

7 Conclusões e Sugestões

7.1. Conclusões

Esta tese investiga a influência do acoplamento modal no comportamento estático e particularmente no comportamento dinâmico não-linear de elementos estruturais suscetíveis ao comportamento pós-flambagem instável, verificando a sensibilidade de tais estruturas a influência da rigidez relativa das molas (considerada também como uma imperfeição) e a imperfeições geométricas iniciais. Para isto, são utilizados dois modelos discretos, a saber: o modelo de Augusti e um modelo de torre estaiada com dois graus de liberdade.

Dentre os aspectos analisados, concluem-se os seguintes pontos:

1) Comportamento estático.

Em função do acoplamento modal, gerado por cargas de flambagem iguais ou próximas, existe a possibilidade de perda de estabilidade para cargas inferiores à carga crítica de flambagem, desde que as perturbações excedam os limites da região em torno da configuração fundamental, cuja fronteira é limitada pelos pontos de sela associados às soluções pós-críticas instáveis. Esta região, que constitui a bacia de atração da solução fundamental de equilíbrio e delimita a magnitude das oscilações, decresce à medida que o carregamento estático cresce, tornando-se zero no ponto de bifurcação (carga crítica). Assim, à medida que cresce o carregamento, reduz-se substancialmente o conjunto de possíveis condições iniciais que levam a estrutura a retornar, após a perturbação, à configuração fundamental de equilíbrio cuja estabilidade e integridade se deseja preservar. Conclui-se, portanto, que a carga crítica é um limite superior da capacidade de carga da estrutura. Juntamente com o acoplamento modal, as imperfeições diminuem a carga crítica de flambagem, a região segura e a topologia da energia potencial do sistema, mudando conseqüentemente seu comportamento dinâmico não-linear e sua estabilidade global. Portanto, a

definição de um carregamento seguro para projeto deve ser baseada em medidas de integridade que levem em consideração o efeito das imperfeições.

2) Comportamento dinâmico em vibração livre.

O estudo das frequências naturais indica a possibilidade de ressonância interna e ao mesmo tempo mostra a sensibilidade das frequências a imperfeições. A análise da geometria da região segura que circunda a posição de equilíbrio pré-crítica e a análise das variedades invariantes dos pontos de sela que definem esta região, mostram que a introdução das imperfeições provoca uma quebra de simetria, reduzindo substancialmente as regiões seguras (bacias de atração conservativas) e alterando as conexões entre os pontos de sela. As simetrias inerentes à estrutura, juntamente com o acoplamento modal, dão origem a um número de modos não-lineares superior ao número de graus de liberdade. Particular atenção deve-se dar à identificação de todos os modos não-lineares, tanto estáveis quanto instáveis, e à relação frequência-amplitude associada a cada modo. Esta análise permite compreender como tais modos controlam, limitam e explicam a dinâmica dos modelos sob vibração forçada. Em especial, a determinação dos modos não-lineares permite reduzir o modelo a um oscilador não-linear desacoplado com um grau de liberdade, facilitando a análise. Portanto, a análise não-linear desta classe de estruturas deve obrigatoriamente incluir a determinação e características dos modos não-lineares e a identificação das variedades invariantes dos pontos de sela associados à região segura.

3) Comportamento dinâmico sob vibração forçada.

As fronteiras de estabilidade (escape), obtidas através de um estudo sistemático de bifurcações locais, explicitam as principais regiões de ressonância dos modelos, mostrando à forte sensibilidade as imperfeições através da acentuada diminuição na capacidade de carga da estrutura. As curvas de ressonância nas principais regiões de ressonância são governadas pelos modos não-lineares de vibração e o acoplamento entre os diversos modos explica a existência dos diversos valores críticos de escape. O estudo da integridade dinâmica das soluções estáveis através da evolução e estratificação das bacias de atração e das medidas de integridade mostra que o acoplamento modal e as imperfeições reduzem substancialmente a segurança dos modelos, seja pelo processo de erosão gerado pelo aumento do carregamento, seja pela interpenetração das bacias gerada por

bifurcações globais homoclínicas e heteroclínicas. Os modelos não-lineares reduzidos com um grau de liberdade, obtidos pela teoria dos modos não-lineares, não representam os modelos originais para todas as faixas de frequência. Observa-se em muitas regiões um forte acoplamento entre os modos não-lineares, gerando uma grande diferença de resultados entre o modelo acoplado e o desacoplado. Portanto, em sistemas com forte acoplamento modal, modelos reduzidos baseados na teoria dos modos não-lineares devem ser testados, através de perturbações transversais à variedade associada ao modo não-linear selecionado, com a finalidade de identificar possíveis acoplamentos entre os modos de vibração.

4) Controle da erosão das bacias de atração.

O controle das bifurcações globais homoclínicas e heteroclínicas, através da adição de uma excitação paramétrica à excitação harmônica dos modelos não-lineares reduzidos, retarda o processo de erosão e estratificação das bacias de atração, aumentando o fator de integridade da bacia e, conseqüentemente, a segurança da estrutura.

7.2. Sugestões

A compreensão dos efeitos do acoplamento modal para na estabilidade e na dinâmica não-linear de estruturas é fundamental para a avaliação do comportamento global e da segurança de estruturas esbeltas. Como continuação do presente trabalho, são sugeridos os seguintes tópicos de pesquisa:

- A determinação analítica dos modos não-lineares e das variedades invariantes bidimensionais associadas a estes modos;
- O estudo do acoplamento entre diferentes modos não-lineares e sua influência na segurança da estrutura;
- A análise dos modelos aqui estudados na presença de outros tipos de excitação, como, por exemplo, a adição de uma componente vertical à excitação de base;
- Análise dinâmica não-linear de estruturas com comportamento semelhante ao dos modelos aqui analisados, como, por exemplo, cascas de revolução, placas enrijecidas, torres estaiadas, e estruturas complacentes empregadas na indústria *off-shore*.