

## 8

# Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 8.1.

#### Conclusões

Este trabalho teve por objetivo o estudo do comportamento crítico e pós-crítico de placas dobradas sob compressão axial através de um estudo paramétrico, determinando a influência dos diversos parâmetros geométricos e condições de contorno nas cargas e modos críticos e no caminho pós-crítico. Estudou-se também o comportamento não-linear de placas dobradas sob flexão, investigando os fenômenos de perda de estabilidade por ponto limite. Todas as análises foram feitas através do programa ABAQUS, no regime elástico.

O uso de um elemento finito não-linear de casca permitiu uma análise eficiente do comportamento pós-crítico e da evolução do estado de tensões ao longo da placa. Isto permitiu a identificação das regiões onde ocorrem as tensões máximas e das regiões responsáveis pela rigidez pós-crítica da placa dobrada. Cabe ressaltar que placas esbeltas são muitas vezes projetadas para trabalhar no regime pós-crítico, sendo estas informações importantes para o projeto destas estruturas.

Todos os resultados relativos às cargas e modos de bifurcação obtidos pelo ABAQUS coincidiram com os valores teóricos apresentados na literatura para placas isoladas sob diferentes condições de contorno, confirmando a qualidade da modelagem computacional.

Para placas dobradas com todos os bordos apoiados, o modo de flambagem apresenta uma meia-onda na direção perpendicular ao carregamento em cada uma das abas e o número de semi-ondas na direção axial depende da relação entre os lados de cada aba. Tanto para placas isoladas como para placas dobradas, o número de semi-ondas axiais  $m$  depende apenas do valor do parâmetro  $\alpha$ , isto é, para  $\alpha = 1.0$  tem-se  $m = 1$ , para  $\alpha = 1.5$  e  $\alpha = 2.0$  tem-se  $m = 2$  e para  $\alpha = 2.5$  e  $\alpha = 3.0$  o valor de  $m$  é 3. Observa-se pois que a forma do modo crítico de placas dobradas não é muito afetada pela ligação entre as placas, sendo similar ao de uma placa isolada. Entretanto, tanto a forma quanto o valor da carga de bifurcação dos modos mais altos são bastante afetados pela

ligação. Nota-se em todos os casos que a placa dobrada apresenta cargas de bifurcação inferiores ao da placa isolada, crescendo esta diferença para os modos mais altos.

Para todos os valores de  $\alpha$ , a carga crítica da placa dobrada decresce a medida que o valor do ângulo  $\theta$  cresce, aumentando assim a diferença entre a carga crítica da placa dobrada e da placa isolada.

Para placas apoiadas apenas nos bordos carregados e livres nos outros bordos, nota-se que, para todos os ângulos de dobra ( $\theta$ ), o número de meias-ondas na direção perpendicular ao carregamento,  $n$ , é sempre igual a  $\frac{1}{2}$  e na direção do carregamento,  $m$ , é sempre igual a 1, independente do valor de  $\alpha$ . Verifica-se que, para todos os valores de  $\theta$  considerados, a carga crítica decresce sensivelmente a medida que  $\alpha$  cresce, seguindo um padrão semelhante de uma placa isolada com um bordo descarregado livre e os outros três simplesmente apoiados.

As cargas de bifurcação da placa dobrada são sempre inferiores às da placa isolada, com a mesma relação  $a/b$  em cada aba, e a diferença cresce com a ordem do modo de bifurcação.

Nos dois casos de condições de contorno analisados as diferenças entre as cargas e modos críticos são pequenas o suficiente para se poder considerar no dimensionamento das placas cada aba como uma placa isolada. Entretanto se, em virtude da presença de enrijecedores ou contraventamentos, a placa dobrada vier a exibir cargas críticas associadas aos modos mais altos, a diferença entre as duas configurações passa a ser importante no cálculo estrutural.

Nas placas dobradas onde uma das abas tem a largura variável, a carga crítica decresce com o valor de  $H/b$ , atingindo o menor valor quando ambas as placas têm a mesma dimensão. É interessante notar que, para todos os valores de  $\alpha$  estudados, para valores pequenos de  $H/b$  a carga crítica da placa dobrada é bem superior ao da placa isolada. Por exemplo, para  $H/b = 0.25$  este ganho pode chegar a 25%.

Todos os caminhos de equilíbrio estudados exibiram uma bifurcação simétrica estável.

Em placas isoladas com todos os bordos apoiados, para tensões de compressão maiores que a tensão crítica, as tensões perto dos bordos descarregados apoiados são menores que no centro, pois sofrem a influência dos apoios. Com base nas distribuições de tensões, podem-se derivar critérios

práticos e recomendações de normas que permitam o dimensionamento seguro da estrutura. No caso de placas isoladas e placas dobradas com todos os bordos apoiados, a distribuição de tensões é praticamente uniforme até se atingir a carga crítica. Ao se ultrapassar a carga crítica, as tensões passam a apresentar uma grande variação ao longo da largura da placa, podendo inclusive ocorrer tensões de tração no centro da placa, região onde o momento de segunda ordem tem maior influência. Nesta região também ocorrem as maiores tensões de compressão. A tensão máxima ocorre no centro da face negativa, onde se inicia o processo de plastificação. Verifica-se também que as duas faixas junto aos bordos verticais são as responsáveis pela maior parte da rigidez pós-crítica da placa o que está de acordo com a idéia de largura efetiva usada no cálculo de placas isoladas.

Em placas carregadas apenas nos bordos apoiados e com os demais bordos livres, as tensões máximas ocorrem nos bordos livres, sendo a região da junção a maior responsável pela rigidez pós-crítica da placa. As maiores tensões ocorrem na aba maior, sendo a menor responsável por grande parte da rigidez pós-crítica. Observa-se que as maiores tensões ocorrem, como esperado, no bordo livre da placa maior.

Por fim mostra-se que a dobra tem uma influência marcante no comportamento da estrutura. Ao se comparar a mesma placa sem dobra ( $\alpha = 1.0$ ) e com uma pequena dobra de  $15^\circ$  ( $\alpha = 2.0$ ), observou-se um acréscimo significativo na carga crítica e rigidez pós-crítica e uma grande mudança na distribuição de tensões, o que comprova a importância das dobras no comportamento das placas dobradas.

No estudo de placas dobradas sob flexão, verifica-se que o comportamento é eminentemente não-linear. À medida que a carga cresce há uma gradativa diminuição da rigidez efetiva até se atingir um ponto limite quando a estrutura perde a estabilidade. Teoricamente, ao atingir o ponto limite, a estrutura salta para uma configuração pós-crítica envolvendo grandes deslocamentos e inversão da concavidade. Este fenômeno é conhecido na literatura como *snap-through*. Na prática, durante o salto, estruturas usuais de aço e concreto sofrem danos permanentes que podem inclusive levar ao colapso da estrutura.

Pelos caminhos de equilíbrio observa-se um comportamento não-linear típico de arcos e cascas abatidas, com um caminho de equilíbrio em forma de “S” e dois pontos limites separando o trecho instável intermediário dos dois trechos estáveis.

Através dos caminhos de equilíbrio e dos valores apresentados da carga limite,  $P_{lim}$ , conclui-se que ela decresce acentuadamente à medida que  $\alpha$  cresce. Isto mostra que o grau de não-linearidade da resposta e a capacidade de carga da estrutura decrescem com o aumento do vão.

Pelo estudo da evolução do estado de tensões em placas dobradas sob flexão, observa-se que há uma concentração de tensões na região da dobra e que estas tensões crescem bastante logo após a perda de estabilidade por *snaph-through*.

## 8.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se o prosseguimento dos estudos nesta área de pesquisa, enfocando, dentre outros, os seguintes tópicos:

- Interação entre os modos de bifurcação de placas dobradas, especialmente para os casos onde a relação  $a/b$  não é um inteiro;
- Estudo de diferentes geometrias de placas dobradas compostas pela junção de duas ou mais placas;
- Aprofundamento do estudo do comportamento não-linear de placas dobradas sob flexão;
- Interação entre modos distintos de flambagem como por exemplo o modo distorcional e o modo de flexão.