

8

Conclusões

Para estudar os efeitos não-lineares e levar em conta a influência do esforço axial na resposta dinâmica das estruturas sujeitas à ação do vento foi elaborada uma solução analítica simplificada com base em uma técnica do tipo Rayleigh, que foi empregada como proposta para o cálculo da frequência fundamental de vibração das estruturas em balanço. Além disso, foram avaliados os modelos para o cálculo da ação do vento, segundo as prescrições da NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento em edificações, com a frequência das estruturas sendo calculadas sob condições lineares e não-lineares.

É possível concluir, portanto, que as investigações experimentais, conduzidas em laboratório e no campo, permitiram ates-

tar a natureza não-linear dos sistemas estruturais esbeltos e a validade das postulações analíticas desenvolvidas neste trabalho para a consideração da influência do esforço axial na rigidez e na frequência natural das estruturas. Os resultados numéricos apontaram no mesmo sentido.

A importância da inclusão da não-linearidade geométrica no cálculo da resposta dinâmica devido à turbulência atmosférica dependerá das propriedades elásticas, geométricas e da distribuição de massa da estrutura, podendo ter significativo efeito redutor na capacidade dos postes de telecomunicações possuírem área de exposição ao vento para a instalação de antenas.

Resumem-se a seguir as principais conclusões.

- A solução proposta neste trabalho foi aferida favoravelmente por meios experimentais, em laboratório e no campo; e numericamente, por meio do valor da carga crítica dada pela solução de Euler e Euler-Greenhill, e pelo Método dos Elementos Finitos, por meio de análises dinâmicas.
- As análises feitas utilizando como referência os modelos físicos de laboratório levaram à comprovação de que a consideração do esforço normal na rigidez dos sistemas estruturais modifica as suas frequências de vibração.
- Os sensores utilizados nos testes de laboratório, extensômetros elétricos e acelerômetros, mostraram-se eficientes na determinação das frequências naturais dos modelos.
- Quando limitados aos pequenos deslocamentos, a média das diferenças entre os resultados experimentais e os da solução proposta neste trabalho, para modelos solicitados axialmente por uma força de compressão aplicada na sua extremidade superior, foi de 3,17%.
- A análise numérica comparativa foi desenvolvida computacionalmente via Método dos Elementos Finitos. Foram encontradas frequências distintas entre os modelos lineares e os não-lineares. A diferença entre ambas cresce rapidamente com a esbeltez do sistema.

- Contrariamente à análise linear, a análise não-linear geométrica pelo Método dos Elementos Finitos, feita por meio do conceito de rigidez geométrica, apresenta diferenças desprezíveis tanto em relação aos resultados experimentais quanto em relação aos resultados analíticos da solução ora proposta.
- Verificou-se que modelos lineares possuem reduzida sensibilidade à maneira de como são discretizados, pois as diferenças não superaram 2,28%. Entretanto, sistemas não-lineares apresentaram diferença de 25,18% entre modelos com a maior e a menor discretização. Para os modos de vibração acima do 2º essa diferença é pouco representativa.
- Quando aplicado às estruturas de telecomunicações, o método proposto neste trabalho mostrou-se bastante apropriado ao cálculo da frequência fundamental. Quando realizada por intervalos de integração, os resultados encontrados foram compatíveis com os apresentados pelo Método dos Elementos Finitos.
- Ainda no campo das estruturas reais, a formulação desenvolvida neste trabalho foi aferida por meio de atividade experimental de campo, com a medida da frequência de um poste metálico de telecomunicações.
- A aplicação direta da equação (4.19) ou sua adaptação, equação (4.21), com a inércia sendo calculada com as propriedades da estrutura com algum critério de ponderação conduziu a uma frequência mais baixa, tanto em relação ao valor exato do método quanto em relação ao MEF, em torno de 78%. Portanto, a aplicação direta da equação proposta neste trabalho deve ser feita multiplicando-se a frequência obtida pela Eq.(4.19) ou (4.21) por um fator médio de ajuste de 1,22.
- A aplicação da expressão (4.19) ou (4.21), considerando a altura acima do solo é uma maneira prática e eficiente de se calcular a frequência fundamental das estruturas em balanço, equivalendo-se ao uso de recursos computacionais sofisticados.

- Além da não-linearidade geométrica, já captada por essas expressões, ainda é possível introduzir a não-linearidade material, adequado a cada caso. Nesse sentido, a pesquisa sobre o valor do produto de rigidez EI a ser utilizado, seja para os postes de concreto armado empregados no sistema telefonia móvel celular ou outro tipo de estrutura, é um ponto de investigação que necessita ser ampliado.
- As expressões para o cálculo do período fundamental de vibração, propostas pela NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento em edificações, não se aplicam confortavelmente aos postes destinados ao suporte de sistemas irradiantes do sistema de telefonia móvel celular, utilizados em larga escala no Brasil. As soluções propostas neste trabalho mostraram-se mais eficientes que as da norma brasileira para o cálculo da frequência fundamental dessas estruturas.
- A forma modal $\mathbf{x} = \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma$, prevista na NBR 6123/88 com o expoente igual a 1,7 situa-se 5% abaixo da média dos expoentes que possibilitam uma melhor aproximação à forma modal não-linear.
- Além das estruturas destinadas ao serviço de telefonia celular, as expressões (4.19) ou (4.21) prestam-se ao cálculo da frequência fundamental de qualquer estrutura que possa ser modelada como elemento de barra simplesmente engastado, podendo ser utilizada com facilidade pelos engenheiros.
- Foi visto que o 1º modo de vibração é o que aporta maior contribuição da resposta dinâmica da estrutura dentre os outros modos de vibração. Supera a contribuição do vento médio na resposta dinâmica total. Na maioria dos casos, a contribuição dos modos superiores ao primeiro podem ser desprezadas, indo de encontro aos resultados apresentados por Galindez (1989).
- A utilização do modelo dinâmico simplificado com a frequência da estrutura calculado sob não-linearidade geométri-

ca conduziu a resultados muito elevados quando comparados aos resultados da análise dinâmica discreta não-linear, configurando-se em um processo de cálculo improcedente para a determinação da resposta dinâmica de estruturas como as de telecomunicações.

- O cálculo da ação do vento realizado como previsto no item 4 da NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento em edificações, processo utilizado pelos engenheiros para projetar as estruturas analisadas, apresenta esforços que podem ser superados em mais 50%.
- Para as estruturas metálicas estudadas, a relação entre a análise dinâmica discreta linear e a análise dinâmica discreta não-linear alcança quase 2%. Percentual que se aproxima de 8%, quando se trata de postes de concreto armado. Para estruturas cujo fim é a transmissão do sinal de telecomunicações, esse diferencial pode representar um importante decréscimo no conjunto de antenas a serem instaladas.

