

6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1

CONCLUSÕES

Silveira (1995), Galvão (2000, 2001), Rocha (2000) e Pinheiro (2003), desenvolveram em linguagem *Fortran* (Fortran PowerStation 4.0, 1994-1995), um programa computacional capaz de realizar a análise não-linear de sistemas reticulados planos. Com base nesses trabalhos, que apresentam valiosas comparações entre diversas formulações de elementos finitos e metodologias de resolução de sistemas de equações não lineares, foram selecionadas as formulações e algoritmos apresentados nesta tese. Objetivando dar continuidade aos trabalhos precedentes, foi incorporada à base computacional citada a capacidade de desenvolver também análises de natureza dinâmica. Para isto foram inicialmente implementadas rotinas de solução de problemas de autovalores, que, acopladas à metodologia de solução não-linear, possibilitaram a determinação das frequências naturais e modos de vibração ao longo dos caminhos não-lineares de equilíbrio. Isto permitiu uma implementação eficiente do critério dinâmico de estabilidade, possibilitando a identificação dos trechos estáveis e instáveis ao longo das trajetórias de equilíbrio e, portanto, a identificação dos pontos críticos. Também foram incorporados ao mesmo sistema computacional algoritmos clássicos de integração numérica, implícitos (Newmark, Wilson- θ) e explícitos (Método das diferenças centrais e Runge-Kutta de quarta ordem), que possibilitaram análises lineares e não-lineares de pórticos planos com ligações rígidas e semi-rígidas sob carregamentos dinâmicos. Com a finalidade de tornar mais eficiente o processo de integração numérica, em conjunto com os métodos de integração, foram implementadas duas eficientes estratégias de controle automático dos incrementos de tempo.

Com o objetivo de validar as implementações das rotinas de solução do problema de autovalor e autovetor, foram estudados na seção 5.2 alguns exemplos simples envolvendo vibração livre de estruturas descarregadas e carregadas. A obtenção das frequências naturais e modos de vibração para as estruturas com as

ligações rígidas foram obtidas com sucesso. Entretanto, foi constatado, na análise de estruturas carregadas compressivamente, que a utilização do elemento com ligação semi-rígida pode gerar erros no cálculo das frequências. Através de um exemplo de barra carregada axialmente, foi observado que para a condição descarregada o resultado é excelente, mas surge uma discrepância crescente a medida que se aumenta a força compressiva. Também foi observado que este problema é tanto maior quanto mais flexíveis forem as ligações. Nenhum comentário foi encontrado na literatura sobre ligações semi-rígidas a respeito dessa sensibilidade. Com base na análise das matrizes do sistema discretizado, verificou-se que a diminuição do comprimento do elemento semi-rígido diminui essa sensibilidade. Portanto, no presente trabalho, o procedimento adotado para contornar este problema foi utilizar valores reduzidos para o comprimento L_{SR} dos elementos com ligações semi-rígidas na modelagem das estruturas.

Os métodos de integração numérica, bem como as estratégias adaptativas fornecidas no Capítulo 4, tiveram sua eficiência avaliada na seção 5.3. Foi visto que todos os métodos apresentaram excelentes resultados na resposta transiente. Entretanto, mesmo na análise de problemas lineares, utilizando-se dos mesmos valores de parâmetros e incremento de tempo recomendados para cada algoritmo, verificou-se que, após um grande número de ciclos, os métodos implícitos podem apresentar uma defasagem da resposta. Para resolver esse problema foi necessário usar um passo de tempo da mesma ordem de grandeza que aqueles exigidos pelos métodos explícitos. Esse problema se agrava na análise de sistemas não-lineares, mas pode ser minorado com a adaptatividade do passo de tempo.

Outra observação importante na análise não-linear é a ocorrência de um deslocamento da configuração de referência da resposta temporal quando se integra por um longo período de tempo, possivelmente devido à natureza cumulativa do processo incremental de cálculo dos esforços internos. O acúmulo de resíduos a cada incremento devido às simplificações e linearizações inerentes à formulação do elemento finito, para uma quantidade muito grande de incrementos, pode gerar erros não desprezíveis. Esse desvio pode ser reduzido com a diminuição do incremento no tempo, porém para análises envolvendo intervalos muito grandes de tempo e, portanto, uma quantidade muito grande de ciclos, uma dimensão economicamente viável de Δt pode levar a discrepâncias consideráveis.

Entretanto, a integração eficiente das equações de movimento por um longo período de tempo é uma necessidade na análise de sistemas não-lineares. Essas deficiências impedem a implementação eficiente em programas de elementos finitos de técnicas numéricas para a obtenção de, por exemplo, diagramas de bifurcação, expoentes de Liapunov, autovalores de Floquet e bacias de atração. Isso também é um empecilho a análise de sistemas que exibam longos transientes e movimentos caóticos.

Para aferir as potencialidades do sistema computacional aqui desenvolvido escolheu-se para uma análise detalhada dois problemas que apresentam respostas com forte não-linearidade: o arco de geometria senoidal submetido a carregamento distribuído e os pórticos em L. Pesou na escolha destes exemplos o fato de apresentarem características de comportamento que são comuns a uma grande gama de estruturas utilizadas na prática da engenharia. Pode-se, por exemplo, constatar no arco a perda de estabilidade por ponto limite ou através de bifurcação ao longo do caminho não-linear de equilíbrio em um modo assimétrico, com a ocorrência de saltos para configurações com grandes deslocamentos. Observa-se também sensibilidade a imperfeições com redução drástica da capacidade de carga da estrutura. Por sua vez, os pórticos em L apresentam não só saltos dinâmicos como são um exemplo clássico de estruturas com bifurcação assimétrica. Outro ponto que motivou a escolha dessas duas estruturas é a farta literatura com soluções analíticas, experimentais, aproximadas e numéricas, que, servindo como base para comparação, puderam dar confiabilidade aos modelos estruturais empregados nas análises subsequentes do presente trabalho.

Com a finalidade de se ter uma melhor compreensão dos fenômenos de instabilidade desses dois sistemas estruturais, estudou-se, na seção 5.2, a variação das frequências e modos de vibração destas estruturas para diferentes níveis de carregamentos, imperfeições geométricas, de ligações e de carga. Na seção 5.3, o comportamento destas estruturas é observado quando estas são submetidas a cargas dinâmicas.

Em seguida são apresentadas as principais observações relativas às análises não-linear estática e dinâmica dos sistemas estruturais analisados.

O arco senoidal abatido, cuja geometria inicial foi fornecida por Bergan (1980), não apresenta grande sensibilidade a imperfeições. Porém, ao se aumentar

a altura do arco, percebe-se que a partir de uma certa altura limite ocorre uma diferenciação clara entre a carga limite do arco perfeitamente simétrico e a carga de bifurcação em um modo assimétrico. Essa diferença aumenta gradativamente com o acréscimo da altura, e, portanto, os arcos pouco abatidos apresentam uma clara bifurcação seguida de perda de estabilidade. Nesses arcos observa-se uma maior sensibilidade a imperfeições. Em ambos os casos observa-se que os picos de ressonância são bastante afetados pelas características da estrutura e do carregamento.

Os resultados mostram uma grande sensibilidade a variações na rigidez da ligação. Em particular, mostra-se que um decréscimo na rigidez das ligações pode gerar uma mudança drástica nas respostas estática e dinâmica, aumentando o grau de não-linearidade e a probabilidade de colapso por perda de estabilidade. Isto se torna particularmente significativo, se for levado em consideração o fato de ligações em estruturas metálicas sofrerem usualmente uma deterioração ao longo da vida da estrutura em função de vários fatores como, por exemplo, corrosão. Esses resultados também indicam a importância de se avaliar de forma precisa a rigidez das ligações em sistemas estruturais não-lineares.

O pórtico em L estudado por Roorda (1965) foi analisado considerando-se variações da geometria, propriedades físicas e condições de contorno originais, e, deste modo, pôde-se estudar a influência de cada um destes parâmetros na solução da estrutura. Estas conclusões podem servir de base para a análise de outras geometrias de pórticos esbeltos. Por exemplo, foi observado que o aumento da rigidez da barra lateral promove o acréscimo do valor da carga crítica do pórtico; entretanto, há um aumento substancial na sensibilidade a imperfeições. Esta é uma característica interessante apresentada por vários sistemas sensíveis a imperfeições: a carga crítica cresce devido à variação de algumas restrições, mas a sensibilidade a imperfeições também cresce. Deste modo, o aparente acréscimo na capacidade de carga pode ser totalmente destruído pela inevitável presença de imperfeições.

Em resumo, os resultados demonstram que o presente desenvolvimento pode ser usado com eficiência na avaliação do comportamento estático e dinâmico de estruturas esbeltas suscetíveis a flambagem e pode servir de base para futuros desenvolvimentos, alguns dos quais são relatados a seguir.

6.2

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Através do sistema computacional do presente trabalho pode-se dar continuidade ao estudo de vários fenômenos de instabilidade de estruturas comumente utilizadas na prática, como por exemplos torres de transmissão, treliças planas e espaciais, arcos, *pitched-roof frames*, etc.

Em relação a problemas de análise estrutural não-linear há um vasto campo de pesquisas do qual somente uma pequena parcela foi abordada pelo presente trabalho. Tendo em vista a seqüência do presente trabalho, pode-se sugerir a condução dos seguintes estudos:

1. Na análise dinâmica de pórticos semi-rígidos do presente trabalho, foi adotado um modelo com rigidez constante. Para se utilizar modelos mais realistas que levem em conta a variação da rigidez diante de grandes deformações durante a análise dinâmica é necessário levar em consideração o comportamento histerético da ligação (Chan e Chui, 2000);
2. Utilizou-se na integração numérica dos problemas dinâmicos não-lineares os algoritmos de Newmark e Wilson- θ , entretanto, foi visto na seção 5.3 que a resposta desses algoritmos em problemas envolvendo grandes intervalos de integração podem apresentar erros de precisão. Sugere-se, portanto, a implementação de outros algoritmos como, por exemplo, os algoritmos com dissipação numérica controlada α H-Newmark (Hilber e Hughes, 1978) e α B-Newmark (Wood et al., 1980). A implementação de algoritmos mais eficientes permitirá a obtenção de diagramas de bifurcação, além de outras ferramentas essenciais no estudo de vibrações não-lineares;
3. Sugere-se estudar outras formas de se calcular o vetor de forças internas acopladas ao processo incremental de integração numérica, com o intuito de se de reduzir a discrepância que possivelmente é causada por acúmulo de resíduos no processo incremental;

4. Para tornar a análise de estruturas metálicas mais realista em termos de projeto é necessária a implementação de modelos que considerem a não-linearidade física do material da estrutura (Chan e Chui, 1997e 2000);
5. Com base no programa aqui desenvolvido, pode-se desenvolver modelos de baixa dimensão, mas que sejam suficientemente precisos para uma análise paramétrica detalhada das oscilações não-lineares de elementos estruturais esbeltos. A obtenção de modelos representativos com poucos graus de liberdade tem merecido grande atenção dos pesquisadores nos últimos anos (Soares, 1998 e Baracho Neto, 2003).
6. Por fim, para tornar o programa mais acessível e possibilitar uma melhor visualização dos resultados obtidos são necessárias implementações de rotinas gráficas de pré e pós-processamento.