

1 Introdução

1.1. Justificativa do trabalho de pesquisa

Na atualidade, os engenheiros estruturais são conscientes de que considerar eventos extremos no carregamento vai se tornar uma parte necessária do projeto estrutural. Em particular, um entendimento do comportamento estrutural durante o colapso parcial ou completo, permitirá avaliar de maneira mais precisa a integridade total do projeto estrutural quando é submetido a carregamentos extremos.

A natureza do colapso de estruturas envolve grandes deslocamentos, grandes rotações e respostas inelásticas do material como plasticidade, dano, fraturamento, entre outros, nas regiões de tensão extrema. No estado limite perto do colapso, grandes deformações são prováveis também. Para simular tal comportamento de colapso é necessário empregar modelos computacionais que considerem tanto a não linearidade geométrica quanto a não linearidade do material.

As não linearidades geométricas ocorrem quando as forças requeridas para causar deformação na estrutura são funções não lineares do deslocamento. Estas não linearidades são essenciais na simulação do colapso porque capturam os efeitos da flambagem, as grandes mudanças na forma da estrutura e as mudanças nas forças internas que são necessárias para manter a estrutura em equilíbrio estático.

Por outro lado, as não linearidades do material, considerando só efeitos elastoplásticos, ocorrem quando as regiões de tensão extrema atingem a superfície de escoamento do material, ocasionando uma perda de rigidez da estrutura que frequentemente causa uma redução considerável na carga máxima da mesma. O fenômeno de escoamento pode tornar um comportamento pós-crítico estável em um instável, já que depois do escoamento um incremento na deformação causa um decréscimo na carga.

As técnicas de análise do colapso estrutural são um assunto importante no processo de projeto em engenharia civil, mecânica, naval e aeronáutica. Para estudar as instabilidades estruturais que levam ao colapso de estruturas elásticas e inelásticas, costuma-se avaliar os pontos críticos, que podem ser pontos limite ou de bifurcação, ao longo dos caminhos ou trajetórias de equilíbrio definidas no espaço carga-deslocamentos. A avaliação exata destes pontos é necessária para poder definir as condições críticas na funcionalidade da estrutura.

No entanto, os usuários de programas comerciais de elementos finitos, trabalham frequentemente na modelagem deste tipo de problemas de maneira parcial. Usualmente, as cargas críticas dos caminhos de equilíbrio são calculadas através de uma análise linearizada da carga crítica, a qual leva a resultados errados em alguns casos.

A análise linearizada da carga crítica prediz a resistência teórica de flambagem de uma estrutura ideal linear elástica. Na análise é assumido que a configuração da estrutura não muda no processo de carregamento, ou seja, as equações de equilíbrio são sempre referidas à configuração indeformada da estrutura. As cargas críticas são calculadas nesta análise formulando um problema de autovalores que torna singular a matriz de rigidez tangente da estrutura.

A suposição de que uma estrutura se comporta elasticamente e deslocamentos e rotações são desprezíveis até atingir o valor da carga crítica nem sempre é verdadeira. Se alguma parte da estrutura desenvolve deformações plásticas e mudanças relativamente grandes na geometria, a análise linearizada da carga crítica levará a resultados errados, usualmente maiores que o resultado exato. Neste tipo de casos a análise da instabilidade da estrutura deve incluir a não linearidade geométrica e não linearidade do material.

Trabalhos desenvolvidos por Zhehua et al. (2002), Zhou et al. (2011); e Novoselac et al. (2012); mostram os efeitos na estimação do valor das cargas críticas quando as não-linearidades geométricas e físicas não são consideradas.

Pelos motivos expostos anteriormente, neste trabalho pretende-se incluir os efeitos das não linearidades geométricas e físicas, na estimação das cargas críticas presentes nas trajetórias de equilíbrio definidas pelas variáveis nodais e o parâmetro de carga.

1.2.

Objetivos do trabalho e tipo de problemas a considerar

No método dos elementos finitos existem dois tipos de categorias para analisar o problema de flambagem ou colapso de estruturas. A primeira emprega um problema de autovalor, formulado a partir de uma linearização, e a outra uma análise não linear completa. Na primeira categoria incluem-se dois tipos de problemas de autovalores, uma baseada na análise linear que emprega matrizes de rigidez iniciais; e outra baseada na análise não linear que emprega matrizes de rigidez atualizadas que consideram até certo nível as não linearidades geométricas e físicas da estrutura. No entanto, no caso da análise não linear completa os efeitos não lineares geométricos e físicos são considerados em sua totalidade durante toda a análise.

O principal objetivo deste trabalho é poder comparar de maneira qualitativa, em base a resultados quantitativos, os três tipos de técnicas de análise do colapso estrutural apresentados. Para avaliar os resultados das três técnicas de colapso, desenvolveu-se um programa computacional em Matlab baseado no método dos elementos finitos para o processamento dos dados e pós-processamento dos resultados. No pré-processamento, geração de dados (malhas), e visualização das tensões desenvolvidas nos elementos empregou-se o programa GID.

Na implementação do programa considerou-se a formulação das equações de equilíbrio na configuração deformada da estrutura e um comportamento inelástico do material através do modelo elastoplástico de Von Mises (J2) com encruamento isotrópico baseado na decomposição aditiva, já que na maioria dos casos, o colapso das estruturas de engenharia civil envolvem grandes deslocamentos, grandes rotações e relativamente pequenas deformações.

Nas últimas décadas muitos trabalhos na área da instabilidade de estruturas elásticas e inelásticas foram desenvolvidos por muitos autores. Na maioria dos casos foram empregados elementos de pórtico na análise de estruturas planas como vigas, colunas, pórticos e arcos. Neste trabalho pretende-se estudar a instabilidade destas estruturas planas adotando uma aproximação de meio contínuo considerando um estado plano de tensões, que permitirá aproveitar as vantagens da formulação Lagrangeana Total neste tipo de estruturas. Trabalhos feitos por Wood and Zienkiewicz (1976), e Guimarães (2006), consideraram uma aproximação de meio contínuo para avaliar cargas críticas e comportamento pós-crítico em estruturas planas.

Adotando as hipóteses descritas acima, pretende-se abordar os seguintes problemas presentes numa análise computacional do colapso:

- Incorporar as não linearidades geométricas através da formulação lagrangeana Total.
- Levar em consideração a plasticidade distribuída, que permite uma propagação inelástica ao longo da seção e comprimento do elemento, através da aproximação de contínuo e um modelo elastoplástico de Von Mises (J2).
- Considerar as deformações cisalhantes e distorções da seção transversal, através da teoria do meio contínuo adotada.
- Prevenir o efeito de 'shear locking' empregando elementos isoparamétricos de ordem tal que não permitam a necessidade de uma malha refinada.
- Considerar as altas não linearidades da curvatura ao longo do elemento pela formação de regiões plásticas, através da suficiente discretização do domínio.
- Capturar as respostas carga-deslocamento de estruturas instáveis que apresentam uma alta não linearidade, onde a carga e/ou o deslocamento decrescem no progresso da solução, mediante o uso do método de controle por deslocamentos e comprimento de arco.

Outro objetivo do presente trabalho é dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos na área de instabilidade e dinâmica de estruturas no departamento de engenharia civil da PUC-Rio. Trabalhos que abordaram estudos quase estáticos de colapso ou instabilidade de estruturas planas foram Gabbay (1977), Sousa (1984), Guimarães (1999, 2006) e Burgos (2005).

1.3. Organização dos capítulos restantes

Além da introdução, este trabalho conta com os seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – Aqui se apresentam todos os fundamentos teóricos das técnicas de análise do colapso que são empregadas no método dos elementos finitos. Descrevem-se a análise não linear completa,

a análise incremental da carga crítica, e a análise linearizada da carga crítica.

- Capítulo 3 – Neste capítulo são apresentadas as características próprias do estado plano de tensões que devem ser consideradas na implementação computacional. São apresentadas as matrizes que relacionam as deformações e deslocamentos, matrizes de rigidez, vetor de forças internas, algoritmo de integração das tensões, e exemplos de validação da implementação numérica.
- Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados exemplos de colapso ou flambagem de estruturas planas como vigas, colunas, pórticos e arcos. Aqui são estimadas as cargas críticas mediante as três técnicas de análise de colapso descritas.
- Capítulo 5 – Aqui são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.