

SISTEMAS DIAFRAGMA COM PAINÉIS DE CHAPA FINA,  
APLICADOS A EDIFICAÇÕES ESTRUTURADAS EM AÇO

Hisashi Inoue

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Eduardo de Miranda Batista, D.Sc.

---

Prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D

---

Prof. Paulo Batista Gonçalves, D.Sc.

---

Prof. Francisco Carlos Rodrigues, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2004

INOUE, HISASHI

Sistemas diafragma com painéis de chapa fina, aplicados a edificações estruturadas em aço [Rio de Janeiro] 2004

XXII, 104 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2004)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Estabilidade estrutural
2. Estrutura de aço
3. Perfil de chapa dobrada

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

Aos meus pais,  
Katsuro e Masuko.

## Agradecimentos

Ao prof. Eduardo de Miranda Batista, pela orientação, dedicação e paciência para a realização deste trabalho.

Ao prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro pela valiosa orientação na parte numérica relacionada a estabilidade elástica.

Aos meus familiares, em especial ao meu irmão Tadashi pelo apoio durante o Doutorado e ao longo da minha vida.

Aos professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos Alexandre Landesmann, Elaine, Santiago e Maurício, pelo apoio, colaborações e amizade neste período de convivência.

Ao Koji de Jesus Nagahama pelo fornecimento do programa Inslod e auxílio de grande valia no estudo de estabilidade via MFF.

Aos amigos da COPPE, Miguel, Mergulhão, Jéferson, Guilherme, Sidiclei, Wendel, Marco, Jardel, Roberto, Vinicius, Norma, Patrícia, Mayra, Luciana, Reila, Silvosso, Gadéia, Alexandre Lima, Alex, Danilo, Tiago, Emerson, Adcleides, Walber, Jonylson, Vivian e Eugênia, pelas colaborações e amizade.

Ao Thelmo, Célio, Luzidele, Sandra, Beth, Jairo e demais funcionários do Programa de Engenharia Civil da COPPE.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SISTEMAS DIAFRAGMA COM PAINÉIS DE CHAPA FINA, APLICADOS  
A EDIFICAÇÕES ESTRUTURADAS EM AÇO

Hisashi Inoue

setembro/2004

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista  
Fernando Luiz Bastos Ribeiro  
Programa: Engenharia Civil

Apresenta-se um estudo de flambagem e pós-flambagem elástica e elastoplástica de painéis metálicos formados a frio, submetidos a combinações de cargas axial e transversal no plano do painel. Estes perfis, formados a frio e com seção tipo U enrijecido, podem ser adotados como elementos estruturais em sistemas construtivos baseados em fechamentos metálicos pré-fabricados, com aplicação nas construções de edifícios de andares múltiplos. Nesse caso, os painéis podem ser adotados como elementos com função de contraventamento transversal da estrutura.

A análise numérica é realizada com base no método dos elementos finitos, adotando-se elementos de casca, obtendo-se as respostas para o problema de estabilidade de primeira ordem: cargas críticas e os respectivos modos de flambagem. A análise não-linear permite obter a trajetória de equilíbrio que descreve o comportamento pós-flambagem. São ainda considerados os seguintes aspectos no comportamento estrutural: (i) variação na geometria da seção, (ii) condições de apoio nas extremidades, com empenamento livre ou impedido e (iii) influência das imperfeições iniciais. São consideradas ainda distintas combinações de cargas axial e de cisalhamento no painel.

Os resultados das análises permitem avaliar a eficiência da contribuição dos fechamentos com painéis metálicos leves e a possível eliminação de barras de contraventamento global da estrutura.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## THIN-WALLED PANELS FOR STEEL BRACING SYSTEMS

Hisashi Inoue

september/2004

Advisors: Eduardo de Miranda Batista  
Fernando Luiz Bastos Ribeiro

Department: Civil Engineering

The present study is addressed to elastic and elastoplastic post-buckling analysis of cold-formed steel panels under combined compression and shear loading. These channel section panels can be adopted as closing systems for multistory buildings. In this case the thin-walled steel panels are taken as bracing system.

The structural analysis is performed based on the FEM, with shell elements. Both linear and non-linear stability analysis are computed, the former to obtain the critical loads and the buckling modes the latter to obtain the post-buckling behavior. The following aspects of the structural behavior are considered: (i) cross-section variation; (ii) end conditions, with free or fixed warping, (iii) the influence of initial imperfections. Several load combinations are considered.

The results of the analysis allowed to conclude about the efficiency of the panel system to replace the standard bracing system of the buildings, based on diagonal members.

# Sumário

Índice de figuras.....	ix
Índice de tabelas.....	xviii
<b>Capítulo I</b> Introdução.....	<b>1</b>
1.1 Considerações Gerais .....	1
1.2 Objetivo do Trabalho.....	4
1.2.1 Objetivo Geral .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
1.3 Bibliografia Recente .....	5
1.4 Organização do Trabalho .....	7
<b>Capítulo II</b> Sistema Construtivo e Metodologia de Análise.....	<b>8</b>
2.1 Sistemas Construtivos .....	8
2.2 Métodos de Análise .....	11
2.2.1 Método dos Elementos Finitos .....	11
2.2.2 Programa Shell .....	12
2.2.3 Programa Ansys.....	13
<b>Capítulo III</b> Análise de Estabilidade Elástica.....	<b>14</b>
3.1 Introdução.....	14
3.2 Estabilidade elástica de placas isoladas.....	16
3.2.1 Placa submetida à compressão simples .....	16
3.2.2 Placa submetida a cisalhamento puro .....	22
3.3 Estabilidade elástica de perfil .....	25
3.3.1 Cargas atuando no perfil.....	25
3.3.2 Condições de contorno do perfil.....	25
3.3.3.1 Condição de empenamento livre .....	26
3.3.3.2 Condição de empenamento impedido .....	27
3.3.3 Modos de Flambagem .....	28
3.3.4 Modo de Flambagem Local.....	32

3.3.5	Flambagem Distorcional .....	35
3.3.6	Modo de Flambagem Global .....	37
3.3.7	Flambagem Local e Distorcional Acoplados.....	39
<b>Capítulo IV</b> Análise da Estabilidade Linear de Painéis		<b>42</b>
<hr/>		
4.1	Introdução .....	42
4.2	Estudo de Painéis Isolados .....	42
4.3	Painéis Submetidos à compressão Uniforme .....	47
4.4	Painéis Submetidos à Carga Horizontal .....	51
4.5	Painel Submetido a Combinação de Cargas.....	56
<b>Capítulo V</b> Análise Não-Linear		<b>61</b>
<hr/>		
5.1	Introdução .....	61
5.2	Análise Não-Linear Elástica de Painéis Diafragma .....	62
5.3	Análise Não-Linear Elastoplástica de Painéis Diafragma .....	70
<b>Capítulo VI</b> Estudo de Caso: Sistema Construtivo		<b>73</b>
<hr/>		
6.1	Introdução .....	73
6.2	Edifício residencial padrão CDHU.....	74
6.3	Diagonais equivalentes para painéis metálicos .....	77
6.4	Cargas e combinações de cargas .....	86
6.5	Estrutura contraventada por meio de diagonal equivalente .....	90
6.6	Estrutura contraventada por meio de barras .....	92
6.7	Comparação entre as soluções com contraventamento por barras e por painéis diafragma.....	93
<b>Capítulo VII</b> Conclusões e sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras		<b>95</b>
<hr/>		
7.1	Conclusões.....	95
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	96
<b>Anexo A</b> .....		<b>102</b>

Figura 1.1 (a) perfiladeira de rolete contínua; (b) seqüência de dobras em uma perfiladeira.....	2
Figura 1.2 (a) e (b); Estrutura, cobertura e fechamento lateral em hangar.....	3
Figura 1.3 Sistema de armazenamento industrial.....	3
Figura 1.4 Evolução na conformação de seções dos perfis; (a) perfil Z enrijecido ;(b) perfil U enrijecido.....	4
Figura 2.1 Perfil diafragma: (a) sem enrijecedor intermediário, (b) com enrijecedor intermediário, (c) detalhe de enrijecedor intermediário.....	9
Figura 2.2 Painéis formados com a combinação de painéis U enrijecido.....	10
Figura 2.3 Construção residencial baixa em painel diafragma [18]: (a) durante a montagem, (b) residência concluída.....	10
Figura 2.4 Vista de painéis diafragma.durante a construção de um edifício comercial [9] .....	11
Figura 2.5 Elemento tridimensional degenerado de oito nós: (a) coordenadas globais; (b) coordenadas naturais.....	12
Figura 3.1 Placas submetidas à compressão uniforme com diferentes condições de contorno: (a) sem restrição a deslocamento no plano; (b) com restrição a deslocamento lateral nas bordas longitudinais; (c) com restrição a deslocamento lateral nas bordas transversais; (d) o deslocamento no plano é livre; (e) com restrição à deslocamento lateral nas bordas transversais.....	16
Figura 3.2-Vínculos introduzidos para impedir a translação de corpo rígido no plano da placa. A linha tracejada refere-se à placa deformada, levando-se em consideração as condições de contorno mostradas na Figura 3.1.....	17
Figura 3.3 Coeficiente de flambagem para placa sem restrição a deformação lateral, Figura 3.1 (a). Coeficiente flambagem, via MEF e teórico, segundo a equação (3.2).....	20
Figura 3.4 Coeficiente de flambagem para placa com restrição a deformação lateral nas bordas laterais, Figura 3.1 (b). Coeficiente de flambagem, via MEF e teórico	

segundo equação (3.2). .....	20
Figura 3.5 Coeficiente de flambagem para placa com restrição a deformação lateral nas bordas longitudinais, Figura 3.1 (c). Coeficiente de flambagem, via MEF segundo a equação (3.2). .....	21
Figura 3.6 Coeficiente de flambagem para placa com três bordas apoiadas e uma livre: (a) sem restrição ao deslocamento lateral nos apoios transversais Figura 3.1 (d); (b) sem e com restrição ao deslocamento lateral nos apoios transversais (as curvas se sobrepõem) Figuras 3.1 (d) e (e). .....	21
Figura 3.7 Modos de flambagem para placa isolada simplesmente apoiada nas quatro bordas e submetida a uma carga axial uniforme. O número entre parênteses refere-se ao número de meias ondas. ....	22
Figura 3.8 Placa quadrada com as bordas simplesmente apoiadas e submetida a cisalhamento puro: (a) carga cisalhante nas bordas, (b) mudança de eixo de referência e vínculos introduzidos para impedir a translação de corpo rígido, (c) deformação da placa. ....	22
Figura 3.9- Modos de flambagem de uma placa apoiada nas quatro bordas e submetida ao cisalhamento puro. ....	23
Figura 3.10 (a) Barra comprimida de perfil U simples com os eixos de referência e dimensões; (b) carga axial uniformemente distribuída nas extremidades; (c) cargas nodais equivalentes. ....	25
Figura 3.11 Condições de contorno para empenamento livre: (a) deslocamentos impedidos no plano xy, nós das extremidades da barra comprimida; (b) deslocamento impedido na direção z, por um nó à meia altura; (c) restrição nas extremidades da barra comprimida, para simular deformação uniforme da seção transversal ao longo do eixo longitudinal; (d) modo de flambagem nas seções das extremidades, quando restringido o deslocamento por apenas três nós. ....	27
Figura 3.12- Condições de contorno para empenamento impedido: (a) barra comprimida com placas rígidas nas extremidades; (b) carga de compressão nos nós de extremidade da barra comprimida; (c) ponto de restrição a deslocamento lateral e de torção; (d) deslocamento longitudinal impedido por um nó à meia altura na direção z. ....	28

Figura 3.13 Placa simplesmente apoiada nas quatro bordas: (a) compressão axial uniforme na direção longitudinal; (b) modo de flambagem senoidal. ....	29
Figura 3.14 Instabilidade por bifurcação de equilíbrio e trajetória de equilíbrio estável, para a placa apresentada na Figura 3.13: (a) flambagem segundo a flexão, $w$ ; (b) encurtamento longitudinal, $u$ . ....	30
Figura 3.15 Perfil U enrijecido com as respectivas dimensões e as propriedades geométricas. ....	30
Figura 3.16 Resultados da análise de estabilidade para perfil U enrijecido com dimensões de 100x100x15x2, empenamento livre, obtidos pelo MEF. ....	31
Figura 3.17 Resultados de cargas de flambagem para perfil U enrijecido com dimensões de 100x100x15x2, empenamentos livre e impedido, obtidos pelo MEF. ....	32
Figura 3.18 Modo de flambagem local de placa (MLP): (a) perfil U simples; (b) U enrijecido; (c) U simples com modo de flambagem antissimétrico; (d) U enrijecido com modo de flambagem antissimétrico. ....	33
Figura 3.19 Resultados da análise de estabilidade de perfil U enrijecido, com empenamento livre, para o modo de flambagem local de placa (MLP), obtidos pelo MEF e o MFF. ....	34
Figura 3.20 Modos de flambagem calculados pelo MEF do perfil U enrijecido 100x100x15x2: (a) modo de flambagem local de placa com uma meia onda, MLP (1); (b) modo de flambagem local de placa com duas meias ondas, MLP (2). ....	35
Figura 3.21 Exemplos de modos de flambagem distorcional (MD): (a) rack; (b) U simples com enrijecedor intermediário; (c) U enrijecido; (d) U enrijecido com modo de flambagem distorcional antissimétrico. ....	36
Figura 3.22 Resultados da análise de estabilidade para perfil U enrijecido, com empenamento livre, modo distorcional de flambagem(MD), obtidos pelo MEF e o MFF. ....	36
Figura 3.23 Perfil U enrijecido 100x100x15x2, empenamento livre, modo de flambagem distorcional MD (2). ....	37
Figura 3.24 Modos de flambagem global de um perfil com de seção monossimétrica,	

submetido a carga de compressão centrada: por flexo-torção (MFT) e por flexão (MF <sub>y</sub> ).....	38
Figura 3.25 Modos de flambagem por flexo-torção e por flexão, para perfil U enrijecido 100x100x15x2. Condições de extremidade: empenamento livre. ....	39
Figura 3.26 Cargas de flambagem local e distorcional acoplados, para perfil U enrijecido com seção de 100x50x5 e espessura de 1,0 mm.....	40
Figura 3.27 Flambagem local e distorcional acoplado, perfil U enrijecido com seção de 100x50x5 e espessura de 1,0 mm: (a) interação entre os MLP(3) e MD(1); (b) interação entre os MLP(6) e MD(2). ....	40
Figura 4.1 Resultado da análise de estabilidade linear segundo Harris e Pifko [33]: (a) painel com enrijecedores intermediários; (b) curva de interação entre a carga de compressão axial e cisalhamento. ....	44
Figura 4.2 Tipos de carregamentos e condições de contorno do painel: (a) compressão uniforme; (b) cisalhamento puro, impedido o deslocamento extensional no topo; (c) cisalhamento puro, deslocamento extensional livre no topo e (d) sob combinação de compressão e cisalhamento.....	45
Figura 4.3 (a) Modo de flambagem local de placa (análise linear); (b) interação entre flambagem local e global (análise não-linear).....	46
Figura 4.4 Modos de flambagem de painel enrijecido: (a) local de placa; (b) distorcional.....	47
Figura 4.5 Carga de flambagem e respectivos modos de flambagem para painel diafragma (600x100x50x1) sem enrijecedor intermediário na alma, submetido a compressão simples uniforme.....	48
Figura 4.6 Cargas críticas de flambagem para diferentes condições de empenamento (livre ou impedido), com ou sem enrijecedor intermediário de parede na alma do perfil.....	49
Figura 4.7 Coeficientes de flambagem ( <i>k</i> ) de painel diafragma ( $b_2/b_1=100/600$ ) para diferentes dimensões de enrijecedores intermediários de parede e de borda. ....	50
Figura 4.8 Cargas de flambagem para painel (600x100x50xt) submetido a carga horizontal na extremidade superior e com deslocamento axial impedido na	

extremidade superior, para diferentes comprimentos ( $L/b_1$ ) e espessura de parede ( $t$ ).....	52
Figura 4.9 Modo de flambagem na alma ( $b_1$ ) de painel diafragma, com seção de $600 \times 100 \times 10 \times 1$ , sem enrijecedor intermediário, para diferentes comprimentos ( $L/b_1$ ) e espessura de parede ( $t$ ).....	52
Figura 4.10 Cargas de flambagem para painel ( $600 \times 100 \times 50 \times t$ ) submetido à carga horizontal na extremidade superior e com deslocamento axial livre na extremidade superior para diferentes espessuras.....	53
Figura 4.11 Cargas de flambagem, para painel $600 \times 100 \times 50 \times 1$ , com e sem enrijecedor intermediário.....	54
Figura 4.12 Coeficiente de flambagem ( $k$ ), para painel $600 \times 100 \times 50 \times 1$ , em função do parâmetro ( $L/b$ ).....	55
Figura 4.13 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, para um painel com seção de $600 \times 100 \times 50 \times 1$ , sem enrijecedor intermediário de parede, para ações combinadas de compressão e cisalhamento.....	56
Figura 4.14 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, para painel formado pela associação de dois painéis, com seção de $600 \times 100 \times 50 \times 1$ cada, sob ação combinada de compressão e cisalhamento. ....	57
Figura 4.15 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, de painel enrijecido, com seção de $600 \times 100 \times 50 \times 1$ , sob ação combinada de compressão e cisalhamento. ....	57
Figura 4.16 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, de painel enrijecido formado pela associação de dois painéis diafragmas, com seção de $600 \times 100 \times 50 \times 1$ cada, sob ação combinada de compressão e cisalhamento. ....	58
Figura 4.17 Modos de flambagem de um painel diafragma com empenamento impedido: (a) compressão simples; (b) ação combinada de compressão e horizontal.....	58
Figura 4.18 Cargas críticas de flambagem de painel com seção de $600 \times 100 \times 50 \times 1$ , sem enrijecedor intermediário, para diferentes combinações de cargas e comprimento do painel.....	59
Figura 4.19 Cargas críticas de flambagem para diferentes combinações de cargas e	

comprimento do painel, seção de 600x100x50x1, com enrijecedor intermediário. .....	60
Figura 5.1 Resposta carga vs. deslocamento ( $v_L$ ) na placa de um painel, com seção de 600x100x50x1, submetido à compressão uniforme (na legenda, amplitudes de imperfeição inicial no modo local). .....	62
Figura 5.2 Resposta de (a) carga-deslocamento axial ( $w$ ) e (b) carga-flexão global ( $v$ ). .....	63
Figura 5.3 Painel diafragma, com seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm, submetido à compressão uniforme: (a) modo de flambagem local; (b) vista da deformada na seção transversal, em uma seção a 200 mm da extremidade inferior. .....	64
Figura 5.4 Comportamento não-linear geométrico, para o caso de imperfeição inicial nula, para painel com seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm. ....	65
Figura 5.5 Vista da deformada na seção transversal em uma seção a 557mm da extremidade inferior, ampliada em 100.000 vezes, para uma carga de $P/P_{cr}=0,02$ . Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm.....	65
Figura 5.6 Campo de deslocamentos ( $u$ ) na extremidade do painel.....	66
Figura 5.7 Resposta carga x deslocamento local ( $v_L$ ) de placa para diferentes amplitudes de imperfeições iniciais. Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm. Combinação de cargas com $F_h/F_v=1,0$ .....	67
Figura 5.8 Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm, submetido a combinação das cargas de compressão e cisalhamento, com $F_h/F_v=1,0$ : (a) modo de flambagem; (b) comportamento pós-flambagem.....	67
Figura 5.9 Deformada pós-flambagem de um painel sob combinação de cargas de compressão e cisalhamento: (a) para a seção transversal $s_1$ (Figura 5.8); (b) para seção $s_2$ (Figura 5.8). .....	68
Figura 5.10 Esquema de painel diafragma em uma edificação, com função de contraventamento. ....	68
Figura 5.11 Resposta carga x deslocamento ( $v_L$ ), para painel submetido a cisalhamento puro. ....	69

Figura 5.12 Vista de um painel, seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm, submetido a um carregamento horizontal no seu plano: (a) modo crítico de flambagem; (b) resposta do comportamento pós-flambagem.....	69
Figura 5.13 Campo de deslocamentos ( $v+v_L$ ): (a) $P/P_{cr}=0$ (imperfeição inicial), (b) $P/P_{cr}=1,0$ ; (c) $P/P_{cr}=2,0$ e (d) campo escalar para $P/P_{cr}=2,0$ . ....	70
Figura 5.14 Resultados da análise não-linear elastoplástica de painel diafragma (600x100x50x1) submetido a uma carga horizontal, comprimento de 2400 mm, deslocamento axial impedido na extremidade superior, limite de escoamento do aço ( $f_y$ ) = 240 Mpa. Deslocamentos fora do plano (y) e na direção da carga (x). .	71
Figura 5.15 Resultados da análise não-linear elastoplástica de painel diafragma (600x100x50x1) submetido a uma carga horizontal, comprimento de 2400 mm, deslocamento axial livre na extremidade superior, limite de escoamento do aço ( $f_y$ ) = 240 MPa, deslocamentos fora do plano (y) e na direção da carga (x).....	71
Figura 6.1 Vista de edifício residencial, padrão CDHU: modelo Prédios Verticais Isolados – V122-V2. ....	74
Figura 6.2. Planta baixa de um bloco com dois apartamentos, padrão CDHU, modelo Prédios Verticais Isolados – V122-V2.....	75
Figura 6.3 Pilares formados pela associação de dois perfis cartola: (a) pilar P1; (b) pilar P2. ....	75
Figura 6.4 Seção de perfis: (a) viga; (b) contraventamento. ....	76
Figura 6.5 Pavimento tipo indicando as posições dos pilares e vigas (medidas em mm). ....	77
Figura 6.6 Pórticos do edifício: (a) pórtico rígido no plano yz; (b) pórtico flexível no plano xz; (c) pórtico contraventado no plano xz (medidas em mm). ....	77
Figura 6.7 Sistema equivalente de contraventamento: (a) painel diafragma; (b) diagonal equivalente. ....	78
Figura 6.8 Substituição das diagonais de contraventamento por sistema de painéis em chapa fina formada a frio: (a) sistema original; (b) sistema proposto; (c) detalhe dos painéis.....	79
Figura 6.9 Módulo de painel formado pela associação de perfil U enrijecido: (a)	

esquema estrutural para seis perfis U enrijecidos; (b) modelo computacional em elementos finitos. ....	79
Figura 6.10 Ligação parafusada dos painéis: (a) vista geral; (b) ligação entre os painéis adjacentes; (c) detalhes de ligações parafusadas entre os painéis. ....	80
Figura 6.11 Esquema de ligação parafusada entre a viga e o painel: (a) corte do painel e da viga, com o sistema de ligação; (b) detalhe de ligação utilizando cantoneira e parafusos auto-atarraxantes.....	80
Figura 6.12 Painel diafragma submetido à carga horizontal: (a) modulação dos painéis; (b) cargas de flambagem por cisalhamento de painel diafragma, para diferentes números de perfis.....	81
Figura 6.13 Resposta carga x deslocamento em painel diafragma composta por 5 perfis, para deslocamento no plano e fora do plano do painel.....	82
Figura 6.14 Identificação da diagonal equivalente para painel com 5 perfis, formada por barra de seção circular com diâmetro d. ....	83
Figura 6.15 Visualização de flambagem local de placa, deslocamento fora do plano do painel ( $v_L$ ), para painel diafragma com cinco perfis U enrijecidos. ....	83
Figura 6.16 Tensão de Von Mises (MPa) para painel diafragma formado com cinco perfis U enrijecidos, para carga horizontal ( $F_h$ ) de 23.000 N. ....	84
Figura 6.17 Resposta: carga x deslocamento de painel diafragma com 6 perfis, para deslocamento no plano e fora do painel.....	85
Figura 6.18 Identificação da diagonal equivalente para painel com 6 perfis, formada por barra de seção circular com diâmetro d. ....	85
Figura 6.19 Coeficiente de pressão e de forma, externos, nas paredes entre dois blocos edifício, quando os blocos estiverem próximos.....	88
Figura 6.20 Coeficiente de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular, quando os blocos estiverem afastados. ....	88
Figura 6.21 Coeficiente de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular [38].....	89
Figura 6.22 Perspectiva isométrica da estrutura do edifício.....	91

Figura 6.23 Fachadas: (a) lateral com diagonais equivalentes; (b) frontal e de fundo... 91

Figura 6.24 Contraventamento de edificio por meio de barra: (a) perspectiva isométrica;  
(b) vista lateral. .... 93

# Índice de tabelas

---

---

Tabela 4.1 Cargas de flambagem à compressão simples e cisalhante puro, empenamento livre (EL) e empenamento impedido (EI), para um painel diafragma com seção de 600x100x50x1 e comprimento L de 2600 mm.....	51
Tabela 4.2 Comparação de cargas de flambagem, entre o deslocamento axial livre ou impedido na extremidade superior, para um painel de seção 600x100x50 e espessura de 1mm, submetido à carga horizontal.....	54
Tabela 6.1 Valores dos coeficientes de forma $C_e$ para um dos blocos de edifício.....	89
Tabela 6.2 Pressões de vento na parte frontal (barlavento) e fundo (sotavento) do prédio.....	90
Tabela 6.3 Deslocamentos horizontais calculados com contraventamento por painéis diafragma e por perfis diagonais e limites estabelecidos pela NBR 8800.....	94

# Lista de Símbolos

## LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A$  - área bruta da seção transversal da barra

$C_w$  - constante de empenamento da seção

$D$  - rigidez de flexão da placa

$E$  - módulo de elasticidade de Young

$G$  - módulo de elasticidade transversal do material

$I_o$  - momento de inércia polar em relação ao centro de cisalhamento da seção

$I_x$  - momento principal de inércia da seção em torno do eixo  $x$

$I_y$  - momento principal de inércia da seção em torno do eixo  $y$

$I_r$  - o momento de inércia da seção transversal de área  $A_r$

$I_t$  - momento de inércia à torção uniforme

$I_{xy}$  - produto de inércia

$J$  - constante de torção da seção

$K$  - matriz de rigidez elástico

$K_G$  - matriz de rigidez geométrica

$F_h$  - força horizontal ou cisalhante

$F_v$  - força vertical

$L$  - comprimento do perfil

$P$  - carga de compressão

$P_{cr}$  - carga crítica de flambagem elástica

## LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a - comprimento de placa

b - largura de placa

$b_1$  - largura da alma

$b_2$  - largura de flange

$b_3$  - largura de enrijecedor

t - espessura

$h_u$  - altura de enrijecedor intermediário

$b_{1r}$  - semi-largura da alma enrijecida por um enrijecedor

$f_y$  - tensão de escoamento

q - carga distribuída

x - eixo de referencia na direção x

y - eixo de referencia na direção y

z - eixo de referencia na direção z

u - deslocamento na direção x

v - deslocamento na direção y

w - deslocamento na direção z

xy - plano nos eixos x e y

xz - plano nos eixo x e z

yz - plano nos eixos y e z

cg - centro de gravidade

cc - centro de cisalhamento

$v_L$  - deslocamento local de placa

v - deslocamento devido à flexão global do perfil

$k$  - coeficiente de flambagem local

$r_0$  - raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

$r_x$  - raio de giração da seção transversal em relação ao eixo principal  $x$

$r_y$  - raio de giração da seção transversal em relação ao eixo principal  $y$

$x_0$  - distância do centro de cisalhamento da seção ao eixo principal de inércia

$y_0$  - distância do centro de cisalhamento da seção ao eixo principal de inércia

$d$  - diâmetro da barra

## LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

$\lambda$  - parâmetro de carga

$\nu$  - coeficiente de Poisson do material

$\sigma$  - carga normal de compressão ( $P/A_g$ )

$\sigma_{cr}$  - carga crítica de flambagem ( $P_{cr}/A_g$ )

$\phi$  - graus de liberdade

# Capítulo I

## Introdução

---

### 1.1 Considerações Gerais

Os perfis de aço formados a frio, objeto do presente estudo, são produtos utilizados na construção civil, sendo fabricados a partir de chapa fina e o dobramento pode ser realizado em uma dobradeira ou em uma mesa de roletes, conforme ilustrado na Figura 1.1. Os perfis dobrados podem ser abertos ou fechados, com vários tipos de seção transversal, para atenderem a finalidades estruturais, arquitetônicas e construtivas. Dão origem a estruturas leves, podendo, em certas situações, substituir economicamente os perfis soldados ou laminados.

O uso de perfis de paredes finas tem aumentado continuamente na construção civil, devido à redução do custo final do produto, aliado a um contínuo desenvolvimento tecnológico em diversas áreas relacionadas à produção de perfis. As indústrias siderúrgicas têm desenvolvido aços de alta resistência na produção de bobinas laminadas a frio ou a quente com espessura fina, galvanizadas para proteger contra a corrosão, sem perder a eficiência da proteção devido ao dobramento. A partir de chapas finas, as perfiladeiras contínuas e automatizadas produzem perfis com as dimensões

precisas e seções geométricas variadas. Por outro lado, os perfis de paredes finas são afetados por problemas de flambagem, havendo a necessidade de desenvolver pesquisas que auxiliem na definição da metodologia do cálculo estrutural, conduzindo ao aprimoramento das normas técnicas.

As aplicações de perfis de chapa dobrada são bastante amplas, sendo utilizados estruturalmente ou como material de vedação, podendo-se citar como exemplos: colunas, treliças, vigas, pisos, coberturas, painéis diafragma, fechamentos laterais e componentes estruturais para armazenamento industrial, alguns exemplos ilustrados nas Figuras 1.2 e 1.3. Podem ainda ser aplicados em associação com o concreto, formando estruturas mistas.

Os perfis de paredes finas, em função do tipo de carregamento e da geometria da seção transversal podem conduzir a fenômenos de flambagem: local das paredes, distorcional da seção, global de barra ou interação entre dois ou, ainda, a mais modos de flambagem, segundo o Davies [1]. Quanto à flambagem global, podemos citar a flambagem por flexão, por flexo-torção e a flambagem lateral de vigas.

A rigidez de um perfil dobrado pode ser aumentada, adotando-se enrijecedores de borda e intermediários de parede. Para ilustrar a evolução da conformação de terças com seções  $Z$  e  $U$  [1] [2], estão apresentados na Figura 1.4 vários tipos de seções de perfis dobrados a frio.



Figura 1.1 (a) perfiladeira de rolete contínua; (b) seqüência de dobras em uma perfiladeira.



(a)



(b)

Figura 1.2 (a) e (b); Estrutura, cobertura e fechamento lateral em hangar.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1.3 Sistema de armazenamento industrial.

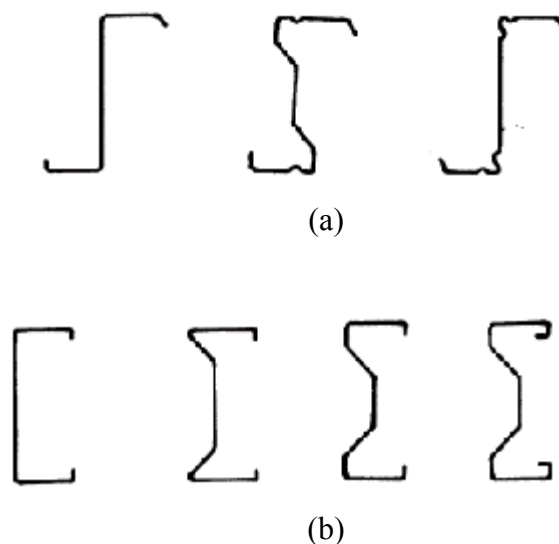


Figura 1.4 Evolução na conformação de seções dos perfis; (a) perfil Z enrijecido ;(b) perfil U enrijecido.

## 1.2 Objetivo do Trabalho

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo da presente pesquisa é a análise estrutural de painéis formados a frio por chapa de aço dobrada a frio, com a finalidade de servirem como elemento diafragma em edificações de andares múltiplos. O uso de sistemas de fechamento conhecidos como “*steel frames*”, para a execução de residências, é proposto para edifícios de andares, buscando associar as vantagens da pré-fabricação com a possível capacidade dos painéis de fechamento como elementos diafragma na edificação, se confirmada, poderá conduzir a uma alternativa atraente de sistema construtivo no campo da construção em aço.

Para alcançar tal objetivo, é necessária a verificação dos painéis estruturais, com auxílio da análise computacional e experimental. No presente trabalho foram realizados desenvolvimentos com base em análise computacional, com auxílio dos métodos dos elementos finitos e das faixas finitas. Destacamos, no entanto, que o presente tema de pesquisa apenas será concluído com auxílio de campanha de análise experimental.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os principais objetivos da presente Tese, destacam-se:

- O estudo de comportamento de painel diafragma, tipo perfil U enrijecido em chapa fina e formado a frio, com as funções de vedação e de elemento estrutural em edificações de uso residencial e comercial.
- Análise de estabilidade linear de perfis com seção aberta U enrijecido, onde são calculados os principais modos críticos de flambagem: modo de flambagem local de placa, modo distorcional e modo global, além do modo acoplado entre os modos local e distorcional, quando o perfil é submetido à compressão axial.
- Análise da estabilidade linear de painel diafragma, via Método de Elementos Finitos, quando o painel é submetido à ação vertical, horizontal e a combinação das ações vertical e horizontal.
- Estudo do comportamento não-linear elástico e elastoplástico de painéis.
- Aplicação dos resultados da análise dos elementos de painéis em sistema estrutural dirigido para a construção de edificações até 5 pavimentos.

## 1.3 Bibliografia Recente

Os modos de flambagem local de placa de perfil formado a frio, submetido à compressão, são bastante conhecidos [3], enquanto que o modo distorcional tem recebido atenção mais recentemente. No entanto, quanto a instabilidade linear e a análise não-linear elastoplástica de painéis submetidos à carga horizontal e/ou vertical, encontramos poucos resultados na literatura. A seguir, apresentam-se referências bibliográficas sobre a estabilidade de perfis de chapa fina formados a frio e de painéis submetidos à carga horizontal.

BATISTA [4] analisa a estabilidade linear de perfis de chapa fina formados a frio, computacionalmente, via métodos de elemento finitos e métodos de faixas finitas (MEF e MFF). Os modos e as cargas de flambagem obtidos, para perfil U enrijecido e

perfil *rack*, são local de placa, distorcional e global (flexo-torção e flexão). No estudo, leva-se em consideração as condições de extremidade do perfil, empenamento livre ou impedido, além de comparar os resultados obtidos numericamente com os valores teóricos no modo global de flambagem.

NAGAHAMA [5] apresenta estudos de flambagem e pós-flambagem local de perfis de aço formado a frio, via métodos de elementos finitos (MEF), em regime elástico e elastoplástico. São obtidas as cargas de flambagem e os respectivos modos de flambagem; as trajetórias de equilíbrio (carga de flambagem *vs.* comprimento do perfil) nos regimes elástico e elastoplástico.

BATISTA [6] analisa os modos de flambagem, levando em consideração as condições de empenamento nas duas extremidades do perfil, e confronta resultados computacionais com as especificações de normas para projeto estrutural de perfis de aço formado a frio. Apresentam-se, ainda, os modos acoplados e a interação entre os modos de flambagem local de placa e distorcional.

NAGAHAMA [7] apresenta resultados numéricos e experimentais, com o objetivo de determinar a carga última e o mecanismo de colapso no modo de flambagem distorcional de perfil *rack*. Os tipos de carregamentos adotados são de compressão centrada e excêntrica, o empenamento é impedido nas duas extremidades do perfil. Os ensaios experimentais [8] foram conduzidos no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Os resultados de estabilidade linear e o comportamento pós-flambagem foram obtidos numericamente, via Método de Elementos Finitos. Na análise de comportamento não-linear elastoplástica, considerou-se a influencia de imperfeição geométrica inicial.

DAVIES [9] [10] apresenta estudo numérico e experimental de painel diafragma submetido a carga horizontal, com ou sem isolantes térmicos embutidos no interior do painel, obtendo os resultados de estabilidade linear e da análise não-linear elastoplástica. Neste trabalho, apresenta a importância das condições de contorno, tipo de restrição nos nós do flange adotada na análise numérica, para obter os resultados aproximados com os experimentos.

MATTEIS [11] apresenta painel enrijecido como sistema de proteção passiva contra sismo, além de funcionar como sistema de contraventamento em edifícios

estruturados em aço. Neste exemplo, adota painel de alumínio, devido à baixa tensão de escoamento e ductibilidade do material. Quando o painel é submetido a carga sísmica, pode flambar e plastificar, funcionando como dissipador de energia. Posteriormente, o painel plastificado pode ser substituído por um novo. Em substituição ao painel de alumínio, pode-se adotar aço de baixa resistência ao escoamento,  $f_y = 90-120$  MPa, técnica adotada na construção de edifício Nikken Sekkei Ltd em Tokyo [12].

## 1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os métodos construtivos em painéis diafragmas e alguns exemplos de construções em painéis, além dos métodos numéricos utilizados na análise computacional deste trabalho.

No Capítulo 3 são apresentados os principais modos de flambagem e as respectivas cargas de flambagem de perfis de chapa fina formados a frio, por meio de Métodos de Elementos Finitos (MEF). Na análise numérica, o perfil é discretizado como elementos cascas, levando-se em consideração a influência das condições de contorno nas extremidades do perfil, empenamento livre ou impedido, e o comprimento do perfil.

No Capítulo 4 faz-se análise de estabilidade linear dos painéis, sob diferentes combinações de cargas: axial e horizontal, por meio de Métodos de Elementos Finitos, obtendo-se a carga de flambagem e o respectivo modo de flambagem.

No Capítulo 5 são feitas análises não-lineares elástica e elastoplástica para diferentes imperfeições iniciais do painel, permitindo analisar o comportamento pós-flambagem.

No Capítulo 6 são feitos estudos de painel diafragma, com a função de contraventamento em um edifício residencial. Nesta análise adota-se simplificação, substituindo-se os painéis diafragmas por diagonais equivalentes para reduzir o esforço computacional.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentados as conclusões e sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras.

# Capítulo II

## Sistema Construtivo e Metodologia de Análise

---

### 2.1 Sistemas Construtivos

Os painéis diafragmas, em chapas de aço, podem ser usados para resistirem às forças horizontais devidas ao vento e ação sísmica [12]. As principais vantagens relacionadas a estas construções, são a melhoria na dissipação de energia e o aumento da rigidez lateral da construção. Os painéis com as funções de vedação e estrutural, conhecido como painel diafragma ou painel *cassette*, segundo Davies [1] [9] [10], são utilizados em construções residenciais ou comerciais, submetidos a combinação das ações vertical e horizontal.

Geralmente, para construções com até dois pavimentos, são adotados painéis diafragma isoladamente como estrutura. Quando a construção tiver mais de dois pavimentos, os painéis trabalham em conjunto com os pilares e as vigas [9] [10] e, neste caso, o painel pode resistir apenas às cargas horizontais, substituindo os contraventamentos convencionais formados por elementos de barra e proporcionando economia de material, rapidez e padronização na construção e redução no custo.

Outros tipos de painéis, em perfis metálicos e submetidos à carga horizontal, podem fazer parte de uma construção, tais como: (i) laje mista com forma de aço incorporada (*Steel Deck*), em associação com o concreto, (ii) coberturas em telhas corrugadas [13][14] e (iii) painéis de fechamento lateral, sendo esses últimos em geral aplicados a galpões e construções para fins industriais.

Os painéis podem ser obtidos pela aplicação de perfis diafragma, ilustrado na Figura 2.1 (a), que é formado por um perfil U enrijecido. Em geral, a alma ( $b_1$ ) tem largura de 300 a 600 mm, os flanges ( $b_2$ ) de 60 a 200 mm e os enrijecedores de borda ( $b_3$ ) com dimensões de 30 a 60 mm, sendo a espessura ( $t$ ) das chapas de 0,75 a 1,50mm [15]. Estes painéis devem resistir às forças verticais devidas às cargas permanentes e variáveis, e às forças horizontais originadas da carga de vento e dos deslocamentos devidos a variações de temperatura na edificação.

Na Figura 2.1 (b) é mostrado um perfil com enrijecedor intermediário de parede com altura  $h_u$ , sendo  $b_{1r}$  a subdivisão da largura da alma ( $b_1$ ) ao introduzir enrijecedor de parede na alma. O detalhe do enrijecedor de parede na alma é ilustrado na Figura 2.1 (c).

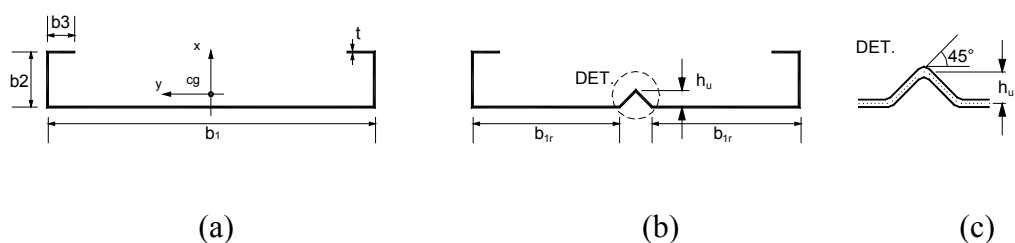


Figura 2.1 Perfil diafragma: (a) sem enrijecedor intermediário, (b) com enrijecedor intermediário, (c) detalhe de enrijecedor intermediário.

Os painéis recebem acabamentos nas duas faces para melhorar a aparência e proteção contra intempéries e incêndio [16]. Os principais materiais de acabamento são: gesso acartonado, lâminas de *siding vinílico*, placa cimentício ou placa OSB (*Oriented Strand Board*) [17].

Os vazios dos painéis podem ser preenchidos para melhorar as características termo-acústicas, utilizando-se lã de vidro ou lã de rocha. Também se usam placas de

isopor. As tubulações da rede elétrica e hidráulica podem ser introduzidas nos vãos internos dos painéis. Se os vãos forem preenchidos com poliuretano, além de melhorar o desempenho termo-acústico, obtém-se maior rigidez nos painéis ao impedir a flambagem local das paredes. A proteção contra umidade nas paredes podem ser obtidas utilizando-se membranas que impedem a passagem de gotas de água para o interior da construção, mas permitem a passagem de vapor para o exterior [17].

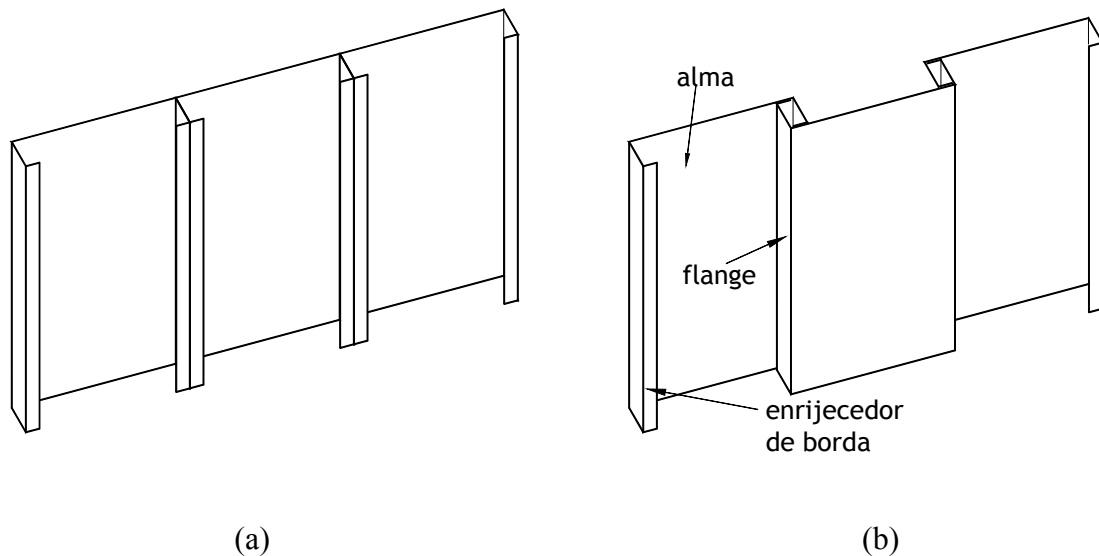


Figura 2.2 Painéis formados com a combinação de painéis U enrijecido.



Figura 2.3 Construção residencial baixa em painel diafragma [18]: (a) durante a montagem, (b) residência concluída.

Nas montagens de painéis diafragma, podem ser adotadas diferentes modulações, conforme são ilustradas na Figura 2.2. A Figura 2.3 (a) mostra a seqüência de montagem de painéis durante a construção residencial, e na Figura 2.3 (b) a residência já concluída

Para ilustrar o uso de painel diafragma em edifícios, em substituição a contraventamentos tradicionais, é mostrada na Figura 2.4 um edifício comercial durante a construção [9].



Figura 2.4 Vista de painéis diafragma.durante a construção de um edifício comercial [9]

## **2.2 Métodos de Análise**

### **2.2.1 Método dos Elementos Finitos**

Na análise estrutural, adotou-se o Método dos Elementos Finitos para a análise de estabilidade linear e não-linear. Adotou-se o Programa Shell (Ribeiro, Landau) [19], para a análise de estabilidade linear , no qual são determinadas as cargas de flambagem e os respectivos modos de flambagem em função da geometria do painel. Para a análise de estabilidade não-linear elastoplástica, utilizou-se os programas Ansys e SAP 2000 para determinar a trajetória de equilíbrio elastoplástica e o carregamento limite.

## 2.2.2 Programa Shell

Na análise de estabilidade linear elástica, é necessário resolver o problema clássico de autovalores expresso pela equação matricial a seguir:

$$(K + \lambda K_G)\phi = 0 \quad (2.1)$$

Na expressão acima,  $K$  e  $K_G$  são respectivamente matrizes de rigidez elástica e geométrica,  $\lambda$  é o parâmetro de carga e  $\phi$  representa os graus de liberdade.

No presente trabalho adota-se o programa Shell [19], baseado no MEF, para análise do problema acima, sendo que o problema de autovalor é resolvido por meio do método de iteração por subespaço [20]. As estruturas são discretizadas por meio de elementos de casca e a matriz  $K_G$  é obtida a partir da formulação Lagrangeana total aplicada ao elemento tridimensional degenerado quadrilátero de 8 nós, ilustrado a seguir.

A geometria do elemento de casca quadrilátero com oito nós, ilustrada pela Figura 2.5, é discretizada pela superfície média do elemento.

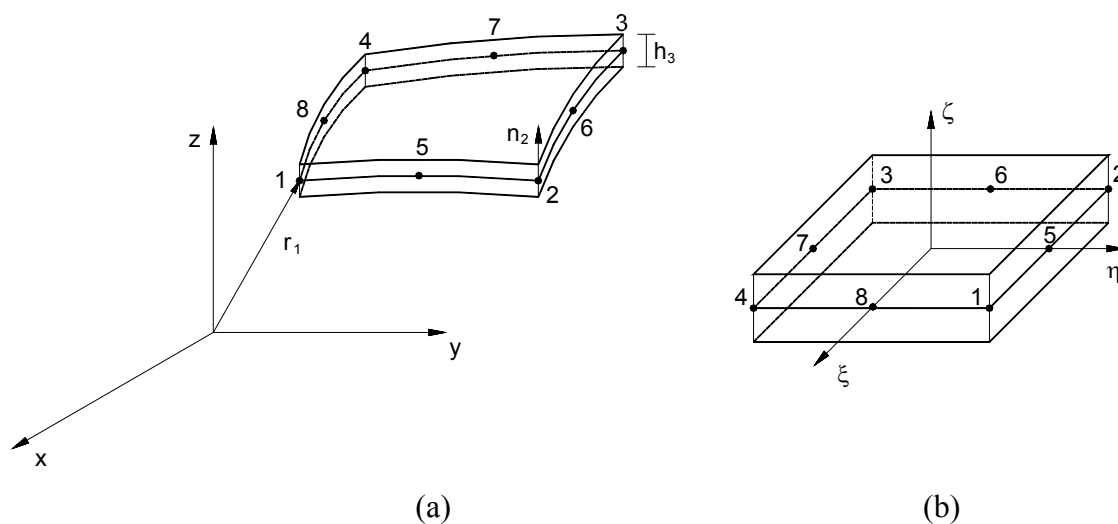


Figura 2.5 Elemento tridimensional degenerado de oito nós: (a) coordenadas globais; (b) coordenadas naturais.

### 2.2.3 Programa Ansys

Adotou-se o programa Ansys [21], baseado em Método dos Elementos Finitos, na análise não-linear elastoplástica dos painéis. Os elementos cascas utilizados são Shell 63 e Shell 143, que constam na biblioteca do programa. Os dois elementos são quadriláteros com quatro nós por elemento e com seis graus de liberdade por nó.

O elemento Shell 63 permite a análise linear elástica, obtendo-se a carga de flambagem e o respectivo modo de flambagem que é adotado como a imperfeição inicial na análise não-linear. Com este elemento é possível, ainda, fazer análise não-linear elástica, determinar a trajetória de equilíbrio estável elástico.

O elemento Shell 143 é adotado para análise não-linear elastoplástica, permitindo determinar a trajetória de equilíbrio, além da carga de colapso do painel, identificada como carga limite. A magnitude de imperfeição inicial é tomada como uma fração da espessura da chapa do painel, em torno de 1% a 10%. No programa Ansys a deformada inicial é obtida de modo automático, a partir da análise linear elástica, adotando-se o primeiro modo de flambagem. Na análise elastoplástica, adotou-se um valor de resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ) para o modelo elastoplástico do material. A trajetória de equilíbrio é obtida adotando-se a técnica de controle de comprimento de arco (*arc-length control*). Esta técnica permite obter a configuração deformada, além da carga limite, na região de descarga da estrutura.

# Capítulo III

## Análise de Estabilidade Elástica

---

### 3.1 Introdução

Neste capítulo analisa-se numericamente a estabilidade elástica de perfis formados a frio, que são as cargas e os respectivos modos de flambagem, por meio de Métodos de Elementos Finitos (MEF), além da influência das condições de contorno nos resultados de flambagem. Adota-se o programa Shell nas análises, desenvolvido originalmente por Ribeiro e Landau [19]. Este programa, em conjunto com pré-processador e pós-processador desenvolvidos pelo autor, permitem gerar os dados de entrada e armazenar os resultados de maneira automática para diferentes comprimentos de perfil.

Os resultados numéricos obtidos na análise de estabilidade elástica, curvas de cargas de flambagem ( $\sigma$ ) vs. comprimentos (L), permitem interpretar a estabilidade de um perfil para diferentes comprimentos. Já, o modo de flambagem pode ser adotado como imperfeições geométricas iniciais na análise do comportamento não-linear elástica e elastoplástica.

Primeiramente, analisa-se estabilidade de placas isoladas apoiadas nas quatro bordas, submetida à compressão axial, levando-se em consideração as influências das condições de contorno nos resultados. Faz-se, também, um estudo de uma placa quadrada apoiada nas quatro bordas, submetida a cisalhamento puro. Estes resultados de estabilidades de placas isoladas permitiram a comparação com os resultados teóricos, validando, assim, o programa Shell.

De um modo geral, os resultados da análise de instabilidade de uma barra comprimida de seção aberta indicam, em ordem crescente de comprimento, os modos local de placa (MLP), distorcional da seção (MD), ou, ainda, segundo os modos globais de flambagem de barras: por torção (MT), por flexo-torção (MFT) e por flexão (MF).

Em certos tipos de perfis de seção aberta, que dependem da geometria da seção transversal e do comprimento, podem ocorrer o acoplamento entre os modos de flambagem local (MLP) e distorcional (MD). Em geral, o modo de flambagem por flexo-torção, que é um modo acoplado entre os modos de flambagem por flexão e torção, é identificado como modo crítico para barras longas..

A flambagem por torção, que não faz parte do presente trabalho, ocorre quando a resultante da carga de compressão for aplicada sobre o centro de cisalhamento (CC). Nestes casos, como não há acoplamento entre os modos de flexão e torção, não se verifica o modo de flambagem por flexo-torção.

Para validar o programa Shell, no caso de empenamento livre e para os modos de flambagem local de placa e distorcional, os resultados obtidos do MEF são comparados com aqueles obtidos pelo Método de Faixas Finitas (MFF) [22]. Os modos globais de flambagem são comparados com os valores teóricos fornecidos pela Teoria da Estabilidade Elástica, Timoshenko [23], estes resultados podem ser obtidos analiticamente.

## 3.2 Estabilidade elástica de placas isoladas

### 3.2.1 Placa submetida à compressão simples

A seguir, apresentam-se os resultados numéricos de placas isoladas com diferentes condições de contorno e submetidas à compressão axial. Os resultados obtidos, via MEF, são comparados com valores teóricos de flambagem segundo a solução analítica, de acordo com a Teoria de Estabilidade Elástica.

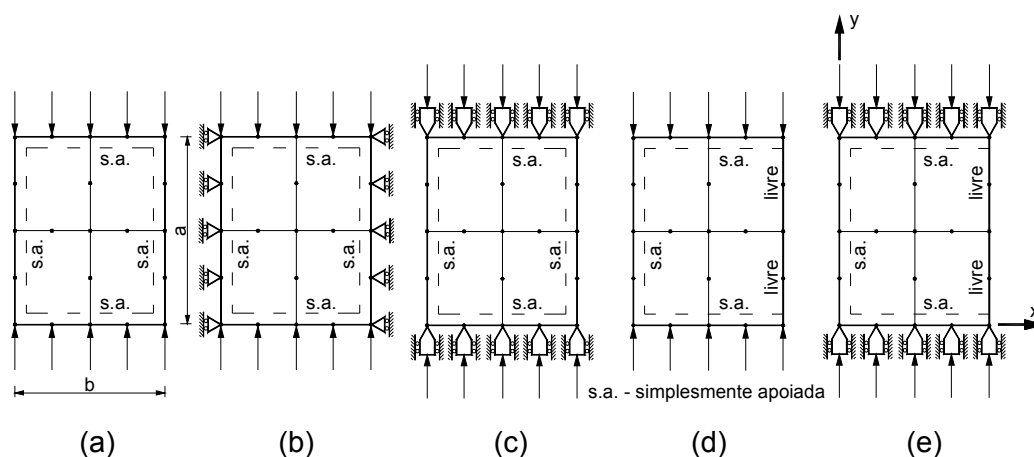


Figura 3.1 Placas submetidas à compressão uniforme com diferentes condições de contorno: (a) sem restrição a deslocamento no plano; (b) com restrição a deslocamento lateral nas bordas longitudinais; (c) com restrição a deslocamento lateral nas bordas transversais; (d) o deslocamento lateral nas bordas transversais é livre; (e) com restrição a deslocamento lateral nas bordas transversais.

As placas analisadas têm as seguintes dimensões: largura ( $b$ ) de 100 mm, comprimento ( $a$ ) variável, espessura de 1,0 mm, módulo de elasticidade ( $E$ ) de 210.000 MPa e o coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) igual a 0,3. Estas placas, que são submetidas à compressão uniforme, apresentam diferentes condições de contorno, conforme ilustradas na Figura 3.1. As placas nas Figura 3.1 (a), (b) e (c) estão simplesmente apoiadas nas quatro bordas e nas Figura 3.1 (d) e (e) são apoiadas em três bordas e livre na outra. Em relação à restrição no plano da placa, na Figura 3.1 (a) o deslocamento é totalmente livre nas quatro bordas, em (b) impedido o deslocamento lateral nas duas bordas na direção longitudinal, em (c) impedido o deslocamento lateral nas duas bordas

transversais, em (d) o deslocamento é livre em todo o plano e em (e) impedido o deslocamento das duas bordas transversais.

Para se resolver os problemas de autovalor e autovetor, que conduzem à carga crítica e ao modo de flambagem, além das condições de contorno impostos no problema, são necessários introduzir vínculos para impedir translação de corpo rígido. Em relação aos modelos das placas, considerando a placa no plano  $xy$ , deve-se impedir translação do corpo rígido nas direções  $x$  e  $y$  introduzindo vínculos, de tal maneira que não perturbem as deformações nas placas, causadas pela carga axial. Na Figura 3.2, são ilustrados os vínculos introduzidos para impedir a translação de corpo rígido, além dos deslocamentos representados pelas linhas tracejadas devido à compressão axial, referentes às placas da Figura 3.1.

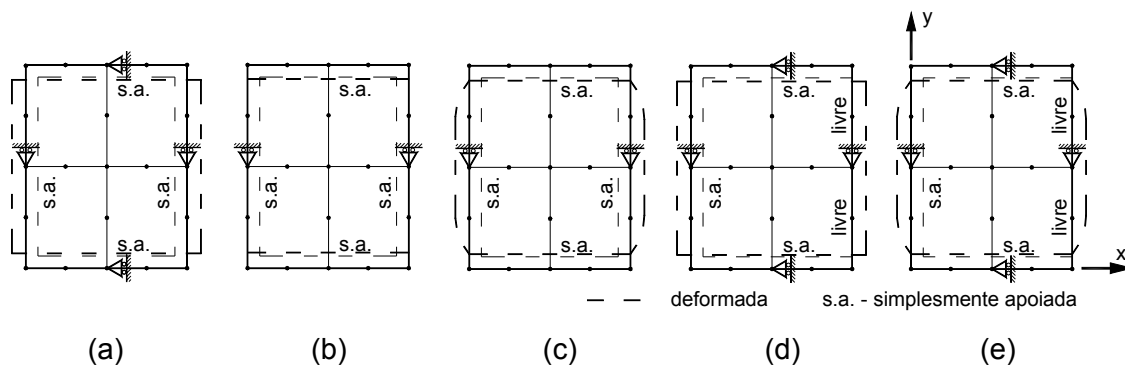


Figura 3.2-Vínculos introduzidos para impedir a translação de corpo rígido no plano da placa. A linha tracejada refere-se à placa deformada, levando-se em consideração as condições de contorno mostradas na Figura 3.1.

Discutem-se, a seguir, os resultados da análise de estabilidade elástica das placas, levando-se em consideração as influencias das condições de contorno. Graficamente, são representadas pelas curvas em função de coeficiente de flambagem ( $k$ ) vs. comprimento ( $a$ ). O valor de coeficiente de flambagem ( $k$ ) é obtido da equação a seguir:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3.1)$$

Onde:  $\sigma_{cr}$ ,  $k$ ,  $E$ ,  $b$ ,  $\nu$  e  $t$  são respectivamente, carga crítica de flambagem (apresentada de modo paramétrico pela relação  $\sigma_{cr}=P_{cr}/A$ , sendo  $A$  a área da seção transversal da placa e  $P_{cr}$  a carga crítica de flambagem), coeficiente de flambagem local, módulo de elasticidade, largura da placa, coeficiente de *Poisson* e espessura da placa.

Primeiramente, é analisada a placa com as condições de contorno ilustradas na Figura 3.1 (a), simplesmente apoiadas nas quatro bordas e submetida à compressão axial. Neste modelo de placa, o deslocamento nas bordas, no plano da placa, é totalmente livre.

Os resultados obtidos numericamente via MEF são apresentados na Figura 3.3 (a) e, na Figura 3.3 (b), são comparados com os resultados teóricos [24] O coeficiente de flambagem ( $k$ ) é expresso analiticamente pela equação (3.2), onde:  $m$ ,  $a$  e  $b$  representam, respectivamente, número de meias ondas na direção longitudinal, comprimento e largura da placa. As diferenças máximas entre os resultados numérico e teóricos são pequenos, variando de 1,01% a 0,50%, respectivamente para o primeiro e o segundo modo de flambagem. Nota-se que, à medida que aumenta o comprimento longitudinal, o valor de coeficiente de flambagem pelo MEF aproxima-se do valor teórico igual a 4,0.

$$k = \left( m \frac{b}{a} + \frac{1}{m} \frac{a}{b} \right)^2 \quad (3.2)$$

As curvas de coeficientes de flambagem ( $k$ ) são semelhantes a uma parábola, conforme a Figura 3.3, mas tende para um valor constante à medida que aumenta o comprimento da placa. Os valores são mínimos quando a relação comprimento longitudinal ( $a$ ) e largura ( $b$ ) da placa forem inteiros ( $a/b = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), ou seja, se o comprimento da meia onda longitudinal for igual à largura da placa. Portanto, os pontos mínimos repetem-se harmonicamente. Na mesma figura, os números entre parenteses representam quantidades de meias ondas na direção longitudinal da placa. Na mesma figura são apresentados os resultados teóricos segundo a equação (3.2), verificando-se boa concordância com os resultados numéricos obtidos via MEF.

Para a placa com as condições de contorno conforme ilustrada na Figura 3.1 (b), simplesmente apoiadas nas quatro bordas e submetida à compressão uniforme, com

impedimento a deslocamento lateral nas bordas longitudinais, conforme se observa na Figura 3.4, há redução dos valores do coeficiente de flambagem, sendo o coeficiente de flambagem mínimo inferior ao valor mínimo encontrado no caso anterior.

Os resultados da análise de estabilidade para a placa com as condições de contorno conforme a Figura 3.1 (c), simplesmente apoiadas nas quatro bordas e submetida à compressão uniforme, com restrição a deslocamento lateral, no plano da placa, nas bordas transversais, estão apresentados na Figura 3.5. Neste modelo, há uma pequena influência nos valores de coeficientes de flambagem para comprimento curto, influência essa que tende a se anular para comprimentos maiores, conforme mostrado na Figura 3.5. Esse efeito corresponde à influência das condições de bordas transversais.

Por último, apresenta-se na Figura 3.6 os resultados da análise para placas com as condições de contorno conforme a Figura 3.1 (d) e (e), sem e com restrição a deslocamento lateral nas bordas transversais, em ambas, simplesmente apoiada nas três bordas e livre em uma borda longitudinal, submetidas à compressão uniforme. O modo de flambagem da placa forma apenas uma meia onda na direção longitudinal, independentemente da relação comprimento-largura, ( $a/b$ ).

Os valores de coeficientes de flambagem são coincidentes nos dois casos, conforme a Figura 3.6. Portanto, as restrições de deslocamentos laterais nas bordas transversais não influenciam os resultados de estabilidade. As curvas de coeficiente de flambagem são do tipo hiperbólica, decrescendo abruptamente e tendendo para o valor teórico igual a 0,425 no modo crítico de flambagem [23].

Os diferentes modos de flambagem em função de comprimento da placa, referentes ao problema anterior, são ilustrados na Figura 3.7.

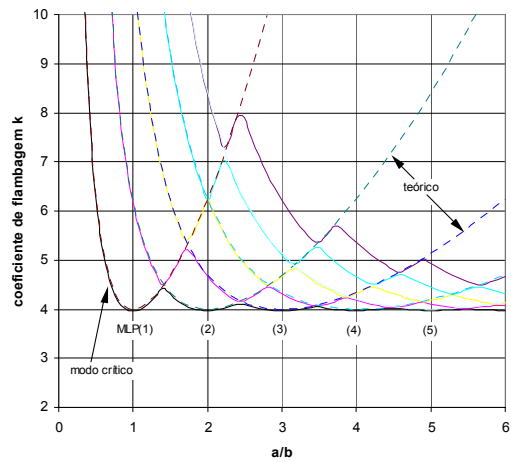


Figura 3.3 Coeficiente de flambagem para placa sem restrição a deformação lateral, Figura 3.1 (a). Coeficiente flambagem, via MEF e teórico, segundo a equação (3.2).

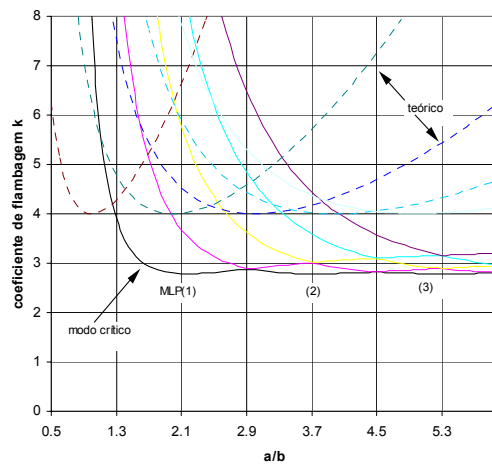


Figura 3.4 Coeficiente de flambagem para placa com restrição a deformação lateral nas bordas laterais, Figura 3.1 (b). Coeficiente de flambagem, via MEF e teórico segundo equação (3.2).

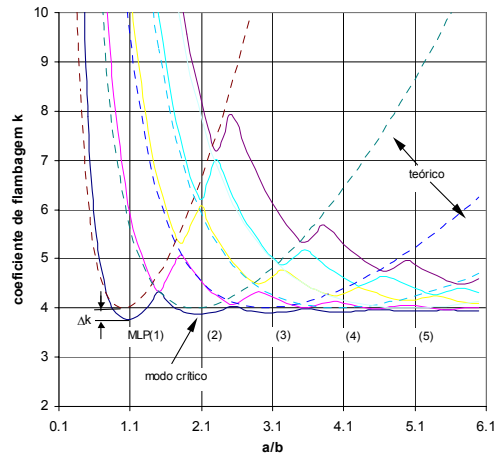


Figura 3.5 Coeficiente de flambagem para placa com restrição a deformação lateral conforme, Figura 3.1 (c). Coeficiente de flambagem, via MEF segundo a equação (3.2).

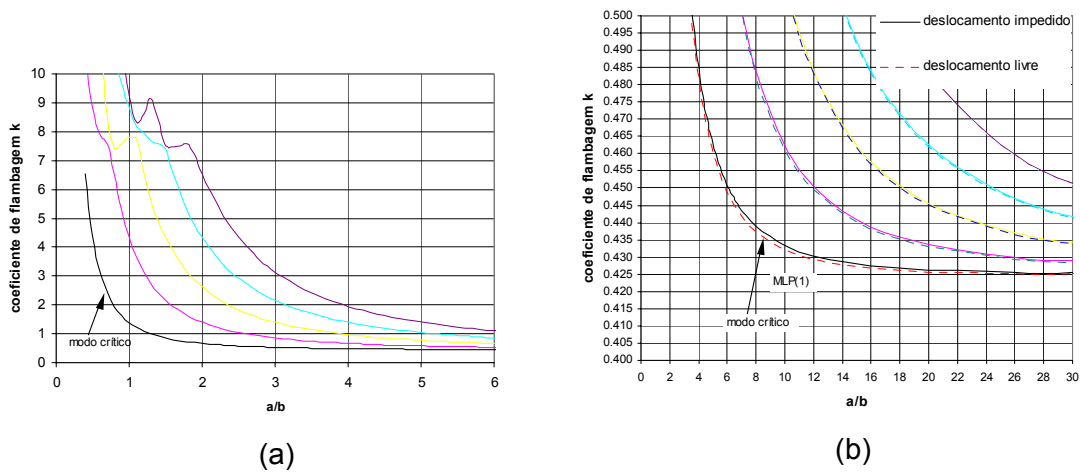


Figura 3.6 Coeficiente de flambagem para placa com três bordas apoiadas e uma livre: (a) sem restrição ao deslocamento lateral nos apoios transversais Figura 3.1 (d); (b) sem e com restrição ao deslocamento lateral nos apoios transversais (as curvas se sobrepõem) Figuras 3.1 (d) e (e).

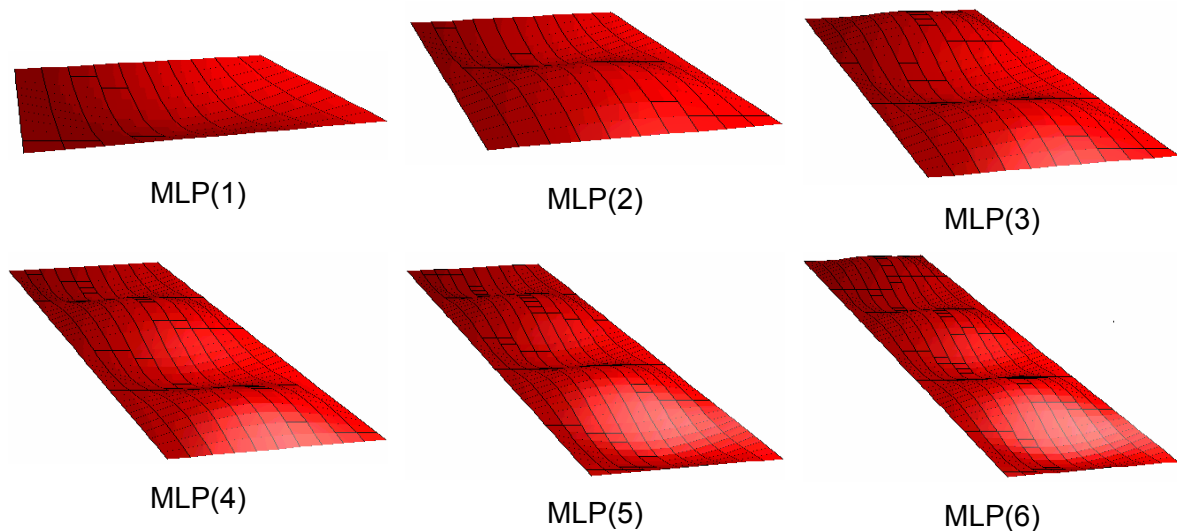


Figura 3.7 Modos de flambagem para placa isolada simplesmente apoiada nas quatro bordas e submetida a uma carga axial uniforme. O número entre parênteses refere-se ao número de meias ondas.

### 3.2.2 Placa submetida a cisalhamento puro

Examina-se, via MEF, um exemplo de placa submetida a cisalhamento puro. A placa é quadrada (100 mm x 100 mm) com as quatro bordas simplesmente apoiadas, ilustrada na Figura 3.8 (a): espessura de 1,0 mm, módulo de elasticidade ( $E$ ) de 210.000 MPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,3.

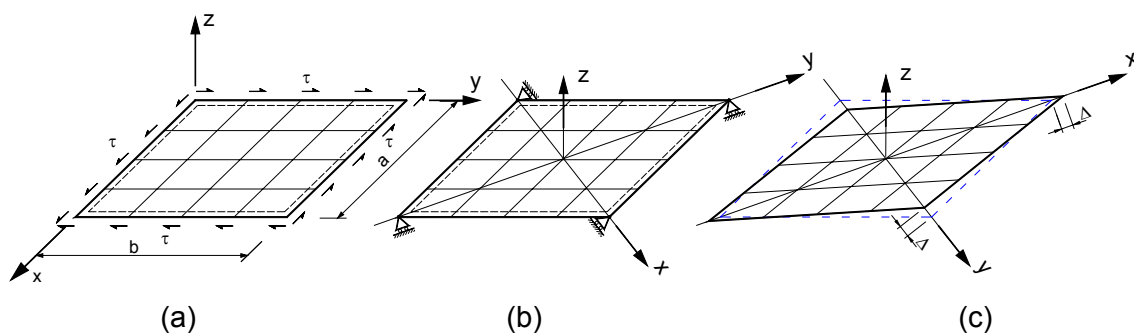


Figura 3.8 Placa quadrada com as bordas simplesmente apoiadas e submetida a cisalhamento puro: (a) carga cisalhante nas bordas, (b) mudança de eixo de referência e vínculos introduzidos para impedir a translação de corpo rígido, (c) deformação da placa.

Neste exemplo, adotou-se os eixos de coordenadas conforme mostrado na Figura 3.8 (b), para que permitam deslocamentos da placa ( $\Delta$ ) conforme ilustrado na Figura 3.8 (c), a partir dos quatro vínculos introduzidos nos vértices da placa. Estas condições impedem a translação de corpo rígido, conforme ilustra a Figura 3.8 (c).

Os resultados dos cinco primeiros modos de flambagem local de placa, submetida ao cisalhamento puro, são visualizados na Figura 3.9, onde são observados diferentes números de meias ondas na placa. O número entre parênteses representa o número de meias ondas.

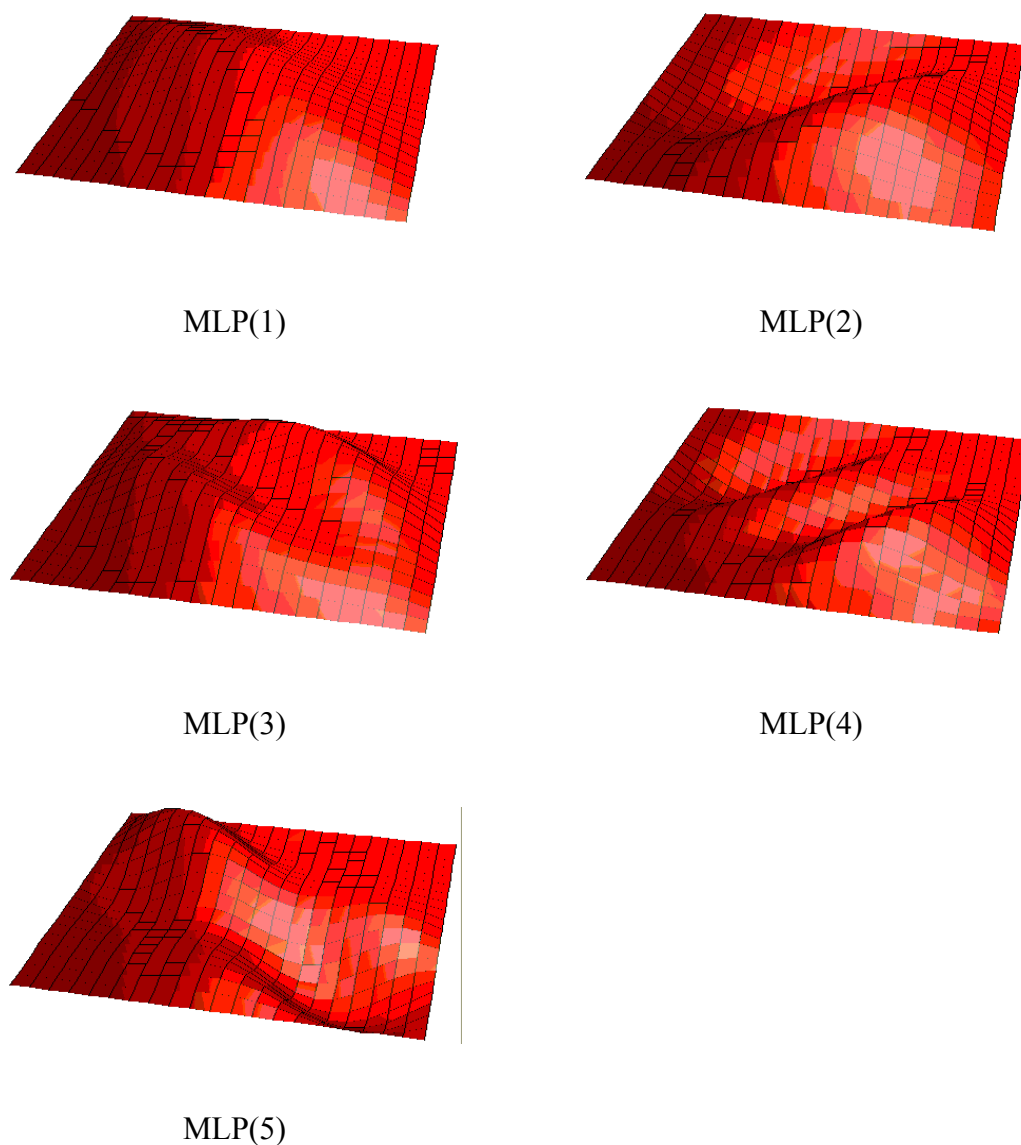


Figura 3.9- Modos de flambagem de uma placa apoiada nas quatro bordas e submetida ao cisalhamento puro.

O valor de coeficiente de flambagem ( $k$ ) para uma placa quadrada submetida a cisalhamento puro, calculado via MEF, é igual a 9,24 e o valor teórico, conforme TIMOSHENKO [23], é de 9,34, apresentando uma diferença de apenas 1,08%.

Portanto verificamos pelos resultados apresentados acima que o programa Shell está habilitado a realizar análise de estabilidade em elementos de placa. A seguir o mesmo programa será aplicado na análise de barras formadas por elementos de placas dobradas e esbeltas.

### 3.3 Estabilidade elástica de perfil

#### 3.3.1 Cargas atuando no perfil

Para exemplificar um perfil formado a frio sob compressão axial, adota-se perfil U simples, conforme ilustrado na Figura 3.10 (a). Na simulação da resultante de carga no centro de gravidade (cg), aplica-se uma carga uniformemente distribuída ( $q$ ) nas duas extremidades da barra comprimida, conforme a Figura 3.10 (b), onde, as cargas uniformes são substituídas por cargas nodais equivalentes na análise via MEF, conforme visualizados na Figura 3.10 (c).

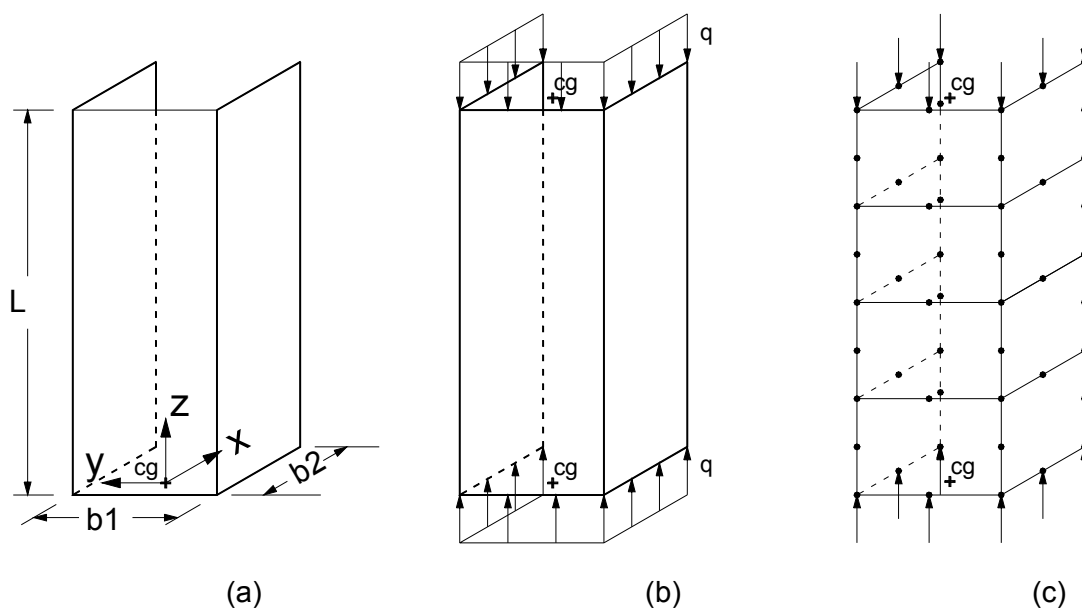


Figura 3.10 (a) Barra comprimida de perfil U simples com os eixos de referência e dimensões; (b) carga axial uniformemente distribuída nas extremidades; (c) cargas nodais equivalentes.

#### 3.3.2 Condições de contorno do perfil

Na análise de estabilidade, são necessários levar em consideração as condições de restrição dos nós nas extremidades do perfil para o cálculo das cargas de flambagem

e os respectivos modos de flambagem. Neste trabalho são analisadas para as condições de empenamento livre e impedido.

### 3.3.3.1 Condição de empenamento livre

As condições de contorno são introduzidas para simularem situações de empenamento livre e, ao mesmo tempo, impedir o movimento de corpo rígido. As seguintes condições são impostas: restrição a deslocamentos no plano  $xy$ , em todos os nós das extremidades inferior e superior da barra comprimida, e restrição a deslocamento na direção  $z$ , por um nó à meia altura do modelo, condições essas ilustradas nas Figura 3.11 (a) e (b). Essas condições permitem analisar a barra comprimida no modo de flambagem global como sendo bi-rotuladas e as paredes das extremidades rotuladas localmente. Além de permitirem os deslocamentos das seções transversais das extremidades na direção  $z$ . Ou seja, as seções das extremidades não permanecem planas e, portanto, simulam as condições de empenamento livre.

O carregamento axial da barra comprimida, sem a imperfeição geométrica inicial e pequena carga, causa uma deformação uniforme na seção do plano  $xy$  da barra ao longo do eixo longitudinal, com exceção das regiões próximas às extremidades devido às restrições a deslocamento transversal. Para contornar este problema, existe a possibilidade de se permitir deformação uniforme em toda a seção da barra comprimida. Por exemplo, se adotar as condições de contorno mostradas na Figura 3.11 (c), restringindo o deslocamento em apenas três nós. No entanto, essas condições de contorno podem provocar o modo de flambagem indicado na Figura 3.11 (d), não sendo este o modo de flambagem de interesse na presente análise. Por isso, há necessidade de se restringir o deslocamento transversal, no plano  $xy$ , nas extremidades da barra.

A restrição ao deslocamento longitudinal, na direção  $z$ , é assegurada por um nó como mostra a Figura 3.11 (b) à meia altura da barra. Isto permite as rotações em torno dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  e deslocamentos nas direções  $x$  e  $y$ . Desse modo, fica assegurada a possibilidade de desenvolvimento dos modos de flambagem global: por flexo-torção e por flexão.

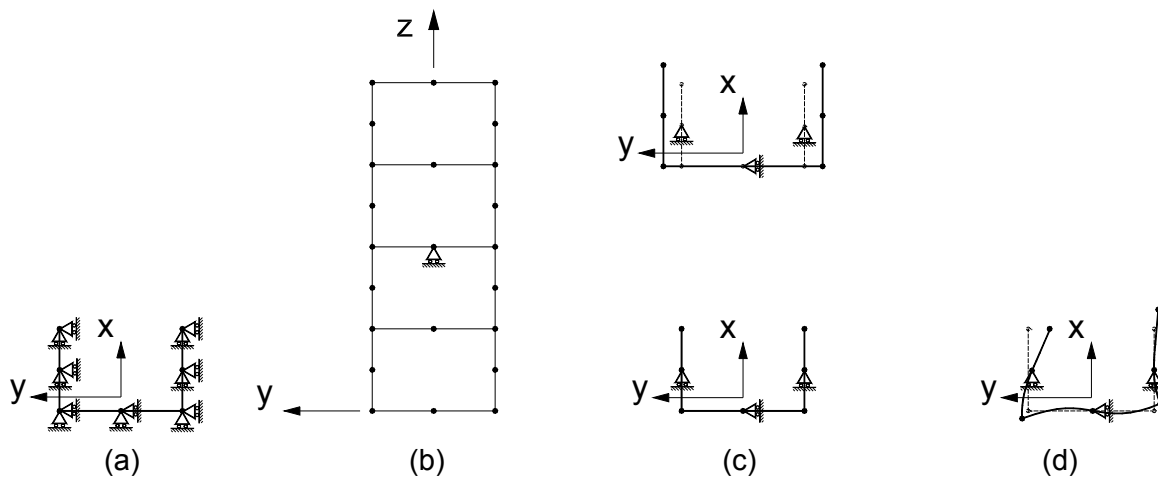


Figura 3.11 Condições de contorno para empenamento livre: (a) deslocamentos impedidos no plano  $xy$ , nós das extremidades da barra comprimida; (b) deslocamento impedido na direção  $z$ , por um nó à meia altura; (c) restrição nas extremidades da barra comprimida, para simular deformação uniforme da seção transversal ao longo do eixo longitudinal; (d) modo de flambagem nas seções das extremidades, quando restringido o deslocamento por apenas três nós.

### 3.3.3.2 Condição de empenamento impedido

Para a condição de empenamento impedido, é simulada a condição de ensaio experimental, onde a barra comprimida é apoiada nas duas extremidades sobre placas rígidas de aço, globalmente bi-rotuladas em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , e com rotação de torção em torno do eixo  $z$  impedida nos apoios.

Nos ensaios de perfis *rack*, realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil COPPE/UFRJ, o empenamento foi impedido moldando-se placas de material compósito de resina reforçada com fibra de vidro nas extremidades da barra comprimida, conforme descrito por VAZQUES [25]. Na solução computacional, o empenamento é impedido adotando-se placas de aço com espessura de 30 mm, conforme ilustrada Figura 3.12 (a), fixadas nas extremidades da barra comprimida. As placas espessas introduzidas nas extremidades não permitem os deslocamentos no plano  $xy$  da seção e mantém planas as seções transversais das extremidades, com empenamento impedido, além de engastar localmente as paredes das extremidades da barra comprimida.

À meia altura da barra comprimida está posicionado um vínculo simples, impedindo deslocamento na direção  $z$ , conforme a Figura 3.12 (d). Os deslocamentos no direções  $x$ ,  $y$  e rotação em torno do eixo  $z$  são impedidos através de um nó localizado no centro de gravidade (cg) da seção do perfil localizado sobre a placa rígida de extremidade, Figura 3.12 (c). Isto faz com que as extremidades da barra comprimida sejam globalmente rotuladas. As cargas nodais equivalentes estão apresentadas na Figura 3.12 (b).

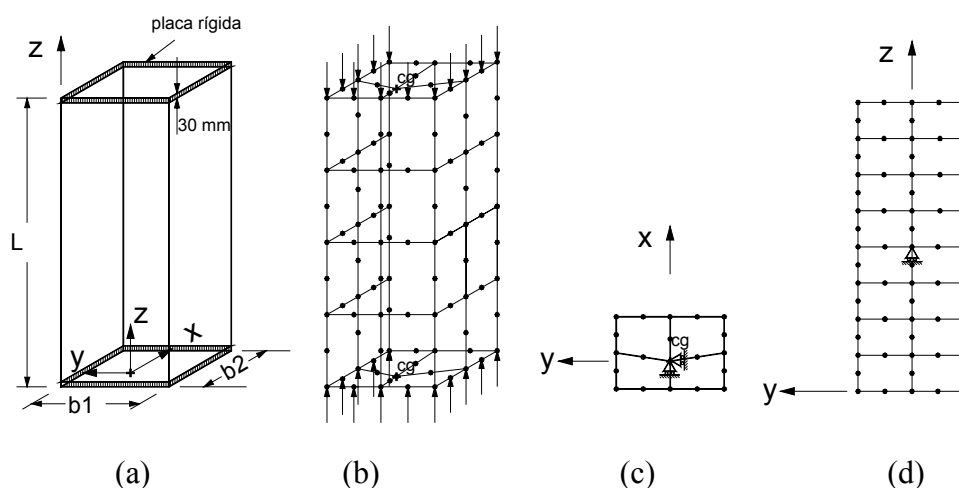


Figura 3.12- Condições de contorno para empenamento impedido: (a) barra comprimida com placas rígidas nas extremidades; (b) carga de compressão nos nós de extremidade da barra comprimida; (c) ponto de restrição a deslocamento lateral e de torção; (d) deslocamento longitudinal impedido por um nó à meia altura na direção  $z$ .

### 3.3.3 Modos de Flambagem

Os perfis formados a frio são elementos esbeltos, com relação largura-espessura elevada das paredes, estando sujeitos a diferentes modos de flambagem, tais como: flambagem local de placa (MLP), flambagem distorcional da seção (MD), flambagem global (MG) por torção, por flexo-torção (MFT) e por flexão (MF). De um modo geral, as cargas de flambagem e os respectivos modos de flambagem estão relacionados com a geometria da seção transversal, comprimento, tipo de carregamento e as condições de apoio nas extremidades da barra.

Para o estudo desses fenômenos, pode-se aplicar, por exemplo, o método dos elementos finitos (MEF), ou o método das faixas finitas (MFF). No entanto, verifica-se a necessidade da realização de ensaios em laboratório para validar os resultados numéricos, devido ao fato dos perfis apresentarem imperfeições geométricas, físicas e condições de contorno que influenciam o comportamento estrutural e os modos de colapso.

Para exemplificar, considera-se uma placa retangular esbelta e isolada, com as quatro bordas simplesmente apoiadas e submetida a uma carga de compressão uniforme aplicada no seu plano médio, Figura 3.13 (a), onde o modo de flambagem local de placa (MLP) é ilustrado na Figura 3.13 (b). Quando a placa flete, formam-se meias ondas senoidais na direção longitudinal e uma meia onda na direção transversal. Essa placa, como todos os perfis formados a frio, apresenta um comportamento pós-flambagem estável, com aumento de rigidez, conforme ilustra o gráfico carga de flambagem ( $\sigma$ ) vs. deslocamento ( $w$ ), da Figura 3.14 (a).

Nas placas sem as imperfeições geométricas iniciais, a mudança da trajetória de equilíbrio entre as fases pré e pós-flambagem ocorre de maneira abrupta, caracterizando o fenômeno de bifurcação. Nas placas com imperfeições iniciais a transição é suave, ilustrado pela Figura 3.14 (a) e Figura 3.14 (b), respectivamente deslocamento fora do plano ( $w$ ) e deslocamento longitudinal ( $u$ ).

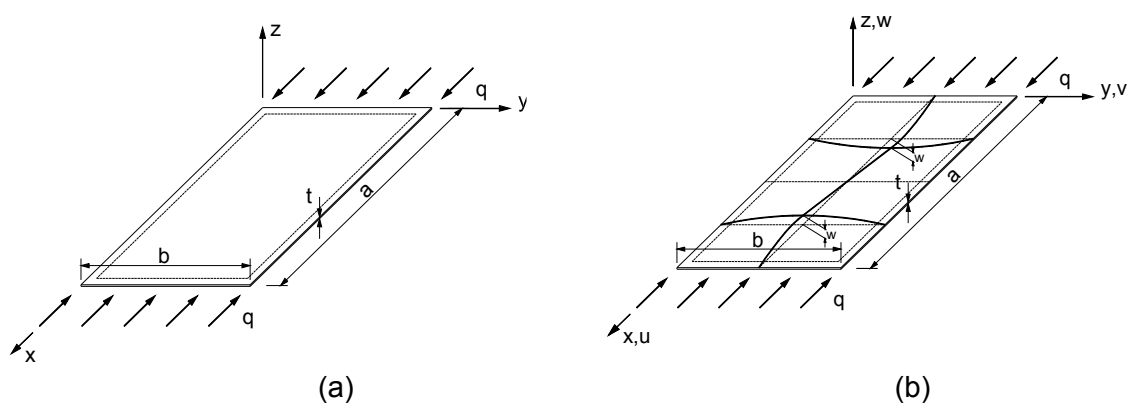


Figura 3.13 Placa simplesmente apoiada nas quatro bordas: (a) compressão axial uniforme na direção longitudinal; (b) modo de flambagem senoidal.

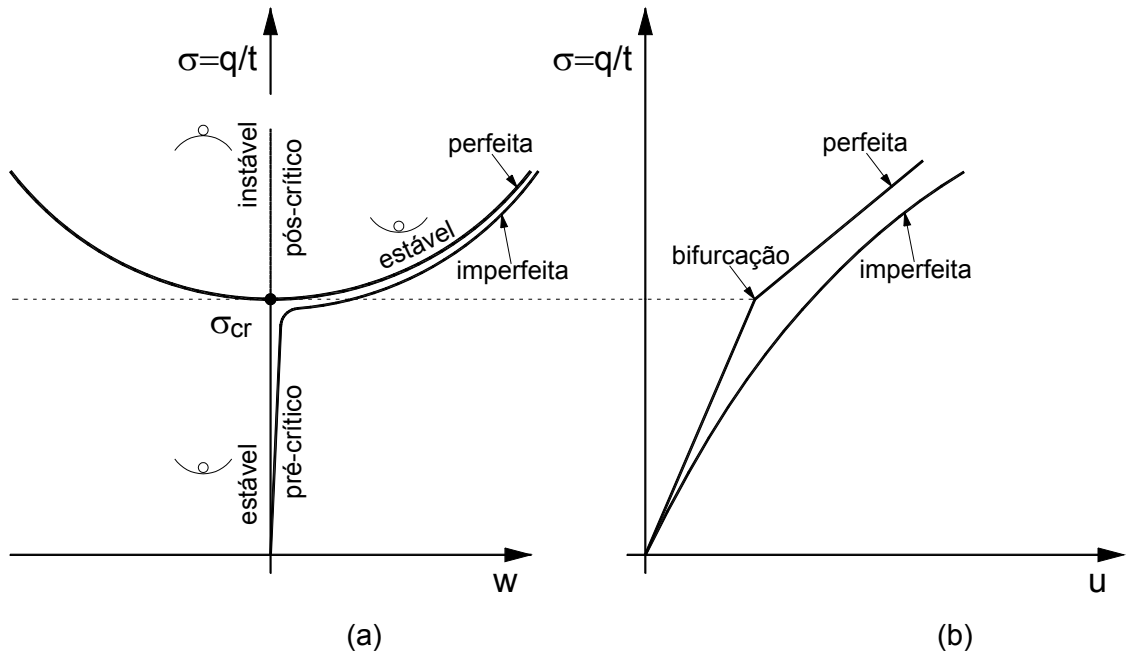


Figura 3.14 Instabilidade por bifurcação de equilíbrio e trajetória de equilíbrio estável, para a placa apresentada na Figura 3.13: (a) flambagem segundo a flexão,  $w$ ; (b) encurtamento longitudinal,  $u$ .

Para ilustrar a instabilidade de um perfil formado a frio sob compressão axial, estuda-se um perfil U enrijecido de seção aberta e geometria monossimétrica, conforme apresentado na Figura 3.15.

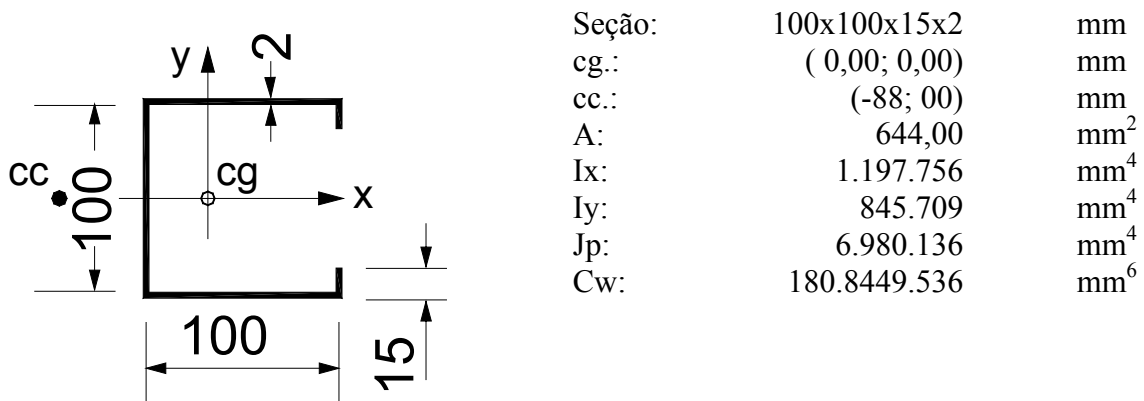


Figura 3.15 Perfil U enrijecido com as respectivas dimensões e as propriedades geométricas.

O perfil U enrijecido com dimensões de 100x100x15x2, respectivamente as medidas de: mesa, flange, enrijecedor de borda e espessura, está sujeito ao modo de

flambagem local de placa (MLP) e também ao modo distorcional (MD), segundo pode ser verificado na tabela D.1 encontrada no Anexo D da NBR-14762 [26] ( $b_3/b_1=0,15$ ,  $b_2/b_1=1,0$  e  $b_1/t=50$ ). Essa previsão está baseada em análise paramétrica com base no MFF, NAGAHAMA e BATISTA [27]. Verifica-se ainda o modo de flambagem global por flexo-torção (MFT) e por flexão (MF), para comprimento longo.

A Figura 3.16 apresenta os resultados obtidos, pelo autor, por meio de MEF, utilizando o programa Shell [19], representados pelas cargas de flambagem vs. comprimentos e os respectivos modos de flambagem para o perfil U enrijecido com empenamento livre. A carga de flambagem é apresentada de modo paramétrico pela relação  $\sigma=P/A$ , sendo  $A$  a área da seção transversal do perfil e  $P$  a carga de flambagem. A carga crítica e o respectivo modo crítico de flambagem são representados pela curva inferior, enquanto as curvas superiores representam os modos de flambagem superiores. Para comprimento curto do perfil identifica-se o MLP, com transição para o MD, e seguindo-se para os modos MFT e MF conforme se aumenta o comprimento ( $L$ ) do perfil.

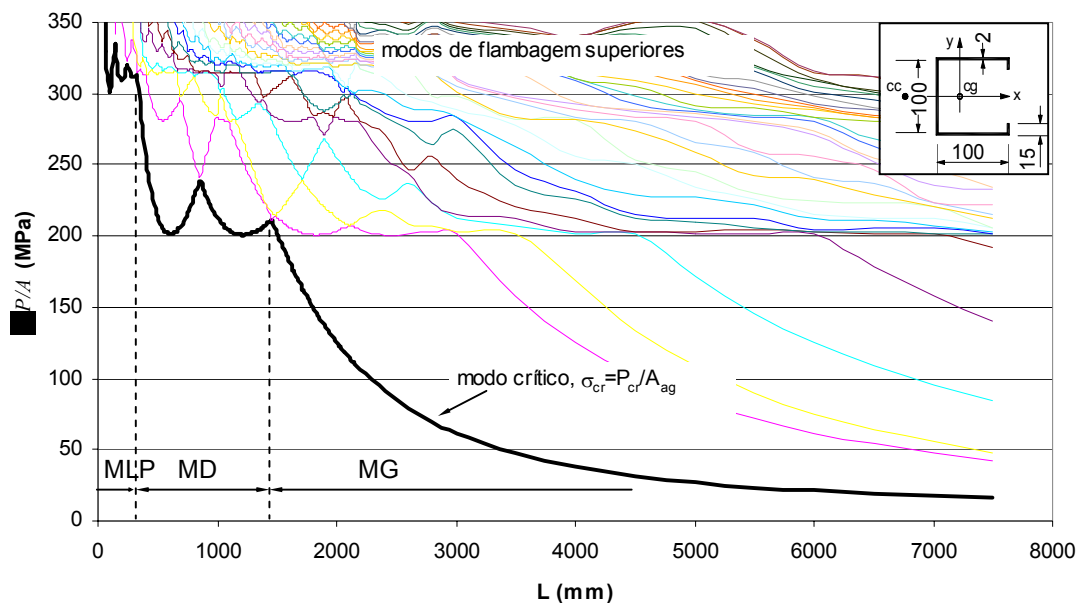


Figura 3.16 Resultados da análise de estabilidade para perfil U enrijecido com dimensões de 100x100x15x2, empenamento livre, obtidos pelo MEF.

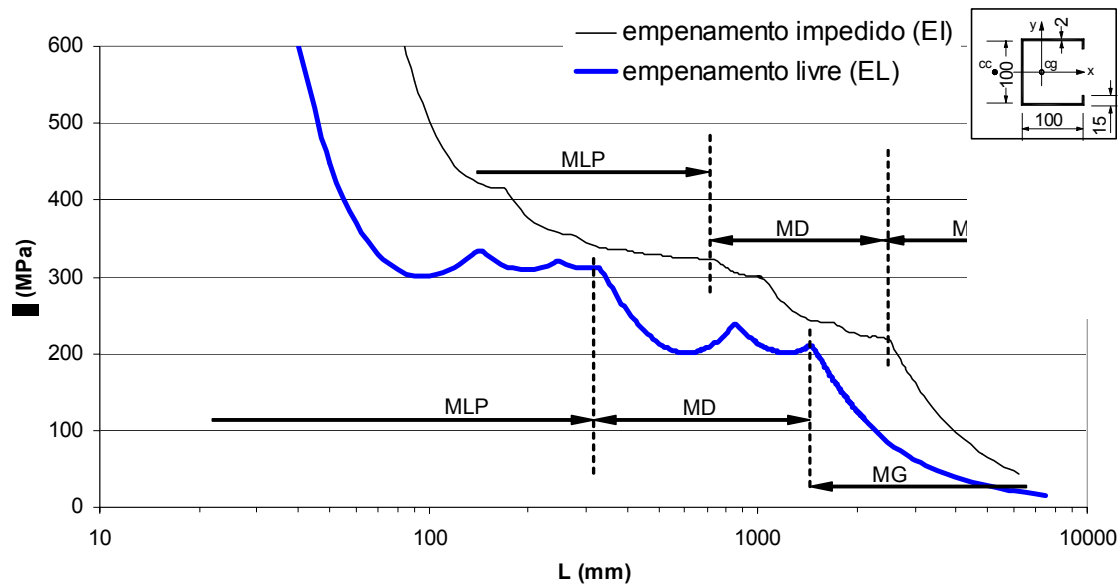


Figura 3.17 Resultados de cargas de flambagem para perfil U enrijecido com dimensões de 100x100x15x2, empenamentos livre e impedido, obtidos pelo MEF.

Quando o empenamento é impedido nas extremidades da barra, para as mesmas propriedades geométricas do perfil, os valores das cargas críticas de flambagem,  $\sigma_{cr}$ , são maiores do que aqueles obtidos para empenamento livre, para um mesmo comprimento,  $L$ , conforme ilustrado na Figura 3.17. Conclui-se que os perfis com empenamento impedido são mais resistentes à flambagem do que os perfis com empenamento livre.

### 3.3.4 Modo de Flambagem Local

Os perfis de paredes finas de comprimentos curtos, submetidos à compressão uniforme, podem estar sujeitos ao modo de flambagem local das paredes. As paredes apresentam flambagem local, de modo equivalente a uma placa isolada, com interação entre os elementos que formam a seção do perfil. As condições de extremidade (empenamento livre ou impedido) devem igualmente ser considerada, pois tem influência fundamental no comportamento do perfil comprimido.

As principais características de um perfil com modo de flambagem local, conforme ilustrado na Figura 3.18, são:

- As bordas comuns entre duas paredes adjacentes, cantos dobrados do perfil, permanecem retas e sem deslocamento transversal após a flambagem.
- As paredes giram em torno das bordas comuns, mas mantêm o ângulo original entre as paredes vizinhas inalterado.
- No modo crítico de flambagem, formam-se conjuntos de meias ondas senoidais ao longo das placas e apenas uma meia onda na seção transversal, em cada parede.
- Os modos de flambagem antissimétricos, com duas meias ondas na seção transversal, em uma mesma parede, Figura 3.18 (c) e (d), são previstos apenas numericamente, mas não correspondem aos modos críticos de flambagem [28].

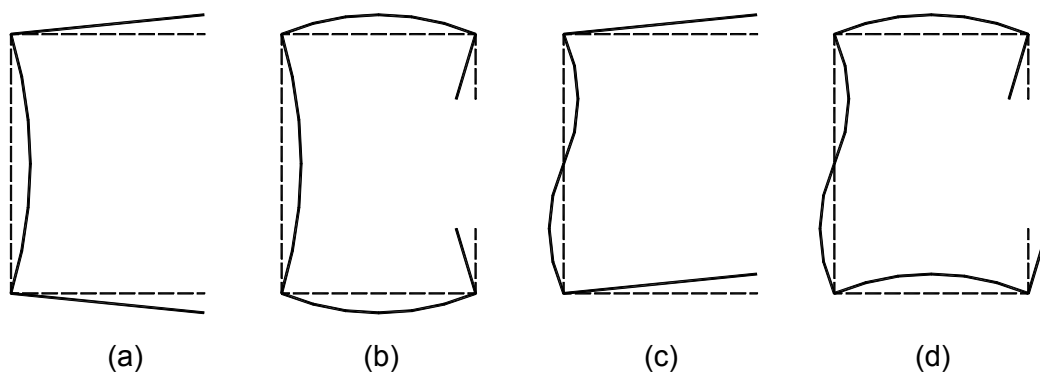


Figura 3.18 Modo de flambagem local de placa (MLP): (a) perfil U simples; (b) U enrijecido; (c) U simples com modo de flambagem antissimétrico; (d) U enrijecido com modo de flambagem antissimétrico.

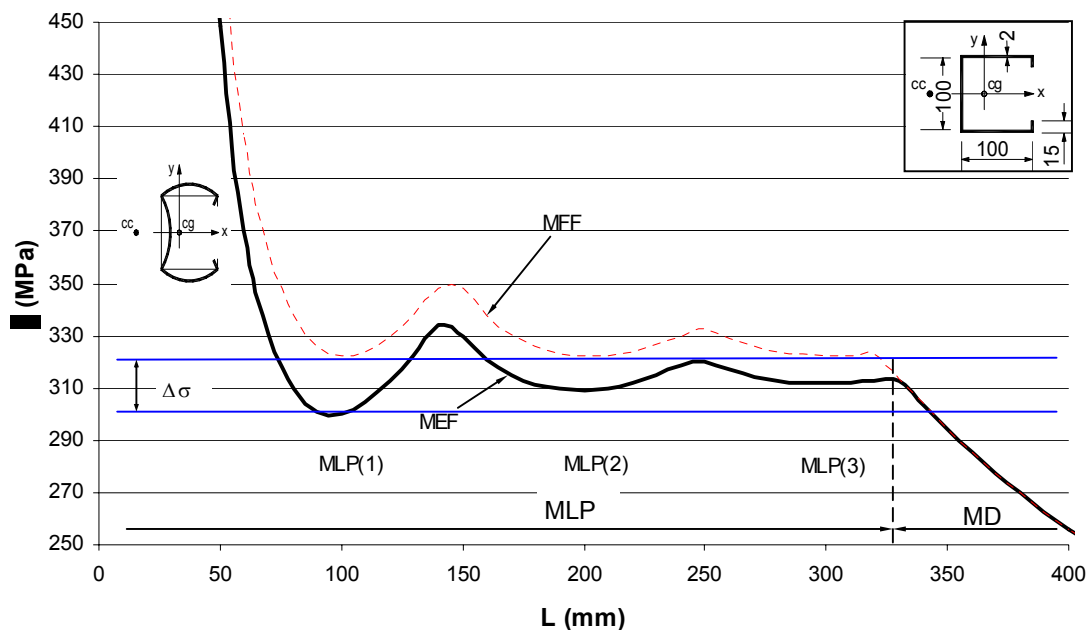


Figura 3.19 Resultados da análise de estabilidade de perfil U enrijecido, com empenamento livre, para o modo de flambagem local de placa (MLP), obtidos pelo MEF e o MFF.

No modo de flambagem local de placa, com empenamento livre, os resultados segundo o MEF permitem identificar a influência da restrição a deslocamento transversal das seções nas extremidades da barra, conforme apresentado na Figura 3.19, onde as cargas críticas de flambagem ( $\sigma_{cr}$ ) não são iguais para diferentes MLP(1, 2 e 3). Os números entre parênteses representam o número de meias ondas na direção longitudinal do perfil. As cargas críticas de flambagem obtidas via Métodos de Faixas Finitas mantêm-se constante, conforme a Figura 3.19, pois no modelo numérico considera-se o deslocamento transversal livre nas extremidades do perfil. A diferença da carga de flambagem, entre o MEF e o MFF, no primeiro modo de flambagem, é indicado na Figura 3.19,  $\Delta\sigma$ . A condição real da barra, com restrição a deslocamento transversal nas extremidades, é a representada corretamente pelo MEF.

Na Figura 3.20 são visualizados os modos de flambagem local para diferentes comprimentos de perfil, com uma e duas meias ondas na direção longitudinal, respectivamente MLP (1) e MLP (2).

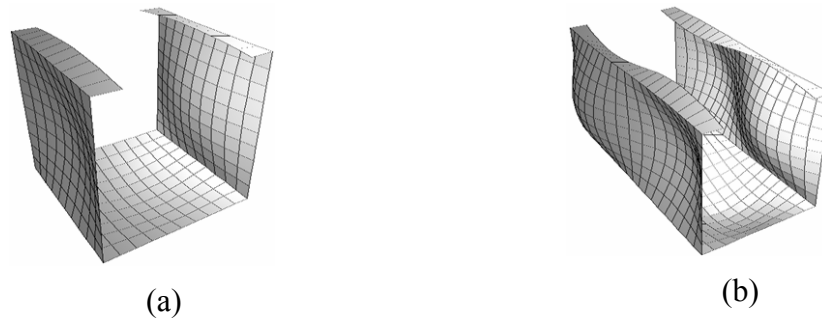


Figura 3.20 Modos de flambagem calculados pelo MEF do perfil U enrijecido 100x100x15x2: (a) modo de flambagem local de placa com uma meia onda, MLP (1); (b) modo de flambagem local de placa com duas meias ondas, MLP (2).

### 3.3.5 Flambagem Distorcional

No modo de flambagem distorcional (MD), ocorre translação das arestas comuns entre duas paredes ou de um enrijecedor intermediário de parede do perfil. A Figura 3.21 ilustra alguns modos de flambagem distorcional para perfis de chapa dobrada. O modo de flambagem distorcional ocorre, para uma determinada seção de perfil, para comprimento ( $L$ ) da barra situada entre o modo de flambagem local de placa e modo de flambagem global do perfil.

Não se verifica o modo de flambagem distorcional para perfis com menos de quatro paredes, como são os casos de perfis U simples e cantoneiras simples. O modo de flambagem distorcional pode apresentar cargas de flambagem menores em relação à flambagem local de placa (MLP), tornando a estrutura menos resistente. Pode-se evitar o modo distorcional adotando-se dimensões da seção transversal como aquelas sugeridas na tabela D.1 da Norma Brasileira [26], para o caso de perfil U enrijecido.

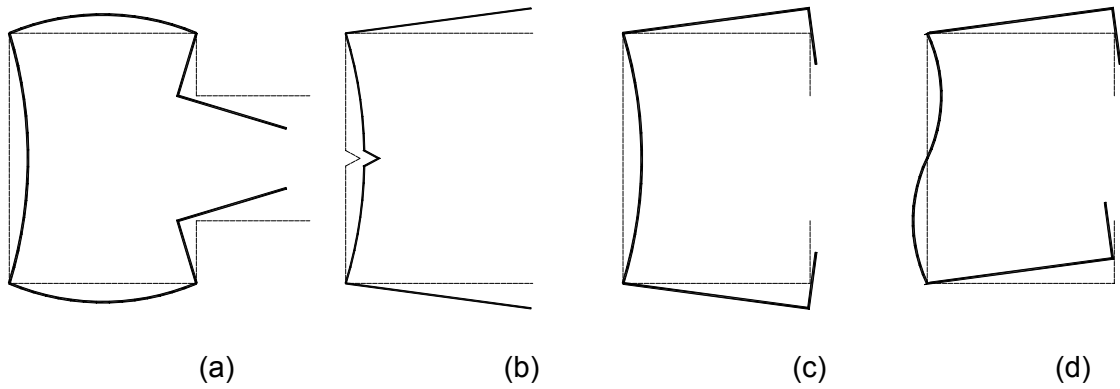


Figura 3.21 Exemplos de modos de flambagem distorcional (MD): (a) rack; (b) U simples com enrijecedor intermediário; (c) U enrijecido; (d) U enrijecido com modo de flambagem distorcional antissimétrico.

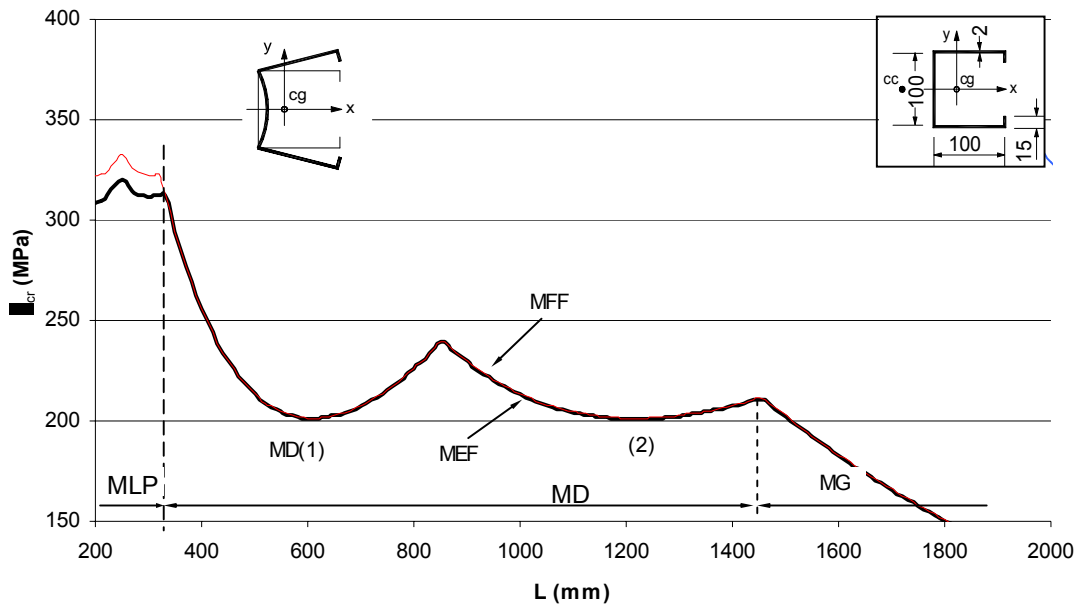


Figura 3.22 Resultados da análise de estabilidade para perfil U enrijecido, com empenamento livre, modo distorcional de flambagem(MD), obtidos pelo MEF e o MFF.

O modo de flambagem distorcional antissimétrico, com duas meias ondas em uma das paredes do perfil, conforme ilustra a Figura 3.21 (d), não é o modo crítico de flambagem, podendo ser previsto apenas numericamente.

A Figura 3.22 apresenta os resultados, praticamente coincidentes, da análise da estabilidade de um perfil U enrijecido, obtidos pelo MEF e MFF. Os resultados pelo MFF são originados do programa Inslod, NAGAHAMA [22].

Na Figura 3.23, ilustra-se o modo de flambagem distorcional com duas meias ondas na direção longitudinal, MD (2), com empenamento livre, obtido para o perfil indicado na Figura 3.22, por meio de MEF.

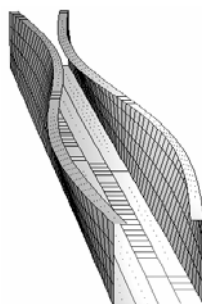


Figura 3.23 Perfil U enrijecido 100x100x15x2, empenamento livre, modo de flambagem distorcional MD (2).

### 3.3.6 Modo de Flambagem Global

O modo de flambagem global ocorre para perfis com comprimento longo. São os seguintes modos de flambagem, dependendo da geometria da seção e do tipo de carregamento: por flexo-torção (MFT), por flexão (MF) (coluna de Euler) ou por torção (MT). Este último é observado quando a resultante da carga estiver sobre o centro de cisalhamento, ou nos perfis de seção cruciforme.

Para um perfil de seção aberta e monossimétrica, submetido a carga de compressão centrada, com um eixo de simetria  $x$ , os modos de flambagem são por flexo-torção (MFT), ou por flexão (MF), conforme ilustrado na Figura 3.24. No modo de flambagem por flexo-torção, há interação entre os modos de flambagem por flexão em torno do eixo  $x$  e por torção. No modo crítico de flambagem por flexão, coluna de Euler, a flambagem ocorre em torno de eixo  $y$ , de inércia mínima.

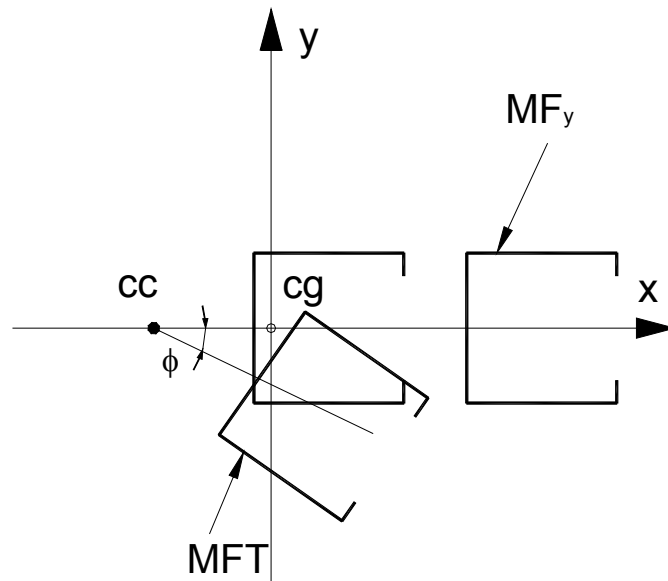


Figura 3.24 Modos de flambagem global de um perfil com de seção monossimétrica, submetido a carga de compressão centrada: por flexo-torção (MFT) e por flexão ( $MF_y$ ).

Na Figura 3.25 são mostrados os modos de flambagem global para um perfil U enrijecido, com seção de 100x100x15x2 e com empenamento livre nas extremidades, obtidos numericamente utilizando o MEF, o MFF e teoricamente segundo a solução analítica, de acordo com a Teoria de Elasticidade Elástica [23], conforme apresentado no anexo A. No modo global de flambagem, a flambagem por flexo-torção ocorre para comprimentos menores, evoluindo para flambagem por flexão em relação ao eixo y para comprimentos maiores.

No modo de flambagem global há coincidência dos resultados teóricos [23] e numéricos segundo o MEF e o MFF, conforme apresentados na Figura 3.25, pois as restrições de deslocamentos nas seções extremas da barra não têm influencia para comprimentos longos. Para os comprimentos ilustrados, o modo de flambagem é por flexo-torção (MFT). Porém, para comprimentos mais longos da barra o modo de flambagem passa a ser por flexão (MF).

Ainda na Figura 3.25, são apresentados os modos de flambagem superiores, conforme descrito a seguir, em ordem crescente de carga de flambagem: modo de flambagem por flexo-torção MFT(1) para empenamento impedido, obtido teoricamente; modo de flambagem por flexo-torção MFT(2), com duas meias ondas, obtido via MEF;

modo de flambagem por flexão  $MF_y$  em torno do eixo  $y$ , obtidos teoricamente e via MEF; modo de flambagem por flexão em torno do eixo  $x$ ,  $MF_x$ , obtidos teoricamente e via MEF; modo de flambagem por flexo-torção MFT(3) com três meias ondas.

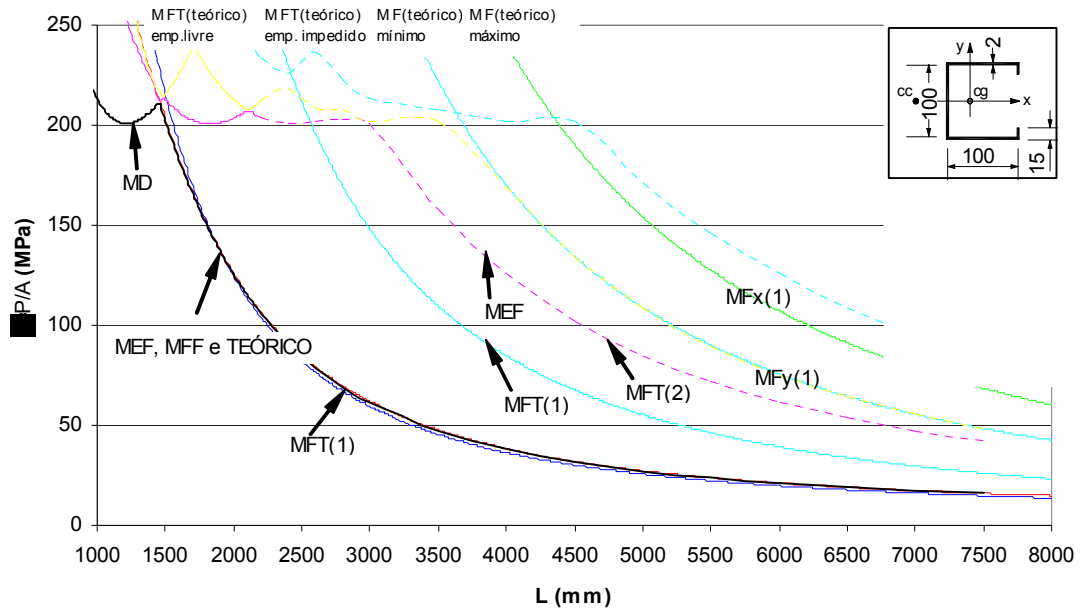


Figura 3.25 Modos de flambagem por flexo-torção e por flexão, para perfil U enrijecido 100x100x15x2. Condições de extremidade: empenamento livre.

### 3.3.7 Flambagem Local e Distorcional Acoplados

Os modos de flambagem acoplados, pela interação entre os modos de flambagem local e distorcional, são observados em determinados tipos de seção transversal. Como exemplo, apresentamos o perfil U enrijecido com seção de 100x50x5x1. Neste exemplo, o fenômeno ocorre quando os modos de flambagem distorcional e o local coincidem, no caso, para comprimentos múltiplos de 250 mm.

As cargas críticas e os respectivos modos de flambagem superiores, em função do comprimento da barra, são apresentadas na Figura 3.26. Os modos críticos de flambagem são MLP e acoplados (MLP + MD), com a carga crítica de flambagem de  $95 \text{ N/mm}^2$ , para comprimentos menores que 1900 mm. Acima desse comprimento o modo crítico de flambagem passa a ser de flexo-torção (MFT).

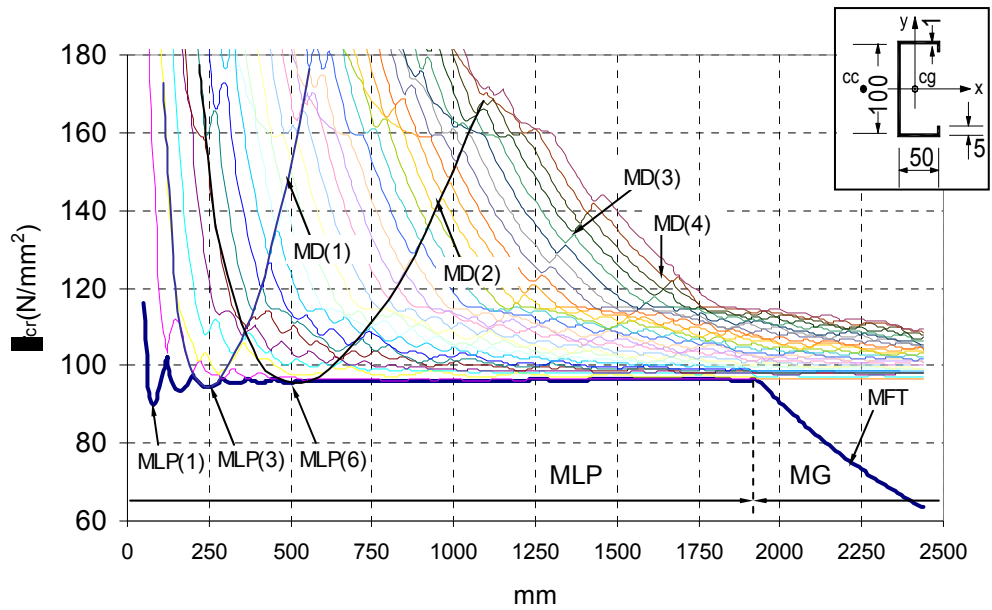


Figura 3.26 Cargas de flambagem local e distorcional acoplados, para perfil U enrijecido com seção de 100x50x5 e espessura de 1,0 mm.

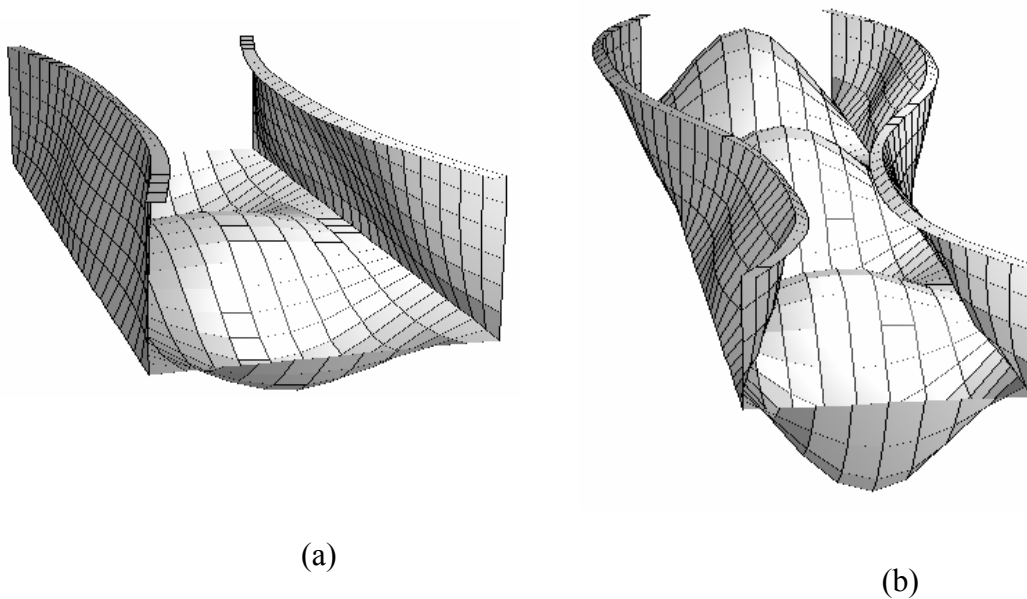


Figura 3.27 Flambagem local e distorcional acoplado, perfil U enrijecido com seção de 100x50x5 e espessura de 1,0 mm: (a) interação entre os MLP(3) e MD(1); (b) interação entre os MLP(6) e MD(2).

O primeiro modo de flambagem acoplado ocorre para combinação MD(1) e MLP(3), conforme ilustra a Figura 3.27 (a), para comprimento da barra de 250 mm.

O segundo modo de flambagem acoplado ocorre para comprimento de 500 mm, com interação entre MD(2) e MLP(6), conforme ilustrada na Figura 3.27 (b). Para comprimentos maiores, repetem-se outros modos acoplados para comprimentos múltiplos de 250 mm, até que o modo crítico de flambagem passa a ser de flexo-torção.

# Capítulo IV

## Análise da Estabilidade Linear de Painéis

---

### 4.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados os resultados das análises computacionais da estabilidade de painéis diafragma sob diferentes combinações de carregamentos e condições de contorno. Propõem-se soluções analíticas simples, que são obtidas por meio de estudos paramétricos, para painéis diafragma submetidos a carregamento horizontal e sobre combinações de cargas horizontal e compressão axial.

Os painéis diafragma aqui estudados são formados por elementos de chapa fina de aço dobrada a frio, do tipo daqueles apresentados no Capítulo II, Figura 2.1.

### 4.2 Estudo de Painéis Isolados

Os resultados de estudos analíticos e experimentais de placas enrijecidas (painéis) submetidas a combinação das ações de compressão axial e carga horizontal são escassos [29]. Em razão disto, neste capítulo, são feitas análises numéricas para estudar o comportamento de estabilidade linear de painéis formados por chapas finas de aço.

Para o painel submetido apenas à carga de compressão axial, pode-se adotar a equação ( 4.1) [23] para determinar a carga de flambagem local.

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b_1} \right)^2 \quad (4.1)$$

Onde:  $k$ ,  $E$ ,  $b_1$ ,  $\nu$  e  $t$  são respectivamente coeficiente de flambagem local, módulo de elasticidade, largura da alma, coeficiente de *Poisson* e espessura da placa.

Os valores de  $k$  podem ser obtidos baseados nos resultados de análise paramétricas, no caso de perfil U enrijecido os coeficientes de flambagem podem ser representados por uma expressão polinomial, por exemplo a equação ( 4.2) obtidos por meio de MFF [25] [30], sendo  $\eta = b_2/b_1$ , onde  $b_2$  é a largura de flange.

$$k = 6,8 - 5,8\eta + 9,2\eta^2 - 6,0\eta^3 \quad (4.2)$$

Já no comportamento pós-flambagem, utiliza-se métodos semi-empíricos, como o Método de Largura Efetiva da NBR 14762 [26] [31], que considera o perfil como associação de paredes isoladas e leva em consideração as condições de borda de cada parede. No entanto, estudos demonstram que quando as paredes da seção transversal do perfil trabalham em conjunto, os resultados da rigidez são bem maiores em relação ao método baseado na associação de paredes isoladas [32]. Logo, os resultados numéricos que levam em consideração a interação entre as paredes adjacentes, são mais precisos que o Método de Largura Efetiva.

No caso de uma placa quadrada simplesmente apoiada nas quatro bordas e submetida a uma combinação das ações de compressão e cisalhamento, o resultado da análise de estabilidade linear (problema de bifurcação) é uma curva parabólica, segundo GALAMBOS [29], do tipo apresentado na equação ( 4.3). A vantagem desta solução é a possibilidade de representar todas as combinações de cargas possíveis.

$$\left( \frac{\tau_{cr}}{\tau_{cr}^0} \right)^2 + \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr}^0} = 1,0 \quad (4.3)$$

ou

$$R_s^2 + R_c = 1,0 \quad (4.4)$$

Onde,  $\sigma_{cr}^0$  e  $\tau_{cr}^0$  representam as tensões críticas de flambagem, respectivamente, sob compressão simples e cisalhamento puro. As tensões  $\sigma_{cr}$  e  $\tau_{cr}$  são tensões críticas de compressão e cisalhamento, para o caso de cargas combinadas de compressão e cisalhamento.

Os resultados da análise de estabilidade linear de painéis enrijecidos, tratados por Harris e Pifko [33], com diferentes propriedades geométricas e simplesmente apoiados nas quatro bordas, obtidos por meio de MEF, conduziram a uma curva de interação entre a carga compressão simples e de cisalhamento, conforme ilustra a Figura 4.1 (b).

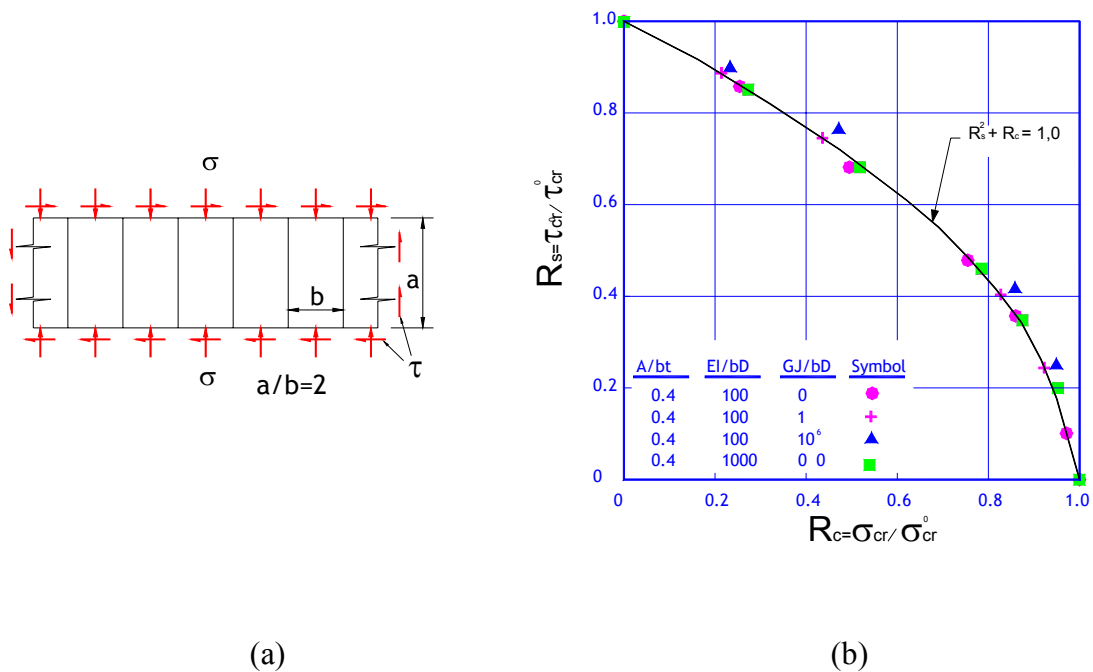


Figura 4.1 Resultado da análise de estabilidade linear segundo Harris e Pifko [33]: (a) painel com enrijecedores intermediários; (b) curva de interação entre a carga de compressão axial e cisalhamento.

No gráfico, os resultados são apresentados na forma de tensão de compressão vs. tensão de cisalhamento, onde as tensões de flambagem são normalizados em relação às

respectivas tensões críticas de flambagem,  $\sigma_{cr}^0$  e  $\tau_{cr}^0$ . Verifica-se que, como nas placas isoladas, as curvas tensões de compressão vs. cisalhamento tende para uma parábola ( $R_s^2 + R_c = 1, 0$ ).

Portanto, os resultados de problemas de combinações de tensões de compressão e de cisalhamento podem ser obtidos por meio de soluções analíticas, desde que se conheçam as tensões críticas de compressão simples e de cisalhamento puro,  $\sigma_{cr}^0$  e  $\tau_{cr}^0$ .

Como exemplos de análise de estabilidade elástica linear, conforme ilustrado na Figura 4.2, são analisados os painéis diafragma submetidos a carregamento uniforme de: (a) compressão simples, (b) cisalhamento puro com deslocamento extensional na extremidade superior impedido, (c) cisalhamento puro com deslocamento extensional na extremidade superior livre e (d) sob combinação de compressão e cisalhamento.

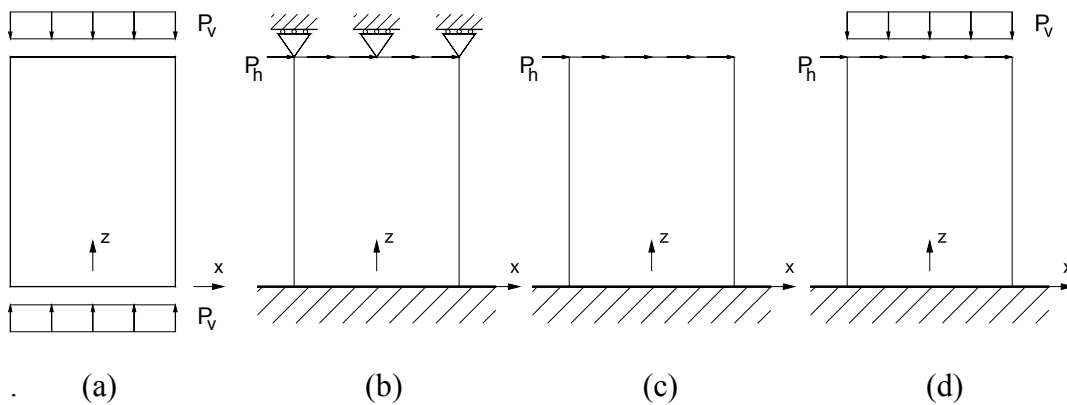


Figura 4.2 Tipos de carregamentos e condições de contorno do painel: (a) compressão uniforme; (b) cisalhamento puro, impedido o deslocamento extensional no topo; (c) cisalhamento puro, deslocamento extensional livre no topo e (d) sob combinação de compressão e cisalhamento.

Na Figura 4.3 apresenta-se os resultados de análise de estabilidade linear de um painel de chapa dobrada, com o modo de flambagem local (Figura 4.3 (a)), e de comportamento pós-flambagem com interação entre o modo de flexão e local de placa (Figura 4.3 (b)).

As dimensões do painel, os deslocamentos e os eixos de coordenadas são igualmente indicados na Figura 4.3, onde  $v_L$ ,  $w$  e  $v$  são, respectivamente, deslocamento

local de placa na alma, deslocamento axial e deslocamento devido à flambagem global do painel.

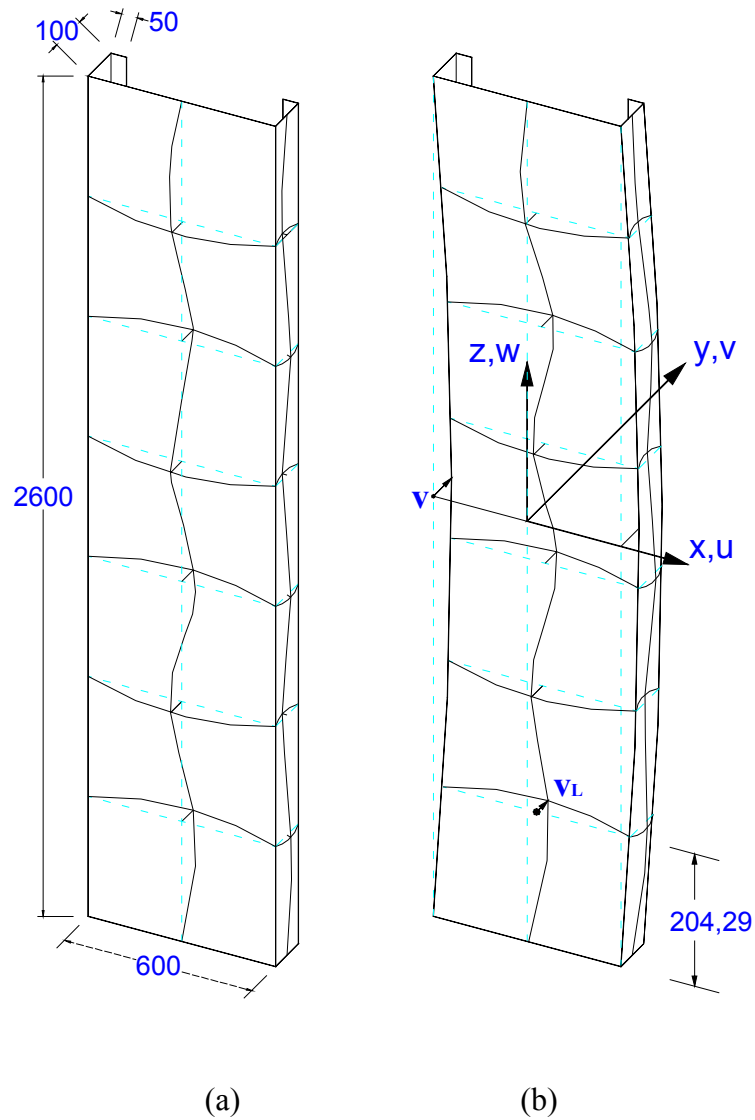


Figura 4.3 (a) Modo de flambagem local de placa (análise linear); (b) interação entre flambagem local e global (análise não-linear)

Apresenta-se a seguir alguns resultados, obtidos pelo autor, da análise de estabilidade linear de painéis diafragma utilizando-se o programa Shell. Trata-se de painéis diafragma (600x100x50) com espessura de 1 mm, comprimento de 2.600 mm e módulo de elasticidade de aço igual a  $2,1 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, com ou sem enrijecedor intermediário na alma e empenamento livre ou impedido. As cargas de compressão

axial e horizontal são linearmente distribuídas na extremidade superior da seção transversal do painel.

### 4.3 Painéis Submetidos à compressão Uniforme

Os painéis diafragmas submetidos a carga vertical e/ou horizontal, podem ser conduzidos ao colapso devido à flambagem local de placa ou por flambagem distorcional, conforme ilustrado na Figura 4.4, ou, ainda, por flambagem global, conforme analisado no capítulo anterior. A flambagem ocorre em função da rigidez do elemento estrutural, portanto, em função das propriedades do material, da geometria da seção transversal, do comprimento e das condições de contorno do painel. Pode-se, ainda, adotar enrijecedores intermediários na alma do painel, para aumentar sua resistência à flambagem.

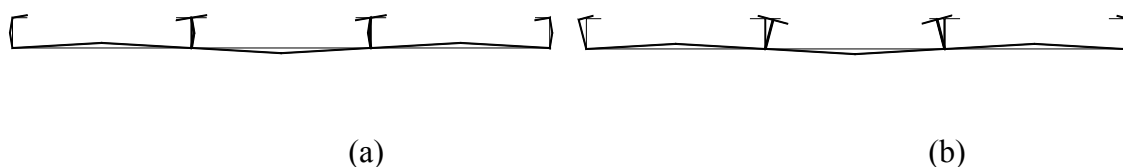


Figura 4.4 Modos de flambagem de painel enrijecido: (a) local de placa; (b) distorcional.

No caso de um painel com seção de 600x100x50, com espessura de 1mm e sem enrijecedor intermediário de parede, submetido à compressão axial, a carga e o modo crítico de flambagem são ilustrados na Figura 4.5. Para este painel, o modo crítico de flambagem Figura 4.5 é local de placa (MLP).

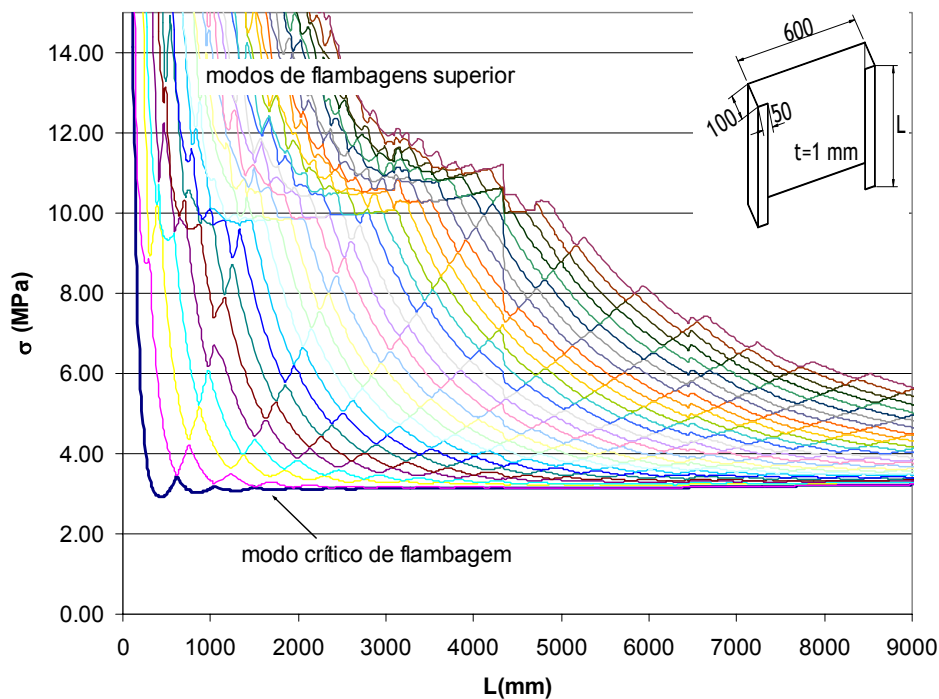


Figura 4.5 Carga de flambagem e respectivos modos de flambagem para painel diafragma (600x100x50x1) sem enrijecedor intermediário na alma, submetido a compressão simples uniforme.

Os resultados da análise de estabilidade, para diferentes condições de contorno nas extremidades do mesmo painel, com ou sem enrijecedor intermediário de parede, são apresentados na Figura 4.6. Verifica-se que, quando o painel for acrescido de um enrijecedor intermediário de parede, eficiente, aumenta-se consideravelmente a rigidez do painel, apesar de pouco acréscimo na quantidade de material. Se o empenamento for impedido, tanto no painel com ou sem enrijecedor intermediário, há aumento da rigidez para o painel curto, mas a diferença diminui à medida que aumenta o comprimento do painel.

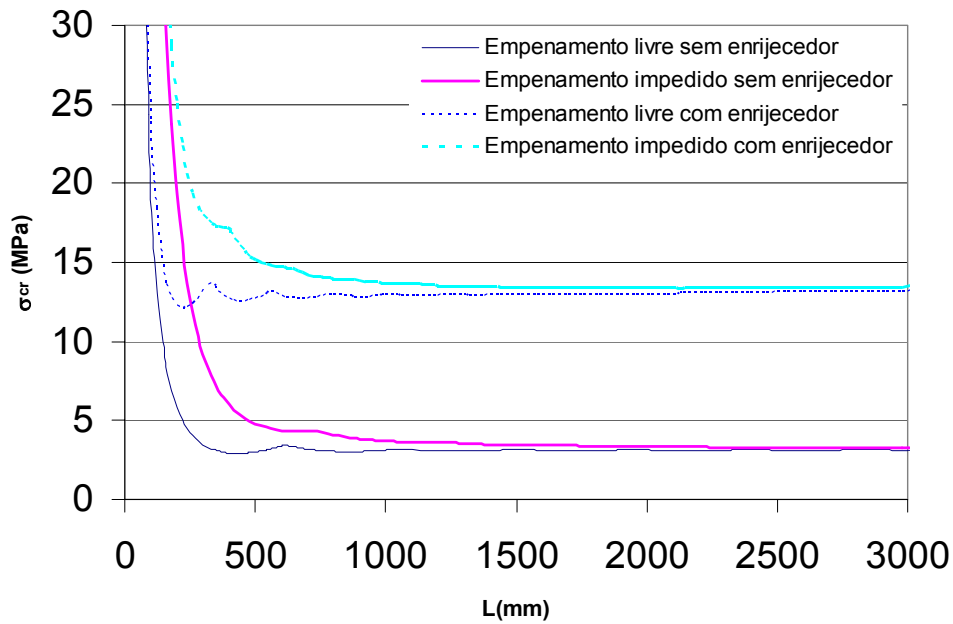


Figura 4.6 Cargas críticas de flambagem para diferentes condições de empenamento (livre ou impedido), com ou sem enrijecedor intermediário de parede na alma do perfil.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de enrijecedores de borda ( $b_3$ ) e intermediário de parede ( $h_u$ ), é analisado o painel com seção de  $600 \times 100 \times (b_3) \times 1,0$ , sendo o painel submetido à compressão axial.

Os resultados numéricos obtidos via MFF [22] são as curvas ilustradas na Figura 4.7,  $k$  vs.  $b_3/b_1$ , onde  $k$  é coeficiente de flambagem, para diferentes alturas de enrijecedor intermediário de parede. Conclui-se que o enrijecedor de parede ( $h_u$ ) é completamente eficiente quando a altura for maior que 8,0 mm, para o enrijecedor de borda ( $b_3/b_1$ ) no intervalo de 0,05 e 0,20.

Os perfis com enrijecedor intermediário de parede, adotados no presente trabalho, têm as dimensões de  $600 \times 100 \times 50 \times 1$  ( $b_3/b_1=8,3$ ) e altura de enrijecedor ( $h_u=10$  mm), para atender as condições tratadas anteriormente.

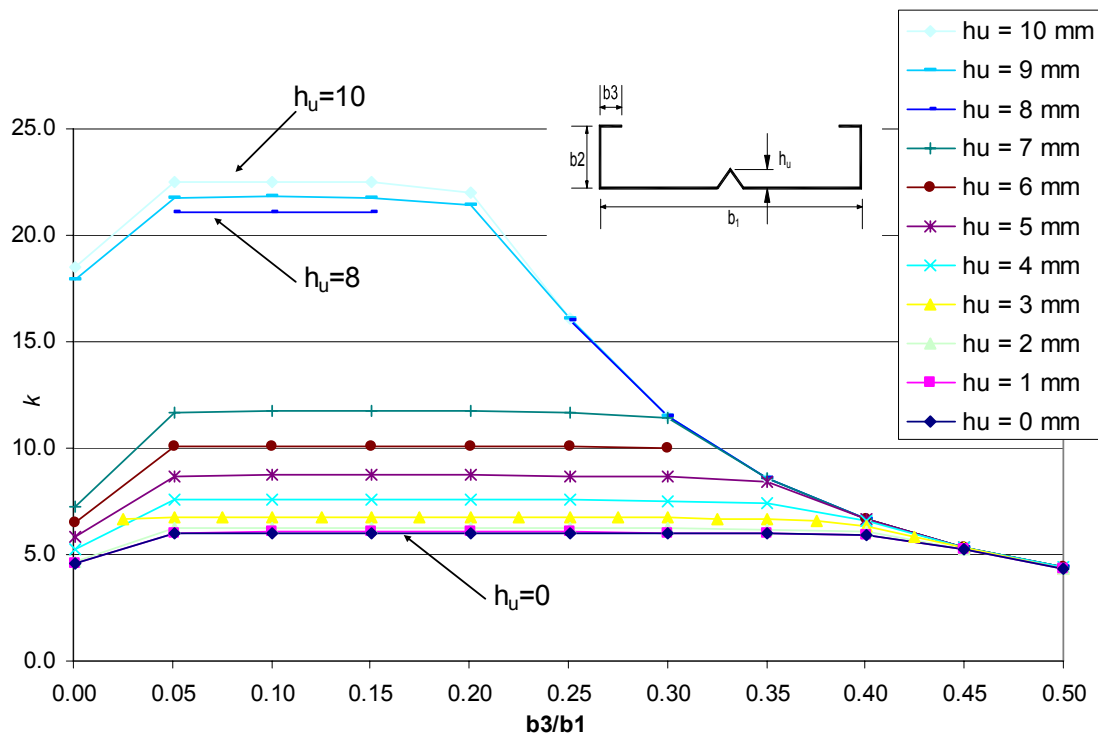
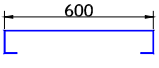
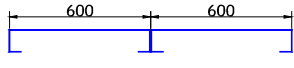
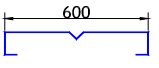
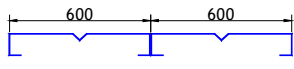


Figura 4.7 Coeficientes de flambagem ( $k$ ) de painel diafragma ( $b_2/b_1=100/600$ ) para diferentes dimensões de enrijecedores intermediários de parede e de borda.

Os resultados da análise de estabilidade linear, para painéis submetidos à compressão simples e ao cisalhamento puro, com comprimento  $L$  de 2600 mm, são apresentados na Tabela 4.1. Como se espera, os painéis com enrijecedor intermediário de parede ( $h_u=10$  mm) apresentam valores maiores da carga de flambagem, tanto para compressão simples como para cisalhamento puro.

Na compressão simples, a carga de flambagem varia pouco em função do empenamento livre ou impedido, para este comprimento. A carga crítica de cisalhamento puro, por outro lado, aumenta consideravelmente para os casos de empenamento impedido.

Tabela 4.1 Cargas de flambagem à compressão simples e cisalhante puro, empenamento livre (EL) e empenamento impedido (EI), para um painel diafragma com seção de 600x100x50x1 e comprimento L de 2600 mm.

Caso		$\sigma_{cr}^0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{cr}^0$ (N/mm <sup>2</sup> )
	EL	3,12	0,95
	EI	3,28	-----
	EL	3,26	0,53
	EI	3,44	0,75
	EL	16,47	1,55
	EI	16,75	2,15
	EL	16,53	1,92
	EI	16,95	2,31

#### 4.4 Painéis Submetidos à Carga Horizontal

A seguir apresentam-se resultados da análise de painéis diafragma (600x100x50x1) submetidos à carga horizontal na extremidade superior. As condições de apoio adotadas são ilustradas na Figura 4.2 (b) e na Figura 4.2 (c), respectivamente, com deslocamento axial impedido e livre na extremidade superior do painel. Em ambos os casos, o empenamento é impedido com auxílio de placas de aço de 30 mm de espessura, embutidas rigidamente nas duas extremidades do painel.

O primeiro exemplo, com deslocamento axial impedido na extremidade superior e engastado na extremidade inferior, referem-se a situações em que os painéis funcionam como elementos de contraventamento em edificações. As cargas de flambagem em função do comprimento e diferentes espessuras são apresentadas na Figura 4.8. Quanto mais espessas as paredes, maiores as cargas de flambagem. As curvas tornam-se suaves no trecho cujo comprimento passa a ser maior que largura da alma ( $L/b_1 > 1$ ), trecho onde se formam ondas na direção longitudinal do painel. Porém, se o comprimento do painel for menor que a largura da alma ( $L/b_1 < 1$ ), formam-se ondas na direção transversal, conforme ilustrados na Figura 4.9.

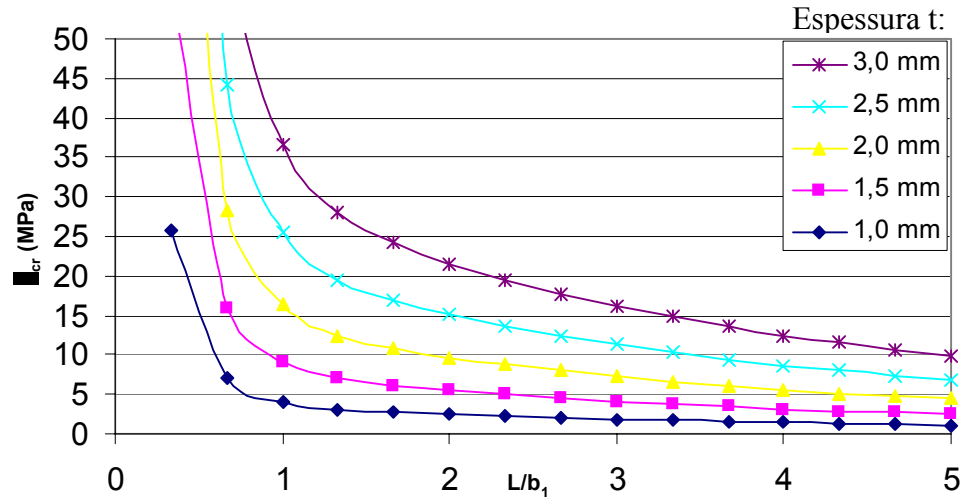


Figura 4.8 Cargas de flambagem para painel (600x100x50xt) submetido a carga horizontal na extremidade superior e com deslocamento axial impedido na extremidade superior, para diferentes comprimentos ( $L/b_1$ ) e espessura de parede ( $t$ ).

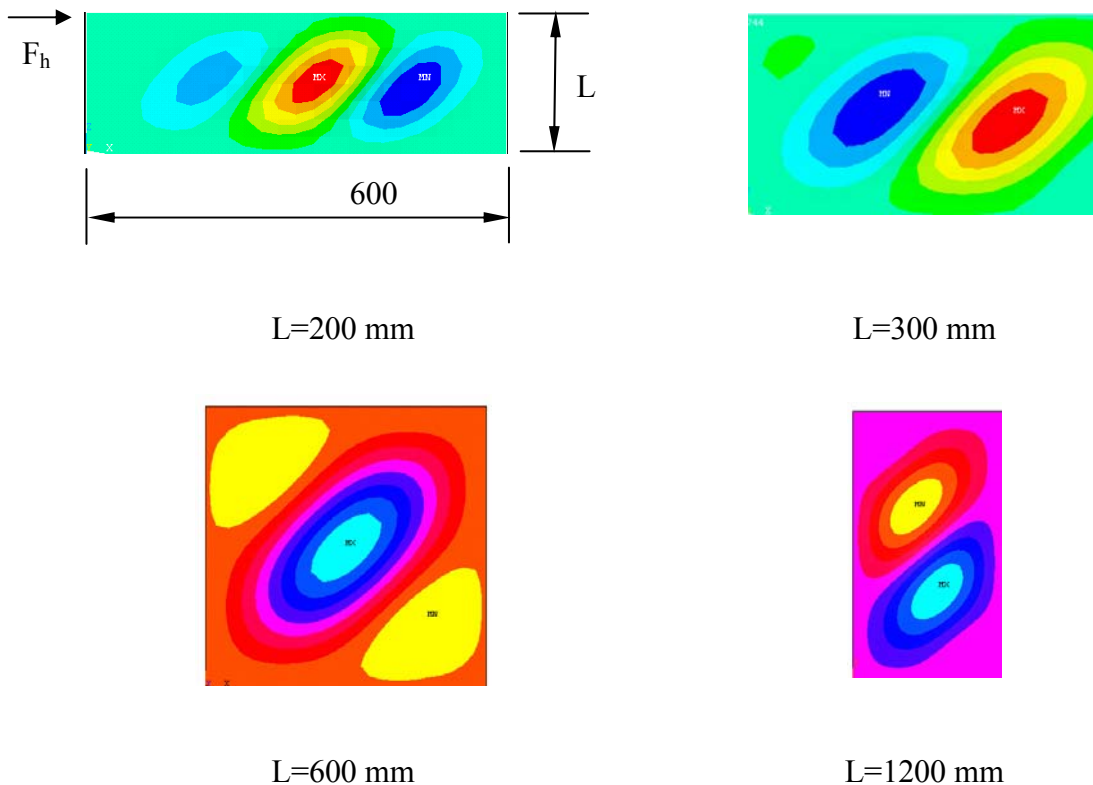


Figura 4.9 Modo de flambagem na alma ( $b_1$ ) de painel diafragma, com seção de 600x100x10x1, sem enrijecedor intermediário, para diferentes comprimentos ( $L/b_1$ ) e espessura de parede ( $t$ ).

No segundo exemplo, com o deslocamento axial livre na extremidade superior e engastado na extremidade inferior, as cargas de flambagem são inferiores em relação ao primeiro exemplo, para as mesmas espessuras, conforme se observa na Figura 4.10 e na Tabela 4.2.

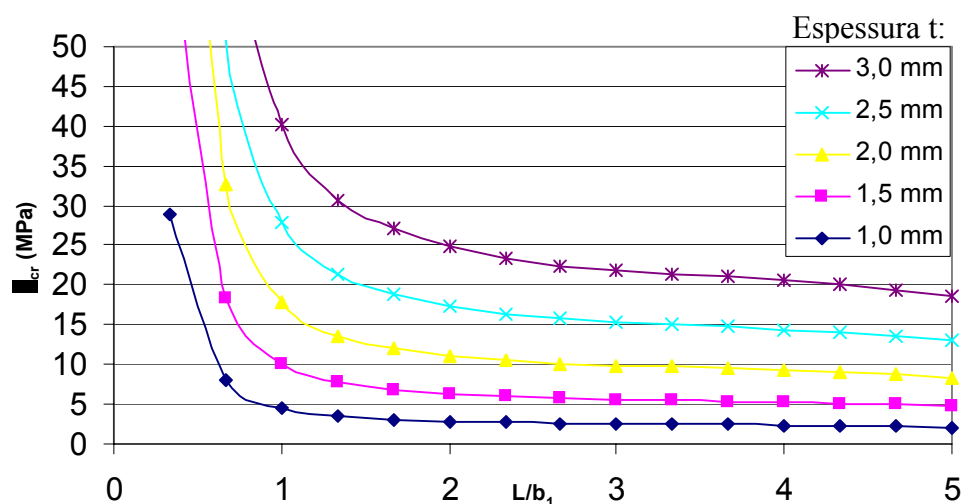


Figura 4.10 Cargas de flambagem para painel (600x100x50xt) submetido à carga horizontal na extremidade superior e com deslocamento axial livre na extremidade superior para diferentes espessuras.

As condições de contorno na extremidade superior do painel, com deslocamento axial impedido ou livre, influencia os resultados das cargas de flambagem, conforme a Tabela 4.2. De acordo com a tabela, o painel com deslocamento axial impedido melhora o desempenho estrutural, à medida que o comprimento fica longo.

O acréscimo de enrijecedor intermediário de parede nos painéis diafragma submetidos à carga horizontal, aumenta a rigidez para comprimento curto, em relação ao caso de painel sem enrijecedor, conforme ilustra o gráfico da Figura 4.11. Porém, esta diferença diminui conforme o comprimento se torna mais longo.

Tabela 4.2 Comparação de cargas de flambagem, entre o deslocamento axial livre ou impedido na extremidade superior, para um painel de seção 600x100x50 e espessura de 1mm, submetido à carga horizontal.

L/b <sub>1</sub>	Tensões críticas de flambagem - $\sigma_{cr}$ (N/mm <sup>2</sup> )		Diferença
	desloc.axial - impedido	desloc.axial - livre	%
0.333	28.90	25.82	11.91
0.667	8.16	7.15	13.99
1.000	4.46	4.09	8.95
1.333	3.41	3.12	9.32
1.667	3.02	2.71	11.59
2.000	2.81	2.44	15.39
2.333	2.66	2.21	20.50
2.667	2.57	2.01	27.87
3.000	2.51	1.82	37.39
3.333	2.45	1.66	47.15
3.667	2.39	1.52	57.52
4.000	2.34	1.40	67.49
4.333	2.27	1.29	76.15
4.667	2.19	1.19	83.62
5.000	2.10	1.11	88.90

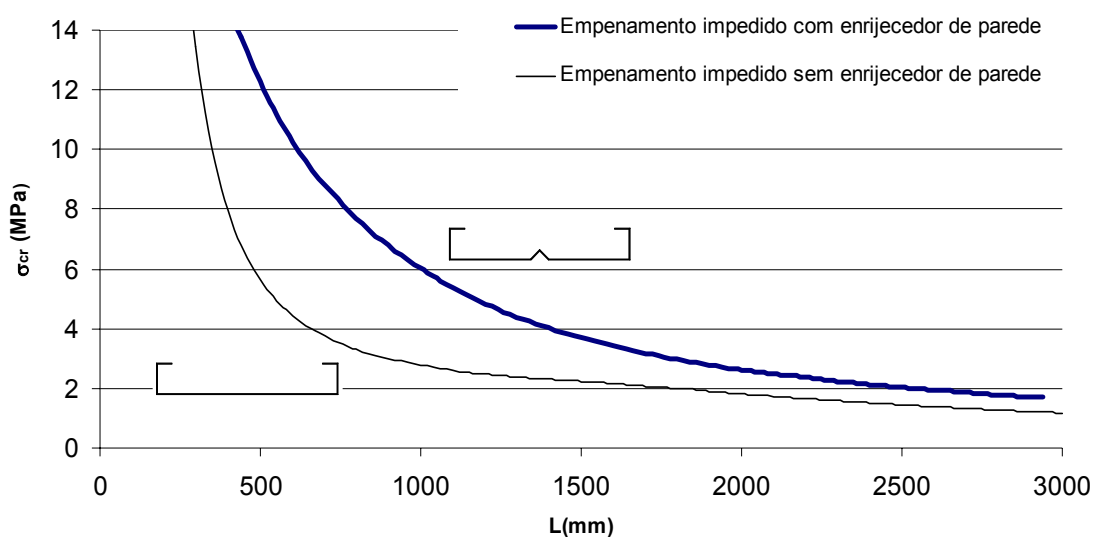


Figura 4.11 Cargas de flambagem, para painel 600x100x50x1, com e sem enrijecedor intermediário.

Neste tipo de elemento estrutural, submetido a carga horizontal e com deslocamento axial impedido na extremidade superior, é possível obter equações paramétricas para auxiliar no cálculo das cargas críticas de flambagem por cisalhamento.

A partir dos dados de painel diafragma fornecidos pela curva da Figura 4.8, obtém-se equações paramétricas apresentadas nas equações ( 4.5), que representam os resultados do coeficiente de flambagem ( $k$ ), em função comprimento ( $L$ ) e da largura da alma ( $b$ ), válidos para painel sob carga horizontal e com deslocamento axial impedido na extremidade superior.

$$k = 4,16 + \frac{4,30}{(L/b)^2} \quad \text{para } \frac{L}{b} > 1,0 \quad (4.5)$$

$$k = 2,68 + \frac{5,78}{(L/b)^2} \quad \text{para } \frac{L}{b} < 1,0$$

Graficamente as equações ( 4.5) podem ser representadas pela curva ilustrada a seguir:

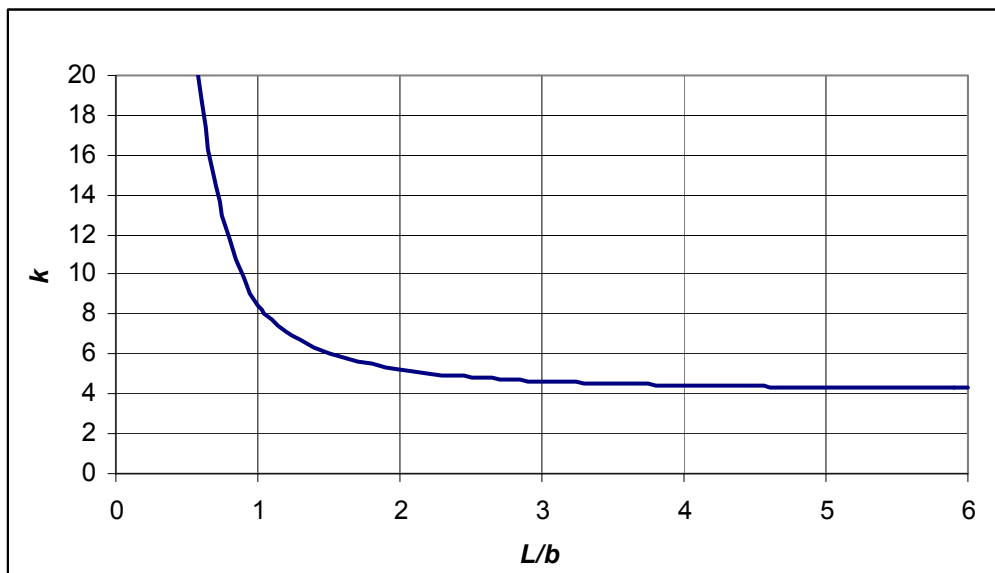


Figura 4.12 Coeficiente de flambagem ( $k$ ), para painel 600x100x50x1, em função do parâmetro ( $L/b$ ).

Quando os valores de coeficiente de flambagem ( $k$ ), determinados pela equação ( 4.5), forem substituídos na equação ( 4.1), obtém-se os valores das cargas críticas de flambagem de maneira simples e prática.

## 4.5 Painel Submetido a Combinação de Cargas

Os resultados da estabilidade linear elástica para a ação combinada de compressão uniforme e carga horizontal, para um painel diafragma de seção 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm, são mostrados nas Figuras 4.13 a 4.16. Os resultados ( $R_s = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{cr0}}$  x  $R_c = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr0}}$ ), tendem para uma curva parabólica ( $R_s^2 + R_c = 1$ ) quando se tratar de um painel isolado e sem enrijecedor intermediário de parede, ou para uma reta ( $R_s + R_c = 1$ ) nos casos de associação de painéis e de painel isolado com um enrijecedor intermediário de parede. A solução na forma de círculo ( $R_s^2 + R_c^2 = 1$ ) está representada apenas como ilustração. Isto permite a simplificação da solução analítica para a ação combinada de compressão uniforme e carga horizontal, desde que se conheçam as tensões críticas de flambagem à compressão simples e ao cisalhamento puro.

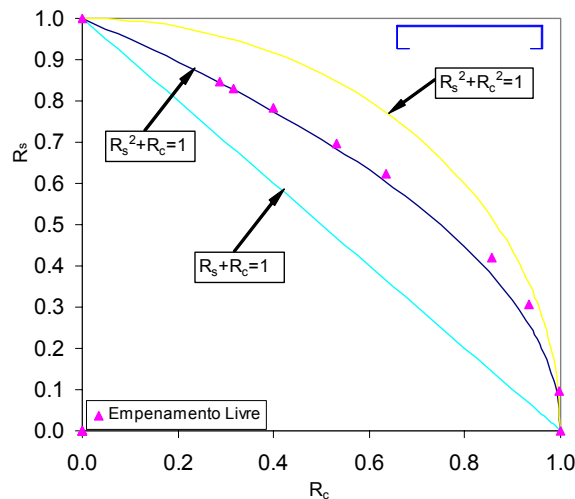


Figura 4.13 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, para um painel com seção de 600x100x50x1, sem enrijecedor intermediário de parede, para ações combinadas de compressão e cisalhamento.

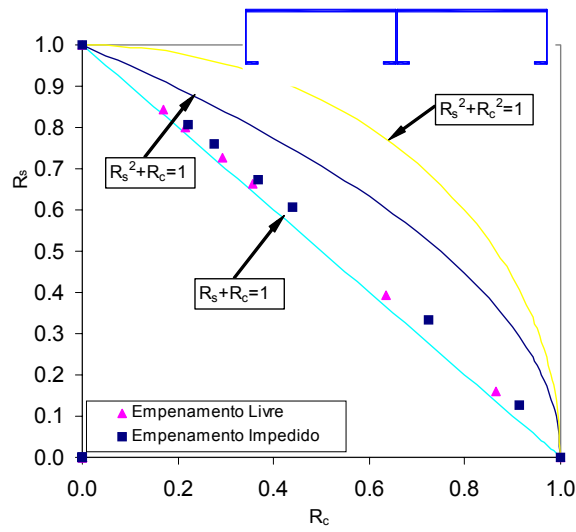


Figura 4.14 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, para painel formado pela associação de dois painéis, com seção de 600x100x50x1 cada, sob ação combinada de compressão e cisalhamento.

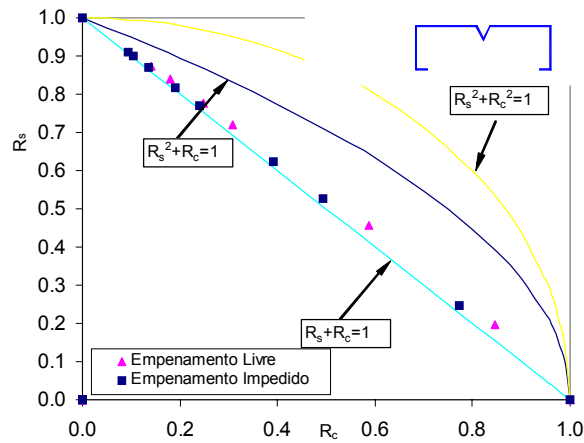


Figura 4.15 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, de painel enrijecido, com seção de 600x100x50x1, sob ação combinada de compressão e cisalhamento.

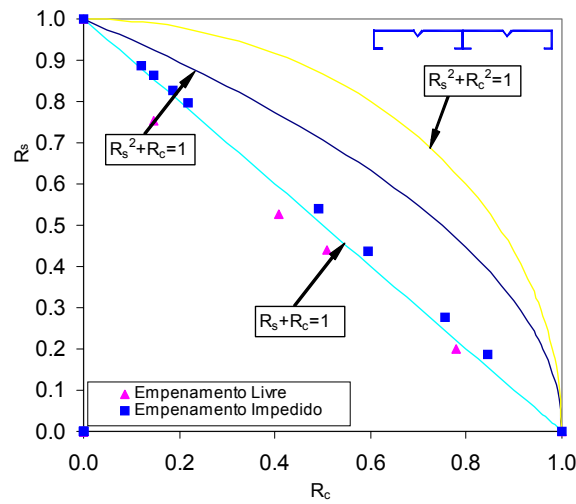


Figura 4.16 Resultados da análise de estabilidade linear pelo MEF, de painel enrijecido formado pela associação de dois painéis diafragmas, com seção de 600x100x50x1 cada, sob ação combinada de compressão e cisalhamento.

Na Figura 4.17 são ilustrados os modos críticos de flambagem de painel diafragma, sob compressão uniforme e sob a combinação de cargas de compressão e horizontal.

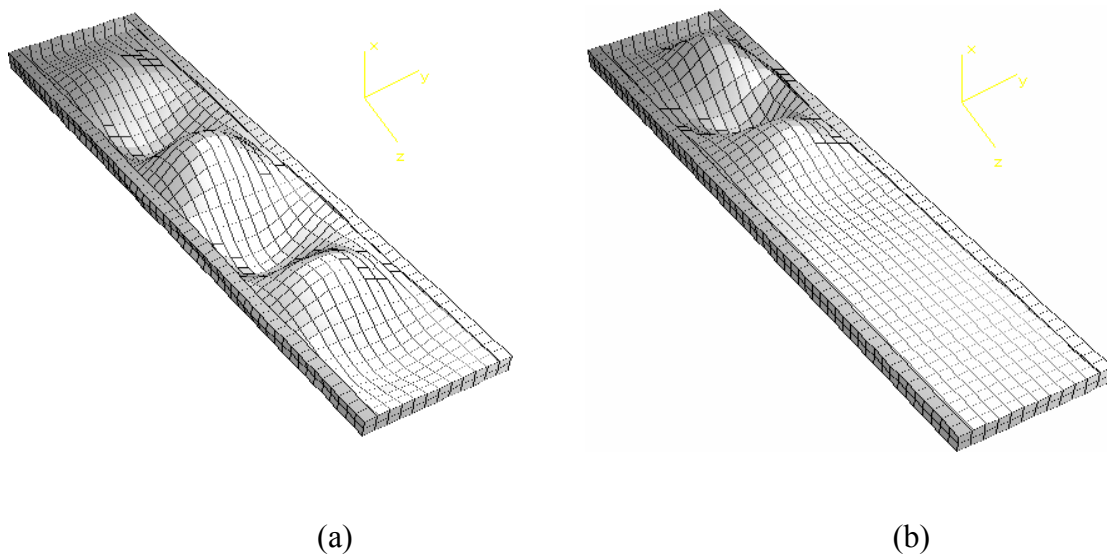


Figura 4.17 Modos de flambagem de um painel diafragma com empenamento impedido: (a) compressão simples; (b) ação combinada de compressão e horizontal.

Pode-se analisar as cargas de flambagem para diferentes comprimentos de painéis, em função das combinações de cargas, conforme os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, respectivamente para painéis com e sem enrijecedor intermediário de parede.

O lado esquerdo do gráfico representa as cargas de flambagem quando a resultante da carga horizontal ( $F_h$ ) é dominante e do lado direito quando a resultante da carga de compressão ( $F_v$ ) passa a prevalecer. De acordo com os gráficos, no trecho  $F_h > F_v$ , à medida que aumenta a carga de compressão há decréscimo no valor da carga de flambagem, atingindo valor mínimo quando as carga horizontal e de compressão são iguais. Já quando a carga de compressão passa a dominar ( $F_h < F_v$ ), o valor da carga de flambagem aumenta no caso de comprimento de painel curto mas, para os painéis de comprimento longo, a influência da carga horizontal é pequena.

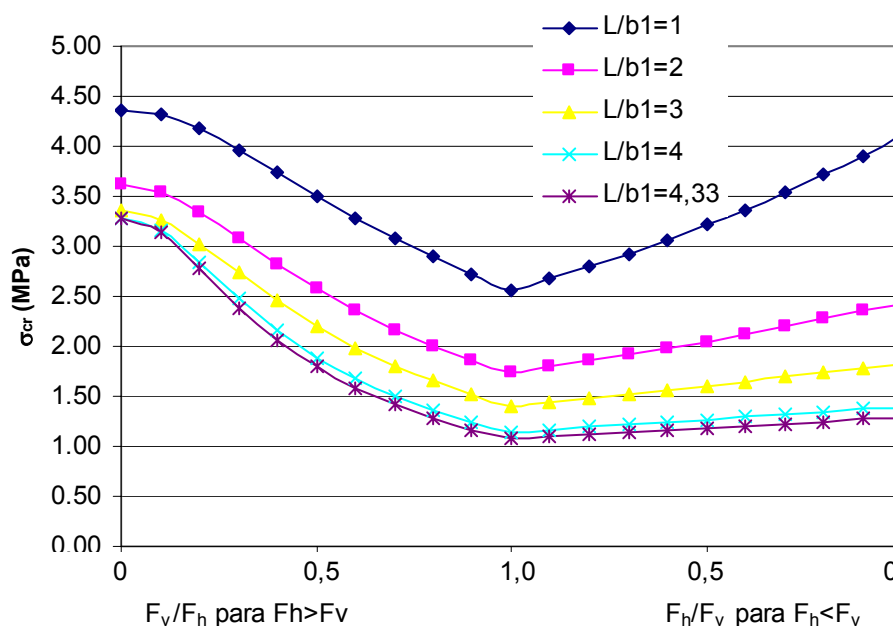


Figura 4.18 Cargas críticas de flambagem de painel com seção de 600x100x50x1, sem enrijecedor intermediário, para diferentes combinações de cargas e comprimento do painel.

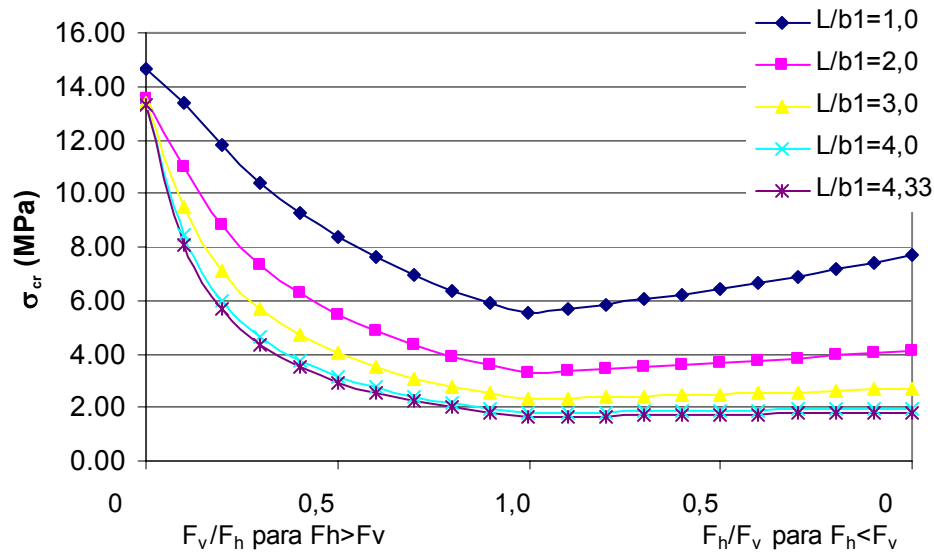


Figura 4.19 Cargas críticas de flambagem para diferentes combinações de cargas e comprimento do painel, seção de 600x100x50x1, com enrijecedor intermediário.

Na modelagem computacional dos painéis analisadas neste capítulo, foram adotadas algumas simplificações nas ligações entre dois painéis adjacentes e, também, nas extremidades superior e inferior do painel. As ligações dos painéis são feitas sem o uso de parafusos, que seria o caso real adotado em uma construção de edifício. Na discretização dos elementos, os flanges em contato entre dois painéis são considerados como peças únicas, com espessura duas vezes a espessura de chapa do painel. A extremidade inferior é considerada perfeitamente engastada na base e a extremidade superior unida a uma placa rígida de aço, com uma espessura de 30 mm. Portanto, em ambas extremidades, os elementos são considerados com ligação contínua e localmente engastada.

Para simular uma situação real de ligação dos painéis, por meio de conectores, devem ser feitas novas considerações, levando em conta os problemas de contato entre os elementos e as ligações intermitentes com o uso de parafusos, além da necessidade de verificar a resistência dos parafusos.

# Capítulo V

## Análise Não-Linear

---

### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados da análise não-linear elástica e elastoplástica de painéis isolados, por meio de Métodos de Elementos Finitos e a representação gráfica da curva carga *vs.* deslocamento que representa a trajetória de equilíbrio estável. No primeiro caso, de análise não-linear elástica, utiliza-se o programa Shell e no segundo caso, de análise não-linear elastoplástica, o programa comercial Ansys. Nos dois casos, adota-se como imperfeição inicial o modo crítico de flambagem.

Na análise não-linear elástica, são analisados os painéis submetidos à compressão uniforme, à carga horizontal e à combinação dessas. Leva-se em consideração as amplitudes das imperfeições iniciais, pois estes parâmetros influenciam no comportamento pós-flambagem.

Na análise não-linear elastoplástica, estuda-se o comportamento do painel submetido à carga horizontal, para os casos de deslocamento axial livre e impedido na extremidade superior. Estes painéis simulam o comportamento de painéis diafragma com a função de contraventamento em edifícios residenciais ou comerciais.

## 5.2 Análise Não-Linear Elástica de Painéis Diafragma

Os resultados computacionais do comportamento não-linear elástico, carga vs. deslocamento, que representam as trajetórias de equilíbrio de um painel submetido à compressão uniforme, são ilustrados na Figura 5.1 e Figura 5.2. O painel apresenta uma seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600mm, com empenamento livre nas duas extremidades. O painel é globalmente bi-apoiado e localmente livre nas duas extremidades. São apresentados os resultados dos seguintes deslocamentos no painel: local de parede ( $v_L$ ), encurtamento axial ( $w$ ) e flexão global ( $v$ ), conforme previamente indicado na Figura 4.3. A imperfeição geométrica inicial adotada no painel corresponde ao modo de flambagem local, que é o modo crítico de flambagem obtido pela análise de estabilidade linear, adotando-se diferentes amplitudes de imperfeições geométricas iniciais na análise.

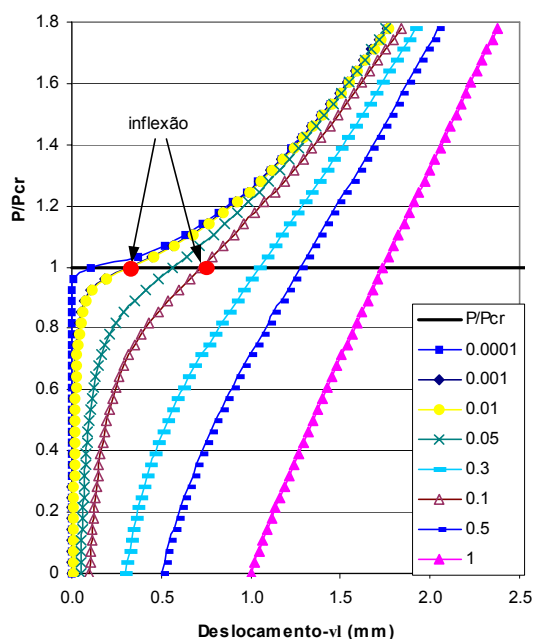


Figura 5.1 Resposta carga vs. deslocamento ( $v_L$ ) na placa de um painel, com seção de 600x100x50x1, submetido à compressão uniforme (na legenda, amplitudes de imperfeição inicial no modo local).

As curvas  $P/P_{cr}$  vs.  $v_L$ , ilustrada na Figura 5.1, onde os incrementos de cargas ( $P$ ) são normalizados em relação à carga crítica de flambagem ( $P_{cr}$ ), representam as configurações de equilíbrio na alma na posição de 204,29 mm, conforme ilustrado na

Figura 4.3, onde o deslocamento é máximo no modo crítico de flambagem local. Nota-se que há um decréscimo de rigidez do painel até o ponto de inflexão da curva, a partir da qual há ganho de rigidez. Na mesma curva, verifica-se que o ponto de inflexão coincide com a carga crítica de flambagem ( $P/P_{cr}=1,0$ ). Estes fenômenos são melhor observados quando a imperfeição inicial é pequena.

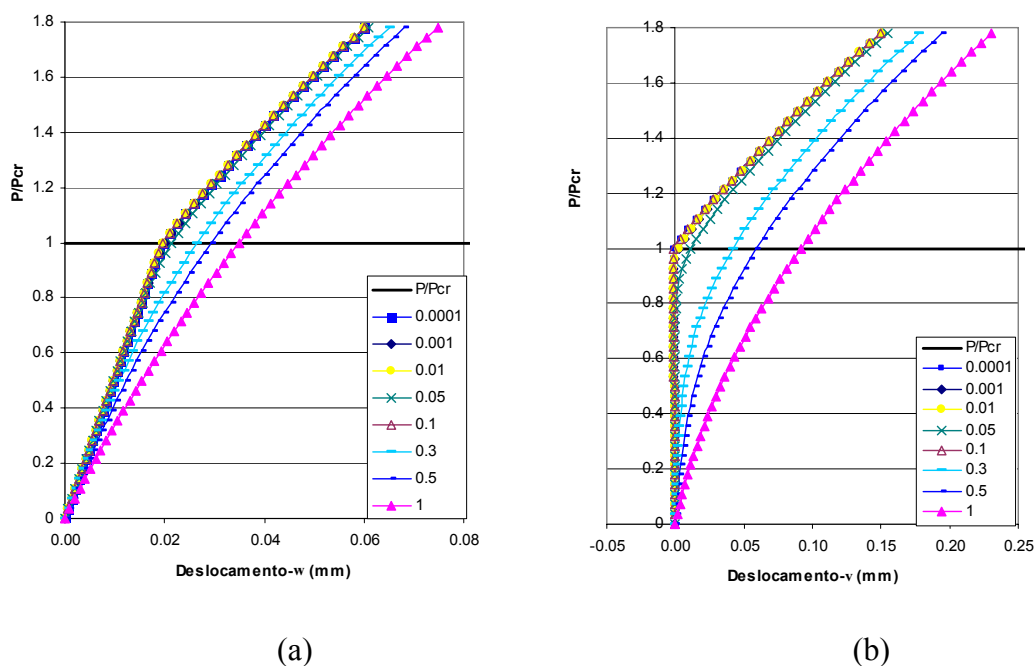


Figura 5.2 Resposta de (a) carga-deslocamento axial ( $w$ ) e (b) carga-flexão global ( $v$ ).

Já as curvas  $P/P_{cr} \times w$ , conforme a Figura 5.2 (a), representam os deslocamentos axiais nas extremidades longitudinais do painel. Quando os valores das imperfeições iniciais forem pequenos, menores do que 0,3 mm ( $0,3t$ ), os resultados são quase coincidentes, representados por duas retas que mudam de inclinação a partir do patamar da carga crítica de flambagem. Para imperfeições maiores, o gráfico é representado por uma curva suave, sem a mudança brusca da trajetória de equilíbrio.

As curvas  $P/P_{cr} \times v$ , ilustradas na Figura 5.2 (b), representam os deslocamentos globais por flexão no comprimento médio do painel. Para pequenas imperfeições iniciais, as curvas coincidem e a flexão global se inicia após a carga crítica de flambagem. Ao contrário, para imperfeições maiores que 1% da espessura ( $0,1t$ ), a flexão se inicia para carga inferior à carga crítica de flambagem.

Conforme os resultados das análises anteriores, na trajetória de equilíbrio estável, há interação entre os modos de flambagem local de placa e o modo de flambagem global por flexão. Para pequena imperfeição inicial, a interação se dá durante o comportamento pós-flambagem, caso contrário, se a imperfeição inicial for acentuada, a interação ocorre desde o início dos incrementos de carga, conforme se observa nas Figura 5.1 (a) e Figura 5.2 (b).

Para ilustrar a deformada pós-flambagem de um painel com seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm, submetido à compressão uniforme, apresenta-se na Figura 5.3 (a) uma visão espacial do painel e na Figura 5.3 (b) o deslocamentos das paredes ( $v_L$ ) de uma seção transversal a uma altura de 200 mm. Formam-se várias meias ondas na direção longitudinal e apenas uma meia onda em cada parede do painel, conforme discutido anteriormente.

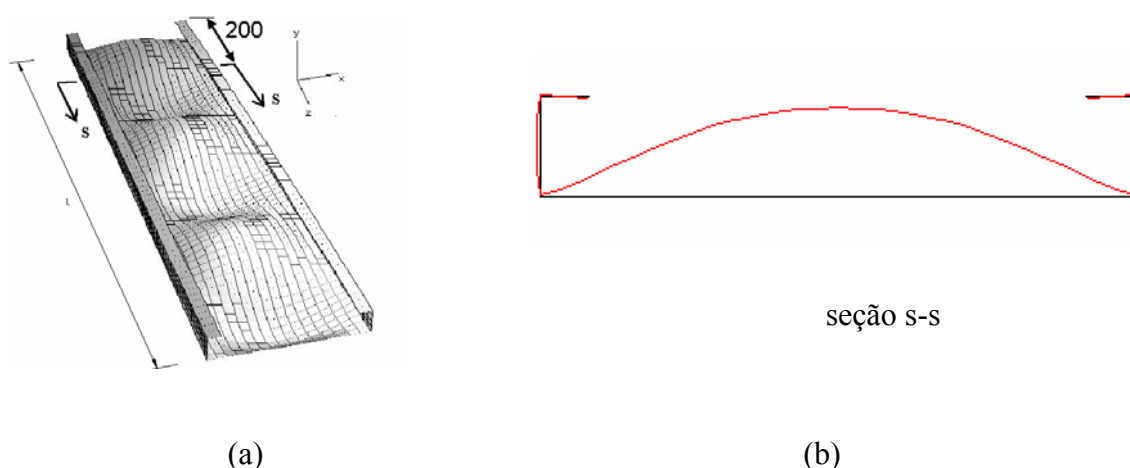


Figura 5.3 Painel diafragma, com seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm, submetido à compressão uniforme: (a) modo de flambagem local; (b) vista da deformada na seção transversal, em uma seção a 200 mm da extremidade inferior.

Com relação ao problema anterior, pode-se analisar o comportamento não-linear elástico sem a introdução da imperfeição geométrica inicial, conforme os resultados ilustrados na Figura 5.4, onde os valores de  $v_L$ ,  $w$  e  $v$  são, respectivamente: (i) deslocamento local da alma ( $v_L$ ), (ii) deslocamento axial ( $w$ ) e (iii) flambagem global por flexão ( $v$ ). Apesar do painel não apresentar imperfeição geométrica inicial, a trajetória de equilíbrio é estável no trecho pós flambagem. Neste caso, como a seção

geométrica do perfil é monossimétrica, a origem da imperfeição geométrica no painel é devida à deformação não uniforme e à mudança na geometria da seção transversal ao longo do eixo axial (flambagem local), alterando-se a posição do centro de gravidade da seção do painel ao longo eixo axial em relação às duas extremidades. Na Figura 5.5, observa-se o deslocamento da seção transversal, para uma carga de  $P/P_{cr}=0,02$ , cujo deslocamento foi ampliado para ilustrar melhor o fenômeno. Na Figura 5.6 é ilustrado o campo de deslocamentos não uniforme, na direção x, na extremidade inferior do painel.

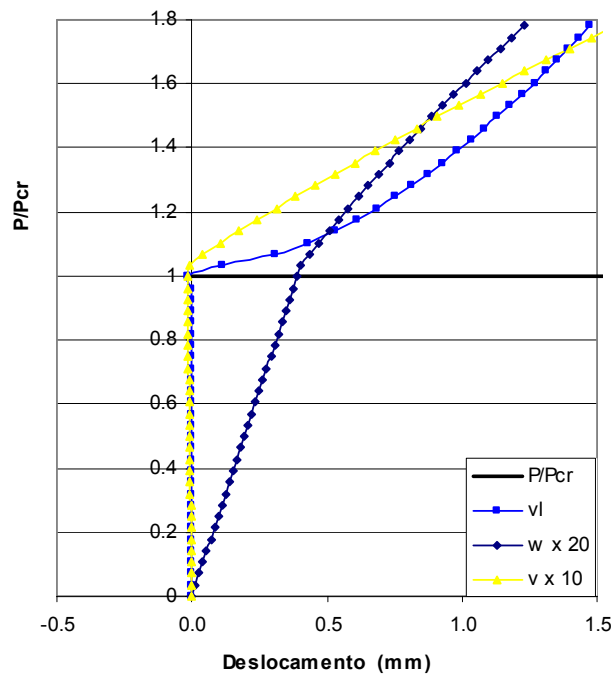


Figura 5.4 Comportamento não-linear geométrico, para o caso de imperfeição inicial nula, para painel com seção de 600x100x50x1 e comprimento de 2600 mm.



Figura 5.5 Vista da deformada na seção transversal em uma seção a 557mm da extremidade inferior, ampliada em 100.000 vezes, para uma carga de  $P/P_{cr}=0,02$ . Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm.

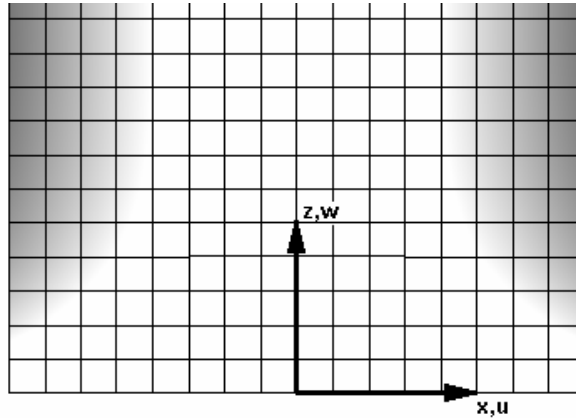


Figura 5.6 Campo de deslocamentos (u) na extremidade do painel.

Para o caso de painel submetido à combinação de cargas de compressão e horizontal, sendo ambas com a mesma resultante força ( $F_h/F_v=1,0$ ), e aplicadas uniformemente distribuídas na extremidade superior, obtém-se as curvas de deslocamento local de placa ( $v_L$ ) mostradas na Figura 5.7, para uma seção a 539,00 mm da extremidade inferior (deslocamento máximo no modo crítico de flambagem).

O painel tem uma seção de 600x100x50x1, comprimento de 2600mm, o empenamento é impedido nas duas extremidades por meio de placas rígidas de aço engastadas nas duas extremidades. Globalmente é bi-apoiado e localmente engastado nas duas extremidades.

Na Figura 5.8 (a) e (b) são ilustrados o modo de flambagem e o comportamento pós-flambagem, notando-se que há aumento de número de meias ondas no comportamento pós-flambagem.

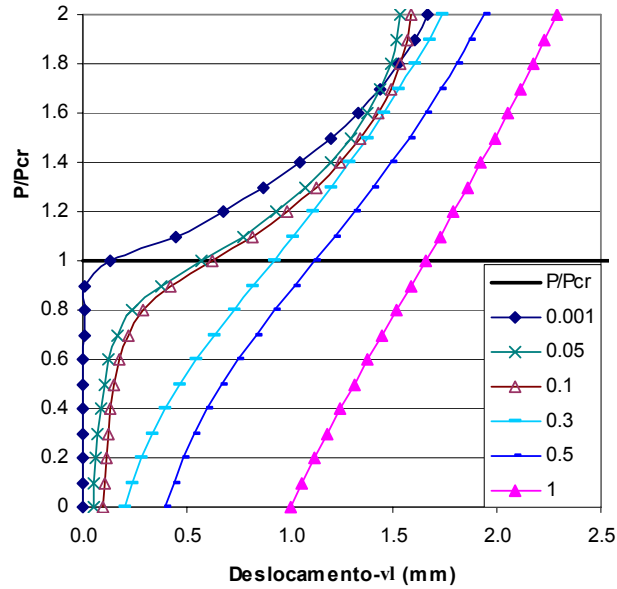


Figura 5.7 Resposta carga x deslocamento local ( $v_L$ ) de placa para diferentes amplitudes de imperfeições iniciais. Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm. Combinação de cargas com  $F_h/F_v=1,0$ .

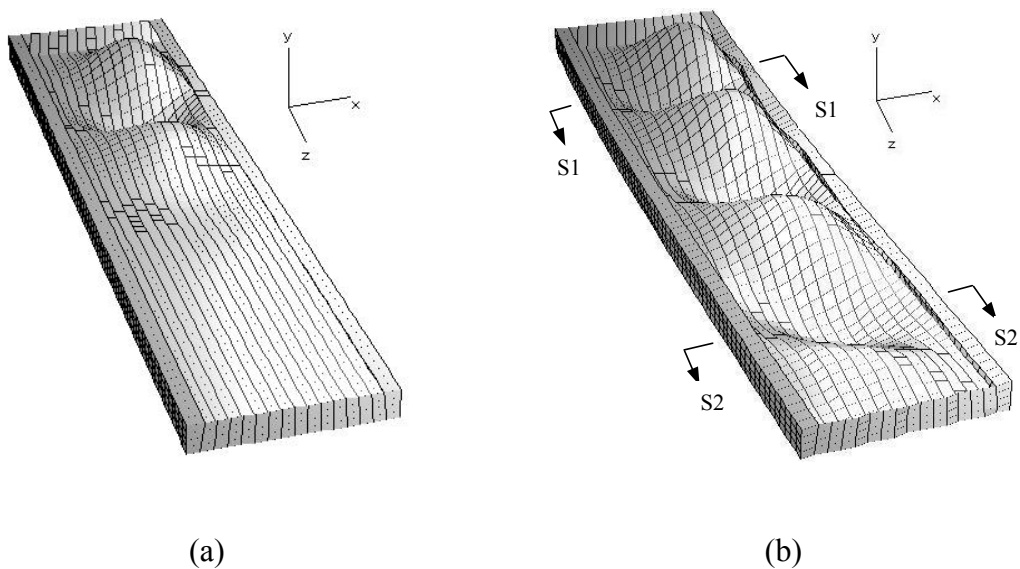


Figura 5.8 Painel 600x100x50, espessura de 1,0 mm, comprimento de 2600 mm, submetido a combinação das cargas de compressão e cisalhamento, com  $F_h/F_v=1,0$ : (a) modo de flambagem; (b) comportamento pós-flambagem.

Na Figura 5.9 apresentam-se os deslocamentos da seção transversal no comportamento pós-flambagem, referente ao painel da Figura 5.8. Além do deslocamento local da placa, há deslocamento global de flexão em torno de momento de inércia máxima.

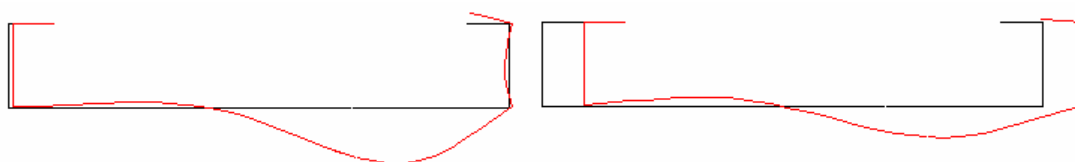


Figura 5.9 Deformada pós-flambagem de um painel sob combinação de cargas de compressão e cisalhamento: (a) para a seção transversal  $s_1$ (Figura 5.8); (b) para seção  $s_2$ (Figura 5.8).

Por último, são apresentados os resultados do comportamento não-linear geométrico sob cisalhamento puro, para um painel isolado com a seção de 600x100x50, espessura de 1,0 mm, e comprimento de 2600 mm. Este exemplo é a simulação de um painel diafragma contido entre duas vigas de uma edificação, que resiste à força horizontal do vento, conforme o esquema da Figura 5.10.

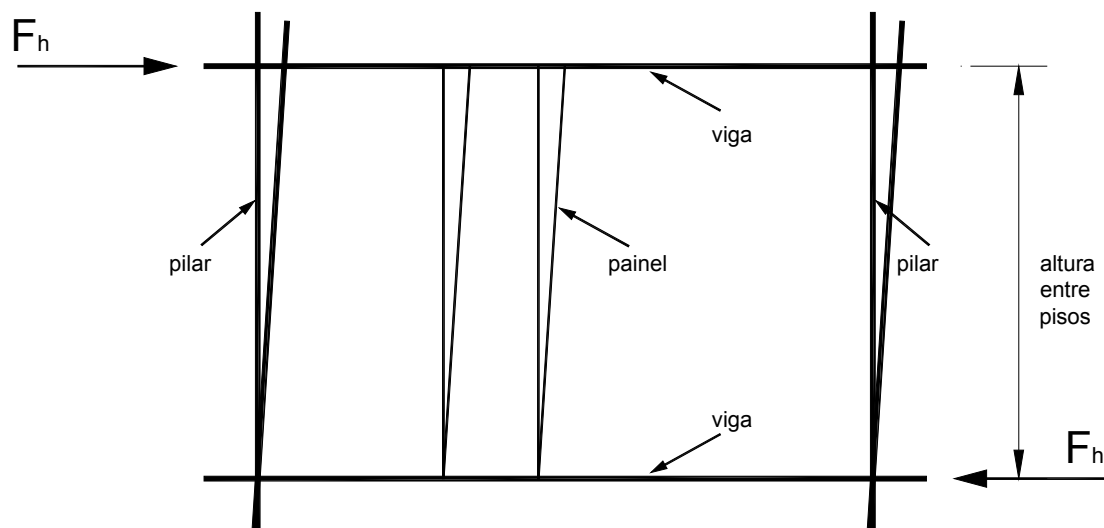


Figura 5.10 Esquema de painel diafragma em uma edificação, com função de contraventamento.

No gráfico de deslocamento lateral de placa ( $v_L$ ), ilustrado na Figura 5.11, verifica-se um ganho de rigidez acentuado nos trechos pós-critico para imperfeição inicial menor que  $0,2t$ .

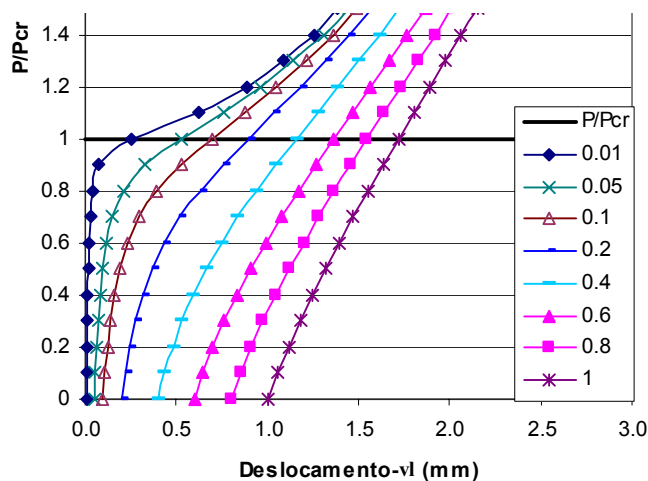


Figura 5.11 Resposta carga x deslocamento ( $v_L$ ), para painel submetido a cisalhamento puro.

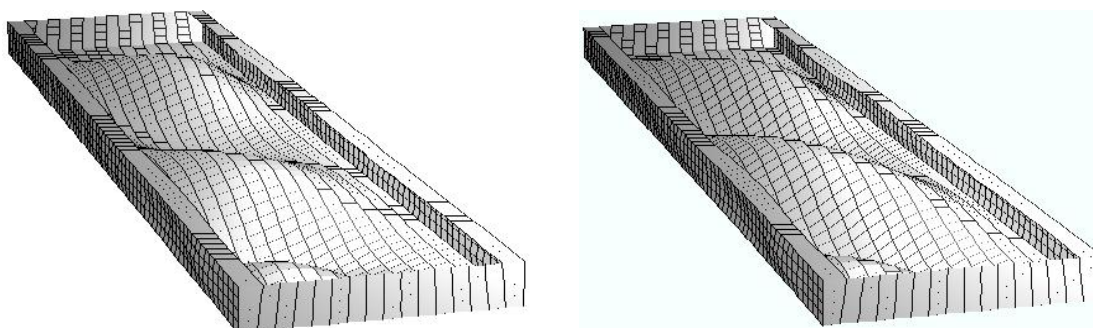


Figura 5.12 Vista de um painel, seção de  $600 \times 100 \times 50 \times 1$  e comprimento de 2600 mm, submetido a um carregamento horizontal no seu plano: (a) modo crítico de flambagem; (b) resposta do comportamento pós-flambagem.

Os campos de deslocamentos são semelhantes, tanto para pré como para pós-flambagem, nos painéis submetidos a cisalhamento puro, conforme se observa na Figura 5.12, onde são mostrados o modo crítico de flambagem e a resposta do comportamento pós-flambagem. Os campos de deslocamentos ( $v+v_L$ ), para diferentes incrementos de cargas, são ilustrados nas Figura 5.13 (a), (b) e (c), onde estão representados para  $P/P_{cr}$  iguais a 0, 1 e 2, respectivamente: imperfeição inicial, carga total igual à carga crítica de

flambagem e carga total de compressão igual ao dobro da carga crítica. Na Figura 5.13 (d), está representado o campo escalar de deslocamento da Figura 5.13 (c).

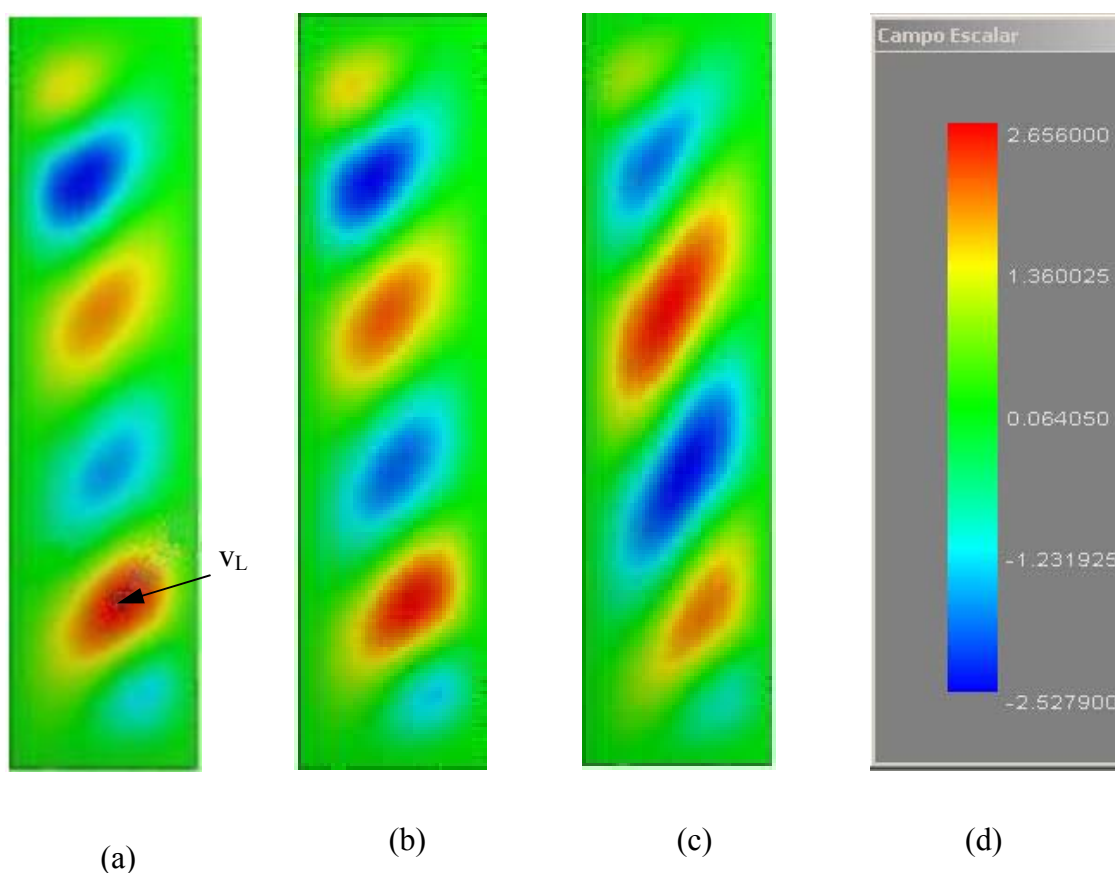


Figura 5.13 Campo de deslocamentos ( $v+v_L$ ): (a)  $P/P_{cr}=0$  (imperfeição inicial), (b)  $P/P_{cr}=1,0$ ; (c)  $P/P_{cr}=2,0$  e (d) campo escalar para  $P/P_{cr}=2,0$ .

### 5.3 Análise Não-Linear Elastoplástica de Painéis Diafragma

A análise não-linear elastoplástica permite estudar o comportamento pós-flambagem, além da carga de colapso em uma estrutura. Dependendo das propriedades física do material e da geometria do elemento estrutural, a estrutura pode entrar em colapso com valor da carga inferior à carga de flambagem.

Os resultados da análise elastoplástica para um painel diafragma (600x100x50x1) com altura de 2400 mm, submetido apenas à carga horizontal na extremidade superior e obtidos utilizando-se o programa Ansys, são ilustrados na Figura

5.14 e Figura 5.15, para condição de deslocamento axial livre ou impedido na extremidade superior, respectivamente. Nestes exemplos, adotou-se aço com resistência ao escoamento ( $f_y$ ) de 240 MPa e módulo de elasticidade (E) de 210.000 MPa.

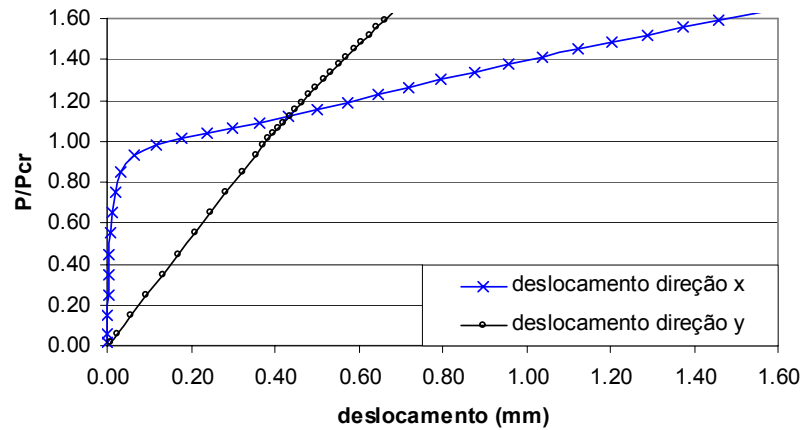


Figura 5.14 Resultados da análise não-linear elastoplástica de painel diafragma (600x100x50x1) submetido a uma carga horizontal, comprimento de 2400 mm, deslocamento axial impedido na extremidade superior, limite de escoamento do aço ( $f_y$ ) = 240 Mpa. Deslocamentos fora do plano (y) e na direção da carga (x).

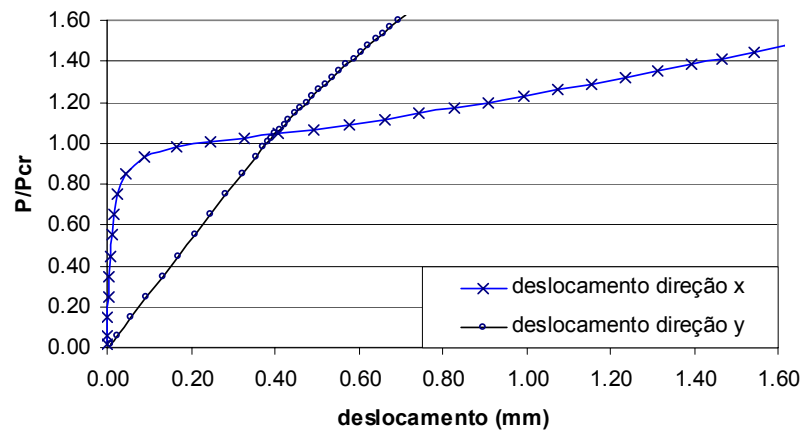


Figura 5.15 Resultados da análise não-linear elastoplástica de painel diafragma (600x100x50x1) submetido a uma carga horizontal, comprimento de 2400 mm, deslocamento axial livre na extremidade superior, limite de escoamento do aço ( $f_y$ ) = 240 MPa, deslocamentos fora do plano (y) e na direção da carga (x).

De acordo com as figuras anteriores, o deslocamento na direção  $x$  representa a flambagem local da placa na alma do painel, apresentando pequeno deslocamento no trecho pré-flambagem, mas um grande deslocamento no trecho pós-flambagem. No entanto, o deslocamento  $y$ , que representa o deslocamento na direção da carga horizontal, o comportamento é quase linear em todo o trecho, tanto para borda com deslocamento axial livre ou impedido na extremidade superior.

Na modelagem computacional dos painéis isolados, tratadas neste capítulo, as ligações nas extremidades inferior e superior são consideradas perfeitamente engastadas, sem o uso de parafusos. Conforme já mencionado no capítulo anterior, as ligações parafusadas podem conduzir a resultados diferentes. Portanto, para os casos analisados neste capítulo, há necessidade de analisar os painéis levando em consideração as ligações por meio de parafusos.

# Capítulo VI

## Estudo de Caso: Sistema Construtivo

---

### 6.1 Introdução

No presente capítulo são analisados painéis diafragma com a função de contraventamento em edifícios residenciais. Os painéis, além da função estrutural, permitem a substituição da alvenaria convencional, reduzindo o peso da estrutura e, conseqüentemente, diminuindo o custo das fundações e aumentando a velocidade na execução da obra.

Na análise estrutural do edifício, os painéis diafragma serão substituídos por diagonais equivalentes, com o objetivo de diminuir o esforço computacional nos cálculos e evitar a discretização com elementos de casca.

Os resultados do comportamento global da estrutura serão comparados com o sistema convencional, que adotam os contraventamentos em elementos barra.

## 6.2 Edifício residencial padrão CDHU

O edifício adotado para a análise é o modelo de CDHU- Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo [34] [35], conforme ilustrado na Figura 6.1. Os pilares, as vigas e os contraventamentos são em chapa dobrada a frio e as lajes em concreto moldado no local. O edifício é composto por um conjunto de dois blocos, com cinco pavimentos tipo. A distância entre os pisos é de 2500 mm. Cada bloco possui dois apartamentos por andar, e as ligações entre os andares e os blocos são feitas por uma escadaria e um corredor que estão localizados entre os dois blocos. As paredes de vedação são em alvenaria, que não são consideradas como painéis diafragma no cálculo estrutural. Cada apartamento possui dois quartos, sala, cozinha, banheiro, cozinha e área de serviço, com 45,46 m<sup>2</sup> de área de construção por apartamento, conforme apresentado na Figura 6.2.



Figura 6.1 Vista de edifício residencial, padrão CDHU: modelo Prédios Verticais Isolados – V122-V2.

A Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo - CDHU, elabora projetos, executa construções e promove medidas de apoio à realização de planos e programas estaduais e/ou municipais de habitação prioritários

para o atendimento à população de baixa renda, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela política habitacional do Governo Estadual [35].

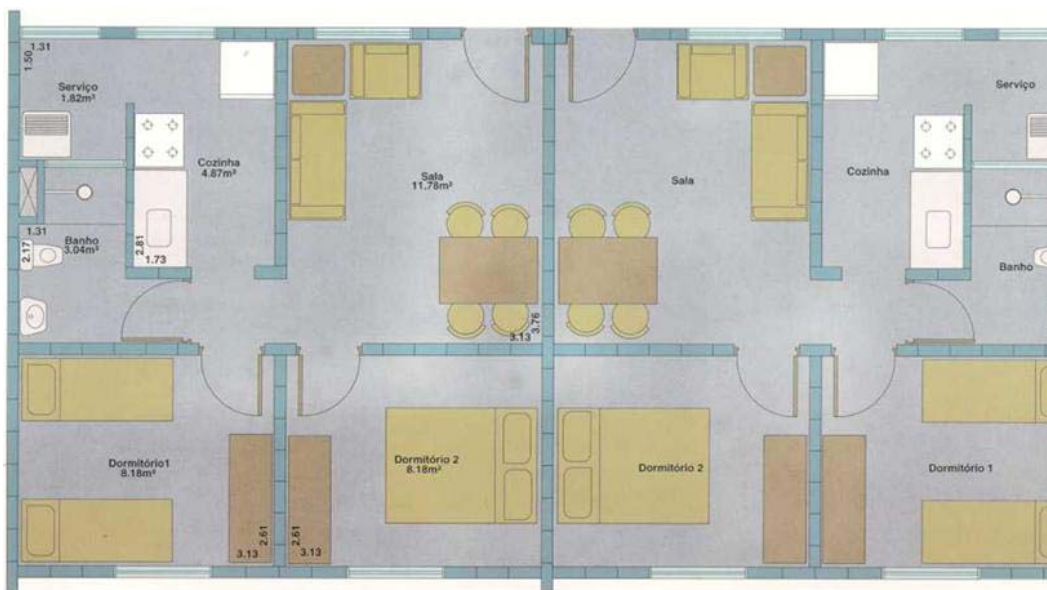


Figura 6.2. Planta baixa de um bloco com dois apartamentos, padrão CDHU, modelo Prédios Verticais Isolados – V122-V2.

Os pilares são formados pela associação de dois perfis cartola, sendo adotados dois tipos pilares, com as respectivas dimensões ilustradas na Figura 6.3. As posições dos pilares encontram-se na Figura 6.5.

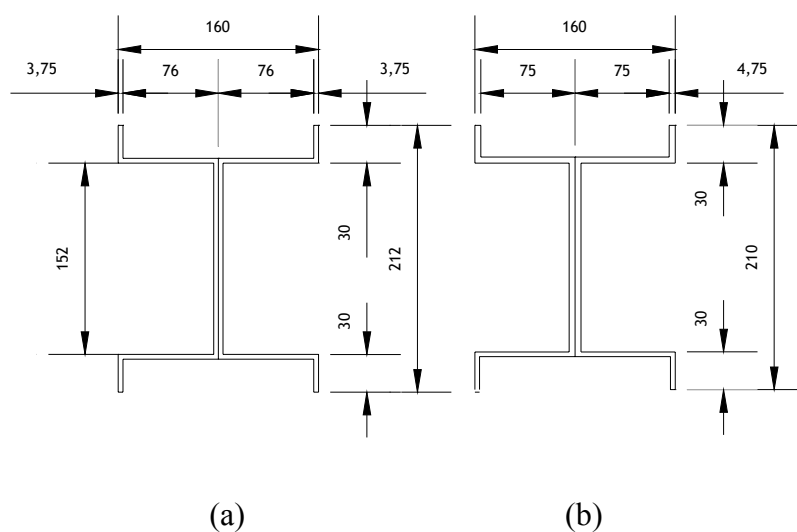


Figura 6.3 Pilares formados pela associação de dois perfis cartola: (a) pilar P1; (b) pilar P2.

As vigas são formadas associando-se dois perfis U enrijecidos, conforme a Figura 6.4 (a). As barras de contraventamento são em perfis U simples, Figura 6.4 (b). As lajes são maciças em concreto armado, moldadas no local com espessura de 10 cm.

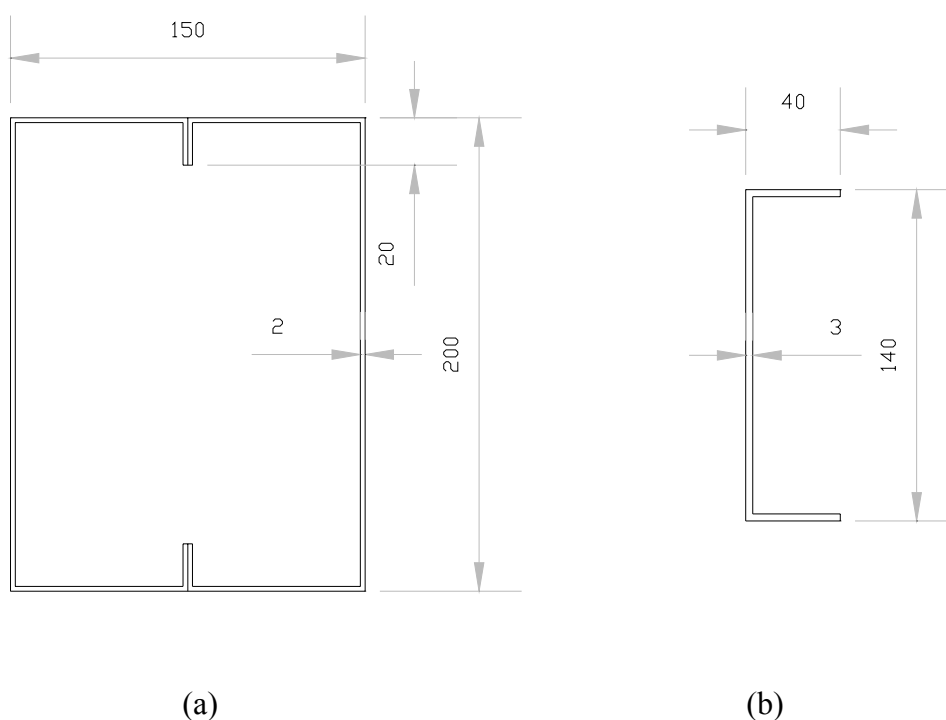


Figura 6.4 Seção de perfis: (a) viga; (b) contraventamento.

No modelo para análise estrutural, os pórticos na direção y, conforme os eixos de referência da Figura 6.5, são considerados com ligações rígidas e não contraventadas, conforme ilustrado na Figura 6.6 (a). Já as ligações dos pórticos na direção x são executadas como ligações flexíveis. No projeto original CDHU, adota-se contraventamento nos pórticos das extremidades, na direção x, enquanto os pórticos internos, nessa direção, não são contraventados, conforme as Figura 6.6 (c) e (b), respectivamente. As ligações das bases dos pilares com as fundações são consideradas perfeitamente engastadas.

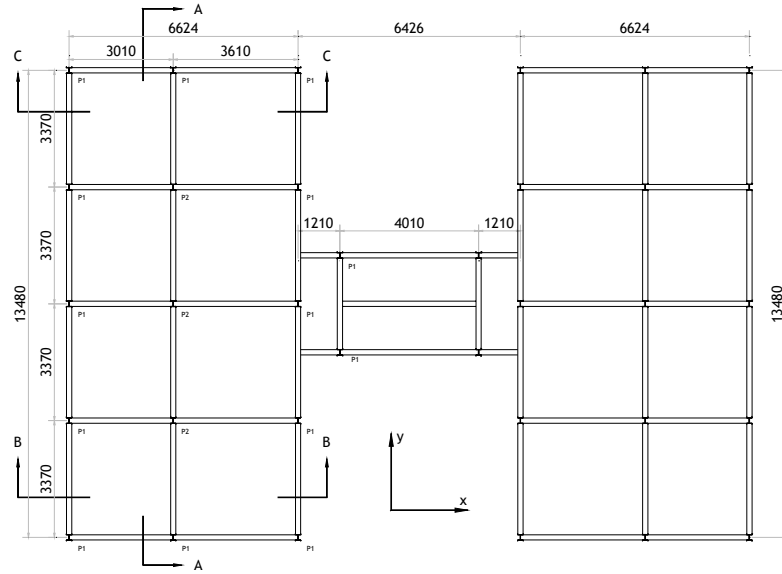


Figura 6.5 Pavimento tipo indicando as posições dos pilares e vigas (medidas em mm).

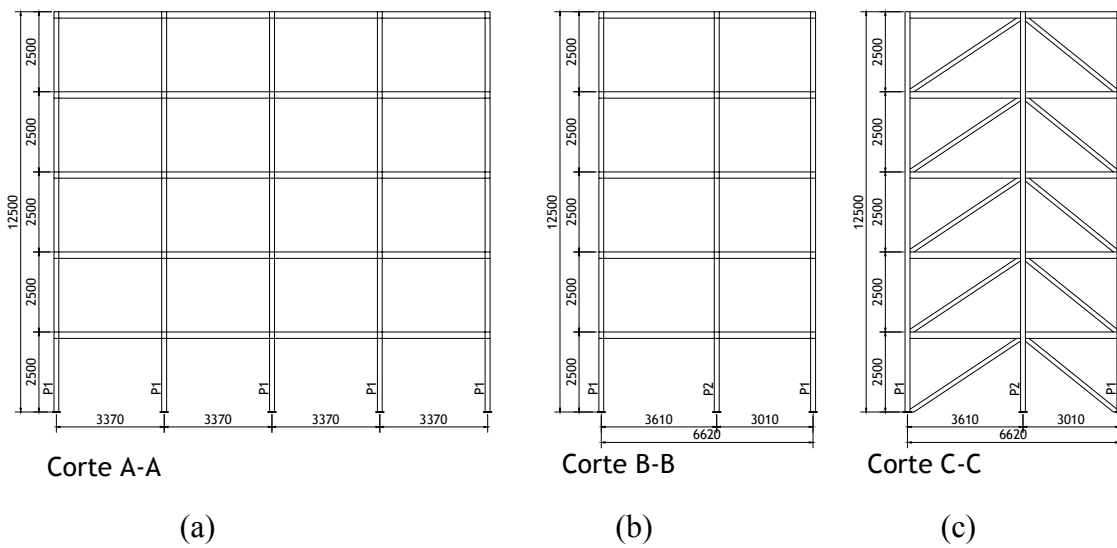


Figura 6.6 Pórticos do edifício: (a) pórtico rígido no plano yz; (b) pórtico flexível no plano xz; (c) pórtico contraventado no plano xz (medidas em mm).

### 6.3 Diagonais equivalentes para painéis metálicos

Nesse item, apresenta-se a definição de um sistema equivalente de contraventamento com barra na diagonal, submetida apenas à tração, com a função de

simular o comportamento real do sistema de contraventamento formado pelos painéis em chapa fina de aço. Determina-se uma seção da diagonal com o mesmo deslocamento ( $u$ ) de um painel diafragma, para a mesma carga  $F_h$ , conforme ilustrado na Figura 6.7.

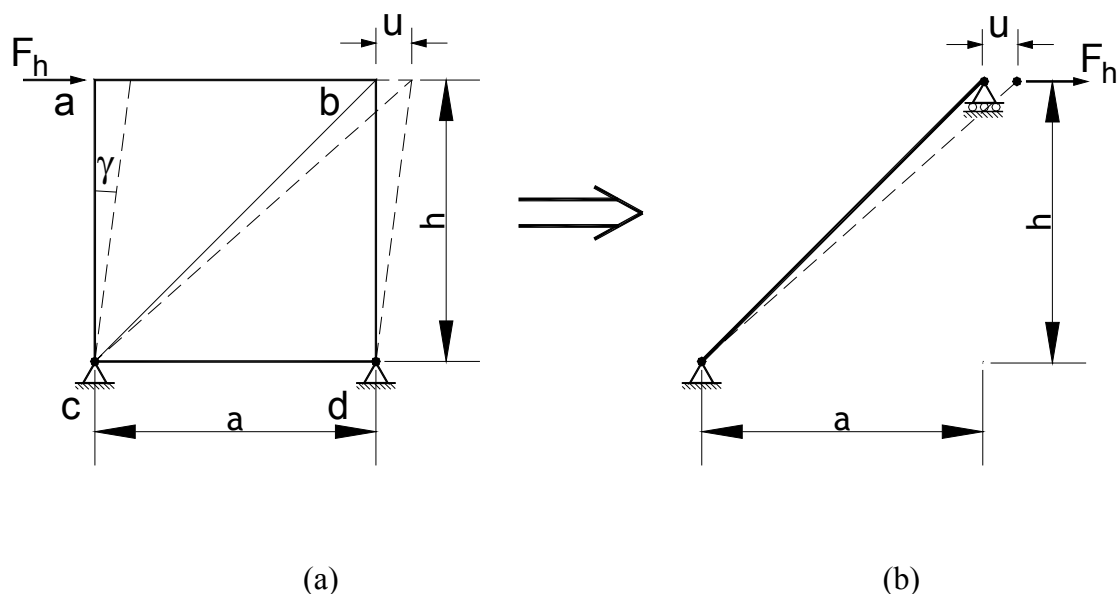


Figura 6.7 Sistema equivalente de contraventamento: (a) painel diafragma; (b) diagonal equivalente.

No edifício a analisar, existem dois pórticos contraventados por bloco de apartamentos, conforme apresentado na Figura 6.6 (c). Nesses pórticos, efetuou-se a substituição das barras diagonais pelos sistemas com painéis, conforme ilustrado na Figura 6.8. Adotou-se painéis com 5 e 6 perfis U enrijecidos, com seção de 600x100x50, espessura de 1 mm e comprimento de 2300 mm, resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ) de 240 N/mm<sup>2</sup>, engastados entre duas vigas, cuja seção está indicada na Figura 6.4 (a), e entre dois painéis adjacentes, conforme ilustrado na Figura 6.8 (b) e (c).

Em estruturas reais, as ligações dos painéis são feitas por meio de conectores e não são ligações contínuas e engastadas como adotado neste trabalho. Na Figura 6.10 estão ilustradas ligações por meio de parafusos e de rebites pop [36] entre painéis adjacentes, similar às indicações encontradas no Eurocode 3 [15] e no ESDEP [14]. Na Figura 6.11 está apresentado o detalhe de um tipo de ligação parafusada entre painel e viga, com auxílio de cantoneira de chapa dobrada.

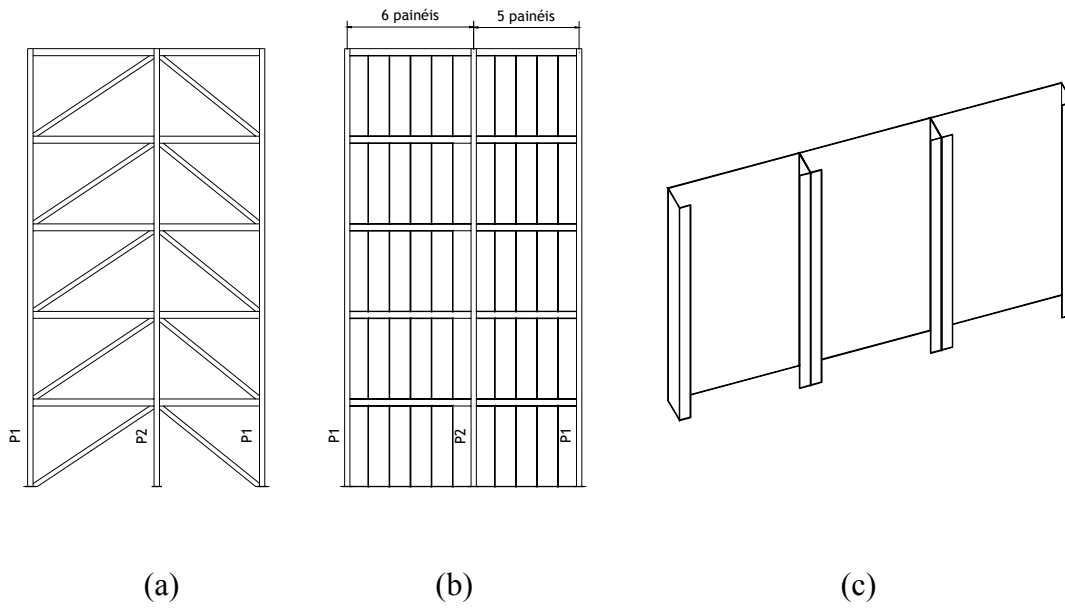


Figura 6.8 Substituição das diagonais de contraventamento por sistema de painéis em chapa fina formada a frio: (a) sistema original; (b) sistema proposto; (c) detalhe dos painéis.

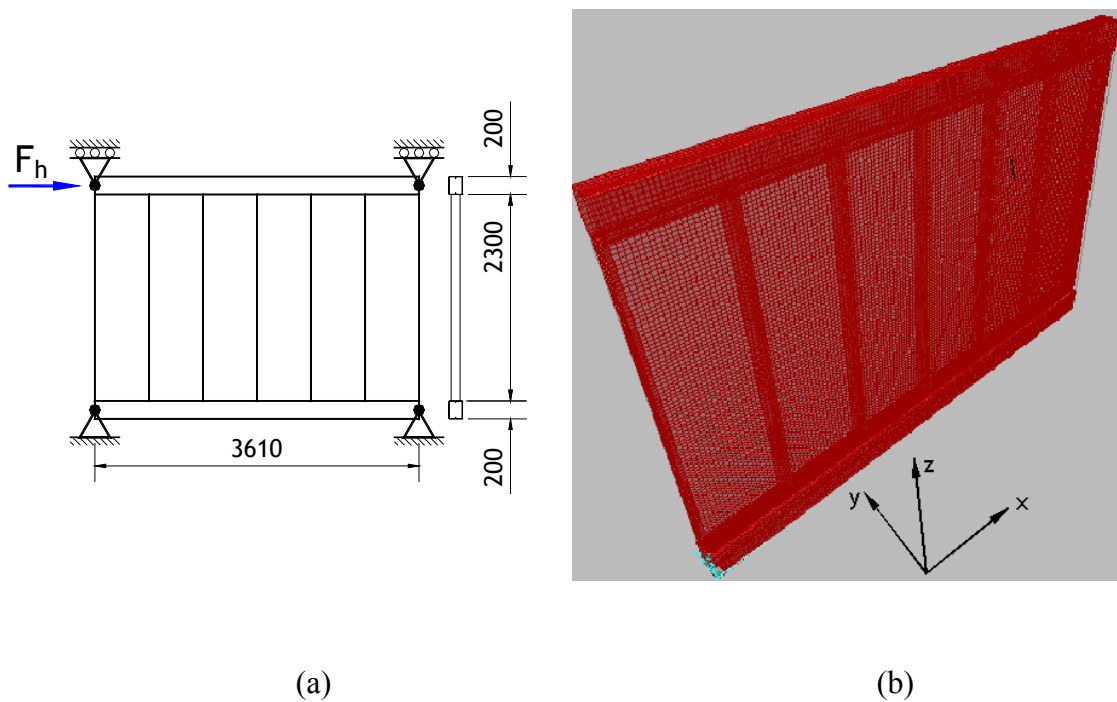


Figura 6.9 Módulo de painel formado pela associação de perfil U enrijecido: (a) esquema estrutural para seis perfis U enrijecidos; (b) modelo computacional em elementos finitos.

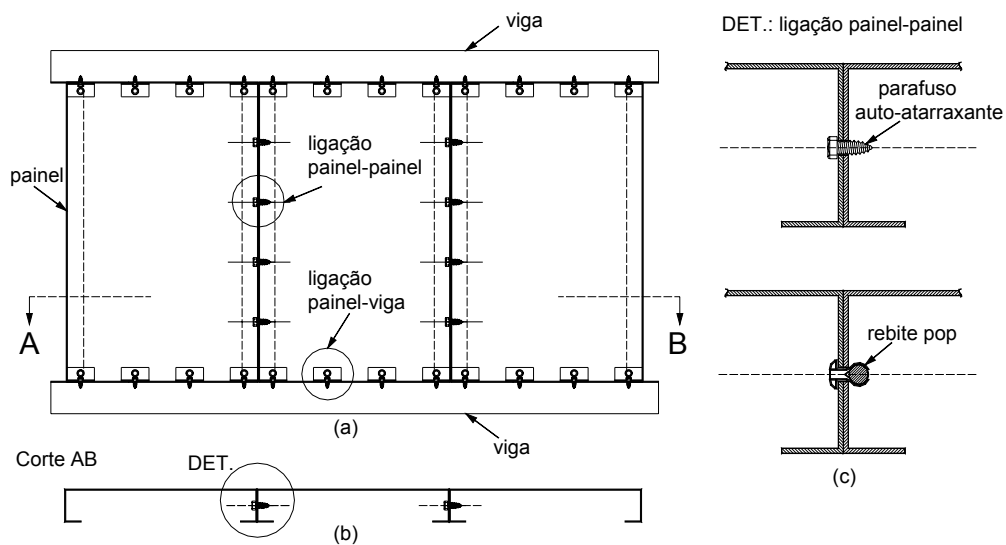


Figura 6.10 Ligação parafusada dos painéis: (a) vista geral; (b) ligação entre os painéis adjacentes; (c) detalhes de ligações parafusadas entre os painéis.

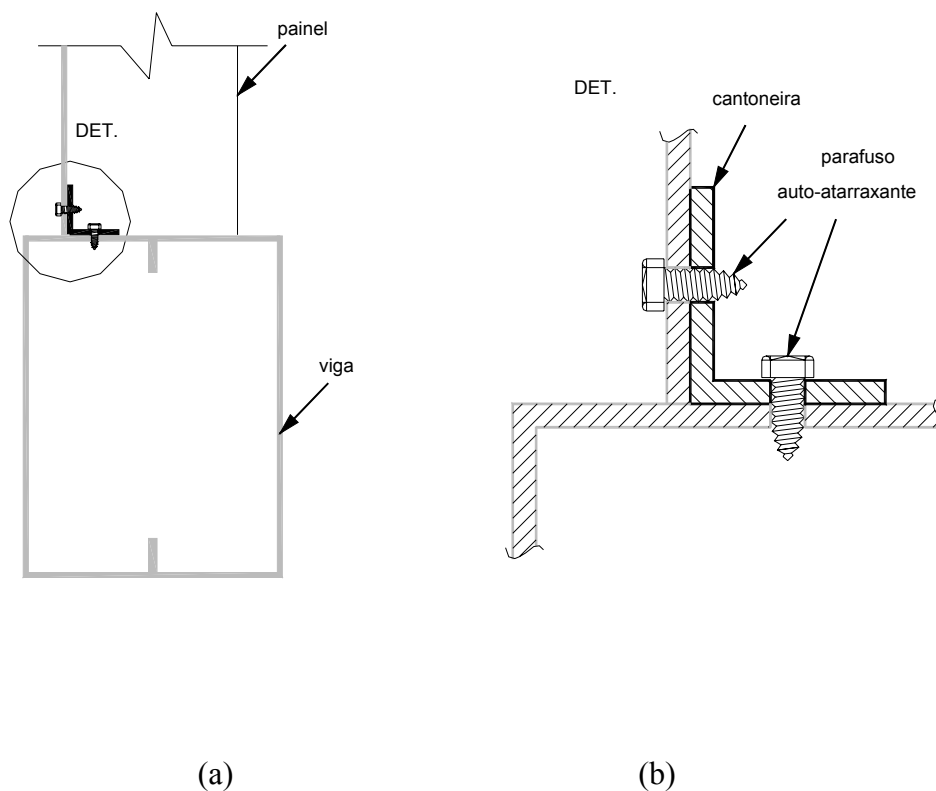


Figura 6.11 Esquema de ligação parafusada entre a viga e o painel: (a) corte do painel e da viga, com o sistema de ligação; (b) detalhe de ligação utilizando cantoneira e parafusos auto-atarraxantes.

Para definir um modelo de barras diagonais equivalente aos painéis com função diafragma, adotou-se o modelo de painéis isolados, posicionados entre duas vigas, uma superior e outra inferior, conforme apresentado na Figura 6.9.

As vigas estão apoiadas nas duas extremidades, simulando apoios nos pilares, sendo que na viga superior é liberado o deslocamento horizontal no plano do painel, e na viga inferior é impedido. Os deslocamentos laterais das vigas são impedidos, simulando a contenção promovida pelas lajes.

As análises foram realizadas por meio do MEF, com auxílio do programa computacional SAP 2000 versão 8. Para diferentes números de painéis, conforme a Figura 6.12 (a), obtém-se as cargas de flambagem por cisalhamento ( $F_{cr}$ ) mostradas na Figura 6.12 (b).

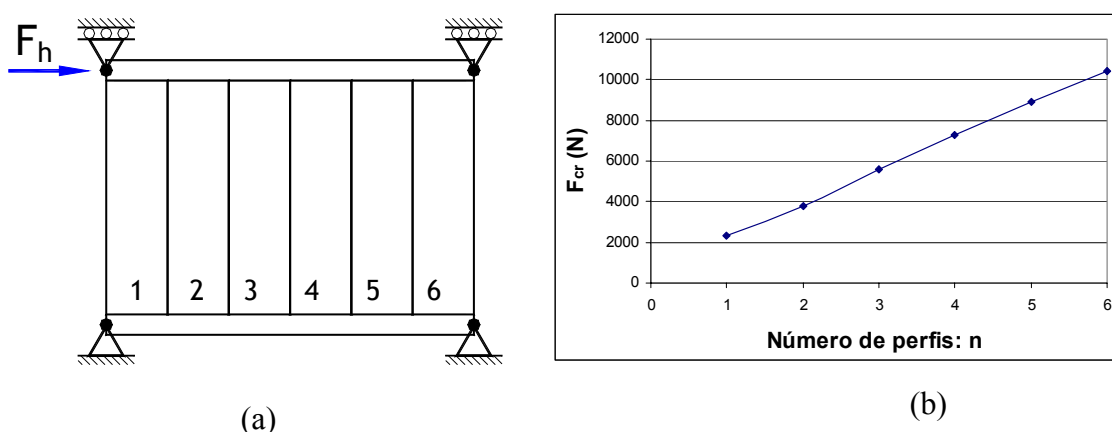


Figura 6.12 Painel diafragma submetido à carga horizontal: (a) modulação dos painéis; (b) cargas de flambagem por cisalhamento de painel diafragma, para diferentes números de perfis

Quanto maior o numero de perfis, ou seja, quanto maior a relação largura-altura do painel, a carga de flambagem cresce. Observa-se, ainda, uma relação quase-linear entre as cargas de flambagem e os números de perfis adotados.

Dos resultados obtidos Figura 6.12 (b), podemos obter a seguinte expressão para a carga critica de flambagem:

$$F_{cr}=1653,26.n + 508,20 \text{ (N)} \quad (6.1)$$

onde:  $n$  = número de perfis U enrijecidos.

A seguir, são determinadas as seções das diagonais equivalentes, referentes ao edifício em estudo, adotando-se barras em aço de seção circular.

Para o primeiro painel diafragma, com 5 perfis, o comportamento não-linear (carga x deslocamento) é ilustrado pela Figura 6.13, para uma imperfeição inicial de 1% da espessura, equivalente ao modo de flambagem do painel. A flambagem local (deslocamento na direção  $y$  ( $v_L$ )), apresenta resposta não-linear, enquanto o deslocamento ( $u$ ) no plano do painel (deslocamento na direção  $x$  conforme a Figura 6.9 (b)), apresenta resposta linear.

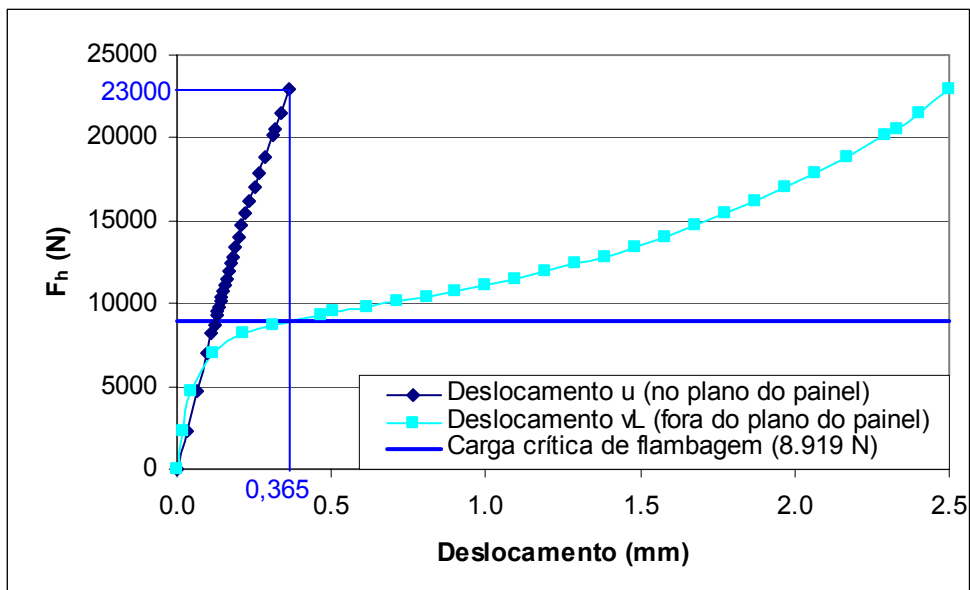


Figura 6.13 Resposta carga x deslocamento em painel diafragma composta por 5 perfis, para deslocamento no plano e fora do plano do painel.

O objetivo é determinar a seção de uma barra diagonal em aço, ilustrada na Figura 6.7, com rigidez equivalente ao sistema estrutural formado pelo painel de chapa fina. No caso em estudo, para uma carga horizontal ( $F_h$ ) no painel diafragma, o deslocamento horizontal ( $u$ ) é de 0,365 mm, conforme o gráfico da Figura 6.13. Para obter a seção da diagonal equivalente, fixa-se a carga e, variando a área da seção,

obtém-se a curva que relaciona diâmetro da barra vs. deslocamento, conforme ilustrado na Figura 6.14. Como resultado, a diagonal equivalente para o mesmo deslocamento horizontal é representada por uma seção de 51 mm de diâmetro.

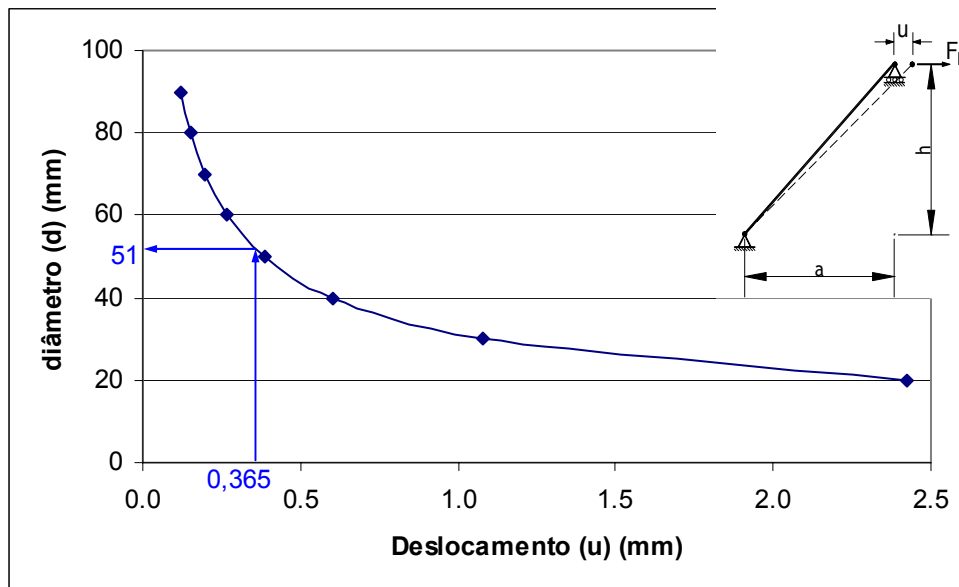


Figura 6.14 Identificação da diagonal equivalente para painel com 5 perfis, formada por barra de seção circular com diâmetro  $d$ .

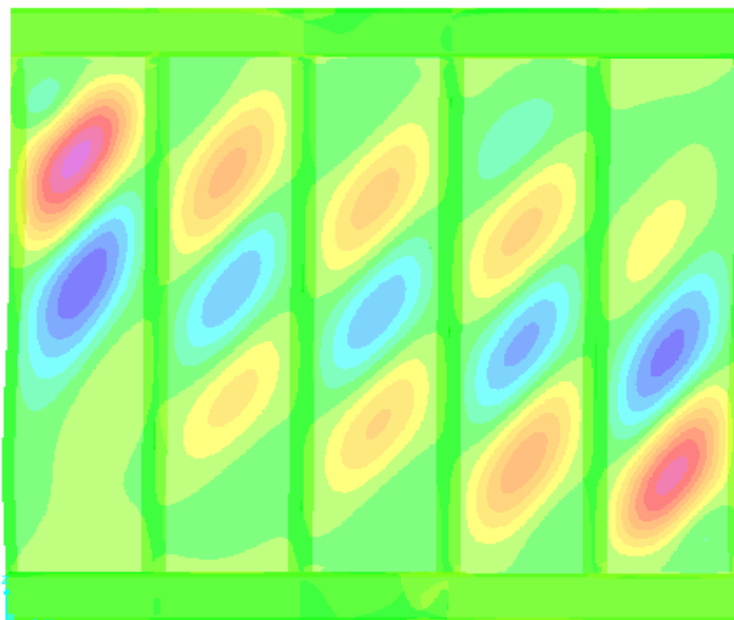


Figura 6.15 Visualização de flambagem local de placa, deslocamento fora do plano do painel ( $v_L$ ), para painel diafragma com cinco perfis U enrijecidos.

A Figura 6.15 ilustra a flambagem local de painel ( $v_L$ ), deslocamento fora do plano do painel, quando a carga horizontal é de 23.000 N. Na Figura 6.16 são mostradas as tensões de Von Mises no painel diafragma, para a mesma carga horizontal. Observa-se que as tensões são inferiores a  $40 \text{ N/mm}^2$ , indicando que a estrutura encontra-se em regime elástico.

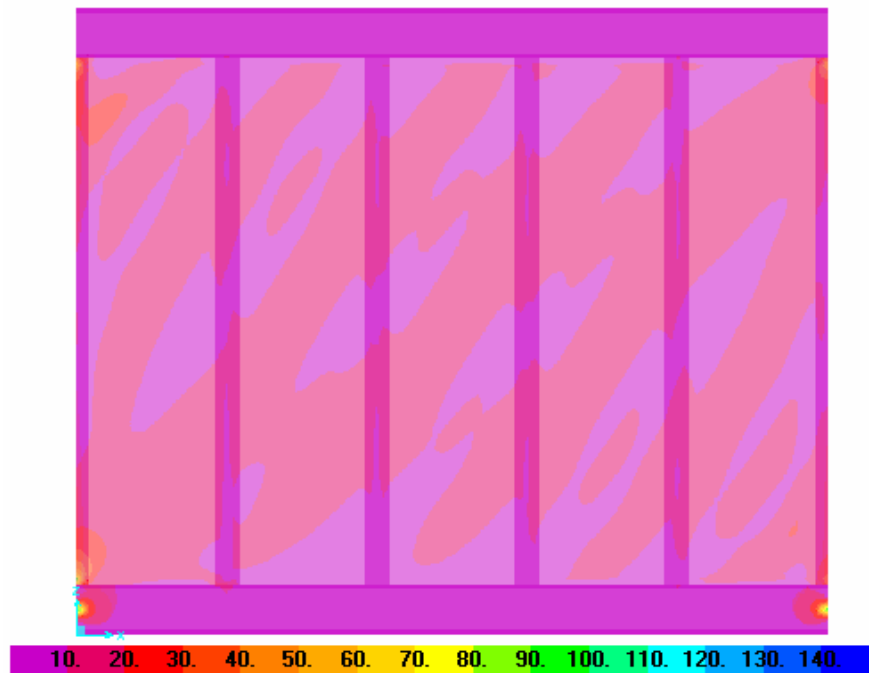


Figura 6.16 Tensão de Von Mises (MPa) para painel diafragma formado com cinco perfis U enrijecidos, para carga horizontal ( $F_h$ ) de 23.000 N.

No segundo tipo de painel, formado por 6 perfis U enrijecidos, o comportamento não-linear (carga x deslocamento) é ilustrado pela Figura 6.17, para uma imperfeição inicial de 1% da espessura, equivalente ao modo de flambagem do painel.

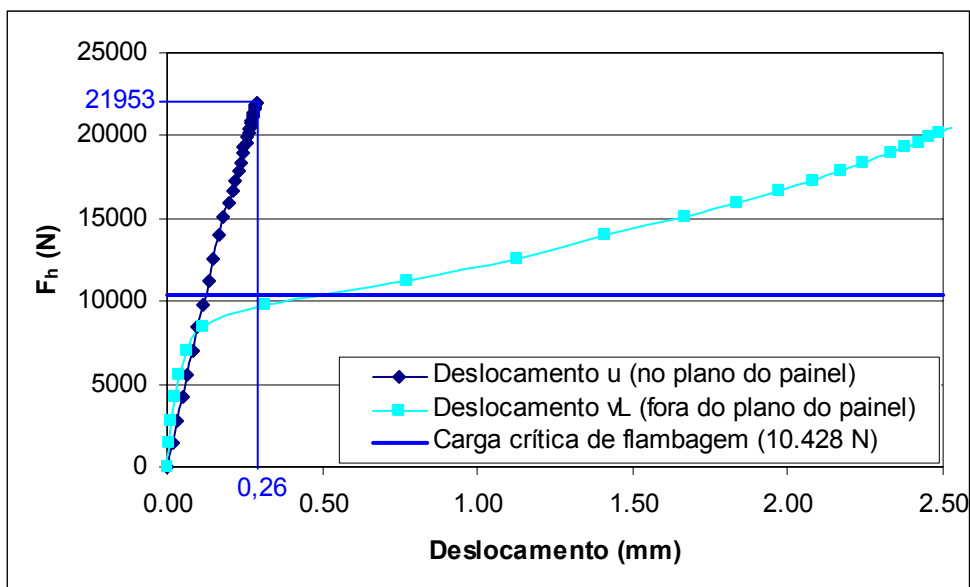


Figura 6.17 Resposta: carga x deslocamento de painel diafragma com 6 perfis, para deslocamento no plano e fora do painel.

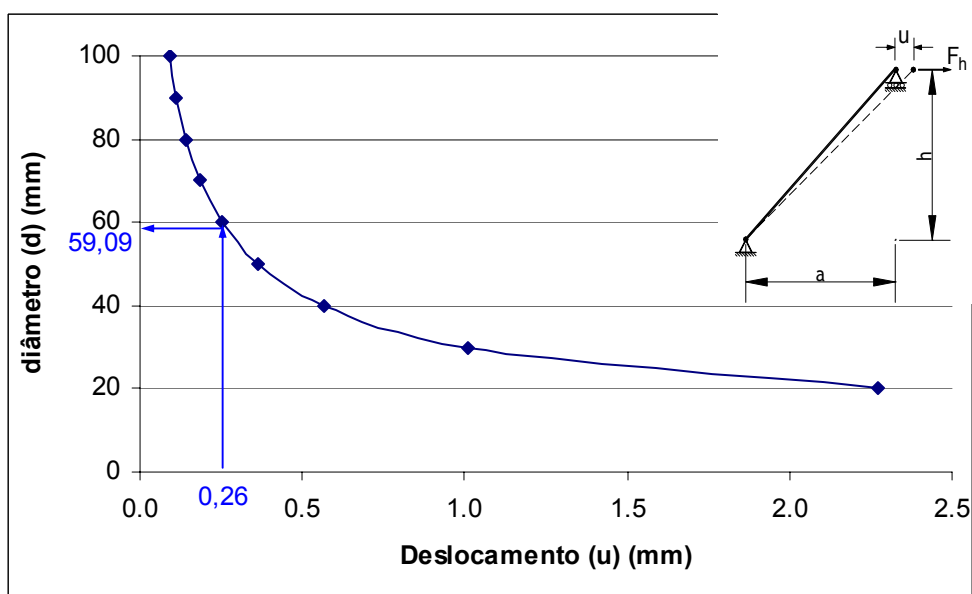


Figura 6.18 Identificação da diagonal equivalente para painel com 6 perfis, formada por barra de seção circular com diâmetro  $d$ .

Adotando o mesmo procedimento do caso anterior, para carga ( $F_h$ ) de 21953 N e deslocamento de 0,26 mm, obtém-se a resposta diâmetro vs. deslocamento ( $u$ ),

conforme a Figura 6.17. Desse modo, obtém-se uma diagonal equivalente com seção de 59,09 mm de diâmetro, como ilustrado na Figura 6.18.

## 6.4 Cargas e combinações de cargas

O edifício está submetido às seguintes cargas: permanentes, acidentais (sobrecargas) e cargas devidas ao vento. As duas primeiras cargas são verticais e a última é horizontal. Além dessas cargas, podem atuar ações excepcionais (incêndio, explosões, choques de veículos, efeitos sísmicos, etc.), que não serão levadas em consideração neste trabalho.

As cargas permanentes ( $F_{Gi}$ ) são constituídas pelo peso próprio da estrutura, dos materiais de acabamento e pelos painéis diafragma revestidos com gesso acartonado.

As sobrecargas ( $F_{Qi}$ ) são normalizadas pela norma NBR 6120 [37]. São divididas em dois grupos: as cargas verticais de utilização do edifício (CA) e cargas horizontais devido à pressão do vento (V).

A carga de vento é calculada de acordo com a NBR6123 [38]. Adota-se neste trabalho uma situação, com as seguintes condições.

- Velocidade básica do vento, 40 m/s.
- Fator topográfico S1
  - altura da construção = 15,0m;
  - desnível do terreno = 0,0 m;
  - inclinação do talude = 0,0 m;
  - $S1 = 1,0$
- Fator de rugosidade S2
  - categoria IV;
  - classe A

- Fator estatístico S3

- $S_3 = 1,0$

Com esses dados, obtém-se a velocidade característica ( $V_k$ ) e a pressão dinâmica (q).

$$\begin{aligned} V_k &= V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \\ q &= 0,613 \cdot V_k^2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

O cálculo do coeficiente de pressão e de forma ( $C_e$ ) não é simples no edifício em estudo, pois a norma brasileira que trata de vento, NBR 6123 [38], não prevê forças devidas ao vento para dois blocos de edifícios retangulares próximos um do outro.

Se considerarmos os blocos bem próximos, haverá forças de sucção atuando nas paredes entre os dois blocos, havendo o efeito de forças de vento localmente nas paredes, conforme ilustrado na Figura 6.19. Mas, globalmente, as forças se anulam e haverá pouca influência no deslocamento global do edifício.

Caso os dois blocos sejam afastados, pode ser considerado que em cada bloco atuem cargas de barlavento e sotavento, conforme ilustrada na Figura 6.20. Neste caso, a força de vento é maior em relação à situação anterior.

Para simplificar o cálculo do coeficiente de forma ( $C_e$ ) e majorar a segurança estrutural, no edifício em estudo, serão adotadas ações de vento nas partes frontal e fundo, barlavento e sotavento, em cada bloco do edifício, conforme opção da Figura 6.20 e descrito a seguir.

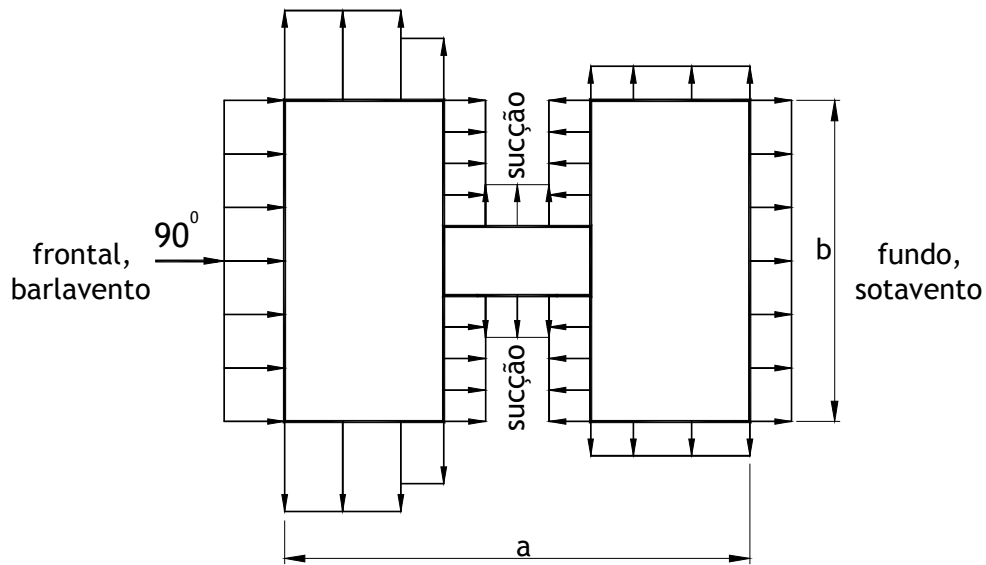


Figura 6.19 Coeficiente de pressão e de forma, externos, nas paredes entre dois blocos edifício, quando os blocos estiverem próximos.

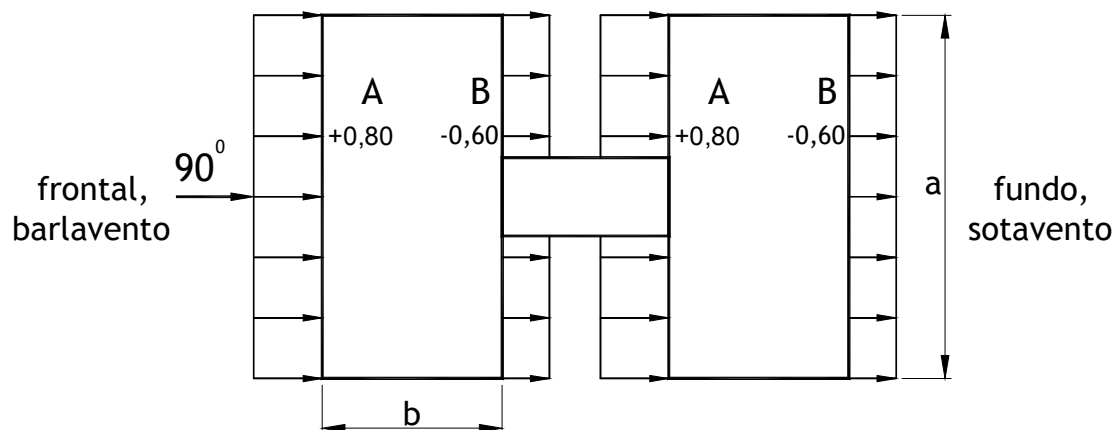


Figura 6.20 Coeficiente de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular, quando os blocos estiverem afastados.

Coeficientes de forma na parede frontal e de fundo (barlavento e sotavento), onde  $a$ ,  $b$  e  $h$  são, respectivamente, comprimento, largura e altura de um dos blocos de edifício.

$$a = 13,48\text{m}; b = 6,62\text{m}; h = 15,0\text{m}$$

$$2 < a/b < 4$$

Logo, os coeficientes de pressão e forma são representados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Valores dos coeficientes de forma  $C_e$  para um dos blocos de edifício.

$\alpha=0^\circ$				$\alpha=90^\circ$				$C_{pe}$
$A_1$ e $B_1$	$A_2$ e $B_2$	C	D	A	B	$C_1$ e $D_1$	$C_2$ e $D_2$	médio
-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

Os coeficientes de forma, na parte frontal e posterior, são: +0,80 e -0,60, respectivamente, frontal e fundo, conforme ilustrada na Figura 6.21.

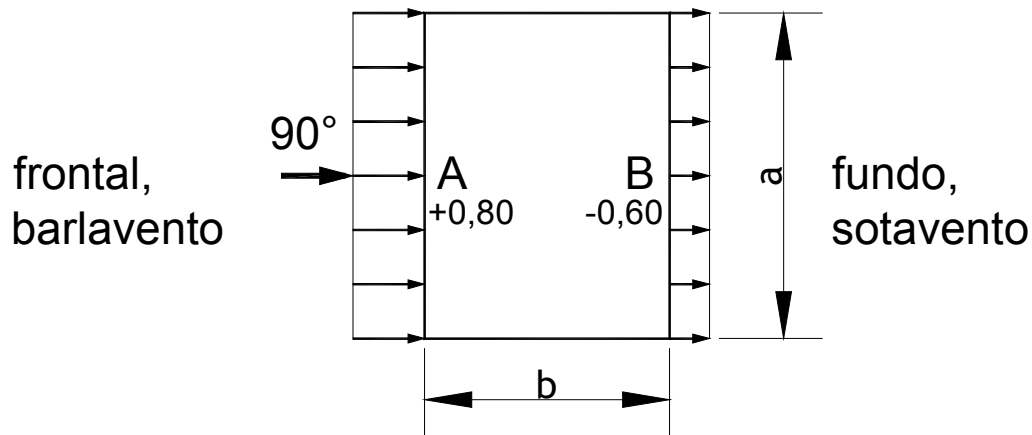


Figura 6.21 Coeficiente de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular [38].

Obtém-se, desse modo, as pressões estáticas de vento atuando nas faces de barlavento e de sotavento do edifício, conforme apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Pressões de vento na parte frontal (barlavento) e fundo (sotavento) do prédio.

Altura (m)	Pressão (N/m <sup>2</sup> )	Frontal (N/m <sup>2</sup> )	Fundo (N/m <sup>2</sup> )
12,5	2.530	2.024	1.518
10,0	2.413	1.930	1.448
7,5	2.295	1.836	1.377
5,0	2.119	1.695	1.272
2,5	1.943	1.555	1.166
0,0	972	777	583

As combinações das ações são calculadas de acordo com os coeficientes de combinação e ponderação de carga da Norma Brasileira NBR 8681 [39].

## 6.5 Estrutura contraventada por meio de diagonal equivalente

A estrutura contraventada por meio de diagonais equivalentes, no edifício com cinco pavimentos tipos, será analisada conforme ilustrado na Figura 6.22. Na modelagem estrutural do edifício, os pilares, as vigas e as diagonais equivalentes são considerados como elementos de barra. A laje é considerada por meio de elementos de casca, com 10,0 cm de espessura.

Neste exemplo, a ação considerada é apenas de vento, pois na determinação das diagonais equivalentes não são consideradas as cargas verticais (peso próprio e sobrecarga). Para isto, supõe-se que os painéis diafragmas são instalados após a

concretagem e cura das lajes, e que as ações das sobrecargas sejam inteiramente absorvidas pelas vigas, com pouca influência sobre os painéis.

Os painéis diafragma que são substituídos por diagonais equivalentes na presente análise estão ilustrados na Figura 6.23 (a), e o pórtico frontal sem contraventamento é ilustrado na Figura 6.23 (b). Os painéis diafragma são adotados nos dois pórticos de extremidade (empenas do edifício) e, também, nas paredes que separam os dois apartamentos, paredes essas que não possuem aberturas de janelas e de portas.

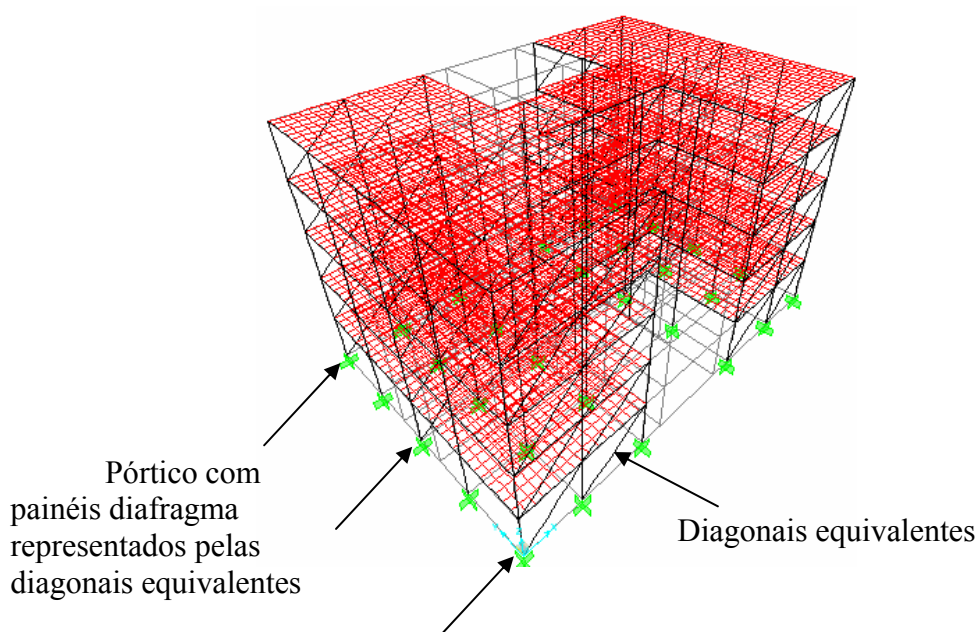


Figura 6.22 Perspectiva isométrica da estrutura do edifício.

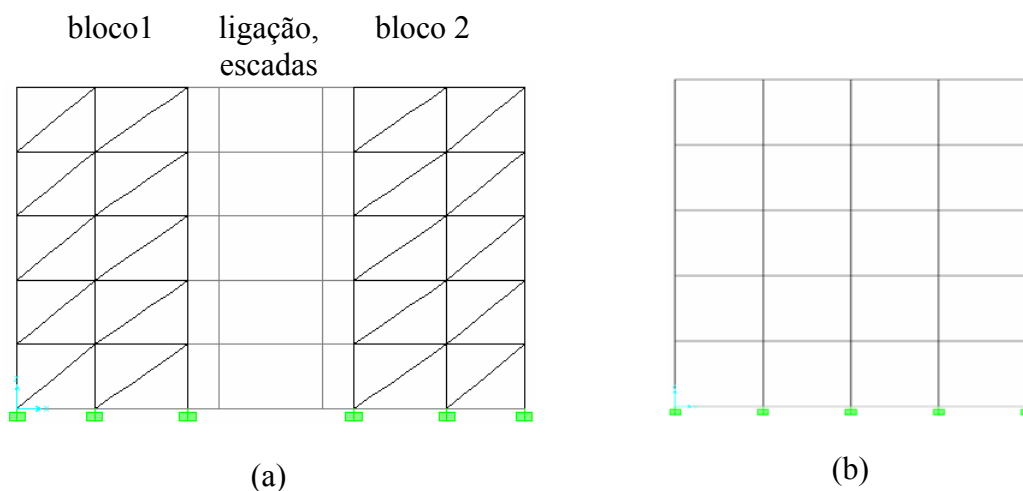


Figura 6.23 Fachadas: (a) lateral com diagonais equivalentes; (b) frontal e de fundo.

Como resultado da análise estrutural, obtêm-se os seguintes valores:

- Deslocamento máximo no topo do edifício na direção do vento:

$$\Delta_{\max} = 3,28 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\max} < h/400=31,25 \text{ mm (de acordo com a NBR 8800 [40])}$$

- Deslocamento entre os pisos na direção do vento:

$$\Delta_{\max} = 0,72 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\max} < L/500=5 \text{ mm (de acordo com a NBR 8800)}$$

Logo, tanto o deslocamento lateral máximo no topo do edifício quanto os deslocamentos entre os pisos estão de acordo com os limites fixados pela NBR 8800.

## 6.6 Estrutura contraventada por meio de barras

O edifício original é contraventado conforme ilustrado na Figura 6.24, no modelo da CDHU. Para as combinações de cargas, segundo a norma NBR 8800, obtêm-se os seguintes valores de deslocamentos:

- Deslocamento máximo no topo do edifício;

$$\Delta_{\max} = 13,88 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\max} < h/400=31,25 \text{ mm}$$

- Deslocamento entre os pisos;

$$\Delta_{\max} = 3,42 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\max} < L/500=5 \text{ mm}$$

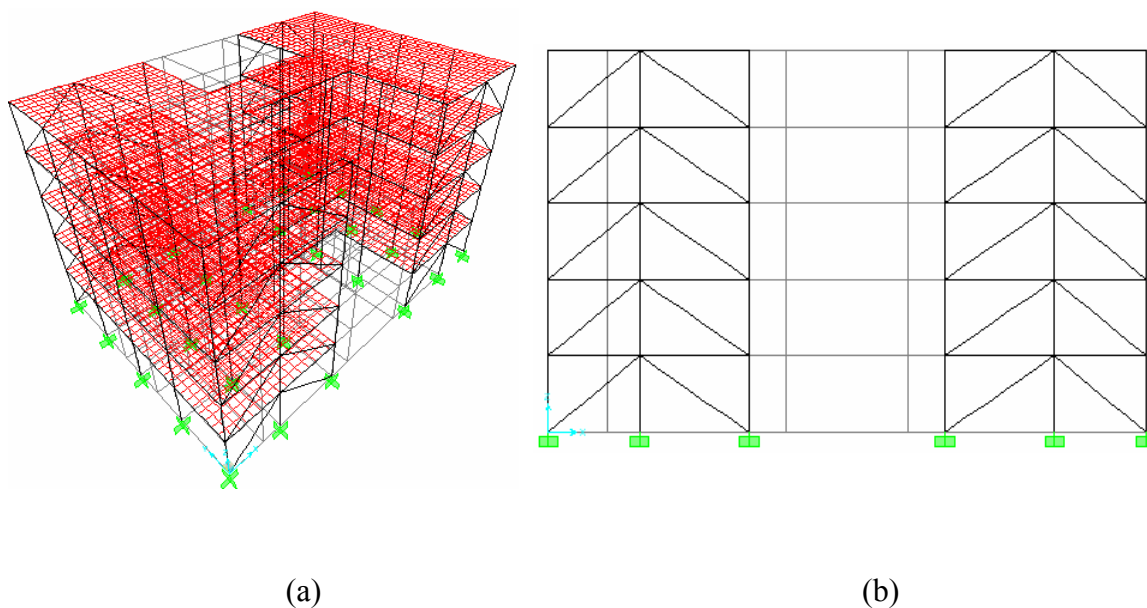


Figura 6.24 Contraventamento de edifício por meio de barra: (a) perspectiva isométrica; (b) vista lateral.

## 6.7 Comparação entre as soluções com contraventamento por barras e por painéis diafragma

Apresenta-se na Tabela 6.3 os deslocamentos calculados nos edifícios com painéis diafragma (obtidos do modelo de barras equivalentes) e com contraventamento por perfis diagonais (solução original) e os limites estabelecidos pela norma NBR 8800. Em, ambos os casos os deslocamentos estão de acordo com os limites estabelecidos pela norma.

O modelo de edifício com painéis diafragma apresenta maior rigidez lateral do que o modelo original contraventado por barras. Deve-se notar que o modelo estudado apresenta um número maior de pórticos contraventados pelos painéis do que o edifício original. Deve-se notar ainda que, no edifício com fechamento com os painéis, as demais divisórias internas, se executadas no mesmo sistema de painéis em chapa fina, conduzirão a um aumento da rigidez do edifício e maior eficiência do sistema de contraventamento, fato esse que poderá ser considerado para a possível redução da espessura da chapas utilizadas na fabricação dos painéis.

Tabela 6.3 Deslocamentos horizontais calculados com contraventamento por painéis diafragma e por perfis diagonais e limites estabelecidos pela NBR 8800.

Tipo de deslocamento	Solução com painel diafragma (mm)	Solução com Contraventamento por perfis diagonais (mm)	NBR 8800 Limite (mm)
Entre pisos	0,72	3,42	5,00
Topo do edifício	3,28	13,88	31,25

Na análise computacional dos painéis, não foram consideradas o uso de parafusos nas ligações entre os painéis adjacentes e entre os painéis e as vigas. As ligações foram consideradas contínuas e perfeitamente engastadas, conforme discutido nos capítulos IV e V. Os flanges em contato entre dois painéis foram considerados como peças únicas, com o dobro da espessura da chapa.

Em uma construção real com painel diafragma, as ligações entre as estruturas são executadas por meio de conectores. Este tipo de ligação envolve problemas de contato entre os elementos estruturais e há necessidade de dimensionar o diâmetro e o espaçamento entre os parafusos que ligam os painéis, assim como as ligações entre os painéis e as vigas. Deve-se levar em consideração, ainda, a resistência ao cisalhamento das chapas metálicas.

# Capítulo VII

## Conclusões e sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras

---

### 7.1 Conclusões

O objetivo central da pesquisa é a análise de sistemas construtivos de edifícios de andares múltiplos, com estruturas de aço e painéis diafragma formados por perfis de chapa dobrada a frio. Obteve-se resultados de análise linear de estabilidade e do comportamento pós-flambagem pelo MEF, para perfis e painéis de paredes finas submetidos a combinação de carga de compressão e carga horizontal no plano dos painéis.

Os resultados obtidos indicam que a solução adotada de painéis de chapa fina de aço com função de fechamento no sistema construtivo e, simultaneamente, como elemento estruturais do tipo diafragma, é eficiente e pode conduzir à substituição da barras de contraventamento da estrutura.

Adicionalmente, verificou-se por meio das análises que a estrutura de edifício adotada como exemplo resultou mais rígida, com os painéis de chapa fina, do que na sua configuração original, com barras diagonais de contraventamento.

A adoção de painéis diafragma em construções de edifícios de andares múltiplos pode proporcionar uma série de vantagens, como por exemplo: rapidez na execução, evitar desperdício de materiais, redução no peso das fundações e uma obra limpa.

O estudo prévio de painéis isolados, em perfil U enrijecido com seção de 600x100x50 e espessura de 1,0 mm, proporcionou aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento, a estabilidade e os modos de colapso dos painéis de paredes finas. Nestes estudos foram levados em consideração: os modos de flambagem e o comportamento pós-flambagem; a sensibilidade das imperfeições nos modos de flambagem; as respostas carga-deformação para diferentes combinações de cargas.

Apesar dos resultados favoráveis obtidos, é necessário que se destaque a grande sensibilidade das estruturas formadas por painéis associados, quanto às condições de contorno associadas, quanto às ligações. Os resultados obtidos consideram ligações contínuas e engastadas no contorno dos painéis, seja na ligação painel-painel, seja na ligação painel-viga. Para se investigar a real influência de ligações discretas, através de conectores (parafusos ou rebites), é necessária se estender o presente estudo, seja por meio de análise computacional pelo MEF, seja por meio de investigação experimental. Nesse caso, a nosso ver, merece destaque a necessidade de experimentos, de modo a assegurar a correta interpretação do comportamento do sistema estrutural proposto.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Há um campo vasto a ser pesquisado com os painéis diafragma submetidos a diferentes combinações de cargas, tanto numericamente como por meio de ensaios de experimentos em laboratório, listamos a seguir algumas sugestões para a continuidade das pesquisas.

- Ensaios experimentais dos painéis diafragma submetidos a combinações de cargas axial e horizontal, para permitir a aferição dos resultados numéricos.

- Estudo da influência da temperatura de incêndio nos painéis metálicos, de modo a assegurar a segurança estrutural requerida em condições de incêndio.
- Estudo da geometria da seção transversal do painel que conduza a maior rigidez, proporcionando economia de material e segurança da construção.
- Estudo dos tipos de ligações no contorno dos painéis diafragma.
- Análise da viabilidade de construções em painéis diafragma para edifícios com mais de 5 pavimentos.

## Referências Bibliográficas

- [1] DAVIES, J. M., “Recent Research Advances in Cold-Formed Steel Structures”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 55, pp. 267-288, 2000.
- [2] HANCOCK, G. J., “Light Gauge Construction”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 1, pp. 25-30, 1997.
- [3] GIONCU, V., “General Theory of Coupled Instabilities”, *Thin-Walled Structures*, v. 19, pp. 81-127, 1994.
- [4] BATISTA, E.M., INOUE, H.; NAGAHAMA, K., RIBEIRO, F. L. B., CAMOTIM, D., “Stability Analysis of Cold-Formed Members: Finite Element and Finite Strip Method Result”, In: *Stability and Ductility of Steel Structures*, Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 156-162, 2002.
- [5] NAGAHAMA, K., CAMOTIM, D., BATISTA, E. M., INOUE, H., “Flambagem, Pós-Flambagem e Interação Local de Perfis de Aço Formados a Frio: Utilização do MEF”, In: *II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM*, São Paulo, SP, 2002, (artigo completo em CD-Rom).
- [6] BATISTA, E. M., “Stability and Strength of Thin-Walled Cold-Formed Members”, In: *Recent Advances and New Trends in Structural Design, International Colloquium Dedicated to the 71th Anniversary of Professor Victor Gioncu*, Timisoara, Romania, 2004.
- [7] NAGAHAMA, K., PEREZ, S. V. S, BATISTA, E. M., “Análise Pós-Flambagem Distorcional de Perfis de Aço Dobrados a Frio”, In: *Métodos Computacionais em Engenharia*, Lisboa, Portugal, 2004, (artigo completo em CD-Rom)
- [8] PÉREZ, S. V. S., *Análise Experimental da Instabilidade Distorcional em Perfis de Paredes Finas e Seção Aberta, Sob Forças de Compressão Excêntrica*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [9] DAVIES, J. M., FRAGOS, A. S., “The Local Shear Buckling of Thin-walled Cassettes Infilled by Rigid Insulation”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 60, pp. 581-599, 2004.
- [10] DAVIES, J. M., FRAGOS, A. S., “Shear Strength of Empty and Infilled Cassettes”, *Thin-Walled Structures*, v. 41, pp. 109-125, 2003.
- [11] MATTEIS, G., MAZZOLANI, F. M., PANICO, S., “Numerical Analysis of Pure Aluminium Stiffened Shear Panels for Design Optimisation”, In: *Fourth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures – CIMS '04*, Rome, Italy, pp. 529-543, 2004.

- [12] MATTEIS, G.; LANDOLFO, R.; MAZZOLANI, F.M., “Seismic response of MR steel with low-yield steel shear panels”, *Engineering Structures*, v. 25, pp. 155-168, 2003.
- [13] DAVIES, J. M., “A General Solution for the Shear Flexibility of Profiled Sheets” *Thin-Walled Structures*, v. 4, pp. 151-161, 1986.
- [14] ESDEP, *Lecture 9.5 Stressed Skin Design*, Thin-Walled Construction, WG 9. European Steel Design Education Programme, The Construction Institute, 1994.
- [15] European Committee for Standardisation (CEN), “*Design of Steel Structures, Cold-Formed Thin Gauge Members and Sheet piling*”, Eurocode 3 Part 1.3, Draft, CEN/TC250/SC3-PT1A, 1992.
- [16] FENG, M., WANG, Y. C., DAVIES, J. M. “Thermal Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel Panel Systems in Fire” *Fire Safety Journal*, v. 38, pp. 365-394, 2003.
- [17] METALICA OSB Painéis de madeira para fechamento de paredes. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br>>. Acesso em 20 nov. 2002.
- [18] METALICA Casas Industrializadas. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br>>. Acesso em: 20 nov. 2002.
- [19] RIBEIRO, F. L. B., LANDAU, L., “Formulação Não-Linear Geométrica para Análise de Cascas Usando Elementos Finitos Tridimensionais Degenerados”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. v.7, pp. 301-320, 1991.
- [20] BATHE, K. J., WILSON, E. L., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. New Jersey, Prentice-Hall, 1976.
- [21] MOAVENI, S., *Finite Element Analysis - Theory and Application with ANSYS*. New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
- [22] NAGAHAMA, K. J., *Análise de Estabilidade Local em Perfis de Seção Aberta em Aço e em Resina Reforçada com Fibra de Vidro*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [23] TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M., *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1961.
- [24] MURRAY, N. W., *Introduction to the Theory of Thin-Walled Structures*, Clarendon Press Oxford, 1986.

- [25] VAZQUES, E. G., *Análise Teórica e Experimental da Instabilidade Torcional de Perfis Formados a Frio Sob Compressão Centrada*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [26] ABNT NBR-14762, “*Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*”, Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.
- [27] NAGAHAMA, K. J. e BATISTA, E. M., “Análise Computacional da Estabilidade de Perfis de Seção Aberta”, In: *I Congresso Internacional da Construção Metálica - I CICOM*, São Paulo, 2001 (artigo completo em CD Rom).
- [28] DUBINA, D., UNGUREANU, V., “*Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members*”, *Thin-Walled Structures*, v. 40, pp. 239-262, 2002.
- [29] GALAMBOS, T. V., *Guide Stability Design Criteria for Metal Structures*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1998.
- [30] BATISTA, E. M., *Édule de la Stabilité des Profils à Parois Minces et Section Ouverte de Types U et C*, Tese de D.Sc., Université de Liège, 1988.
- [31] American Institute of Steel Construction (AISC), “*Load and Resistant Factor Design. AISC/LRFD*”, Chicago, 1999.
- [32] SCHAFER, B. W.; *Distorcional Buckling of Cold-Formed Steel Columns*, AISI - American Iron and Steel Institute, 2000.
- [33] HARRIS, H. G., PIFKO, A. B., “*Elastic-Plastic Buckling of Stiffened Rectangular Plates*”, Proc. Symp. Appl. Finite Elem. Methods Div. Eng., Vanderbilt University, Nashville, Tenn., 1969.
- [34] PEREIRA, J. C. J., *Edifícios de Pequeno Porte Contraventados com Perfis de Chapa Fina de Aço*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [35] CDHU. Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano. Disponível em: <<http://www.cdhu.sp.gov.br>>. Acesso em: 20 ago. 2004.
- [36] YU, W. W., BAEHRE, R., TOMÀ, T., *Cold-Formed Steel in Tall Building*, Council on Tall Building and Urban, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1993.
- [37] ABNT NBR-6120, “*Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações*”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.

- [38] ABNT NBR-6123, “*Forças Devidas ao Vento em Edificações*” Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.
- [39] ABNT NBR-8681, “*Ações e Segurança nas Estruturas*”, Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- [40] ABNT NBR-8800, “*Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios – Métodos dos Estados Limites*”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986.

## Modo de Flambagem Global

O modo de flambagem de uma coluna de paredes finas e seção aberta, com uma carga axial aplicada fora do centro de cisalhamento, pode representar fenômeno de interação entre dois modos de flambagem: por flexão em relação ao eixo de simetria e por torção, sendo denominado de modo de flambagem por flexo-torção.

A seguir, é apresentado o cálculo das cargas críticas de perfis de paredes finas e seção aberta, conforme a Figura A.1, de acordo com a teoria de Estabilidade Elástica, TIMOSHENKO [23].

### a) Perfil assimétrico

A carga crítica  $N_e$  é a menor raiz da equação do terceiro grau.

$$G(N) = r_0^2(N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{et}) - N_e^2(N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2(N_e - N_{ex})y_0^2 = 0 \quad (\text{A.1})$$

### b) Perfil duplamente simétrico

O modo crítico será o menor valor entre as cargas de flambagem  $N_{ey}$ ,  $N_{ex}$  e  $N_{et}$ .

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{A.2})$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GI_t \right] \quad (\text{A.3})$$

onde:

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (\text{A.4})$$

$r_x$  ;  $r_y$  são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia  $x$  e  $y$ ,

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}, \quad r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} \quad (\text{A.5})$$

$x_0, y_0$  são as coordenadas do centro de cisalhamento segundo os eixos principais  $y$  e  $x$ , respectivamente, em relação ao centro de gravidade da seção.

### c) Perfil monossimétrico

Perfil com um eixo de simetria, sendo eixo principal  $x$  o eixo de simetria. A carga crítica será o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{ext}$ . Exemplos de perfis monossimétricos: *rack*, U simples, U enrijecido e cantoneira.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{A.6})$$

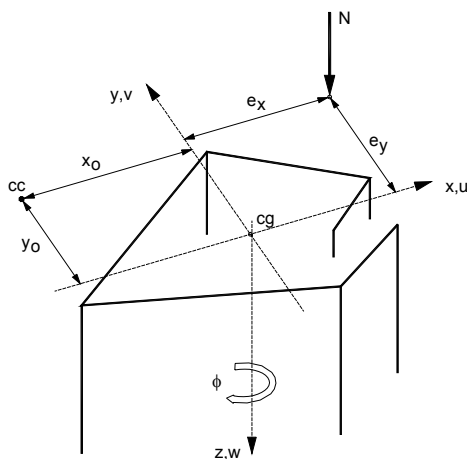
$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{et}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] \quad (\text{A.7})$$

O valor de  $K_t$  está relacionado às condições de extremidade da coluna, podendo assumir os seguintes valores:

Empenamento livre nas duas extremidades:  $K_t=1,0$

Empenamento impedido nas duas extremidades:  $K_t=0,5$

Uma extremidade livre e a outra impedida:  $K_t=0,7$



Legenda:

N: carga de compressão;

x,y: eixos principais da seção;

z: eixo axial;

u, v, w: graus de liberdade;

$\phi$ : grau de liberdade de torção;

$x_0, y_0$ : distância entre cc e cg;

$e_x, e_y$ : excentricidade da carga N;

c.c.: centro de cisalhamento.

Figura A.1 – Caso geral de flambagem de barra: carga excêntrica, seção aberta e assimétrica.