

6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1

Conclusões

O objetivo da dissertação foi cumprido, ou seja, aprender a utilizar o módulo de otimização do ANSYS, e aplicar o módulo no projeto de arquibancadas reutilizáveis. Para ter certeza se o módulo de otimização estava sendo usado corretamente, o programa ANSYS foi utilizado na otimização de várias estruturas como vigas, pórticos e treliças planas e espaciais, cujos projetos ótimos se encontram na literatura técnica. Os resultados fornecidos pelo módulo de otimização do ANSYS foram, na maioria das vezes, muito semelhantes àqueles encontrados na literatura e por vezes melhores do que os das referências citadas. Esse fato deve-se provavelmente a diferença entre o algoritmo de otimização utilizado pelo ANSYS e os algoritmos usados nas referências. Muitas vezes, se um problema de otimização não é convexo, vários ótimos locais podem ser obtidos. O fato curioso é que o módulo de otimização do ANSYS forneceu soluções melhores quando diferentes das encontradas na literatura.

O algoritmo, apesar de certas limitações como o uso de diferenças finitas para a análise de sensibilidade, mostrou-se de enorme eficiência em uma ampla faixa de problemas estruturais. Comportou-se satisfatoriamente nas otimizações de estruturas planas e espaciais. Pode-se observar a importância das restrições das variáveis de projeto e de estado nos casos tridimensionais. O projeto ótimo foi obtido para complexos casos com restrições de tensão e deslocamento, além de sistemas com dois e até três casos de carregamento atuantes simultânea e independentemente na estrutura.

Para problemas de viga, por exemplo o caso de viga engastada e em balanço (exemplo V3, item 4.4.1.3), o ótimo foi obtido fornecendo uma estrutura mais leve, tão econômica quanto a da referência bibliográfica, com espessura variável e submetida às restrições de tensão e deflexão. Nos casos de estruturas

planas, o pórtico do exemplo P1 (item 4.4.2.1), sujeito a quatro restrições de flexão, o projeto ótimo foi também alcançado.

Os casos de treliças planas mostraram boa adequação ao algoritmo do ANSYS, haja vista os excelentes resultados alcançados para as clássicas treliças de três barras (*3-bar truss*, exemplo T2, item 4.4.2.2) e treliça de dez barras (*10-bar truss*, item 4.4.2.3), tendo esta última seus resultados equivalentes aos obtidos por técnicas de programação matemática e por técnica mais recente de computação evolucionária, aqui no caso a técnica de otimização por algoritmos genéticos.

Com relação aos casos de estruturas em 3D, a importância das restrições laterais ficou evidente no caso da estrutura de trinta e duas barras (exemplo T3, item 4.4.2.4), submetida apenas a restrições de tensão, pois o algoritmo do ANSYS, para o caso de carregamento dado, forneceu uma estrutura menos contraventada, reduzindo significativamente o volume, quando comparado a resultados obtidos por três *softwares* específicos para a otimização de treliças.

No caso (T4) da Torre de Transmissão (*twenty-five bar transmission tower*, item 4.4.2.5) submetida a dois casos de carregamento, além de restrições de tensão e deslocamento, o comportamento do módulo de otimização deixou claro sua confiabilidade em problemas mais específicos. No último exemplo (T5, item 4.4.2.6), com três casos de carregamento, a torre para estocagem de material com setenta e duas barras, obteve-se grande redução de peso, merecendo o problema ser mais detalhadamente investigado, porém, nos outros casos citados, percebe-se que alguns autores obtiveram grandes reduções de peso das estruturas, o que confere validade ao resultado da treliça de setenta e duas barras (*seventy-two-bar truss*).

Ou seja, para as análises mais frequentes de estruturas reticuladas, o ANSYS mostrou-se devidamente eficiente. Em casos mais específicos, como os de arquibancadas reutilizáveis, o módulo de otimização permite que o projetista tenha uma idéia de como dispor inicialmente de forma mais adequada o contraventamento, para obter uma melhor aproximação de faixas seguras de frequências e, a partir disso, pode-se otimizar a estrutura a partir da concepção de projeto.

Uma possível implementação em linguagem APDL de técnicas mais modernas e computacionalmente mais rápidas, seria de grande melhoria no que

diz respeito ao tempo de análise, pois percebe-se certa dificuldade de se estimar o tempo de solução, já que devido às limitações do método de primeira ordem e da utilização do método de diferenças finitas na análise de sensibilidade interna, o tempo de solução, por vezes, não corresponde a maior ou menor complexidade da estrutura analisada.

Em sendo o módulo de otimização uma ferramenta considerada de uso complexo por parte das empresas e instituições que utilizam a plataforma ANSYS, o trabalho aqui apresentado espera facilitar futuras incursões no uso do módulo de otimização para estruturas reticuladas, pois demonstrou ser viável o uso do algoritmo. Sugere-se que através de programação em APDL seja possível dispor de projetos mais otimizados, mais precisos e econômicos.

Porém, constatou-se certa deficiência do ANSYS no que se refere a análise de sensibilidade. Além de utilizar o método das diferenças finitas para a análise de sensibilidade, que é um método pouco eficiente, no que diz respeito ao esforço computacional, ainda depende da perturbação relativa da variável. O ANSYS não permite que uma análise de sensibilidade seja realizada fora do módulo de otimização. Em outras palavras, se o projetista estiver interessado em realizar uma análise de sensibilidade, apenas poderá ter uma idéia de sensibilidades locais de projeto através da comparação de um projeto inicial com um projeto no qual a ferramenta de avaliação de gradiente calculou os gradientes da função objetivo e das variáveis de estado com respeito às variáveis de projeto, no entanto fornecendo como saída os novos valores das variáveis envolvidas e não um valor de referência da análise de sensibilidade. O ideal seria que houvesse um módulo de análise de sensibilidade.

Ao se aplicar o módulo de otimização do ANSYS em busca do projeto ótimo de arquivancadas metálicas reutilizáveis, verificou-se, o que a princípio é óbvio, que o bom senso e a sensibilidade do engenheiro são fundamentais na definição do projeto. A partir de uma topologia pré-definida foi impossível obter um projeto viável no caso da arquivancada tipo AR1, apesar das mudanças nas variáveis de projeto. Somente uma mudança na concepção do projeto que pudesse elevar a primeira frequência natural da estrutura, poderia conduzir a um projeto que atendesse às restrições em termos de frequência própria. Isso foi possível introduzindo novas barras na estrutura espacial que melhorassem o contraventamento da mesma.

No caso da arquibancada tipo MC1, a análise modal revelou que as frequências estavam fora de faixas críticas, sendo possível apenas através da otimização adequar o projeto estático para as limitações de tensão e frequência natural.

6.2

Sugestões

Devido aos limites de tempo no desenvolvimento da dissertação, não foi possível testar toda a potencialidade do módulo de otimização do ANSYS, assim sugere-se como continuação desta pesquisa os seguintes pontos:

- a) Introdução de novas restrições referentes à flambagem local das barras;
- b) Examinar a possibilidade de se obter projetos ótimos para estruturas com comportamento não-linear, seja geométrico ou do material;
- c) Investigar uma possível obtenção de otimização de projetos para estruturas submetidas a vibrações forçadas;
- d) Utilizar o módulo de otimização de forma na qual as variáveis de projeto sejam parâmetros que definam a geometria do contorno ou de “furos” internos em estruturas planas (2D);
- e) Verificar a possibilidade de serem realizadas otimizações topológicas com eficiência;
- f) Verificar a possibilidade de se implementado um módulo de contraventamento baseado nos cinco critérios propostos;
- g) Estudar a possibilidade de se acoplar outros algoritmos ao módulo de otimização do ANSYS através da programação em APDL;
- h) Analisar uma possível implementação dos métodos analítico e semi-analítico para a análise de sensibilidade ao módulo de otimização do ANSYS;
- i) Verificar a possibilidade do desenvolvimento de um módulo autônomo para a análise de sensibilidade no ANSYS, talvez através de *plug-in*;
- j) Quanto ao estudo de otimização das arquibancadas: executar modelagem completa de uma estrutura, otimização considerando vibração forçada com efeitos transientes e não-linearidades, além de testes de campo.

Pode-se citar vários temas de trabalhos futuros, relacionados a inúmeros problemas a serem explorados no uso do módulo de otimização aplicado as arquibancadas. No entanto as propostas de futuras pesquisas se limitam a dar continuidade no que diz respeito ao trinômio otimização, dinâmica e arquibancadas.

Têm sido conduzidos trabalhos no mundo inteiro a fim de estudar as ações humanas em estruturas, enquanto examinando o comportamento dinâmico de arquibancadas e resposta de arquibancadas ao carregamento. As pesquisas futuras poderiam focar, numericamente e/ou experimentalmente, um processo de compreensão do comportamento de arquibancadas usadas para ambos eventos: esportivos e concertos populares. O foco das pesquisas seria a busca de um método simples e seguro para avaliar a resposta de arquibancadas ao carregamento rítmico de multidão, melhorando o comportamento dinâmico estrutural de arquibancadas de qualquer tipo (construções temporárias e permanentes), com o objetivo de otimizar o projeto dessas estruturas, levando-se em consideração investigações sobre problemas dinâmicos no projeto de arquibancadas para eventos esportivos e ‘shows’ de música.

Em todos os trabalhos ressalta-se a necessidade de análises dinâmicas transientes, já que entende-se que deve-se considerar a característica de vibrações forçadas com efeitos transientes, com as cargas de excitação tendo caráter oscilatório, a exemplo do carregamento em arquibancadas, onde as forças externas podem ser representadas pela excitação dos ocupantes ao se movimentarem. Para o caso específico de otimização de estruturas reutilizáveis, os estudos envolveriam influência de ações humanas, modelagem do corpo humano em vibrações horizontais, análise de sensibilidade com comportamento dinâmico e influência da resposta ao carregamento rítmico de multidão.