

# 1 Introdução

A análise e o projeto de estruturas têm passado, nas últimas décadas, por processos de mudança. Deve-se esse fato principalmente aos avanços computacionais e ao crescente desenvolvimento das técnicas e dos métodos de análise. Busca-se, através desses processos adotar modelos mais sofisticados a fim de reproduzir de forma mais realista o comportamento das estruturas.

Dentre as simplificações adotadas na análise de estruturas está a adoção de valores determinísticos para variáveis aleatórias. As propriedades mecânicas dos materiais como módulo de elasticidade e resistência, as dimensões dos elementos, devido às imperfeições construtivas e às cargas são alguns exemplos de variáveis aleatórias que usualmente são substituídas por valores determinísticos. Essa simplificação leva a uma resposta da estrutura também determinística ao invés de uma resposta estatística em termos de valores médios e dispersões a qual seria obtida com a consideração da aleatoriedade das variáveis e com o emprego de métodos estatísticos de análise.

Segundo SEXSMITH (1999), a idéia da análise estatística de estruturas foi introduzida por FREUDENTHAL em um trabalho apresentado em 1950. Neste, usando a teoria da probabilidade e da estatística foi descrita a base da segurança estrutural. A partir deste trabalho, diversos métodos para a análise estatística de estruturas têm sido estudados. De acordo com GUAN & MELCHERS (1999), a simulação de Monte Carlo (SMC) é o mais empregado dos métodos devido à simplicidade e facilidade de implementação computacional. Entretanto, o grande número de simulações necessárias nesse método faz com que outros sejam estudados.

Diversos autores, compartilhando desta opinião sobre a simulação de Monte Carlo, buscam outras alternativas para a análise estatística de estruturas. Nesse sentido foi apresentado por HART (1982) o método estatístico linear, o qual utiliza uma expansão em série de Taylor para formular uma relação linear entre a

resposta aleatória e os parâmetros aleatórios da estrutura. GUAN & MELCHERS (1999), FALSONE & IMPOLLONIA (2002), MATTHIES, BRENNER, BUCHER & SOARES (1997) apresentam em seus trabalhos formulações para a análise probabilística via elementos finitos (PFE). Outros autores trabalham de maneira mais restrita, desenvolvendo seus estudos para tipos específicos de materiais. ARAÚJO (2001) apresenta a utilização da análise estatística para a determinação da confiabilidade no projeto de pilares de concreto. PAZ (2000) também realizou estudos probabilísticos referentes ao concreto. MIRZA (1998) e SAKURAI, ELLINGWOOD & KUSHIYAMA (2001) desenvolveram estudos relacionados às estruturas metálicas.

Um grande número de autores utiliza a análise estatística para tratar os problemas referentes ao vento, como HONG, BEADLE & ESCOBAR (2001) e para análise dinâmica, como PAPADIMITRIOU, KATAFYGIOTIS & BECK (1995). De maneira geral, a análise estatística de estruturas é utilizada para a determinação da confiabilidade das estruturas.

A otimização de estruturas tem sido vista, nos últimos anos, não apenas como uma ferramenta de minimização do peso das estruturas, despreocupada com fatores relacionados à estabilidade e a segurança das estruturas, mas sim como uma ferramenta auxiliar ao projetista na busca de projetos “ótimos” que atendam critérios de estabilidade, como apresentado por PARENTE (1995) no seu trabalho de otimização de estruturas sujeitas à instabilidade global, ou a estruturas submetidas a restrições de natureza dinâmica, como no estudo realizado por CASTRO (1999), onde se otimizou a estrutura de um satélite atendendo restrições de frequência lateral ou como no trabalho de MEIRA (2000), onde se estudou a otimização de cascas submetidas a carregamento dinâmico. Além desses enfoques, cita-se o grande número de trabalhos que vem sendo realizados referentes à otimização de forma, onde se estuda a geometria da estrutura, a otimização topológica, que trata da distribuição dos materiais, e a otimização das dimensões das seções transversais.

Apesar do grande desenvolvimento na área referente à análise estatística de estruturas, a otimização estrutural continua sendo efetuada basicamente em conjunto com a análise determinística. VANDERPLAATS (1984), sugere uma otimização estrutural que atenda critérios estatísticos. Porém, pouca ênfase tem

sido dada a estes estudos. Uma vez verificada a segurança ou confiabilidade da estrutura, raramente são estudadas alternativas que, por sua vez, também podem ser viáveis e mais econômicas.

Muitas vezes tem-se como fator limitante de um projeto estrutural um determinado valor de deslocamento ou uma determinada tensão. Geralmente, por facilidades construtivas, são utilizadas peças de seção transversal constante ou um pequeno número de seções transversais distintas para as barras de treliças. Este procedimento muitas vezes pode levar a estruturas antieconômicas e que subutilizem a capacidade resistente dos materiais devido a fatores de segurança demasiadamente elevados.

O presente trabalho propõe a otimização de estruturas reticuladas, a priori treliças e pórticos planos, com a consideração de incertezas nas propriedades dos materiais. Supondo-se que a probabilidade de determinados deslocamentos ultrapassem valores prescritos seja menor que um valor pré-determinado, ou que a probabilidade de falha de um determinado elemento seja inferior a um valor determinado, busca-se, pela alteração das dimensões dos elementos, a estrutura mais leve que atenda tais restrições.

Com esse objetivo traçado, desenvolveu-se um programa de computador associando métodos de análise e análise de sensibilidade estatística de estruturas, técnicas de programação matemática e computação gráfica para a otimização da seção transversal de treliças e pórticos planos sujeitos a restrições de natureza probabilística. Salientam-se as limitações do programa desenvolvido no que se refere aos tipos de restrições formuladas e também aos tipos de variáveis aleatórias consideradas, sabendo-se da importância do acréscimo de outras restrições e da consideração da aleatoriedade de dimensões e carregamentos. Pretende-se, desta forma, que este trabalho seja o passo inicial no desenvolvimento de uma ferramenta de otimização de estruturas com a consideração de incertezas.

## 1.1 Organização da dissertação

O capítulo 2 desse trabalho apresenta aspectos relacionados às incertezas na engenharia de estruturas assim como fundamentos teóricos de probabilidade e de estatística. Faz-se inicialmente uma apresentação histórica da evolução desse ramo da matemática, seguida por apontamentos relacionados a incertezas na engenharia estrutural e pela descrição sucinta dos principais conceitos da probabilidade e da estatística. Os tópicos apresentados nesse capítulo estão direcionados e são de grande importância para a compreensão dos capítulos seguintes.

O capítulo 3 traz aspectos referentes à análise elástica e à análise de sensibilidade de estruturas reticuladas. Juntamente com a importância e a aplicabilidade da análise de sensibilidade, apresentam-se alguns métodos para sua realização assim como alguns exemplos de aplicação. Este capítulo também traz itens referentes à análise de estruturas que serão utilizados no desenvolver do trabalho.

A análise estatística de estruturas é descrita no capítulo 4. Apresenta-se nesse capítulo, além da análise estatística exata, o método de simulação por Monte Carlo e a análise estatística linear. Demonstra-se no final do capítulo alguns exemplos e comparações.

No capítulo 5, abordam-se novamente tópicos referentes à análise de sensibilidade, sendo desta vez específicos à análise estatística. Demonstrem-se exemplos para os diferentes tipos de análise estatística.

Os fundamentos de programação matemática como condições de ótimo e o algoritmo utilizado no programa desenvolvido são apresentados no capítulo 6. Inicialmente, apresenta-se a formulação geral de um problema de otimização, sendo depois descrito o algoritmo de pontos interiores, utilizado na solução do problema.

No capítulo 7, descreve-se a formulação para o problema de otimização adotada no trabalho. Apresentam-se a função objetivo e as restrições do problema. Nesse capítulo, faz-se a otimização de algumas estruturas com a utilização do

programa desenvolvido a fim de verificar a economia obtida e a aplicabilidade do programa.

As principais considerações referentes à implementação computacional do programa proposto são apresentadas no capítulo 8. A metodologia, as ferramentas computacionais empregadas para o desenvolvimento do programa, as vantagens que o tipo de programação adotado no trabalho possui em relação à programação convencional e um esquema do mesmo também é apresentado. Finalizando este capítulo, demonstram-se as principais telas do programa.

Com referência nos capítulos antecedentes, fazem-se no capítulo 9, as considerações finais sobre o trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.