

## 6

# Conclusões e sugestões

### 6.1. Conclusões

Neste trabalho, a análise do comportamento dinâmico não-linear de vigas e pórticos planos esbeltos, parte da obtenção das equações diferenciais de movimento a partir de um funcional não-linear de energia. Um modelo consistente de baixa dimensão é obtido pelo uso dos métodos de Ritz ou Galerkin para a redução espacial e do método do balanço harmônico para redução no domínio do tempo dos problemas.

O método dos elementos finitos é usado para a obtenção dos modos lineares de vibração livre das estruturas aqui estudadas, por meio de funções polinomiais. Esses polinômios são utilizados como uma primeira aproximação para os modos não-lineares de vibração. O uso destas aproximações prediz um comportamento satisfatório das vibrações não-lineares livres, das vibrações forçadas amortecidas e não amortecidas para os exemplos aqui considerados. Esta constatação torna possível o uso de programas computacionais tradicionais baseados numa formulação de elementos finitos para obtenção dos modos lineares a partir dos quais são determinadas as funções a serem empregadas no método de Ritz ou Galerkin. Essa metodologia pode ser aplicada também ao estudo de fenômenos típicos de uma classe de sistemas contínuos não-lineares da qual fazem parte as vigas e os pórticos planos. Entre esses fenômenos encontram-se a relação de dependência entre a frequência e a amplitude, os saltos dinâmicos e multiplicidade de soluções na resposta frequência-amplitude.

A obtenção da resposta frequência-amplitude para uma viga biapoiada é utilizada como base para o desenvolvimento da metodologia de redução utilizada neste trabalho. Os resultados produzidos pelo modelo reduzido são muito semelhantes quando tanto o modo exato, quanto o aproximado por polinômios, são utilizados. A resposta frequência-amplitude para vibração livre obtida pelo método de Lindstedt-Poincaré também é muito próxima dos valores produzidos

pelo modelo reduzido utilizando os métodos de Galerkin e do balanço harmônico, quando as amplitudes de vibração são pequenas.

O estudo paramétrico permite observar o comportamento das vigas biapoiadas em relação à sua esbelteza; quanto mais esbeltas maiores as amplitudes para uma mesma frequência de vibração. O comportamento diante da presença de um carregamento harmônico externo mostra que, quanto maior a amplitude deste carregamento, mais se afasta a resposta daquela obtida para vibração livre na região de ressonância, enquanto que para valores mais altos de frequência, o comportamento é assintótico àquele da vibração livre.

O método do comprimento de arco, adaptado para problemas dinâmicos, é utilizado para obtenção de curvas de ressonância com pontos limites, como no caso de vibração forçada amortecida de vigas e pórticos. A aplicação do método se mostra satisfatória para obtenção destas curvas.

A análise da influência do fator de amortecimento mostra que, quanto maior o seu valor, menor a influência da não-linearidade nas curvas de ressonância. O efeito da não-linearidade cresce, no caso de vibração forçada amortecida, com o aumento da amplitude da carga harmônica aplicada.

Metodologias que utilizam o método dos elementos finitos e o método da perturbação considerando o tipo de não-linearidade das equações de movimento, são desenvolvidas para obtenção de uma primeira correção do modo não-linear de vibração. A aplicação do modo corrigido mostra, para as estruturas aqui estudadas, que há influência, ainda que pequena, da correção somente na região de ressonância para valores grandes de amplitude. O modo corrigido captura ainda um pequeno pico na zona de frequência igual a nove vezes a frequência fundamental.

O estudo das condições de apoio mostra que, com o aumento da rigidez imposta pelo conjunto de condições de contorno, há redução do efeito da não-linearidade nas curvas de ressonância para as vigas. As curvas de ressonância para vigas com apoios elásticos ficam entre aquelas obtidas para vigas biapoiadas e biengastadas, dependendo do valor da rigidez rotacional das molas utilizadas.

A aplicação da metodologia de redução aos pórticos planos em L mostra que estes são mais sensíveis aos efeitos da não-linearidade que as vigas, principalmente quando não há simetria em sua configuração. Os pórticos sob ação de carregamento axial compressivo são mais sensíveis ao efeito da não-

linearidade que os não carregados. Essa sensibilidade cresce à medida que o carregamento se aproxima da primeira carga crítica da estrutura, enquanto há uma redução no valor da frequência fundamental de vibração.

A metodologia utilizada representa uma vantagem no estudo dinâmico não-linear de pórticos planos, pois independente do número de barras dessas estruturas, é utilizada uma única função no tempo para o campo de deslocamentos transversais e uma outra para o campo de deslocamentos axiais, mantendo fixo o número de equações a serem resolvidas para cada modo de vibração assumido no estudo do comportamento dinâmico do pórtico.

## **6.2. Sugestões**

Dentre as sugestões para trabalhos futuros citam-se as seguintes:

- Um estudo mais aprofundado de pórticos com outras geometrias e configurações, de modo a se verificar a capacidade do modelo reduzido em prever o comportamento de geometrias mais sensíveis às não-linearidades aqui estudadas;
- Automatização dos procedimentos para descrição do comportamento dinâmico não-linear de estruturas reticuladas compostas de um número de barras e configuração quaisquer;
- Extensão da metodologia para outros tipos de estruturas esbeltas, tais como placas, arcos, cascas e pórticos espaciais;
- Estudo da influência do carregamento nos modos de vibração não-lineares;
- Emprego de métodos formais como o método das formas normais e de Karhunen-Loève na obtenção de modos não-lineares de vibração.