

6 Conclusões e sugestões

6.1. Conclusões

Os modos normais não lineares são utilizados neste trabalho para a obtenção de uma análise modal não linear de modelos discretos de estruturas offshore. Como exemplos de aplicação são utilizados três modelos estruturais: pêndulo invertido, torre articulada e plataforma tipo “spar”.

A aplicação da análise modal não linear aos exemplos aqui discutidos resulta em modelos de ordem reduzida desses sistemas estruturais. Esses modelos reduzidos são representados por osciladores não lineares de um único grau de liberdade chamados osciladores modais.

Os modelos de ordem reduzida são utilizados para se obter o comportamento dinâmico não linear das estruturas de modo simplificado e preciso, sendo empregados na análise paramétrica dos exemplos considerados. Mostra-se assim que a análise modal não linear se constitui numa ferramenta apropriada para as fases de pré-projeto de estruturas submetidas a grandes deslocamentos, como o caso de estruturas offshore.

O uso da análise modal não linear aos exemplos aqui considerados permite a descrição de um comportamento complexo resultante das não linearidades consideradas. São observados fenômenos tais como a multiplicidade de modos, ressonância interna, existência de modos bifurcados, troca de energia, variação da frequência com a amplitude e energia de vibração, modos instáveis, modos não lineares similares e não similares, modos não lineares não clássicos, bifurcações e existência de múltiplas soluções.

A multiplicidade de modos é verificada pela obtenção das seções de Poincaré no caso de sistemas hamiltonianos. As seções de Poincaré também permitem a determinação da estabilidade dos modos, sendo que os estáveis correspondem a centros e os instáveis a pontos de sela nessas seções. Observam-

se nos exemplos do pêndulo invertido e da torre articulada a existência de modos estáveis e instáveis.

Para obtenção dos modos normais são utilizados o método assintótico e o método baseado no procedimento de Galerkin. Sendo que o domínio de validade do último é conhecido *a priori*, enquanto o do primeiro é determinado por comparação com a solução de referência obtida da integração numérica das equações de movimento do sistema original (não reduzido).

Um terceiro método de obtenção dos modos normais não lineares é apresentado. O método é essencialmente numérico e baseia-se na integração das equações adicionadas de uma pequena quantidade de amortecimento. Os resultados da integração numérica são interpolados para obtenção de expressões analíticas para as variedades invariantes de cada modo. Desse modo o método pode ser utilizado para obtenção de análises paramétricas mais rápidas. A validade do método é determinada fundamentalmente pela precisão dos métodos numéricos de integração e interpolação utilizados. O método pode ser utilizado para obtenção das variedades invariantes de modos essencialmente não lineares, ao contrário dos métodos assintóticos e aquele baseado no procedimento de Galerkin.

O modelo físico de um pêndulo invertido é utilizado para o desenvolvimento e demonstração das metodologias desenvolvidas para aplicação em estruturas offshore do tipo complacentes. A dinâmica não linear do pêndulo é estudada para os casos de vibração livre e forçada. Para o caso do sistema sem imperfeição geométrica observa-se a ocorrência de multiplicidade de modos, inclusive com modos não clássicos.

Observa-se uma excelente correspondência entre os resultados dos modelos reduzidos e a solução de referência, no caso dos modos similares estáveis para o sistema perfeito. Para comparação entre essas duas soluções, é utilizada uma transformação entre as coordenadas físicas e modais dos sistemas estudados. Desse modo a dinâmica do sistema completo pode ser recuperada a partir das equações de restrição e da solução do modelo de ordem reduzida para o par mestre.

A análise da vibração forçada é realizada por meio da construção das curvas de ressonância para os diferentes modos observados. Verifica-se a existência do fenômeno do salto dinâmico e modos, tanto com característica de perda quanto de ganho de rigidez. Análises paramétricas em relação aos parâmetros da carga

externa e do amortecimento são realizadas, demonstrando que o salto dinâmico é sensível à variação desses parâmetros, podendo até mesmo não ocorrer para valores muito pequenos de amplitude de carga externa ou valores muito grandes de fator de amortecimento. Resultados semelhantes são obtidos para os exemplos da torre articulada e da plataforma “spar”.

Variedades invariantes forçadas (dependentes do tempo) são obtidas, empregando-se a técnica dos multimodos, e comparadas com as de vibração livre (independentes do tempo). Observa-se que, quando as amplitudes da carga externa são pequenas se comparadas à amplitude de movimento dos sistemas, as variedades invariantes independentes do tempo podem ser utilizadas no caso de vibração forçada.

A comparação entre a solução de referência e as soluções provenientes dos osciladores modais para várias direções de atuação da carga externa demonstram que a ressonância ocorre na vizinhança dos modos normais não lineares e que estes podem ser utilizados para o estudo do comportamento dinâmico não linear das estruturas aqui estudadas.

A estabilidade das soluções dos modelos de ordem reduzida é estudada empregando-se a teoria de Floquet. As regiões de estabilidade são obtidas por diagramas de estabilidade e diagramas de Mathieu. Observam-se nos três exemplos estudados a existência de múltiplas soluções, perda de estabilidade com o aumento dos parâmetros da carga externa, e bifurcações do tipo tridente e nó-sela.

A influência da existência de uma imperfeição geométrica no modelo do pêndulo invertido provoca a perda de simetria do sistema. Mesmo para pequenos valores de imperfeição essa perda de simetria é essencial para que a dinâmica do sistema torne-se menos complexa em relação ao caso perfeito, incluindo a redução ou desaparecimento da multiplicidade de modos. A variação da resposta do sistema imperfeito é periódica em relação à variação da direção da existência da imperfeição, sendo que somente alguns casos representativos precisam ser estudados.

No exemplo da torre articulada o efeito da variação da direção de atuação da corrente marinha é semelhante ao efeito da imperfeição no caso do pêndulo invertido. Desse modo, a simetria do problema tem grande influência na resposta dinâmica não linear da estrutura, sendo que, para os exemplos aqui estudados,

quanto mais assimétrico for o problema mais simples sua resposta dinâmica não linear.

No caso da plataforma tipo “spar”, o método assintótico é utilizado para obtenção da resposta do sistema sob excitação paramétrica, sendo para isso desenvolvida uma metodologia empregando a análise multimodal não linear. A comparação da resposta do sistema à excitação harmônica simples e paramétrica demonstra ser importante o uso do modelo reduzido considerando a excitação paramétrica em regiões próximas à ressonância.

Um estudo de convergência realizado para o exemplo da plataforma “spar” demonstra a importância para a precisão da solução, da manutenção de termos não lineares de graus mais elevados, mesmo que incompletos, nos osciladores modais. Esses termos incluem no modelo de ordem reduzida importantes informações de contribuições não lineares dos modos não simulados (modos escravos).

6.2. Sugestões

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

- Automatização das metodologias utilizadas neste estudo para a análise de modelos estruturais com um maior número de graus de liberdade;
- Derivação de métodos de discretização para a solução das equações que governam as variedades invariantes tais como o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos;
- Aplicação da metodologia para outros exemplos de estruturas da indústria offshore tais como estruturas flutuantes, embarcações, risers, tubulações submarinas e monobóias.
- Extensão da metodologia para modelos contínuos de estruturas offshore;
- Estudo mais aprofundado das variedades invariantes multimodais;
- Aprofundamento teórico para extensão das definições atuais para modos normais não lineares para outros casos;
- Consideração de viscoelasticidade nos modelos aqui apresentados.