

OPTIMIZATION TECHNIQUES APPLIED TO THE STRUCTURAL DESIGN USING FINITE ELEMENT METHOD

**Edgar Francisco Guimarães de Oliveira, Vitor Hugo Benevenuto Müller,
Thiago Pontin Tancredi**

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Departamento de Engenharias da Mobilidade, Campus Joinville - SC

guima.naval@gmail.com vhbm1993@gmail.com thiago.tancredi@ufsc.br

Abstract. The use of Element Finite Method in structural analysis is well-known in the literature. This work describes a structural design methodology based in optimization techniques that include numerical simulations as analysis tool. The methodology proposed was applied to the design of a mezzanine built with steel plates and steel columns able to support the design loads. The optimization objective is to determine the design with less mass, which minimizes the volume material (and cost). The constraints considered are the equivalent stress von Mises and the critical loads of buckling in the support columns. The first step of the methodology was to develop a parametric model of the structure. This was done directly in the finite element program Ansys Workbench. Afterwards it was done structural analysis in random configurations of the model to define the range of each design variable and the constraints. The optimization process uses the NLPQL algorithm (Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian) and the Ansys Workbench program. The results show a weight reduction of the structure without compromising security. In the conclusion, we discussed the results and the application of the methodology proposed.

Palavras-chave: *Projeto Estrutural, Elementos Finitos, Otimização*

1. INTRODUÇÃO

Em todos os setores da indústria busca-se, primordialmente, a qualidade dos produtos finais aliada a uma minimização dos custos relacionados com material, tempo e métodos de fabricação. A utilização de simulações computacionais nas diversas áreas de engenharia tem se tornado uma

ferramenta fundamental para garantir a qualidade e eficiência no desenvolvimento de diversos produtos, proporcionando benefícios como a redução de custos e tempo de projeto, aumento da produtividade, facilidade na detecção de eventuais erros e auxílio na identificação de soluções.

Usualmente, as técnicas numéricas como o Método dos Elementos Finitos (MEF) são usadas em etapas finais do processo de projeto, como importantes ferramentas de análise. Enquanto que nas etapas iniciais de concepção, as soluções iniciais são fortemente baseadas na experiência de projetistas e engenheiros.

Nesse trabalho, o projeto conceitual de uma estrutura é tratado como um problema matemático de otimização, o qual utiliza MEF como ferramenta de análise.

O desenvolvimento do estudo foi baseado na análise estrutural de um mezanino projetado para suportar cargas aplicadas entre seus pavimentos. O objetivo é, por meio de técnicas de otimização, determinar o melhor arranjo de chapas e colunas que minimizem a quantidade de material e, portanto, o custo da estrutura.

A simulação computacional estática dessa estrutura, com a utilização do método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica robusta e eficiente para determinar as tensões e deformações considerando diferentes condições de carregamento.

Portanto, a metodologia proposta correlaciona a redução de peso com a eventual ocorrência de falhas por flambagem e escoamento do material.

Para as análises em questão foram utilizados diferentes módulos do programa

Ansys Workbench, o qual disponibiliza ferramentas de modelagem geométrica, aplicação do MEF, análise paramétrica e otimização. O processo de otimização utiliza o algoritmo NLPQL (Programação Não-Linear por Lagrangeano Quadrático), permitindo uma análise de otimização estrutural mono objetivo, capaz de obter uma configuração final comprometida com a redução de massa e com a segurança da estrutura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Método dos Elementos Finitos – MEF

O método dos elementos finitos (MEF) é essencialmente um processo de discretização, que visa transformar um problema infinito dimensional em um problema finito dimensional, com número finito de incógnitas. Segundo Rade [1], o método consiste em dividir o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas, denominadas elementos.

A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizados como o valor de uma função desconhecida a um conjunto de pontos nodais. A resposta do modelo matemático é considerada como sendo aproximadamente a resposta do modelo discreto obtida pela contabilização do conjunto de todos os elementos.

2.2 Processo de Otimização

A otimização de um projeto baseia-se num processo iterativo para minimizar uma determinada função descrita a partir das variáveis de projeto. O ponto ótimo do projeto é alcançado quando a função objetivo é minimizada, satisfazendo um conjunto de restrições ou critérios de convergência.

É importante observar que a função objetivo é uma função dos parâmetros de projeto e caracteriza a qualidade do projeto.

2.3 Otimização Não Linear Restrita

Na metodologia proposta utilizou-se o algoritmo NLPQL, o qual é um algoritmo de otimização desenvolvido por Klaus Schittkowski que resolve problemas de programação não linear com restrições, conforme cita Ramos [2].

O algoritmo NLPQL é fundamentado no método de Programação Sequencial Quadrática (PSQ). Esse método é utilizado para a otimização não-linear restrita, sendo uma técnica de quase - Newton baseada em uma ideia proposta por Wilson em 1963 e interpretados por Beale, em 1967 [2].

Um programa quadrático é uma classe de problemas de otimização restrita de tal modo que a função objetivo é uma função quadrática e as restrições são lineares. Técnicas para resolver este problema estão disponíveis, mesmo quando restrições de desigualdade estão incluídas. Conforme Fonseca [3], a solução exata é obtida depois de um número finito de iterações, sendo bem aplicada a problemas de otimização estrutural.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL

3.1 Construção do Modelo

A estrutura do mezanino foi modelada diretamente no programa por meio da criação de um modelo paramétrico. Foi modelada pela união de chapas e colunas maciças de aço, conforme Fig.1. O mezanino possui um comprimento fixo de 10 metros, largura de 5 metros por 2,5 metros de altura.

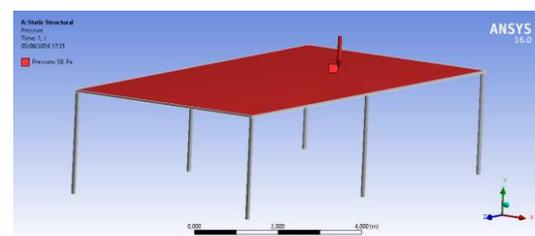


Figura 1. Modelo paramétrico da estrutura

O modelo inicial possui um piso superior com 50 mm de espessura e as

colunas de sustentação foram projetadas com um raio inicial de 50 mm.

A carga aplicada foi uma pressão uniforme de 500 Pa no piso superior.

Para que fosse viabilizada a otimização da estrutura, tornou-se necessário a criação de um modelo paramétrico, possibilitando a adaptação da estrutura para as diversas configurações de análise. Dessa forma, a espessura da chapa do piso, o raio das colunas, bem como o espaçamento entre elas foram definidos como parâmetros a serem ajustados no processo de otimização.

3.2 Discretização do Modelo

Para a discretização da geometria (geração da malha), Fig.2, foram utilizados os recursos disponíveis para escolha do tipo de elemento, bem como seu tamanho e características. A seleção desses parâmetros exerce grande influência no tempo de processamento e na qualidade de respostas obtidas no pós-processamento.

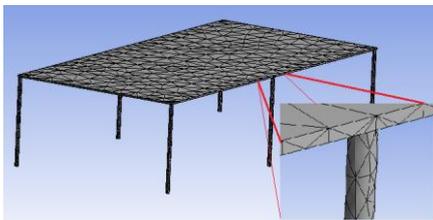


Figura 2. Geometria discretizada para análise

O elemento selecionado para discretização da geometria foi o Linear Strain Tetrahedron ou Tetraedro de tensões lineares. Esse elemento possui 10 nós em suas arestas e vértices, contendo cada nó três graus de liberdade e apresenta grande habilidade para representação de geometrias mais complexas.

Além disso, sua função interpoladora possui grau quadrático, podendo representar muito bem o campo de deslocamentos, deformações e, conseqüentemente, o campo de tensões dentro de cada elemento. Como o elemento possui nós intermediário nas arestas e as tensões irão variar ponto a ponto dentro do elemento, este torna-se adequado

para análises que envolvam um alto gradiente de tensão.

3.3 Análise Estrutural Estática

A partir do modelo devidamente preparado e discretizado, o próximo passo foi a análise estrutural de acordo com as configurações e com as restrições de projeto que, no estudo em questão, definiu-se como sendo a tensão máxima de escoamento e a tensão crítica de flambagem.

Um estudo de convergência de malha foi realizado considerando a configuração do mezanino com três colunas de sustentação, com vistas a se determinar o comportamento da tensão na estrutura de acordo com a quantidade de elementos na malha (Fig.3). Para a configuração inicial, pode-se notar que a tensão máxima de von Mises na estrutura tende a 186 MPa conforme se aumenta a discretização da malha. Da mesma forma, obteve-se o valor da tensão crítica de flambagem, o qual correspondente ao fator multiplicador de carga de 177.

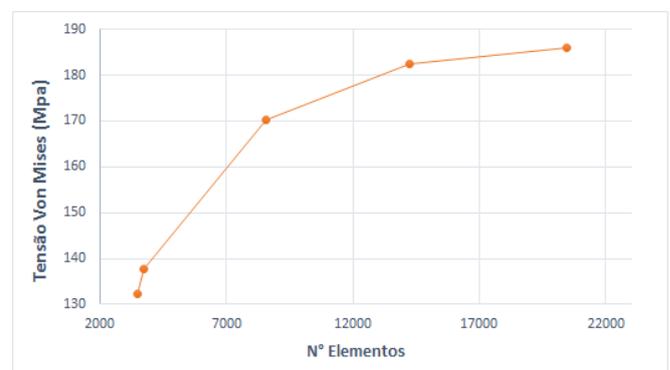


Figura 3. Tensão X n° de elementos

4. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

O processo de otimização visou a redução da massa da estrutura e foi realizado através da solução de subproblemas de programação sequencial quadrática sujeito a restrições de tensão equivalente e da carga crítica de flambagem.

4.1. Modelo de Otimização

As variáveis de projeto selecionadas para o processo de otimização foram:

espessura da chapa do piso, o raio e o espaçamento das colunas de sustentação do mezanino. Já as restrições foram o valor da tensão de von Mises e a carga crítica de flambagem. Por fim, a função objetivo a ser minimizada foi a massa total da estrutura.

4.2. Otimização

A otimização estrutural se deu pela utilização do algoritmo NLPQL discutido na fundamentação teórica.

Após a definição das variáveis e restrições de projeto, bem como da função objetivo, o programa gera uma sequência de pontos do experimento (DOE), com as possíveis configurações da estrutura, sendo a variação dos parâmetros representada a seguir.

A Fig.4 representa a variação da função objetivo, ou seja, a massa final na estrutura.

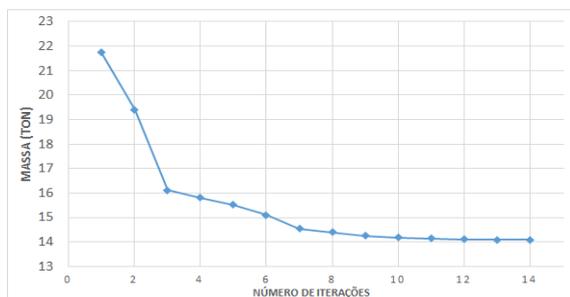


Figura 4. Variação da massa

Já na Fig.5 é mostrada a variação da restrição associada a tensão máxima na estrutura.

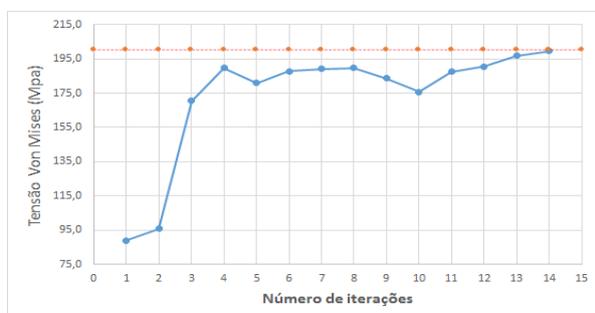


Figura 5. Variação da tensão máxima

A tensão limite foi restringida em 200 Mpa (linha alaranjada), sendo adotada assim uma margem de segurança quanto ao escoamento. Para a flambagem restringiu-se o fator multiplicador de carga referente a configuração crítica de operação.

4.3. Geometria otimizada

Tendo em vista que o objetivo final era proporcionar a maior redução de massa sem que com isso fosse comprometida a segurança, a geometria ótima gerada no processo de otimização corresponde ao mezanino com espessura do piso de 32,7 mm, raio das colunas com 46,7 mm e espaçamento entre coluna de 5 m.

Com isso, obteve-se uma geometria final com massa 14,1 toneladas, sendo respeita as restrições quanto aos possíveis modos de falha.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados é possível perceber a importância de uma ferramenta de otimização aplicada ao projeto de estruturas, pois esta permite analisar um conjunto maior de alternativas, obtendo soluções otimizadas para o projeto.

Essa afirmação pode ser corroborada pelos resultados alcançados neste estudo, onde a redução no peso final da estrutura foi de mais de 35% com relação ao peso da primeira configuração analisada. Da mesma forma, pôde-se atingir uma condição de operação segura, levando-se em conta os diferentes modos de falha considerados.

REFERÊNCIAS

- [1] J.E.T. Reis; D.A. Rade, Método dos elementos finitos aplicados à engenharia mecânica, UFU, 2011.
- [2] H.O.C. Ramos, Um algoritmo para otimização restrita com aproximação de derivadas, Ph.D. Thesis, UFRJ/COPPE, 2011.
- [3] Z.C. Fonseca, Otimização estrutural do suporte de uma turbo máquina usando um método de elementos finitos, TCC. UFRJ, 2015.