

1

INTRODUÇÃO

Estruturas metálicas de arquibancadas são utilizadas em grandes eventos públicos, sendo compostas por barras e conectores. O elevado nível de cargas rítmicas aplicadas a tais estruturas exige que elas sejam projetadas de modo a evitar o efeito de ressonância dinâmica. Isso significa que, ao se otimizar essas estruturas, deve-se considerar a restrição relativa às frequências fundamentais naturais que devem estar fora da faixa das frequências solicitantes. Além disso, é necessário que a estrutura responda adequadamente às cargas estáticas.

1.1

Revisão bibliográfica

Cita-se resumidamente alguns trabalhos relevantes ligados à questão de otimização de estruturas metálicas 3D com restrição de frequência. Em seguida expõe-se breve revisão a respeito do tema das arquibancadas reutilizáveis e seus problemas de dimensionamento frente às solicitações dinâmicas. Alguns trabalhos citados nesta seção são alvo de maiores comentários no Capítulo 5.

Dentre as publicações que versam sobre otimização de estruturas metálicas 3D, com restrição de frequência, algumas tratam de otimização de dimensões, isto é, controlam valores paramétricos do modelo tais como larguras, alturas, áreas, espessuras, diâmetros, etc. (como é o caso dessa dissertação). Outros trabalhos tratam de otimização de forma, a qual está associada a variações geométricas do domínio de definição da peça através da modificação das superfícies (3D) ou contornos (2D) que a definem e, por fim, otimização topológica, que procura estabelecer completamente a definição geométrica ótima da estrutura a partir do conhecimento da ação externa a ser suportada pela mesma, do tipo de desempenho ótimo a ser atingido e das restrições mecânicas e geométricas impostas.

Algumas referências que valem ser destacadas são citadas a seguir. Salajegheh, E., [1] (2000) otimiza o projeto de pórticos espaciais de torres

metálicas com restrição de frequência, usando o método de aproximação por três pontos do coeficiente de Rayleigh. Foram otimizadas estruturas reais clássicas como o pórtico espacial de 180 membros estudado por McGee, O G. e Phan K. F., [2] (1992), ou a torre espacial de heliporto com 46 elementos presente no trabalho de Varnderplaats G. N. e Salajegheh E., [3] (1998).

Já Macnickarajah, D. et al [4] (2000), apresentam um trabalho de otimização para múltipla restrição de frequências usando um método de algoritmo genético, ilustrando exemplos como uma “treliça de 50 barras” e um pórtico de cinco pavimentos, com significativas reduções de volume. Otimização topológica com restrição de frequência foi abordada por Imam, M. H, [5] (1999), na otimização de estruturas mistas (concreto e aço), enquanto que Ohsaki, M. [6] (1998) utilizou otimização simultânea de topologia e dimensões, através de algoritmo próprio aplicado no exemplo da “treliça de dez barras”.

Em outro trabalho Czyz, J. A. et al [7] (1998), se aborda uma metodologia de otimização de projeto com frequência natural máxima, com restrição de volume constante, em pórticos espaciais, usando-se a plataforma ANSYS.

Otimizações utilizando análise de sensibilidade também vêm sendo empregadas na resolução de problemas tridimensionais, como em Cameron T. M. et al [8] (1997), onde apresenta-se um estudo sobre a influência das conexões no projeto de otimização das vigas em pórticos de aço. Já Pantelides, C. P. e Tzanem, S., [9] (1997), utilizam o método MISA (Modified Iterated Simulated Annealing) que envolve seqüências randômicas de projetos candidatos. Neste trabalho realizou-se um teste com um pórtico de 2 andares, com restrições dinâmicas. Takagi, R. et al [10] (1997), propõem uma técnica de otimização para estruturas espaciais sujeitas a grandes cargas de flambagem.

O projeto ótimo de estruturas de aço é abordado por Hernadez, S. [11] (1998), centrado na necessidade de definição precisa da formulação do problema de projeto. Há ainda estudos utilizando-se método de segunda ordem para programação geométrica generalizada na otimização de pórticos espaciais, como o apresentado em [12] (1997), por Sui, Y. K. e Wang, X. C.

Quanto às arquivancadas reutilizáveis, estas vêm sendo construídas e utilizadas desde o século V A.C. (Piqué, J. F [13] 1997). Especificamente sobre os problemas que ocorrem em estruturas de arquivancadas metálicas reutilizáveis, tem-se dois aspectos que dizem respeito as mesmas. O primeiro é em relação à

carga estática pois, tomando como base os casos observados, as arquibancadas em uso têm seus elementos dimensionados “à sentimento”. O segundo aspecto diz respeito à não verificação da adequação do projeto às características dinâmicas. Vários trabalhos de pesquisa são realizados na tentativa de se entender por completo as características dinâmicas dessas estruturas.

Os estudos iniciais referem-se a arquibancadas fixas de concreto armado, como, por exemplo, os trabalhos de Eibl, J. e Rosch, R. [14] (1990); Batista, R. C. e Magluta, C. [15] (1993), ou D’Ambra, R. B. et al [16] (1994).

As cargas dinâmicas atuantes nas arquibancadas estão matematicamente descritas, por exemplo, em Ji, T. e Ellis B. R. [17] (1999). Porém já em 1987 nos estudos registrados por Bachman, H e Amman, W [18] (1987), constam valores de frequências frutos de excitações produzidas pelas atividades de pular na direção vertical, enquanto que em Bachmann et al [19] (1995) avaliam-se as atividades de movimento rítmico na direção lateral. Batista et al [20] (1991), e Prato, C e Larson, C., [21] (1992), também apresentam valores para cargas de impacto e frequências fundamentais.

Modelagens via método dos elementos finitos também vêm sendo usadas. Cita-se como referência D’ambra, R. B. et al [16] (1994), que utilizaram o software ANSYS para a análise numérica em elementos finitos da estrutura das arquibancadas do estádio de Huracán (Corrientes – Argentina).

Em anos recentes, um grande número de publicações técnicas têm sido apresentadas com relatos de problemas de vibrações nessas estruturas. Os atuais problemas com estruturas de arquibancadas, devido a vibrações induzidas por espectadores, foram abordados por Kaspersk, M. [22] (1996), onde o autor sugere um sistema ótimo de amortecimento combinando estruturas de 3,5 Hz de frequência natural com o uso de absorsores passivos TMD (*tuned-mass-dampers*). Já Littler J. D. [23] (1996), em trabalho sobre medições de respostas dinâmicas de arquibancadas temporárias, aborda esse tipo de estrutura reutilizável e fornece respostas de arquibancadas à carregamentos dinâmicos através de testes de campo. Os testes foram realizados em 40 (quarenta) arquibancadas metálicas desmontáveis, nas quais as frequências naturais dessas arquibancadas vazias apresentaram uma faixa de 1,8 a 6,0 Hz na direção lateral – *sway direction*, estando porém a grande maioria entre 3,0 e 5,0 Hz. Este estudo cita que 40% das

arquibancadas pesquisadas apresentam frequência natural fundamental horizontal de 4 Hz.

Através desses estudos foram propostas várias orientações de projeto, como em Ji e Ellis [24] (1994), onde é sugerida que se evite uma faixa de frequência de 1,5 Hz a 3,5 Hz, ou em Ellis, Ji e Littler [25] (1994), onde uma frequência máxima vertical de 8,4 Hz (3 x 2,8 Hz) é sugerida como necessária ao projeto. No estudo de Ellis, B. R., Ji, T. e Littler, J. D., [25] (1994), declara-se que para cargas horizontais as frequências fundamentais, tanto na direção lateral (*sway*) quanto na de frente-para-trás (*front-to-back*), devem estar fora da frequência máxima de dança. Tais variações de valores apresentados deram origem a estudos nos quais ressalta-se que diferentes tipos de eventos produzem diferentes e significantes tipos de carregamentos, como exemplificam os estudos de Littler J. D. [26] (1999) e Ji, T. e Ellis, B. R. [27] (1999).

Mais recentemente Littler, J. D., [26] (1999) apresentou considerações quanto à seção de cargas sincronizadas de dança incluídas na norma britânica e, após este estudo, Ji, T. e Ellis, B. R. [27] (1999) avaliaram o carregamento dinâmico produzido por espectadores em estruturas de estádios esportivos usados para *shows* musicais no Reino Unido, onde destaque maior deve ser dado às características do artigo em reconhecer que às medidas realizadas em campo devem ser adicionadas análises e projetos em elementos finitos. Outro fator deste artigo é a citação do trabalho de Ji. T. e Ellis B. R. [28] (1996), sobre o uso do contraventamento para aumentar a rigidez e, por conseguinte, aumento da frequência da estrutura.

1.2

Objetivo

O objetivo da dissertação é fornecer o projeto ótimo para dois módulos de dois tipos diferentes de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis, para solicitações estáticas e restrição relativa à frequências fundamentais, utilizando-se o módulo de otimização do sistema computacional de análise de estruturas em elementos finitos, ANSYS.

1.3

Escopo do trabalho de dissertação

O presente trabalho foi realizado em parceria com a Universidade Federal da Paraíba – UFPB, e faz parte de um estudo mais amplo sobre problemas dinâmicos em estruturas. Os capítulos subsequentes abordam:

Capítulo 2 – Faz-se uma apresentação da análise de estruturas via ANSYS, comenta-se sobre o programa e seus tipos de análises disponíveis. Após isso, de forma simples, apresenta-se a formulação do MEF para as análises estática e modal que serão alvo do trabalho, mostrando-se dois exemplos para entendimento das etapas “necessárias à modelagem” e solução: uma análise estática de viga biapoiada e uma análise modal de viga engastada;

Capítulo 3 – Comenta-se sobre o processo de análise de sensibilidade de estruturas do ANSYS e, mesmo sendo um parâmetro interno do módulo de otimização não controlado pelo usuário, aborda-se no capítulo a teoria referente ao método das diferenças finitas (utilizado pelo programa), a precisão e escolha do passo, os métodos analítico e semi-analítico, a sensibilidade dos deslocamentos, deformações e tensões na análise estática com apresentação das respectivas formulações, assim como a sensibilidade de frequências naturais fundamentais;

Capítulo 4 – Trata da otimização de estruturas via ANSYS. São apresentados os métodos e ferramentas de otimização disponíveis, em seguida detalha-se o módulo de otimização, descrevendo o equacionamento das variáveis de projeto, variáveis de estado e função objetivo. Após isto o algoritmo de otimização do ANSYS (APDL) utilizado na dissertação (Método de primeira ordem) tem sua formulação descrita e comentada. O capítulo traz ainda os exemplos de validação, com os quais demonstra-se a capacidade e funcionalidade do algoritmo, comparando-se os resultados com a bibliografia especializada. Nove exemplos de estruturas planas e espaciais são apresentados, dentre estruturas de vigas, pórticos e treliças, apresentando-se o bom desempenho do *software* em diferentes tipos de otimização de dimensão.

Capítulo 5 – Capítulo principal. Apresentação do processo de otimização dos dois tipos de arquibancadas reutilizáveis. Comenta-se algumas referências sobre otimização de estruturas metálicas reticuladas sob restrição de frequência. Em seguida aborda-se o problema específico das arquibancadas reutilizáveis, fundamentos, histórico e resalta-se as características atuais dos artigos que dizem respeito aos problemas dinâmicos de projeto dessas estruturas. Em seguida tem-se então o processo de otimização, objetivo da dissertação, com ambos módulos de arquibancadas (MC1 e AR1) tendo sua otimização detalhada. Mostra-se a modelagem, especificações técnicas, análises estáticas e dinâmicas, otimização com discussão e análise, observando a necessidade do correto cálculo estático, importância de critérios de contraventamento (estudo com base em bibliografia especializada a fim de solucionar o problema da AR1) e frequências naturais;

Capítulo 6 – Aqui são apresentadas as conclusões do trabalho a respeito dos casos estudados e também quanto ao uso do módulo de otimização do ANSYS, suas qualidades e limitações. Faz-se ainda sugestões de pesquisas futuras e melhoramentos do *software*.

1.4

Considerações gerais e otimização de projeto

A característica de múltipla reutilização deste tipo de arquibancada difere de estruturas comuns da Engenharia Civil, exigindo-se também que elas sejam projetadas de modo a evitar o efeito de ressonância dinâmica. Isso significa que, ao otimizar tais estruturas, deve-se considerar a restrição relativa às frequências naturais que devem estar fora da faixa das frequências solicitantes. Além disso, é necessário que a estrutura responda adequadamente às cargas estáticas. Disto resulta que eventuais melhorias no seu desempenho estático e dinâmico trarão benefícios diretos ao projeto.

A idéia deste trabalho é propor a otimização do projeto estático e dinâmico de arquibancadas reutilizáveis, utilizando-se modelagem e análise numérica de estruturas reais pelo Método dos Elementos Finitos (ANSYS 5.4/5.5 - APDL), e otimização por método de programação matemática. Pretende-se atingir o dimensionamento ótimo dos elementos componentes da estrutura, sob carga estática, baseado nos parâmetros peso e tensão, além de verificar o nível de

segurança contra colapso quando sujeitas a solicitações rítmicas intensas, propondo critérios para a correta disposição do contraventamento, observando as variações nas frequências naturais e modos de vibração.

Quanto à otimização de projetos, freqüentemente, o processo de cálculo estrutural resulta em um projeto adequado que é então executado. Isto ocorre porque, para se alcançar um projeto ótimo, deve-se consumir uma grande quantidade de tempo e dinheiro. A otimização de um projeto é a criação e modificação do projeto inicial, a fim de torná-lo o mais efetivo possível. Porém, uma otimização resulta, geralmente, nas melhores propriedades para um custo mínimo.

Um dos exemplos mais simples de otimização é determinar a forma de uma cerca de um dado perímetro que incluirá a maior área. Sabe-se que um círculo incluirá a maior área com o determinado perímetro de cerca. Um outro exemplo seria o da determinação de uma certa relação entre o diâmetro e a altura de uma lata cilíndrica que maximizaria o seu volume, ou seja, qual o maior volume com uma dada área de superfície.

Em um projeto ótimo, os seguintes passos devem ser controlados: (i) Um projeto inicial é desenvolvido e analisado para as exigências das normas e possíveis imposições arquitetônicas; (ii) Os resultados da análise são avaliados em geral quanto ao custo, e o projeto é modificado adequadamente de modo a atender os critérios de projeto; (iii) A nova configuração é novamente analisada e o processo torna-se iterativo (*loops*) até que um projeto ótimo é obtido.

Este processo não só consome tempo excessivo, como apresenta elevado custo financeiro. O trabalho deve ter tempo e custo reduzidos com o uso de computadores.

Em cada um destes exemplos de otimização simples citados acima, dois critérios foram respeitados: um foi o de “melhorar o projeto” (Na cerca a área de fechamento, na lata o volume), o outro foi uma restrição imposta (Na cerca o perímetro, na lata a superfície externa). Em problemas correntes de engenharia, quase sempre haverá uma propriedade a ser aperfeiçoada, otimizada, como o peso ou o custo de uma estrutura, e haverá também restrições, em termos da resposta da estrutura a ser controlada e a resistência do material disponível, por exemplo.

As restrições de projeto são de dois tipos. O primeiro tipo são as restrições de Igualdade (*Equality Constraints*). Uma restrição de igualdade especifica uma

propriedade que deve corresponder a um valor especificado (por exemplo, no caso da cerca, seu comprimento devia ser constante, caracterizando, portanto, uma restrição de igualdade). Em uma estrutura, os componentes estruturais ao longo da mesma precisarão ter sua capacidade resistente mantida, por exemplo, abaixo da resistência de escoamento (excluídas as localizações de regiões como a concentração de tensão em certo ponto da estrutura). Em muitas partes da estrutura, a tensão deverá estar abaixo da tensão de escoamento. Por conseguinte, neste caso, há uma restrição de desigualdade (*Inequality Constraint*). Em uma restrição de desigualdade unilateral, exige-se que uma propriedade do projeto seja mantida acima ou abaixo de determinado valor numérico.

A partir de um projeto preliminar desenvolvido, podem ser avaliadas variações em algumas das dimensões do projeto, que nesse processo são simplesmente conhecidas como variáveis. De algumas variáveis de projeto será exigido que não excedam certos limites, ou restrições. Pode haver restrições nos graus de liberdade, como também em propriedades derivadas, como a tensão em certo ponto da estrutura. Caso o projeto inicial seja viável, ou seja., não viole nenhuma restrição, variações no projeto podem resultar em uma melhoria. Se, uma vez calculadas as variáveis, houver valores viáveis que resultem na melhor solução possível, diz-se que o projeto foi otimizado. No caso da cerca, pode-se ter partido da tentativa de uma forma retangular, e eventualmente chegando-se ao círculo, ter-se-ia otimizado o projeto. Isto requereria que não houvesse restrição alguma quanto às formas permitidas, como restringir que a cerca fosse obrigatoriamente retangular por questões arquitetônicas, por exemplo.

A otimização clássica é realizada analiticamente com álgebra, cálculo, e cálculo variacional. Podem ser solucionados problemas com uma grande variedade de restrições simbólicas que usam multiplicadores de Lagrange. Muitos problemas de projetos modernos são bastante complexos para serem solucionados com métodos simbólicos puramente algébricos. Então, há algum tempo, computadores são usados para avaliação numérica de variações em um projeto. No início o computador foi utilizado para analisar o projeto, e através dele, os métodos de otimização puderam ser aperfeiçoados. Hoje, códigos para otimização podem ser livremente adquiridos ou comprados como parte de bibliotecas matemáticas de seqüência de dados. Na maioria dos *softwares* uma modelagem do problema a ser resolvido é requerida.