

1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, a otimização estrutural vem se destacando dentro da engenharia. O crescente desenvolvimento dos microcomputadores aliado à automação dos procedimentos de análise viabilizaram a sua aplicação. Desta forma, as técnicas de otimização numérica se tornaram valiosas na busca pelo projeto ótimo.

A formulação clássica dos problemas de otimização de dimensões busca minimizar o peso de uma estrutura, onde é adotada a hipótese do comportamento linear físico e geométrico, o que simplifica bastante as etapas de análise estrutural e de avaliação da sensibilidade, aumentando a eficiência e contribuindo para a popularização da otimização.

Em geral, a formulação clássica gera projetos seguros e econômicos. No entanto, frequentemente o modelo linear não permite a avaliação correta da capacidade de carga da estrutura.

Na busca pela estrutura ideal, utilizando-se a formulação clássica, muitas vezes se aumenta a esbeltez de um dado elemento estrutural, o que pode gerar significativas mudanças no seu mecanismo de colapso. Desta forma, a não-linearidade geométrica se torna cada vez mais importante e dá origem a vários fenômenos que não são encontrados em sistemas lineares como a existência de múltiplas configurações de equilíbrio (estáveis e instáveis) e de pontos críticos (limite e bifurcação) ao longo do caminho não-linear de equilíbrio.

Assim, durante muito tempo a otimização foi criticada por gerar estruturas com sérios problemas de instabilidade. Contudo, estes problemas não são inerentes à otimização, podendo ser evitados através da utilização de restrições e procedimentos de análise apropriados. A formulação do problema é de suma importância na solução encontrada, pois nenhuma solução será mais “ótima” do que a sua formulação permite.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia de otimização de estruturas reticuladas planas com segurança em relação à instabilidade. Para atingir este objetivo, a formulação proposta considera os

efeitos da não-linearidade geométrica no comportamento da estrutura e inclui uma restrição sobre a carga crítica

Esta dissertação é parte integrante de algumas linhas de pesquisa do DEC/PUC-Rio, em particular da linha de Aplicação de Técnicas de Otimização, Instabilidade e Dinâmica das Estruturas.

As técnicas de otimização vêm sendo largamente aplicadas a problemas de engenharia estrutural no DEC/PUC-Rio e diversos trabalhos vêm sendo publicados nesta área. O trabalho de Eboli (1989) foi o precursor desta linha e traz uma descrição detalhada do algoritmo de Han-Powell de programação não-linear. Mais recentemente, Parente (2000) estudou a otimização de forma de estruturas geometricamente não-lineares.

Na parte de instabilidade, Silveira (1995) forneceu uma metodologia geral de solução de sistemas de equações algébricas não-lineares. Utilizando a mesma metodologia, Rocha (2000), realizou um estudo comparativo de diversas estratégias de iteração e incremento de carga através da análise de vários exemplos numéricos de sistemas estruturais e Galvão (2000) implementou diversas formulações de elementos finitos geometricamente não-lineares.

Os algoritmos de programação matemática utilizados neste trabalho empregam os gradientes da função objetivo e das restrições em relação às variáveis de projeto para determinar a direção de busca do processo de otimização. Esses gradientes são calculados com base nos gradientes das respostas da estrutura (sensibilidades). Portanto, a convergência do processo de otimização é fortemente influenciada pela qualidade das sensibilidades calculadas. A análise de sensibilidade de estruturas geometricamente não-lineares tem apresentado grandes progressos nos últimos anos e as equações básicas já são bem conhecidas (Kleiber, 1997; Haftka, 1992).

As expressões necessárias ao cálculo analítico das sensibilidades são apresentadas no presente trabalho. É importante ressaltar que os resultados obtidos através da aplicação dessas expressões representam as sensibilidades exatas de uma dada malha de elementos finitos.

1.1

Escopo do trabalho

Para facilitar o entendimento, a dissertação foi dividida em diversos capítulos, cujo conteúdo é apresentado a seguir.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos gerais de programação matemática e os algoritmos utilizados neste trabalho. Este capítulo mostra quais as informações necessárias para os algoritmos de otimização, com o objetivo de facilitar o entendimento da organização do sistema computacional implementado.

No Capítulo 3 estuda-se a análise não-linear de estruturas através do Método dos Elementos Finitos. A formulação dos elementos de pórtico de acordo com o procedimento Lagrangiano Atualizado é discutida em detalhes. Os métodos de determinação do caminho de equilíbrio de estruturas não-lineares são apresentados, bem como o método utilizado para a determinação dos pontos críticos. Por fim, são apresentados exemplos numéricos que mostram a qualidade dos elementos finitos e procedimentos numéricos implementados.

No Capítulo 4 é feita uma explanação sobre o cálculo dos gradientes dos deslocamentos e da carga crítica (limite) de um modelo de elementos finitos com comportamento geometricamente não-linear onde, considerando-se os procedimentos de análise da análise não-linear, algumas aproximações são feitas tendo em vista uma melhor eficiência computacional. São apresentados exemplos numéricos com o objetivo de validar as implementações realizadas e de comparar a precisão do método.

No Capítulo 5 é apresentada a formulação do modelo de otimização de dimensões de estruturas bidimensionais. O modelo proposto inclui restrições sobre deslocamentos e carga crítica, podendo ser utilizado tanto para estruturas lineares quanto não-lineares. Também são apresentados os programas que fazem parte do sistema computacional para otimização de dimensões e exemplos de estruturas otimizadas por este sistema.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.