

# 1 Introdução

Projetar com segurança, economia, durabilidade e estética é um dos principais objetivos da engenharia estrutural. Sendo assim, a esbeltez de uma estrutura ilustra bem esse compromisso.

O colapso de uma estrutura pode ocorrer essencialmente de dois modos: pela ruptura do material e pela instabilidade da estrutura (Reis & Camotim, 2001). O primeiro modo ocorre quando as estruturas atingem o limite de resistência do material, cujo estudo é objeto da Mecânica Estrutural e da Resistência dos Materiais. Já o segundo modo constitui domínio da Estabilidade Estrutural. Para muitas estruturas esbeltas, o colapso pode ocorrer por perda da estabilidade, sob níveis de tensão inferiores ao da resistência do material. Com o aumento da esbeltez, a não-linearidade geométrica e as imperfeições tornam-se cada vez mais importantes.

Placas esbeltas são elementos estruturais usados em diversos ramos da engenharia e possuem uma reserva de rigidez pós-crítica vantajosa para projeto quando submetidas a compressão axial, pois redistribuem de forma eficiente as forças compressivas em seu plano mesmo após a flambagem. Isto faz com que possam ser usualmente projetadas para trabalhar no regime pós-crítico.

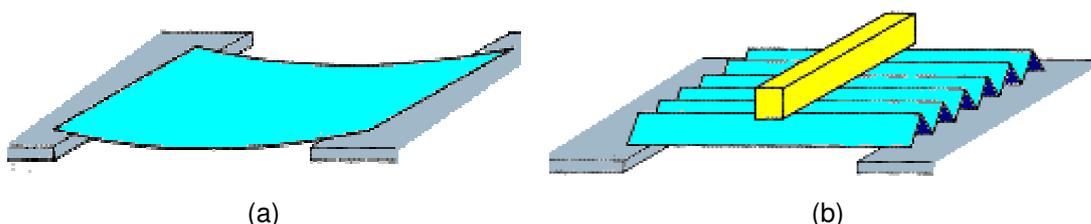


Figura 1.1 – Placa esbelta: (a) Plana sob flexão; (b) Dobrada / Enrijecida.

<http://www.ul.ie/~gaughran/Gildea/page10.htm>

Ao se estudar placas esbeltas, observa-se que, quando usadas em grandes vãos, não possuem a resistência necessária para suportar seu próprio peso, apresentando então uma configuração deformada com grandes deflexões; porém enrijecendo-as, passam a serem capazes de suportar cargas além de seu próprio peso. Uma das formas de se conseguir um significativo aumento de

rigidez é usar uma ou mais dobras, como ilustra a Figura 1.1. Estas placas são conhecidas na literatura como placas dobradas ou *folded plates*.

Se a carga for aumentada além de sua capacidade, as dobras aplainarão e a estrutura abrirá, podendo inclusive apresentar instabilidade por ponto limite, como se mostrará neste trabalho. Para corrigir este problema, podem ser utilizados enrijecedores transversais às extremidades, como mostra a Figura 1.2. Assim as placas dobradas agem como uma viga e podem suportar cargas mais elevadas.

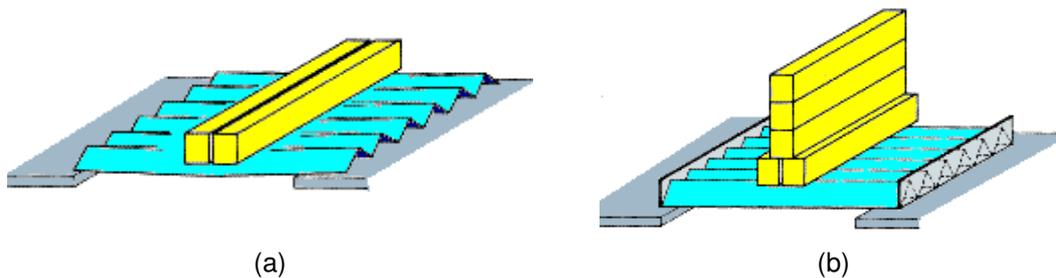


Figura 1.2 – Placa esbelta com: (a) Cargas além de sua capacidade;  
(b) Enrijecedores transversais às extremidades.

<http://www.ul.ie/~gaughran/Gildea/page10.htm>

No caso de uma placa esbelta sujeita a compressão em seu próprio plano, nota-se que ela também não terá resistência suficiente para suportar cargas elevadas, flambando facilmente. Entretanto, se a dobrarmos, este fenômeno só ocorrerá para cargas bem mais elevadas, como ilustra a Figura 1.3.



Figura 1.3 – Placa esbelta: (a) Plana / Flambada; (b) Dobrada / Enrijecida.

<http://www.ul.ie/~gaughran/Gildea/page10.htm>

Placas dobradas não podem ser tão finas como as cascas, por estarem sujeitas às ações de momentos fletores e torsores quando carregadas fora de seu plano, como mostra a Figura 1.4. Entretanto, mesmo nestes casos, são capazes de vencer grandes vãos com um valor competitivo de peso por unidade de área.

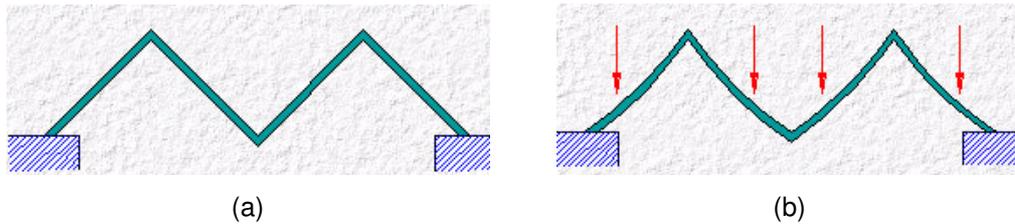


Figura 1.4 – Placa dobrada: (a) Sem Momento Fletor; (b) Sujeita ao Momento Fletor.

<http://www.ul.ie/~gaughran/Gildea/page10.htm>



Figura 1.5 - Exemplos de aplicação de *folded plates* como paredes portantes.

<http://www.cardboardschool.co.uk/content/index1.htm>



Figura 1.6 - Exemplos de aplicação de *folded plates* como cobertura de grandes vãos.

<http://www.ketchum.org/shellpix.html>

Placas dobradas, tanto de aço quanto de concreto, são compostas por duas ou mais placas esbeltas como chapas dobradas, vigas-caixão e *folded-plates*. Neste último caso podemos citar sua aplicação como paredes portantes (Figura 1.5) e coberturas de grandes vãos (Figura 1.6). No caso de coberturas de grandes vãos (ginásios, hangares, auditórios...), placas dobradas têm uma aplicação semelhante a de cascas esbeltas, porém distinguem-se pela maior facilidade em termos construtivos e por serem mais adaptáveis às áreas menores. O uso criterioso de placas esbeltas tem dado origem a estruturas de grande beleza plástica e leveza.

O estudo de placas esbeltas tem se destacado na engenharia estrutural por suas inúmeras aplicações na engenharia civil, marítima, espacial e automobilística, entre outras. Entretanto estas estruturas podem perder a estabilidade sob diversos tipos de carregamento. Assim sendo, o estudo da perda de estabilidade de tais elementos estruturais passou a interessar muitos pesquisadores, sendo um tópico clássico dos livros sobre instabilidade de estruturas como Timoshenko & Gere (1961), Brush & Almroth (1975), Allen & Bulson (1980), Bazant & Cedolin (1991) e Reis & Camotim (2001), dentre outros. Aspectos práticos relativos ao projeto destas estruturas quanto à estabilidade podem ser encontrados em Galambos (1988). Um estudo mais aprofundado sobre a teoria não-linear de placas e em particular de seu comportamento pós-crítico pode ser encontrado em Chia (1980), que aborda em sua publicação o comportamento não-linear de placas sob diferentes tipos de carregamentos, condições de contorno, geometrias e materiais.

Quanto ao estudo da estabilidade de placas dobradas, são poucas as contribuições encontradas. Entre elas podem ser citados os trabalhos de Lakshmy & Bhavikatti (1994), que estudaram uma otimização de projeto de coberturas de placas dobradas; Samanta & Mukhopadhyay (1998), que desenvolveram elementos finitos específicos para a análise estática e dinâmica de placas dobradas; Tan (2000), que analisou o colapso de vigas esbeltas causado por cargas distribuídas e peso próprio; Gotsulyak, Trotoev & Prusov (2000), que estudaram a influência da rigidez da dobra e das imperfeições na estabilidade de placas dobradas; Lai, Wu, Zhu & Sun (2000), que fizeram uma análise não-linear geométrica de um telhado de seção “V” com placa dobrada simplesmente apoiada; Lai & Yu (2001), que estudaram a solução analítica para vibração forçada de um telhado de seção “V” com placa dobrada simplesmente apoiada; Lee, Wooh & Yhim (2003), que investigaram o comportamento dinâmico de placas dobradas pela teoria de placas de terceira ordem; Özakça & Kolcu (2003), que desenvolveram um algoritmo de baixo custo computacional, usando o método de faixas finitas, para otimizar a forma e espessura da seção transversal de placas dobradas com respeito a sua carga de flambagem e Bergamini & Biondini (2004), que desenvolveram uma metodologia para a otimização de projeto de estruturas protendidas de placas dobradas sob múltiplas condições de carregamento, como vigas-caixão, estruturas pra telhado e vigas esbeltas através do método das faixas finitas.

Uma classe particular de placas dobradas com grande aplicação em engenharia são os perfis de chapa dobrada. Estes perfis podem apresentar diversos tipos de instabilidade e, em virtude de seu comportamento não-linear que gera o acoplamento de diversos modos de flambagem, tem sido objeto de um grande número de pesquisas nas últimas décadas. Exemplos recentes são os trabalhos de Vasquez (2002), que apresentou uma análise teórica e experimental da instabilidade torcional de perfis formados a frio sob compressão centrada, Nagahama (2003), que analisou a estabilidade local em perfis de seção aberta em aço e em resina reforçada com fibra de vidro, Pérez (2003), que analisou experimentalmente a instabilidade distorcional em perfis de paredes finas e seção aberta sob forças de compressão excêntrica, e Inoue (2004), que estudou sistemas diafragma com painéis de chapa fina, aplicados a edificações estruturadas em aço. Entretanto, as geometrias da seção transversal e dimensões destes perfis são bem diferentes daqueles usados para paredes portantes e coberturas de grandes vãos.

### **1.1. Objetivo**

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento crítico e pós-crítico de placas dobradas, compostas de duas placas esbeltas formando um determinado ângulo entre si (chapas em “V”) e sujeitas a compressão axial. Pretende-se desenvolver um estudo paramétrico detalhado para determinar a influência dos diversos parâmetros geométricos e condições de contorno nas cargas críticas e respectivos modos críticos e no caminho pós-crítico. Na análise não-linear é dada particular atenção à influência dos diversos parâmetros na rigidez pós-crítica, sensibilidade a imperfeições e evolução do estado de tensões. Objetiva-se também estudar o comportamento não-linear destas placas sob flexão, investigando os fenômenos de perda de estabilidade por ponto limite. A análise será realizada através do programa de elementos finitos ABAQUS - versão 6.3 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001).

Cabe ressaltar que toda a análise é restrita ao regime elástico.

## 1.2. Organização do Texto

Este trabalho está organizado em oito capítulos, um conjunto de referências bibliográficas e três apêndices.

O trabalho inicia-se com este Capítulo 1, de caráter introdutório, onde abordam-se a necessidade e importância de estudos que contribuam para a compreensão do fenômeno da instabilidade de placas dobradas.

No Capítulo 2 é apresentado um resumo da teoria não-linear de placas.

O Capítulo 3 apresenta o programa de elementos finitos, ABAQUS, usado neste trabalho, o elemento finito adotado e a modelagem dos problemas estudados.

O Capítulo 4 apresenta uma revisão da instabilidade de placas retangulares sob compressão, estudando as equações de equilíbrio crítico, sua solução analítica, comportamento pós-crítico e evolução do estado de tensões.

No Capítulo 5 apresenta-se o estudo paramétrico da carga crítica e modo crítico para placas dobradas sob compressão, variando-se o ângulo de dobra ( $\theta$ ), as condições de contorno, a relação  $a/b$  ( $\alpha$ ) e, para  $\theta=90^\circ$  variou-se a dimensão  $b$  de uma das placas, chamado-a de  $H$ . Estas variáveis são apresentadas na Figura 1.7.

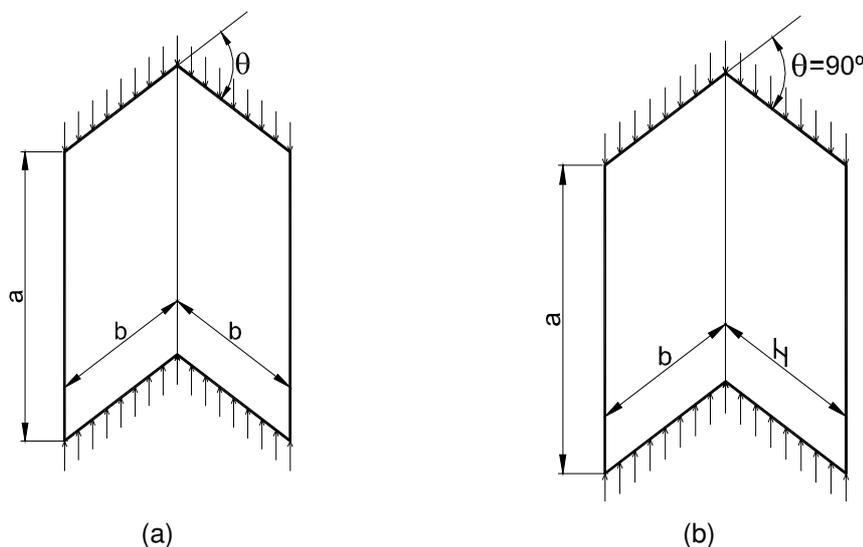


Figura 1.7 - Placa dobrada sob compressão axial e:

(a)  $\theta$  variável;      (b)  $\theta = 90^\circ$  e  $H$  variável.

Em seguida, no Capítulo 6, faz-se o estudo paramétrico do comportamento pós-crítico de placas dobradas sob compressão, analisando o efeito das imperfeições geométricas e de carregamento e a evolução do estado de tensões.

No Capítulo 7 estuda-se a instabilidade de placas dobradas sob flexão, abordando seu comportamento não-linear e a evolução do estado de tensões.

No Capítulo 8, são apresentadas as principais conclusões, baseadas nos resultados obtidos, e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, os três apêndices exemplificam os arquivos de entrada dos modelos estudados. Os Apêndices A e B apresentam os arquivos de entrada de uma placa dobrada simplesmente apoiada, sob compressão axial com  $\alpha=1.0$   $\theta=15^\circ$  e que permitem, respectivamente, a obtenção dos modos de flambagem e seus fatores de carga ( $\lambda$ ) e a determinação do caminho crítico e pós-crítico de equilíbrio através do uso de uma pequena imperfeição na forma do modo crítico. No Apêndice C encontra-se o arquivo de entrada de uma placa dobrada sob flexão, com  $\alpha=3.0$   $\theta=15^\circ$  para o estudo do comportamento não-linear, através do método de RIKS.