

1

INTRODUÇÃO

1.1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS

Considerações práticas de projeto obrigam o engenheiro calculista a fazer verificações quanto à resistência e à estabilidade de sistemas estruturais. Adicionalmente, problemas relacionados com o estado limite de utilização desses sistemas também precisam ser analisados de forma cuidadosa.

O desenvolvimento de novos materiais, de novas técnicas construtivas, bem como a disponibilidade de recursos computacionais e fatores econômicos, entretanto, tem motivado o emprego de elementos estruturais cada vez mais leves e esbeltos nesses projetos. Porém, sabe-se que, a medida que se aumenta a esbeltez de um dado elemento estrutural, o seu mecanismo de colapso pode sofrer significativas mudanças qualitativas. Assim, problemas relativos à perda de estabilidade sob cargas estáticas e dinâmicas, bem como vibrações indesejáveis, podem surgir. Particularmente isto é bastante comum em projetos envolvendo estruturas metálicas reticuladas.

Portanto, a análise numérica não-linear dessas estruturas se torna cada vez mais relevante. Essa análise não-linear consiste basicamente em introduzir no modelo numérico e formulações a serem usadas, todos os fatores considerados relevantes e que permitam o analista conhecer os possíveis mecanismos de colapso da estrutura. Dentre os fatores considerados relevantes a serem incluídos na análise destacam-se: os efeitos decorrentes dos grandes deslocamentos e rotações que o sistema estrutural pode sofrer, a flexibilidade das conexões e as imperfeições iniciais, como as geométricas e de carregamento.

Assim, muitos pesquisadores têm se empenhado e direcionado suas pesquisas para o desenvolvimento de metodologias práticas e eficientes para uma análise não-linear de sistemas estruturais. Esta tese é uma continuação natural de uma série de pesquisas focadas neste objetivo. Dentre essas, vale destacar as pesquisas de Silveira (1995), Galvão (2000, 2001), Rocha (2000) e Pinheiro (2003), que desenvolveram em

linguagem *Fortran* (Fortran PowerStation 4.0, 1994-1995), um programa computacional capaz de realizar a análise não-linear de sistemas reticulados planos. Em Silveira (1995) estão os procedimentos numéricos necessários para a obtenção da resposta de sistemas estruturais esbeltos com restrições de contato; já Galvão (2000) estudou e implementou várias formulações não-lineares de elementos de viga-coluna; em Rocha (2000) são desenvolvidas estratégias de solução não-linear que permitem o traçado de forma completa do caminho não-linear de equilíbrio; Galvão (2001) adicionou ao sistema a possibilidade de se realizar a análise de vibração em treliças e pórticos planos e espaciais; e, recentemente, Pinheiro (2003) implementou formulações não-lineares para a análise de treliças planas e espaciais, bem como a possibilidade da modelagem de pórticos com ligações semi-rígidas. Paralelamente, vários trabalhos foram desenvolvidos nesta linha de pesquisa sobre ferramentas de análise qualitativa e quantitativa das oscilações não-lineares de sistemas estruturais suscetíveis a grandes deslocamentos usando modelos de baixa dimensão, isto é, modelos com poucos graus de liberdade. Dentre esses trabalhos deve-se mencionar as teses de Machado (1993) e Santee (1999), que implementaram diversos algoritmos para a análise de oscilações não-lineares, e Del Prado (2001), que usou estas ferramentas para analisar as oscilações não-lineares e instabilidade dinâmica de cascas cilíndricas. Cabe também citar a tese de Pinto (1999) e Beneveli (2002), que estudaram o controle de vibrações não-lineares de estruturas flexíveis.

As referências citadas forneceram a base computacional para as implementações realizadas neste trabalho, cujo objetivo principal é a obtenção da resposta não-linear, estática e dinâmica, de sistemas estruturais reticulados planos com ligações rígidas e semi-rígidas. Atenção especial é dada à formulação do problema dinâmico não-linear e aos algoritmos empregados na sua solução. Foram então desenvolvidos e implementados métodos de integração numérica (explícitos e implícitos) que possibilitam a análise dinâmica de pórticos com a incorporação da flexibilidade das conexões das barras. Juntamente com esses métodos foram utilizadas estratégias adaptativas que permitem o controle automático dos incrementos de tempo no processo de integração das equações diferenciais do movimento.

Por fim, destaca-se que o presente trabalho é parte integrante da linha de pesquisa '*Instabilidade e Dinâmica de Estruturas*' do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

1.2

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Ainda neste capítulo, na Seção 1.3, é feita uma pequena revisão bibliográfica onde atenção especial é dada aos trabalhos recentes sobre formulações e estratégias de solução dos problemas estáticos e dinâmicos não-lineares.

No Capítulo 2 é feita uma explanação geral sobre o problema estrutural estático não-linear, onde inicialmente são introduzidos os tipos de referenciais e em seguida a definição da formulação do elemento finito não-linear de viga-coluna. Depois são discutidas as modificações necessárias para que ele incorpore os efeitos devido à flexibilidade (ou semi-rigidez) das conexões estruturais. A metodologia de solução não-linear implementada é apresentada no final do referido capítulo.

No Capítulo 3 são realizadas análises estáticas de alguns sistemas estruturais com respostas fortemente não-lineares. Em particular, a atenção é voltada à análise paramétrica envolvendo dois sistemas estruturais clássicos: o arco senoidal abatido e os pórticos em L.

No Capítulo 4 é formulado o problema estrutural dinâmico com a definição das equações diferenciais ordinárias de movimento que caracterizam o equilíbrio do sistema. Em seguida, são apresentadas as expressões das matrizes de massa para o elemento finito com ligações rígidas e flexíveis. O problema de vibração livre e os procedimentos usados neste trabalho para se calcular as frequências naturais e os modos de vibração são então estudados. Por fim, são apresentados os métodos de integração direta e as estratégias de adaptatividade do incremento de tempo, que juntos serão usados na obtenção da resposta transiente linear e não-linear do sistema estrutural.

O Capítulo 5 apresenta as análises numéricas dos problemas estruturais dinâmicos lineares e não-lineares. Mais uma vez, atenção especial é dada ao arco

senoidal abatido e aos pórticos em L, dando continuidade assim ao estudo paramétrico iniciado no Capítulo 3.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões relativas ao emprego e implementações das diversas formulações e metodologias utilizadas nas análises numéricas dos Capítulos 3 e 5. Em seguida são apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

1.3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Formulações não-lineares para o elemento de viga-coluna em referenciais Lagrangianos total e atualizado (RLT e RLA) foram propostas por vários pesquisadores, dos quais pode-se citar: Wen et al. (1983); Chajes et al. (1987); Goto et al. (1987); Wong e Loi (1990); Alves (1993); e Torkamani et al. (1997). Adicionalmente, Yang e Kuo (1994) sugeriram que o vetor de forças internas poderia ser calculado através de duas abordagens: uma usando os deslocamentos naturais incrementais e a outra através da rigidez externa. Já Pacoste e Eriksson (1995 e 1997) introduziram, baseados numa formulação em RLT, relações deformação-deslocamento não-lineares através de funções trigonométricas. Galvão (2000) implementou e comparou, através da análise de vários problemas estruturais, a eficiência computacional de várias formulações de elementos finitos de pórticos planos.

Entre os estudos que abordam a importância da inclusão da não-linearidade geométrica na análise estrutural, destacam-se: Fonte (1992) e Banki (1999), que estudaram o comportamento não-linear de edifícios; e Anchieta Jr (2001), que analisou torres de transmissão.

Nos últimos tempos, vários pesquisadores têm estudado e desenvolvido formulações com o objetivo de examinar o comportamento não-linear de estruturas metálicas aporticadas, onde, mais especificamente, a inclusão da não-linearidades física na análise tem recebido grande atenção. Dentro dessa linha de pesquisa

destacam-se os trabalhos de Chen e Sohal (1995) e de Chan e Chui (1997, 2000). Esses últimos pesquisadores adotaram o conceito da '*seção montada*' para levar em consideração a plastificação na seção. Merece ainda destaque o artigo de Liew et. al. (2000) e os publicados recentemente por Ochoa (2004) e Zhou e Chan (2004a, 2004b). No Brasil, a análise inelástica de sistemas estruturais metálicos tem despertado interesse de grandes centros de pesquisa e várias dissertações e teses já foram concluídas envolvendo esse tema (Martins, 1999; Landesman, 1999; Carneiro, 2000; Assaid, 2001).

A solução de sistemas de equações não-lineares e, em particular, a obtenção dos caminhos de equilíbrio de sistemas estruturais suscetíveis a flambagem é em muitos casos um problema de difícil solução. Assim, juntamente com as pesquisas relativas ao desenvolvimento de formulações não-lineares (física e geométrica), muitos trabalhos têm sido produzidos com a finalidade de se determinar a melhor estratégia de solução de sistemas de equações não-lineares. Os métodos que têm mostrado maior eficiência são os que combinam procedimentos incrementais e iterativos. Como trabalhos pioneiros, podem ser citados: Mallet e Marçal (1968), que utilizaram iterações do tipo Newton; e Zienkiewicz (1971), que apresentou uma modificação no método de Newton-Raphson, fazendo com que a matriz de rigidez só fosse atualizada a cada passo de carga. Nos últimos anos, diversos trabalhos vêm apresentando diferentes estratégias de controle automático do processo incremental, bem como diferentes estratégias de iteração. Utilizando um '*parâmetro de rigidez corrente*' como indicador do grau de não-linearidade do sistema estrutural, Bergan et al. (1978) e Bergan (1980) suprimiram as iterações de equilíbrio nas zonas críticas da trajetória, até os pontos limites serem atravessados.

Batoz e Dhatt (1979) apresentaram uma técnica na qual o ciclo iterativo é realizado não à carga constante, mas a deslocamento constante; Riks (1972) apresentou um método, baseado no *parâmetro comprimento de arco* Δl , capaz de obter o traçado completo do caminho de equilíbrio da estrutura; Meek e Tan (1984) apresentaram um resumo das principais técnicas para se ultrapassar os pontos limites, das quais a técnica do comprimento de arco foi reconhecida como uma das mais

eficientes. Contribuíram, adicionalmente, com essa técnica: Riks (1979), Ramm (1981) e Crisfield (1981 e 1991).

Yang e Kuo (1994) introduziram estratégias de incremento de carga e iteração baseadas num *parâmetro de rigidez generalizado*; Krenk (1993, 1995) elaborou uma estratégia de iteração usando a condição de ortogonalidade entre o vetor de forças residuais e o vetor de deslocamento incremental; e em Crisfield (1997) são encontrados procedimentos numéricos que permitem avaliar com precisão os pontos críticos existentes nas trajetórias de equilíbrio.

Joaquim (2000) implementou e testou a performance de técnicas numéricas para solução de problemas estáticos não-lineares. Numa dessas técnicas ele empregou o comprimento de arco cilíndrico junto com um acelerador de convergência do tipo '*line-search*'. Com a mesma base computacional utilizada no presente trabalho, Silveira et al. (1999a, 1999b) desenvolveram uma metodologia geral de solução de sistemas de equações algébricas não-lineares. Em sua dissertação de mestrado, Rocha (2000) realizou um estudo comparativo detalhado de várias estratégias de iteração e incremento de carga.

Nos projetos de estruturas metálicas tradicionais, os pórticos bi ou tridimensionais são usualmente analisados com a simplificação de que o comportamento da ligação viga-coluna pode ser idealizado através dos casos extremos, a saber: ligações *rotuladas* (onde nenhum momento é transmitido entre a coluna e a viga e esses elementos se comportam de forma independente) e *rígidas* (onde o ângulo entre os eixos da coluna e viga não se altera quando a estrutura se deforma). Nas estruturas reais, entretanto, investigações experimentais têm demonstrado que a maioria das conexões entre os elementos estruturais metálicos deve ser tratada como ligações semi-rígidas, usando curvas momento-rotação para descrever o seu comportamento. Torna-se necessário, portanto, incorporar o efeito da resistência e da flexibilidade (ou rigidez) da ligação na análise do sistema estrutural e dessa forma representar o comportamento verdadeiro do pórtico.

A bibliografia especializada relata que o primeiro trabalho desenvolvido para avaliar a rigidez de uma ligação foi realizado na Universidade de Illinois, em 1917 (Wilson e Moore, 1917). Desde essa época, e mais recentemente com a popularização

do uso da solda e dos parafusos de alta resistência, tem sido demonstrado um crescente interesse no estudo e no uso de ligações semi-rígidas em estruturas metálicas. Como já mencionado, outro fator importante para o avanço das pesquisas sobre o comportamento das ligações foi o desenvolvimento verificado na área da computação, o que possibilitou o uso de equipamentos e técnicas sofisticadas para a análise e tratamento dos modelos experimentais e para o refinamento dos modelos matemáticos desenvolvidos.

Entre os principais trabalhos surgidos nos últimos anos que tratam da análise não-linear estática de pórticos com conexões semi-rígidas destaca-se o de Sekulovic e Salatic (2001), que propuseram um elemento de viga-coluna híbrido. Esse último artigo está relacionado ao de Sekulovic e Malcevic (1994), que trata da análise de segunda ordem de pórticos. Outros trabalhos que apresentam formulações para análise de pórticos com ligações semi-rígidas são os de Lui e Chen (1988), King (1994), Simões (1996) e Xu (2001).

Vários outros trabalhos tratam da predição do comportamento não-linear de conexões semi-rígidas, seja através da modelagem por elementos finitos (Lima et al. 2002) ou através de banco de dados contendo os valores de momento e rotação oriundos de ensaios experimentais (Chen e Kishi, 1989; Abdalla e Chen, 1995).

Nas últimas décadas, vários pesquisadores propuseram formas de se aproximar o comportamento momento-rotação de ligações semi-rígidas através de modelos analíticos, matemáticos ou mistos. Entre os principais trabalhos, encontram-se os de Richard e Abbott (1975), Frye e Morris (1975), Ang e Morris (1984), Lui e Chen (1986, 1988), Kishi e Chen (1986a, 1986b), Al-Bermani et al. (1994) e Zhu et al. (1995), entre outros.

Utilizando a base computacional inicialmente desenvolvida por Silveira (1995) e expandida por Galvão (2000), Pinheiro (2003) implementou três formulações de elementos de viga-coluna com conexões semi-rígidas e várias possibilidades de curvas momento-rotação para aproximar o comportamento da ligação. Os trabalhos de Chen e Lui (1991), Chan e Chui (2000) e Sekulovic e Salatic (2001) foram de fundamental importância para o desenvolvimento da dissertação de Pinheiro (2003).

Portanto, a estabilidade elástica e inelástica de pórticos planos com ligações rígidas e flexíveis, sob carregamento estático, tem sido extensivamente estudada nas últimas décadas, porém, problemas envolvendo carregamento dinâmico dessas estruturas têm recebido atenção limitada (Xue e Meek, 2001).

Por outro lado, a engenharia estrutural vem cada vez mais concebendo sistemas estruturais que não podem ser analisados e dimensionados sem que os efeitos dinâmicos sejam considerados. Portanto, existe uma demanda crescente por sistemas computacionais com recursos para análise dinâmica linear e não-linear. Atentando a esse fato, nos últimos anos, várias teses e dissertações vêm sendo desenvolvidas em instituições brasileiras focalizando os estudos na análise dinâmica de estruturas. Entre elas podem ser citadas: Vianna (1991), que modelou as não-linearidades por meio de elementos especiais de amortecimento e de contato, e utilizou os métodos Hilber, Hughes e Taylor para integração no tempo; Pires (1992), que apresentou uma formulação para a análise não-linear geométrica (estática e dinâmica) em estruturas treliçadas; Fernandes Jr. (1995), que abordou o problema dinâmico de pórticos planos de aço sob carregamentos transientes com consideração de formação de rótulas plástica, onde excitações dinâmicas de curta duração e grande intensidade foram consideradas; Soares Filho (1997), que estudou o problema dinâmico de pórticos planos com ligações semi-rígidas nos regimes elástico e elastoplástico através de recursos da programação matemática, e abordando o problema de vibrações forçadas através do método da superposição modal e integração de Newmark; De Paula (2001), que apresentou uma formulação de modelos numéricos para estruturas reticuladas planas considerando as não-linearidades física e geométrica.

Para a análise dinâmica não-linear de estruturas, os métodos mais convenientes e, portanto, mais utilizados, são os métodos de integração implícitos, em particular os da família de Newmark (Chan e Chui, 2000). Algoritmos de integração direta, explícitos e implícitos, são fartamente apresentados na literatura. Destacam-se aqui os livros clássicos de elementos finitos como o Bathe (1995) e o Cook et al. (1989). Em 1988, Dokainish e Subbaraj publicaram dois artigos importantes (Dokainish e Subbaraj, 1988; Subbaraj e Dokainish, 1988) em que foram discutidas e apresentadas alternativas de implementação para diversos métodos de integração explícitos e

implícitos para análise estrutural linear e não-linear. Nos últimos anos, buscando-se eliminar as altas frequências da resposta dinâmica, tem-se pesquisado algoritmos com dissipação numérica controlada. A principal dificuldade no desenvolvimento de desses algoritmos está na definição do amortecimento numérico nas altas frequências sem introduzir um excessivo amortecimento em importantes modos de vibração de baixas frequências. Vários algoritmos implícitos com dissipação numérica foram desenvolvidos com esse objetivo, como por exemplo, o método Wilson- θ (Wilson et al, 1973), o método de α H-Newmark (Hilber e Hughes, 1978) e o método de α B-Newmark (Wood et al., 1980).

Com o objetivo de se melhorar a eficiência dos métodos de integração direta, sem, no entanto, diminuir a sua precisão, foram desenvolvidos procedimentos adaptativos para selecionar o maior incremento de tempo possível para o próximo passo do processo de solução. Entre os trabalhos envolvendo esse tema, citam-se: uma estratégia adaptativa que monitora o erro de truncamento no método Runge-Kutta (Press et. al., 1992); e uma estratégia adaptativa introduzida por Jacob (1990), baseada no trabalho de Bergan e Mollestad (1985), para algoritmos implícitos da família de Newmark. Em 1996, De Cássia (1996) utilizou três estratégias adaptativas distintas, uma no espaço e duas no tempo, na análise dinâmica bidimensional de problemas contínuos elasto e visco-plásticos.

Finalmente, a análise transiente linear e não-linear de vigas e pórticos com conexões semi-rígidas, bem como o estudo dos problemas de vibração associados com esses sistemas estruturais, podem ser encontrados nos artigos de Shi e Atluri (1989), Chan (1994), Chui e Chan (1997), e Sekulovic et al. (2002). Esses últimos autores obtiveram a resposta dinâmica não-linear de sistemas estruturais com ligações semi-rígidas também considerando a excentricidade do elemento de conexão em relação ao pilar.