



MESTRADO EM ESTRUTURAS METÁLICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
ESCOLA DE MINAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ALEXANDRE DA SILVA SEVERO JÚNIOR

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PERFIS DE PAREDES ESBELTAS COM ENRIJECEDOR INTERMEDIÁRIO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

*Orientadores: Prof<sup>ta</sup>. Arlene Maria Sarmanho Freitas, D.Sc.  
Prof. Marcílio Sousa da Rocha Freitas, D.Sc.*

Convênio USIMINAS/UFOP/FUNDAÇÃO GORCEIX  
**Ouro Preto, Outubro de 2000**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

## **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PERFIS DE PAREDES ESBELTAS COM ENRIJECEDOR INTERMEDIÁRIO**

**AUTOR: ALEXANDRE DA SILVA SEVERO JÚNIOR**

ORIENTADORES: Prof<sup>a</sup>. Arlene Maria Sarmanho Freitas, D. Sc.  
Prof. Marcílio Sousa da Rocha Freitas, D. Sc.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, outubro de 2000.

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PERFIS DE PAREDES ESBELTAS COM ENRIJECEDORES INTERMEDIÁRIOS.**

**AUTOR: ALEXANDRE DA SILVA SEVERO JÚNIOR**

Esta dissertação foi apresentada em seção pública e aprovada em 20 de outubro de 2000, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (Presidente-Orientador / UFOP)

Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (Orientadora / UFOP)

Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista (UFRJ)

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP)

**Aos meus pais, Alexandre e Alayde Severo,  
pelo amor, pela compreensão e pelo encorajamento  
ao longo de toda a minha vida.**

**À minha sobrinha Letícia, por ela ser o  
verdadeiro significado da palavra felicidade.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a toda a minha família pela força e por mais esta conquista em minha vida.

Aos professores Arlene Maria Sarmanho Freitas e Marcílio Sousa da Rocha Freitas, orientadores desta dissertação e pelos quais tenho grande admiração.

A Flávia pelo apoio, pela amizade e o amor.

A todos os professores do Programa de Mestrado da UFOP, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas Metálicas da Escola de Minas, João, Carlos, Geraldo e Wilson (Dequinha), pela boa vontade, amizade, ajuda e atenção demonstradas durante a realização dos ensaios experimentais.

Às secretárias e amigas Silvana e Róvia, pela simpatia, atenção e eficiência no atendimento aos alunos.

Aos meus amigos Leonardo Baptista, Carlos Marcelo (Chinay) e Adriano Magela (Dodói), bem como à minha amiga Carina Bertoncine e a todos os amigos do mestrado, Urânia, Ilma, Soraia, Cleberson (Dors), Welber (Cló), Eduardo, Djaniro (Bussa) e Renilson, além da galera da república SEM DESTINO. Também a todos os amigos que, embora não estejam citados, foram essenciais.

À UFOP, USIMINAS e CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que direta ou indiretamente tornaram possível a realização deste trabalho os meus mais sinceros AGRADECIMENTOS.

## RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um estudo experimental para colunas curtas constituídas de perfis metálicos de paredes esbeltas em chapa dobrada, com seção transversal com enrijecedor intermediário na alma.

Os perfis de chapa dobrada estão sujeitos a fenômenos de instabilidade estrutural, tanto local, que considera problemas de flambagem local e distorcional das paredes que constituem o perfil, quanto global, que considera flambagem por flexão e flexo-torção. Além da análise destes fenômenos, deve-se considerar ainda a interação entre modos de instabilidade locais e globais nos elementos.

A flambagem local é um fenômeno de instabilidade que influencia na capacidade de carga do elemento comprimido. No caso de perfis de paredes esbeltas a utilização de enrijecedores pode aumentar a capacidade de carga e a eficiência do elemento.

O programa experimental consistiu em um estudo experimental em perfis de colunas curtas de seção transversal do tipo U enrijecido submetidas a carregamento centrado, chamado de perfil sigma ( $\Sigma$ ) com um enrijecedor intermediário na alma, divididos em quatro séries de ensaios agrupados em função das diferentes dimensões de seção transversal. Foram previstos três protótipos para cada série a ser ensaiada, totalizando doze protótipos. Cada série teve a largura do flange e altura do enrijecedor intermediário variando em relação às demais.

As análises realizadas nestes perfis tiveram o objetivo de avaliar a eficiência do tamanho do enrijecedor intermediário na capacidade de carga da coluna, avaliar também a influência da flambagem local na resistência das mesmas e comparar os resultados experimentais das cargas de flambagem local e última com os resultados teóricos obtidos pelas prescrições de norma.

## ABSTRACT

This work presents an experimental study of steel stub columns constituted of thin-walled cold, formed with intermediate stiffeners in the web.

Cold-formed steel members need attention to the problem of structural stability both local, that considers problems of local and distortional buckling of the walls, and global one, that considers problems of flexural and flexural-torsional buckling. Besides the analysis of these problems, it should still be considered the interaction among local and global modes of instability in the structural elements .

The local buckling is an instability phenomenon that influence the ultimate capacity of the compressed element. For Cold-formed steel members with thin walled, the use of intermediate stiffeners can improve the load capacity and the efficiency of the element.

The profiles studied in this work have cross section of the type rigid U submitted to centered load, called sigma ( $\Sigma$ ) with one intermediate stiffener in the web, divided in fourth series of rehearsals contained in function of the different dimensions of traverse section. Three prototypes were foreseen for each series to be rehearsed, totality twelve prototypes. Each series had the width of the flange and height of the intermediary stiffeners varying in relation to the others.

The analyses accomplished in these profiles had the objective of evaluating the efficiency of the size of the intermediary stiffeners in the load capacity of the column, to also evaluate the influence of the local buckling in the resistance of the same ones and to compare the experimental results of the load of local buckling and ultimate load with the theoretical results obtained by the codes specifications.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE FOTOS .....</b>	<b>XXI</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - TEORIA DE PLACAS ESBELTAS .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. PLACAS ISOLADAS .....	6
2.3. PLACAS ASSOCIADAS .....	9
2.4. COMPORTAMENTO PÓS-CRÍTICO .....	12
2.5. MÉTODO DA LARGURA EFETIVA.....	13
2.6. ELEMENTOS ENRIJECIDOS NA ALMA.....	18
<b>CAPÍTULO 3 - PRESCRIÇÕES DE NORMA .....</b>	<b>24</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	24
3.2. PRESCRIÇÕES DA NORMA AMERICANA AISI/96 PARA O CÁLCULO DO ELEMENTO ESTRUTURAL COLUNA.....	25
3.2.1. Flambagem Local .....	25
3.2.2. Flambagem Global.....	30
3.2.3. Coluna.....	31
3.3. PRESCRIÇÕES DE CÁLCULO PARA PERFIS DE SEÇÃO TRANSVERSAL SIGMA COM UM E COM VÁRIOS ENRIJECEDORES INTERMEDIÁRIOS – AISL. ....	32



3.4. TEXTO BASE DA NORMA BRASILEIRA.....	35
3.4.1. Prescrições para Perfis de Seção Transversal Sigma com Um e com Múltiplos Enrijecedores Intermediários .....	35
3.4.1.1. Flambagem por flexão, por torção ou flexo-torção.....	37
3.4.1.2. Flambagem por distorção da seção transversal .....	38
<b>CAPÍTULO 4 - PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	39
4.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS PERFIS .....	41
4.3. SEÇÕES ESTUDADAS .....	42
4.4. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL.....	47
4.5. PREPARAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS .....	49
4.6. ESQUEMA DE MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS .....	52
4.7. METODOLOGIA DE ENSAIO .....	55
4.7.1. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -1 .....	58
4.7.1.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -1A .....	59
4.7.1.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -1B .....	61
4.7.1.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -1C .....	63
4.7.2. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -2 .....	65
4.7.2.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -2A .....	66
4.7.2.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -2B .....	66
4.7.2.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -2C .....	67
4.7.3. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -3 .....	67
4.7.3.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -3A .....	68
4.7.3.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -3B .....	69
4.7.3.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -3C .....	70
4.7.4. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -4 .....	70
4.7.4.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -4A .....	71
4.7.4.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -4B .....	72
4.7.4.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -4C .....	73

<b>CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	74
5.2. DESCRIÇÃO DAS SÉRIES DE ENSAIOS E RESULTADOS DAS MEDIÇÕES .....	74
5.2.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -1A.....	75
5.2.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -1B .....	80
5.2.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -1C.....	85
5.2.4. Protótipo MOD $\Sigma$ -2A.....	94
5.2.5. Protótipo MOD $\Sigma$ -2B .....	98
5.2.6. Protótipo MOD $\Sigma$ -2C.....	102
5.2.7. Protótipo MOD $\Sigma$ -3A.....	107
5.2.8. Protótipo MOD $\Sigma$ -3B .....	111
5.2.9. Protótipo MOD $\Sigma$ -3C.....	115
5.2.10. Protótipo MOD $\Sigma$ -4A .....	120
5.2.11. Protótipo MOD $\Sigma$ -4B .....	124
5.2.12. Protótipo MOD $\Sigma$ -4C .....	128
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS .....	133
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

# LISTA DE SÍMBOLOS

## *Letras maiúsculas:*

$A$	→ Área total da seção transversal do perfil.
$A_c$	→ Área dos cantos dobrados da seção transversal.
$A_e$	→ Área efetiva da seção transversal.
$A_r$	→ Área total da seção transversal do perfil, considerando os elementos retos.
$A_t$	→ Comprimento da parte útil (seção reduzida).
$A_s$	→ Área reduzida do enrijecedor.
$A'_s$	→ Área efetiva do enrijecedor.
$B$	→ Comprimento da cabeça de fixação do corpo de prova à tração.
$C_t$	→ Largura da cabeça de fixação do corpo de prova à tração.
$C_w$	→ Constante de empenamento da seção transversal.
$D$	→ Coeficiente de rigidez à flexão da placa.
$E$	→ Módulo de elasticidade longitudinal do material.
$F$	→ Função de tensão de Airy.
$F_e$	→ Tensão crítica de flambagem elástica.
$F_n$	→ Tensão crítica, obtida através da curva de flambagem.
$G$	→ Módulos de elasticidade transversal do material.
$G_i$	→ Comprimento inicial do corpo de prova à tração.
$I_a$	→ Momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário da placa.
$I_c$	→ Momento de inércia da curva do enrijecedor.
$I_{mim}$	→ Momento de inércia mínimo do enrijecedor intermediário.
$I_s$	→ Momento de inércia da seção total do enrijecedor.
$I_{sf}$	→ Momento de inércia da seção bruta do elemento com enrijecedores intermediários.
$I_{xr}$	→ Momento de inércia da parte reta do enrijecedor intermediário em relação ao eixo x.

$I_{yr}$	→ Momento de inércia da parte reta do enrijecedor intermediário em relação ao eixo y.
$I_{xx}$	→ Momento de inércia em torno do eixo local 'x'.
$I_{yy}$	→ Momento de inércia em torno do eixo local 'y'.
$J$	→ Constante de torção St. Venant da seção transversal.
$K_x$	→ Coeficiente da flambagem em relação ao eixo 'x'.
$K_y$	→ Coeficiente da flambagem em relação ao eixo 'y'.
$K_t$	→ Coeficiente da flambagem à torção.
$L_p$	→ Comprimento da coluna.
$L_t$	→ Comprimento total do corpo de prova à tração.
$N_{c,Rd}$	→ Força normal de compressão resistente de cálculo.
$P_{cr}$	→ Carga crítica de flambagem elástica.
$P_{cr\_la}$	→ Carga crítica de flambagem local da alma.
$P_{cr\_lm}$	→ Carga crítica de flambagem local da mesa.
$P_{ex}$	→ Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo 'x'.
$P_{ey}$	→ Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo 'y'.
$P_{ft}$	→ Carga crítica de flambagem por flexo-torção.
$P_n$	→ Carga nominal axial de acordo com a AISI/96.
$P_u$	→ Resistência última das placas sob compressão uniforme.
$P_{u\_exp}$	→ Carga última obtida através dos ensaios experimentais.
$P_y$	→ Carga de escoamento.
$R_t$	→ Raio do corpo de prova à tração.
$X_{cg}$	→ Posição do centro de gravidade em relação ao eixo 'x'.
$Y_{cg}$	→ Posição do centro de gravidade em relação ao eixo 'y'.
$Y_{cgr}$	→ Posição do centro de gravidade em relação ao eixo 'y', considerando os elementos retos.
$Z$	→ Largura do corpo de prova à tração.

***Letras minúsculas:***

$a$	→ Comprimento longitudinal da placa.
$b$	→ Largura da placa original.
$b_e$	→ Largura efetiva da placa.
$b_{eA}$	→ Largura efetiva da alma.
$b_{eM}$	→ Largura efetiva do flange.
$b_{ep}$	→ Largura efetiva de projeto.
$b_o$	→ Largura total da alma comprimida, desconsiderando as extremidades curvas.
$b_1$	→ Largura total da alma.
$b_2$	→ Largura total do flange.
$b_3$	→ Largura total do enrijecedor de extremidade.
$cc$	→ Posição do centro de cisalhamento.
$cg$	→ Posição do centro de gravidade.
$d$	→ Altura do enrijecedor intermediário.
$d_{sf}$	→ Largura efetiva do enrijecedor de extremidade.
$e$	→ Largura do enrijecedor intermediário.
$f_y$	→ Tensão limite de escoamento do aço.
$f_u$	→ Tensão limite de resistência à tração.
$f_1$ e $f_2$	→ Tensões nas extremidades da placa calculadas com base na seção efetiva.
$k$	→ Coeficiente de flambagem local da placa.
$k_o$ e $k_g$	→ Matrizes de rigidez linear e geométrica, respectivamente.
$l_b$	→ Comprimento do trecho reto do enrijecedor intermediário.
$m$	→ Posição do centro de cisalhamento.
$q_x$	→ Carga de compressão uniformemente distribuída na placa.
$r$	→ Raio da placa.
$r_x$	→ Raio de giração em torno do eixo 'x'.
$r_y$	→ Raio de giração em torno do eixo 'y'.
$r_o$	→ Raio polar de giração.
$s$	→ Comprimento da meia onda que se forma ao longo do eixo $x$ da parede.

$t$	→ Espessura da placa ou da parede do perfil.
$t_s$	→ Espessura equivalente do elemento com enrijecedores intermediários.
$w$	→ Largura do trecho reto das paredes.
$w_1$	→ Largura do trecho reto das paredes entre o enrijecedor intermediário.
$w_2$	→ Largura do trecho reto do flange.
$w_3$	→ Largura do trecho reto do enrijecedor de extremidade.
$x_o$	→ Coordenada do centro de cisalhamento no eixo 'x'.
$y_o$	→ Coordenada do centro de cisalhamento no eixo 'y'.

***Letras gregas:***

$\alpha$	→ Ângulo do enrijecedor intermediário.
$\beta$	→ Grandeza geométrica.
$\epsilon_r$	→ Alongamento residual após a ruptura do aço.
$\gamma$	→ Grandeza geométrica.
$\lambda$	→ Fator de esbeltez relativa da placa.
$\lambda_c$	→ Fator de esbeltez da coluna.
$\lambda_p$	→ Esbeltez relativa da seção.
$\lambda_o$	→ Esbeltez relativa da seção para o início da flambagem local, $\lambda_o = 0,673$ .
$\nu$	→ Coeficiente de Poisson.
$\rho$	→ Fator de redução da capacidade da barra devido à flambagem.
$\sigma_{cr}$	→ Tensão crítica de flambagem local da placa real.
$\sigma_{cr\_la}$	→ Tensão crítica de flambagem local da alma.
$\sigma_{cr\_lm}$	→ Tensão crítica de flambagem local do flange.
$\sigma_e$	→ Tensão crítica de flambagem local da placa substituta.
$\sigma_{ex}$	→ Tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo x.
$\sigma_{ey}$	→ Tensão crítica de flambagem por flexão em torno do eixo y.
$\sigma_t$	→ Tensão crítica de flambagem por flexo-torção.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	→ Tensão máxima de flambagem local da placa real.

# LISTA DE TABELAS

## CAPÍTULO 2

Tabela 2.1- Curvas propostas para o cálculo da largura efetiva. ....	17
--	----

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.1– Dimensões nominais dos protótipos a serem ensaiados. ....	44
Tabela 4.2– Dimensões reais da seção transversal dos protótipos. ....	45
Tabela 4.3– Dimensões dos corpos de prova à tração. ....	48
Tabela 4.4- Valores dos comprimentos dos perfis para controle dimensional. ....	50

## CAPÍTULO 5

Tabela 5.1- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD $\Sigma$ -1..	93
Tabela 5.2- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD $\Sigma$ -2..	107
Tabela 5.3- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD $\Sigma$ -3..	120
Tabela 5.4- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD $\Sigma$ -4..	132
Tabela 5.5- Dimensões reais dos protótipos para o cálculo da carga nominal $P_n$ . ....	133
Tabela 5.6- Valores das cargas calculadas, utilizando os valores reais da seção transversal e do comprimento $L_p$ dos protótipos.....	134
Tabela 5.7- Valores das cargas últimas utilizando as prescrições da norma AISI do projeto da norma brasileira, e valores obtidos nos ensaios experimentais. ....	135

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1- Placa sob compressão uniforme.....	7
Figura 2.2- Modo de instabilidade de uma placa sob compressão uniforme.....	7
Figura 2.3- Coeficiente de flambagem para placas simplesmente apoiadas sob compressão uniforme.....	9
Figura 2.4- (a) Modo de flambagem local do perfil sigma com enrijecedor intermediário eficiente. (b) Modo de flambagem local do perfil sigma com enrijecedor intermediário ineficiente.....	10
Figura 2.5- Distribuição de tensões ao longo de uma placa sob compressão uniforme: ... a) antes da carga crítica; b) após ser excedida a carga crítica.....	13
Figura 2.6- Representação esquemática do Método da Largura Efetiva. ... a) Distribuição não linear de tensões ao longo da largura $b$ da placa original; b) Distribuição uniforme de tensões para a placa substituta de largura efetiva $b_e$ . ....	14
Figura 2.7- Diferentes tipos de comportamento a ruína.....	18
Figura 2.8- Modos de instabilidade do perfil sigma: (a) modo local; (b) e (c) modo distorcional; (d) modo global de flexão; (e) modo global por flexo-torção.....	19
Figura 2.9- Modo de flambagem local de uma coluna curta de seção transversal sigma. . ....	21
Figura 2.10- (a) modo local em placas com um enrijecedor intermediário formando ondas simétricas; (b) modo local em placas com um enrijecedor intermediário formando ondas anti-simétricas; (c) modo local em placas com dois enrijecedores intermediários. . ....	21
Figura 2.11- (a) distribuição não uniforme de tensões ao longo de paredes com enrijecedores intermediários; (b) distribuição uniforme de tensões e largura efetiva de paredes com enrijecedor intermediário.....	22
Figura 2.12- (a) modo de flambagem da placa sem enrijecedor intermediário; (b) modo de flambagem da placa com enrijecedor intermediário. ....	23



### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1- Condições de bordo do perfil de seção transversal tipo sigma. ....	25
Figura 3.2- Distribuição das tensões e da largura efetiva em um elemento enrijecido com um e com dois enrijecedores intermediários.....	27
Figura 3.3- Distribuição da largura efetiva em um elemento não enrijecido.....	29
Figura 3.4- Substituição da placa original por uma de espessura equivalente $t_s$ .....	34

### **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1- Esquema de montagem dos ensaios. ....	40
Figura 4.2- Nomenclatura da seção transversal. ....	42
Figura 4.3- Posições nos protótipos de onde foram retirados os corpos de prova.....	47
Figura 4.4- Características geométricas dos corpos de prova à tração.....	48
Figura 4.5- Pontos de medição do comprimento da coluna na seção transversal do perfil, para o controle dimensional. ....	49
Figura 4.6- Esquema geral de montagem dos ensaios. ....	53
Figura 4.7- Detalhe do sistema de apoio composto de rótula e placa de aço. ....	53
Figura 4.8- Esquema de instrumentação para o MOD $\Sigma$ -1A.....	59
Figura 4.9- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -1A e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	61
Figura 4.10- Esquema de instrumentação do protótipo MOD $\Sigma$ -1B. ....	62
Figura 4.11- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -1B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	63
Figura 4.12- Esquema de instrumentação do protótipo MOD $\Sigma$ -1C. ....	64
Figura 4.13- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -1C e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	65
Figura 4.14- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD $\Sigma$ -2.....	66
Figura 4.15- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -2B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	67
Figura 4.16- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD $\Sigma$ -3.....	68
Figura 4.17- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -3A e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	69

Figura 4.18- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD $\Sigma$ -4.....	71
Figura 4.19- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -4A e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	72
Figura 4.20- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -4B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	72
Figura 4.21- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD $\Sigma$ -4C e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.....	73

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo ..... MOD $\Sigma$ -1A. ....	75
Figura 5.2- Deformações nos extensômetros E5 a E10 colados ao longo do comprimento do protótipo MOD $\Sigma$ -1A. ....	76
Figura 5.3- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo ..... MOD $\Sigma$ -1A. ....	77
Figura 5.4- Deformações externas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7 e E9, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1A. ....	79
Figura 5.5- Deformações internas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E6, E8 e E10, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1A. ....	79
Figura 5.6- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo ..... MOD $\Sigma$ -1B.....	80
Figura 5.7- Deformações nos extensômetros E5 a E16, colados ao longo do comprimento do protótipo MOD $\Sigma$ -1B.....	82
Figura 5.8- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo ..... MOD $\Sigma$ -1B.....	83
Figura 5.9- Deformações externas medidas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7, E9, E11, E13, E15 e E16, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1B. ....	84
Figura 5.10- Deformações internas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E6, E8, E10, E12 e E14, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1B.....	84
Figura 5.11- Deslocamento do enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -1B.....	85

Figura 5.12- Deformações nos extensômetros E1 e E2, no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -1C.....	86
Figura 5.13- Deformações nos extensômetros E5 a E10, colados ao longo do comprimento do protótipo MOD $\Sigma$ -1C.....	88
Figura 5.14- Deformações nos extensômetros E3 e E4, no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -1C.....	89
Figura 5.15- Deformações externas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7 e E9, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1C.....	90
Figura 5.16- Deformações internas na região da parede $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E6, E8 e E10, no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -1C.....	91
Figura 5.17- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -1C.....	92
Figura 5.18- Dimensões medidas nos protótipos.....	92
Figura 5.19- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2A. ....	94
Figura 5.20- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2A. ....	95
Figura 5.21- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2A. ....	96
Figura 5.22- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -2A. ....	97
Figura 5.23- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2B.....	99
Figura 5.24- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2B.....	100
Figura 5.25- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2B.....	100
Figura 5.26- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -2B.....	101
Figura 5.27- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2C.....	103
Figura 5.28- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2C.....	104

Figura 5.29- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -2C.....	104
Figura 5.30- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -2C.....	105
Figura 5.31- Valores das deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD $\Sigma$ -3A.....	108
Figura 5.32- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3A. ....	109
Figura 5.33- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3A. ....	109
Figura 5.34- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -3A. ....	110
Figura 5.35- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3B.....	112
Figura 5.36- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3B.....	113
Figura 5.37- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3B.....	113
Figura 5.38- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -3B.....	114
Figura 5.39- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3C.....	116
Figura 5.40- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3C.....	117
Figura 5.41- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -3C.....	117
Figura 5.42- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -3C.....	118
Figura 5.43- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4A. ....	120
Figura 5.44- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4A. ....	121
Figura 5.45- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4A. ....	122

Figura 5.46- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -4A. ....	123
Figura 5.47- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4B.....	125
Figura 5.48- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4B.....	126
Figura 5.49- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4B.....	126
Figura 5.50- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -4B.....	127
Figura 5.51- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4C.....	129
Figura 5.52- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4C.....	130
Figura 5.53- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo .....	
MOD $\Sigma$ -4C.....	130
Figura 5.54- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD $\Sigma$ -4C.....	131

# LISTA DE FOTOS

## CAPÍTULO 4

Foto 4.1– Equipamento utilizado para a aquisição dos dados .....	41
Foto 4.2- Vista de instrumentação ao longo do comprimento do perfil. ....	51
Foto 4.3- Vista geral do corpo de prova MOD $\Sigma$ -1A posicionado no pórtico de ensaio.	54
Foto 4.4- Detalhe do equipamento utilizado para aquisição das leituras dos extensômetros. ....	55

## CAPÍTULO 5

Foto 5.1- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -1A.....	78
Foto 5.2- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -1B.....	81
Foto 5.3- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -1C.....	87
Foto 5.4- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -2A.....	98
Foto 5.5- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -2B.....	102
Foto 5.6- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -2C.....	106
Foto 5.7- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -3A.....	111
Foto 5.8- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -3B.....	115
Foto 5.9- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -3C.....	119
Foto 5.10- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -4A.....	124
Foto 5.11- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -4B.....	128
Foto 5.12- Mecanismo de colapso do perfil MOD $\Sigma$ -4C.....	132

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

A engenharia estrutural procura atender todas as exigências de segurança e desempenho nas construções. A melhor solução de projeto para uma estrutura é aquela que leva em consideração tanto desempenho quanto segurança estruturais, bem como estruturas mais leves e de menor custo final.

Uma das soluções para o atendimento das exigências que a engenharia estrutural impõe hoje consiste em utilizar perfis metálicos de seção transversal compostos de paredes esbeltas e formados por chapas de aço dobradas a frio.

Entre as diversas aplicações possíveis na engenharia civil, podemos citar galpões, silos, estantes industriais, casas populares, estruturas treliçadas planas e espaciais no caso de coberturas, além de outras.

A fabricação de perfis de chapa dobrada não impõe restrições significativas quanto à configuração da seção transversal, o que possibilita haver uma diversidade de formas de seção adequadas para serem aplicadas na construção civil, procurando sempre obter perfis mais leves e com maior resistência. Porém elementos estruturais de chapa dobrada, quando fabricados a partir de chapas finas de aço, estão sujeitos a fenômenos de instabilidade.

Os fenômenos de instabilidade estrutural podem ser locais, como a flambagem local e distorcional que considera a influência do tipo de seção transversal e das paredes que a constituem, e globais como a flambagem por flexão e torção. Além da análise desses fenômenos, deve-se considerar também a interação entre os modos de instabilidade locais e globais nos elementos estruturais compostos de perfis de chapa dobrada.

Diversos autores desenvolveram pesquisas visando avaliar o comportamento de perfis de chapa dobrada. Shafer e Peköz (1998) estudaram os modos de flambagem local e distorcional em perfis de chapa dobrada com múltiplos enrijecedores intermediários. Desmond et al. (1981) por sua vez descreveram o comportamento de perfis de chapa dobrada com um enrijecedor intermediário, sobre compressão e Kwon et

al. (1992), realizaram testes com perfis de chapa dobrada de seção transversal do tipo U enrijecido com um enrijecedor intermediário, apresentando resultados sobre os modos de flambagem local e distorcional.

Este trabalho visa estudar o comportamento de perfis de paredes esbeltas com seção transversal do tipo U enrijecido, chamado de sigma ( $\Sigma$ ) com um enrijecedor intermediário na alma sob compressão centrada, com a finalidade de avaliar a influência do tamanho do enrijecedor intermediário no comportamento e na capacidade de carga do elemento comprimido.

Na análise teórica foram estudadas duas seções transversais: uma com um enrijecedor intermediário e outra com dois enrijecedores intermediários. Essa análise consistiu em avaliar as prescrições pela norma americana LRFD COLD-FORMED STEEL Design Manual - American Iron and Steel Institute AISI/96 assim como pela formulação do projeto da norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (1999), quanto às cargas de flambagem local, flexão e flexo-torção, bem como quanto às cargas últimas, para tamanhos variados de enrijecedores intermediários.

Os resultados obtidos na análise teórica para os perfis com apenas um enrijecedor intermediário foram comparados com os resultados experimentais, atingidos nos ensaios.

Com o objetivo de automatizar as análises teóricas, foi desenvolvida uma rotina de cálculo computacional, utilizando o software MathCad, versão 5 (1994), com base na norma AISI/96 e no projeto da norma brasileira.

O programa experimental consistiu em ensaios de colunas curtas sob carregamento centrado com perfis com seção transversal do tipo U enrijecido, chamado de sigma ( $\Sigma$ ) com um enrijecedor intermediário na alma, agrupados em quatro séries, de acordo com a variação nas dimensões do enrijecedor intermediário e dos flanges. Os ensaios foram realizados no laboratório Prof. Altamiro Tibiriçá Dias, da Escola da Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Através dos resultados experimentais obtidos pôde-se avaliar a eficiência do tamanho do enrijecedor intermediário no modo de colapso da coluna e a influência da flambagem local na resistência das colunas.



No capítulo 2 é apresentada a teoria de placas esbeltas, onde o problema da estabilidade de placas isoladas e das seções compostas de paredes esbeltas é tratado de forma sucinta, seguindo-se de uma apresentação do problema do comportamento pós-crítico até a ruína, onde a busca de soluções simplificadas para esse problema sugere a utilização do Método da Largura Efetiva. É descrito e caracterizado o modo de flambagem local, bem como resumidamente, os modos de flambagem distorcional e global para os perfis de chapa dobrada do tipo sigma ( $\Sigma$ ).

No capítulo 3 são introduzidas as prescrições da norma de projetos “American Iron and Steel Institute, AISI/96” e as prescrições do projeto da norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (1999), para o dimensionamento do perfil de seção transversal sigma com um e dois enrijecedores intermediários.

São apresentadas algumas diferenças do projeto da norma brasileira em relação à norma americana no tratamento das barras submetidas à compressão além de uma avaliação da metodologia de cálculo pela norma americana, no tratamento de perfis com mais de um enrijecedor intermediário.

No capítulo 4 é descrito o programa experimental, englobando a definição das características geométricas da seção dos perfis ensaiados, o processo de fabricação dos perfis, as características mecânicas do aço utilizado, bem como a metodologia empregada para preparar, instrumentar e executar os ensaios dos protótipos. Também são descritas nesse capítulo as imperfeições geométricas medidas em cada protótipo ensaiado.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados experimentais, avaliada a influência das imperfeições geométricas dos protótipos nos resultados dos ensaios e ainda são apresentadas comparações entre os resultados teóricos obtidos pelas formulações da AISI/96 e do projeto da norma brasileira com os resultados experimentais.

No capítulo 6, por fim, são relacionadas as conclusões deste estudo, além de serem feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

No anexo I, ainda, encontra-se listada a rotina de cálculo efetuada no programa MathCad (1994), com base na norma AISI/96 e no projeto da norma brasileira para o cálculo das resistências últimas dos perfis sigma ( $\Sigma$ ), submetidos a carregamento centrado.

## **CAPÍTULO 2**

### **TEORIA DE PLACAS ESBELTAS**

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

Os perfis com paredes esbeltas, quando submetidos à compressão são suscetíveis a flambagem local e para o seu estudo é necessário conhecer o comportamento das placas esbeltas.

As placas esbeltas apresentam comportamento pós-crítico estável, com reserva de resistência que deve ser levada em consideração quando for avaliada a sua resistência última. Esse comportamento pós-crítico é de difícil análise e exige soluções complexas, bem como refinadas no seu tratamento matemático, levando à aplicação de métodos numéricos, como o método das faixas finitas.

A busca de soluções simplificadas para o problema do comportamento pós-crítico, com a finalidade de obter soluções confiáveis e de fácil utilização em prescrições de projeto, conduz à utilização do Método da Largura Efetiva, proposto por von Kármán et al. (1932). Esse método permite a consideração aproximada do fenômeno e é amplamente empregado em normas de projeto.

Neste capítulo será tratada inicialmente a instabilidade de placas isoladas através do Método da Largura Efetiva, tradicionalmente utilizado, e a seguir a instabilidade das placas associadas.

## **2.2. PLACAS ISOLADAS**

Considerando uma placa biapoiada, submetida à compressão uniforme na direção longitudinal figura (2.1), sua equação diferencial de equilíbrio de Saint–Venant (Bulson, 1970) é dada por:

$$D \cdot \left[ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + q_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.1)$$

onde  $w$  é a função de deslocamentos transversais, e  $D$  é denominado rigidez à flexão da placa, dado por:

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

sendo:  $E$  → módulo de elasticidade longitudinal do material;

$t$  → espessura da placa;

$\nu$  → coeficiente de Poisson;

$q_x$  → carga de compressão uniformemente distribuída na placa.

Os deslocamentos transversais são funções de  $x$  e  $y$ , sendo baseados em uma função de deslocamento senoidal. A solução da equação 2.1 pode ser representada, assim pela equação 2.2:

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right) \quad (2.2)$$

onde  $m$  está associado ao número de meias ondas senoidais que se formam no sentido longitudinal (direção  $x$ ) da placa,  $n$  ao número de meias ondas senoidais que se formam no sentido transversal (direção  $y$ ) da placa,  $a$  constitui o comprimento longitudinal da placa, e  $b$  é a sua largura.

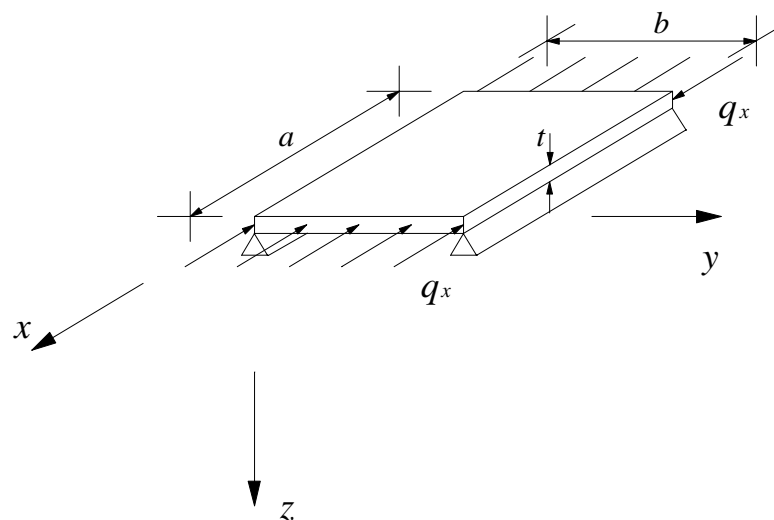


Figura 2.1- Placa sob compressão uniforme.

O modo de instabilidade da placa biapiada da figura (2.1), baseado em uma função senoidal de deslocamento, é apresentado na figura (2.2).

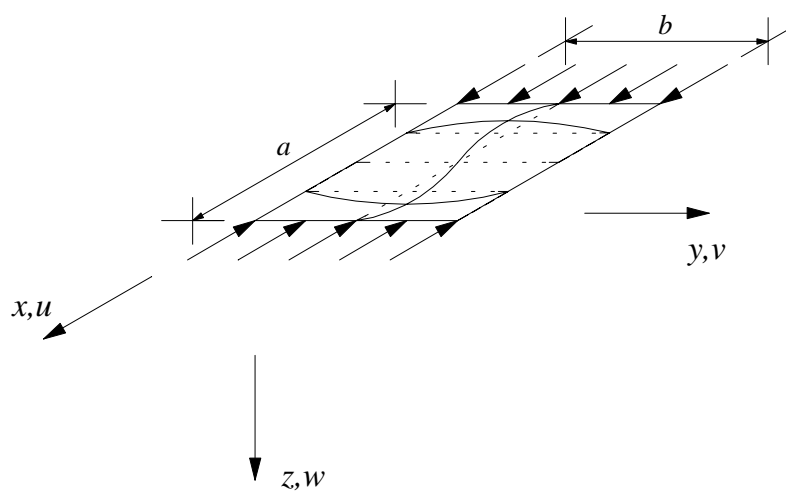


Figura 2.2- Modo de instabilidade de uma placa sob compressão uniforme.

Substituindo a função de deslocamentos  $w$ , dada pela equação 2.2 na equação 2.1, obtém-se para  $n=1$  o menor valor da carga crítica.

$$q_x = \frac{\pi^2 \cdot D}{b^2} \cdot \left( m \cdot \frac{b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \right)^2 \quad (2.3)$$

A expressão da tensão crítica para placas submetidas à compressão é dada pela equação 2.4, a seguir:

$$\sigma_{cr} = \frac{q_x}{t} \quad (2.4)$$

ou ainda

$$\sigma_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.5)$$

onde  $k$  é denominado coeficiente de flambagem de placa e está associado à geometria e a condições de extremidade da placa, sendo expresso por:

$$k = \left( \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \right)^2 \quad (2.6)$$

Adotando soluções teóricas para  $m = 1, 2, 3, \dots$ , para o caso da placa com os quatro bordos simplesmente apoiados (figura 2.1), pode-se representar graficamente a solução para a equação 2.6, figura (2.3).

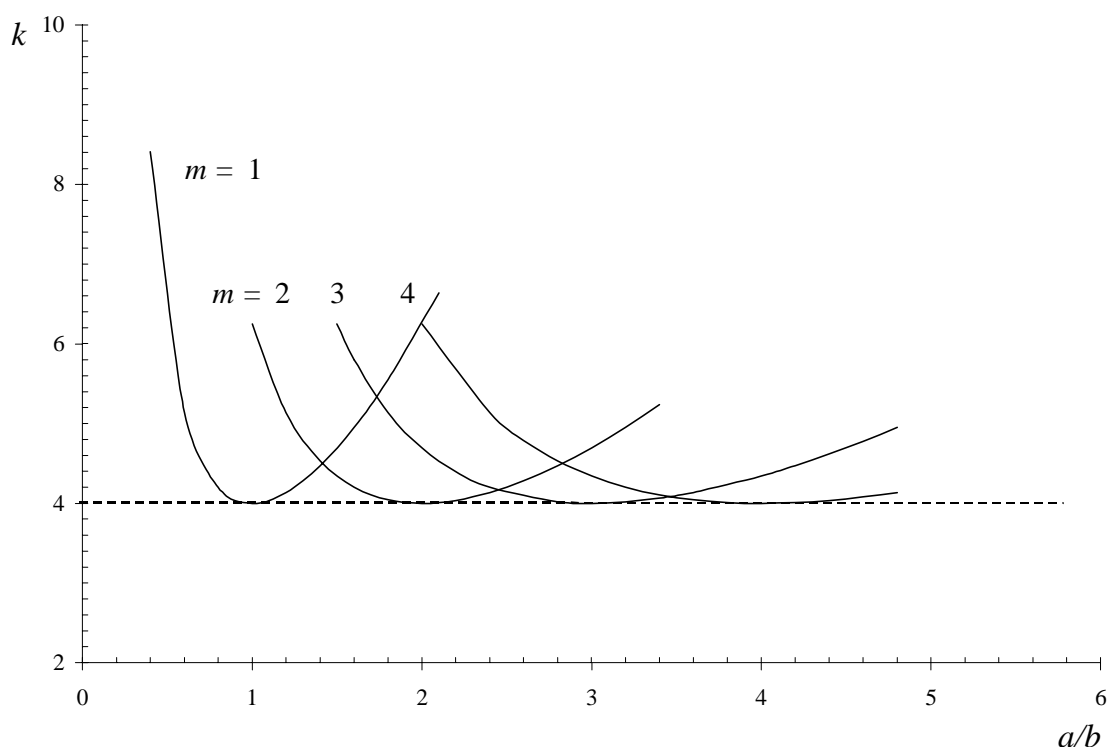


Figura 2.3- Coeficiente de flambagem para placas simplesmente apoiadas sob compressão uniforme (Sarmanho, 1991).

Observa-se que para diferentes modos de flambagem de placa, se adapta diferentes valores da relação geométrica largura e comprimento da placa ( $a/b$ ), sendo que para cada modo de flambagem temos um valor mínimo do coeficiente de flambagem  $k = 4$ , correspondente a um valor inteiro da relação.

Os valores de  $k$  para diferentes condições de extremidade, combinadas com diferentes carregamentos, são tabelados e podem ser encontrados na literatura técnica (Timoshenko e Gere, 1961).

### **2.3. PLACAS ASSOCIADAS**

Os perfis de chapa dobrada podem ser analisados como sendo uma associação de placas esbeltas que, quando submetidas à compressão, podem sofrer o fenômeno da flambagem local, dependendo da esbeltez (relação largura/espessura), análogo àquele encontrado para as placas isoladas.

O cálculo do coeficiente de flambagem  $k$ , para determinação da carga crítica de flambagem da placa, depende da relação entre as dimensões da placa, da geometria e das condições de bordo. Estas condições de bordo são determinadas assumindo-se um engastamento elástico entre as paredes que compõem a seção transversal do perfil, dependendo, portanto, das dimensões das paredes vizinhas.

A solução do problema de autovalor gerado pelo problema de instabilidade de placas esbeltas, cuja solução representa as tensões críticas de flambagem e as formas modais de instabilidade, pode ser encontrada utilizando-se métodos numéricos, sendo muito utilizado o método de faixas finitas conforme apresentado por Hancock (1977).

O modo de flambagem local do perfil sigma com um enrijecedor intermediário, sujeito à compressão uniforme é representado nas figuras (2.4a) e (2.4b).

A figura (2.4 a) apresenta o modo de flambagem local para o perfil com o enrijecedor intermediário eficiente, ou seja, as paredes entre o enrijecedor intermediário se comportam como duas placas independentes. A figura (2.4b) apresenta o modo de flambagem local para o perfil com o enrijecedor intermediário ineficiente, ou seja, mesmo com a presença do enrijecedor as paredes se comportam como uma parede única.

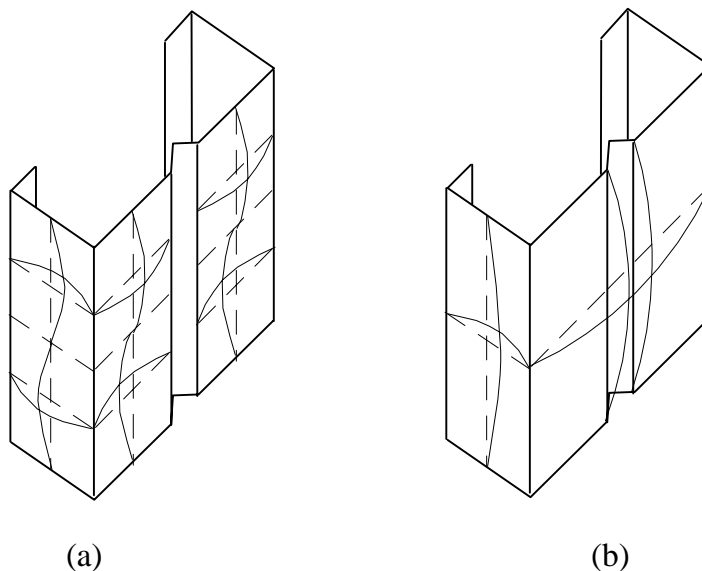


Figura 2.4— (a) Modo de flambagem local do perfil sigma com enrijecedor intermediário eficiente.  
(b) Modo de flambagem local do perfil sigma com enrijecedor intermediário ineficiente.



A deformada que se propaga ao longo do comprimento da peça segue a mesma lei senoidal das placas isoladas, sendo a função de deslocamento  $w$  para cada parede indicada pela equação 2.7:

$$w(x, y) = f(y) \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{s} \quad (2.7)$$

onde  $x$  é o eixo local longitudinal,  $y$  o eixo local transversal, no plano de cada parede, e  $s$  é o comprimento da meia onda que se forma ao longo do eixo  $x$  da parede. A função de interpolação  $f(y)$  constitui em geral uma função polinomial.

Para atender à compatibilidade de deslocamentos é imposta a condição de que os bordos comuns (adjacentes) entre placas vizinhas são impedidos de se deslocar, permitindo a deslocabilidade apenas por rotação, ou seja, as arestas permanecem retas antes e depois da aplicação da carga, permitindo assim ser identificado o modo local, como ilustrado nas figuras (2.4 a) e (2.4 b).

A solução do problema de autovalor, representada pela equação 2.8, onde  $k_o$  e  $k_g$  são as matrizes de rigidez linear e geométrica, respectivamente, e  $u$  é o vetor de deslocamentos, permite determinar os modos de instabilidade e às tensões críticas  $\sigma_{cr}$  correspondentes; assim:

$$[k_o + (k_g) \cdot \sigma] \cdot \{u\} = 0 \quad (2.8)$$

O valor da tensão crítica  $\sigma_{cr}$  pode ser calculado para diferentes valores de  $s$ , por um processo iterativo de sucessivas interpolações polinomiais entre os resultados obtidos, determinando o valor da tensão crítica mínima.

Esse procedimento, quando utilizado para placas isoladas, fornece resultados muito próximos dos obtidos através da Teoria da Elasticidade, apresentados por Timoshenko e Gere (1961).

Para perfis compostos pela associação de placas esbeltas, vários estudos, como os de Batista (1988) e Vazquez (1998), foram desenvolvidos de modo a obter o valor do comprimento de onda, em função do coeficiente de flambagem da seção transversal, ou

seja, considerando todas as placas que a compõem e a influência das paredes vizinhas nas condições de contorno.

No caso dos perfis do tipo sigma, o enrijecedor intermediário possui uma condição de engastamento diferente da introduzida pelo enrijecedor de extremidade. Deve-se avaliar o real coeficiente de flambagem considerando-se as condições de apoio das paredes vizinhas através do Método da Seção Efetiva (Batista, 1988).

## **2.4. COMPORTAMENTO PÓS-CRÍTICO**

As placas esbeltas demonstram um comportamento pós-crítico correspondente a um caminho de equilíbrio estável. Quando as placas são submetidas à compressão longitudinal uniforme, a partir de um certo nível de carregamento, elas apresentam deslocamentos transversais fora de seu plano.

A solução para tal comportamento foi proposta por von Kármán et al. (1932) e é representada pelo sistema de equações diferenciais de equilíbrio, a seguir:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{t}{D} \cdot \left[ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \quad (2.9a)$$

assim como pela equação de compatibilidade:

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = E \cdot \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (2.9b)$$

onde  $F$  é a função de tensão de Airy, a partir da qual podem-se obter as tensões por meio das relações:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad (2.10a)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad (2.10b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad (2.10c)$$

Para solucionar o problema descrito, podem ser utilizados métodos numéricos. Buscando obter soluções mais simples e de aplicação geral que conduzam a resultados confiáveis para o tratamento de placas em estado pós-crítico, o método mais utilizado é o Método da Largura Efetiva (von Kármán et al., 1932).

## **2.5. MÉTODO DA LARGURA EFETIVA**

O Método da Largura Efetiva consiste em reduzir a rigidez da placa perfeita, substituindo a placa original de largura  $b$  por uma placa substituta de largura efetiva  $b_e$ , sendo  $b_e$  menor que  $b$ .

Para uma placa perfeita submetida à compressão axial uniforme, a distribuição de tensões é constante antes de ser atingida a carga crítica de flambagem, como representado na figura (2.5a). Após exceder a carga crítica de flambagem local, há uma redistribuição de tensões internas longitudinais, passando a uma distribuição não uniforme de tensões, como apresentado na figura (2.5b), onde  $\sigma_{máx}$  é a tensão máxima atuante antes da flambagem, e  $\sigma_{cr}$  a tensão crítica.

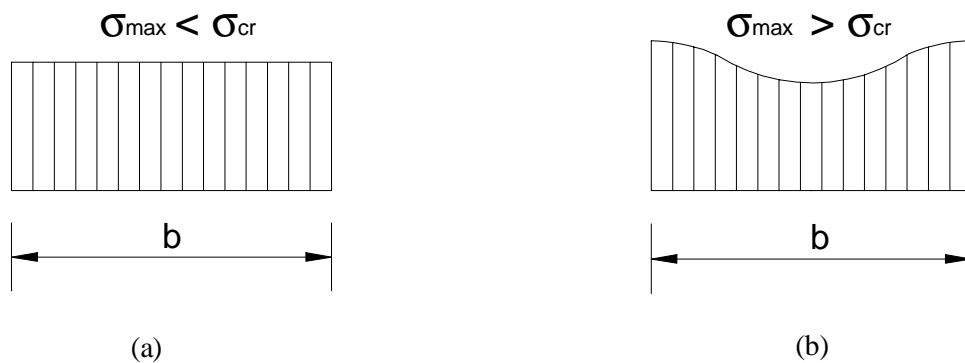


Figura 2.5– Distribuição de tensões ao longo de uma placa sob compressão uniforme:  
a) antes da carga crítica e b) após ser excedida a carga crítica.

Na figura (2.6a) tem-se a distribuição não uniforme de tensões em uma placa bi-apoiada submetida à compressão uniforme, ao longo da largura original  $b$ . Após ser excedida a carga crítica, com valor máximo de tensão dado por  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , supõe-se que a tensão uniforme  $\sigma_e$  à qual a placa substituta de largura efetiva  $b_e$  está submetida, é igual à tensão máxima atuante nos bordos da placa original ( $\sigma_e = \sigma_{m\acute{a}x}$ ), como ilustrado na figura (2.6b), (Sarmanho, 1991).

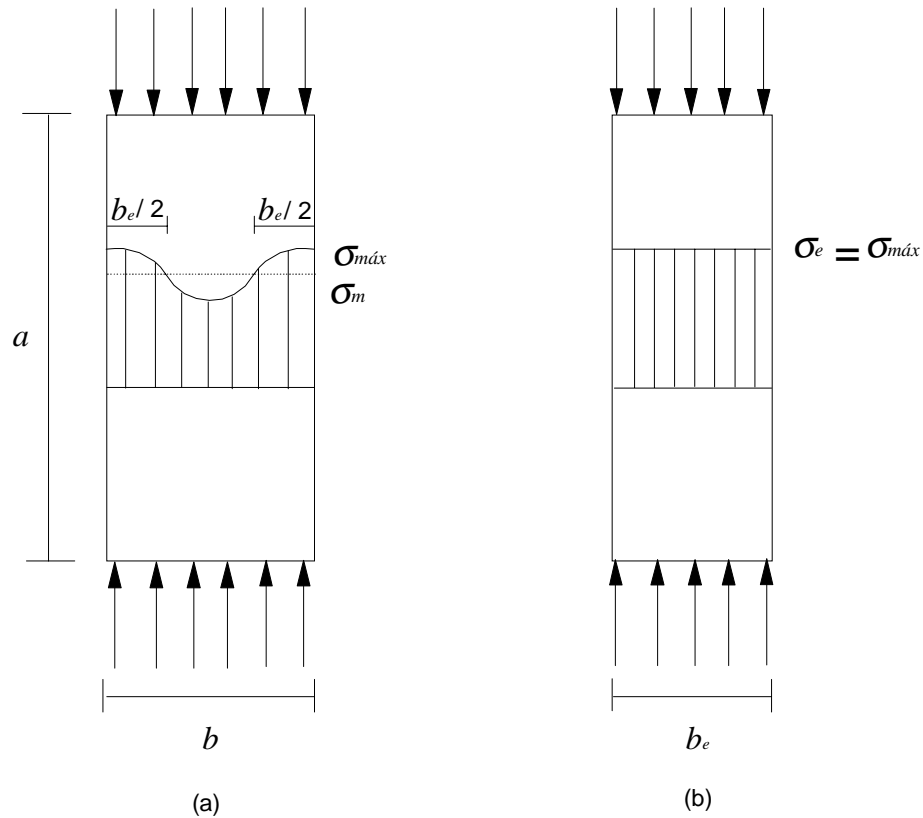


Figura 2.6– Representação esquemática do Método da Largura Efetiva.

- a) Distribuição não linear de tensões ao longo da largura  $b$  da placa original;
- b) Distribuição uniforme de tensões para a placa substituta de largura efetiva  $b_e$ .

A tensão crítica de flambagem local da placa original é escrita na forma:

$$\sigma_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.11)$$

onde:  $k \rightarrow$  coeficiente de flambagem da placa;

$E \rightarrow$  modulo de elasticidade longitudinal do material;

$t \rightarrow$  espessura da placa;

$\nu \rightarrow$  coeficiente de Poisson;

$b \rightarrow$  largura da placa original.

A tensão crítica da placa substituta de largura efetiva  $b_e$  após a flambagem é igual a  $\sigma_e$ , dada por:

$$\sigma_e = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b_e} \right)^2 \quad (2.12)$$

onde  $b_e$  é a largura efetiva da placa substituta.

Igualando as equações 2.11 e 2.12, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}} \quad (2.13)$$

Define-se  $\lambda_{pd}$  como:

$$\lambda_{pd} = \sqrt{\frac{\sigma_e}{\sigma_{cr}}} \quad (2.14)$$

logo, a relação dada pela equação 2.13 pode ser escrita na forma:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_{pd}} \quad (2.15)$$

No estado limite último admite-se que a tensão máxima  $\sigma_e$  atinja a tensão de escoamento do material  $f_y$ , como critério de ruína da placa. Essa hipótese considera que placas esbeltas apresentam pouca reserva de resistência plástica.

Dessa forma a equação 2.13 pode ser escrita como:

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad (2.16)$$

Nesse caso, define-se a grandeza  $\lambda_p$  (que é a esbeltez relativa da placa no estado limite último), dada por:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (2.17)$$

Assim, no estado limite último de colapso tem-se a expressão a seguir, que é válida para a análise da resistência de placas esbeltas e perfeitas, comprimidas, conhecida como curva de von Kármán:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \quad (2.18)$$

Sabe-se que os perfis de chapa dobrada possuem tanto imperfeições geométricas quanto tensões residuais que estão relacionadas ao processo de fabricação e que afetam o seu comportamento e sua carga última.

Diversas curvas foram desenvolvidas com o auxílio de estudos teóricos e experimentais a partir da curva original de von Kármán para considerar as imperfeições. Na tabela (2.1) estão relacionadas algumas dessas curvas e seus autores, (Sarmanho, 1991).

Tabela 2.1- Curvas propostas para o cálculo da largura efetiva.

Autor	$b_e / b$
BOX (1883)	$0,725 / \lambda_p^{0,5}$
KÁRMÁN	$1 / \lambda_p$
CHILVER	$0,725 / \lambda_p^{0,2}$
GERALD	$0,824 / \lambda_p^{0,425}$
FOLKNER	$1,05 [ 1 - (0,26) / \lambda_p ] / \lambda_p$
WINTER	$[ 1 - (0,22) / \lambda_p ] / \lambda_p$

Entre as várias formulações propostas, a equação 2.19 apresentada por Winter (1947) constitui a de mais larga aceitação, além de ser amplamente utilizada em normas de projetos:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \cdot \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \quad (2.19)$$

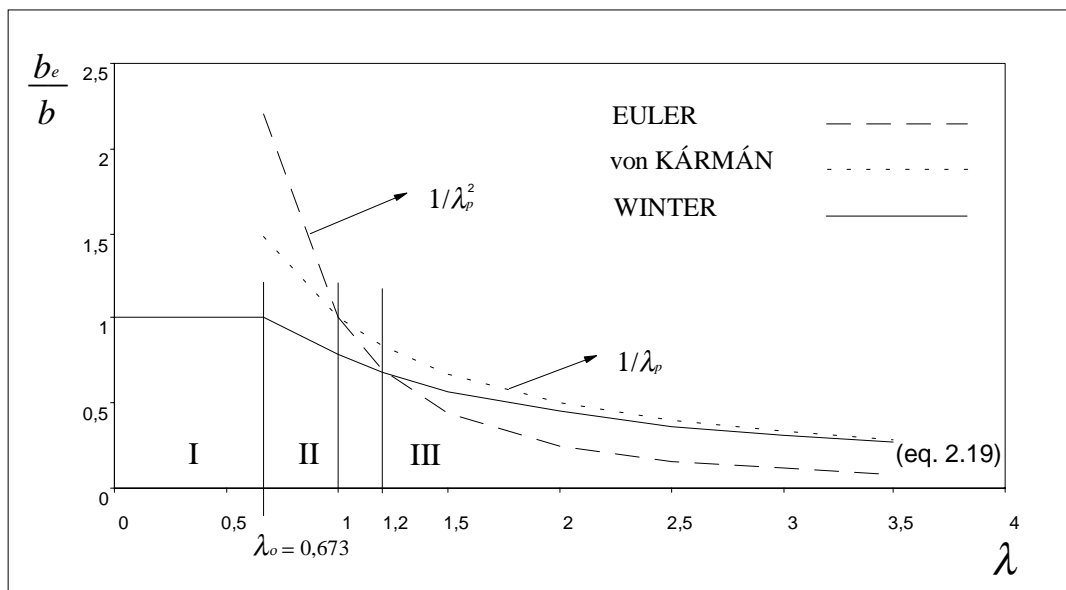
sendo a esbeltez relativa  $\lambda_p$  da placa dada por:

$$\lambda_p = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.20)$$

onde  $k$  é o coeficiente de flambagem da placa.

O gráfico da figura (2.7) apresenta a variação da largura efetiva em função do índice de esbeltez relativo, ilustrando os diferentes comportamentos de placas esbeltas sob carregamento de compressão uniforme.

São apresentadas três regiões distintas que se classificam de acordo com o índice de esbeltez relativa da placa (Batista, 1988).



Através da equação de Winter, verifica-se que a esbeltez relativa  $\lambda_o = 0,673$  corresponde a  $b_e/b = 1$ . Alguns comentários podem ser feitos sobre essas regiões.

Na região I, com  $0 < \lambda_p < \lambda_o$ , a placa não é afetada por fenômenos de instabilidade, como a flambagem local, devido ao fato de serem placas espessas cuja relação largura/ espessura é pequena. A placa será levada ao colapso por plastificação.

Na região II, com  $\lambda_o < \lambda_p < 1,2$ , a placa sofre o fenômeno de instabilidade elasto-plástica e apresenta deslocamentos moderados fora de seu plano.

Na região III, com  $\lambda_p > 1,2$ , a placa é afetada pelo fenômeno de instabilidade elástica, associado a grandes deslocamentos fora de seu plano.

## 2.6. ELEMENTOS ENRIJECIDOS NA ALMA

Os perfis sigma podem apresentar modos de flambagem local, distorcional, por flexão ou por torção, bem como interação entre esses modos. Considerando a estabilidade das barras comprimidas formadas por perfis de chapa dobrada, com relação aos modos locais e globais, as configurações desses modos são representadas na figura (2.8).



As figuras (2.8a) e (2.8b) ilustram os modos de flambagem local que é caracterizado pela ausência de deslocamentos das arestas comuns. As figuras (2.8c) e (2.8d) apresentam o modo de flambagem distorcional que se caracteriza pela ocorrência de rotação relativa entre as paredes da seção.

Segundo Schafer e Peköz (1998), esse modo de flambagem é mais freqüente em seções de aço de alta resistência e verificado em ensaios de colunas longas onde as tensões críticas são menores que as locais, ocorrendo como o primeiro modo de flambagem.

Seções abertas de perfis de paredes esbeltas, quando apresentam apenas um eixo de simetria, como é o caso do perfil em estudo, são suscetíveis à flambagem global por flexão ou flexo-torção. Os modos de flambagem global por flexão ou flexo-torção, entre outros são relacionados com o tipo e a esbeltez da seção transversal do perfil.

As figuras (2.8e) e (2.8f) indicam os modos de flambagem global de flexão e flexo-torção, respectivamente.

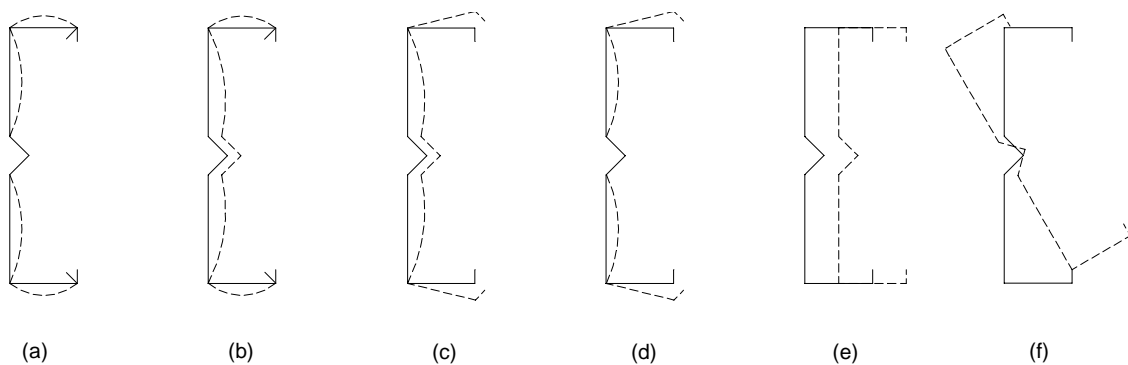


Figura 2.8– Modos de instabilidade do perfil sigma: (a) e (b) modos locais; (c) e (d) modos distorcionais; (e) modo global de flexão; (f) modo global por flexo-torção.

Para placas sujeitas a flambagem local uma alternativa para minimizar seus efeitos, bem como aumentar a capacidade de carga é o uso de enrijecedores, como os intermediários, tornando os elementos multiplamente reforçados. Estes podem ser entre uma alma e um enrijecedor de extremidade ou entre almas, como no caso dos perfis sigma.

Após a flambagem local, o comportamento pós-crítico é caracterizado por uma redistribuição das tensões de flexão que pode ser considerada através do Método da Largura Efetiva, descrito no item 2.5.

Algumas observações podem ser feitas sobre o modo de flambagem local, com base em Desmond et al. (1981) e Schafer e Peköz (1998):

- a) No caso de seções transversais constituídas por uma associação de placas esbeltas, como o caso dos perfis de chapa dobrada, desde que as arestas permaneçam retas após a flambagem local e os ângulos entre as paredes não se alterem, as paredes do perfil flambam segundo uma sucessão de meias ondas senoidais de comprimentos iguais  $s$ , como ilustrado na figura (2.9) (Schafer e Peköz, 1998);
- b) Os enrijecedores não defletem com a placa, podendo o modo local formar ondas simétricas ou anti-simétricas, como apresentado nas figuras (2.10a), (2.10b) e (2.10c).

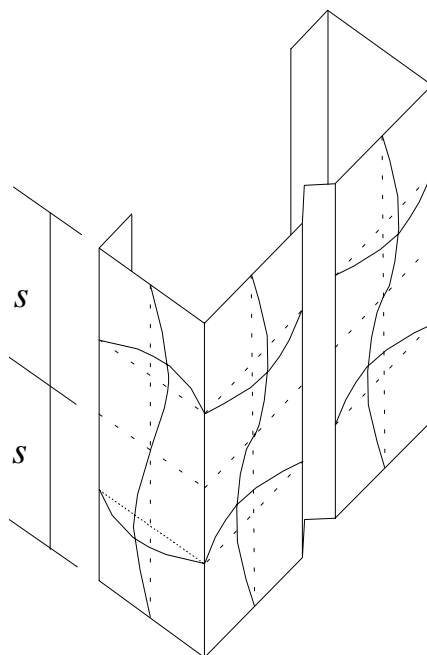


Figura 2.9– Modo de flambagem local de uma coluna curta de seção transversal sigma.

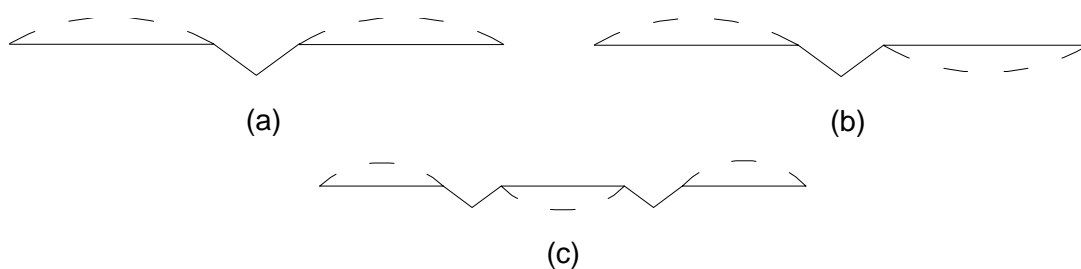


Figura 2.10- (a) modo local em placas com um enrijecedor intermediário formando ondas simétricas; (b) modo local em placas com um enrijecedor intermediário formando ondas anti-simétricas; (c) modo local em placas com dois enrijecedores intermediários.

Na avaliação do modo de flambagem local em placas com um enrijecedor intermediário formando ondas simétricas, tanto a AISI/96 quanto Schafer e Peköz (1998) consideram que os elementos entre os enrijecedores constituem placas isoladas e que cada placa possui sua própria largura efetiva, com a correspondente distribuição de tensão, como pode ser observado nas figuras (2.11a) e (2.11b)

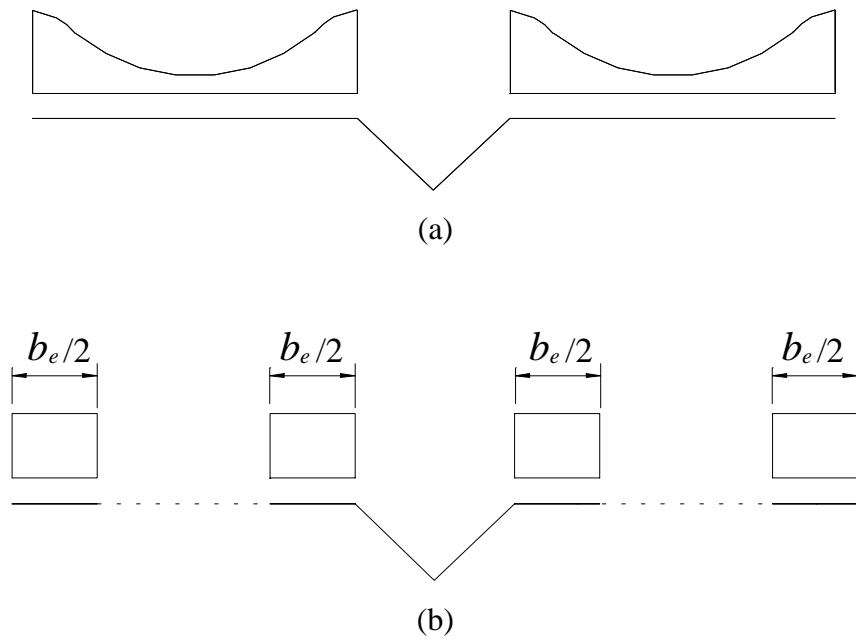


Figura 2.11– (a) distribuição não uniforme de tensões ao longo de paredes com enrijecedores intermediários; (b) distribuição uniforme de tensões e largura efetiva de paredes com enrijecedor intermediário.

A tensão crítica de flambagem local da placa com enrijecedor intermediário é superior àquela da placa sem este enrijecedor. A figura (2.12a) ilustra o modo local de flambagem da placa sem enrijecedor intermediário, enquanto a figura (2.12b) apresenta o modo local com enrijecedor intermediário.

Dependendo do número de enrijecedores (Desmond et al., 1981), os subelementos, ou seja, a porção adjacente entre enrijecedores intermediários, comportam-se como uma placa biapoiada e possuem sua própria onda de deslocamento.

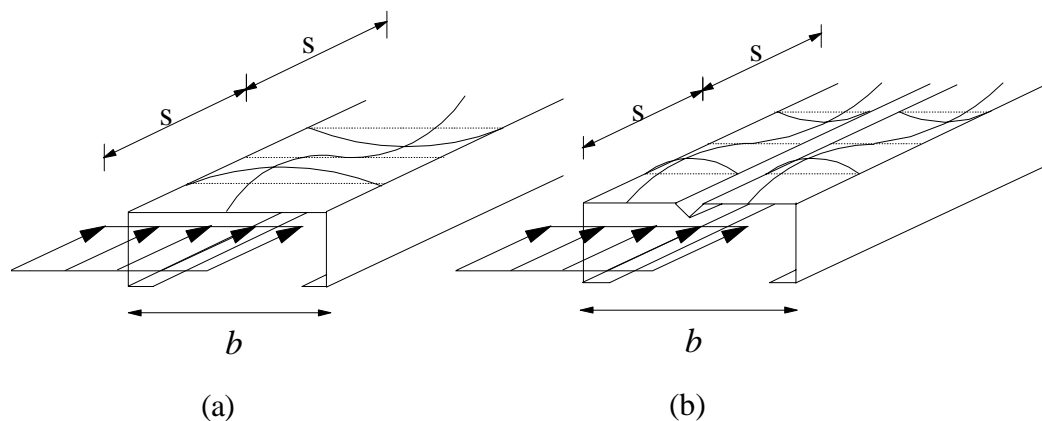


Figura 2.12– (a) modo de flambagem da placa sem enrijecedor intermediário;  
 (b) modo de flambagem da placa com enrijecedor intermediário.

No entanto, para que essa consideração seja feita, é necessário que o enrijecedor intermediário seja suficientemente eficiente de modo a garantir que a placa com enrijecimento intermediário possa ser analisada como duas placas simplesmente apoiadas, conforme descrito no item 2.3.

## **CAPÍTULO 3**

### **PRESCRIÇÕES DE NORMA**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

Existem várias normas de projetos para o cálculo de elementos de aço de chapa dobrada, como: EUROCODE 3, Design of steel structures - parte 1.3, Cold-formed thin gauge members and sheetings (1992), o CAN/CSA-S136-M89 – Cold-formed steel structural members – Canadian Standards Association (1991), além da norma australiana AS1538/88 – Cold-formed steel structural – Standards Association of Australia (1988). No Brasil, como a norma brasileira encontra-se ainda em fase de elaboração, a norma mais utilizada é a americana, editada pelo “American Iron and Steel Institute, AISI”.

O presente capítulo apresenta as prescrições da norma americana de projeto “Cold-Formed Steel Design Manual, LRFD Method – 1996 Edition” editada pelo AISI, para o cálculo da resistência de elementos estruturais sob compressão e de seção transversal sigma com enrijecedores intermediários e de extremidade.

Na rotina de cálculo desenvolvida neste trabalho, no qual se utilizou o programa matemático MathCad, versão 5 (1994), foram consideradas as prescrições para elementos enrijecidos com um e com dois enrijecedores intermediários.

Neste capítulo, serão apresentadas também as prescrições de projeto da norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (1999), para o cálculo de perfis de seção transversal sigma com um e com dois enrijecedores intermediários. Uma análise entre as diferenças do projeto da norma brasileira em relação à norma americana e ainda uma avaliação da metodologia de cálculo pela norma americana de perfis de seção transversal sigma com mais de um enrijecedor intermediário.

### **3.2. PRESCRIÇÕES DA NORMA AMERICANA AISI/96 PARA O CÁLCULO DO ELEMENTO ESTRUTURAL COLUNA**

Os conceitos e as equações utilizados para o cálculo de elementos do tipo coluna de seção transversal U com enrijecedores de extremidade e intermediários são apresentados a seguir de acordo com a nomenclatura utilizada na AISI:

- 1 – Flambagem Local;
- 2 – Flambagem Global;
- 3 – Coluna.

#### **3.2.1. Flambagem Local**

Na análise da flambagem local, a norma emprega o Método da Largura Efetiva descrito no capítulo 2. Elementos de placas, enrijecidos ou não, quando submetidos a esforços de compressão têm a sua tensão crítica de flambagem local dada pela equação 2.11.

A figura (3.1) ilustra a caracterização utilizada para descrever as condições de contorno das paredes.

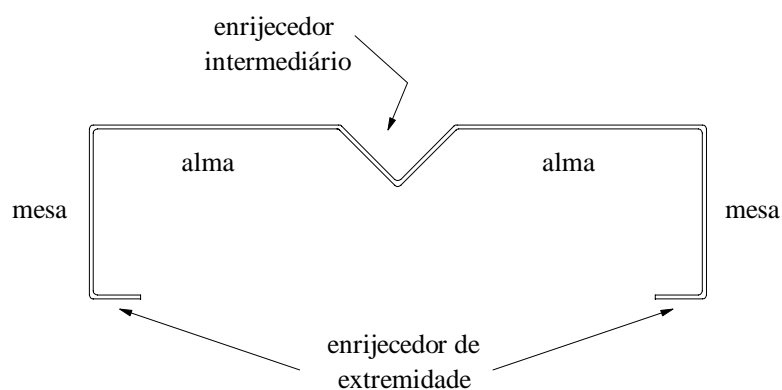


Figura 3.1- Condições de bordo do perfil de seção transversal tipo sigma.

As paredes correspondentes ao enrijecedor intermediário, à alma e às mesas são analisadas como placas planas comprimidas, com duas bordas paralelas ao sentido longitudinal da barra, enrijecidas por outros elementos de placa. As paredes que correspondem aos enrijecedores de extremidade são placas planas comprimidas, enrijecidas em um dos lados por outro elemento de placa e tendo lado oposto livre.

O valor de  $k$ , coeficiente de flambagem, é determinado segundo os casos:

- Elementos enrijecidos:

$$k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi)^3 + 2 \cdot (1 - \psi) \quad (3.1)$$

onde

$$\psi = \frac{f_2}{f_1} \quad (3.2)$$

sendo  $f_1$  e  $f_2$  as tensões presentes nas extremidades da placa e calculadas com base na seção efetiva do perfil. A tensão  $f_1$  é de compressão, enquanto a tensão  $f_2$  poderá ser de compressão ou de tração. Para o caso de compressão uniforme, como ocorre neste trabalho,  $f_1 = f_2$ .

- Elementos não enrijecidos:

$$k = 0,43 \quad (3.3)$$

No presente estudo utiliza-se:

$k = 4$  (paredes correspondentes ao enrijecedor intermediário, à alma e às mesas – apoiada e apoiada), pois  $f_1 = f_2$ , ou seja, a tensão de compressão é uniforme em toda a placa;



$k = 0,43$  (paredes correspondentes aos enrijecedores de extremidade – apoiada e livre).

A figura (3.2) apresenta as tensões  $f_1$  e  $f_2$ , bem como a distribuição da largura efetiva nas extremidades da placa:

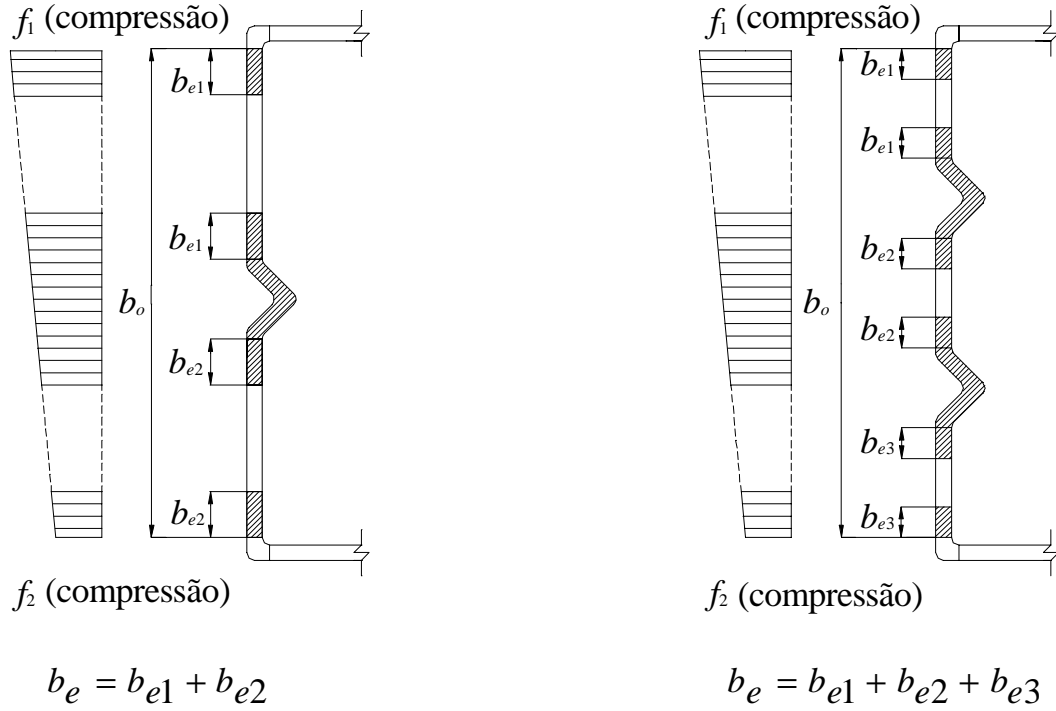


Figura 3.2– Distribuição das tensões e da largura efetiva em um elemento enrijecido com um e com dois enrijecedores intermediários.

Para a determinar a resistência última de placas esbeltas sob compressão uniforme, é utilizada a equação de Winter (equação 2.19). Esta equação, escrita em função da razão  $\sigma_{cr}$  (tensão crítica) sob  $f_{max}$ , (tensão máxima), assume a forma:

$$\frac{b_e}{w} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_{max}}} \cdot \left( 1 - 0,22 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_{max}}} \right) \quad (3.4)$$

sendo que  $f_{max} = f_y$  (tensão de escoamento) no estado limite último, considerando-se a ruína.

A largura efetiva  $b_e$  do elemento de placa é dada por:

$$b_e = \rho \cdot w \quad \text{para } \lambda > 0,673 \quad (3.5)$$

$$b_e = w \quad \text{para } \lambda \leq 0,673 \quad (3.6)$$

onde  $w$  é a largura do trecho reto das paredes, e  $\rho$  é o fator de redução, dado por:

$$\rho = \frac{1}{\lambda} \cdot \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda} \right) \quad (3.7)$$

onde  $\lambda$  é o fator de esbeltez relativa da placa, assim expresso:

$$\lambda = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (3.8)$$

A largura efetiva é dividida em  $b_{e1}$  e  $b_{e2}$ , indicados por:

$$b_{e1} = \frac{b_e}{(3-\psi)} \quad (3.9)$$

$$b_{e2} = b_e - b_{e1} \quad \text{para } \psi > -0,236 \quad (3.10)$$

$$b_{e2} = \frac{b_e}{2} \leq (b_e - b_{e1}) \quad \text{para } \psi \leq -0,236 \quad (3.11)$$

Neste estudo  $f_1 = f_2$ , logo  $\psi = 1$ , assim as larguras efetivas  $b_{e1}$  e  $b_{e2}$  são dadas por:

$$b_{e1} = \frac{b_e}{2} \quad (3.12)$$

$$b_{e2} = \frac{b_e}{2} \quad (3.13)$$

Para elementos não enrijecidos, a norma determina que toda a largura efetiva,  $b_e$ , da região comprimida seja posicionada o mais próximo possível da extremidade apoiada, como apreseto a figura (3.3), de modo que:

$$b_{e1} = b_e \quad (3.14)$$

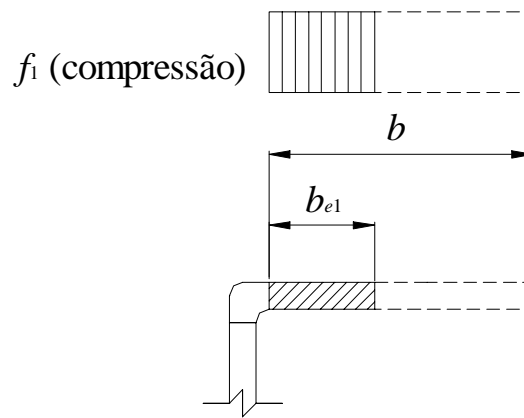


Figura 3.3– Distribuição da largura efetiva em um elemento não enrijecido.

Na determinação da resistência última das placas sob compressão uniforme, a AISI apresenta as seguintes equações:

$$P_u = A_e \cdot f_y \quad (3.15)$$

$$A_e = t \cdot \sum_{i=1}^n b_{ei} + A_c \quad (3.16)$$

onde:  $A_e$  → área efetiva da seção transversal;

$A_c$  → área dos cantos dobrados da seção transversal;

$n$  → número de paredes da seção.

### **3.2.2. Flambagem Global**

A tensão crítica de flambagem elástica  $F_e$ , para elementos monossimétricos submetidos à compressão uniforme, será o menor valor entre as tensões críticas de flambagem elástica por flexão e por flexo-torção, apresentadas nas seguintes equações:

- Flambagem por flexão:

$$F_e = \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left( \frac{K_y \cdot L}{r_y} \right)^2} \quad (3.17)$$

- Flambagem por flexo-torção:

$$F_e = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ (\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4 \cdot \beta \cdot \sigma_{ex} \cdot \sigma_t} \right] \quad (3.18)$$

onde:

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left( \frac{K_x \cdot L}{r_x} \right)^2} \quad (3.19)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left( G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} \right) \quad (3.20)$$

$$\beta = 1 - \left( \frac{x_o}{r_o} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad (3.22)$$

onde:  $E$  e  $G$  → são os módulos de elasticidade longitudinal e transversal do material;  
 $L$  → comprimento da coluna;  
 $r_x$  e  $r_y$  → raios de giração em torno dos eixos  $x$  e  $y$ ;  
 $J$  → constante de torção de Saint Venant da seção transversal;  
 $C_w$  → constante de empenamento da seção transversal;  
 $A$  → área total da seção transversal do perfil;  
 $r_o$  → raio polar de giração;  
 $x_o$  → distância entre centro de cisalhamento e o centro de gravidade.

Sendo  $K$  (fator de comprimento efetivo) avaliado para a influência da restrição contra a rotação e a translação existentes nas extremidades da coluna sob carregamento.

A carga crítica de flambagem elástica  $P_{cr}$  é dada por:

$$P_{cr} = A \cdot F_e \quad (3.23)$$

onde:  $A$  → área total da seção transversal do perfil;  
 $F_e$  → tensão crítica de flambagem elástica.

### **3.2.3. Coluna**

Na avaliação de colunas sobre carregamento centrado, com carga axial passando pelo centro de gravidade efetivo da seção transversal, o valor da carga nominal resistente  $P_n$  é assim expresso:

$$P_n = A_e \cdot F_n \quad (3.24)$$

onde:  $A_e$  → área efetiva da seção transversal;  
 $F_n$  → tensão crítica, obtida através da curva de flambagem e indicada por:

$$F_n = f_y \cdot (0,658^{\lambda_c^2}) \quad \text{para } \lambda_c \leq 1,5 \quad (3.25)$$

$$F_n = f_y \cdot \left( \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) \quad \text{para } \lambda_c > 1,5 \quad (3.26)$$

$\lambda_c$  é o fator de esbeltez da coluna dado por

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} \quad (3.27)$$

### **3.3.PRESCRIÇÕES DE CÁLCULO PARA PERFIS DE SEÇÃO TRANSVERSAL SIGMA COM UM E COM VÁRIOS ENRIJECEDORES INTERMEDIÁRIOS – AISI/96.**

Para o cálculo da largura efetiva de elementos estruturais sob compressão uniforme com um ou dois enrijecedores intermediários na alma, tem-se:

#### **- Elementos enrijecidos com um enrijecedor intermediário**

É usada a relação da largura total da alma comprimida desconsiderando as extremidades curvas,  $b_o$ , pela espessura  $t$  do perfil ( $b_o/t$ ), com o objetivo de separar a avaliação em três casos que serão apresentados a seguir. Para cada caso é definido um momento de inércia adequado de modo que o subelemento de placa se comportará como um elemento enrijecido.

Com base no momento de inércia da seção total do enrijecedor,  $I_s$ , e em um momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de bordo  $I_a$  da placa, o coeficiente de flambagem  $k$  é modificado ou não. Adicionalmente, uma redução da área do enrijecedor,  $A_s$ , é calculada, visando determinar a resistência da seção.

- Determinação da resistência:

sendo o limite de esbeltez para a efetividade do enrijecedor  $S$  dado por:

$$S = 1,28 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3.28)$$

$b_o$  dimensão definida na figura (3.2)

tem-se:

a) caso I: para  $\frac{b_o}{t} \leq S$

$I_a = 0$  Não haverá necessidade de enrijecedor intermediário

$$b_e = w \quad (3.29)$$

$$A_s = A'_s \quad (3.30)$$

Onde  $A'_s$  é a área efetiva do enrijecedor;

b) caso II: para  $S < \frac{b_o}{t} \leq 3 \cdot S$

$$\frac{I_a}{t^4} = \left[ 50 \cdot \left( \frac{b_o}{t} \right) / S \right] - 50 \quad (3.31)$$

$b_e$  é calculado de acordo com o item 3.2.1 deste capítulo;

$$k = 3 \cdot \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^{1/2} + 1 \leq 4 \quad (3.32)$$

$$A_s = A'_s \cdot \left( \frac{I_s}{I_a} \right) \leq A'_s \quad (3.33)$$

c) caso III: para  $\frac{b_o}{t} \geq 3 \cdot S$

$$\frac{I_a}{t^4} = \left[ 128 \cdot \left( \frac{b_o}{t} \right) / S \right] - 285 \quad (3.34)$$

$b_e$  é calculado de acordo com o item 3.2.1 deste capítulo.

$$k = 3 \cdot \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^{1/3} + 1 \leq 4 \quad (3.35)$$

$$A_s = A'_s \cdot \left( \frac{I_s}{I_a} \right) \leq A'_s \quad (3.36)$$

### - Elementos enrijecidos com mais de um enrijecedor intermediário

A primeira etapa para esse procedimento é determinar o momento de inércia,  $I_s$ , real do enrijecedor e compará-lo com o momento de inércia mínimo,  $I_{min}$ , dado a seguir. Esse último momento considera a relação largura/espessura entre enrijecedores, o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento do material:

$$I_{min} = 3,66 \cdot t^4 \cdot \sqrt{\left(\frac{w}{t}\right)^2 - \frac{(0,136 \cdot E)}{f_y}} \geq 18,4 \cdot t^4 \quad (3.37)$$

Se  $I_s < I_{min}$ , os enrijecedores são ignorados. Já se  $I_s > I_{min}$ , a largura do subelemento  $w$  é comparada com a largura efetiva do subelemento  $b_e$ . Caso o comprimento  $w$ , das almas entre os enrijecedores intermediários é tal que o subelemento  $b_e < w$ , somente dois enrijecedores intermediários serão considerados efetivos.

Se  $b_e = w$ , todos os enrijecedores serão considerados efetivos. Para efeito de cálculo da carga de flambagem local, os enrijecedores intermediários serão substituídos por uma placa com espessura equivalente  $t_s$ , como apresentado na figura (3.4).

A espessura equivalente é determinada de modo que se tenha o mesmo momento de inércia na direção transversal que a placa original com enrijecedor intermediário.

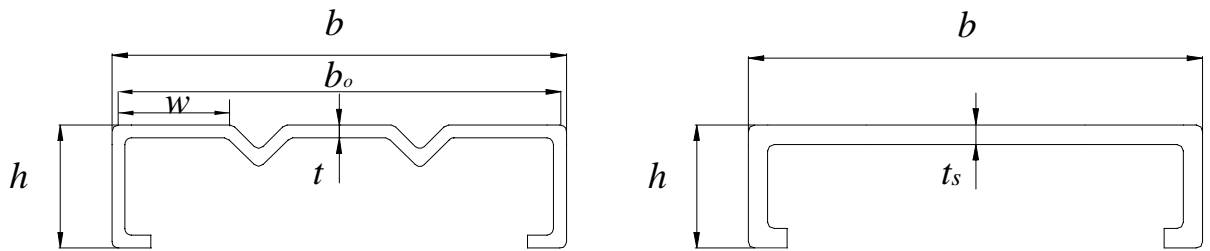


Figura 3.4– Substituição da placa original por uma de espessura equivalente  $t_s$ .

A espessura  $t_s$  é dada por:

$$t_s = \sqrt[3]{12 \cdot I_{sf} / b_o} \quad (3.38)$$



onde  $b_o$  é a largura total da alma comprimida desconsiderando as extremidades curvas e  $I_{sf}$  é o momento de inércia da seção bruta do elemento com enrijecedores intermediários (incluindo os enrijecedores intermediários), em relação ao eixo principal de inércia da seção completa.

### **3.4. TEXTO BASE DA NORMA BRASILEIRA**

O texto base da norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio foi elaborado de maneira a ser o mais compatível possível com as demais normas brasileiras de projetos e execução de estruturas.

A norma brasileira foi baseada no Método dos Estados Limites e estabelece os princípios gerais para o dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio por chapas ou tiras, conectados por parafusos ou soldas e destinados a estruturas de edifícios.

Na sua elaboração, foram utilizados procedimentos adotados também em outras normas, tais como a norma americana do AISI/96, muito empregada no Brasil, o EUROCODE 3/93 – parte 1.3, além da norma australiana AS1538/88.

#### **3.4.1. Prescrições para Perfis de Seção Transversal Sigma com Um e com Múltiplos Enrijecedores Intermediários**

A norma brasileira revela algumas diferenças na forma de apresentar a avaliação de perfis de seção transversal sigma com um enrijecedor intermediário, em relação à norma americana do AISI.

No cálculo de perfis de chapa dobrada do tipo sigma com um enrijecedor intermediário, considera-se a redução de sua resistência provocada pela flambagem local. Para isso calculam-se as larguras efetivas do elemento e do enrijecedor, como é descrito no AISI.

Para o caso do elemento com um enrijecedor intermediário na alma, pode ser verificado que a determinação de  $k$  (coeficiente de flambagem local) e  $A_s$  (área reduzida do enrijecedor) não se modifica na norma brasileira, em comparação com a norma americana do AISI.

Observam-se algumas diferenças entre o texto base da norma brasileira e a norma do AISI, na forma de apresentação de alguns parâmetros como o  $I_a$  (momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário), o qual na norma brasileira é descrito em função de  $\lambda_{po}$ , como se vê na equação (3.39):

$$\lambda_{po} = (b_o/t) / [1,9 (E/\sigma)^{0,5}] \quad (3.39)$$

A equação (3.39) é equivalente à expressão do fator de esbeltez  $S$  (equação 3.28) do AISI, multiplicada pela relação  $b_o/t$ .

Para a seção com dois ou mais enrijecedores intermediários uniformemente comprimidos, a norma brasileira utilizou a mesma forma de determinação da norma americana, que despreza os enrijecedores intermediários, a menos que eles possuam um momento de inércia  $I_s$ , da seção total do enrijecedor em relação ao seu eixo principal paralelo ao elemento a ser enrijecido, maior ou igual ao momento de inércia mínimo, sendo  $I_{min}$  dado pela equação (3.37).

As exigências que a norma americana propõe, no tocante ao cálculo de perfis com dois enrijecedores intermediários, foram utilizadas também no texto base da norma brasileira.

Outro aspecto de diferenciação entre a norma brasileira e a norma americana, e de relevância neste trabalho, é o cálculo de barras submetidas à compressão. O texto base da norma brasileira determina que a força normal de compressão resistente de cálculo representada por  $N_{c,Rd}$  é o menor valor dentre os calculados pela flambagem por flexão ou flambagem por torção ou por flexo-torção e ou flambagem por distorção da seção transversal.

São apresentadas a seguir, de acordo com a nomenclatura adotada no texto base da norma brasileira, as equações que determinam a força normal de compressão de cálculo.

#### 3.4.1.1. Flambagem por flexão, por torção ou flexo-torção

A norma brasileira determina que a força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ , deve ser calculada considerando-se a curva apropriada de resistência à compressão, de acordo com o tipo de seção transversal e o eixo de flambagem, sendo dada pela seguinte equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\rho \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1 \quad (3.40)$$

onde  $\rho$  é o fator de redução da capacidade da barra devido à flambagem dado por:

$$\rho = 1/[\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}] \leq 1,0 \quad (3.41)$$

sendo  $\beta$  dado por:

$$\beta = 0,5[1 + \alpha(\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2] \quad (3.42)$$

$\alpha$  é o fator de imperfeição inicial, cujos valores variam segundo o tipo de seção e o eixo de flambagem. Os valores de  $\alpha$  para cada curva são dados a seguir:

curva a:  $\alpha = 0,21$

curva b:  $\alpha = 0,34$

curva c:  $\alpha = 0,49$

$\lambda_o$ , nesse caso, é o índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas, expresso por:

$$\lambda_o = [A_{ef} f_y / N_e]^{0,5} \quad (3.43)$$

onde:  $A_{ef}$  → área efetiva da seção transversal, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando  $\sigma = \rho \cdot f_y$ ;

$N_e$  é a força normal crítica de flambagem elástica da barra, que para elementos monossimétricos será o menor valor entre as tensões críticas de flambagem elástica por flexão e ou por flexo-torção, calculadas pelas equações do item 3.2.2.

O fator de redução da capacidade da barra  $\rho$  pode também ser obtido em tabelas dadas em função de  $\lambda_o$  e das curvas  $\alpha$ .

#### 3.4.1.2. Flambagem por distorção da seção transversal

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem por distorção, a norma determina que  $N_{c,Rd}$  deve ser calculada pelas equações seguintes:

$$N_{c,Rd} = Af_y (1 - 0,25\lambda_{dist}^2) / \gamma \quad \text{para } \lambda_{dist} < 1,414 \quad (3.44)$$

$$N_{c,Rd} = Af_y \{0,055[\lambda_{dist} - 3,6]^2 + 0,237\} \quad \text{para } 1,414 \leq \lambda_{dist} \leq 3,606 \quad (3.45)$$

onde:  $\gamma=1,1$

$A$  → área da seção transversal bruta da barra;

$\lambda_{dist}$  → índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado

por:

$$\lambda_{dist} = (f_y / \sigma_{dist})^{0,5} \quad (3.46)$$

onde  $\sigma_{dist}$  refere-se à tensão crítica convencional de flambagem elástica por distorção que pode ser calculada por expressões apresentadas no anexo D da norma, sendo baseadas no modelo simplificado de Hancock, que dependem da relação entre a largura do flange pela largura da alma da seção transversal, ou através de cálculos com base na teoria da estabilidade elástica.

## CAPÍTULO 4

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O objetivo do programa experimental é analisar colunas curtas compostas de chapa dobrada de seções do tipo sigma ( $\Sigma$ ), para as quais o modo de flambagem local é predominante.

Na série de ensaios realizada, foram avaliadas as tensões devido à flambagem local na parede com um enrijecedor intermediário. Avaliou-se também se o comprimento de onda segue a relação largura/espessura ( $w/t$ ) para uma largura  $w$  que corresponde à distância entre o enrijecedor intermediário e a dobra do flange do perfil. A partir dos deslocamentos do enrijecedor intermediário avaliou-se a influência da altura do mesmo nos modos de flambagem.

No presente trabalho, foram ensaiadas colunas cujo comprimento total,  $L_p$ , é de aproximadamente três vezes a largura  $w_I$  do elemento entre o enrijecedor intermediário e a dobra do flange.

As colunas foram instrumentadas de modo a possibilitar a análise proposta e foram submetidas à compressão centrada e condições de extremidade bi–apoiadas.

Na figura (4.1), a seguir, pode-se observar o esquema geral da montagem dos ensaios, com a representação do tipo de instrumentação utilizada, o posicionamento do perfil nas placas de aço do pórtico de ensaio, além do sistema de aquisição dos dados.

Na foto (4.1) observa-se o equipamento empregado para a aquisição dos dados.

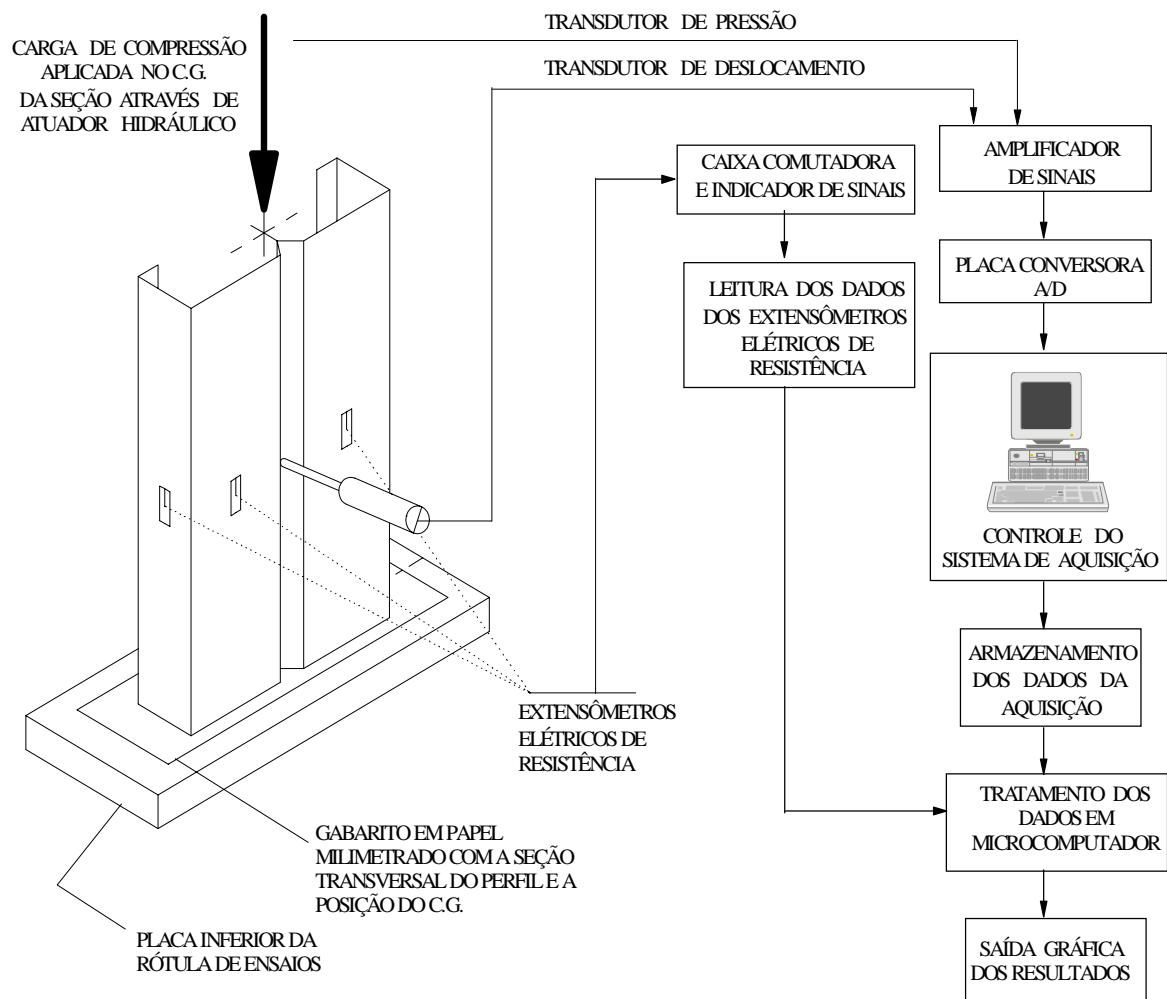


Figura 4.1– Esquema de montagem dos ensaios.



Foto 4.1– Equipamento utilizado para a aquisição dos dados.

#### **4.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS PERFIS**

Os perfis de chapa de aço dobrada a frio são fabricados a partir de chapas finas, laminadas a quente ou a frio. A conformação dos perfis na seção desejada pode ser executada de maneira contínua em mesa de roletes, onde o perfil é conformado gradualmente por roletes que dão a forma de seção, ou de maneira descontínua, quando a conformação é por dobradeiras.

Segundo Rodrigues (1993) ambos os processos de conformação introduzem imperfeições na chapa, e é conhecido que tais imperfeições influenciam os fenômenos de instabilidade; são elas:

- a) As imperfeições geométricas, longitudinais e da seção transversal, oriundas do processo de fabricação;
- b) As tensões residuais, provenientes do processo térmico de resfriamento durante a fase de fabricação da chapa e do processo de conformação a frio do perfil. Na região vizinha às dobras da seção, são encontrados valores máximos de tensões residuais, independente do tipo de fabricação utilizada;

- c) A variação das características mecânicas do material, ocasionada pelo encruamento do aço no decorrer do processo de dobramento a frio da chapa original, causando um aumento nos valores da tensão limite de escoamento, assim como no limite de resistência à tração, no tocante aos valores encontrados no material que constitui a chapa original.

Todos os protótipos utilizados para ensaio nesta pesquisa foram fabricados em dobradeiras, a partir de bobinas de chapas finas laminadas a quente, e fornecidos pela empresa fabricante.

### **4.3. SEÇÕES ESTUDADAS**

Os perfis utilizados para os ensaios são perfis de chapa dobrada de seção U enrijecido com um enrijecedor intermediário na alma, chamado de sigma ( $\Sigma$ ). Na figura (4.2) tem-se a nomenclatura adotada para as dimensões da seção transversal do perfil, além da posição do centro de cisalhamento,  $cc$ ; e do centro de gravidade,  $cg$ .

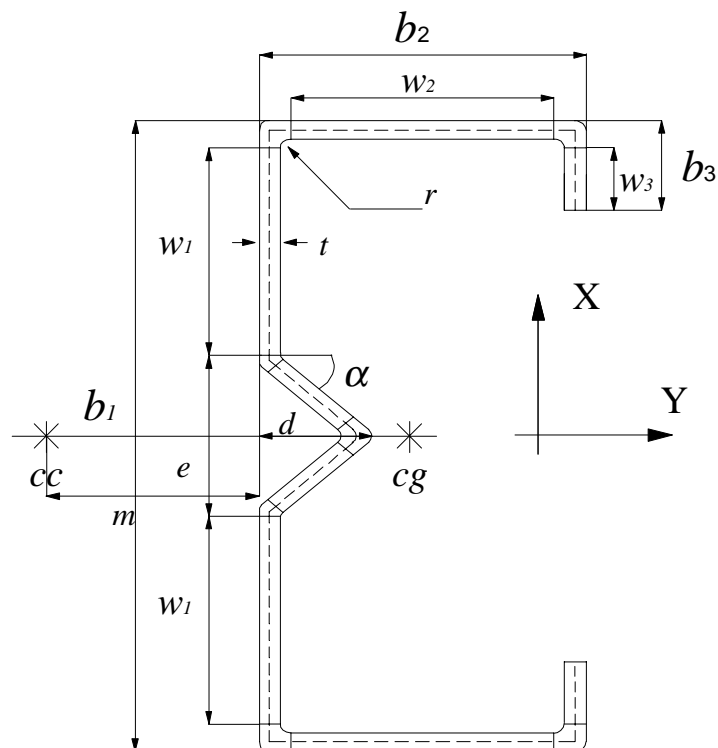


Figura 4.2– Nomenclatura da seção transversal.



Onde:  $b_1$  → Largura total da alma mm;  
 $w_1$  → Largura do trecho reto das paredes entre o enrijecedor intermediário e o flange em mm;  
 $b_2$  → Largura total do flange em mm;  
 $w_2$  → Largura do trecho reto do flange em mm;  
 $b_3$  → Largura total do enrijecedor de extremidade em mm;  
 $w_3$  → Largura do trecho reto do enrijecedor de extremidade em mm;  
 $d$  → Altura do enrijecedor intermediário em mm;  
 $e$  → Largura do enrijecedor intermediário;  
 $m$  → Posição do centro de cisalhamento,  $cc$ ;  
 $r$  → Raio do perfil em mm;  
 $t$  → Espessura da placa em mm;  
 $\alpha$  → Ângulo do enrijecedor intermediário =  $45^\circ$ .

O programa experimental foi dividido em quatro séries de ensaios agrupadas em função das diferentes dimensões de seção transversal. Foram previstos três protótipos para cada série totalizando doze protótipos. Cada série teve a largura do flange e altura do enrijecedor intermediário variando em relação às demais.

Para definir as dimensões da seção transversal dos protótipos, bem como o seu comprimento,  $L_p$ , foi avaliada a flambagem local do perfil, considerando várias dimensões de seção transversal. O comprimento adotado foi estabelecido segundo a teoria da estabilidade elástica das seções, considerando o modo local de flambagem (Batista, 1998/a e b). As extremidades foram usinadas pela empresa fabricante, de forma a garantir que se encontrassem planas e ortogonais ao eixo longitudinal dos perfis, condição importante para garantir a distribuição uniforme de carga na seção transversal.

Ao definir o comprimento dos protótipos, é necessário que ele assegure serem as colunas suficientemente curtas para a que a influência do modo global seja minimizada, contudo suficientemente longas para que os efeitos de extremidade possam ser desprezados.

A tabela (4.1) indica as dimensões nominais da seção transversal dos protótipos de colunas ensaiados bem como o comprimento  $L_p$  dos mesmos.

Tabela 4.1– Dimensões nominais dos protótipos a serem ensaiados.

<b>Protótipo <math>\Sigma</math></b>	<b>Nº. de ensaio</b>	<b><math>L_p</math> (mm)</b>	<b><math>b_1</math> (mm)</b>	<b><math>w_1</math> (mm)</b>	<b><math>b_2</math> (mm)</b>	<b><math>w_2</math> (mm)</b>	<b><math>b_3</math> (mm)</b>	<b><math>w_3</math> (mm)</b>	<b><math>t=r</math> (mm)</b>	<b><math>d</math> (mm)</b>	<b><math>cg</math> (mm)</b>
<b>MOD <math>\Sigma-1</math></b>	3	372	300	124	75	67	20	16	2	20	18,23
<b>MOD <math>\Sigma-2</math></b>	3	300	300	114	75	67	20	16	2	30	19,30
<b>MOD <math>\Sigma-3</math></b>	3	342	300	124	85	77	20	16	2	20	21,32
<b>MOD <math>\Sigma-4</math></b>	3	300	300	114	85	77	20	16	2	30	22,23

Com a finalidade de determinar as dimensões reais da seção transversal dos protótipos, foram realizadas medições ao longo do comprimento dos perfis ensaiados, nas extremidades e à meia altura dos protótipos, totalizando três medidas, sendo utilizado o valor médio.

Na tabela (4.2) estão apresentadas as dimensões reais da seção transversal dos protótipos ensaiados e a média das medidas.

Tabela 4.2– Dimensões reais da seção transversal dos protótipos.

<b>Protótipo</b>	$b_1$ (mm)	$b_2$ (mm) superior	$b_2$ (mm) inferior	$b_3$ (mm) superior	$b_3$ (mm) inferior	$d$ (mm)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1A</b>	300,00	75,00	73,70	22,45	19,55	20,55
	300,40	74,95	75,75	18,70	20,00	20,25
	300,00	74,55	75,00	20,55	19,90	20,40
<b>Média</b>	300,13	74,83	74,82	20,57	19,82	20,40
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1B</b>	299,15	74,80	74,25	18,15	18,75	20,55
	299,45	74,40	74,65	19,55	19,00	20,45
	299,05	74,20	79,95	20,75	19,25	20,40
<b>Média</b>	299,22	74,47	76,28	19,48	19,00	20,47
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1C</b>	298,65	74,90	74,30	17,70	22,25	21,25
	299,50	74,40	74,50	17,60	20,40	21,90
	297,60	74,20	74,90	17,50	18,50	21,90
<b>Média</b>	298,58	74,50	74,57	17,60	20,38	21,68
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2A</b>	300,55	75,00	72,70	22,45	19,55	30,05
	300,65	74,55	73,85	20,55	19,15	30,15
	300,20	74,45	76,20	19,00	19,00	30,65
<b>Média</b>	300,47	74,67	74,25	20,67	19,23	30,28
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2B</b>	299,45	74,95	75,90	18,70	19,00	31,10
	297,50	74,50	75,75	18,80	18,80	31,65
	298,00	74,45	75,00	18,90	18,75	32,15
<b>Média</b>	298,32	74,63	75,55	18,80	18,85	31,63
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2C</b>	299,85	75,25	74,20	19,80	18,35	30,95
	300,85	73,75	74,55	19,65	20,50	30,75
	300,00	72,60	75,00	19,55	22,35	30,70
<b>Média</b>	300,23	73,87	74,58	19,67	20,40	30,80

<b>Protótipo</b>	$b_1$ (mm)	$b_2$ (mm) superior	$b_2$ (mm) inferior	$b_3$ (mm) superior	$b_3$ (mm) inferior	$d$ (mm)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-3A</b>	297,80	84,55	85,00	19,65	20,00	20,25
	298,85	84,45	84,95	20,00	20,55	21,70
	299,20	84,30	84,90	20,35	21,00	21,25
<b>Média</b>	298,62	84,43	84,95	20,00	20,52	21,07
<b>MOD <math>\Sigma</math>-3B</b>	298,35	85,00	84,95	19,75	20,70	19,55
	298,45	84,95	84,90	20,00	20,60	19,70
	299,20	84,95	84,85	20,50	20,55	20,50
<b>Média</b>	298,67	84,97	84,90	20,08	20,62	19,92
<b>MOD <math>\Sigma</math>-3C</b>	298,85	84,95	85,25	20,55	20,25	19,75
	298,45	85,05	85,00	20,15	20,60	19,95
	298,15	85,10	84,95	19,70	20,85	20,25
<b>Média</b>	298,48	85,03	85,07	20,13	20,57	19,98
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4A</b>	299,00	84,85	85,00	20,40	19,10	30,55
	299,50	85,00	84,95	19,80	19,50	30,50
	299,05	85,10	84,90	19,25	20,35	30,40
<b>Média</b>	299,18	84,98	84,95	19,82	19,65	30,48
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4B</b>	299,70	85,00	85,35	19,95	20,30	30,35
	299,65	85,10	85,00	19,40	20,00	30,55
	299,15	85,20	85,00	19,00	19,85	30,85
<b>Média</b>	299,50	85,10	85,12	19,45	20,05	30,58
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4C</b>	298,90	84,85	84,95	19,95	19,10	30,25
	299,40	84,80	84,90	19,30	19,40	30,70
	299,00	84,75	84,95	18,90	19,45	31,60
<b>Média</b>	299,10	84,80	84,93	19,38	19,32	30,85

#### **4.4. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL**

A tensão limite de escoamento,  $f_y$ , a tensão limite de resistência à tração,  $f_u$ , e o alongamento residual após a ruptura do aço,  $\epsilon_r$ , foram medidos a partir de ensaios à tração em corpos de prova padronizados. Os ensaios foram realizados em máquina de ensaios KRATOS, com velocidade de deformação controlada de 25 mm/minuto.

Utilizando as especificações da norma Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials – ASTM (1995), foram definidas as dimensões, bem como os procedimentos de ensaio dos corpos de prova à tração, que foram retirados dos flanges e da alma dos protótipos como esquematizado na figura (4.3).

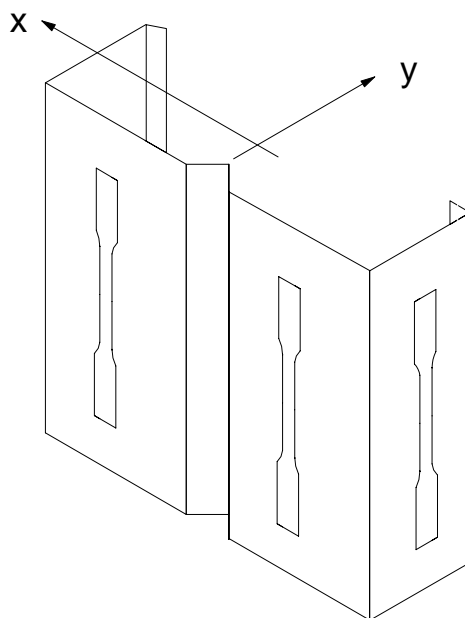


Figura 4.3- Posições nos protótipos de onde foram retirados os corpos de prova.

As características geométricas dos corpos de prova podem ser visualizadas na figura (4.4). Foram usinados oito corpos de prova para o ensaio à tração, com as dimensões apresentadas na tabela (4.3).

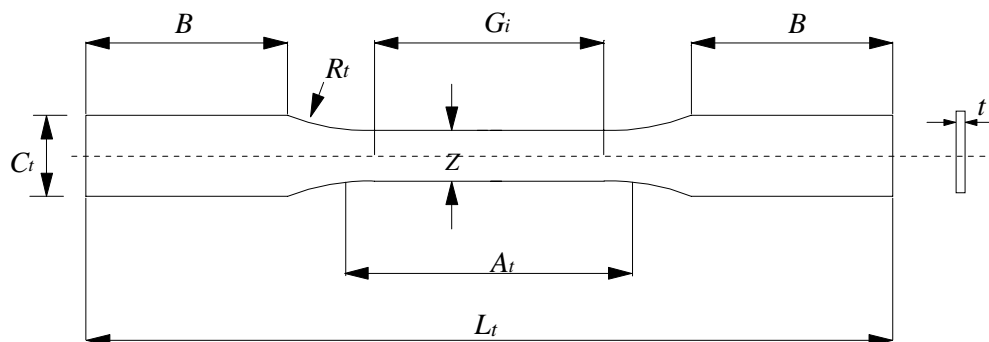


Figura 4.4– Características geométricas dos corpos de prova a tração.

- onde:  $L_t$  → Comprimento total do corpo de prova à tração em mm;  
 $A_t$  → Comprimento da parte útil (seção reduzida) em mm;  
 $G_i$  → Comprimento inicial do corpo de prova à tração em mm;  
 $B$  → Comprimento da cabeça de fixação do corpo de prova à tração em mm;  
 $Z$  → Largura do corpo de prova à tração em mm;  
 $C_t$  → Largura da cabeça de fixação do corpo de prova à tração em mm;  
 $R_t$  → Raio do corpo de prova à tração em mm;  
 $t$  → Espessura do corpo de prova em mm.

Tabela 4.3– Dimensões dos corpos de prova à tração.

Protótipos	Corpos de prova	$t$ (mm)	$Z$ médio (mm)	$G_i$ (mm)	$L_t$ (mm)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1</b> <b>a</b> <b>MOD <math>\Sigma</math>-4</b>	CP01	2	12,33	50	204
	CP02	2	12,35	50	204
	CP03	2	12,47	50	204
	CP04	2	12,48	50	202
	CP05	2	12,35	50	204
	CP06	2	13,45	50	204
	CP07	2	12,48	50	204
	CP08	2	12,10	50	204

O valor limite encontrado para a tensão de escoamento média, a partir dos ensaios é de 315,69 Mpa, e a tensão máxima média é de 426,87 MPa.

#### **4.5. PREPARAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS**

Os perfis ensaiados tiveram suas extremidades preparadas de modo a garantir que elas fossem paralelas e que houvesse distribuição uniforme de tensão normal na seção transversal.

A preparação dos perfis consistiu em lixar as extremidades da coluna ao longo da seção transversal, a fim de obter uma uniformização da altura, e em controlar as dimensões ao longo do comprimento após o lixamento.

O controle dimensional foi realizado em quatorze pontos da seção do perfil, como apresentado na figura (4.5), em que foi medido o comprimento da coluna. De posse dos valores da variação do comprimento apresentados na tabela (4.4), foi calculado o valor médio do comprimento  $L_p$  para cada protótipo, sendo este valor utilizado no cálculo da carga última.

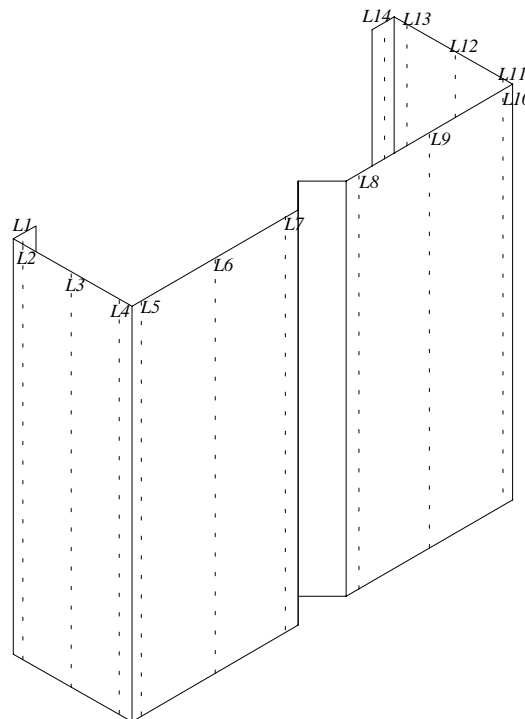


Figura 4.5- Pontos de medição do comprimento da coluna na seção transversal do perfil, para o controle dimensional.

Tabela 4.4- Valores dos comprimentos dos perfis para controle dimensional.

<b>MOD <math>\Sigma</math>-1C – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
37,24	37,25	37,26	37,25	37,27	37,29	37,31	37,37	37,41	37,42	37,42	37,44	37,42	37,41
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2A – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
30,40	30,38	30,36	30,34	30,30	30,52	30,54	30,82	30,88	30,70	30,90	30,92	31,00	30,92
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2B – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
30,64	30,62	30,60	30,56	30,54	30,52	30,50	30,62	30,68	30,72	30,94	31,00	31,12	31,14
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2C – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
31,58	31,66	32,00	32,02	32,30	32,32	32,28	32,60	32,36	32,32	32,30	32,20	32,12	32,08
<b>MOD <math>\Sigma</math>-3B – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
34,24	34,25	34,26	34,28	34,27	34,24	34,20	34,19	34,12	34,08	34,05	34,05	34,03	34,03
<b>MOD <math>\Sigma</math>-3C – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
34,20	34,20	34,19	34,19	34,22	34,23	34,22	34,25	34,24	34,24	34,25	34,26	34,23	34,23
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4A – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
31,76	31,62	31,36	31,22	31,58	31,56	31,44	31,54	31,38	31,32	31,14	31,04	30,88	30,86
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4B – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
30,14	30,10	30,08	30,06	30,04	30,00	29,98	29,92	29,90	29,88	29,72	29,70	29,74	29,80
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4C – Dimensões em cm</b>													
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>	<i>L12</i>	<i>L13</i>	<i>L14</i>
32,00	31,94	31,92	31,88	31,00	31,82	31,76	31,74	31,74	31,72	31,68	31,62	31,60	31,42



Para medição das deformações específicas foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (Strain gages) modelo KFG – 5 –120 C1 - 11, fabricados pela KYOWA Eletronic Instruments CO.

Com o objetivo de acompanhar o comportamento pós-crítico da placa sujeita a fenômeno de flambagem local, os extensômetros foram colados ao longo do comprimento do perfil bem como nas faces externas e internas das paredes  $w_1$ , como apresentado na foto (4.2).



Foto 4.2- Vista da instrumentação ao longo do comprimento do perfil.

A partir dos valores das deformações, obteve-se a previsão de amplitude máxima de deslocamentos devido à flambagem local e observou-se a evolução das tensões oriundas da carga axial de compressão e da flexão local.

Além dos extensômetros da alma, foram colados também dois extensômetros na linha média, somente na face externa de cada flange, com a finalidade de orientar a centragem da carga na direção do eixo de maior inércia.

Foi utilizado um transdutor de deslocamento, LVDT, modelo MVL-500, fabricado pela SENSOTEC, com alcance de 2", posicionado à meia altura da coluna e no enrijecedor intermediário, para medir e avaliar os deslocamentos do enrijecedor em função da carga aplicada.

#### **4.6. ESQUEMA DE MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS**

Para a aplicação do carregamento, foi empregado um atuador hidráulico ENERPAC, com capacidade de 400 kN. O valor da carga aplicada foi obtido através de um transdutor de pressão acoplado ao sistema de aquisição automática.

Os protótipos ensaiados foram posicionados entre as placas de aço que compõem o sistema de apoio. Essas placas, responsáveis pela distribuição uniforme de carga no perfil, foram fixadas a rótulas, e estas por sua vez, na extremidade do atuador hidráulico, que foi, então, foi conectado ao pórtico de ensaio, sendo este fixo à laje de reação.

Foram utilizadas hastes-guias entre as duas placas de aço e o protótipo, visando estabilizar o conjunto e auxiliar no posicionamento do protótipo, bem com no nivelamento de ambas as placas de aço com relação ao ponto de aplicação da carga.

O esquema geral de montagem do protótipo no pórtico de ensaio encontra-se ilustrado na figura (4.6) e na foto (4.3). Na figura (4.7) pode-se observar o detalhe da rótula de apoio e da placa de aço do esquema de montagem.

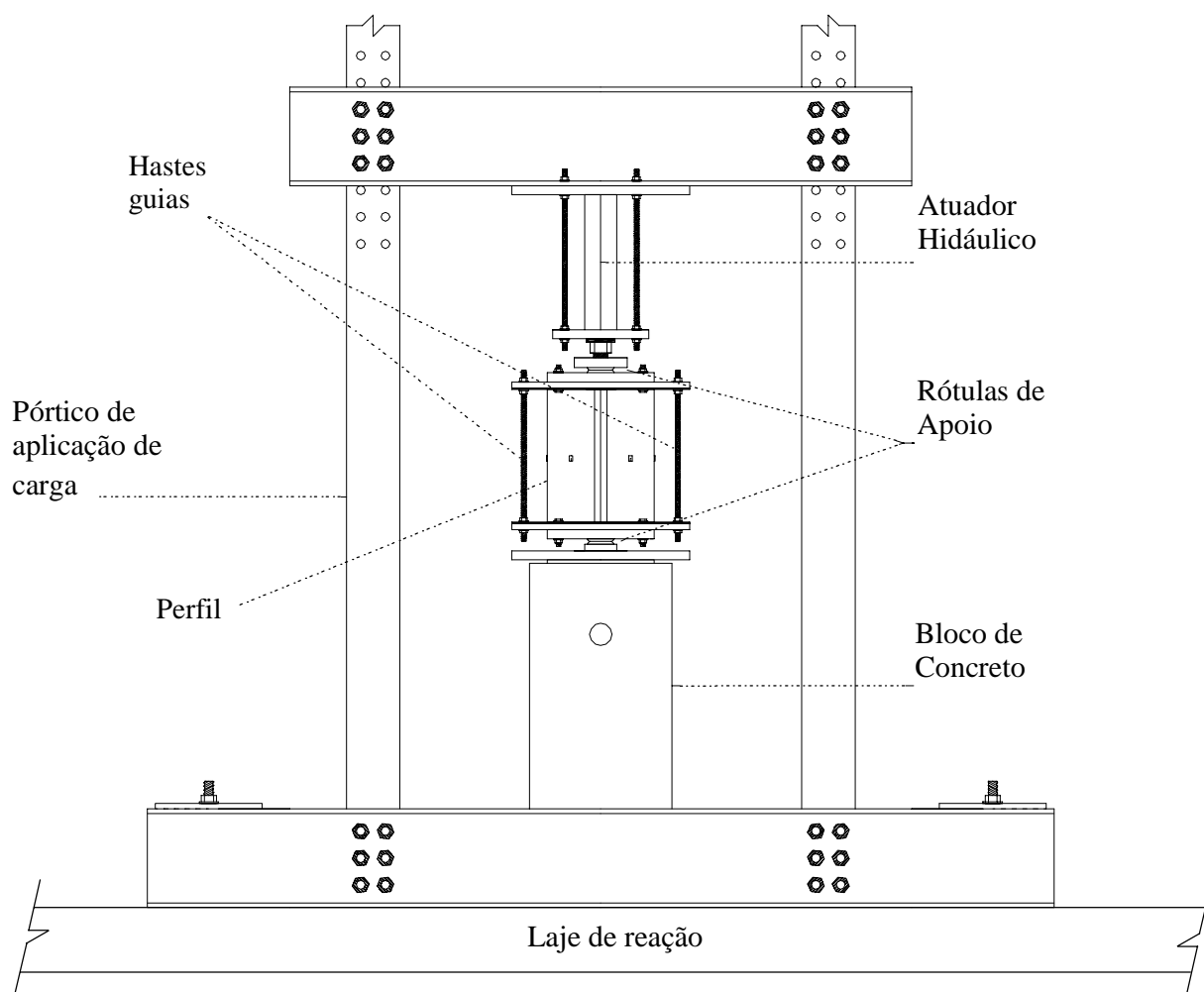


Figura 4.6- Esquema geral de montagem dos ensaios.

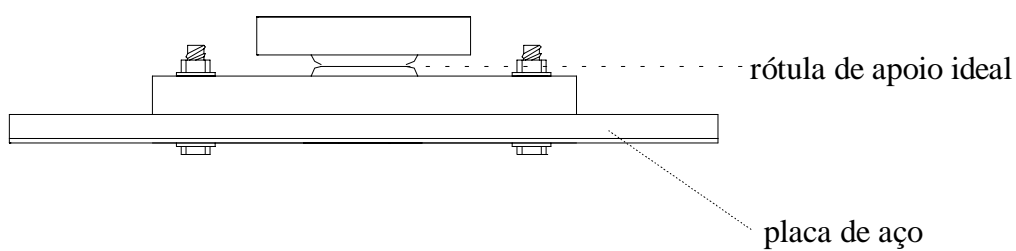


Figura 4.7- Detalhe do sistema de apoio composto de rótula e placa de aço.



Foto 4.3- Vista geral do corpo de prova MOD  $\Sigma$ -1A posicionado no pórtico de ensaio.

Uma importante etapa do experimento consiste na aquisição de dados, os quais também são utilizados para a centragem. Para obter os dados dos pré-ensaios e dos ensaios, foram usados extensômetros elétricos de resistência, transdutores de deslocamento e pressão, além de terem sido feitos o acompanhamento e o monitoramento da instrumentação durante a sua instalação e o seu uso.

As leituras tanto do transdutor de deslocamento LVDT quanto do transdutor de carga foram obtidas por meio do sistema de aquisição automática, controlada por computador. Este é provido de placa de aquisição e software de leitura, permitindo que

os ensaios sejam monitorados e acompanhados a cada nível de carga, com auxílio de tela gráfica e armazenamento dos dados.

A leitura dos valores medidos pelos extensômetros foi obtida a cada incremento de carga, através de indicador de deformação tipo VISHAY e caixa comutadora. A foto (4.4) apresenta esse equipamento.



Foto 4.4- Detalhe do equipamento utilizado para aquisição das leituras dos extensômetros.

#### **4.7. METODOLOGIA DE ENSAIO**

Os ensaios foram realizados com controle de carga, o que não apresentou dificuldades em acompanhá-los na vizinhança da carga última, devido ao fato do fenômeno de formação de rótula plástica induzir a uma perda progressiva de rigidez e, após a passagem da carga máxima, a uma redução não muito brusca da capacidade de carga nas colunas.

Para a centragem da carga foram utilizados dois controles de ajuste do corpo de prova nas placas de aço da montagem. O primeiro foi a centragem geométrica, que

consistiu em ajustar a coluna em um gabarito de papel milimetrado, contendo o esboço da seção transversal, assim como a posição do centro de gravidade do perfil ensaiado. Esse gabarito foi colado tanto na placa de aço inferior quanto na superior, com o centro de gravidade do perfil a ser ensaiado coincidindo com o centro das placas.

Em virtude das imperfeições das dimensões e à dificuldade prática do alinhamento preciso do centro de gravidade da seção com o centro da placa de aço do sistema de apoio, esse procedimento não é o definitivo.

Assim, o segundo controle da centragem foi realizado sob carga, uniformizando as deformações na linha média da coluna, onde foram colados extensômetros nos flanges.

Para esse controle foram realizados pré-ensaios, que consistiram em aplicar um certo nível de carga e verificar as deformações medidas pelos extensômetros. Se as deformações na linha média da alma e do flange da coluna apresentassem valores aproximados das deformações, o carregamento era considerado centralizado.

Como o estudo do comportamento limita-se às paredes mais largas do perfil, ou seja, paredes onde se encontra o enrijecedor intermediário, houve uma preocupação com a uniformidade da distribuição das tensões nessas paredes. As leituras dos extensômetros dos flanges constituíram dados auxiliares, a fim de evitar excentricidades excessivas na direção do eixo de maior inércia da seção.

A centragem foi realizada por tentativas a partir de pré-ensaios, com repetidos ciclos de carregamento e respectivas leituras de deformação. Quando a posição do corpo de prova conduziu a uma distribuição uniforme de deformação nas paredes  $w_I$  em estudo, o ensaio podia ser executado.

Após o pré-ensaio e a centragem, o protótipo foi descarregado, e em seguida a carga foi aplicada até o colapso da coluna. O carregamento foi aplicado inicialmente em passos de carga de 10 kN, em seguida estes foram reduzidos, visando maior precisão de resultados.

A cada passo de carga foram obtidos os valores das deformações, do carregamento e do deslocamento do enrijecedor intermediário. Na proximidade da carga última, as leituras pelo sistema de aquisição automático foram realizadas sem interrupção a cada passo de carga, a fim de obter uma precisão maior da carga máxima.

Com as leituras das deformações e dos deslocamentos, além do valor da carga a cada etapa, procedeu-se ao tratamento dos dados e à análise dos resultados de acordo com os objetivos da pesquisa. Os resultados serão apresentados nos capítulos seguintes.

As diferenças entre as séries dos protótipos ensaiados são apresentadas a seguir.

As diferenças geométricas entre as séries dos protótipos MOD  $\Sigma$ -1 e MOD  $\Sigma$ -2 ensaiados estão listadas abaixo:

- comprimento da coluna: MOD  $\Sigma$ -1 = 372 mm  
MOD  $\Sigma$ -2 = 300 mm
- altura do enrijecedor intermediário: MOD  $\Sigma$ -1 = 20 mm  
MOD  $\Sigma$ -2 = 30 mm

A série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -3 difere da série MOD  $\Sigma$ -4 nos seguintes itens:

- comprimento da coluna: MOD  $\Sigma$ -3 = 342 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 300 mm
- altura do enrijecedor intermediário: MOD  $\Sigma$ -3 = 20 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 30 mm

Comparando as séries MOD  $\Sigma$ -1 e MOD  $\Sigma$ -3 verificam-se diferenças nos itens:

- largura do flange: MOD  $\Sigma$ -1 = 75 mm  
MOD  $\Sigma$ -3 = 85 mm
- comprimento da coluna: MOD  $\Sigma$ -1 = 372 mm  
MOD  $\Sigma$ -3 = 342 mm

Já na comparação das séries MOD  $\Sigma$ -2 e MOD  $\Sigma$ -4 verifica-se diferença no item:

- largura dos flanges: MOD  $\Sigma$ -2 = 75 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 85 mm

Na comparação entre as séries MOD  $\Sigma$ -2 e MOD  $\Sigma$ -3 as diferenças são verificadas nos itens:

- comprimento da coluna: MOD  $\Sigma$ -2 = 300 mm  
MOD  $\Sigma$ -3 = 342 mm
- largura do flange: MOD  $\Sigma$ -2 = 75 mm  
MOD  $\Sigma$ -3 = 85 mm
- altura do enrijecedor intermediário: MOD  $\Sigma$ -2 = 30 mm  
MOD  $\Sigma$ -3 = 20 mm

Na comparação entre as séries MOD  $\Sigma$ -1 e MOD  $\Sigma$ -4 as diferenças são verificadas nos itens:

- comprimento da coluna: MOD  $\Sigma$ -1 = 372 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 300 mm
- largura do flange: MOD  $\Sigma$ -1 = 75 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 85 mm
- altura do enrijecedor intermediário: MOD  $\Sigma$ -1 = 20 mm  
MOD  $\Sigma$ -4 = 30 mm

Nos próximos itens é descrito, para cada série dos protótipos ensaiados, como foram realizados os ensaios, bem como a metodologia e os equipamentos utilizados.

#### **4.7.1. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -1**

A quantidade e o posicionamento dos extensômetros para a primeira série de ensaios, a série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -1, variaram de um protótipo para outro, quanto ao esquema de extensometria de uma das paredes  $w_I$ , em relação à outra. Isto é justificado pelo fato de se tentar determinar a seção de amplitude máxima e os pontos de inflexão das ondas de flambagem das paredes  $w_I$ . Na outra parede  $w_I$ , para todos os protótipos, foram colados dois extensômetros: um na face externa e outro na face interna.



Para todos os protótipos ensaiados foram colados dois extensômetros, um em cada flange na parte externa, com a finalidade de orientar a centragem sob carga, como descrito no item 4.5.

#### 4.7.1.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -1A

Para o primeiro modelo a ser ensaiado, o MOD  $\Sigma$ -1A, foram colados três extensômetros na linha média das faces externa e interna da parede  $w_1$ , distando entre si de 3 cm, medidos de centro a centro. Na figura (4.8) tem-se o esquema de instrumentação desse protótipo.

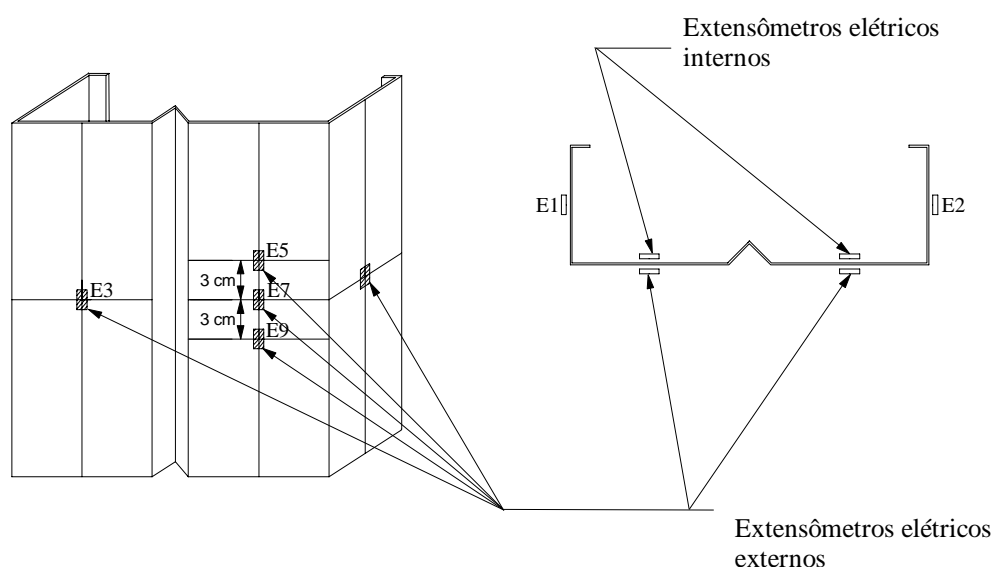


Figura 4.8- Esquema de instrumentação para o MOD  $\Sigma$ -1A.

Mediante comparações dos valores dos pares de extensômetros, verificou-se a distribuição das deformações, sendo então observados os extensômetros E1 e E2 que foram colados nos flanges, os extensômetros E3 e E7 colados nas faces externas de cada uma das paredes  $w_1$ , além dos seus respectivos pares colados nas faces internas, os extensômetros E4 e E8.

Foram realizados três testes de centragem sob carga para esse modelo. Na primeira tentativa de centragem, que serviu para avaliar os equipamentos utilizados, bem como o esquema de montagem do protótipo no pórtilo de ensaios, foi aplicada carga até 30,23 kN, contudo os valores das deformações medidas pelos extensômetros não apresentaram resultados satisfatórios. A coluna foi então descarregada e recolocada

sobre o gabarito com o desenho da seção transversal nominal, a fim de obter melhor centragem do protótipo.

Na segunda tentativa de centragem a carga aplicada alcançou 39,84 kN. Observou-se que os valores das deformações medidas pelos extensômetros, principalmente os E1 e E2, não apresentaram bons resultados. Esse fato decorre dos perfis de chapa dobrada possuírem imperfeições geométricas, longitudinais e da seção transversal, oriundas do processo de conformação na fabricação.

Superpondo a seção transversal do protótipo a ser ensaiado à seção nominal desenhada em papel milimetrado, foram registradas diferenças angulares entre as paredes dos flanges, em relação aos ângulos previstos de  $90^\circ$ . As diferenças foram  $2,5^\circ$  para um dos flanges e  $0,5^\circ$  para o outro, não havendo paralelismo entre eles, o que prejudicou a centragem da coluna.

Outra observação com respeito às imperfeições é que, apesar de os perfis terem sido cortados e usinados em fábrica, para garantir a sua ortogonalidade e distribuição uniforme de carga, foram observados nesse protótipo e em outros espaçamentos entre as seções extremas e as placas de aço do sistema de apoio da ordem de décimos de milímetros no início do ensaio. Este espaçamento era eliminado com o aumento gradual do carregamento. Nesse protótipo a região com maior área de contato com as placas de aço foi a parede  $w_1$ , onde foram colados os seis extensômetros, sendo assim a região mais comprimida.

As leituras dos extensômetros induziram a adotar um deslocamento do protótipo do centro de gravidade nominal. Foi imposta uma excentricidade de 0,5 cm no perfil, para que houvesse uma distribuição uniforme de tensões.

A figura (4.9) tem-se o esquema da seção transversal nominal do perfil, representada pela linha contínua, e a seção transversal real do perfil, representada pela linha pontilhada. Podem ser observadas tanto as imperfeições geométricas dos flanges quanto a posição durante o ensaio, deslocada 0,5 cm em relação ao centro de gravidade.

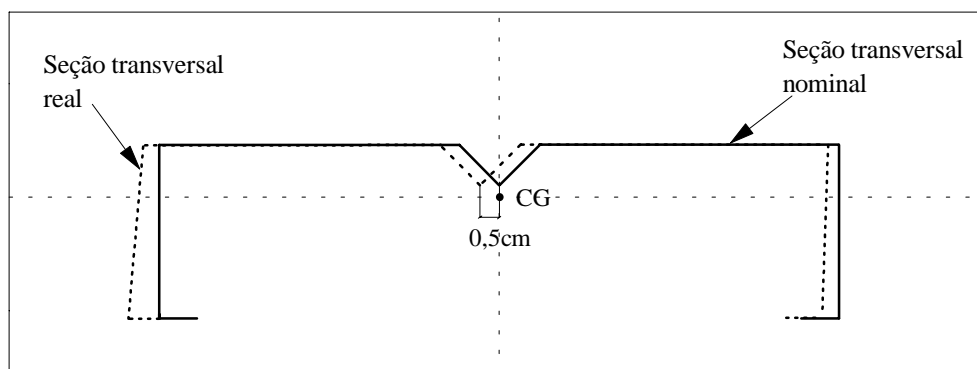


Figura 4.9- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD  $\Sigma$ -1A e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

No terceiro pré-ensaio, já com o perfil excêntrico, foi aplicada carga até 54,92 kN. Os valores das deformações medidas pelos extensômetros E3 e E7, externos, e E4 e E8, internos, apresentaram resultados aproximados, uma vez que as duas paredes  $w_I$  se encontravam em contato com a placa de aço do sistema de apoio. Como os valores do terceiro pré-ensaio foram satisfatórios, deu-se continuidade no ensaio.

#### 4.7.1.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -1B

Nesse protótipo, foram colados sete extensômetros na face externa e cinco na face interna na linha média da parede  $w_I$ . Tal esquema foi escolhido visando determinar com maior precisão os pontos de inflexão de flambagem e o ponto de amplitude máxima, bem com o número de meias ondas formadas ao longo do comprimento do perfil.

Os extensômetros foram colados distanciados 3 cm de eixo a eixo. A figura (4.10) apresenta o esquema de instrumentação do protótipo.

Neste protótipo, assim como em todos os demais que serão apresentados, foi utilizado um LVDT posicionado à meia altura da coluna e no centro do enrijecedor intermediário, como descrito no item 4.5.

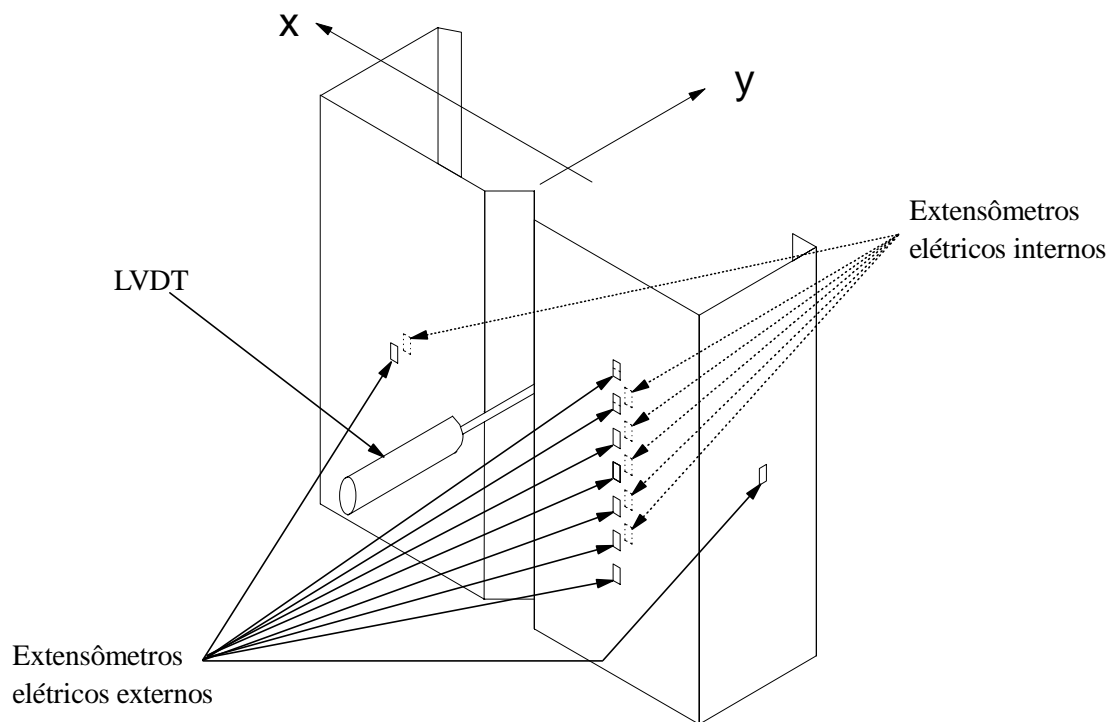


Figura 4.10- Esquema de instrumentação do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

Antes de realizar o ensaio, houve um teste até a carga de 32,98 kN. Procedeu-se o teste em virtude das deformações indicadas pelos extensômetros indicarem uma distribuição não uniforme de carregamento.

No gabarito em papel, representado na figura (4.11), verificava-se pelo desenho da seção transversal real do perfil, representada pela linha pontilhada, que uma das paredes  $w_1$  apresentava uma deformação angular em relação à seção transversal nominal do perfil representada pela linha contínua, o que induziu o modo de colapso nessa direção. Devido às leituras indicarem uma flexão na parede mais carregada e não flambagem local, a coluna foi descarregada, tendo atingido 50,18% da tensão de escoamento do material.

Para garantir a distribuição uniforme de tensões no ensaio desse protótipo, foi imposta uma excentricidade na coluna, visando eliminar as influências das imperfeições nos resultados do teste, como realizado no modelo MOD  $\Sigma$ -1A. Foram realizados dois pré-ensaios para avaliar a distribuição das tensões.

No primeiro pré-ensaio foi imposta uma excentricidade de 0,5 cm na coluna, e a carga aplicada foi até 32,98 kN, no entanto os valores das deformações medidas pelos

extensômetros não se apresentaram uniformes. Foi realizado então um segundo pré-ensaio, no qual foi imposta a excentricidade de 1 cm e a carga atingiu 15,15 kN. Em função dos valores das deformações dos extensômetros da linha média do perfil colados às duas paredes  $w_1$  apresentarem resultados satisfatórios, o ensaio foi realizado.

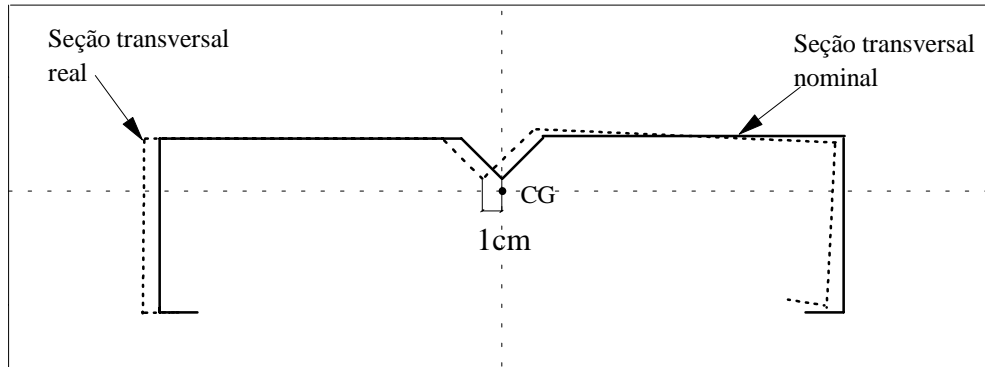


Figura 4.11- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD Σ-1B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

Quanto aos extensômetros dos flanges, ocorreu a mesma situação que no ensaio anterior. Os flanges não se encontravam paralelos, por esse motivo os extensômetros E1 e E2 não apresentaram bons resultados. A razão do não paralelismo dos flanges neste protótipo é explicada pelo fato de uma das paredes  $w_1$  exibir uma diferença angular, como comentado anteriormente.

Da mesma forma que o protótipo ensaiado anteriormente, este também apresentava espaçamentos entre as seções extremas e as placas de aço do sistema de apoio, os quais foram eliminados com o aumento gradual do carregamento. A região com maior área de contato, antes de ser imposta a excentricidade, foi a parede  $w_1$ , onde foram colados os doze extensômetros.

#### 4.7.1.3. Protótipo MOD Σ-1C

No MOD Σ-1C foram colados três extensômetros na linha média, nas faces externa e interna da parede  $w_1$ , analogamente ao MOD Σ-1A, distando entre si 11 cm medidos de centro a centro. A distância entre os extensômetros foi maior para este

modelo do que para o MOD  $\Sigma$ -1A, a fim de tentar determinar com maior precisão o comprimento das ondas de flambagem local.

O LVDT foi posicionado à meia altura da coluna e no enrijecedor intermediário, para obter os deslocamentos do enrijecedor, em função da carga aplicada. A figura (4.12) apresenta o esquema de instrumentação desse protótipo.

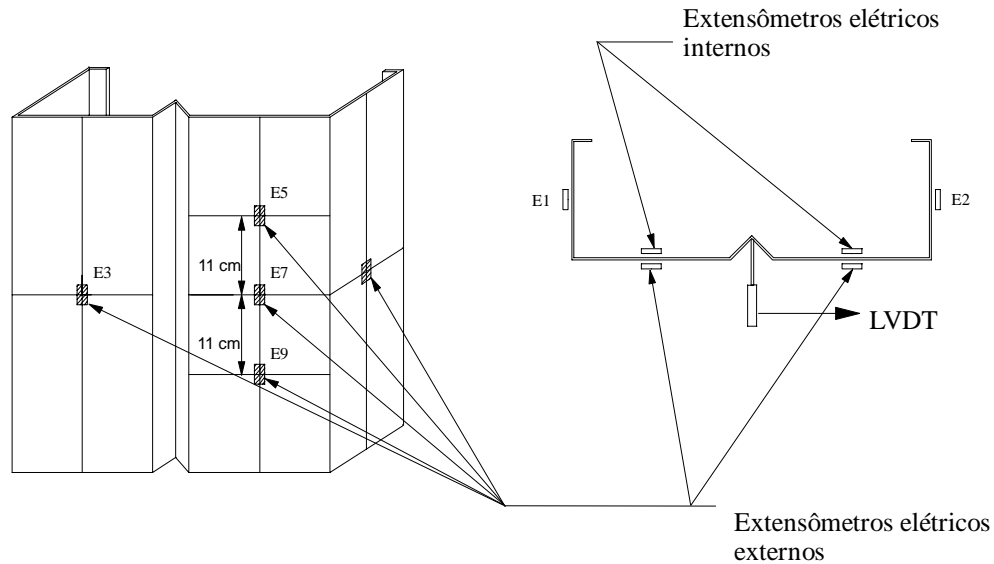


Figura 4.12- Esquema de instrumentação do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

Conforme os ensaios anteriores e seguindo a metodologia descrita, foram realizadas duas tentativas de centragem sob carga para esse protótipo. Nesses dois primeiros pré-ensaios, os extensômetros colados nas paredes  $w_1$  do perfil não apontaram bons resultados, como era previsto, porém os extensômetros E1 e E2, colados nos flanges, apresentaram resultados satisfatórios nos testes de centragem.

No primeiro pré-ensaio a carga aplicada foi até 29,50 kN, e no segundo até 38,00 kN.

Analisando a tabela (4.4), onde se encontravam os valores das alturas desse protótipo, observou-se que um lado era maior que o outro; já no gabarito em papel representado na figura (4.13) verificou-se, pelo desenho da seção transversal real do perfil indicada pela linha pontilhada, que uma das paredes  $w_1$  apresentava uma deformação angular no tocante à seção transversal nominal do perfil, representada pela linha contínua.

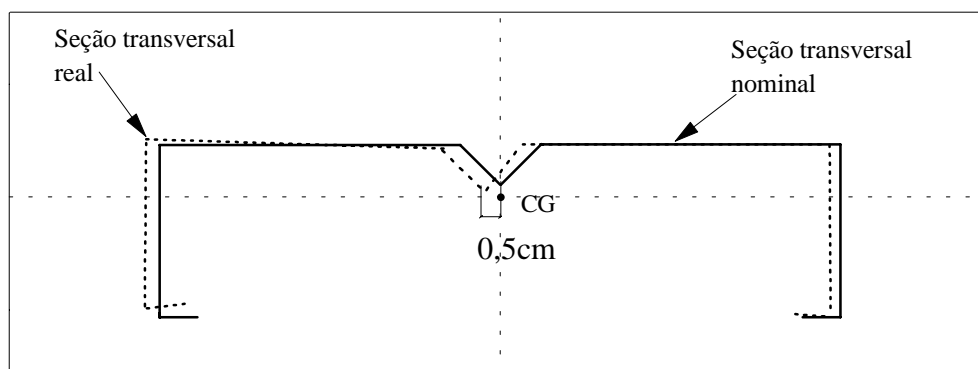


Figura 4.13- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD  $\Sigma$ -1C e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

As diferenças no comprimento do perfil serviram para orientar a excentricidade imposta que foi de 0,5 cm. Com essa excentricidade os valores das deformações medidas pelos extensômetros colados na linha média do perfil apresentaram resultados satisfatórios no segundo pré-ensaio.

#### **4.7.2. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -2**

Todos os protótipos da série MOD  $\Sigma$ -2 ensaiados tiveram o mesmo esquema de extensometria, com um par de extensômetros em cada parede  $w_1$ , como pode ser visualizado na figura (4.14). Seguindo o mesmo procedimento da série de protótipos anterior, foram colados dois extensômetros, um em cada flange na parte externa, com a finalidade de orientar a centragem sob carga; também foi utilizado um LVDT posicionado à meia altura do perfil e no centro do enrijecedor intermediário, para medir os deslocamentos do enrijecedor.

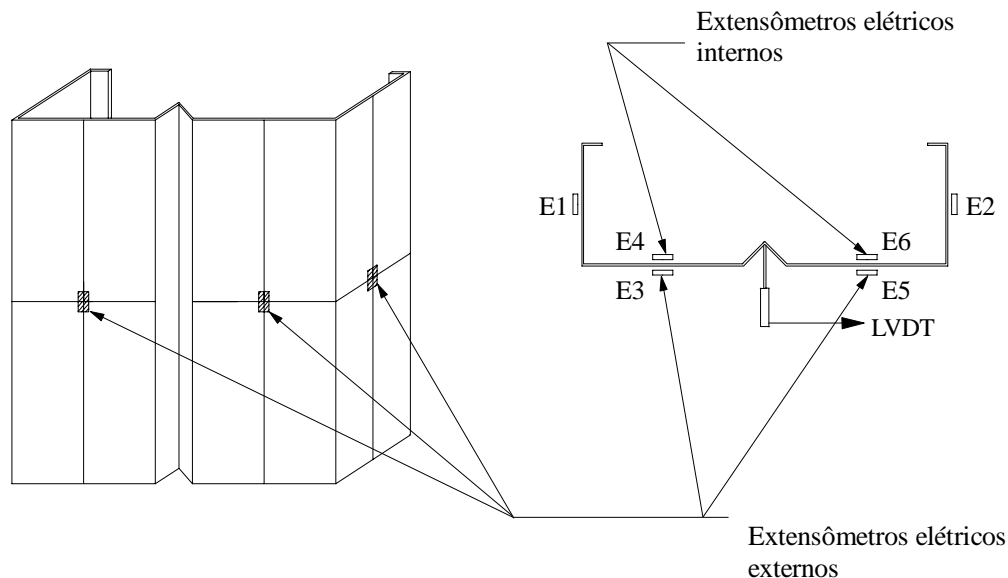


Figura 4.14- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD  $\Sigma$ -2.

#### 4.7.2.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -2A

Para o ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2A, foi realizado um pré-ensaio, no qual aplicou-se a carga máxima de 57,67 kN.

As imperfeições geométricas da extremidade deste protótipo, assim como dos outros da mesma série não eram visíveis, portanto a centragem foi baseada no gabarito em papel milimetrado.

#### 4.7.2.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -2B

Nesse protótipo foi realizado um pré-ensaio para o teste de centragem, aplicando carga até 57,67 kN, como no protótipo anterior.

O MOD  $\Sigma$ -2B, além de apresentar imperfeições geométricas indicadas por variação do seu comprimento, como constatado na tabela do item 4.5, apresentou também deformações visíveis em sua seção transversal, como representado na figura (4.15). Nessa figura observa-se o esquema da seção transversal nominal do perfil representada pela linha contínua, e da seção transversal real do perfil apontada pela linha pontilhada.

Estas imperfeições influenciaram a centragem da coluna, sendo considerado centrado o perfil posicionado no centro de gravidade nominal.



Com o aumento gradual da carga os extensômetros colados nas paredes  $w_1$  apresentaram valores das deformações mais aproximadas.

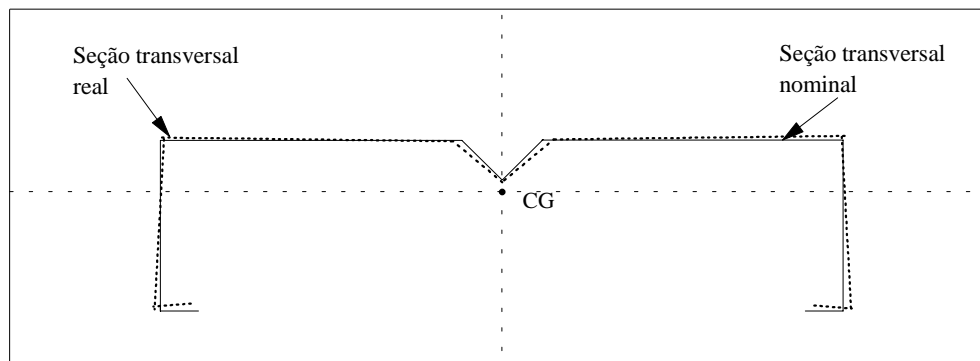


Figura 4.15- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD Σ-2B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

#### 4.7.2.3. Protótipo MOD Σ-2C

No protótipo MOD Σ-2C foi verificada uma variação no comprimento, da mesma forma que nos protótipos anteriores; também não foram observadas imperfeições geométricas na seção transversal nominal.

Na centragem geométrica, o perfil enquadrou-se perfeitamente no contorno da seção nominal desenhada no papel milimetrado. Para a centragem, como nos outros ensaios, os valores das deformações medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges não foram uniformes.

Para esse protótipo foram realizados dois pré-ensaios: no primeiro foi aplicada a carga máxima de 39,84 kN, e no segundo, com o protótipo reposicionado no gabarito segundo à seção transversal nominal, a carga foi de 57,67 kN.

#### 4.7.3. Série dos Protótipos MOD Σ-3

Como na série ensaiada anteriormente, o esquema de extensometria para os protótipos da série MOD Σ-3 teve um par de extensômetros colados em cada parede  $w_1$ , e foram colados ainda dois extensômetros, um em cada flange na parte externa, com a finalidade de orientar a centragem sob carga.

Nesta série tal como na anterior, foi utilizado um LVDT posicionado à meia altura do perfil bem como no centro do enrijecedor intermediário, a fim de medir os deslocamentos do enrijecedor.

Dois protótipos dessa série foram ensaiados com carregamento centrado, sendo imposta uma pequena excentricidade para o primeiro, devido às imperfeições geométricas. A figura (4.16) apresenta o esquema de instrumentação para a série de protótipos ensaiada.

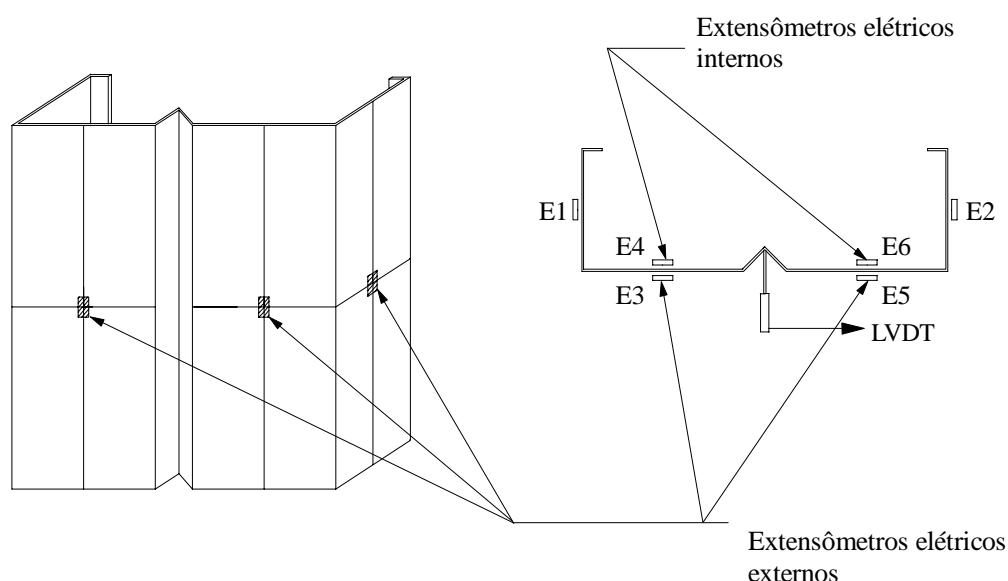


Figura 4.16- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD  $\Sigma$ -3.

#### 4.7.3.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -3A

Para o protótipo MOD  $\Sigma$ -3A foram realizados quatro pré-ensaios, sendo os dois primeiros sem ser introduzir excentricidade no perfil. No primeiro foi aplicada carga até 21,50 kN, e no segundo, até 29,50 kN.

Nesses dois pré-ensaios foi verificado que as imperfeições ao longo do comprimento do perfil eram acentuadas, pois os valores dos pares de extensômetros colados nas paredes  $w_1$  do protótipo apresentavam uma grande diferença entre si.

Não foram verificadas imperfeições na seção transversal, estando os flanges do protótipo paralelos, como apresentado na figura (4.17). Essa figura apresenta o esquema da seção transversal nominal do perfil representada pela linha contínua e da seção transversal real do perfil indicada pela linha pontilhada. Os valores dos extensômetros colados nos flanges não apresentaram bons resultados.

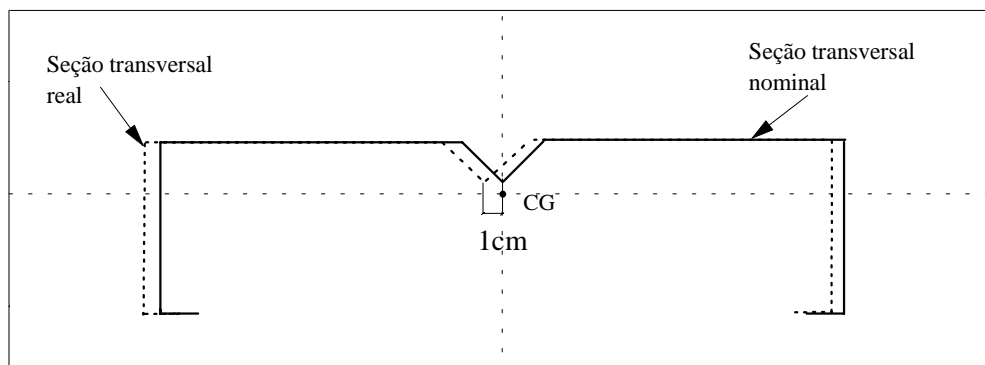


Figura 4.17- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD  $\Sigma$ -3A e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

Após ser imposta a primeira excentricidade ao perfil, devido às imperfeições geométricas ao longo do seu comprimento, foi realizado um pré-ensaio para verificar se os valores dos extensômetros colados nas paredes  $w_1$  apresentavam-se aproximados. Como isso não ocorreu, foi imposta uma excentricidade de 1 cm, sendo efetuado então um segundo pré-ensaio até a carga de 29,50 kN. Nesse caso os valores medidos pelos extensômetros indicavam-se aproximados.

#### 4.7.3.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -3B

O protótipo MOD  $\Sigma$ -3B foi ensaiado com carregamento centrado, tendo sido realizado um pré-ensaio para o teste de centragem, no qual foi aplicada carga até 38,00 kN.

Como ocorreu nos outros protótipos, ao longo do seu comprimento também estavam presentes deformações, contudo não foram verificadas imperfeições em sua seção transversal, quando a seção real do perfil foi sobreposta à seção nominal desenhada no gabarito em papel milimetrado.

Os extensômetros E1 e E2 colados nos flanges não apresentaram bons resultados devido às imperfeições no comprimento, fazendo com que a centragem sob carga fosse abandonada. A centragem foi realizada então com base apenas na geometria da seção transversal.

#### **4.7.3.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -3C**

O protótipo MOD  $\Sigma$ -3C foi ensaiado com o carregamento centrado. Realizou-se um pré-ensaio até a carga de 57,67 kN, sendo verificada uma diferença entre os valores das deformações medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges do perfil e pelos pares de extensômetros colados nas paredes  $w_I$ .

Foi realizada uma nova preparação de sua superfície, além da primeira descrita no item 4.5, para tentar minimizar a influência da variação do seu comprimento nos valores das deformações medidas pelos extensômetros.

O protótipo não apresentou diferenças angulares entre os flanges que se encontravam paralelos e fazendo um ângulo de  $90^\circ$  com as paredes  $w_I$ , nem mesmo deformações visíveis em sua seção transversal.

#### **4.7.4. Série dos Protótipos MOD $\Sigma$ -4**

Os protótipos da série MOD  $\Sigma$ -4 tiveram o mesmo esquema de extensometria que os MOD  $\Sigma$ -2 e MOD  $\Sigma$ -3, com um par de extensômetros colados à meia altura das parede  $w_I$  do protótipo e dois extensômetros colados um em cada flange na parte externa, com a finalidade de orientar a centragem sob carga.

Nessa série, como nas anteriores, também foi utilizado um LVDT posicionado à meia altura do perfil e no centro do enrijecedor intermediário, com o objetivo de medir os deslocamentos do enrijecedor. A figura (4.18) apresenta o esquema de instrumentação para a série de protótipos a ser ensaiada.

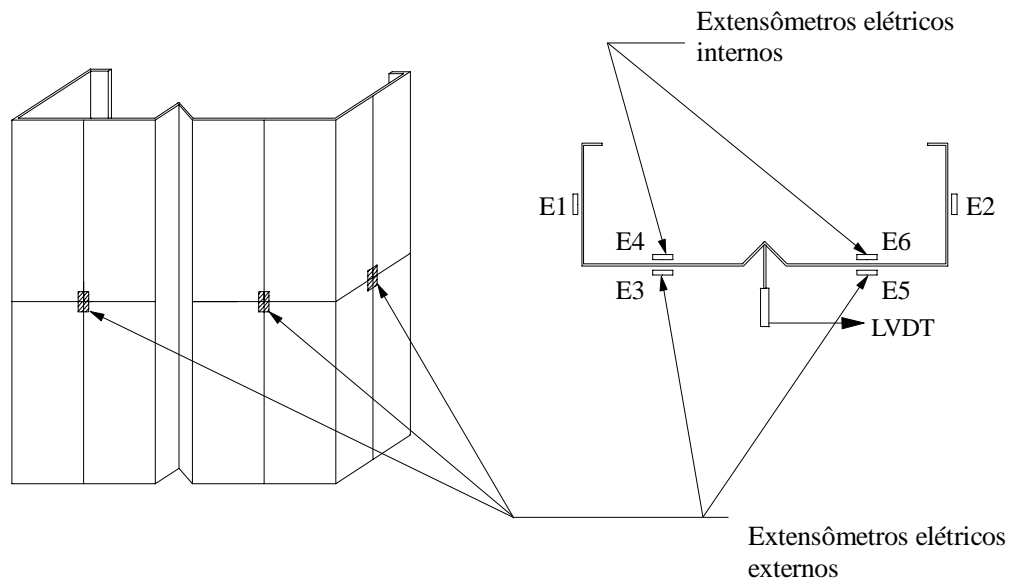


Figura 4.18- Esquema geral de instrumentação dos protótipos da série MOD  $\Sigma$ -4.

#### 4.7.4.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -4A

Para o protótipo MOD  $\Sigma$ -4A, foram realizados dois pré-ensaios para o teste de centragem sob carga.

No primeiro foi aplicada carga até 57,67 kN e como os extensômetros apresentaram valores de deformações muito diferentes, houve a necessidade de reposicionar o perfil no gabarito, sem que fosse introduzida excentricidade; pois foram registradas diferenças angulares de uma das paredes  $w_I$  em relação aos ângulos previstos de  $0^\circ$ , quando a seção transversal do protótipo a ser ensaiado foi superposta à seção nominal desenhada em papel milimetrado (figura 4.19).

No segundo pré-ensaio, já com o protótipo reposicionado no gabarito, foi aplicada carga até 75,50 kN; nesse caso os valores das deformações medidas pelos extensômetros apresentaram-se mais aproximados.

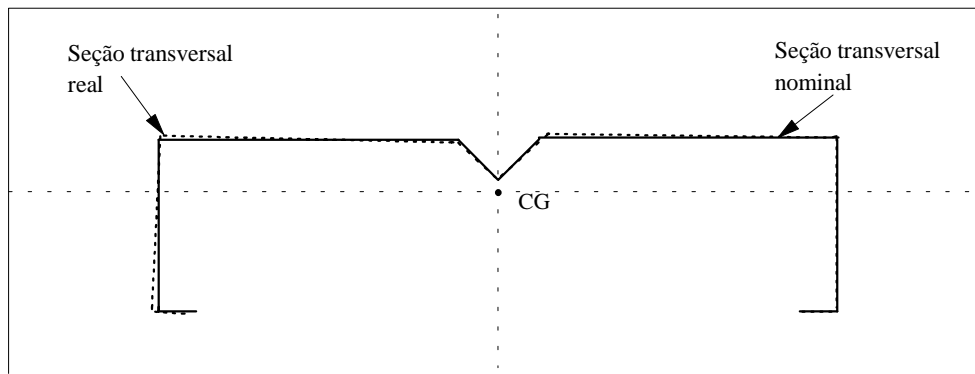


Figura 4.19- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD Σ-4A e a seção transversal real da seção com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

#### 4.7.4.2. Protótipo MOD Σ-4B

No protótipo MOD Σ-4B foi efetuado um pré-ensaio para o teste de centragem, durante o qual foi aplicada carga até 56,30 kN. Como no protótipo anterior da mesma série, o MOD Σ-4A, este também apresentou deformações angulares em sua seção transversal.

Superpondo a seção transversal do protótipo a ser ensaiado à seção nominal desenhada em papel milimetrado, foram registradas diferenças angulares entre uma das paredes  $w_I$  e os flanges, em relação aos ângulos previstos de  $0^\circ$ . Diferenças ao longo do seu comprimento também foram registradas (figura 4.20).

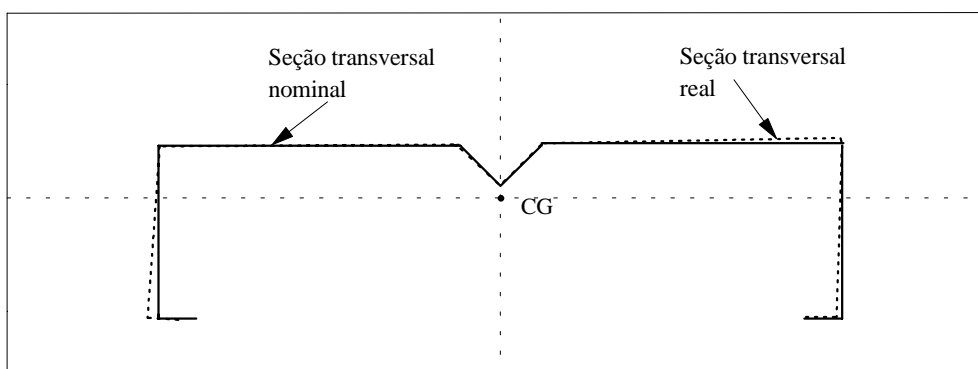


Figura 4.20- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD Σ-4B e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

#### 4.7.4.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -4C

No protótipo MOD  $\Sigma$ -4C, foi realizado um pré-ensaio até a carga de 67,27 kN. Como ocorreu com os protótipos anteriores, este também revelou deformações nos flanges que, apesar de não apresentarem um ângulo de  $90^\circ$  com as paredes  $w_l$ , estavam paralelos entre si. Com o aumento do carregamento durante o pré-ensaio, os valores das deformações medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados ao flange apresentavam-se mais próximos.

Imperfeições ao longo do comprimento também foram registradas e encontram-se relatadas na tabela do item 4.5.

A figura (4.21) ilustra o esquema da seção transversal nominal do perfil indicada pela linha contínua, e da seção transversal real do perfil representada pela linha pontilhada, no gabarito de papel milimetrado.

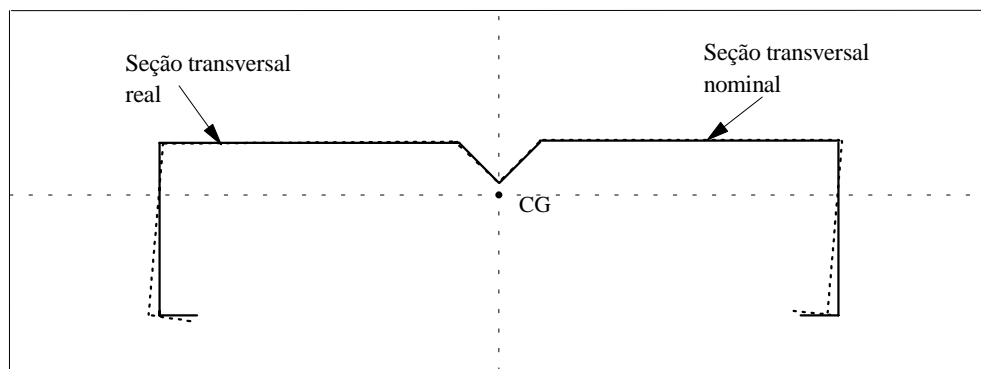


Figura 4.21- Seção transversal nominal da seção do perfil MOD  $\Sigma$ -4C e seção transversal real da seção, com posicionamento em relação ao centro de gravidade.

## **CAPÍTULO 5**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

#### **5.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é feita a apresentação e a análise dos resultados experimentais dos protótipos ensaiados nas séries MOD  $\Sigma$ -1, MOD  $\Sigma$ -2, MOD  $\Sigma$ -3 e MOD  $\Sigma$ -4.

Também é avaliada a influência das imperfeições geométricas dos protótipos nos resultados dos ensaios. Em seguida, os resultados experimentais são comparados com os teóricos obtidos pela formulação da AISI e pela formulação do projeto da norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço, constituídas por perfis formados a frio.

#### **5.2. DESCRIÇÃO DAS SÉRIES DE ENSAIOS E RESULTADOS DAS MEDIÇÕES**

Para todos os protótipos ensaiados, as análises limitam-se a estudar comportamento da parede mais larga do perfil. Desse modo, durante a centragem de carga preocupou-se com a distribuição uniforme de tensões na parede  $w_1$ , não sendo observada a centragem completa da seção transversal do protótipo.

A centragem foi realizada inicialmente utilizando o posicionamento geométrico do protótipo em gabarito de papel milimetrado, localizado entre as placas de aço das rótulas de apoio, e em seguida, sob carga, foi analisado o nível de deformações existentes.

A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos.



### **5.2.1. Protótipo MOD $\Sigma$ -1A**

Seguindo a metodologia descrita no item 4.7 para a execução dos ensaios, e após sucessivas tentativas, obteve-se a centragem da carga nas paredes  $w_I$  do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

A figura (5.1) apresenta os valores das deformações, em função do carregamento aplicado, medidas através dos extensômetros E1 e E2, colados à meia altura dos flanges.

Observa-se que no início do carregamento os valores das deformações medidas pelos extensômetros são bem próximos. À medida que o carregamento aplicado aumenta, os valores das deformações variam caracterizando uma distribuição não uniforme da carga.

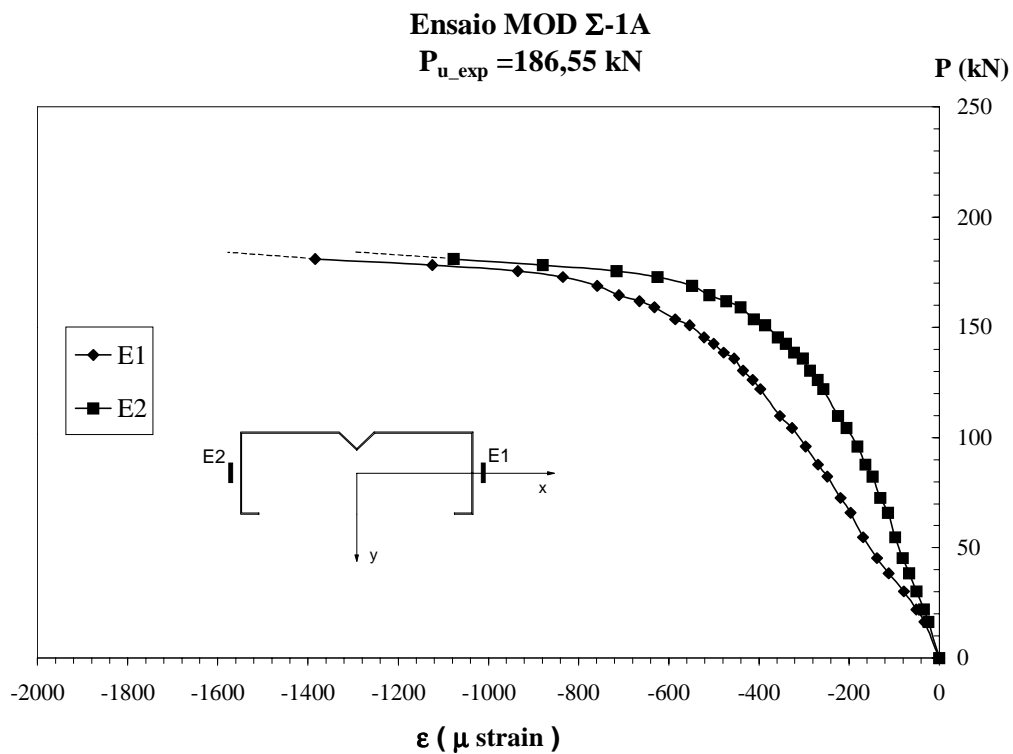


Figura 5.1- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

Como foi observado que a distribuição de tensões nas paredes  $w_I$  apresentaram-se uniformes, deu-se continuidade ao ensaio até o protótipo atingir a sua carga última. O valor da carga última obtida foi de 186,55 kN.

Na figura (5.2) tem-se os valores das deformações medidas por extensômetros colados em uma das paredes  $w_I$ . A flambagem local foi detectada através de extensômetros colados interna e externamente ao longo do perfil. Observa-se a caracterização do início da flambagem local através da divergência das deformações obtidas pelos extensômetros interno e externo.

De acordo com as deformações obtidas, o início da flambagem local ocorreu para a carga de 142,65 kN.

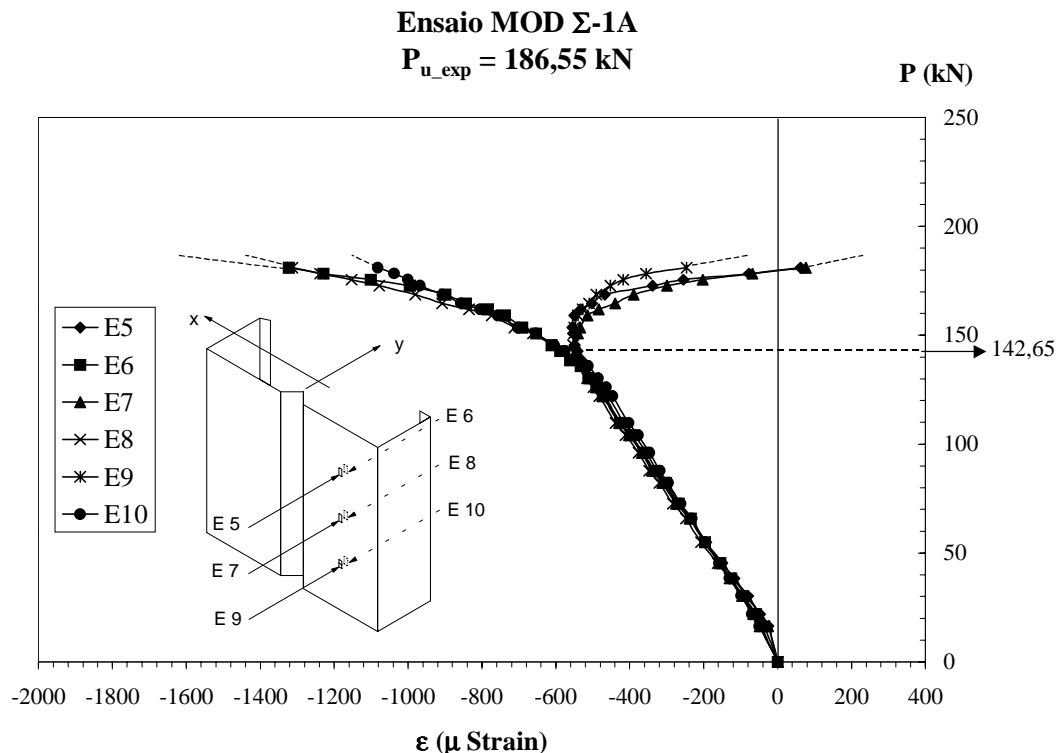


Figura 5.2- Deformações nos extensômetros E5 a E10 colados ao longo do comprimento do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

Na figura (5.3) tem-se os valores das deformações medidas pelos extensômetros E3 e E4. Observa-se, nesse caso, que a divergência de deformações provocadas pelo início da flambagem local ocorreu no nível de carga 138,54 kN.

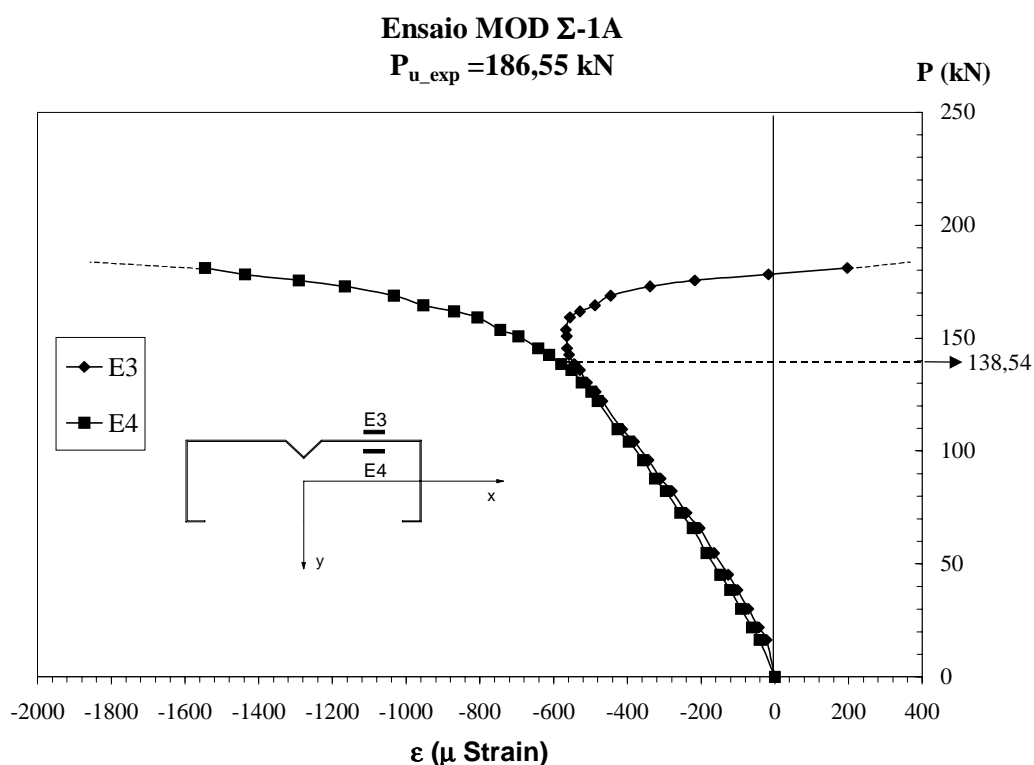


Figura 5.3- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

A diferença do início da flambagem local na parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E3 e E4, para a parede onde foram colados os extensômetros E5 a E10 é de 2,88%, o que caracteriza uma boa centragem e ainda a distribuição uniforme de carga nas paredes  $w_I$  do protótipo.

A foto (5.1) apresenta o perfil MOD  $\Sigma$ -1A no pórtico de ensaio, após atingir a carga última. Verifica-se que o posicionamento do mecanismo de colapso foi influenciado pela excentricidade imposta ao perfil, essa excentricidade visa uma distribuição melhor de tensões e foi induzida pelas imperfeições existentes influenciando o mecanismo de colapso.



Foto 5.1- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -1A.

Nas figuras (5.4) e (5.5) pode-se visualizar, respectivamente, a evolução das deformações externas e internas medidas ao longo do comprimento da parede  $w_1$ , por meio das deformações nos extensômetros externos (E5, E7 e E9) e internos (E6, E8 e E10).

Observa-se que após a carga de 168,71 kN, a meia onda de flambagem local não é mais simétrica em relação à meia altura, caracterizando assim o início da plastificação.

Para avaliar o deslocamento do enrijecedor intermediário nos ensaios posteriores, foi posicionado um LVDT à meia altura da coluna.

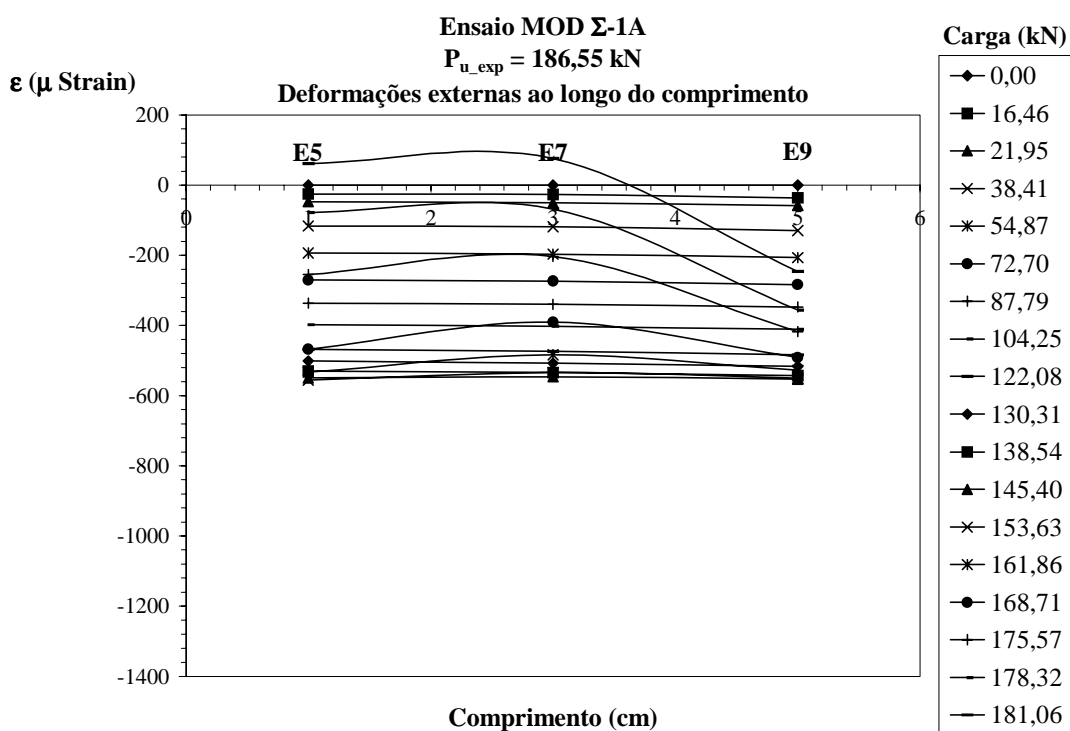


Figura 5.4- Deformações externas na região da parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7 e E9, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

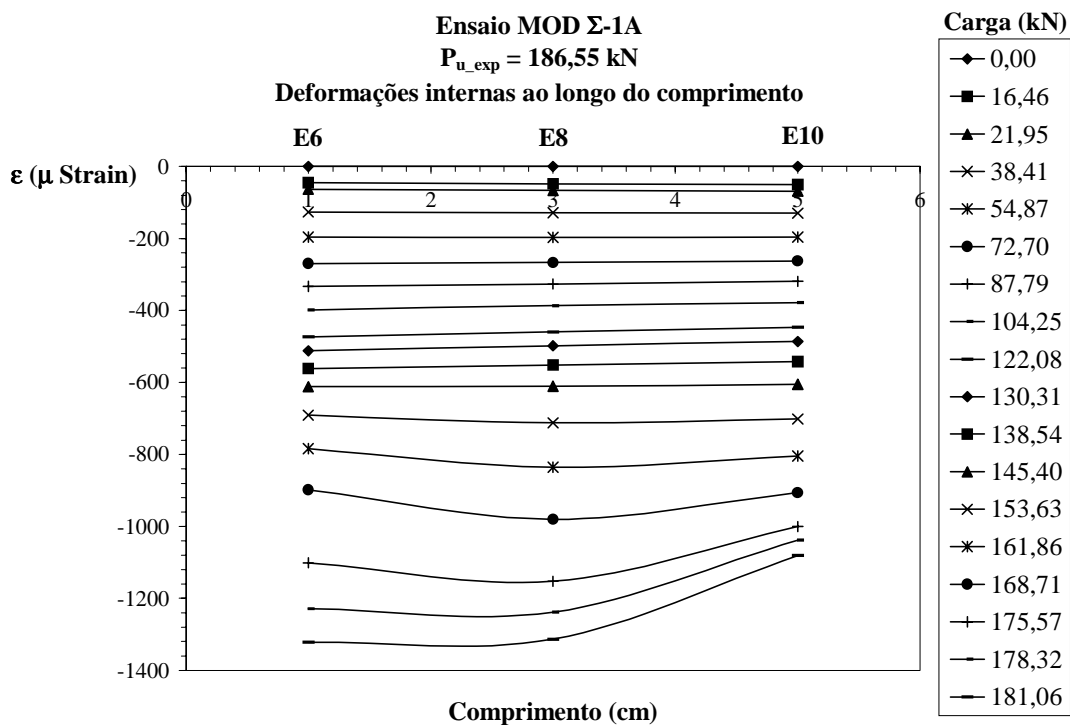


Figura 5.5- Deformações internas na região da parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E6, E8 e E10, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1A.

### **5.2.2. Protótipo MOD $\Sigma$ -1B**

Como descrito no item 4.7.1.2, foram realizados um teste e em seguida o ensaio. No primeiro foi aplicado o carregamento até 153,68 kN e, como nenhum fenômeno de flambagem local foi registrado, a coluna foi descarregada.

Para eliminar a influência das imperfeições observadas no teste, foi imposta excentricidade ao protótipo, após sucessivas tentativas de centragem da carga. O ensaio foi realizado com o protótipo excêntrico, cujos resultados são descritos a seguir.

A figura (5.6) apresenta os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas através dos extensômetros E1 e E2, colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

Como no protótipo anterior, no início do carregamento os valores das deformações medidas pelos extensômetros E1 e E2 estão bem próximos, todavia, com o aumento do carregamento aplicado, há maior divergência entre os valores das deformações, caracterizando uma distribuição não uniforme da carga.

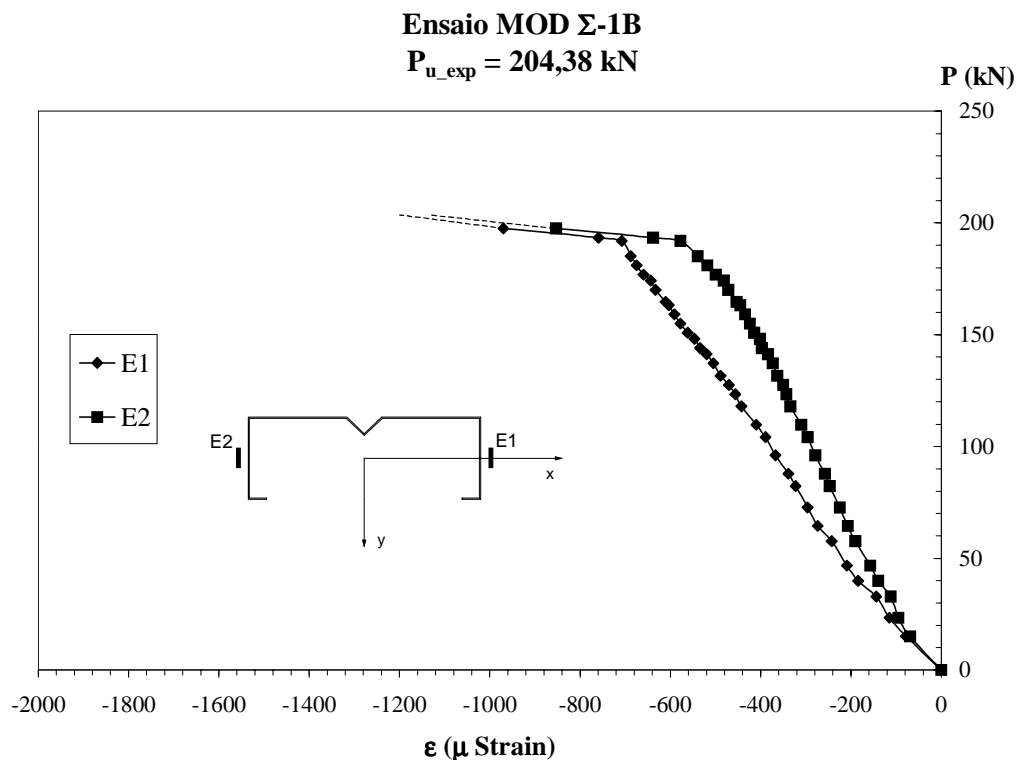


Figura 5.6- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

O valor da carga última obtido nesse ensaio foi de 204,38 kN. A foto (5.2) apresenta o perfil MOD  $\Sigma$ -1B no pórtico de ensaio, após atingir a carga última.



Foto 5.2- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -1B.

Na figura (5.7) tem-se os valores das deformações medidas por extensômetros colados em uma das paredes  $w_I$ . Da mesma forma que no ensaio anterior, a flambagem local foi detectada pela divergência das deformações dos extensômetros colados nas faces interna e externa ao longo da coluna. De acordo com as deformações obtidas, o início da flambagem local ocorreu para a carga de 137,16 kN.

### Ensaio MOD $\Sigma$ -1B

$$P_{u\_exp} = 204,38 \text{ kN}$$

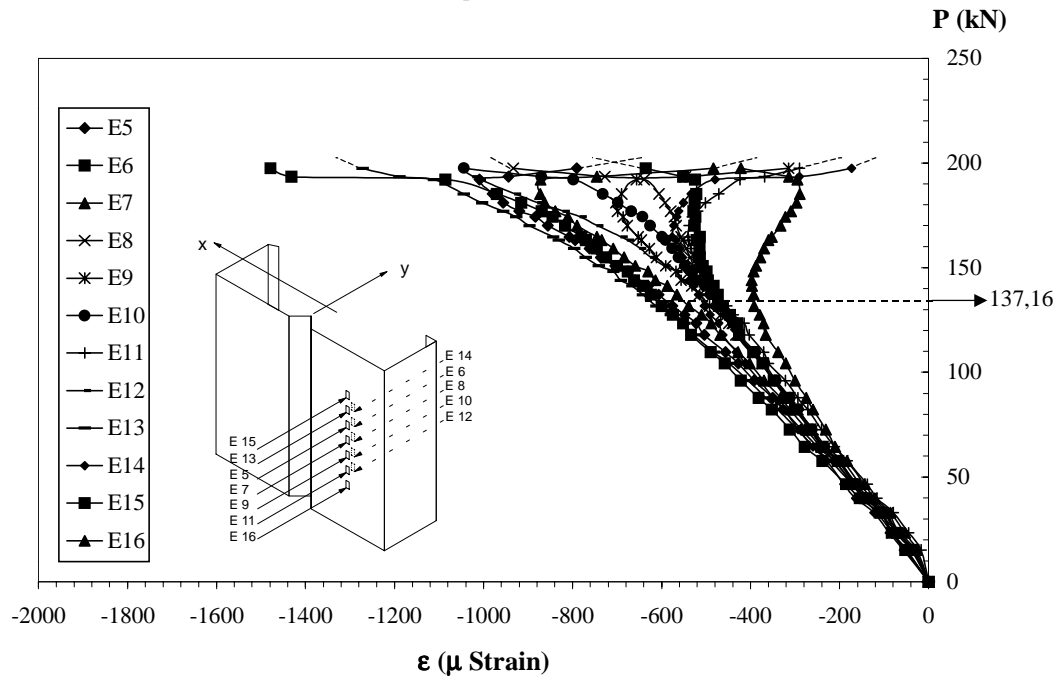


Figura 5.7- Deformações nos extensômetros E5 a E16 colados ao longo do comprimento do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

Na figura (5.8) tem-se os valores das deformações medidas pelos extensômetros E3 e E4. Observa-se a divergência de deformações originando a flambagem local, que nessa parede iniciou-se no nível de carga de 131,68 kN.

Verifica-se também que os valores das deformações medidas pelos extensômetros foram influenciados pela deformação residual do teste para o ensaio.



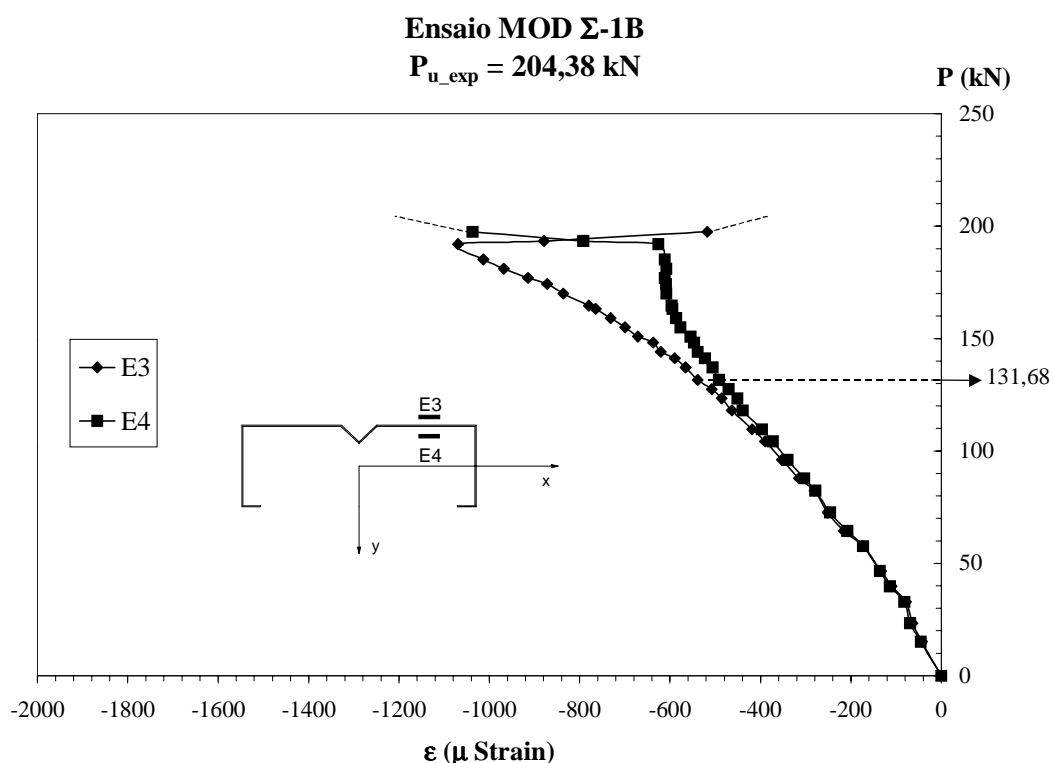


Figura 5.8- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

Como no protótipo anterior, a diferença entre o início da flambagem local na parede  $w_1$ , onde foram colados os extensômetros E3 e E4, e a parede na qual foram colados os extensômetros E5 a E15, é de 3,99%.

Nas figuras (5.9) e (5.10) nota-se, respectivamente, a evolução das deformações externas e internas medidas ao longo do comprimento da parede  $w_1$ , através das deformações nos extensômetros externos (E5, E7, E9, E11, E13, E15 e E16) e internos (E6, E8, E10, E12 e E14).

Em virtude da deformação residual proveniente do teste inicial no protótipo, a análise quanto ao modo de flambagem local foi prejudicada. Observa-se nas figuras (5.9) e (5.10), que a deformação inicial provocou a não simetria na meia onda de flambagem.

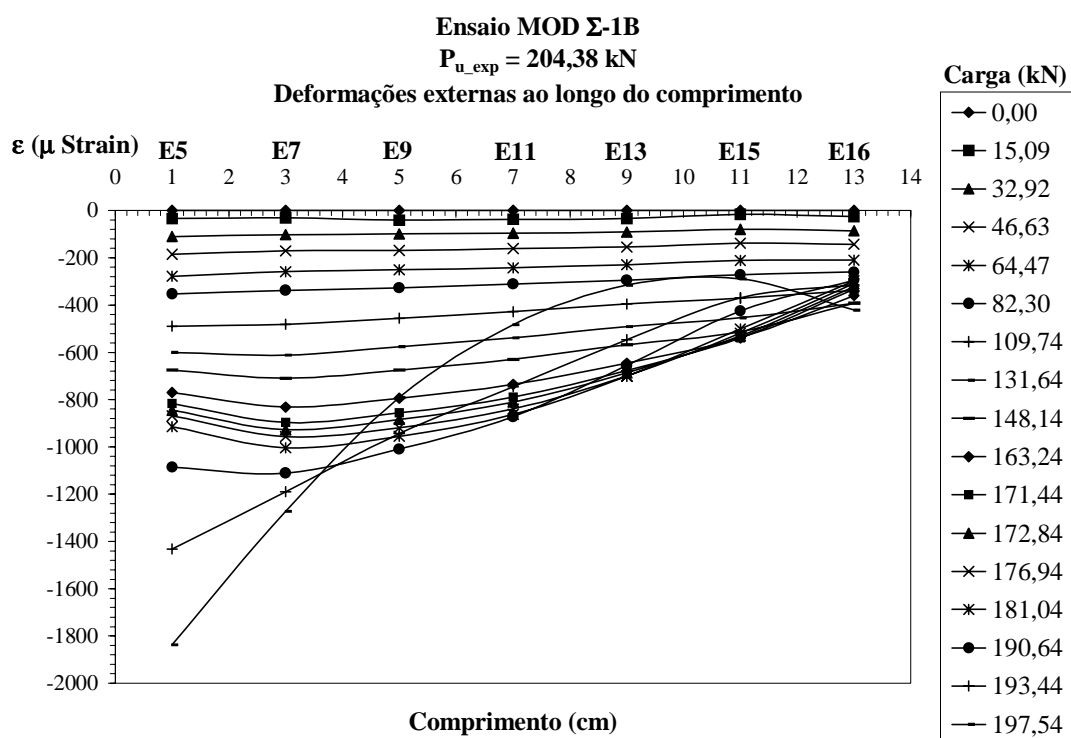


Figura 5.9- Deformações externas medidas na região da parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7, E9, E11, E13, E15 e E16, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

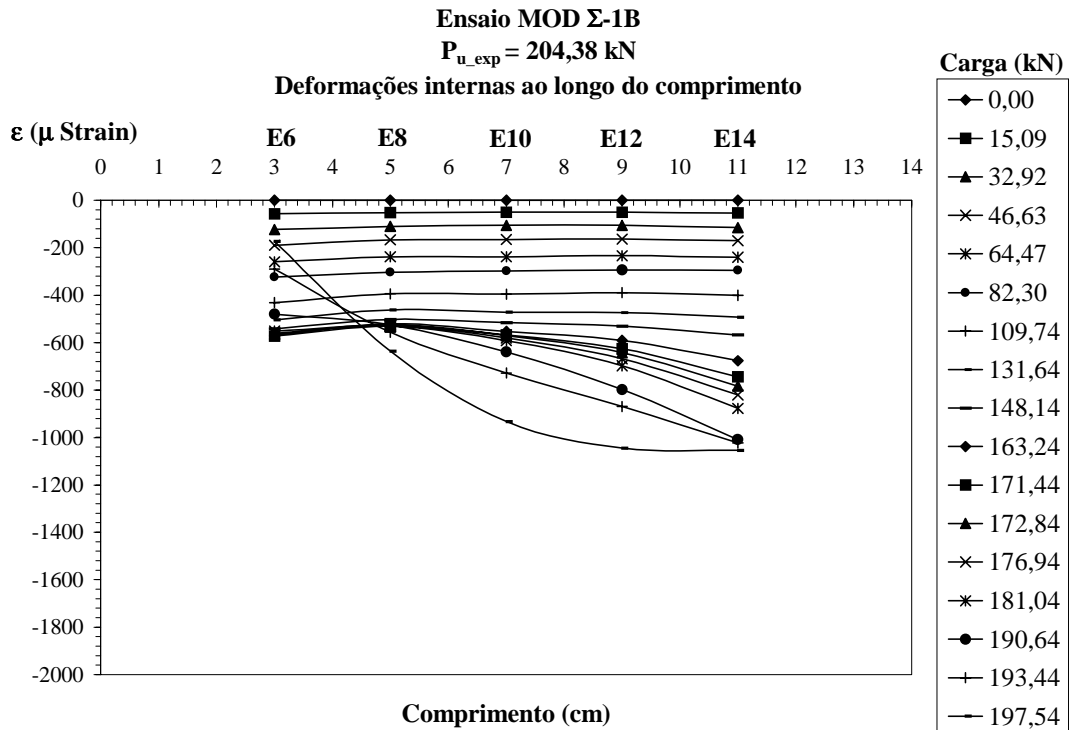


Figura 5.10- Deformações internas na região da parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E6, E8, E10, E12 e E14, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1B.

A figura (5.11) apresenta o gráfico dos deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado à meia altura do perfil, no centro do enrijecedor intermediário. O LVDT foi retirado a 163,23 kN, por questões de segurança. Observa-se que gradualmente houve deslocamento do enrijecedor intermediário, sendo o valor do deslocamento, medido para essa carga, de -6,06 mm.

#### Ensaio MOD $\Sigma$ -1B

$$P_{u\_exp} = 204,38 \text{ kN}$$

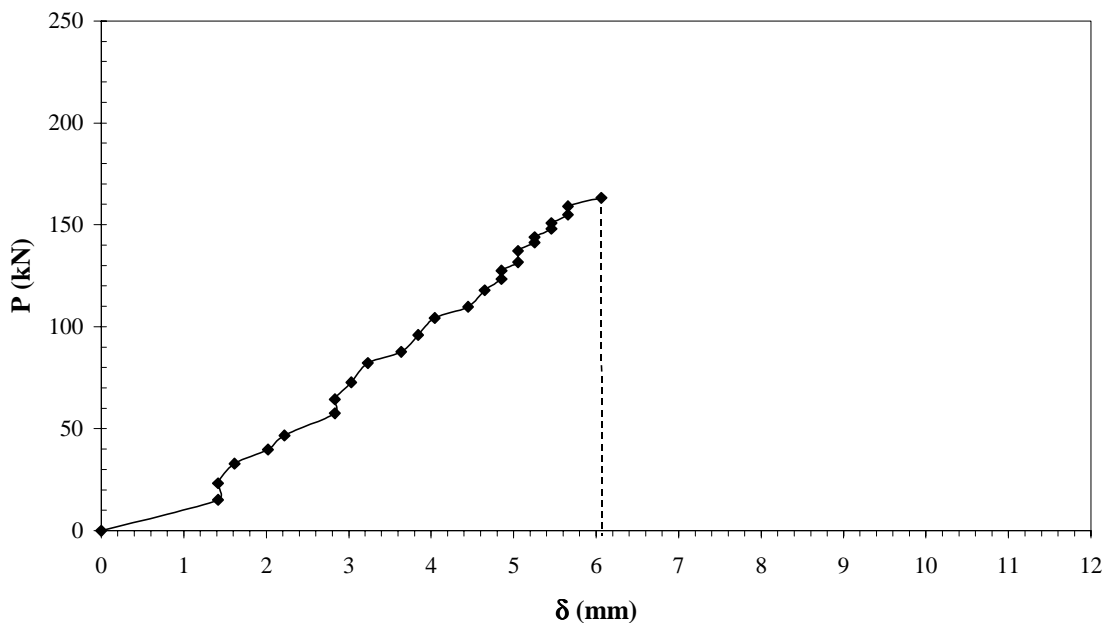


Figura 5.11- Deslocamento do enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -1B.

#### 5.2.3. Protótipo MOD $\Sigma$ -1C

Na figura (5.12) ilustra os valores das deformações, em função do carregamento aplicado, medidas por meio dos extensômetros E1 e E2, colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

Como nos dois protótipos anteriores, da mesma série, no início do carregamento os valores das deformações estão próximos, todavia a medida que se eleva a carga observa-se um afastamento entre os valores das deformações medidas pelos extensômetros, caracterizando uma distribuição não uniforme.

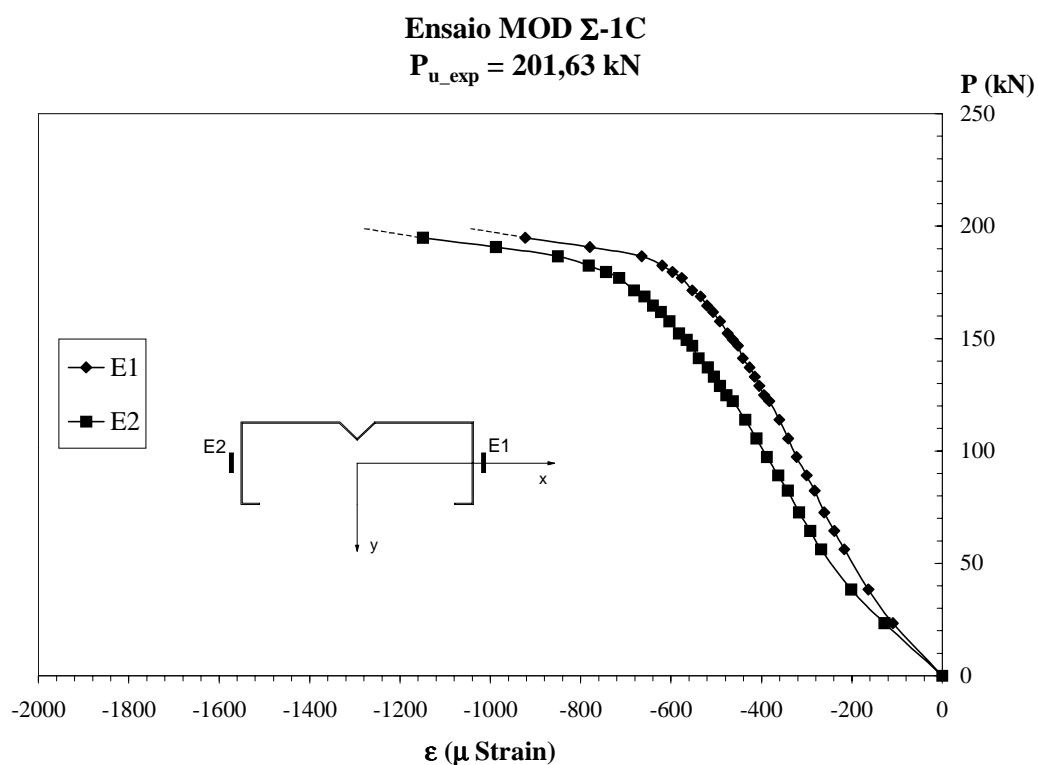


Figura 5.12- Deformações nos extensômetros E1 e E2, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

O valor da carga última obtida nesse ensaio foi de 201,63 kN. A foto (5.3) apresenta o perfil MOD  $\Sigma$ -1C no pórtico de ensaio, após atingir a carga última.

Observa-se por essa foto (5.3) que a excentricidade imposta ao perfil para uma distribuição melhor de tensões, sendo essa excentricidade induzida pelas imperfeições existentes no protótipo, influenciou o posicionamento do mecanismo de colapso.

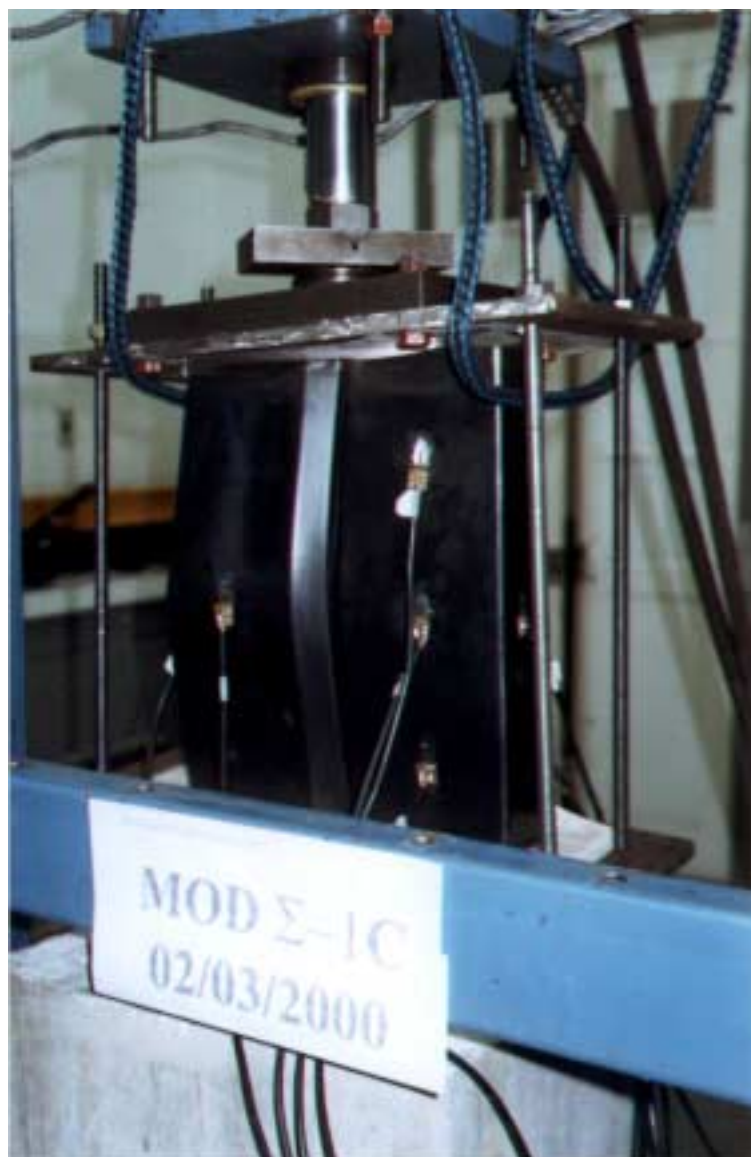


Foto 5.3- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -1C.

Na figura (5.13) tem-se os valores das deformações medidas por extensômetros colados em uma das paredes  $w_I$ . Da mesma forma que nos dois protótipos ensaiados anteriormente, neste a flambagem local também foi detectada através de extensômetros colados nas faces interna e externa do perfil. O início da flambagem local ocorreu, aproximadamente, no nível de carga de 168,71 kN.

### Ensaio MOD $\Sigma$ -1C

$$P_{u\_exp} = 201,63 \text{ kN}$$

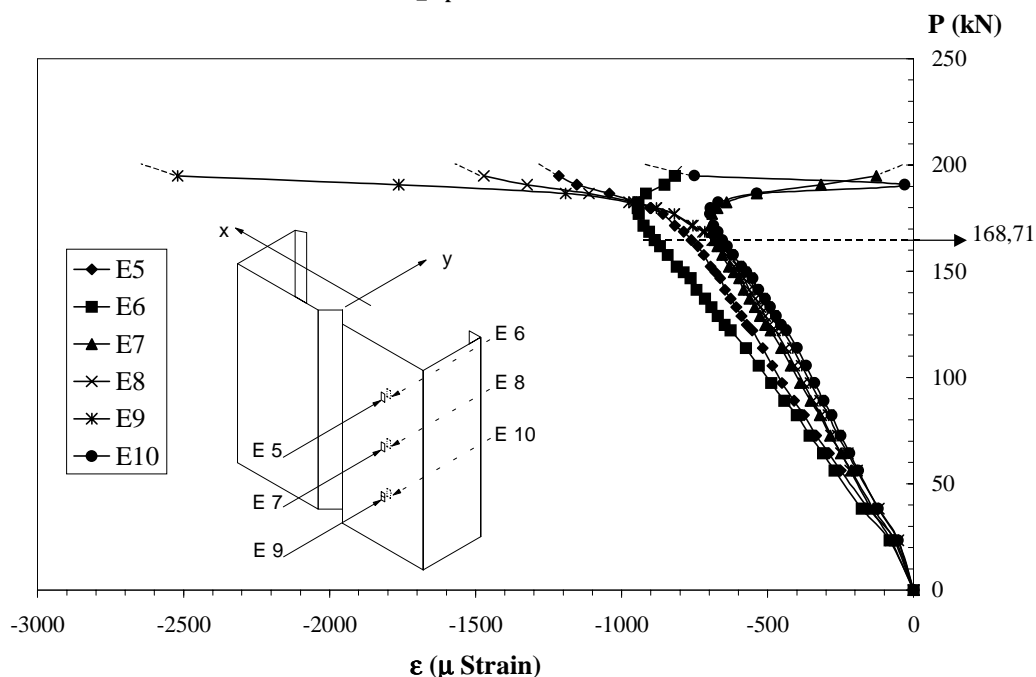


Figura 5.13- Deformações nos extensômetros E5 a E10 colados ao longo do comprimento do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

A figura (5.14) exhibe os valores das deformações medidas pelos extensômetros E3 e E4. A flambagem local, nessa parede, teve início para a carga de 171,46 kN. Observa-se que a diferença entre o início da flambagem local na parede  $w_I$ , na qual foram colados os extensômetros E3 e E4, e na parede onde foram colados os extensômetros E5 a E10 é de 1,60%, de onde se conclui que a excentricidade imposta a esse protótipo fez com que a distribuição de carga fosse uniforme nas paredes  $w_I$ .

### Ensaio MOD $\Sigma$ -1C

$$P_{u\_exp} = 201,63 \text{ kN}$$

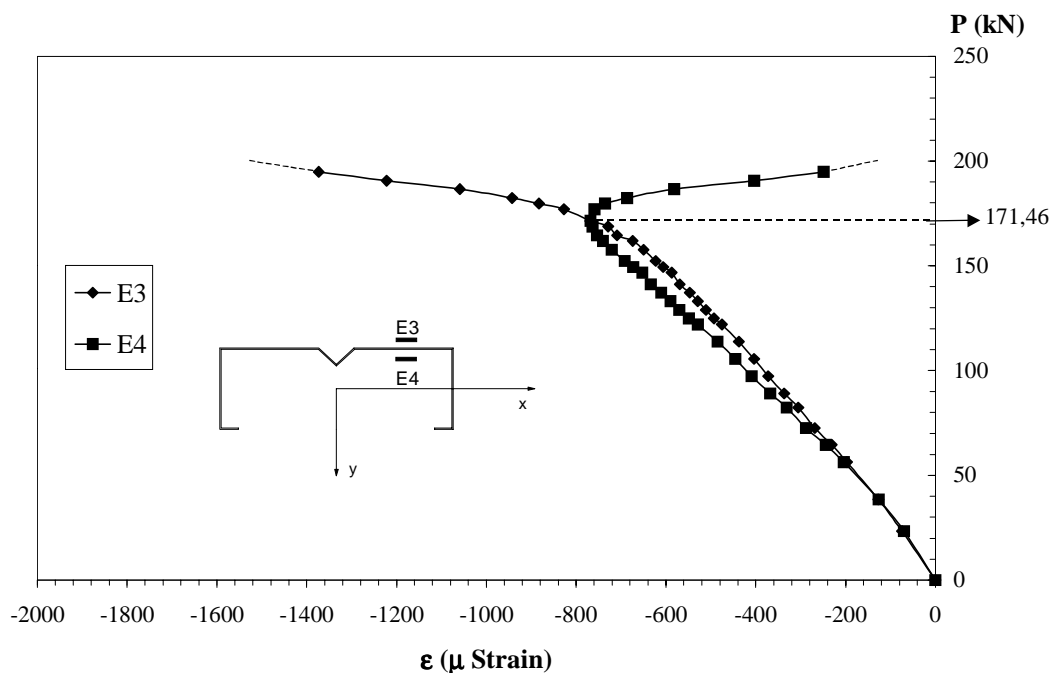


Figura 5.14- Deformações nos extensômetros E3 e E4, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

As figuras (5.15) e (5.16) apresentam, respectivamente, a evolução das deformações nas faces externas e internas medidas ao longo do comprimento da parede  $w_I$ , pelos extensômetros externos (E5, E7 e E9) e internos (E6, E8 e E10).

Nota-se que, após a carga de 179,69 kN, a meia onda de flambagem local não é mais simétrica em relação à meia altura, caracterizando o início da plastificação.

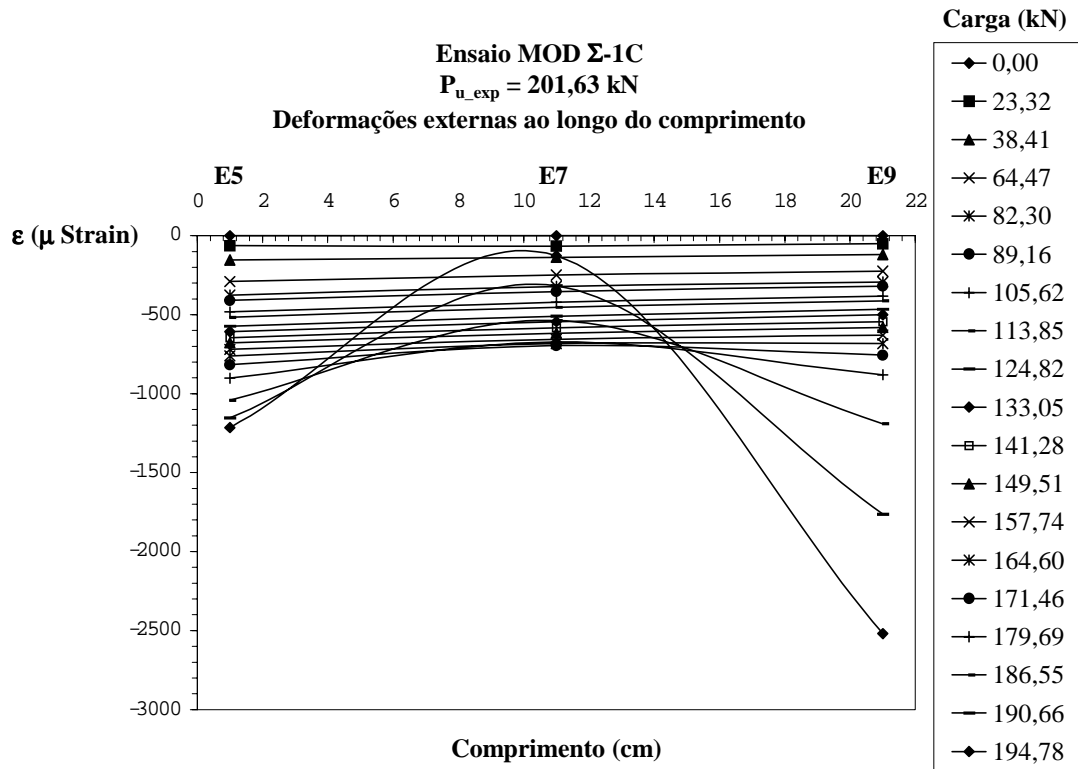


Figura 5.15- Deformações externas na região da parede  $w_l$ , onde foram colados os extensômetros E5, E7 e E9, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.



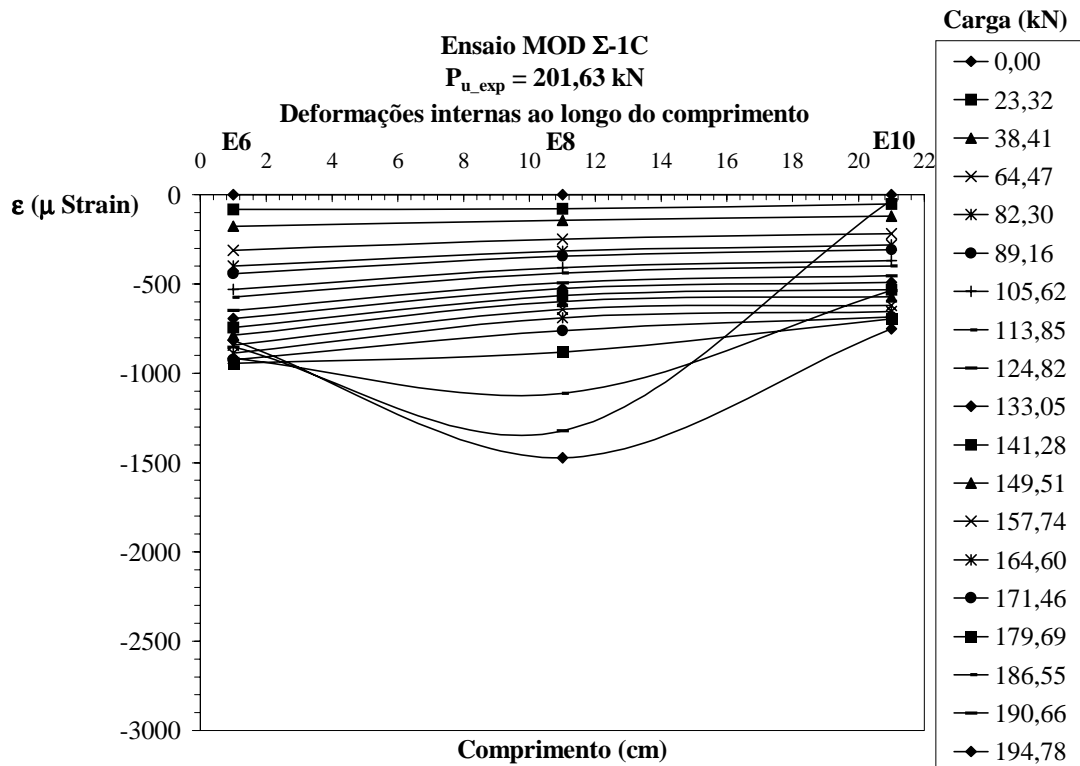


Figura 5.16- Deformações internas na região da parede  $w_I$  onde foram colados os extensômetros E6, E8 e E10, no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -1C.

Nesse ensaio e nos próximos que serão descritos, utilizou-se o LVDT posicionado no enrijecedor à meia altura do protótipo, durante todo o ensaio. Na figura (5.17) visualiza-se o gráfico dos deslocamentos medidos pelo LVDT. Observa-se que gradualmente houve deslocamento do enrijecedor intermediário, sendo o valor do deslocamento máximo medido nesse protótipo de  $-10,11 \text{ mm}$ .

### Ensaio MOD $\Sigma$ -1C

$$P_{u\_exp} = 201,63 \text{ kN}$$

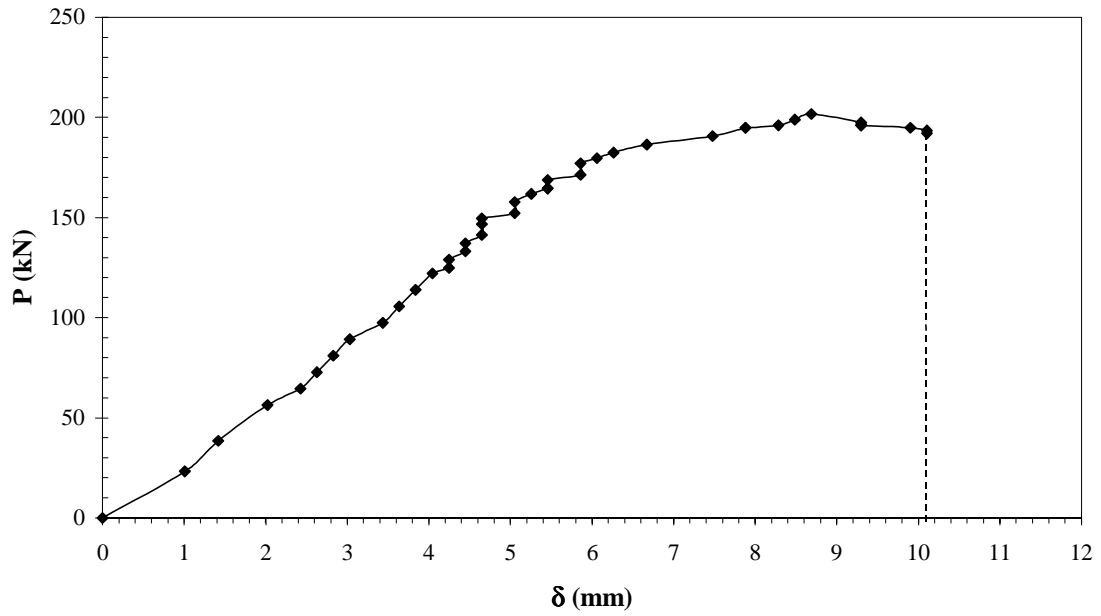


Figura 5.17- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -1C.

A figura (5.18) apresenta as dimensões medidas nos protótipos .

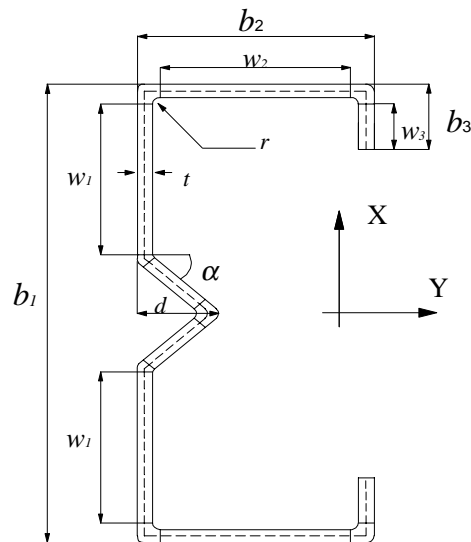


Figura 5.18- Dimensões medidas nos protótipos.

A tabela (5.1) relaciona as dimensões e os valores experimentais obtidos nos ensaios para a série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -1.

Tabela 5.1- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -1.

<b>Protótipos</b>	$L_p$ (mm)	$b_1$ (mm)	$w_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$w_2$ (mm)	$b_3$ (mm)	$w_3$ (mm)	$d$ (mm)	$P_{u\_exp}$ (kN)	$P_{cr\_la\_exp}$ (kN)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1A</b>	372,00	300,13	126,84	74,83	66,83	20,20	16,20	20,40	186,55	138,54
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1B</b>	372,00	299,22	126,31	75,38	67,38	19,24	15,24	20,47	204,38	131,68
<b>MOD <math>\Sigma</math>-1C</b>	373,40	298,58	124,78	74,54	66,54	18,99	14,99	21,68	201,63	168,71

Onde:  $L_p$  → Altura do perfil;

$b_1$  → Largura total da alma;

$w_1$  → Largura do trecho reto das paredes entre o enrijecedor intermediário;

$b_2$  → Largura total do flange;

$w_2$  → Largura do trecho reto do flange;

$b_3$  → Largura total do enrijecedor de extremidade;

$w_3$  → Largura do trecho reto do enrijecedor de extremidade;

$d$  → Altura do enrijecedor intermediário;

$P_{cr\_la\_exp}$  → Menor carga crítica de flambagem local das almas obtida através dos ensaios experimentais em kN;

$P_{u\_exp}$  → Carga última obtida mediante os ensaios experimentais em kN.

A espessura da placa  $t$  e o raio do perfil  $r$  medem 2 mm e são constantes para todos os protótipos ensaiados. O ângulo do enrijecedor intermediário,  $\alpha$ , é igual a 45° para todos os protótipos.

Uma observação importante é que no protótipo MOD  $\Sigma$ -1A foi imposta uma excentricidade de 0,5 cm, no MOD  $\Sigma$ -1B a excentricidade imposta foi de 1 cm e no protótipo MOD  $\Sigma$ -1C, de 0,5 cm.

#### **5.2.4. Protótipo MOD $\Sigma$ -2A**

Na figura (5.19) tem-se as deformações versus o carregamento aplicado, medidas através dos extensômetros E1 e E2, colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -2A. Observa-se que o afastamento dos valores das deformações, medidas pelos extensômetros colados nos flanges, é constatado desde o início do carregamento.

Apesar de não serem constatadas deformações visíveis na seção transversal desse protótipo, imperfeições ao longo do seu comprimento levaram a ser abandonada a centragem de carga, como descrito no item 4.7.2.1, sendo utilizado então o gabarito em papel milimetrado com o desenho da seção nominal do protótipo.

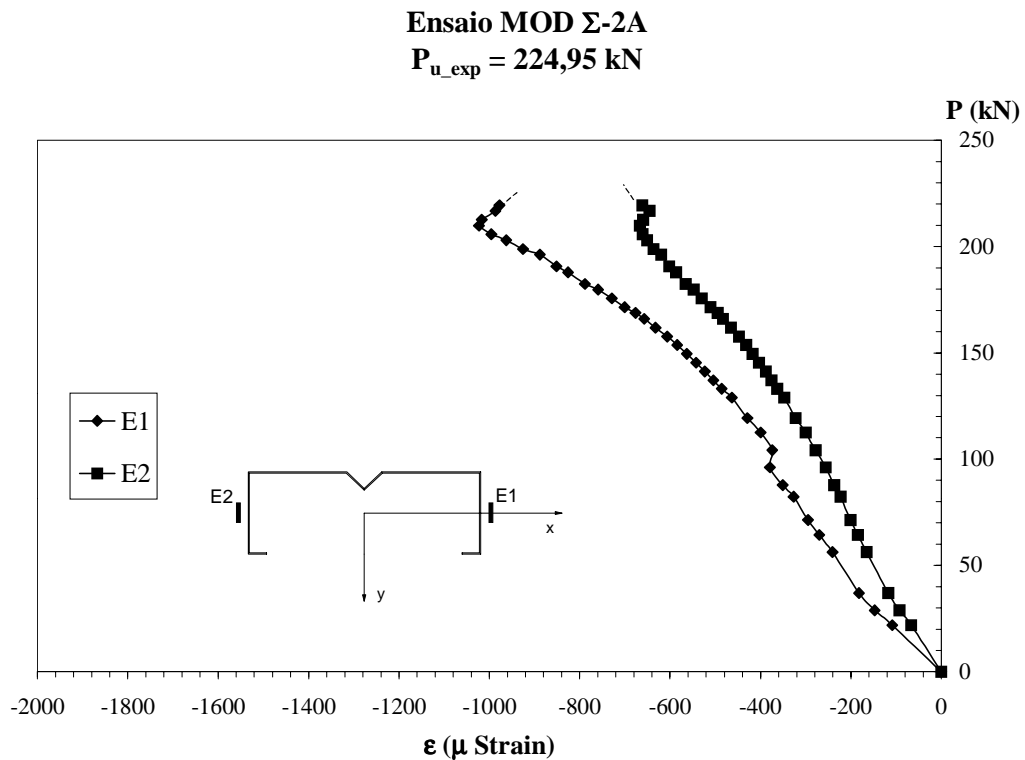


Figura 5.19- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2A.

Nas figuras (5.20) e (5.21) encontram-se os valores das deformações medidas nos extensômetros colados à meia altura do protótipo. A carga última obtida nesse ensaio foi de 224,95 kN.

A flambagem local foi detectada através da divergência de deformações dos extensômetros colados nas faces interna e externa das paredes  $w_I$ : na parede  $w_I$ , na qual foram colados os extensômetros E3 e E4, ocorreu com carga de 182,43 kN, enquanto na parede onde foram colados os extensômetros E5 e E6, ocorreu com carga de 179,69 kN.

Comparando as cargas de flambagem local entre as paredes  $w_I$ , observa-se que a variação é de 1,50%, de onde se conclui que houve uma distribuição uniforme de carga na seção transversal.

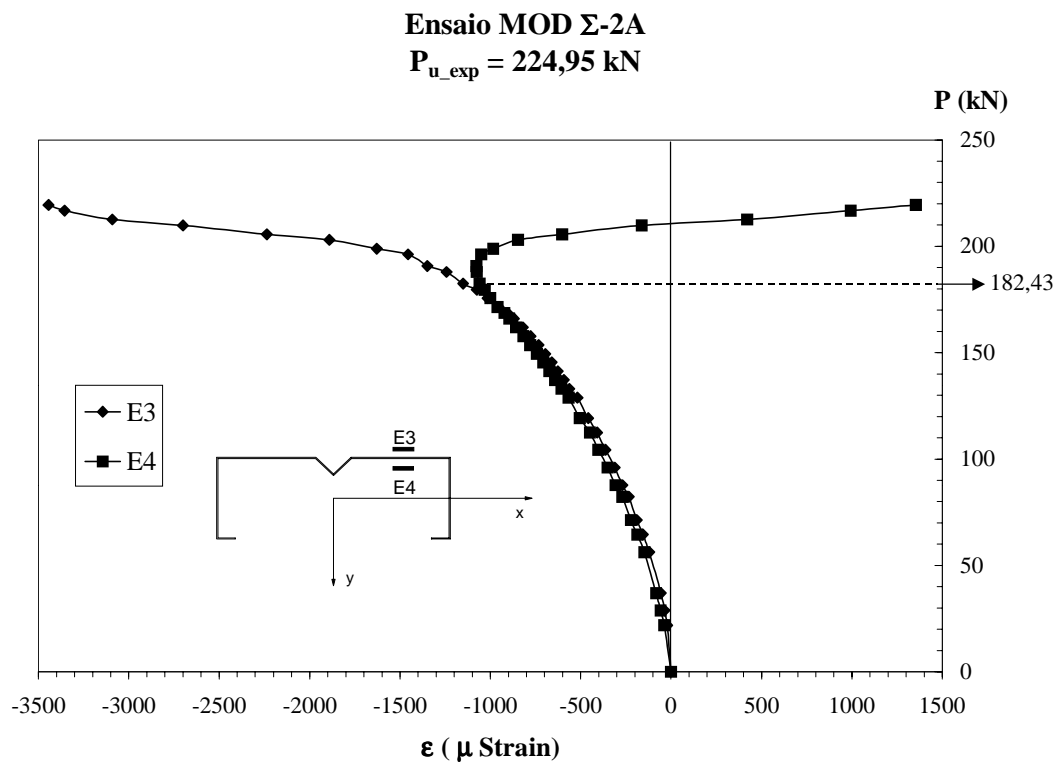


Figura 5.20- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2A.

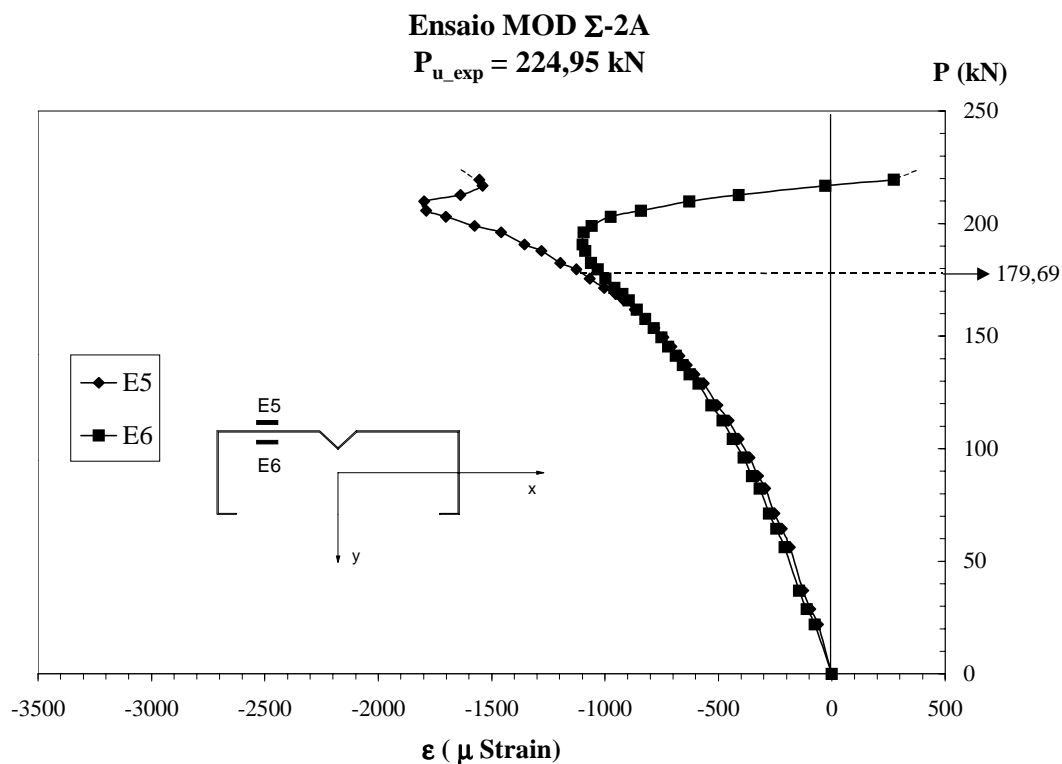


Figura 5.21- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2A.

A figura (5.22) apresenta o gráfico dos deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo, durante todo o ensaio. O valor do deslocamento máximo medido nesse protótipo foi de  $-6,27 \text{ mm}$ .

Verifica-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, não restringindo adequadamente o deslocamento na direção transversal.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -2A**  
**Pu\_exp = 224,95 kN**

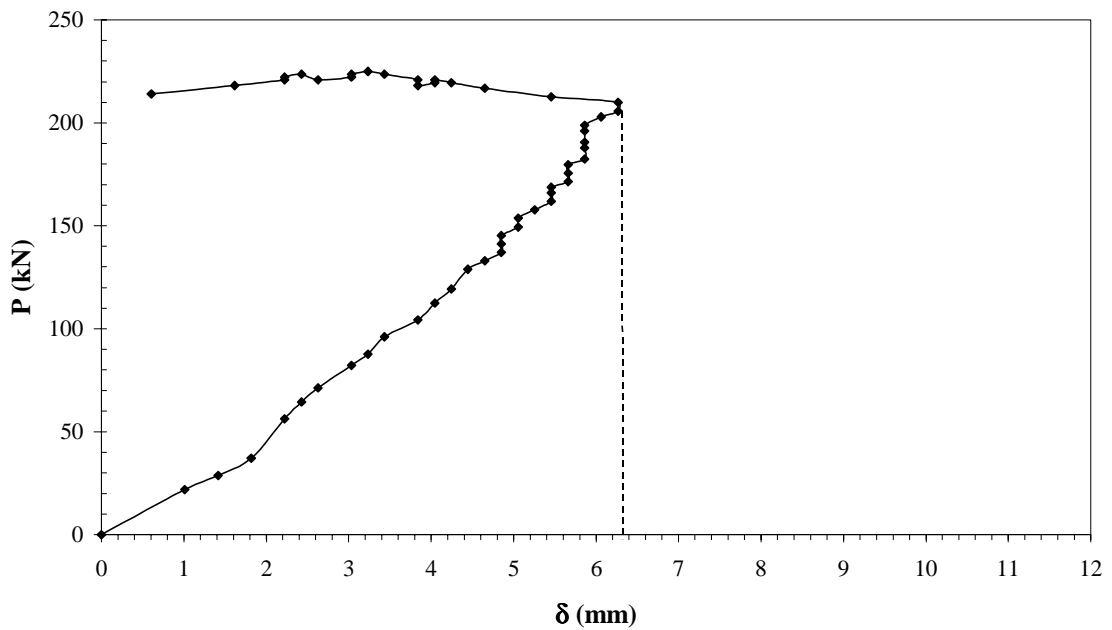


Figura 5.22- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -2A.

A foto (5.4) apresenta o protótipo MOD  $\Sigma$ -2A no pórtico de ensaio após atingir a carga última. Observa-se pelo posicionamento do mecanismo de colapso que houve distribuição uniforme de tensões ao longo da seção transversal.

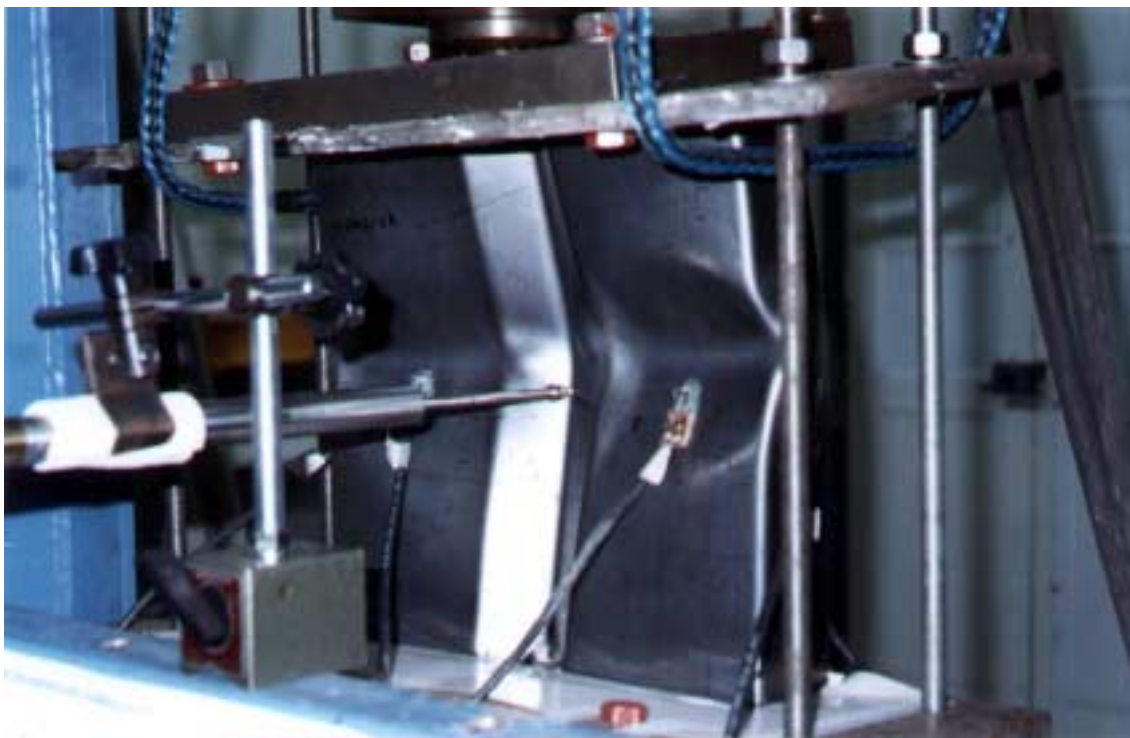


Foto 5.4- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -2A.

#### **5.2.5. Protótipo MOD $\Sigma$ -2B**

Na figura (5.23) tem-se os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -2B.

Como descrito no item 4.7.2.2, esse protótipo revelou imperfeições no seu comprimento, além de deformações na seção transversal que acarretaram o não paralelismo dos flanges. Essas imperfeições influenciaram os valores das deformações medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges, que no início do carregamento apresentaram afastamento, entretanto com o aumento da carga no protótipo os valores apresentaram-se mais próximos.



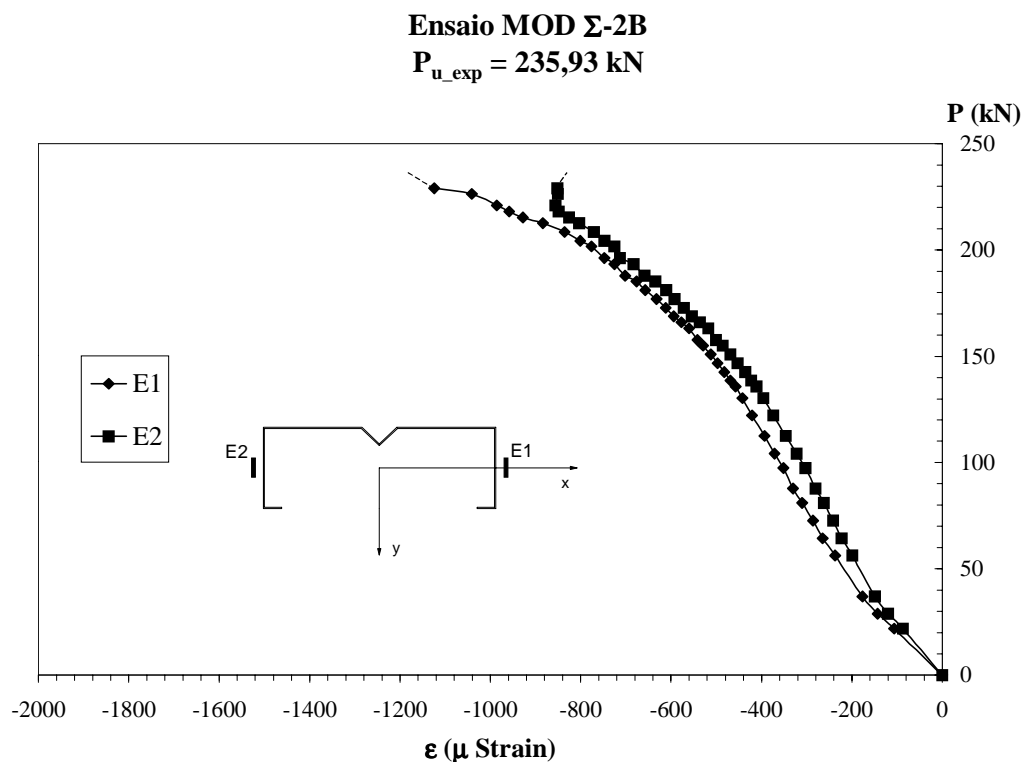


Figura 5.23- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2B.

Nas figuras (5.24) e (5.25) exibem os valores das deformações medidas por extensômetros colados à meia altura das paredes  $w_I$  do protótipo. Como nos protótipos anteriores, a flambagem local foi detectada por intermédio de extensômetros colados nas faces interna e externa da parede com enrijecedor intermediário. A carga última obtida nesse ensaio foi de 235,93 kN.

A flambagem local para a parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5 e E6, ocorreu na carga de 168,71 kN. Para a parede onde foram colados os extensômetros E3 e E4, a carga de flambagem local não foi detectada com exatidão.

A diferença de resultados entre as duas paredes do mesmo protótipo está associada às imperfeições citadas anteriormente. Durante o ensaio foi observado que uma das paredes apresentava maior deslocamento do flange, provocando uma abertura.

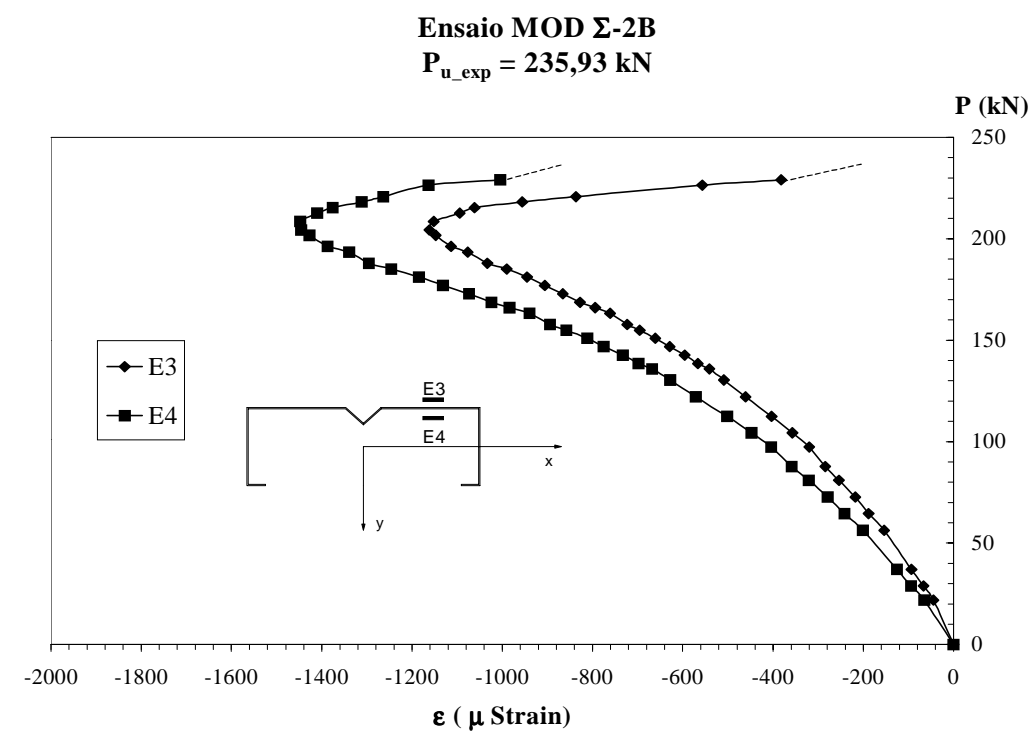


Figura 5.24- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo  
MOD  $\Sigma$ -2B.

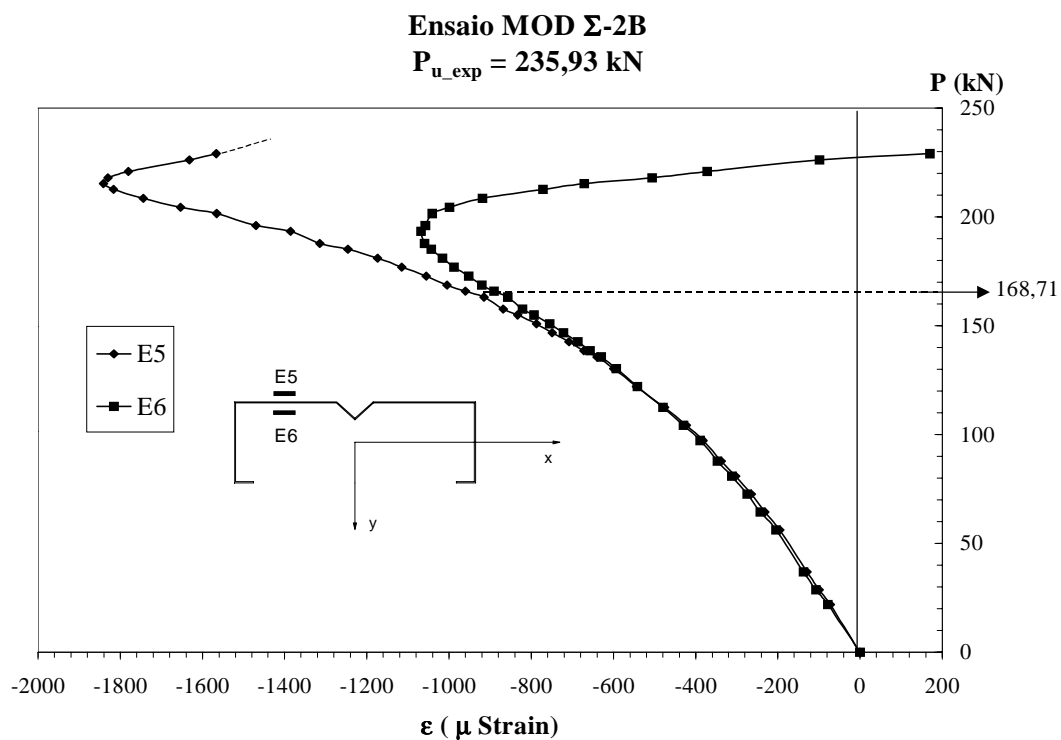


Figura 5.25- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo  
MOD  $\Sigma$ -2B.

A figura (5.26) apresenta os deslocamentos medidos pelo LVDT posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo, no decorrer de todo o ensaio. O valor do deslocamento máximo medido nesse protótipo foi de -6,06 mm.

Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, não restringindo adequadamente o deslocamento na direção transversal.

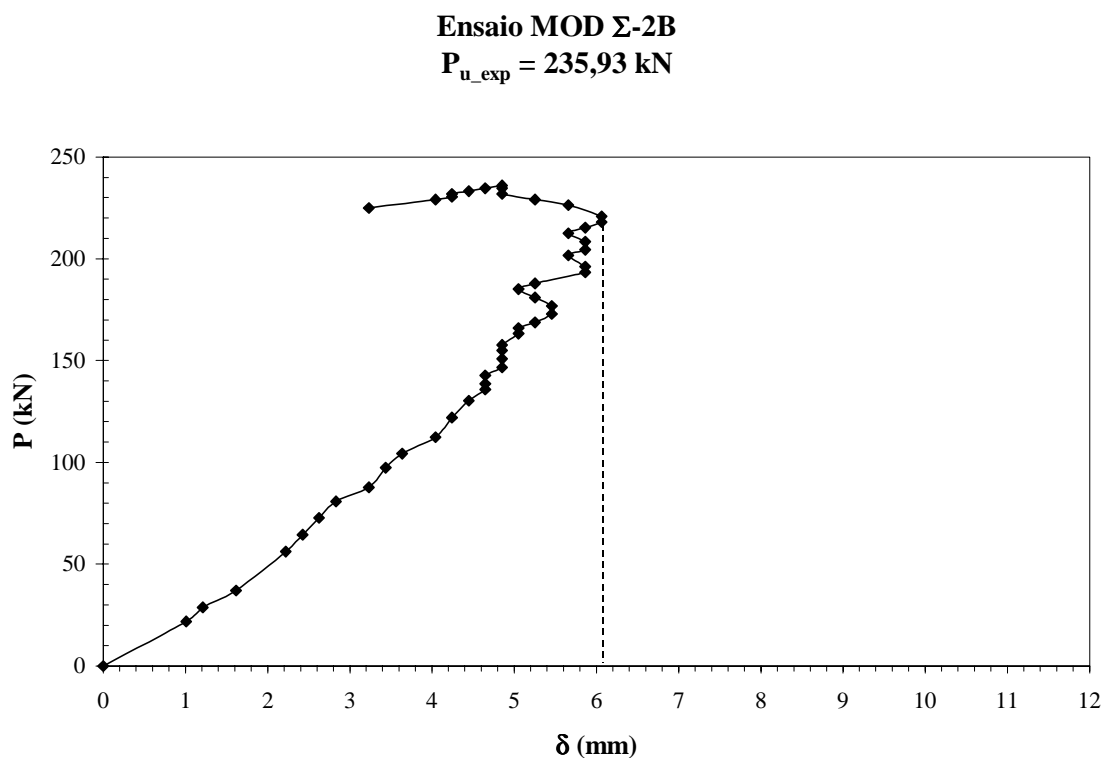


Figura 5.26- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -2B.

A foto (5.5) ilustra o protótipo MOD  $\Sigma$ -2B, após atingir a carga última. Como no protótipo anterior, observa-se neste a formação da charneira plástica na linha média das paredes  $w_1$ , próximo aos extensômetros.

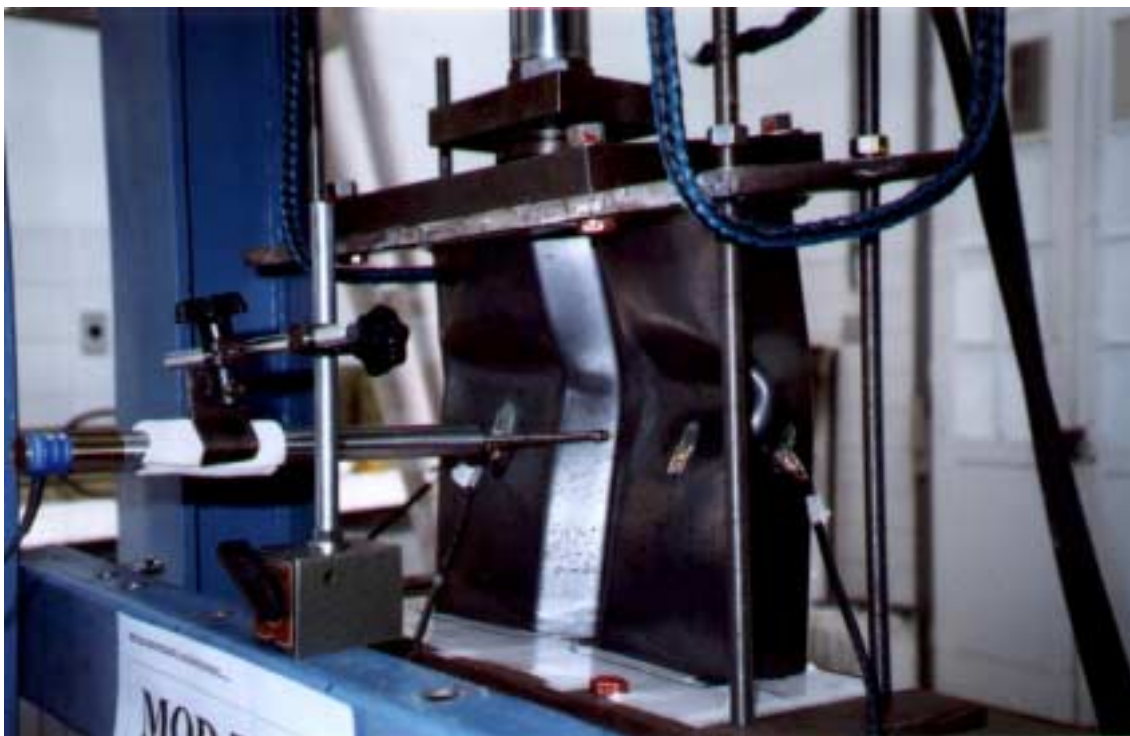


Foto 5.5- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -2B.

#### **5.2.6. Protótipo MOD $\Sigma$ -2C**

A figura (5.27) apresenta os valores das deformações versus carregamento aplicado, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -2C.

Observa-se que há um afastamento dos valores das deformações, medidas pelos extensômetros, desde o início do carregamento, em virtude das imperfeições no protótipo. A carga última foi de 234,55 kN.

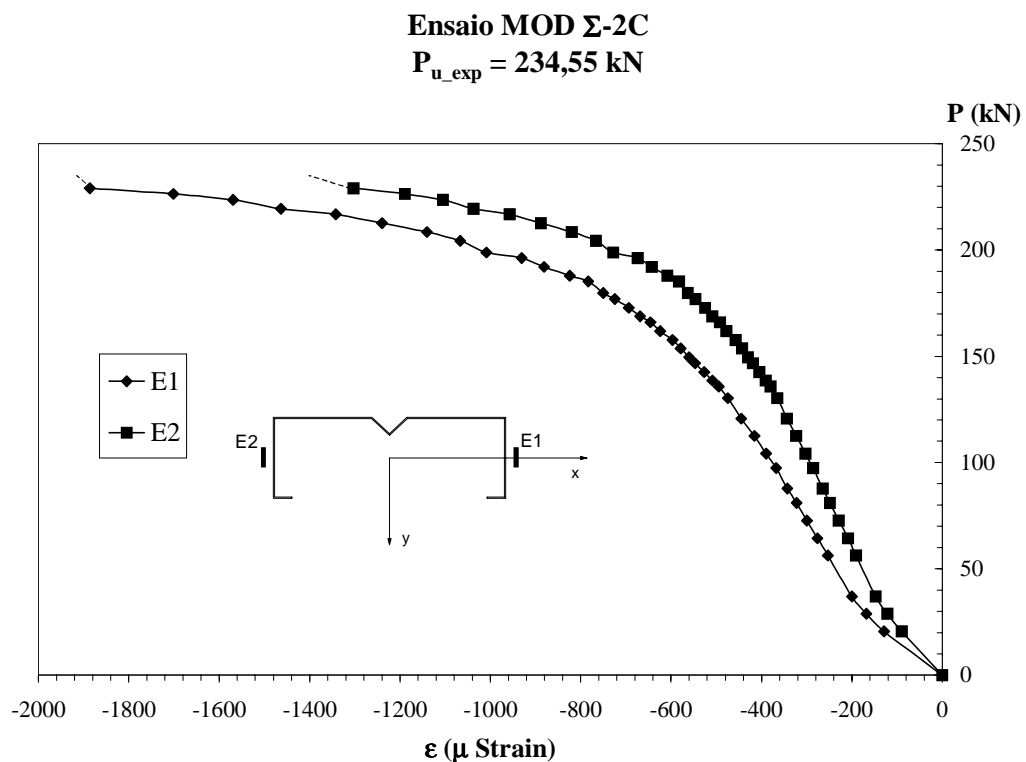


Figura 5.27- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2C.

Nas figuras (5.28) e (5.29) tem-se os valores das deformações medidas por extensômetros colados à meia altura das paredes  $w_I$  do protótipo. Neste protótipo, tal como nos anteriores, a flambagem local foi detectada através de extensômetros colados interna e externamente na parede com enrijecedor intermediário.

A flambagem local para parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E3 e E4 ocorreu na carga de 176,94 kN e para a parede na qual foram colados os pares de extensômetros E5 e E6 sucedeu na carga de 196,15 kN.

Comparando as cargas de flambagem local entre as paredes  $w_I$ , a variação é de 9,79%, o que caracteriza distribuição não uniforme de carga, devido à influência das imperfeições na sua centragem.

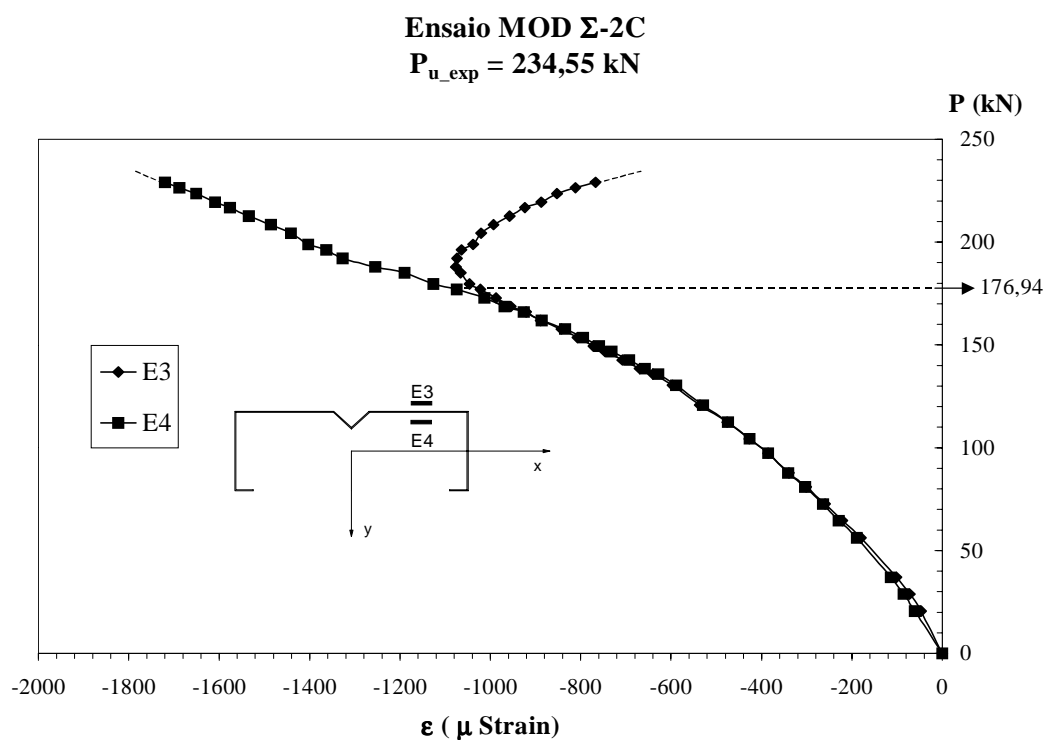


Figura 5.28- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2C.

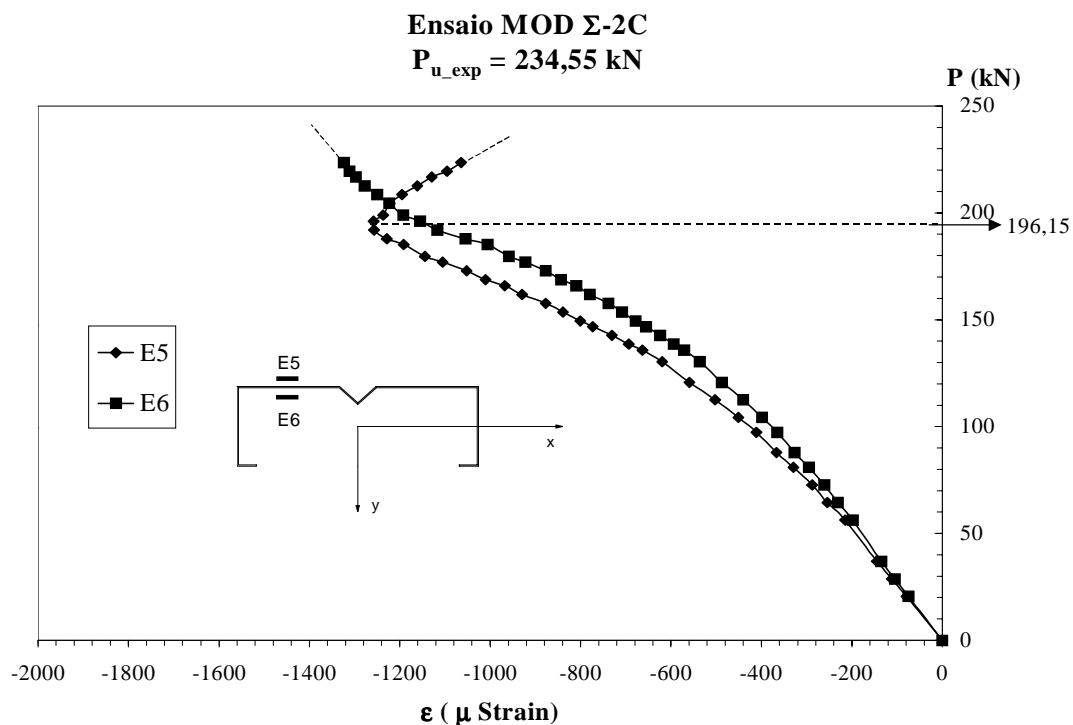


Figura 5.29- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -2C.

A figura (5.30) apresenta os deslocamentos medidos pelo LVDT posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo, durante todo o ensaio. Nota-se que houve deslocamento gradual do enrijecedor, sendo o valor do deslocamento máximo, medido nesse protótipo, de  $-6,27$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -2C**

$$P_{u\_exp} = 234,55 \text{ kN}$$

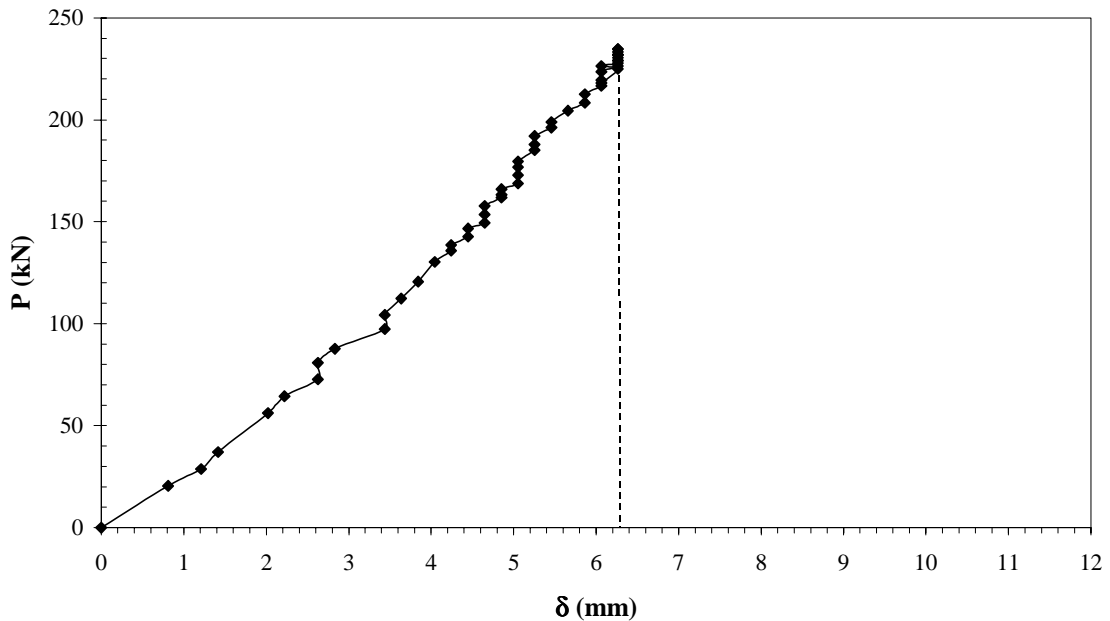


Figura 5.30- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -2C.

A foto (5.6) exhibe o protótipo MOD  $\Sigma$ -2C, após atingir a carga última. Neste ensaio o mecanismo de colapso não se desenvolveu na proximidade da região em que foram colados os extensômetros, como ocorreu nos dois protótipos anteriores, da mesma série, e sim, de forma brusca e repentina. A formação da charneira plástica deu-se na parede onde se encontravam os extensômetros E5 e E6, em função da excentricidade da carga.



Foto 5.6- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -2C.

A partir das dimensões medidas nos protótipos (figura 5.18), é apresentada a tabela (5.2) com as dimensões e os valores experimentais obtidos nos ensaios, para a série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -2. Nessa série não foi imposta nenhuma excentricidade aos protótipos ensaiados.



Tabela 5.2- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -2.

<b>Protótipos</b>	$L_p$ (mm)	$b_1$ (mm)	$w_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$w_2$ (mm)	$b_3$ (mm)	$w_3$ (mm)	$d$ (mm)	$P_{u\_exp}$ (kN)	$P_{cr\_la\_exp}$ (kN)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2A</b>	306,41	300,47	117,13	74,46	66,46	19,95	15,95	30,28	224,95	179,69
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2B</b>	307,29	298,32	114,70	75,09	67,09	18,83	14,83	31,63	235,93	168,71
<b>MOD <math>\Sigma</math>-2C</b>	321,53	300,23	116,49	74,23	66,23	20,04	16,04	30,80	234,55	176,94

### **5.2.7. Protótipo MOD $\Sigma$ -3A**

A figura (5.31) relaciona os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados à meia altura nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -3A. A carga última para esse protótipo é de 209,86 kN.

Após os teste de centragem, como descrito no item 4.7.3.1, foi imposta uma excentricidade de 1 cm, a fim de garantir a mesma deformação nos flanges.

É verificado que inicialmente os valores das deformações medidas pelos extensômetros apresentaram-se próximos, contudo, devido à influência das imperfeições, com o aumento do carregamento estes valores se distanciaram.

### Ensaio MOD $\Sigma$ -3A

$$P_{u\_exp} = 209,86 \text{ kN}$$

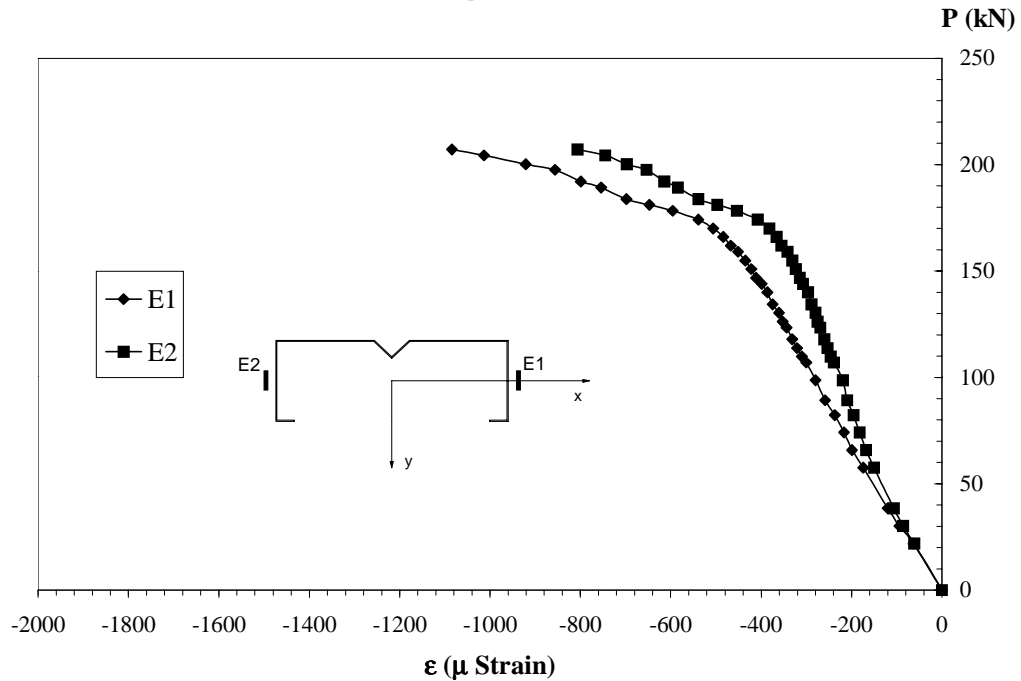


Figura 5.31- Valores das deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3A.

As figuras (5.32) e (5.33) apresentam os valores das deformações medidas pelos pares de extensômetros E3 e E4, bem como E5 e E6, colados à meia altura do protótipo.

A flambagem local para a parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E3 e E4, ocorreu na carga de 170,09 kN. Para a outra parede, em que foram colados os extensômetros E5 e E6, a flambagem local foi detectada na carga de 165,97 kN, sendo a diferença do início da flambagem local entre as paredes  $w_I$  da ordem de 2,42%.

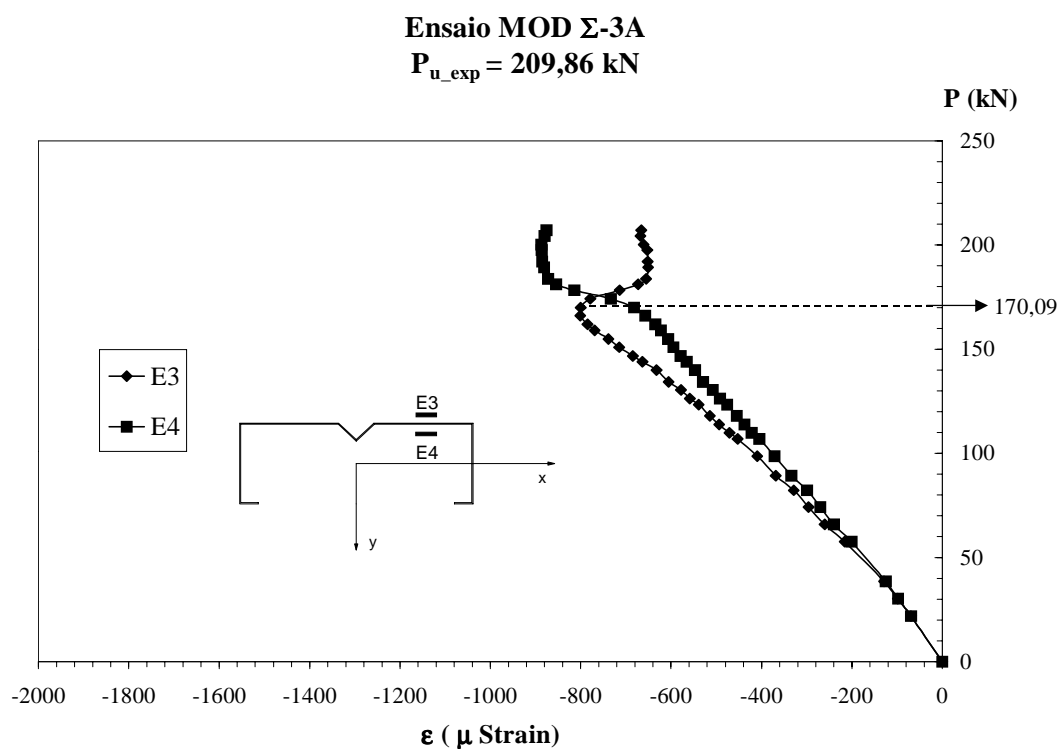


Figura 5.32- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3A.

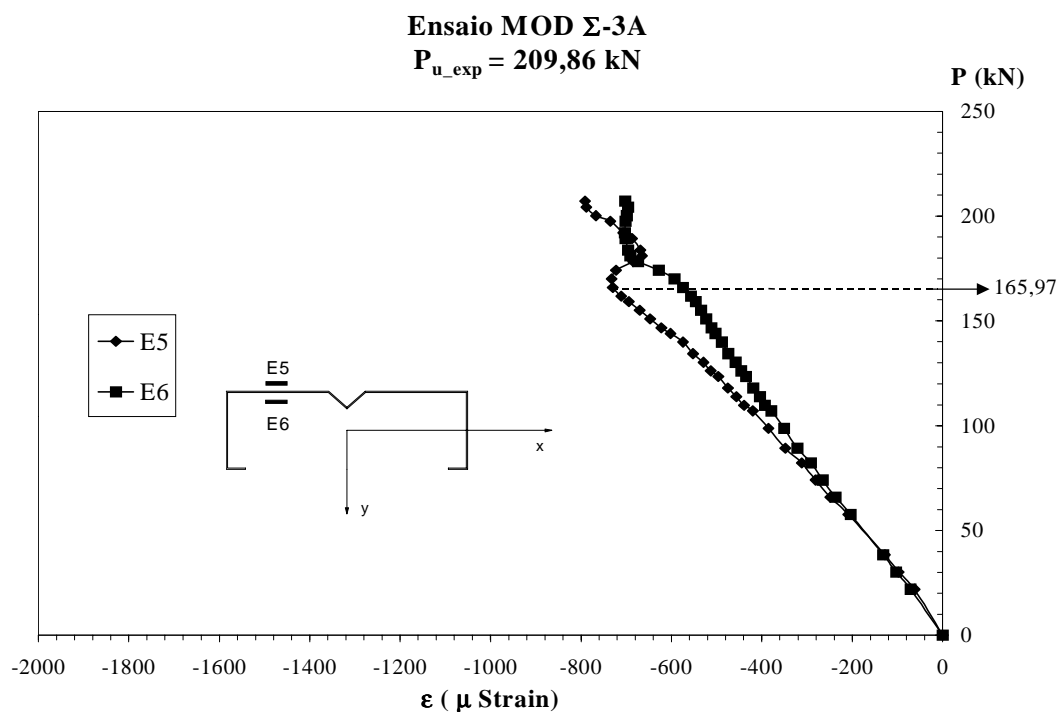


Figura 5.33- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3A.

A figura (5.34) apresenta o gráfico dos deslocamentos medidos pelo LVDT posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo, durante todo o ensaio. Observa-se que gradualmente houve deslocamento do enrijecedor intermediário, sendo o valor do deslocamento máximo medido nesse protótipo de  $-9,50$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -3A**

$$P_{u\_exp} = 209,86 \text{ kN}$$

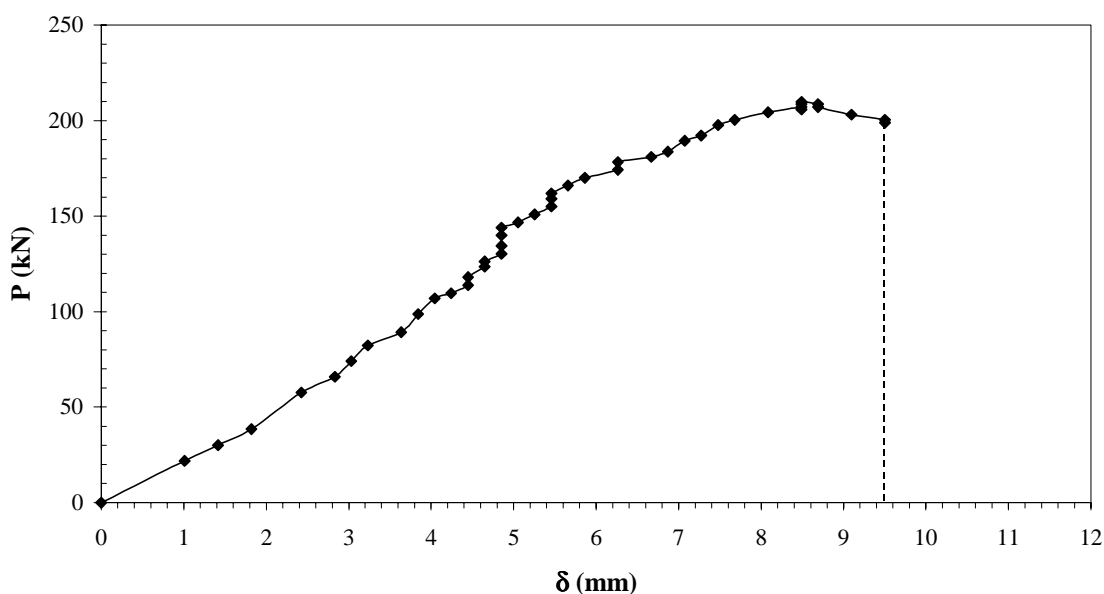


Figura 5.34- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -3A.

A foto (5.7) exhibe o protótipo MOD  $\Sigma$ -3A, após atingir a carga última. Verifica-se, pelo mecanismo de colapso, a influência da excentricidade no seu posicionamento.



Foto 5.7- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -3A.

#### **5.2.8. Protótipo MOD $\Sigma$ -3B**

Na figura (5.35) acham-se dispostos os valores das deformações medidas para cada etapa de carga, pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges, à meia altura do protótipo MOD  $\Sigma$ -3B. A carga última para esse protótipo é de 192,03 kN.

### Ensaio MOD $\Sigma$ -3B

$$P_{u\_exp} = 192,03 \text{ kN}$$

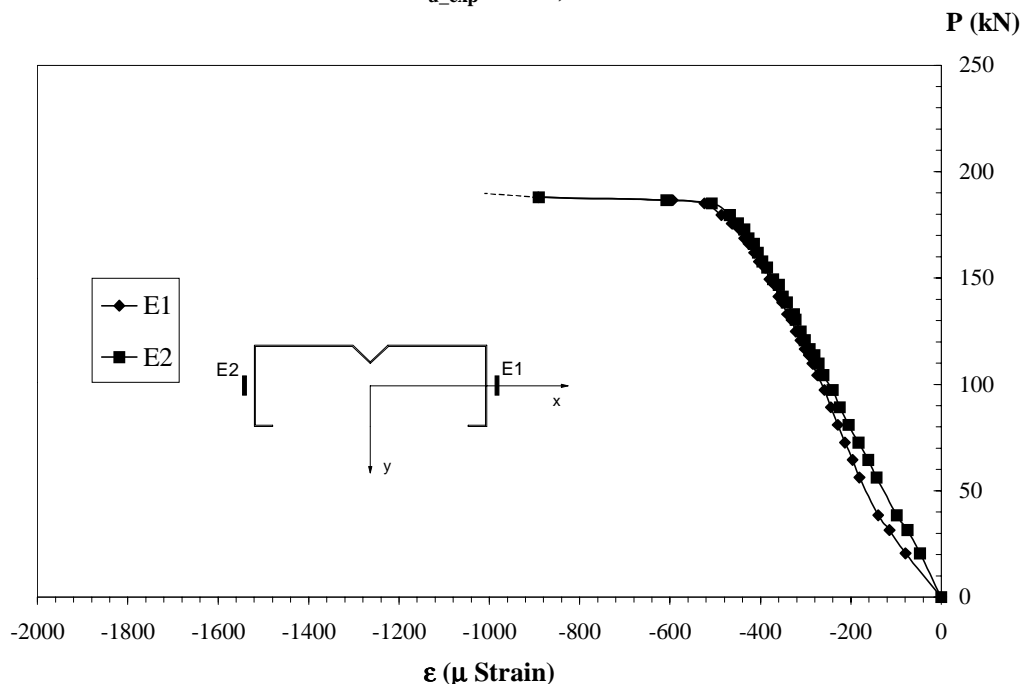


Figura 5.35- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3B.

Como descrito nos ensaios anteriores, nas figuras (5.36) e (5.37) tem-se as deformações medidas pelos pares de extensômetros colados à meia altura do flange do protótipo MOD  $\Sigma$ -3B.

Para a parede  $w_I$  onde foram colados os extensômetros E3 e E4, a flambagem local ocorreu na carga de 175,57 kN ao passo que para a outra parede, na qual foram colados os extensômetros E5 e E6, a flambagem local ocorreu na carga de 179,69 kN. Observa-se que os valores das cargas de flambagem local estão próximos da carga última do protótipo, e a variação entre os valores de flambagem local nas paredes  $w_I$  é da ordem de 2,29%.

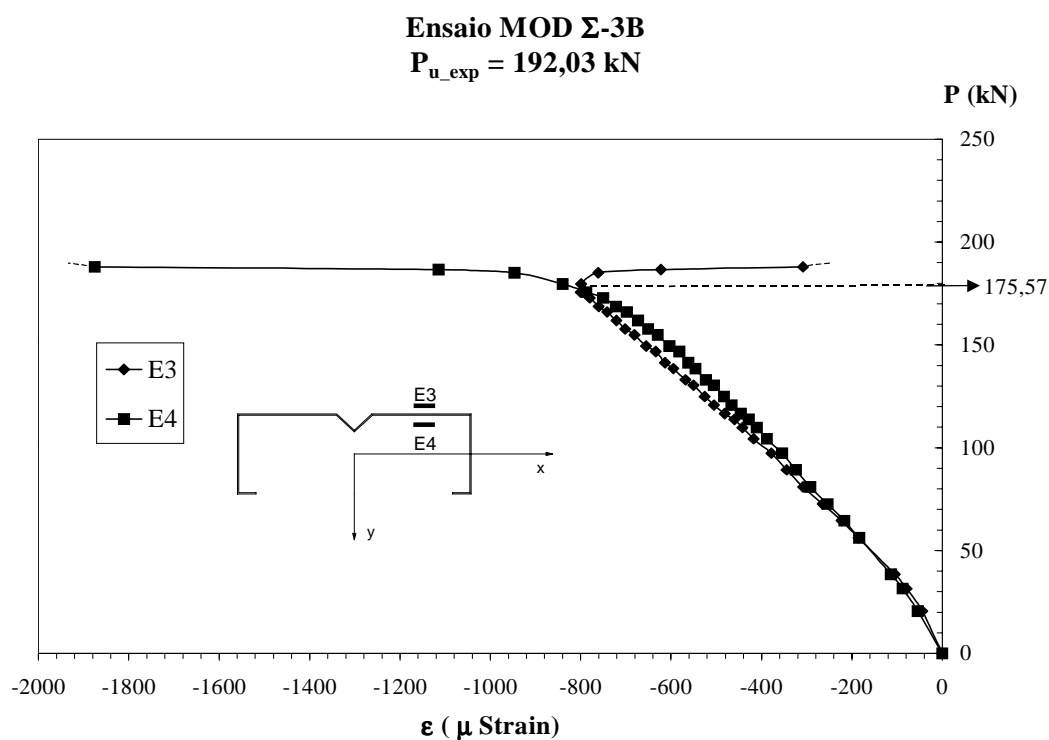


Figura 5.36- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3B.

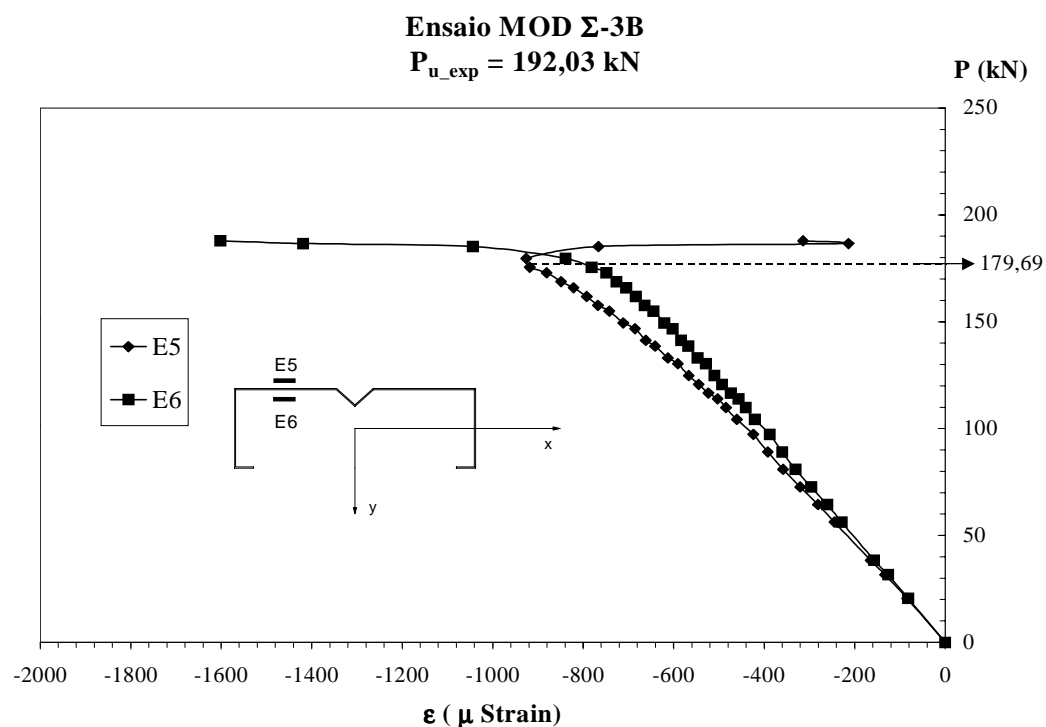


Figura 5.37- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3B.

A figura (5.38) apresenta os deslocamentos medidos pelo LVDT posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo. Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, não restringindo adequadamente o deslocamento na direção transversal, sendo o valor do deslocamento máximo medido nesse protótipo de  $-5,46$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -3B**

**$P_{u\_exp} = 192,03$  kN**

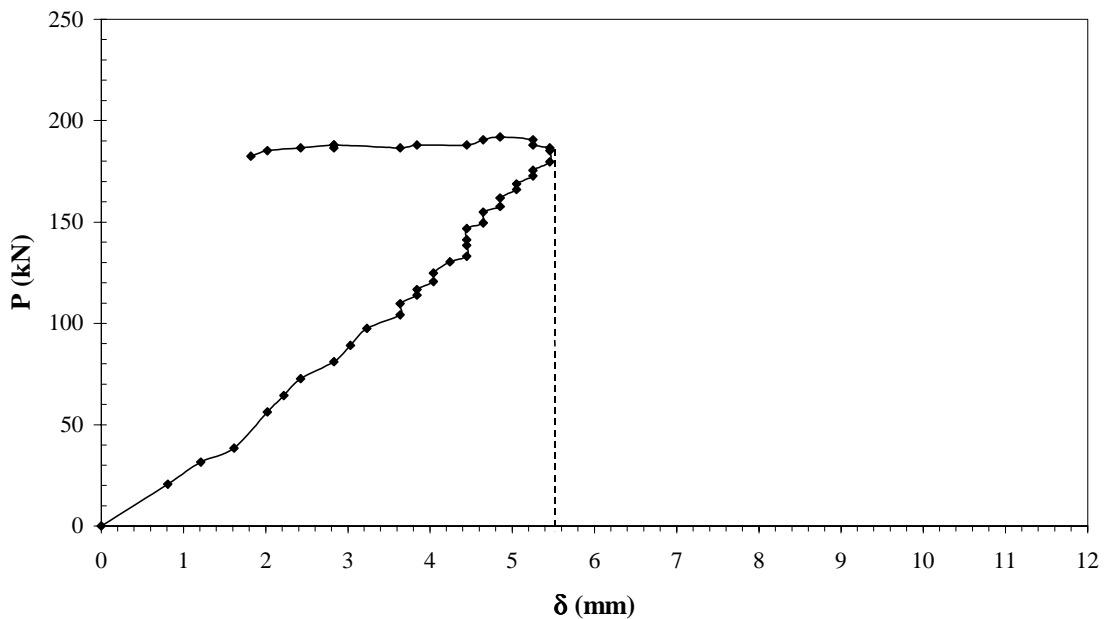


Figura 5.38- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -3B.

A foto (5.8) apresenta o protótipo MOD  $\Sigma$ -3B após atingir a carga última. Nesse ensaio, o mecanismo de colapso desenvolveu-se nas duas paredes  $w_I$ , em uma região pouco acima de onde se encontravam os pares de extensômetros.





Foto 5.8- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -3B.

#### **5.2.9. Protótipo MOD $\Sigma$ -3C**

Na figura (5.39) tem-se os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges, à meia altura do protótipo MOD  $\Sigma$ -3C.

Nota-se que houve pouca variação entre as deformações medidas nos extensômetros E1 e E2, caracterizando a centragem do carregamento em relação ao eixo y.

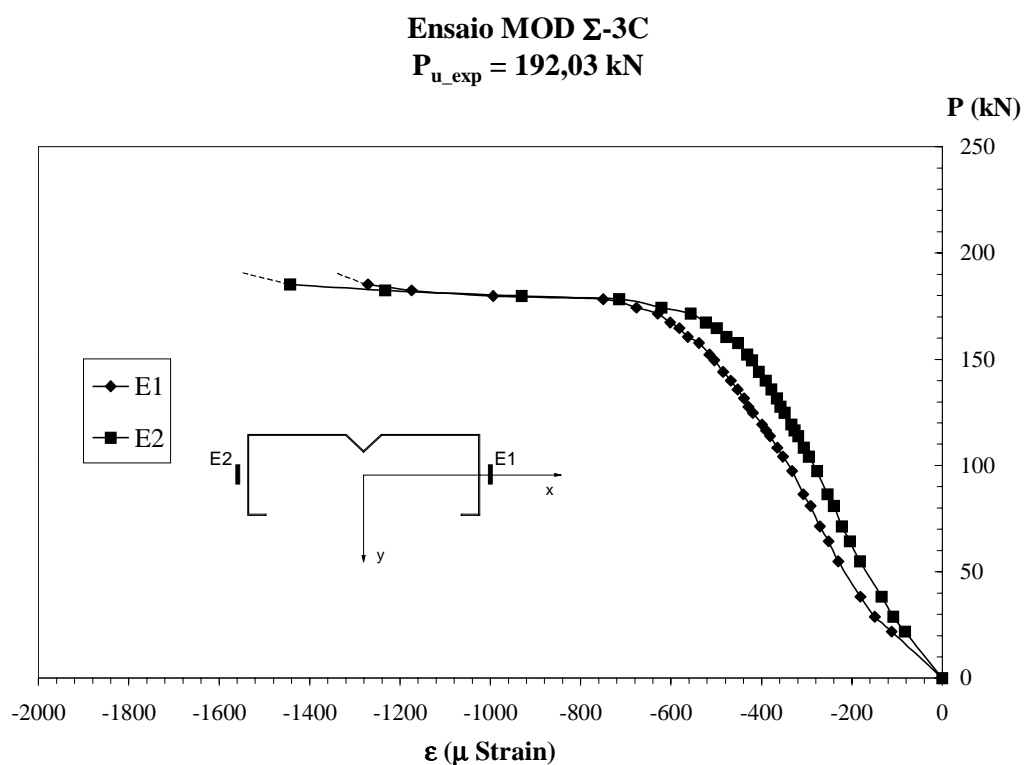


Figura 5.39- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3C.

Nas figuras (5.40) e (5.41) encontram-se os valores das deformações medidas nos extensômetros colados nas paredes externas e internas do protótipo ensaiado. A carga última obtida foi de 192,03 kN.

Para ambas as paredes  $w_I$ , a carga crítica de flambagem local foi de 157,74 kN e, pela correlação entre os valores de deformações medidas, obteve-se uma distribuição uniforme de tensões, além de pouca influência das imperfeições.

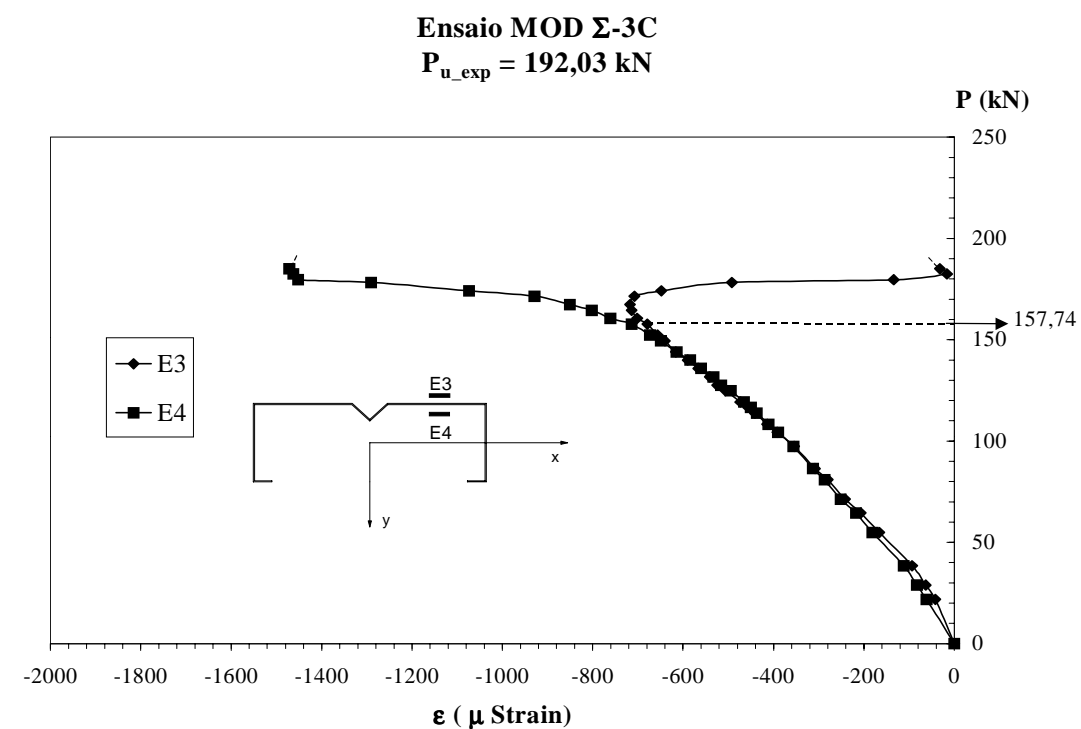


Figura 5.40- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3C.

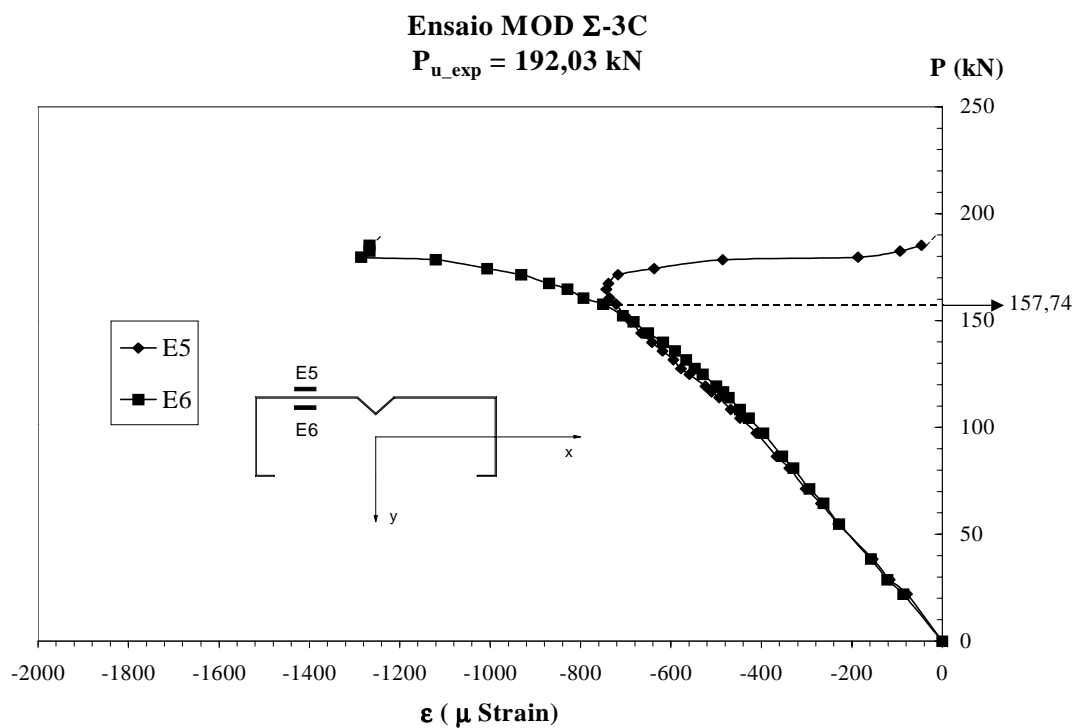


Figura 5.41- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -3C.

A figura (5.42) apresenta os deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo. Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, sendo o deslocamento máximo de  $-13,14$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -3C**

$$P_{u\_exp} = 192,03 \text{ kN}$$

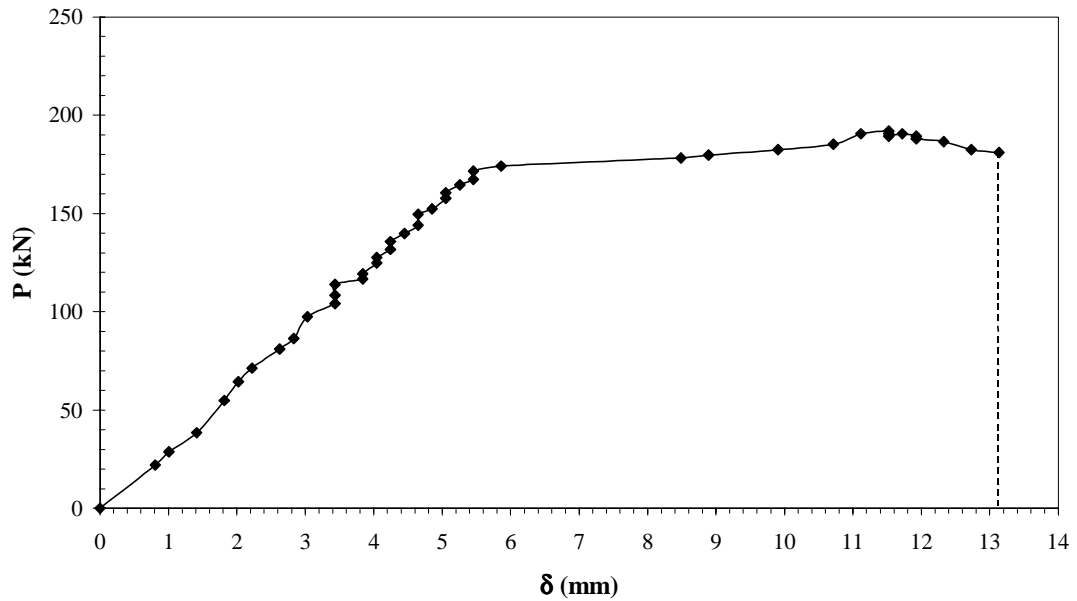


Figura 5.42- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -3C.

Na foto (5.9) visualiza-se o mecanismo de colapso do MOD  $\Sigma$ -3C.



Foto 5.9- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -3C.

A partir das dimensões medidas nos protótipos (figura 5.18), é apresentada a tabela (5.3) com as dimensões e os valores experimentais obtidos nos ensaios, para a série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -3.

Nessa série foi imposta uma excentricidade de 1 cm ao protótipo MOD  $\Sigma$ -3A, enquanto aos protótipos MOD  $\Sigma$ -3B e MOD  $\Sigma$ -3C não foi imposta nenhuma excentricidade.

Tabela 5.3- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -3.

Protótipos	$L_p$ (mm)	$b_1$ (mm)	$w_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$w_2$ (mm)	$b_3$ (mm)	$w_3$ (mm)	$d$ (mm)	$P_{u\_exp}$ (kN)	$P_{cr\_la\_exp}$ (kN)
MOD $\Sigma$ -3A	342,00	298,62	125,41	84,69	76,69	20,26	16,26	21,07	209,86	165,97
MOD $\Sigma$ -3B	341,64	298,67	126,59	84,94	76,94	20,35	16,35	19,92	192,03	175,57
MOD $\Sigma$ -3C	342,25	298,48	126,43	85,05	77,05	20,35	16,35	19,98	192,03	157,74

#### 5.2.10. Protótipo MOD $\Sigma$ -4A

Na figura (5.43) tem-se os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas através dos extensômetros E1 e E2. Observa-se que, apesar das imperfeições encontradas nesse protótipo, houve uma boa correlação entre os valores, caracterizando assim a centragem do perfil.

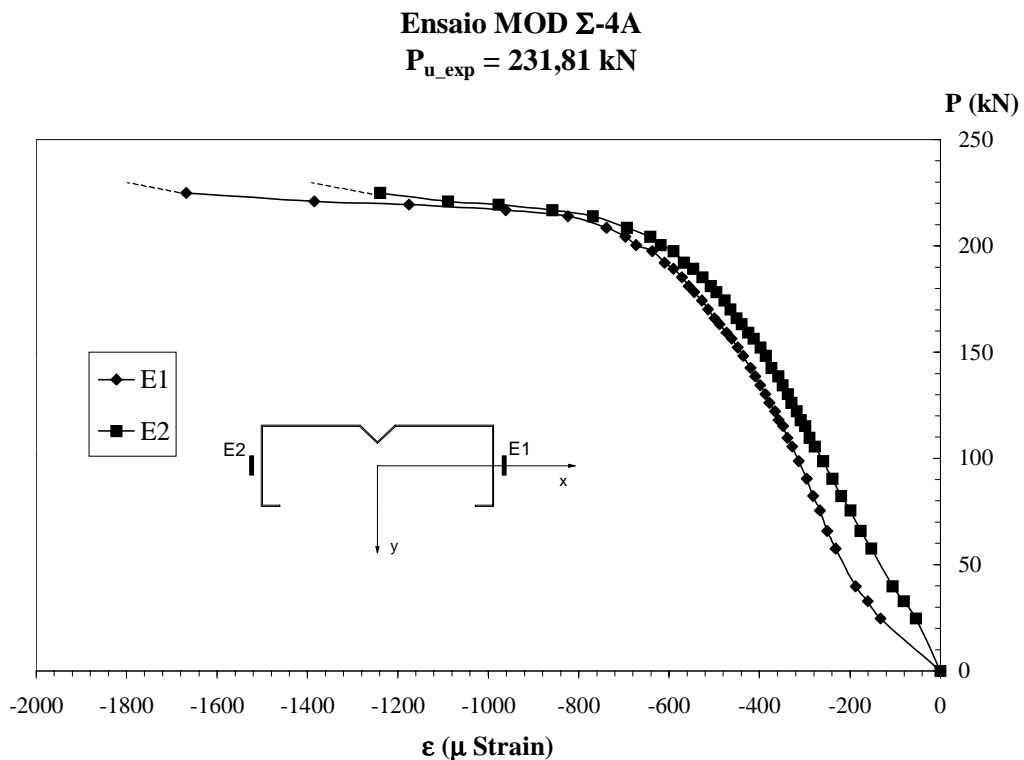


Figura 5.43- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4A.

A flambagem local foi detectada por intermédio de extensômetros colados nas faces interna e externa das paredes  $w_I$  do protótipo. Além disso, verificou-se visualmente a formação de ondas de flambagem local anti-simétricas.

Nas figuras (5.44) e (5.45) encontram-se os valores das deformações medidas nos extensômetros colados à meia altura do protótipo. A carga última obtida nesse ensaio foi de 231,81 kN.

A flambagem local na parede  $w_I$ , onde foram colados os extensômetros E5 e E6, teve início na carga de 200,26 kN, e na outra parede, na qual foram colados os extensômetros E3 e E4, a flambagem local teve início na carga de 204,38 kN, sendo a diferença do início da flambagem local entre as paredes  $w_I$  da ordem de 2,02%.

Como descrito no item 4.7.4.1 foram encontradas imperfeições na seção transversal do perfil, porém as imperfeições exerceram pouca influência na distribuição de cargas nas paredes  $w_I$  do protótipo.

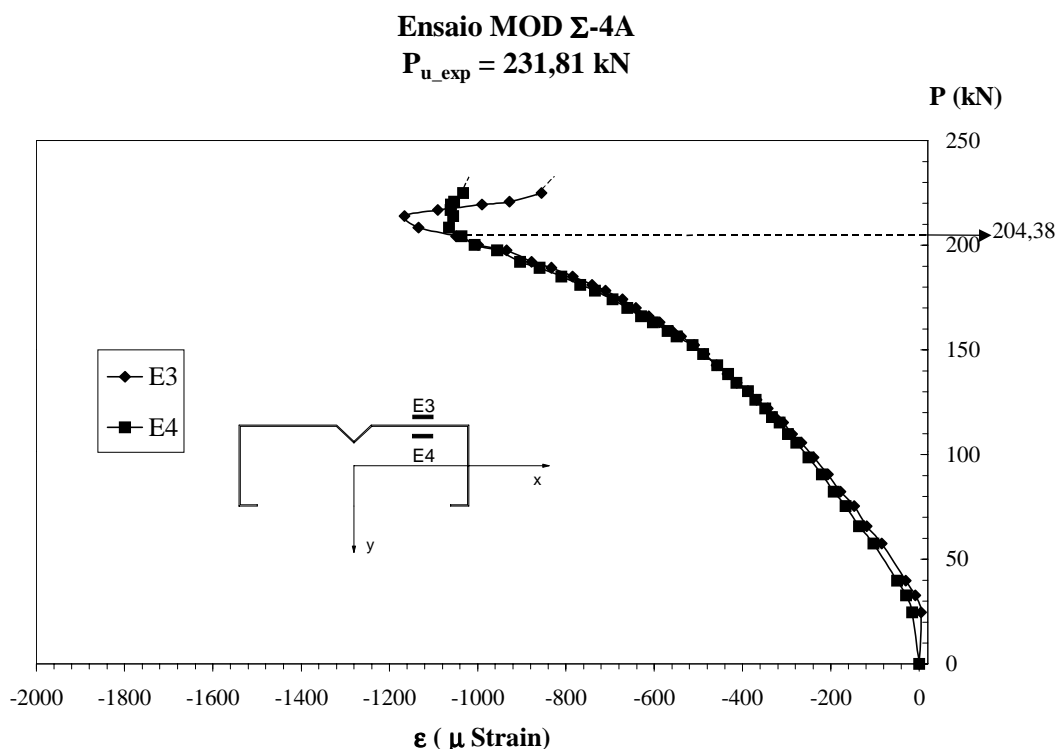


Figura 5.44- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4A.

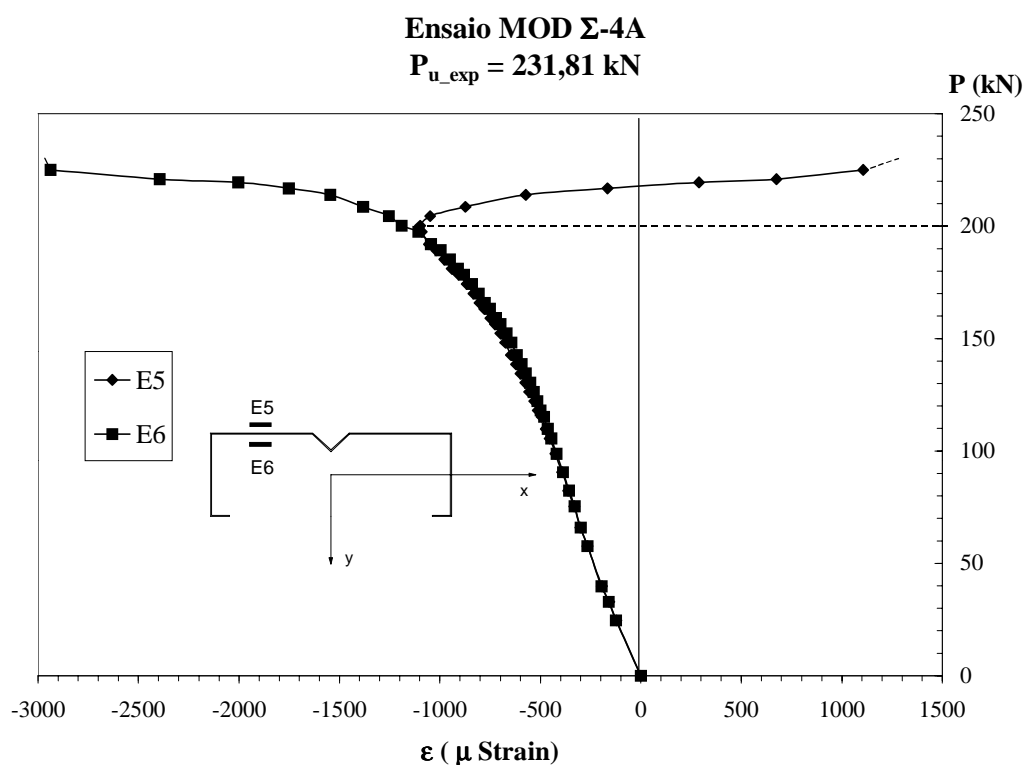


Figura 5.45- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4A.

A figura (5.46) apresenta os deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo. Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, sendo o deslocamento máximo de  $-8,08 \text{ mm}$ .



### Ensaio MOD $\Sigma$ -4A

$$P_{u\_exp} = 231,81 \text{ kN}$$

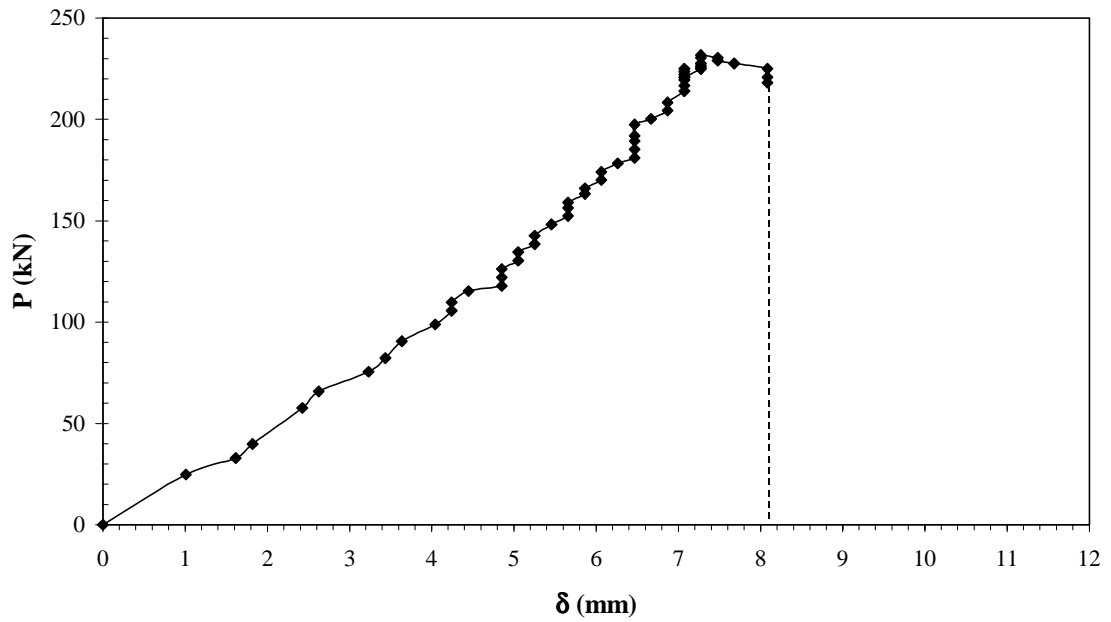


Figura 5.46- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -4A.

A foto (5.10) apresenta o protótipo MOD  $\Sigma$ -4A após atingir a carga última. Nesse ensaio o mecanismo de colapso desenvolveu-se nas duas paredes  $w_1$ .

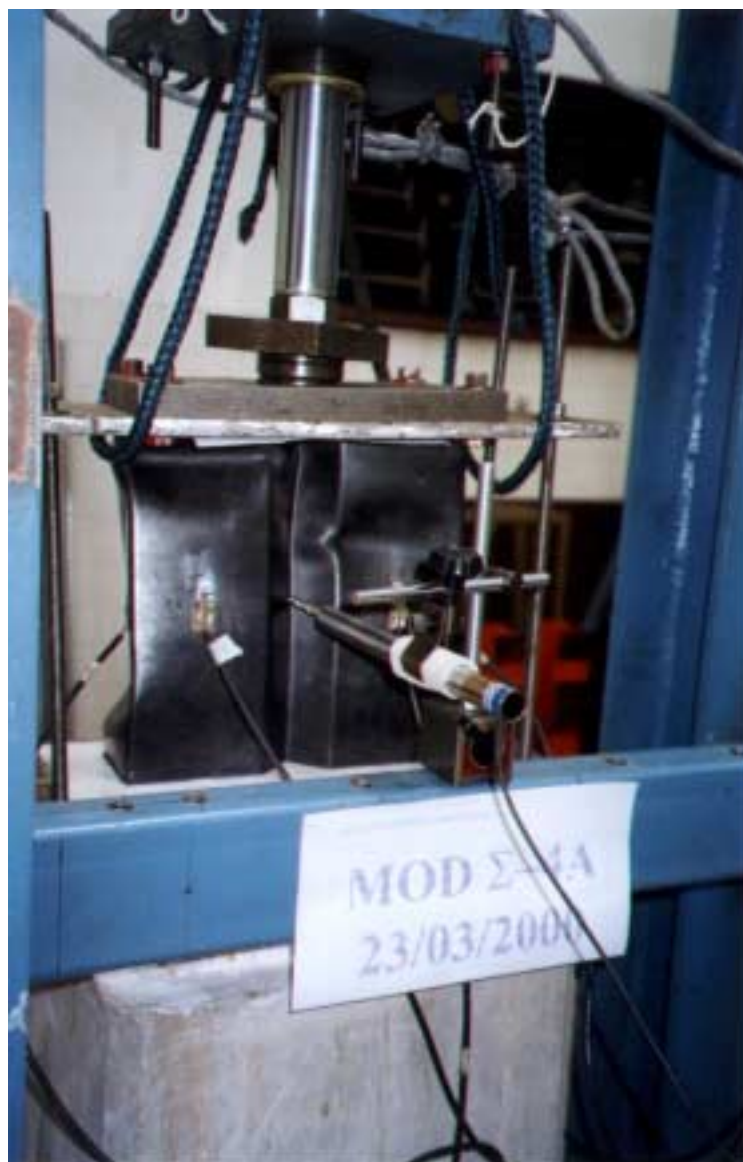


Foto 5.10- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -4A.

#### **5.2.11. Protótipo MOD $\Sigma$ -4B**

Como ocorreu no ensaio anterior, a figura (5.47) ilustra os valores das deformações em função do carregamento aplicado, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges do protótipo MOD  $\Sigma$ -4B.

Nota-se a influência das imperfeições na distribuição da carga nos flanges do protótipo, decorrendo em valores diferentes para as deformações medidas pelos extensômetros.

### Ensaio MOD $\Sigma$ -4B

$$P_{u\_exp} = 224,95 \text{ kN}$$

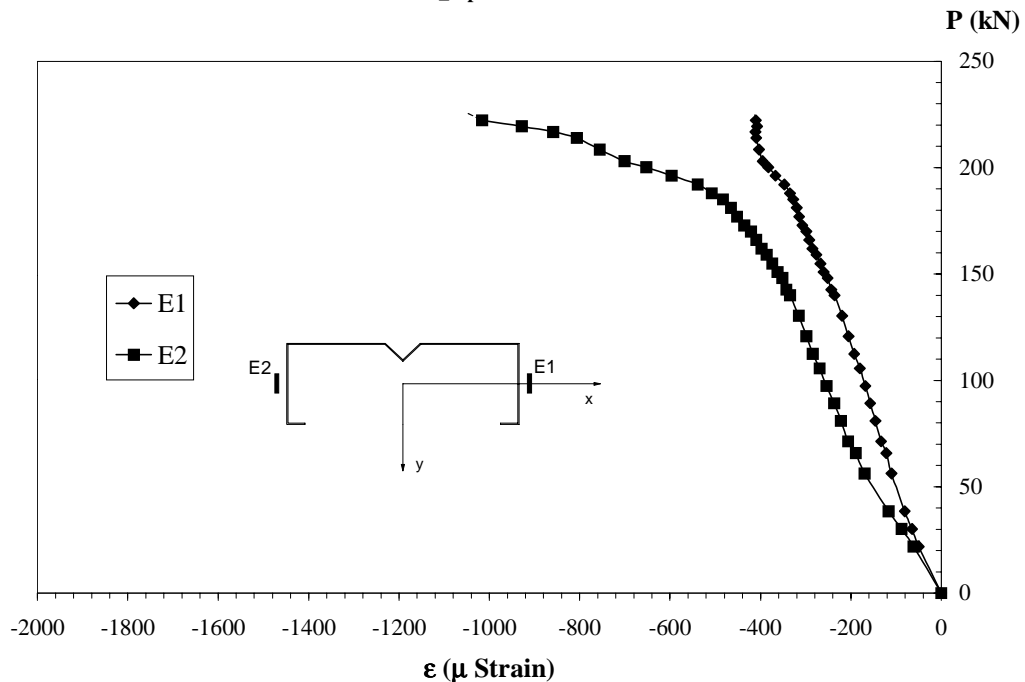


Figura 5.47- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4B.

Nas figuras (5.48) e (5.49) visualizam-se os valores das deformações medidas nos extensômetros colados à meia altura do protótipo MOD  $\Sigma$ -4B. A carga última obtida nesse ensaio foi de 224,95 kN.

A carga crítica de flambagem local, para a parede onde foram colados os extensômetros E3 e E4 foi de 185,17 kN, enquanto para a parede em que se colaram os extensômetros E5 e E6 foi de 192,03 kN.

Observa-se que a diferença entre o início da flambagem local na parede  $w_I$ , na qual foram colados os extensômetros E3 e E4, e na parede onde foram colados os extensômetros E5 e E6 é de 3,57%, de onde conclui-se que as imperfeições influenciaram a distribuição da carga.

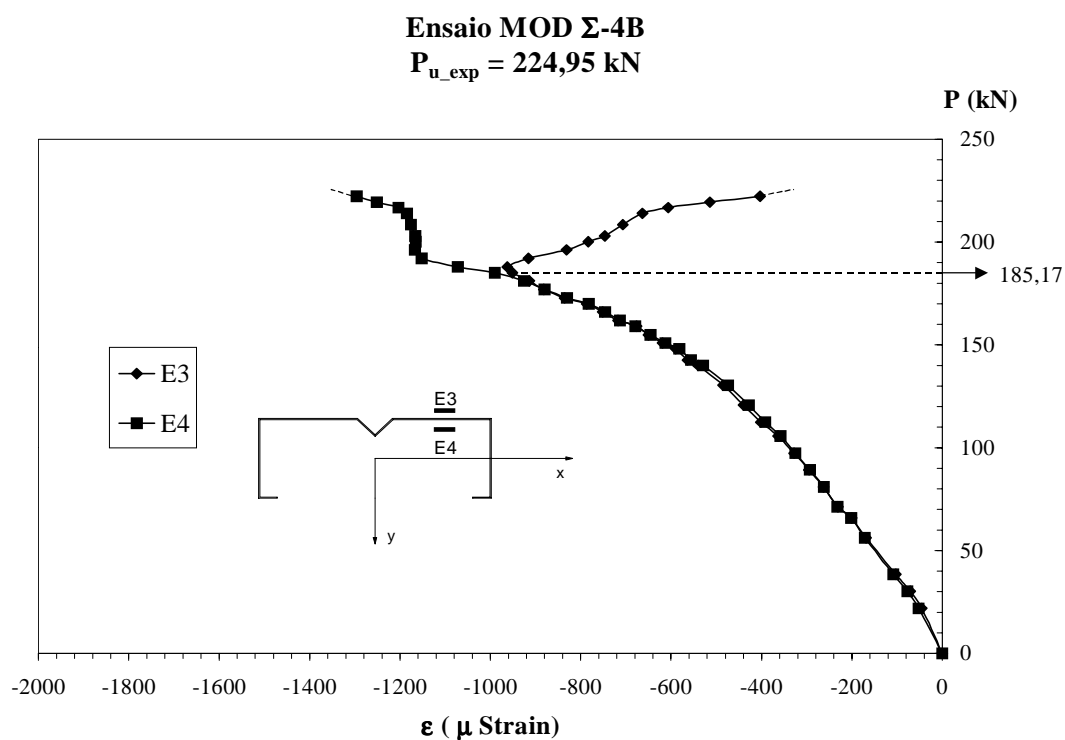


Figura 5.48- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4B.

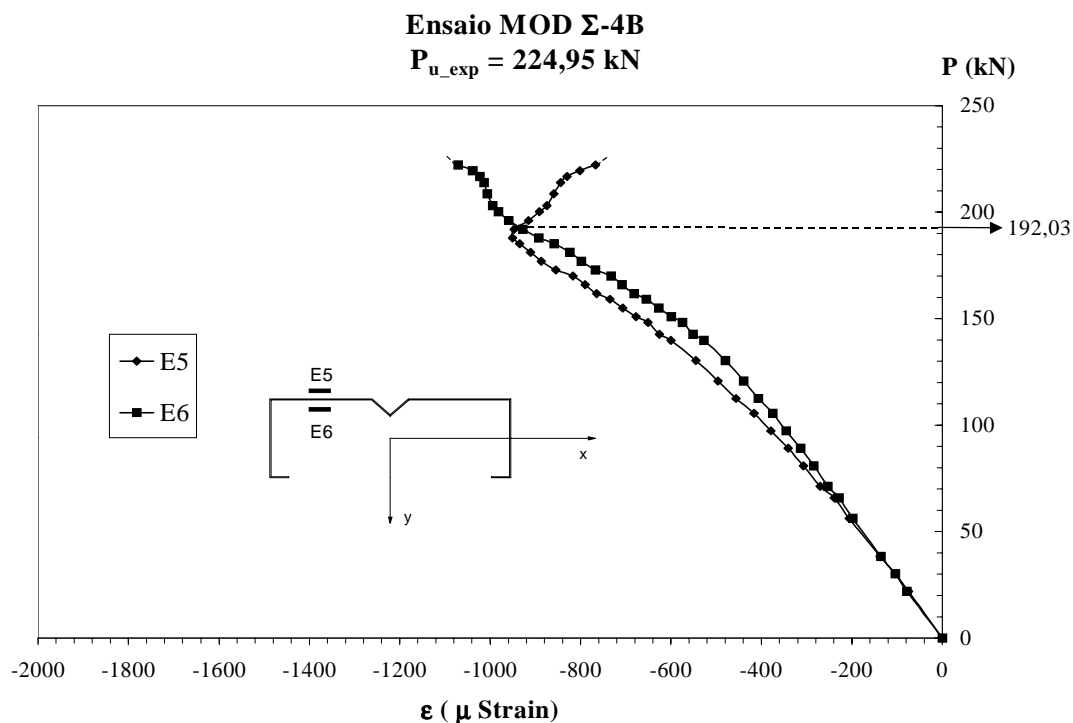


Figura 5.49- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4B.

A figura (5.50) exibem os deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo. Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, sendo o deslocamento máximo de  $-6,47$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -4B**

$$P_{u\_exp} = 224,95 \text{ kN}$$

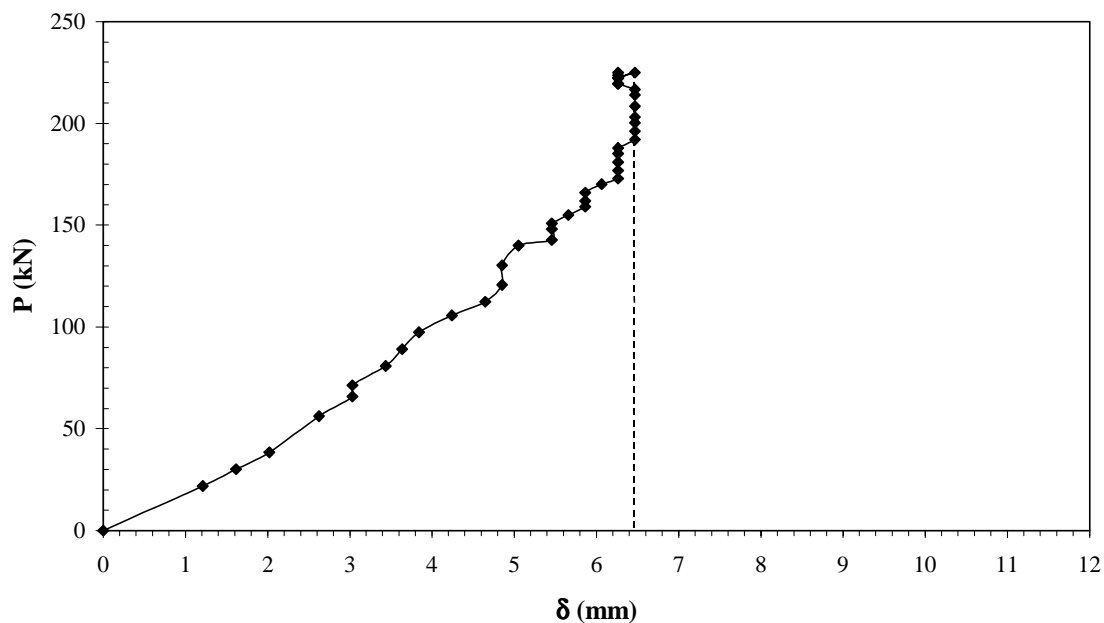


Figura 5.50- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -4B.

A foto (5.11) apresenta o protótipo MOD  $\Sigma$ -4B, após atingir a carga última.



Foto 5.11- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -4B.

#### **5.2.12. Protótipo MOD $\Sigma$ -4C**

Na figura (5.51) acham-se relacionados os valores das deformações para cada etapa de carga, medidas pelos extensômetros E1 e E2 colados nos flanges do protótipo. Verifica-se valores muito próximos de deformação nos extensômetros, caracterizando a centragem da coluna.

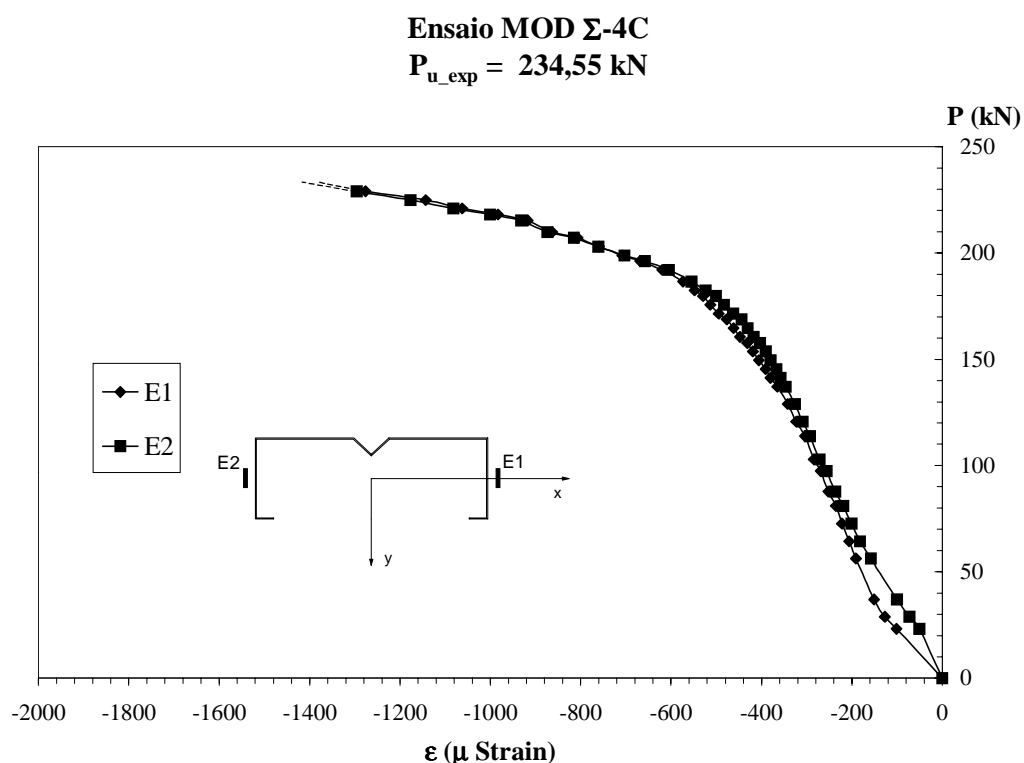


Figura 5.51- Deformações nos extensômetros E1 e E2 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4C.

A flambagem local foi detectada através de extensômetros colados internamente e externamente nas paredes com enrijecedor intermediário. Nas figuras (5.52) e (5.53) tem-se os valores das deformações medidas nos extensômetros colados à meia altura do perfil. A carga última obtida nesse ensaio foi de 234,55 kN.

A carga crítica de flambagem local para a parede  $w_1$ , onde foram colados os extensômetros E3 e E4, foi de 182,43 kN e para a parede em que os extensômetros E5 e E6 foram colados foi de 179,69 kN. A diferença do início da flambagem local na parede  $w_1$ , na qual foram colados os extensômetros E3 e E4, para a parede onde foram colados os extensômetros E5 e E6 é de 1,5%.

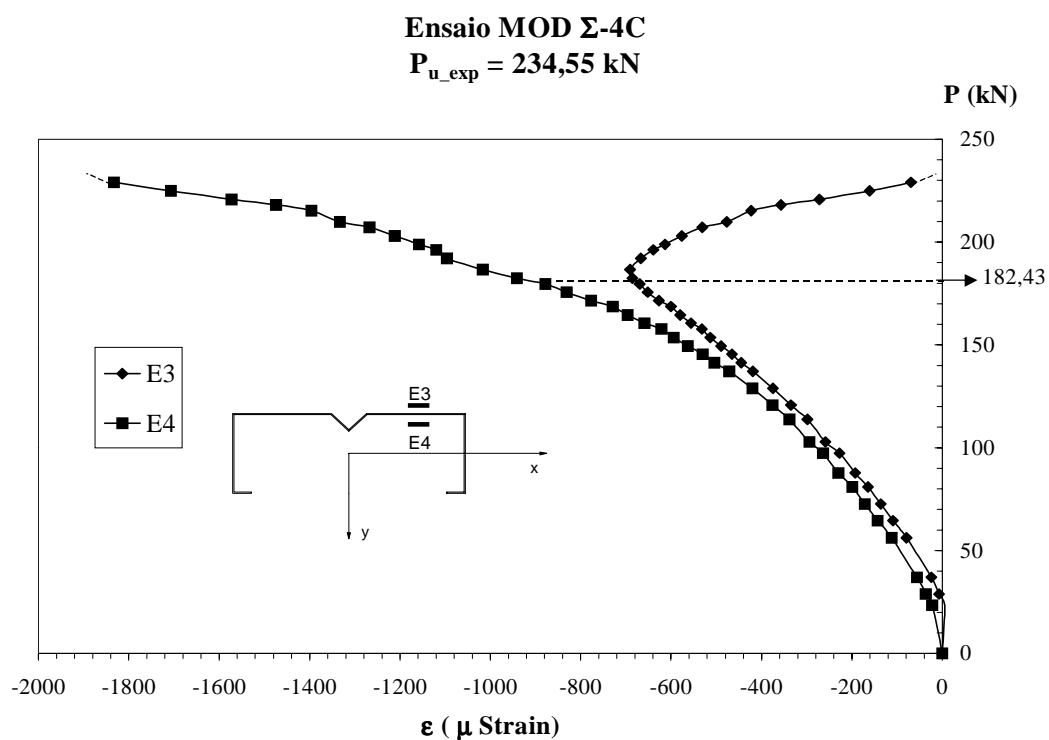


Figura 5.52- Deformações nos extensômetros E3 e E4 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4C.

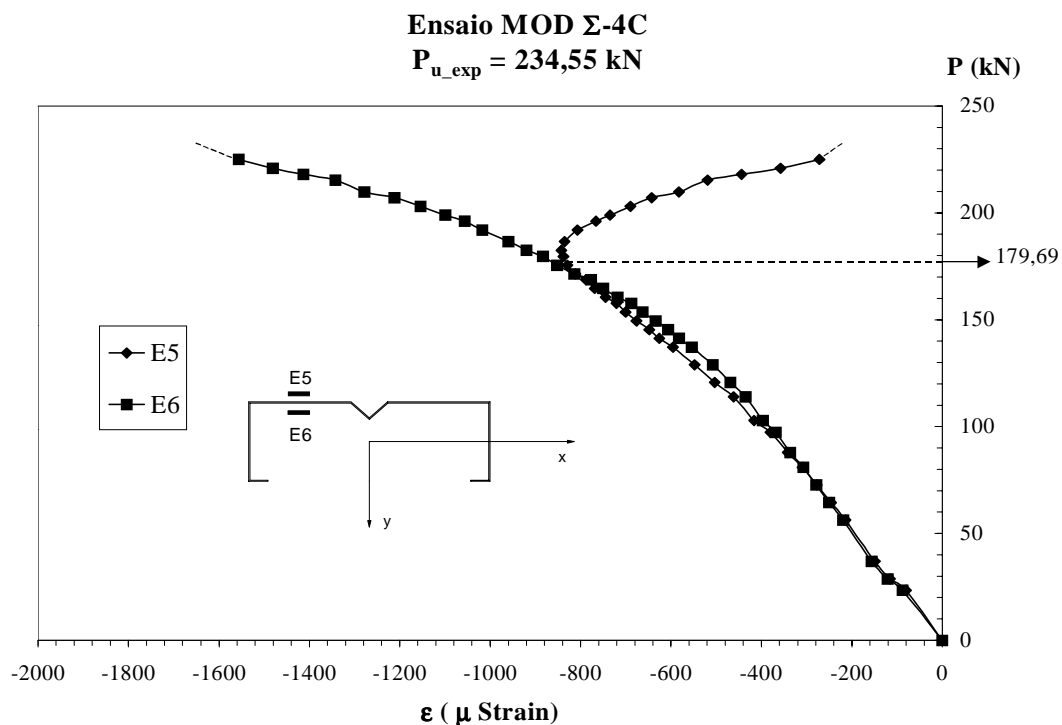


Figura 5.53- Deformações nos extensômetros E5 e E6 no ensaio do protótipo MOD  $\Sigma$ -4C.



A figura (5.54) ilustra os deslocamentos medidos pelo LVDT, posicionado no enrijecedor intermediário à meia altura do protótipo. Observa-se que o enrijecedor intermediário deslocou-se gradualmente desde o início do carregamento, indicando o deslocamento máximo de  $-9,70$  mm.

**Ensaio MOD  $\Sigma$ -4C**

$P_{u\_exp} = 234,55$  kN

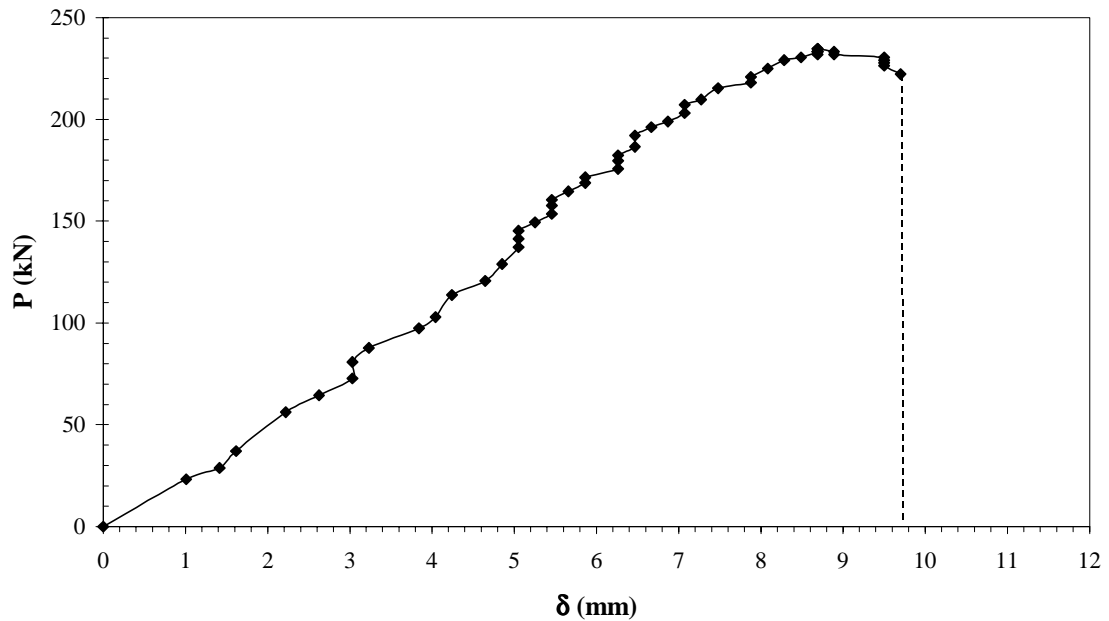


Figura 5.54- Deslocamento no enrijecedor intermediário para o MOD  $\Sigma$ -4C.

A foto (5.12) apresenta o protótipo MOD  $\Sigma$ -4C, após atingir a carga última. Nesse ensaio, o mecanismo de colapso desenvolveu-se nas duas paredes  $w_l$ .

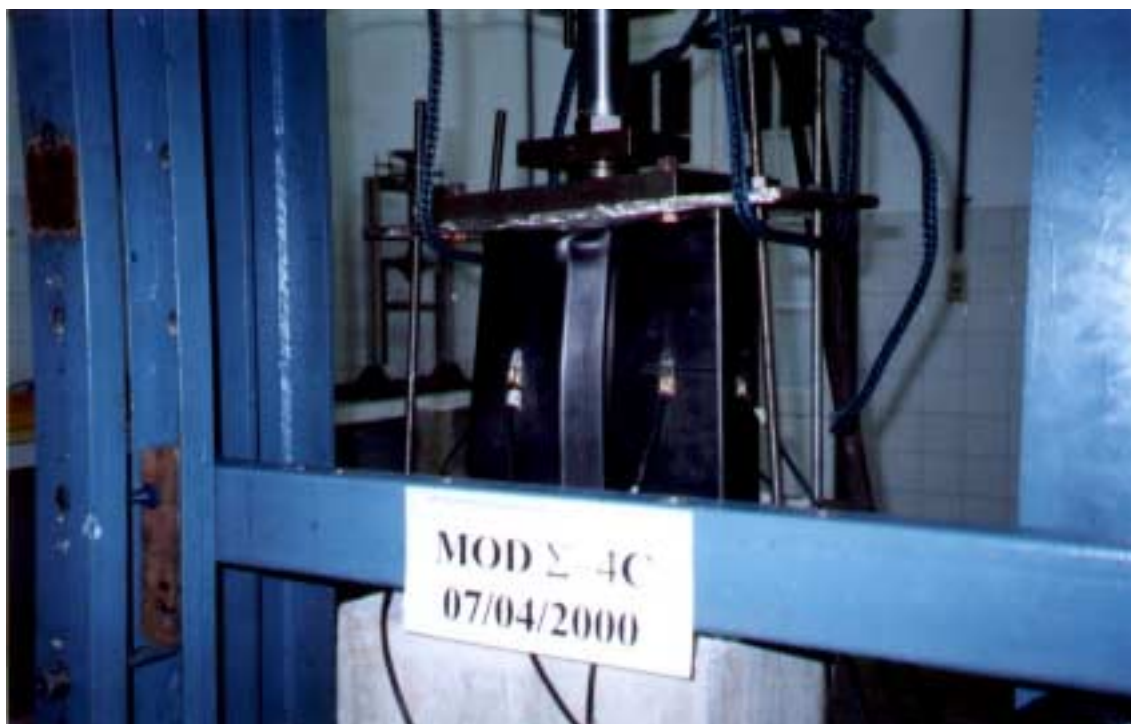


Foto 5.12- Mecanismo de colapso do perfil MOD  $\Sigma$ -4C.

A partir das dimensões medidas nos protótipos (figura 5.18), é apresentada a tabela (5.4) com as dimensões e os valores experimentais obtidos nos ensaios, para a série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -4. Nessa série não foi imposta nenhuma excentricidade aos protótipos ensaiados.

Tabela 5.4- Dimensões e valores obtidos nos ensaios da série dos protótipos MOD  $\Sigma$ -4.

<b>Protótipos</b>	$L_p$ (mm)	$b_1$ (mm)	$w_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$w_2$ (mm)	$b_3$ (mm)	$w_3$ (mm)	$d$ (mm)	$P_{u\_exp}$ (kN)	$P_{cr\_la\_exp}$ (kN)
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4A</b>	313,36	299,18	116,28	84,97	76,97	19,74	15,74	30,48	231,81	200,26
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4B</b>	299,33	299,50	116,34	85,11	77,11	19,75	15,75	30,58	224,95	185,17
<b>MOD <math>\Sigma</math>-4C</b>	317,03	299,10	115,87	84,87	76,87	19,35	15,35	30,85	234,55	179,69

### **5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS**

Os resultados experimentais da resistência última de compressão  $P_{u\_exp}$ , obtidos por meio dos protótipos ensaiados neste trabalho, foram comparados com os resultados teóricos da carga nominal  $P_n$ , alcançados através da rotina de cálculo desenvolvida segundo as prescrições da AISI. Em seguida foram comparados com os resultados teóricos da força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ , conseguidos mediante a rotina de cálculo desenvolvida segundo o projeto da norma brasileira.

Na tabela (5.5) encontram-se os valores médios das dimensões reais da seção transversal dos protótipos e o valor médio do comprimento  $L_p$ , bem como os valores das larguras efetivas,  $b_e$ , utilizados para o cálculo da carga nominal  $P_n$  e da força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ . Já na tabela (5.6) estão relacionados os valores das cargas calculadas pelos valores reais das dimensões dos protótipos.

Tabela 5.5- Dimensões reais dos protótipos para o cálculo da carga nominal  $P_n$ .

<b>Protótipos</b>	$L_p$ (mm)	$b_1$ (mm)	$w_1$ (mm)	$b_{eA}$ (mm)	$b_2$ (mm)	$w_2$ (mm)	$b_{eM}$ (mm)	$b_3$ (mm)	$w_3$ (mm)	$t=r$ (mm)	$d$ (mm)
<b>MOD Σ-1A</b>	372,00	300,13	126,84	77,12	74,83	66,83	59,33	20,20	16,20	2,00	20,40
<b>MOD Σ-1B</b>	372,00	299,22	126,31	77,19	75,38	67,38	58,88	19,24	15,24	2,00	20,47
<b>MOD Σ-1C</b>	373,40	298,58	124,78	78,48	74,54	66,54	58,43	18,99	14,99	2,00	21,68
<b>MOD Σ-2A</b>	306,41	300,47	117,13	79,26	74,46	66,46	59,04	19,95	15,95	2,00	30,28
<b>MOD Σ-2B</b>	307,29	298,32	114,70	78,89	75,09	67,09	58,50	18,83	14,83	2,00	31,63
<b>MOD Σ-2C</b>	321,53	300,23	116,49	79,16	74,23	66,23	59,02	20,04	16,04	2,00	30,80
<b>MOD Σ-3A</b>	342,00	298,62	125,41	77,84	84,69	76,69	62,38	20,26	16,26	2,00	21,07
<b>MOD Σ-3B</b>	341,64	298,67	126,59	76,58	84,94	76,94	62,52	20,35	16,35	2,00	19,92
<b>MOD Σ-3C</b>	342,25	298,48	126,43	76,64	85,05	77,05	62,55	20,35	16,35	2,00	19,98
<b>MOD Σ-4A</b>	313,36	299,18	116,28	79,13	84,97	76,97	62,03	19,74	15,74	2,00	30,48
<b>MOD Σ-4B</b>	299,33	299,50	116,34	79,14	85,11	77,11	62,08	19,75	15,75	2,00	30,58
<b>MOD Σ-4C</b>	317,03	299,10	115,87	79,07	84,87	76,87	61,68	19,35	15,35	2,00	30,85

Onde:  $L_p$  → Altura do perfil;  
 $b_l$  → Largura total da alma;  
 $w_l$  → Largura do trecho reto das paredes entre o enrijecedor intermediário;  
 $b_{eA}$  → Largura efetiva da alma;  
 $b_2$  → Largura total do flange;  
 $w_2$  → Largura do trecho reto do flange;  
 $b_{eM}$  → Largura efetiva do flange;  
 $b_3$  → Largura total do enrijecedor de extremidade;  
 $w_3$  → Largura do trecho reto do enrijecedor de extremidade;  
 $t$  → Espessura da placa;  
 $d$  → Altura do enrijecedor intermediário;  
 $r$  → Raio da placa.

Tabela 5.6- Valores das cargas calculadas, utilizando os valores reais da seção transversal e do comprimento  $L_p$  dos protótipos.

<b>Protótipos</b>	$P_{cr\_la}$ (kN)	$P_{cr\_lm}$ (kN)	$P_{ex}$ (kN)	$P_{ey}$ (kN)	$P_{ft}$ (kN)	$P_n$ (kN)	$P_y$ (kN)
<b>MOD Σ-1A</b>	161,91	453,26	9066,00	178200,00	11130,00	221,11	309,62
<b>MOD Σ-1B</b>	163,39	430,09	9044,00	176700,00	11030,00	219,14	308,56
<b>MOD Σ-1C</b>	174,84	434,86	8661,00	173300,00	10750,00	221,89	307,42
<b>MOD Σ-2A</b>	215,09	460,97	1293,00	264100,00	17310,00	241,39	314,22
<b>MOD Σ-2B</b>	223,37	433,12	1278,00	258100,00	17160,00	240,82	312,95
<b>MOD Σ-2C</b>	217,42	465,32	1166,00	239300,00	15720,00	242,07	314,16
<b>MOD Σ-3A</b>	176,92	362,19	1454,00	223500,00	16090,00	227,32	321,54
<b>MOD Σ-3B</b>	165,98	360,91	1474,00	224400,00	16130,00	224,03	321,40
<b>MOD Σ-3C</b>	166,86	359,96	1473,00	223400,00	16100,00	224,24	321,45
<b>MOD Σ-4A</b>	226,76	358,17	1699,00	268900,00	20320,00	244,63	326,52
<b>MOD Σ-4B</b>	226,84	357,51	1870,00	295700,00	22370,00	245,05	326,96
<b>MOD Σ-4C</b>	228,04	353,18	1642,00	261900,00	19730,00	244,16	326,04

Onde:  $P_{cr\_la}$  → Carga crítica de flambagem local da alma;  
 $P_{cr\_lm}$  → Carga crítica de flambagem local do flange;  
 $P_{ex}$  → Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo 'x';  
 $P_{ey}$  → Carga crítica de flambagem por flexão em torno do eixo 'y';  
 $P_{ft}$  → Carga crítica de flambagem por flexo-torção;  
 $P_n$  → Carga nominal axial de acordo com AISI/96;  
 $P_y$  → Carga de escoamento.

Na tabela (5.7) são indicados os valores de carga última obtidos através dos ensaios experimentais  $P_{u\_exp}$ , os valores teóricos calculados empregando as prescrições da AISI,  $P_n$ , e os valores teóricos da força normal de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , utilizando o projeto da norma brasileira, bem como a relação entre essas cargas.

Tabela 5.7- Valores das cargas últimas utilizando as prescrições da norma AISI do projeto da norma brasileira, e valores obtidos nos ensaios experimentais.

Protótipos	$P_n$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	$P_{u\_exp}$ (kN)	$P_n / P_{u\_exp}$	$N_{c,Rd} / P_{u\_exp}$
<b>MOD Σ-1A</b>	221,11	224,21	186,55	1,19	1,20
<b>MOD Σ-1B</b>	219,14	222,22	204,38	1,07	1,09
<b>MOD Σ-1C</b>	221,89	225,13	201,63	1,10	1,12
<b>MOD Σ-2A</b>	241,39	243,78	224,95	1,07	1,08
<b>MOD Σ-2B</b>	240,82	243,22	235,93	1,02	1,03
<b>MOD Σ-2C</b>	242,07	244,74	234,55	1,03	1,04
<b>MOD Σ-3A</b>	227,32	229,34	209,86	1,08	1,09
<b>MOD Σ-3B</b>	224,03	225,99	192,03	1,17	1,18
<b>MOD Σ-3C</b>	224,24	226,21	192,03	1,17	1,18
<b>MOD Σ-4A</b>	244,63	246,52	231,81	1,06	1,06
<b>MOD Σ-4B</b>	245,05	246,77	224,95	1,09	1,10
<b>MOD Σ-4C</b>	244,16	246,11	234,55	1,04	1,05

Onde:  $N_{c,Rd}$  → Força normal de compressão resistente de cálculo;

$P_{u\_exp}$  → Carga última obtida mediante os ensaios experimentais.

Observa-se na tabela (5.7) que os valores da carga nominal axial,  $P_n$ , obtidos segundo as prescrições da AISI, quando comparados com os valores de carga última conseguidos através dos ensaios experimentais,  $P_{u\_exp}$ , são satisfatórios.

A norma brasileira apresenta valores teóricos da força normal de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , satisfatórios quando comparados com os valores de carga última obtidos através dos ensaios experimentais  $P_{u\_exp}$ . Estes valores são próximos dos valores da carga nominal axial,  $P_n$  obtidos pela AISI.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Após a análise e a comparação entre os resultados experimentais e teóricos, foram levantadas as seguintes conclusões:

- a) Para todos os ensaios realizados através dos valores dos deslocamentos medidos pelo LVDT, correspondentes aos enrijecedores intermediários, foi observado que houve deslocamento dos enrijecedores, a partir do início do carregamento.
- b) Para um mesmo nível de carga, constatou-se semelhantes deslocamentos aproximados dos enrijecedores de altura 30 mm e 20 mm.
- c) O modo de flambagem local desenvolvido é simétrico em relação ao enrijecedor.
- d) O modo de colapso é fortemente influenciado pelas imperfeições.
- e) A carga crítica é prevista de forma melhor para o caso do enrijecedor de 20 mm.
- f) Os resultados experimentais obtidos mostram que a capacidade de carga da coluna é maior no enrijecedor de altura 30 mm que o de 20mm.
- g) A carga última experimental possui boa correlação com a teórica, segundo a AISI.
- h) A carga última experimental possui boa correlação com a teórica, segundo o projeto da norma brasileira.

- i) Quanto menor a esbeltez da seção, maior a diferença dos valores experimentais da carga crítica, o que foi observado na comparação efetuada nos ensaios MOD  $\Sigma$ -4 e MOD  $\Sigma$ -3.

Algumas sugestões são apresentadas para estudos futuros:

- Avaliar a influência do deslocamento do enrijecedor nos estudos teóricos.
- Avaliar teórica e experimentalmente perfis com seções transversais com mais de um enrijecedor intermediário na alma, uma vez que a formulação para avaliar esse tipo de perfil utilizada pela AISI é inconsistente e conduz a resultados questionáveis, segundo estudos feitos por Schafer e Peköz (1997).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISI – LRFD COLD-FORMED STEEL Design Manual (1996). American Iron Steel Institute, Washington DC.

ASTM (1995). E8M-95-A-Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials.

AS1538 (1988). Cold-formed steel structural – Standards Association of Australia. N.S.W. Australia.

Allen, H. G., Bulson, P. (1980). Background to Buckling. Mc Graw-Hill, London.

Batista, E. M. et al. (1998 a). On the Stability and Strength of Steel Columns Affected by Distortional Buckling. Journal Construction Steel Research, 46(1-3), 1998, p.129-131 (full paper in CD-ROM – paper # 86).

Batista, E. M. et al. (1998 b). On the Local Buckling Behavior of Rack Section Thin-Walled Columns. Anais da Seção Técnica Anual do Structural Stability Research Council, p.107-120.

Batista, E. M. (1988). Etude de La Stabilité des Profils à Parois Minces et Section Ouverte de Types U et C. Tese de Doutorado, Universidade de Liège.

Bernard, E. S., Bridge, R. Q. e Hancock, G. J. (1993). Tests of Profiled Steel Decks with V-Stiffeners. Journal of Structural Engineering-ASCE, v. 119, p. 2277 – 2293.

Bernard, E. S., Bridge, R. Q. e Hancock, G. J. (1995). Tests of Profiled Steel Decks with Flat-Hat Stiffeners. Journal of Structural Engineering-ASCE, v. 121, p. 1175 – 1182.

Bernard, E. S., Bridge, R. Q. e Hancock, G. J. (1996). Design Methods for profiled Steel Decks with Intermediate Stiffeners. Journal Construction Steel Research, v.38, p. 61-88.

Bueno, F. G. F. (1999). Estudo de Perfis U Simples de Chapa Dobrada Submetidos a Compressão Excêntrica. Tese de Mestrado, UFOP, Ouro Preto.

CAN/CSA-S136-M89 (1991). Cold-formed steel structural members - Canadian Standards Association.

Desmond, T. P.; Peköz, T. e Winter, G. (1981). Intermediate Stiffeners for Thin-Walled Members. Journal of Structural Division, v.107, p. 627 - 648, Ithaca, NY.

EUROCODE 3 Design of steel structures - parte 1.3 (1992). Cold-formed thin gauge members and sheetings.

Hancock, G. J., Kwon, Y. B. e Bernard, E. S. (1994). Strength Design Curves for Thin-Walled Sections Undergoing Distortional Buckling. *Journal Construction Steel Research*, v. 31, p. 169 – 186.

Hancock, G. J. (1977). Local, Distortional, and Lateral Buckling of I-Beams. Research Report R312, University of Sidney, School of Civil Engineering, Sydney, Australia.

Kwon, Y. B. e Hancock, G. J. (1992). Tests of Cold-Formed Channels with Local and Distortional Buckling. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, v.117, p. 1786 – 1803, Sydney, Australia.

Manual do programa MATHCAD Versão 5, (1994).

Rodrigues, F. C. (1993). Estudo Teórico-Experimental de Perfis de Chapa Dobrada Submetidos a Compressão. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Sarmanho, A. M. C. (1991). Estudo do Comportamento Pós-Critico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Schafer, W. B. e Peköz, T. (1997). The Behavior and Design of Longitudinal Stiffened Thin-Walled Compression Elements. *Thin Walled Structures*, v.27, No. 1, p. 65 – 78.

Schafer, W. B. e Peköz, T. (1998). Cold-Formed Steel Members with Multiple Longitudinal Intermediate Stiffeners. *Journal of Structural Engineering*, v.124, p.1175 – 1181, Ithaca, NY.

Texto-Base para Norma Brasileira (1999). Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Brasil.

Timoshenko, S. P. e Gere, J. M. (1961). *Theory of Elastic Stability*. Mc Graw-Hill Book Co.,Inc, New York.

Vazquez, E. G. (1998). Estabilidade e Resistência de Perfis de Chapa Dobrada Afetados pelo Modo Distorcional. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

von Kármán, T., Sechler, E. E. e Donnel, L. H. (1932). The Strength of Thin Plates in Compression. *Transaction ASME, Applied Mechanics*, v. 54, No.APM-54-5, p. 53.

Winter, G. (1947). Strength of Thin-Walled Compression. *Transcription of the American Society of Civil Engineers, A.S.C.E.*, v.112, p. 527 - 555.

Yu, W. W. (1991). *Cold-Formed Steel Design*, Second Edition. John Wiley & Sons. Inc., Canada.