,42	0,17	0,23	0,02	-0,04	0,02
-1052	0,45	1,22	0,70	1,00	0,74	0,38	0,27	-0,02	-0,02	0,00
-1100	0,79	1,95	1,16	1,74	1,37	0,74	0,37	-0,04	-0,02	0,00
-1144	2,53	6,20	4,30	6,85	5,89	3,15	1,16	-0,04	-0,02	-0,02

Tabela VI.4 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2000 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,05	0,00	0,02	0,04
-101	0,00	-0,04	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,07	-0,02	0,02	0,04
-152	-0,02	-0,10	0,00	0,00	-0,02	0,02	0,05	0,02	0,26	-0,02
-201	-0,02	-0,16	-0,04	-0,03	-0,02	0,00	0,07	0,06	0,28	-0,02
-251	-0,02	-0,19	-0,17	-0,07	-0,02	0,02	0,07	0,07	0,02	-0,02
-302	0,02	-0,27	-0,21	-0,15	0,00	0,00	0,05	0,13	0,22	0,02
-351	0,02	-0,29	-0,23	-0,15	-0,02	-0,02	0,07	0,09	0,37	0,00
-401	0,00	-0,33	-0,31	-0,17	0,02	0,03	0,05	0,13	0,35	0,00
-452	-0,02	-0,39	-0,31	-0,19	-0,02	0,00	0,07	0,15	0,29	-0,04
-503	0,02	-0,41	-0,36	-0,21	0,00	0,02	0,07	0,17	0,42	-0,02
-550	0,04	-0,43	-0,42	-0,24	-0,02	0,02	0,04	0,17	0,40	-0,02
-603	-0,02	-0,52	-0,46	-0,29	0,00	-0,02	0,05	0,19	0,50	0,00
-652	-0,02	-0,60	-0,48	-0,29	-0,02	0,02	0,05	0,19	0,55	0,23
-703	-0,02	-0,66	-0,55	-0,31	-0,02	0,02	0,04	0,22	0,51	0,25
-751	-0,16	-0,74	-0,67	-0,38	-0,06	0,02	0,07	0,26	0,66	0,23
-801	-0,16	-0,78	-0,67	-0,38	-0,07	0,03	0,05	0,26	0,68	0,23
-852	-0,18	-0,85	-0,73	-0,43	-0,11	0,03	0,05	0,28	0,68	0,25
-902	-0,29	-0,93	-0,80	-0,43	-0,09	0,00	0,05	0,28	0,68	0,27
-951	-0,35	-1,05	-0,88	-0,46	-0,17	0,02	0,05	0,26	0,70	0,25
-1000	-0,47	-1,18	-1,05	-0,57	-0,20	0,02	0,05	0,31	0,68	0,25
-1051	-0,61	-1,40	-1,24	-0,67	-0,28	0,00	0,05	0,37	0,68	0,25
-1101	-0,74	-1,79	-1,70	-0,93	-0,42	-0,07	0,07	0,48	0,66	0,27
-1150	-1,10	-3,21	-3,58	-1,96	-1,09	-0,29	0,04	0,46	0,66	0,27
-1155	-1,23	-3,69	-4,23	-2,34	-1,37	-0,43	0,07	0,48	0,68	0,25

Tabela VI.5 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2000 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,04	-0,06	0,00	0,02	-0,02	0,00	-0,04	0,20	0,46	-0,14
-100	0,02	0,00	0,08	0,10	-0,02	0,02	-0,02	0,30	0,66	-0,14
-150	0,00	-0,02	0,10	0,10	0,04	0,03	0,02	0,31	0,70	-0,12
-202	0,00	0,10	0,15	0,14	0,04	0,05	-0,02	0,28	0,70	-0,12
-251	0,00	0,16	0,23	0,19	0,11	0,03	0,02	0,28	0,68	-0,12
-303	0,06	0,25	0,36	0,28	0,15	0,10	0,02	0,28	0,68	-0,12
-353	0,14	0,31	0,42	0,38	0,22	0,10	0,00	0,31	0,70	-0,11
-401	0,22	0,41	0,50	0,46	0,30	0,15	0,00	0,30	0,68	-0,14
-451	0,29	0,51	0,63	0,57	0,37	0,22	0,02	0,28	0,68	-0,14
-503	0,41	0,60	0,82	0,71	0,50	0,28	-0,02	0,24	0,70	-0,14
-552	0,57	0,80	1,05	0,89	0,63	0,40	0,02	0,24	0,70	-0,11
-601	0,67	1,01	1,28	1,10	0,79	0,50	0,04	0,19	0,68	-0,14
-653	0,86	1,22	1,57	1,32	0,98	0,58	0,09	0,13	0,64	-0,11
-700	1,00	1,46	1,87	1,58	1,13	0,71	0,09	0,07	0,68	-0,14
-752	1,18	1,69	2,22	1,88	1,38	0,86	0,14	0,06	0,70	-0,14
-800	1,41	1,96	2,60	2,22	1,66	1,00	0,16	0,04	0,64	-0,11
-850	1,63	2,31	3,14	2,65	1,97	1,22	0,18	0,06	0,28	-0,11
-901	1,94	2,91	3,96	3,48	2,64	1,63	0,28	0,06	0,28	-0,12
-950	2,47	4,23	6,01	5,33	4,06	2,56	0,53	0,06	0,28	-0,14
-978	4,19	8,62	12,99	11,75	8,93	5,51	1,21	0,06	-0,29	-0,12

Tabela VI.6 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2000 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,00	-0,04	-0,05	0,02	-0,03	0,00	-0,04	-0,04	-0,02
-100	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,00	-0,13	-0,06	-0,02
-150	-0,04	0,02	0,04	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,20	-0,04	0,00
-202	0,00	0,00	0,08	0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,24	-0,04	-0,02
-253	0,00	-0,02	0,08	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,24	-0,02	0,12
-300	0,02	0,06	0,11	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,22	-0,02	0,11
-352	0,04	0,08	0,19	0,02	0,02	-0,02	-0,02	-0,28	-0,04	0,14
-403	-0,04	0,12	0,25	0,07	0,00	-0,02	-0,02	-0,24	-0,04	0,11
-452	0,00	0,23	0,29	0,10	0,00	-0,02	0,00	-0,24	-0,06	0,11
-501	0,08	0,25	0,36	0,19	0,15	-0,03	0,00	-0,26	-0,02	0,12
-551	0,18	0,31	0,48	0,21	0,15	0,05	0,00	-0,26	-0,06	0,12
-603	0,25	0,47	0,57	0,33	0,24	0,12	-0,02	-0,22	-0,04	0,12
-651	0,27	0,58	0,73	0,41	0,37	0,17	-0,02	-0,26	-0,02	0,11
-701	0,41	0,66	0,92	0,55	0,44	0,22	0,00	-0,28	-0,04	0,12
-753	0,57	0,82	1,07	0,71	0,54	0,31	0,00	-0,22	-0,04	0,12
-801	0,67	1,01	1,24	0,83	0,65	0,40	0,02	-0,28	-0,04	0,11
-851	0,82	1,17	1,49	1,02	0,77	0,46	0,12	-0,26	-0,02	0,12
-902	0,96	1,46	1,80	1,26	1,01	0,62	0,12	-0,26	-0,04	0,12
-951	1,20	1,86	2,35	1,70	1,35	0,86	0,20	-0,24	-0,04	0,12
-1000	1,49	2,72	3,52	2,62	1,99	1,31	0,34	-0,09	-0,06	0,09
-1050	2,49	5,38	7,42	5,73	4,32	2,70	0,69	-0,04	-0,02	0,09
-1055	3,15	7,19	10,14	8,04	5,98	3,68	0,91	-0,06	-0,04	0,12

Tabela VI.7 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 2500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	0,06	0,11	0,14	0,11	0,07	0,02	-0,04	0,20	-0,02
-101	-0,04	0,16	0,33	0,28	0,22	0,14	0,00	0,07	0,09	-0,02
-152	0,00	0,27	0,42	0,40	0,28	0,21	-0,02	0,06	0,06	-0,02
-200	-0,02	0,39	0,54	0,50	0,42	0,28	-0,02	0,04	0,07	-0,02
-251	-0,02	0,54	0,73	0,64	0,52	0,31	-0,02	0,06	0,06	-0,02
-300	0,04	0,60	0,82	0,71	0,57	0,36	0,00	0,07	0,07	-0,02
-352	0,06	0,68	0,88	0,77	0,63	0,45	0,04	0,06	0,07	-0,02
-402	0,12	0,70	0,96	0,84	0,68	0,45	0,04	0,04	0,04	-0,02
-452	0,16	0,76	0,98	0,89	0,72	0,50	0,04	0,11	0,07	-0,02
-500	0,22	0,80	1,11	0,96	0,79	0,57	0,07	0,11	0,07	-0,02
-552	0,20	0,85	1,21	1,05	0,81	0,57	0,09	0,13	0,06	-0,02
-603	0,25	0,93	1,22	1,12	0,87	0,60	0,05	0,17	0,06	-0,02
-650	0,37	1,07	1,45	1,29	1,01	0,71	0,07	0,13	0,07	-0,02
-703	0,51	1,36	1,78	1,62	1,25	0,86	0,07	0,15	0,09	-0,02
-750	0,69	1,67	2,22	2,00	1,53	1,05	0,14	0,13	0,07	-0,02
-801	0,88	2,08	2,77	2,44	1,88	1,27	0,18	0,15	0,07	-0,02
-851	1,10	2,58	3,50	3,05	2,38	1,58	0,20	0,15	0,06	-0,02
-900	1,41	3,52	4,84	4,18	3,21	2,12	0,28	0,17	-0,70	-0,02
-950	2,45	6,45	9,28	7,97	6,01	3,79	0,57	0,04	-1,95	-0,02
-953	2,86	7,58	11,11	9,53	7,20	4,46	0,69	0,02	-2,28	-0,02

Tabela VI.8 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 2500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	0,00	0,04	0,08	0,10	0,02	0,03	0,07	-0,07	-0,72	-0,02
-101	0,00	0,14	0,13	0,17	0,04	0,09	0,07	-0,07	-0,70	-0,02
-150	0,00	0,16	0,19	0,17	0,02	0,09	0,07	-0,07	-0,68	-0,02
-201	0,00	0,19	0,21	0,19	0,04	0,09	0,05	-0,07	-0,68	0,16
-250	0,00	0,25	0,31	0,26	0,00	0,09	0,07	-0,07	-0,66	0,20
-302	0,08	0,33	0,42	0,33	0,02	0,10	0,07	-0,06	-0,66	0,14
-350	0,10	0,45	0,54	0,40	0,00	0,12	0,09	-0,06	-0,72	0,16
-402	0,16	0,54	0,65	0,52	-0,02	0,17	0,05	-0,06	-0,70	0,16
-452	0,25	0,66	0,82	0,64	0,00	0,26	0,07	-0,07	-0,68	0,18
-503	0,37	0,84	1,03	0,83	0,00	0,33	0,07	-0,06	-0,68	0,28
-550	0,45	1,01	1,30	1,03	0,00	0,43	0,07	-0,09	-0,42	0,28
-601	0,65	1,26	1,61	1,29	0,00	0,55	0,07	-0,06	-0,44	0,28
-651	0,76	1,52	1,95	1,60	0,02	0,67	0,07	-0,04	-0,29	0,27
-700	0,90	1,88	2,39	1,94	0,00	0,88	0,09	-0,07	-0,29	0,27
-752	1,10	2,23	2,93	2,43	0,00	1,07	0,07	-0,06	-0,28	0,27
-800	1,35	2,74	3,67	3,03	2,05	1,34	0,09	-0,06	-0,28	0,27
-851	1,70	3,59	4,92	4,13	2,88	1,81	0,09	-0,06	-0,28	0,41
-901	2,43	5,56	7,94	6,73	4,91	3,01	0,21	-0,06	-0,28	0,43
-917	3,45	8,68	13,06	11,05	8,19	4,92	0,52	-0,02	-0,28	0,43

Tabela VI.9 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 2500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-51	-0,02	0,02	0,00	0,09	-0,02	-0,03	0,00	-0,02	-0,02	-0,02
-101	0,02	0,14	0,15	0,21	0,06	0,00	0,05	0,00	-0,04	0,02
-151	0,02	0,23	0,34	0,31	0,15	0,05	0,04	-0,04	-0,02	0,00
-201	0,04	0,39	0,55	0,45	0,24	0,10	0,05	-0,07	-0,02	-0,02
-251	0,02	0,56	0,75	0,62	0,31	0,17	0,04	-0,07	-0,04	-0,02
-301	0,02	0,68	0,98	0,81	0,44	0,22	0,04	-0,07	-0,02	-0,02
-351	0,04	0,87	1,19	0,98	0,57	0,31	0,04	-0,07	0,00	0,00
-400	0,02	0,99	1,40	1,17	0,70	0,38	0,00	-0,07	-0,02	-0,02
-453	0,04	1,24	1,70	1,41	0,90	0,52	0,04	-0,06	0,00	0,02
-501	0,02	1,48	2,01	1,70	1,11	0,60	0,07	-0,04	0,07	-0,02
-552	0,18	1,77	2,47	2,10	1,37	0,83	0,04	-0,07	0,13	-0,02
-601	0,37	2,14	3,00	2,51	1,72	1,02	0,04	-0,06	0,24	0,00
-652	0,61	2,53	3,60	3,03	2,05	1,20	0,02	-0,06	0,24	0,00
-702	0,84	3,09	4,34	3,65	2,53	1,48	0,05	-0,07	0,24	-0,02
-750	1,12	3,69	5,36	4,47	3,14	1,86	0,05	-0,07	0,20	0,00
-800	1,59	4,95	7,35	6,21	4,35	2,58	0,12	-0,06	0,24	0,00
-845	3,27	9,69	15,13	12,97	9,23	5,44	0,59	-0,06	-1,47	-0,02

Tabela VI.10 – Deslocamentos do modelo 1, de L = 3500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,05	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,02
-100	0,00	-0,02	0,02	0,00	-0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,19	-0,02
-150	-0,03	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	0,03	0,00	0,00	-0,49	-0,04
-201	-0,03	-0,02	-0,09	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,03	-0,60	-0,02
-250	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,04	0,02	0,00	-0,03	-0,68	-0,04
-301	-0,03	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,02	-0,04	-0,03	-0,74	-0,02
-351	-0,03	0,02	0,00	0,02	-0,04	0,03	-0,02	-0,05	-0,78	-0,02
-401	-0,03	-0,02	-0,09	0,00	-0,02	0,02	0,00	-0,10	-0,85	-0,04
-450	0,00	0,00	-0,09	0,00	-0,04	-0,02	0,00	-0,12	-0,91	-0,02
-501	-0,03	-0,02	-0,09	0,03	-0,06	0,00	0,00	-0,12	-0,93	0,00
-551	-0,03	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,14	-0,99	0,00
-601	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	-0,04	-0,15	-1,07	-0,04
-650	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,24	-1,07	-0,02
-700	-0,05	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	0,02	0,00	-0,24	-1,15	-0,04
-750	-0,03	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	0,00	-0,24	-1,15	-0,04
-800	-0,05	-0,02	0,00	0,00	-0,04	-0,02	0,00	-0,24	-1,20	0,00
-850	-0,02	-0,04	0,00	0,00	-0,04	0,00	0,00	-0,24	-1,24	-0,02
-900	0,00	-0,04	0,20	0,00	-0,06	0,02	-0,04	-0,24	-1,38	-0,02
-950	-0,03	0,25	0,43	0,10	-0,02	0,02	0,00	-0,26	-1,53	-0,02
-1000	-0,03	0,40	0,85	0,26	0,15	0,00	0,04	-0,24	-1,69	0,00
-1044	-0,03	2,33	3,72	1,72	1,24	0,31	-0,04	-0,24	-1,77	-0,04

Tabela VI.11 – Deslocamentos do modelo 2, de L = 3500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	0,04	0,02	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,02	0,00
-100	0,03	-0,04	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,02
-150	-0,02	0,02	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,03	0,08	0,00
-200	0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
-251	-0,03	0,19	0,20	0,07	0,00	-0,05	-0,04	0,00	0,08	-0,02
-300	0,00	0,31	0,45	0,14	0,11	-0,02	0,00	0,05	0,08	0,04
-350	0,00	0,52	0,66	0,28	0,22	-0,02	-0,02	0,02	0,04	0,00
-400	0,03	0,67	0,89	0,41	0,33	0,03	0,00	0,05	0,08	-0,02
-450	-0,02	0,86	1,19	0,60	0,52	0,15	0,00	-0,02	0,08	0,02
-500	0,03	1,13	1,55	0,83	0,72	0,26	0,00	0,02	0,04	0,02
-550	-0,02	1,45	2,07	1,20	0,98	0,43	-0,02	0,00	0,04	0,04
-600	0,17	1,93	2,83	1,69	1,44	0,64	0,02	0,03	0,06	-0,02
-651	0,31	2,72	4,04	2,55	2,21	0,98	0,02	0,02	0,06	-0,02
-700	0,48	3,92	6,04	3,97	3,47	1,62	-0,02	0,02	0,08	0,02
-752	1,36	8,63	13,94	9,70	8,41	4,01	0,00	0,00	0,04	0,02

Tabela VI.12 – Deslocamentos do modelo 3, de L = 3500 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deslocamentos nos Transdutores (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,04	0,00
-101	0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,14	0,00
-150	0,03	-0,04	-0,05	-0,22	-0,02	0,00	0,00	0,02	-0,33	0,00
-201	0,03	-0,21	-0,23	-0,34	-0,18	0,02	-0,02	-0,02	-0,43	-0,02
-250	0,02	-0,23	-0,37	-0,50	-0,33	-0,09	-0,02	-0,02	-0,49	0,00
-300	0,02	-0,33	-0,52	-0,64	-0,39	-0,19	-0,04	-0,02	-0,58	-0,02
-351	0,02	-0,40	-0,61	-0,74	-0,50	-0,15	-0,02	0,00	-0,60	-0,02
-400	0,00	-0,59	-0,94	-1,00	-0,77	-0,31	0,00	-0,02	-0,70	-0,02
-450	0,00	-0,80	-1,28	-1,29	-1,05	-0,43	-0,04	0,00	-0,72	-0,04
-500	-0,02	-1,07	-1,76	-1,67	-1,46	-0,65	-0,02	0,00	-0,76	0,00
-551	0,00	-1,49	-2,55	-2,32	-2,01	-0,95	-0,02	-0,02	-0,85	-0,02
-600	-0,14	-2,10	-3,58	-3,17	-2,82	-1,32	-0,04	-0,02	-0,93	0,02
-650	-0,40	-2,95	-5,04	-4,30	-3,78	-1,88	-0,02	-0,02	-1,01	0,00
-700	-0,67	-4,11	-7,14	-5,94	-5,31	-2,60	0,00	-0,03	-1,15	-0,02
-750	-1,15	-6,31	-11,16	-9,03	-8,12	-3,96	-0,07	0,00	-1,42	-0,02
-763	-1,56	-8,26	-14,78	-11,84	-10,61	-5,21	-1,28	-0,03	-1,59	-0,02

SÉRIES CS150x25, PS 200 x 25 E PS 225 x 29.

I – FC, série CS150 x 25. Salienta-se que para esta série foram realizadas medidas por extensometria, apenas, no modelo 2, de $L = 1800$ mm, cujas as deformações encontram-se apresentadas na Tabela VII.1.

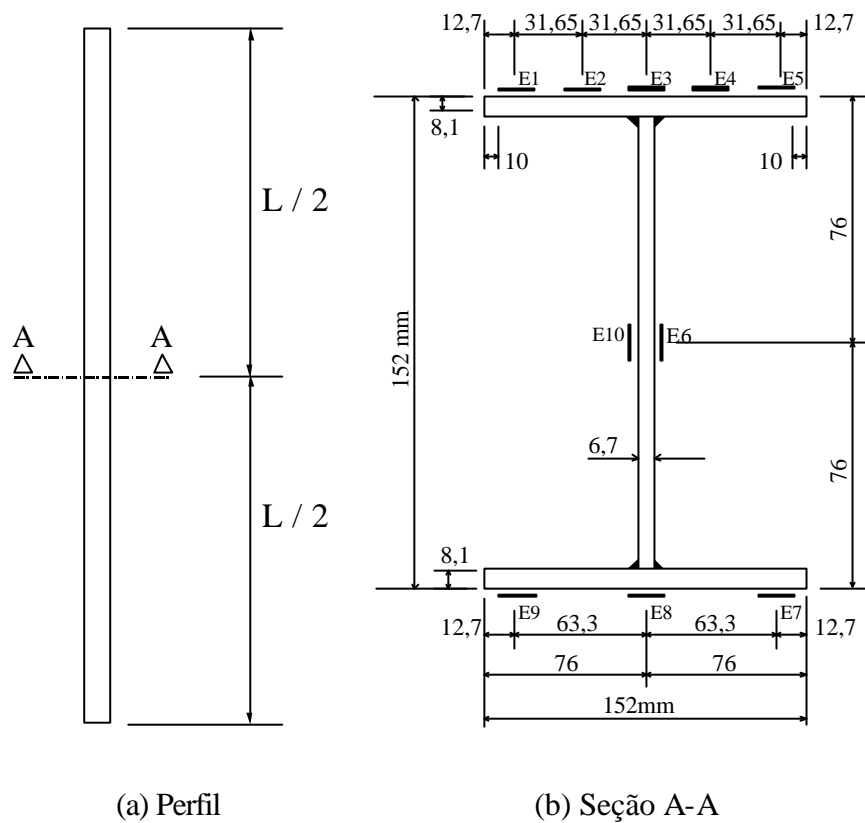


Figura VII.1 - Posições dos extensômetros na altura média do perfil CS 150 x 25.

Tabela VII.1 – Deformações no modelo 2, de L = 1800 mm, do perfil CS 150 x 25.

Força (kN)	me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 37	- 33	- 26	- 20	- 15	- 69	- 144	- 107	- 83	- 66
- 100	- 100	- 95	- 88	- 82	- 74	- 141	- 231	- 184	- 158	- 133
- 150	- 155	- 153	- 147	- 146	- 141	- 209	- 314	- 252	- 220	- 195
- 200	- 216	- 216	- 212	- 121	- 209	- 281	- 395	- 323	- 290	- 260
- 250	- 279	- 280	- 277	- 278	- 274	- 351	- 468	- 390	- 360	- 324
- 300	- 343	- 346	- 342	- 343	- 340	- 421	- 533	- 462	- 427	- 390
- 350	- 409	- 412	- 408	- 410	- 407	- 494	- 605	- 531	- 497	- 456
- 400	- 479	- 483	- 478	- 482	- 478	- 573	- 709	- 610	- 566	- 528
- 450	- 544	- 550	- 545	- 550	- 547	- 649	- 791	- 680	- 659	- 597
- 500	- 613	- 619	- 616	- 647	- 623	- 732	- 888	- 757	- 739	- 668
- 550	- 675	- 684	- 689	- 961	- 720	- 817	- 1000	- 840	- 827	- 738
- 600	- 733	- 742	- 756	- 1150	- 789	- 895	- 1090	- 912	- 900	- 792
- 650	- 823	- 811	- 867	- 1250	- 908	- 880	- 1140	- 1030	- 1000	- 798
- 700	- 921	- 947	- 956	- 1480	- 1030	- 844	- 1170	- 1130	- 1110	- 710
- 750	- 1030	- 1010	- 1060	- 1760	- 1150	- 871	- 1180	- 1230	- 1210	- 708
- 800	- 1110	- 1080	- 1170	- 2230	- 1310	- 889	- 1200	- 1350	- 1320	- 695
- 850	- 1310	- 1180	- 1300	- 2640	- 1500	- 901	- 1250	- 1500	- 1440	- 665
- 900	- 1430	- 1250	- 1430	- 3140	- 1870	- 1030	- 1320	- 1700	- 1530	- 686
- 950	- 1550	- 1300	- 1600	- 3900	- 2350	- 1120	- 1340	- 1940	- 1600	- 755
- 1000	- 1730	- 1520	- 1970	- 4770	- 3020	- 1360	- 1340	- 2230	- 1720	- 765
- 1044	-2434	-2088	-2608	-5137	-2849	-1592	-1027	-2684	-2200	-834

A figura VII.2 ilustra as posições dos extensômetros na altura média do perfil I – FC, série PS 200 x 25. Salienta-se que para esta série foram realizadas medidas por extensometria em quatro modelos, sendo um modelo de cada comprimento ensaiado.

As Tabela VII.2, VII.3, VII.4 e VII.5 apresentam as deformações medias nos extensômetros dos modelos 2 (de $L = 1500$ mm), 3 (de $L = 2000$ mm), 2 (de $L = 2400$ mm) e 3 (de $L = 3000$ mm) do perfil PS 200 x 25.

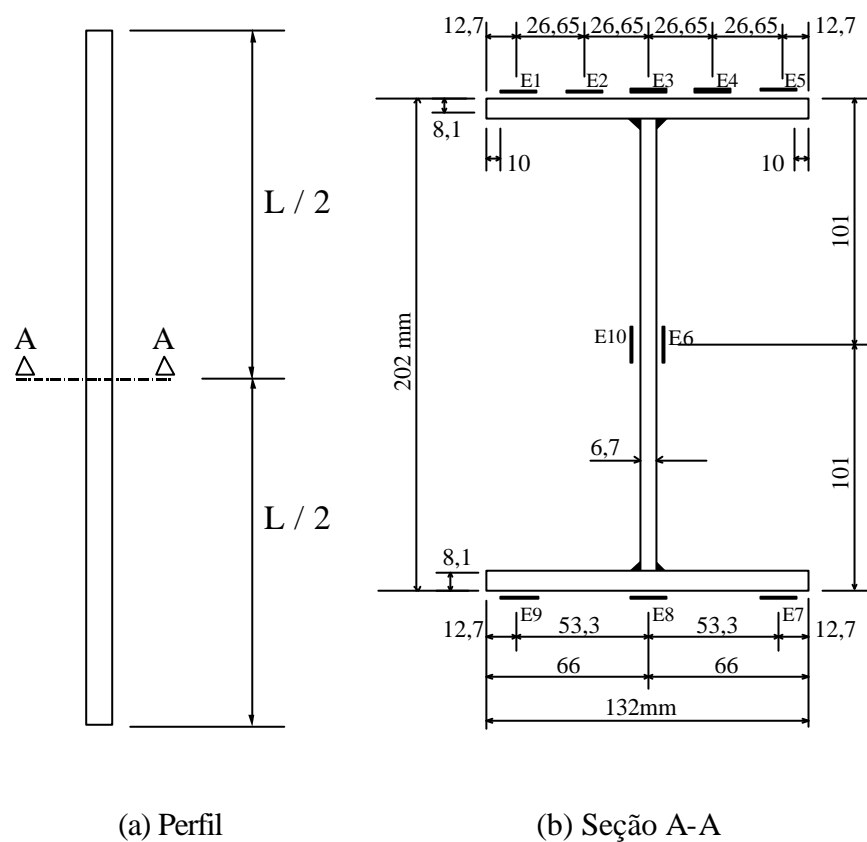


Figura VII.2 - Posições dos extensômetros na altura média do perfil PS 200 x 25.

Tabela VII.2 – Deformações no modelo 2, de L = 1500 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deformações nos Extensômetros (me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 104	- 114	- 127	- 137	- 151	- 64	- 20	- 16	- 12	- 74
- 100	- 206	- 217	- 229	- 242	- 258	- 125	- 55	- 49	- 49	- 146
- 150	- 294	- 305	- 318	- 330	- 350	- 185	- 106	- 95	- 94	- 218
- 200	- 376	- 387	- 398	- 412	- 433	- 245	- 166	- 152	- 154	- 293
- 250	- 459	- 467	- 477	- 487	- 510	- 305	- 224	- 212	- 225	- 368
- 300	- 539	- 543	- 548	- 558	- 581	- 361	- 278	- 272	- 296	- 438
- 350	- 623	- 624	- 622	- 631	- 672	- 422	- 336	- 334	- 370	- 510
- 400	- 709	- 700	- 694	- 705	- 774	- 481	- 395	- 398	- 443	- 580
- 450	- 797	- 781	- 767	- 781	- 869	- 544	- 459	- 463	- 518	- 649
- 500	- 878	- 862	- 839	- 854	- 952	- 611	- 523	- 529	- 596	- 711
- 550	- 958	- 956	- 912	- 924	- 1020	- 697	- 587	- 596	- 698	- 777
- 600	- 1050	- 1060	- 981	- 985	- 1070	- 833	- 639	- 600	- 812	- 1130
- 650	- 1180	- 1210	- 1060	- 1050	- 1130	- 764	- 705	- 733	- 941	- 2270
- 700	- 1330	- 1340	- 1160	- 1150	- 1200	- 816	- 780	- 815	- 1060	- 2500
- 750	- 1510	- 1480	- 1250	- 1250	- 1270	- 1190	- 847	- 900	- 1200	- 2980
- 800	- 1710	- 1650	- 1350	- 1340	- 1340	- 1650	- 923	- 996	- 1370	- 3490
- 850	- 1980	- 1890	- 1480	- 1460	- 1420	- 2390	- 1010	- 1110	- 1590	- 3980
- 900	- 2510	- 2180	- 1650	- 1570	- 1460	- 2840	- 1110	- 1270	- 1960	- 4350
- 950	- 3480	- 2730	- 1860	- 1640	- 1380	- 3520	- 1100	- 1530	- 2820	- 5170
- 987	- 6960	- 4170	- 2390	- 1670	- 896	- 3870	- 594	- 2100	- 5490	- 8090

Tabela VII.3 – Deformações no modelo 3, de L = 2000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deformações nos Extensômetros (me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 94	- 106	- 79	- 72	- 67	- 64	- 61	- 61	- 67	- 71
- 100	- 168	- 179	- 150	- 142	- 134	- 129	- 121	- 129	- 146	- 140
- 150	- 237	- 249	- 218	- 209	- 201	- 190	- 185	- 198	- 223	- 209
- 200	- 312	- 328	- 286	- 273	- 262	- 254	- 249	- 269	- 307	- 279
- 250	- 389	- 417	- 356	- 340	- 327	- 318	- 312	- 339	- 392	- 351
- 300	- 464	- 505	- 425	- 405	- 390	- 380	- 373	- 407	- 471	- 419
- 350	- 537	- 585	- 492	- 471	- 453	- 441	- 431	- 473	- 550	- 487
- 400	- 613	- 663	- 562	- 537	- 519	- 503	- 493	- 541	- 631	- 557
- 450	- 690	- 739	- 632	- 604	- 583	- 566	- 552	- 609	- 715	- 626
- 500	- 771	- 815	- 704	- 672	- 647	- 629	- 610	- 680	- 808	- 699
- 550	- 862	- 895	- 775	- 735	- 703	- 692	- 656	- 753	- 929	- 773
- 600	- 981	- 999	- 850	- 804	- 764	- 762	- 702	- 836	- 1070	- 844
- 650	- 1110	- 1120	- 941	- 885	- 835	- 813	- 751	- 929	- 1230	- 832
- 700	- 1240	- 1240	- 1030	- 959	- 891	- 851	- 796	- 1040	- 1410	- 1040
- 750	- 1420	- 1380	- 1140	- 1060	- 967	- 854	- 837	- 1190	- 1620	- 1120
- 800	- 1640	- 1480	- 1240	- 1130	- 994	- 886	- 815	- 1340	- 1840	- 2120
- 859	- 2520	- 1960	- 1540	- 1120	- 672	- 892	- 329	- 1720	- 2990	- 4360

Tabela VII.4 – Deformações no modelo 2, de L = 2400 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deformações nos Extensômetros (me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 95	- 78	- 65	- 51	- 38	- 70	- 85	- 72	- 71	- 66
- 100	- 165	- 144	- 132	- 115	- 105	- 140	- 161	- 142	- 145	- 130
- 150	- 233	- 211	- 197	- 180	- 171	- 209	- 237	- 212	- 222	- 194
- 200	- 306	- 279	- 263	- 240	- 230	- 278	- 305	- 283	- 308	- 257
- 250	- 376	- 344	- 326	- 302	- 291	- 344	- 371	- 350	- 386	- 320
- 300	- 450	- 413	- 393	- 365	- 356	- 414	- 438	- 419	- 470	- 384
- 350	- 525	- 483	- 461	- 431	- 422	- 479	- 504	- 486	- 553	- 445
- 400	- 602	- 554	- 529	- 494	- 485	- 542	- 568	- 553	- 637	- 507
- 450	- 688	- 628	- 600	- 560	- 549	- 606	- 631	- 624	- 734	- 572
- 500	- 783	- 699	- 665	- 619	- 605	- 658	- 688	- 696	- 852	- 628
- 550	- 898	- 780	- 737	- 680	- 660	- 698	- 742	- 775	- 983	- 698
- 600	- 1010	- 871	- 808	- 746	- 719	- 601	- 797	- 846	- 1120	- 1040
- 650	- 1100	- 979	- 880	- 804	- 767	- 600	- 837	- 925	- 1270	- 1260
- 700	- 1310	- 1180	- 1010	- 899	- 839	- 519	- 899	- 1090	- 1550	- 1220
- 750	- 1650	- 1450	- 1160	- 950	- 797	- 530	- 846	- 1270	- 2160	- 1260
- 769	- 2110	- 1740	- 1260	- 917	- 607	- 537	- 638	- 1420	- 3240	- 1300

Tabela VII.5 – Deformações no modelo 3, de L = 3000 mm, do perfil PS 200 x 25.

Força (kN)	Deformações nos Extensômetros (me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 29	- 46	- 61	- 78	- 95	- 69	- 103	- 79	- 57	- 64
- 100	- 75	- 100	- 125	- 153	- 179	- 136	- 188	- 154	- 125	- 127
- 150	- 109	- 145	- 184	- 225	- 263	- 200	- 277	- 229	- 189	- 187
- 200	- 145	- 193	- 245	- 299	- 352	- 269	- 371	- 310	- 258	- 252
- 250	- 182	- 240	- 305	- 373	- 436	- 334	- 459	- 384	- 323	- 312
- 300	- 225	- 294	- 369	- 449	- 524	- 401	- 547	- 462	- 390	- 374
- 350	- 270	- 348	- 433	- 523	- 610	- 460	- 628	- 534	- 453	- 436
- 400	- 318	- 404	- 497	- 598	- 692	- 518	- 704	- 604	- 506	- 495
- 450	- 368	- 461	- 561	- 673	- 778	- 572	- 774	- 678	- 547	- 557
- 500	- 418	- 520	- 625	- 748	- 862	- 629	- 851	- 749	- 587	- 617
- 550	- 472	- 582	- 691	- 822	- 949	- 706	- 942	- 818	- 635	- 698
- 600	- 539	- 653	- 757	- 909	- 1050	- 831	- 1050	- 895	- 690	- 1190
- 650	- 605	- 729	- 826	- 992	- 1050	- 911	- 1160	- 972	- 741	- 2180
- 700	- 684	- 831	- 939	- 1090	- 1270	- 897	- 1530	- 1080	- 795	- 2510
- 750	- 745	- 929	- 1060	- 1180	- 1430	- 934	- 1920	- 1270	- 810	- 2650
- 785	- 712	- 978	- 1180	- 1250	- 1560	- 1090	- 2440	- 1460	- 695	- 2970

A figura VII.3 ilustra as posições dos extensômetros na altura média do perfil I – FC, série PS 225 x 29. Salienta-se que para esta série foram realizadas medidas por extensometria, apenas, no modelo 1, de $L = 1600$ mm, cujas as deformações encontram-se apresentadas na Tabela VII.6.

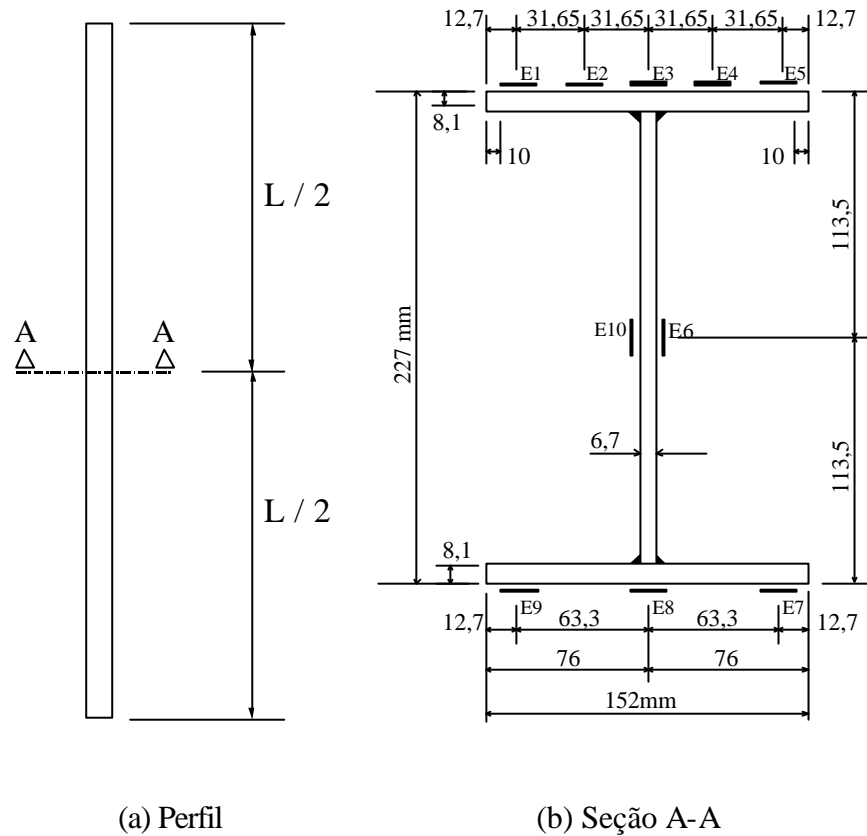


Figura VII.3 - Posições dos extensômetros na altura média do perfil PS 225 x 29.

Tabela VII.6 – Deformações no modelo 1, de L = 1600 mm, do perfil PS 225 x 29.

Força (kN)	Deformações nos Extensômetros (me)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
- 50	- 93	- 84	- 77	- 66	- 59	- 57	- 16	- 41	- 71	- 57
- 100	- 163	- 155	- 147	- 137	- 132	- 118	- 62	- 92	- 131	- 117
- 150	- 224	- 216	- 211	- 201	- 199	- 179	- 121	- 147	- 187	- 174
- 200	- 286	- 276	- 270	- 258	- 253	- 236	- 174	- 203	- 253	- 229
- 250	- 354	- 342	- 332	- 316	- 311	- 298	- 229	- 264	- 322	- 288
- 300	- 418	- 404	- 391	- 374	- 366	- 357	- 283	- 320	- 390	- 346
- 350	- 483	- 466	- 452	- 431	- 424	- 416	- 336	- 377	- 455	- 402
- 400	- 546	- 528	- 512	- 488	- 480	- 474	- 391	- 433	- 520	- 458
- 450	- 609	- 590	- 571	- 546	- 541	- 534	- 446	- 491	- 582	- 515
- 500	- 671	- 655	- 632	- 603	- 608	- 596	- 503	- 552	- 661	- 574
- 550	- 733	- 724	- 690	- 659	- 674	- 655	- 554	- 608	- 741	- 630
- 600	- 827	- 805	- 755	- 715	- 743	- 719	- 604	- 669	- 814	- 692
- 650	- 933	- 886	- 823	- 774	- 802	- 784	- 651	- 731	- 897	- 756
- 700	- 1020	- 962	- 887	- 832	- 849	- 849	- 691	- 791	- 992	- 817
- 750	- 1110	- 1050	- 959	- 893	- 893	- 911	- 739	- 858	- 1100	- 885
- 800	- 1200	- 1130	- 1030	- 951	- 932	- 954	- 793	- 926	- 1200	- 947
- 850	- 1300	- 1230	- 1110	- 1030	- 980	- 970	- 868	- 1010	- 1310	- 1030
- 900	- 1420	- 1350	- 1170	- 1110	- 1030	- 882	- 949	- 1090	- 1440	- 1250
- 950	- 1600	- 1550	- 1280	- 1230	- 1100	- 895	- 1060	- 1210	- 1620	- 1280
- 1000	- 1810	- 1750	- 1390	- 1350	- 1170	- 956	- 1150	- 1340	- 1850	- 1340
- 1050	- 2050	- 1930	- 1500	- 1440	- 1200	- 954	- 1200	- 1480	- 2120	- 1510
- 1100	- 2750	- 2380	- 1720	- 1530	- 1140	- 980	- 1150	- 1730	- 2830	- 1570
- 1135	-5618	-4027	-2454	-1610	-546	-2697	-560	-2494	-4996	-1760