

7

Conclusões e Sugestões

Como evolução natural dos processos tradicionais de otimização estrutural, a incorporação de métodos probabilísticos a fim de se garantir, de maneira racional, a segurança dos projetos, constitui-se de um grande desafio, tanto de ordem computacional quanto teórica. Do ponto de vista computacional, comparada com a otimização determinística, a otimização baseada em confiabilidade apresenta um grande acréscimo no número de análises estruturais e análises de sensibilidade, resultando num enorme esforço computacional, que por sua vez pode se tornar proibitivo para estruturas de grande porte. Do ponto de vista teórico, a consolidação de várias áreas de estudo se fazem necessárias, onde, cada tema isoladamente representa uma área de conhecimento bastante vasta.

Nos trabalhos desenvolvidos pelo DEC/PUC-Rio se consolidou o uso da análise de sensibilidade e das técnicas de programação matemática na solução de problemas de otimização estrutural. Objetivando dar continuidade a estes trabalhos, a análise de confiabilidade, em particular os métodos baseados na busca pelo ponto de projeto, que fazem uso destes conceitos, foram incorporados ao problema de otimização estrutural. Para isto foram implementadas rotinas para a avaliação das restrições probabilísticas e das suas sensibilidades, que, acopladas a metodologia tradicional de otimização, possibilitaram a solução do problema de otimização baseada em confiabilidade.

O presente trabalho teve como objetivo fundamental considerar as incertezas associadas às propriedades dos materiais, às propriedades geométricas e aos carregamentos no processo de otimização estrutural. Para isto, um sistema computacional para a solução de problemas de RBDO foi desenvolvido. Este desenvolvimento requereu a implementação e a integração dos seguintes módulos: programação matemática, análise estrutural, análise de sensibilidade e análise de confiabilidade. Cada uma destas etapas foi discutida nos capítulos anteriores a alguns aspectos são destacados a seguir:

- O método utilizado neste trabalho para a determinação dos pontos críticos na análise não linear de estruturas foi um método indireto e se baseia na idéia de se reduzir o tamanho dos incrementos na região

próxima ao ponto crítico. O uso deste método se deu principalmente pela facilidade de implementação comparada com métodos diretos por exemplo e, conseqüentemente, um desempenho ineficiente computacionalmente já era esperado. Na busca pelo ponto crítico o algoritmo gerou uma grande quantidade de pontos de equilíbrio intermediários que resultaram na lentidão do processo. Apesar disto, como a restrição de carga crítica global é única no processo de otimização, este problema não foi tão sério comparando-se com o tempo despendido para a avaliação das demais restrições.

- A análise de sensibilidade da resposta estrutural desempenha um importante papel na otimização baseada em confiabilidade. Neste trabalho, as expressões necessárias para sua avaliação foram desenvolvidas usando-se o método da diferenciação direta. Equações unificadas foram apresentadas para a sensibilidade da resposta em relação as propriedades dos materiais, as coordenadas nodais, as áreas de seção transversal e aos carregamentos. A sensibilidade em relação aos parâmetros de forma permitiram se incluir as incertezas sobre as coordenadas nodais no modelo. Geralmente este tipo de incerteza é negligenciada nas aplicações de confiabilidade, porém as mesmas representam uma significativa fonte de incerteza.
- Para a avaliação das restrições probabilísticas foram implementados os métodos RIA e PMA. O primeiro se baseia na determinação direta da confiabilidade, o que, para problemas de RBDO pode se tornar inconveniente uma vez que muitas restrições se apresentam bastante “folgadas” produzindo com isso probabilidades de falha muito pequenas e muitas vezes impossíveis de serem determinadas. O segundo método avalia uma função de performance para uma dada probabilidade de falha alvo, o que, conceitualmente é um problema mais fácil de resolver. Além disso, nenhum problema de convergência na avaliação das restrições foi observado. Diante disto, pode-se dizer que PMA é mais indicada na solução de RBDO.
- A RBDO se tornou muito mais eficiente quando se utilizou informações da iteração anterior, principalmente quando as variáveis de projeto sofrem pequenas variações de uma iteração para outra. Esta eficiência se deu pela redução no número de iterações utilizadas na avaliação das restrições probabilísticas.

Em resumo, os resultados demonstram que o presente desenvolvimento pode ser usado com eficiência na solução de problemas de otimização baseada

em confiabilidade de treliças espaciais suscetíveis a flambagem e pode servir de base para futuros desenvolvimentos, alguns dos quais são relatados a seguir.

7.1

Sugestões para Trabalhos Futuros

É importante destacar que este é apenas um primeiro trabalho sobre o tema abordado. A linha de pesquisa na área de otimização baseada em confiabilidade é incipiente no Brasil e, em particular, na PUC-Rio. Todo o ferramental desenvolvido neste trabalho serve de base para muitas aplicações práticas, conseqüentemente um campo fértil para desenvolvimentos futuros.

Diversos aprimoramentos podem ser sugeridos neste trabalho, a maior parte deles como extensões de maneira a dar mais abrangência ao código, sendo, alguns deles, descritos a seguir:

Análise Estrutural, Análise de Sensibilidade e Instabilidade

- Incluir novos elementos, principalmente elementos de pórtico tridimensionais que são bastante utilizados e podem apresentar sérios problemas de instabilidade. Problemas como por exemplo torres de transmissão e linhas de ancoragem, podem ser analisados a partir deste elemento.
- Estudar a viabilidade da utilização de outros métodos para a determinação de cargas críticas e para o cálculo de suas sensibilidades, de maneira a acelerar o processo de otimização.

Análise de Confiabilidade

- Tratar grandezas que apresentam uma variação com o tempo (dependentes do tempo). Nos problemas tratados neste trabalho todas as variáveis foram tratadas como independentes do tempo mas, algumas grandezas, como por exemplo as ações ambientais, variam com o tempo. Desta forma, a definição de campos randômicos e processos estocásticos na análise de confiabilidade se fazem necessários.

Processo de Otimização

- Utilizar novos algoritmos de PM, tanto para determinação do MPP quanto para a solução do problema de otimização estrutural.
- Considerar a simetria e colinearidade das barras, a fim de obter estruturas passíveis de serem utilizadas na prática da engenharia. Os trabalhos de Falcón [20, 21] podem servir como referência na solução destes problemas.

- Implementar técnicas eficientes para a verificação das restrições probabilísticas. É comum em problemas de otimização que poucas restrições dominem o projeto, desta forma as demais, ditas inativas, não contribuem para a solução ótima. Alguns trabalhos propõem o uso de métodos aproximados na avaliação da confiabilidade, desta forma, caso a restrição atenda a um certo critério, que indica que a mesma está ativa, um outro método mais preciso é usado para a avaliação da confiabilidade. Em Youn et al. [83, 84] esta metodologia é explorada com sucesso e pode servir como referência.

Por fim, destaca-se também como sugestão o estudo e a implementação de outras metodologias para a consideração de incertezas no processo de otimização estrutural. Em RBDO a definição dos parâmetros estatísticos tem papel fundamental na resposta obtida. A definição incorreta ou aproximada destes parâmetros pode gerar uma avaliação incorreta da probabilidade de falha, invalidando portanto o uso de RBDO. Quando as informações estatísticas não estão disponíveis ou então não são suficientemente precisas pode-se utilizar a “Otimização Baseada em Possibilidade” (PBDO, do inglês *Possibility-Based Design Optimization*). Este método não requer a definição de funções de distribuição para se descrever as variáveis aleatórias, técnicas como *Interval set*, *Convex modeling* e *Fuzzy set* são usadas para se modelar as incertezas. Um outra formulação para se levar em conta as incertezas no processo de otimização estrutural é o “Projeto Robusto”. Esta formulação, conceitualmente diferente das duas anteriores (RBDO e PBDO), busca uma redução na variabilidade da resposta do sistema. No projeto robusto obtém-se uma estrutura menos sensível a variações do sistema. A medida de variabilidade se dá, por exemplo, através do desvio padrão da função de performance e pode ser usada tanto na função objetivo quanto na restrições do problema de otimização.