

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES DE AÇO TUBULARES PARA GERADORES EÓLICOS

Bruno P. Feijó, João B. C. Athayde Lima, Antônio Macário Cartaxo de Melo, Evandro Parente Jr.

Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 710, 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil, brunofjo@hotmail.com, jbathayde@gmail.com, macario@ufc.br, evandro@ufc.br

Palavras-chave: Otimização Estrutural; Torre Tubular, Torre de Aço.

Resumo. Diversas formas de geração de energia vêm sendo desenvolvidas com o intuito de oferecer alternativas ecologicamente corretas. Na região Nordeste do Brasil, a energia eólica vem se destacando devido ao grande potencial dos ventos da região, seu caráter renovável e a sua complementaridade temporal com a geração hidrelétrica. Para aumentar a potência gerada, torres cada vez mais altas têm sido usadas em busca de ventos mais fortes. O custo das torres, geralmente em aço, representa parcela importante do custo total do sistema. A esbeltez acentuada insere complexidade ao projeto estrutural, de forma que uma solução realista e ótima deve considerar a análise dos efeitos dinâmicos e uma geometria apropriada. Este trabalho apresenta uma formulação para a otimização do projeto de uma torre de aço constituída de segmentos tubulares tronco de cone. As variáveis de projeto são os diâmetros representativos dos segmentos e as suas espessuras. O custo mínimo é procurado minimizando-se o peso da torre. As restrições dizem respeito à rigidez, resistência e estabilidade de acordo com recomendações de norma, às frequências naturais, ao processo de fabricação e transporte. A análise estática linear e de vibração livre são realizadas usando-se elementos finitos de viga e supondo a torre engastada na base. As cargas incluem os efeitos das massas da torre e do conjunto nacele/rotor, esta concentrada no topo da torre, e do vento. Uma ferramenta de otimização com Algoritmos Genéticos foi selecionada para a solução do problema em virtude da natureza discreta adotada para as espessuras e de descontinuidades presentes nas restrições. Algumas aplicações da formulação são feitas e soluções são obtidas usando AGs. Os resultados são comparados com soluções da literatura.

1 INTRODUÇÃO

Diversas formas de energias vêm sendo desenvolvidas com o intuito de oferecer alternativas ecologicamente corretas. Dentre essas energias, a energia eólica vem se destacando no Brasil, principalmente no Estado do Ceará em virtude do grande potencial eólico do estado.

O equipamento responsável pela produção de energia eólica pode ser dividido em aerogerador (rotor e nacelle) e torre. De acordo com a DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION (DWIA, 2009), os aerogeradores podem ser classificados quanto à posição do eixo do seu rotor em aerogeradores de eixo horizontal e aerogeradores de eixo vertical.

Os aerogeradores de eixo vertical são equipamentos mais simples, pois não existe o mecanismo de direcionamento. A ausência desse equipamento impede que o ângulo de ataque do vento nas pás seja mantido constante, tornando-o menos eficiente, além de provocar vibrações excessivas.

Os aerogeradores de eixo horizontal possuem mecanismos que direcionam a posição do aerogerador conforme a direção do vento, proporcionando um melhor aproveitamento deste. Dentre eles estão os de rotores de duas ou três pás, utilizados em todas as turbinas modernas. Estes aerogeradores proporcionam uma elevada razão entre a potência extraída e a área de varredura do rotor. Contudo, necessitam de ventos com velocidades mais elevadas.

Quanto às torres, estas podem ser fabricadas de diversos materiais e formas. Dentre as principais estão as tubulares, que são fabricadas tanto em aço como em concreto, e as treliçadas e as estaiadas, ambas feitas de aço.

As torres treliçadas, apresentam cerca de metade do peso de uma torre de seção cônica DWIA(2009). Sua principal desvantagem é a agressão visual ao meio ambiente. Dessa forma, não são praticamente mais utilizadas. As torres estaiadas são utilizadas somente em pequenos aerogeradores. Possuem como vantagem o baixo custo de fabricação, mas como desvantagens apresentam grande dificuldade de acesso ao aerogerador para manutenção e a necessidade de uma área livre ao redor da torre para a fixação dos cabos de estais.

Aliando as boas propriedades do aço à forma estrutural surgiu a torre com configuração tubular, dotada com flanges internos nas extremidades para favorecer a estética, com facilidade para manutenção através de acesso interno, inclusive em condições de tempo adversas, e assegurando economia de custos. A forma em um conjunto de segmentos em tronco de cone, com 20 a 30 m de comprimento cada, é que tem sido a mais utilizada, pois garante maior estabilidade e rigidez ao conjunto.

Deve-se ressaltar que a altura das torres eólicas vem apresentando grande crescimento devido ao aumento da potência dos aerogeradores que necessitam de ventos mais fortes. Contudo, apesar destas torres, que em sua maioria são fabricadas em aço, representarem uma parte significativa do custo de implantação do gerador eólico, em torno de 20% a 30% segundo a DWIA (2009), pouco se tem investido na obtenção de um projeto otimizado. A fase de análise e projeto da torre assume grande importância, primeiro porque uma redução no seu custo pode ser significativa para o custo final da energia gerada, e depois por que a sua integridade estrutural é a garantia do perfeito funcionamento do sistema.

A análise e o projeto de torres tubulares para aerogeradores têm sido objeto de estudo de alguns trabalhos da literatura. Bazeos et al. (2000) realizou análise por elementos finitos de uma torre de aço de 38,0 m de altura. Eles consideraram cargas estáticas e dinâmicas devido a sismo e modelaram portas de acesso para visita, enrijecedor e a interação solo-estrutura. Uma torre maior, com 45,0 m, foi analisada por Lavassas et al. (2003) considerando no modelo de elementos finitos, além dos enrijecedores e de ações da gravidade e sismo, o efeito do vento e da fundação, e um estudo de fadiga.

Uma redução no custo da torre pode ser obtida formulando-se o problema de projeto como um problema de otimização, onde valores para parâmetros que definem a torre são procurados tais que minimizem uma medida de desempenho, normalmente o custo, e respeitem um conjunto de restrições, tratando do comportamento estrutural, da fabricação, transporte e montagem. Algumas destas restrições impõem o caráter discreto às variáveis de projeto e apresentam problemas relativos à continuidade e diferenciabilidade. Uma classe de algoritmos própria para tratar estes casos é a dos Algoritmos Genéticos que se baseiam na simulação do processo de evolução de Darwin e em princípios da genética, pertencendo assim ao campo da computação evolucionária.

Poucos modelos tem sido propostos na literatura para a otimização de torres tubulares de aço para turbinas eólicas e nenhum no Brasil. Negm et al. (2000) investigou várias funções objetivos (minimização do peso, minimização da rigidez, maximização da relação rigidez/peso e maximização das frequências naturais) usando como variáveis de projeto a área, o raio de giração e o comprimento de cada segmento da torre. Restrições relativas a tensões, rigidez, ressonância e massa foram incluídas no modelo. O problema de otimização não linear foi resolvido usando o método de penalidade interior. Um modelo de peso mínimo bastante refinado foi proposto por Yoshida (2006) mas que fixava os diâmetros inferior e superior. As restrições eram as espessuras e os diâmetros ao longo da torre. Além das cargas estáticas, ele considerou efeitos de tempestades e terremotos no problema que foi resolvido usando algoritmos genéticos. Com diâmetros também fixados, Uys et al. (2007) propuseram um modelo de custo mínimo para uma torre de 45 m considerando as espessuras e as dimensões e o número de enrijecedores como variáveis de projeto. O problema foi resolvido usando o método de Rosembroke.

Apresenta-se neste trabalho uma formulação para o dimensionamento ótimo de uma torre tubular de aço composta de segmentos em tronco de cone. O modelo é tratado como uma viga engastada na base e livre no topo e as ações externas consideradas incluem a massa do aerogerador, o peso próprio da torre e a ação do vento. O objetivo é minimizar o peso da torre dada sua relevância no custo. A torre é dividida em segmentos para garantir as restrições de comprimento, diâmetro e peso, que são limitadas pela capacidade de transporte.

As variáveis de projeto são os diâmetros, de natura contínua, representativos dos segmentos, admitindo-se continuidade nas conexões, e as suas espessuras que são tratadas como variáveis discretas.

2 ANÁLISE

Para torres tubulares cilíndricas, o modelo clássico de viga tem sido aplicado e expressões analíticas para os deslocamentos e esforços solicitantes têm sido obtidas com facilidade (Bruno et al. 2009). A extensão para a torre em troncos de cone, considerando a variação da geometria e a ação do vento, não é tão simples. Neste caso, executa-se a análise por elementos finitos para determinação dos deslocamentos e esforços solicitantes. Considerando o comportamento da torre restrito ao plano formado pela direção do vento e o seu eixo, a análise pode ser realizada usando-se elementos finitos de pórtico plano. (Cook et.al., 2001). Na aplicação da otimização do modelos de torre, utilizou-se o programa SAEF (2008).

No modelo de elementos finitos, a torre suposta engastada na base e livre na outra extremidade é discretizada em n elementos. Cada elemento prismático possui as propriedades equivalentes à seção média do trecho tronco de cone que ele modela na torre.

A torre esta sujeita às ações de uma carga axial de compressão (P) aplicada no topo, devido ao peso do aerogerador, à carga axial de compressão distribuída (PP) relativa ao peso próprio da estrutura, e a uma pressão trapezoidal (q) aplicada transversalmente ao longo de seu comprimento devido às ações do vento (NBR 6123, 1988) (Figura 1).

Para a carga do vento, adotou-se uma simplificação na distribuição da pressão dinâmica, conforme indicado na Figura 1. O efeito da carga do vento distribuída em cada elemento foi obtida multiplicando-se a pressão atuante no nível da seção média de cada elemento, pelo coeficiente de arrasto e pelo respectivo diâmetro.

$$w_{elem} = C_a \cdot q_{elem} \cdot D_{elem} \quad (1)$$

onde C_a é o coeficiente de arrasto (NBR 6123, 1988, p. 21); q_{elem} é a pressão do vento atuante no elemento finito conforme já descrito; D_{elem} é o diâmetro representativo do elemento finito.

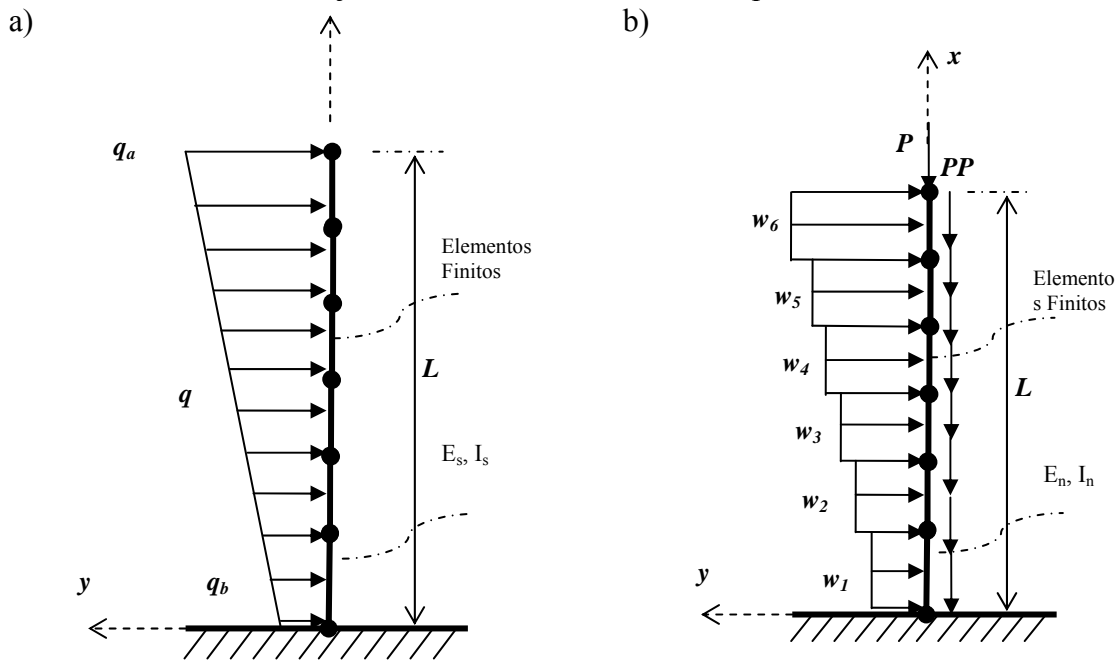


Figura 1 – Ação do vento: a) pressão dinâmica; b) cargas nos elementos

O problema de autovalor para determinação das frequências naturais é dado por Cook et al. (2001)

$$([K] - \omega^2[M]).\{\bar{D}\} = \{0\} \quad (2)$$

3 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Descreve-se a seguir modelo de otimização usado na torre tubular de aço tronco de cone.

3.1 Função Objetivo e Variáveis de Projeto

Na função objetivo buscou-se minimizar o peso total da torre, utilizando como variáveis de projeto os diâmetros representativos de cada segmento e as suas espessuras. Na conexão entre segmentos admite-se a continuidade dos diâmetros. O vetor das variáveis de projeto fica:

$$\{X\}^T = \{Dm_1, Dm_2, Dm_3, \dots, Dm_{n+1}, e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\} \quad (3)$$

Para o diâmetro médio, em virtude do processo de calandragem, foram considerados valores contínuos, enquanto para as espessuras das seções da torre foram utilizados valores discretos correspondentes às espessuras de chapas disponíveis comercialmente. Assim, a função objetivo é representada por

$$P(X) = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^{n_k} \gamma \pi D m_j e_j \quad (4)$$

onde s é o número de segmentos, n_k é o número de elementos finitos no k -ésimo segmento, γ é o peso específico do aço, $D m_j$ é o diâmetro médio do elemento j -ésimo elemento e e_j a sua espessura.

3.2 Restrições

O problema está sujeito às restrições impostas pelas dimensões máximas de transporte, por critérios quanto à resistência, estabilidade e rigidez recomendados pela norma brasileira NBR 8800 (2008).

Para as verificações de resistência utilizaram-se os critérios recomendados pela NBR 8800 (2008), para o caso de barras submetidas à combinação de momento fletor, força axial e força cortante. Para a força normal e o momento fletor impõe-se:

$$C_{comb} \leq 1,0 \quad (5)$$

sendo,

$$C_{comb} = \begin{cases} \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right), & \text{Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \\ \frac{N_{Sd}}{2 \times N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right), & \text{Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \end{cases} \quad (6)$$

onde N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão (a que for aplicável), N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão (a que for aplicável), determinada respectivamente de acordo com o item 5.2 ou 5.3 da NBR 8800 (2008), $M_{Sd,z}$ e $M_{Sd,y}$ são momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos x e y da seção transversal, respectivamente e $M_{Rd,z}$ e $M_{Rd,y}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y da seção transversal, respectivamente, determinados de acordo com item 5.4 da NBR 8800 (2008).

Na determinação dos esforços resistentes N_{rd} e M_{rd} é levada em consideração o estado limite de flambagem local como:

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{al}} \quad (7)$$

onde χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, Q é o fator de redução total associado à flambagem local e A_g é a área bruta da seção transversal. De acordo com NBR 8800/2008 o fator de redução χ é dado por:

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2, & \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2}, & \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (8)$$

onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (9)$$

sendo N_e a força axial de flambagem elástica definida pela fórmula clássica de Euler:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (10)$$

onde E é módulo de elasticidade do aço, I é o valor médio dos momento de inércia da seção transversal dos elementos finitos e KL é o comprimento de flambagem, sendo $K = 2$ para a torre engastada na base e livre na outra extremidade.

O fator de redução total associado à flambagem local Q é definido no item F.4 do anexo da NBR 8800 (2008) na forma:

$$Q = \begin{cases} 1,00, & \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \\ \frac{0,038 E}{\frac{D}{t} f_y} + \frac{2}{3}, & 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \end{cases} \quad (11)$$

Para o momento fletor resistente de cálculo, a NBR 8800 (2008) determina que em seções tubulares circulares, o estado-limite de flambagem local de uma parede do tubo, é dado por:

$$M_{rd} = \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}}, & \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{1}{\gamma_{al}} \left(\frac{0,021E}{\frac{D}{t}} + f_y \right) W, & \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{1}{\gamma_{al}} \left(\frac{0,33E}{\frac{D}{t}} \right) W, & \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (12)$$

sendo:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (13)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (14)$$

$$\lambda_p = \frac{0,31E}{f_y} \quad (15)$$

onde M_{pl} é o momento de plastificação, λ_p é parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação e λ_r é parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

Para a Força Cortante atuante na direção de um dos eixos centrais de inércia deve ser satisfeito a condição:

$$C_{cort} \leq 1,0 \quad (16)$$

onde,

$$C_{cort} = \frac{V_{sd}}{V_{rd}} \quad (17)$$

onde, V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo, e V_{rd} é a força resistente de cálculo, definida por:

$$V_{rd} = \frac{0,5 \times \tau_{cr} \times A_g}{\gamma_{al}} \quad (18)$$

A tensão crítica τ_{cr} é o maior dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,60E}{\sqrt{\frac{L}{D} \left(\frac{D}{t_d}\right)^4}} \leq 0,60 f_y \quad (19)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78E}{\left(\frac{D}{t_d}\right)^2} \leq 0,60 f_y \quad (20)$$

onde t_d é a espessura de cálculo da parede de seção transversal, tomada igual a 0,93 vezes a espessura nominal para tubos com costura e igual à espessura nominal para tubos sem costura.

A verificação do estado limite de flambagem local tem sido tratada por meio de reduções nas avaliações dos esforços resistentes N_{rd} e M_{rd} , conforme as Equações (7) e (12). Além destas condições é necessário observar o limite:

$$\frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (21)$$

Uma restrição de rigidez é imposta à torre limitando-se o deslocamento no topo para um valor máximo de L/β . O coeficiente β depende das condições de utilização do projeto.

Para evitar problemas de ressonância devido à proximidade da frequência de excitação da carga de vento com as frequências naturais da torre, impõe-se um valor mínimo para a frequência fundamental da torre na forma:

$$f_1 \geq f_{1_{Ref}} \quad (22)$$

onde f_1 é a frequência fundamental e $f_{1_{Ref}}$ é um valor de referência.

Os diâmetro médios da torre foram limitados entre os valores de 1 m e 5 m, garantindo que valores inferiores ao limite máximo permitido pelo transporte e ao mesmo tempo diminuindo o campo de atuação do algoritmo, tornando-o mais eficiente. As espessuras das chapas estão restritas aos valores disponíveis comercialmente ilustradas na Tabela 1.

4 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Este modelo de otimização é implementado no software MATLAB®. Em virtude do caráter discreto das espessuras e descontinuidades presentes nas restrições, optou-se por resolver o modelo utilizando Algoritmos Genéticos.

Porém, a ferramenta de Algoritmos Genéticos do MATLAB® não trabalha com variáveis do tipo discretas. Dessa forma, implementou-se uma estratégia para resolver o problema. Utilizou-se uma lista contendo as espessuras das chapas encontradas comercialmente, sendo a posição na lista de cada espessura a variável de projeto do modelo para o AG.

Assim, uma vez que o algoritmo gera uma variável correspondente à posição na lista da espessura da chapa (contínua), arredonda-se essa variável para o número inteiro mais próximo (posição na lista), e localiza-se o valor correspondente na lista (Tabela 1), utilizando esta espessura de chapa, para o cálculo da função objetivo e das restrições do problema.

Para garantir que essa estratégia confira a mesma probabilidade de escolha a todos os elementos da lista, estabeleceram-se o intervalo de busca variando de 0,5 a 13,5.

Tabela 1 – Espessuras das Chapas

Posição	Espessura (m)
1	0,0020
2	0,00265
3	0,0030
4	0,00475
5	0,0063
6	0,0080
7	0,0095
8	0,0125
9	0,016
10	0,019
11	0,0224
12	0,025
13	0,0315

Através deste artifício, a função objetivo do problema deixa de ser uma função contínua, e passa a ser uma função do tipo “degrau” (“step-function”), em termos da variável discreta na lista. A Figura 2 ilustra para um exemplo hipotético como se comporta uma função ao se transformar uma determinada variável (X_n) do tipo contínua em discreta.

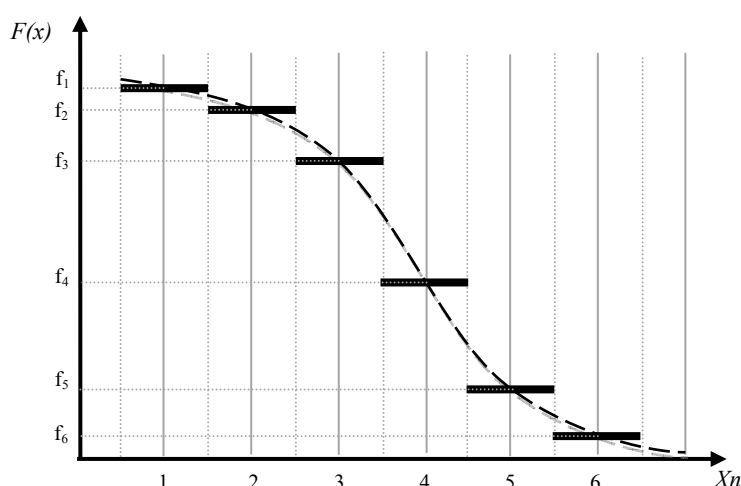


Figura 2 – Gráfico de uma função degrau

O algoritmo genético do MATLAB usa o Algoritmo Genético do Lagrangiano Aumentado (ALGA - Augmented Lagrangian Genetic Algorithm).

5 APLICAÇÕES

O modelo proposto foi aplicado para torres tubulares com alturas de 45 m, 60 m e 80 m. Os dados gerais utilizados constam na Tabela 2. Os modelos são denominados de acordo com a consideração (TCF) ou não (TSF) da restrição de frequência, com altura da torre (45, 60 ou 80) e o número de segmentos (2 ou 3). Por exemplo, o modelo TSF45-2, representa um modelo sem consideração da restrição de frequência para uma torre de 45 metros com dois segmentos.

Tabela 2 – Dados das torres

DADOS GERAIS	
Material:	
Tensão de Escoamento (F_y)	250 MPa (ASTM A-36)
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Peso Específico do aço:	78,50 kN/m ³
Coefficiente de ponderação dos esforços solicitantes:	
Permanente	1,25 (Desfavorável)
Variável	1,40
Coefficiente de ponderação das resistências no estado limite último	1,10
Coefficiente β da restrição de rigidez:	400

A aplicação do modelo foi realizada no software MATLAB, utilizando a ferramenta de algoritmo genético. Observou-se uma dificuldade de convergência para um ótimo global e utilizou-se a estratégia de efetuar um ciclo de otimizações, tomando a população resultante da solução de uma iteração como a população inicial da iteração seguinte. Em conjunto com essa estratégia, utilizou-se um algoritmo de busca padrão combinado com o Algoritmo Genético.

Assim, a partir do resultado que o AG apresenta, o algoritmo de busca padrão procura uma nova solução melhorada. A Tabela 3 apresenta os parâmetros do Algoritmo Genético utilizados.

Tabela 3 – Parâmetros do Algoritmo Genético

População	40
Gerações	100
Tolerância relativa à função objetivo (TolFun)	1e-10
Tolerância relativa às restrições (TolCon)	1e-10
Elitismo	2
Taxa de cruzamento	0,80
Nº de gerações máxima permitidas sem haver melhoria (StallGen)	5

A Tabela 4 ilustra os dados e os resultados da otimização de todos os modelos de torres utilizados.

Tabela 4 – Dados e Resultados

Dados	Modelos das Torres							
	TSF45-2	TSF45-3	TCF45-3	TSF60-2	TSF60-3	TCF60-3	TCF80-3	
Altura	45	45	45	60	60	60	81	
NumSeg	2	3	3	2	3	3	3	
Peso (kN)	111	91	96	270	194	193	491	
Diâmetros	D1 (mm)	3,1070	2,2243	2,2729	3,3824	2,8790	2,8944	4,4614
	D2 (mm)	1,0980	1,8071	1,7107	1,2915	2,5450	2,6144	3,1823
	D3 (mm)	1,0000	1,0235	1,0178	1,0000	1,3280	1,1802	1,7123
	D4 (mm)	-----	1,0021	1,0004	-----	1,0010	1,0101	1,0003
Espess.	e1(mm)	0,0080	0,0063	0,0063	0,0125	0,0080	0,0080	0,0125
	e2(mm)	0,0030	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0080
	e3(mm)	-----	0,0030	0,0048	-----	0,0048	0,0048	0,0048
Restrições	Resist(N,M)	-0,3564	-0,5780	-0,6382	-0,6368	-0,6205	-0,6049	-0,6759
	Resist(C)	-0,9157	-0,9383	-0,9563	-0,9666	-0,9399	-0,9417	-0,9266
	Flamb Loc	-0,0458	-0,0952	-0,0849	-0,3579	-0,0166	-0,0025	-0,0287
	Rigidez	-0,0111	-0,0006	-0,0006	-0,0002	0,0000	-0,0001	0,0000
	Freq.	-----	-----	-1,6260	-1,0160	-----	-1,3640	-1,1660
Massa Aerog (kg)	30.000	30.000	30.000	50.000	50.000	50.000	50.000	
Freq.Fundam (Hz)	-----	-----	1,3130	1,0080	-----	1,1820	1,0830	

Depois de realizada a aplicação do modelo de otimização, modelou-se a torre obtida como resultado em um software de elementos finitos (ABAQUS). A Figura 3 ilustra o resultado obtido para o modelo TSF45-3. Utilizou-se um modelo de casca, e analisou-se o deslocamento e as tensões apresentadas. Através da análise observa-se que as tensões de Von Mises máximas no modelo são da ordem de 60 MPa, inferior à tensão de escoamento do aço utilizado (250MPa). O deslocamento no topo da torre (U1), como se pode conferir na Figura 3, foi da ordem de 0,11 m, o qual era esperado uma vez que a restrição de deslocamento encontra-se próxima de estar ativa. Outras aplicações podem ser encontradas em [Feijó \(2010\)](#).

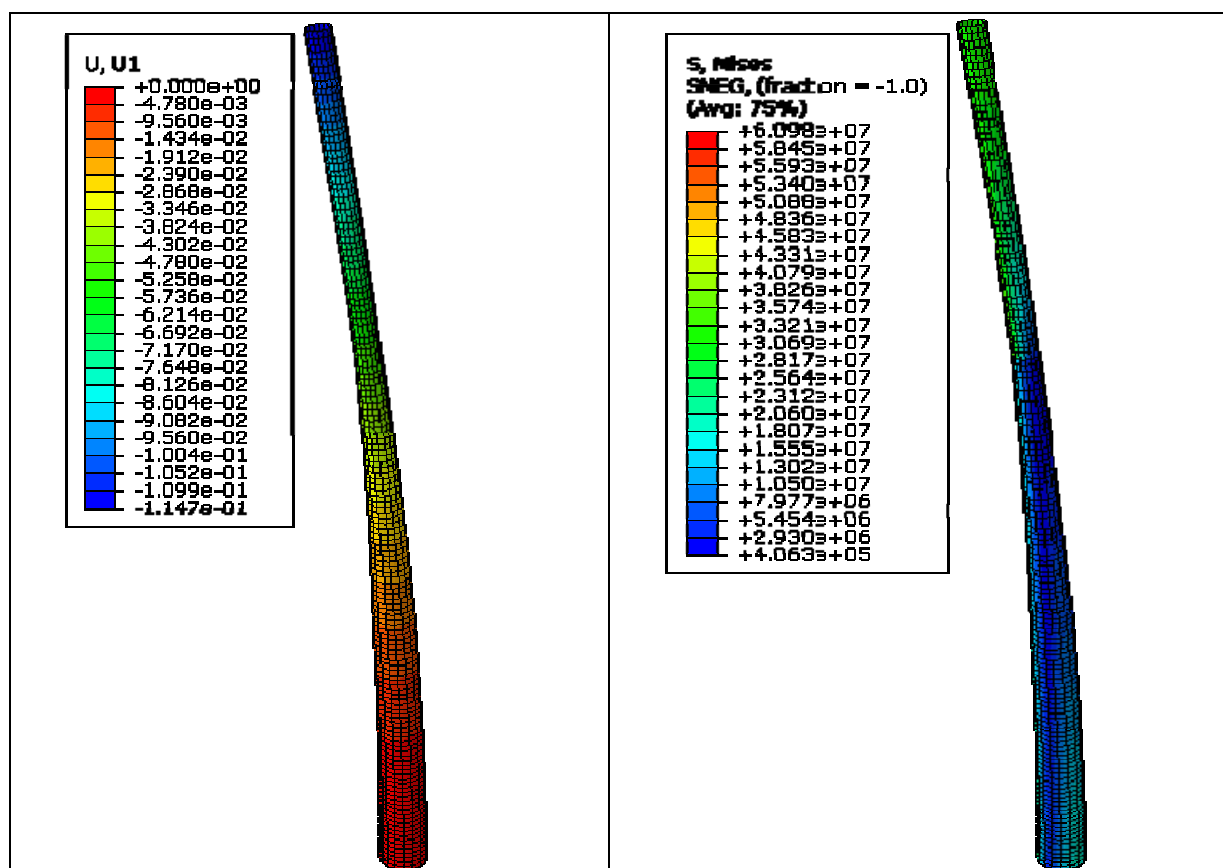


Figura 3 – Modelagem da solução ótima do modelo TSF45-3

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma formulação para otimização de torre de aço composta de segmentos em tronco de cone, para turbinas eólicas, buscando-se a minimização do peso da torre. As variáveis de projeto consideradas foram os diâmetros representativos de cada segmento tronco de cone, impondo-se a continuidade entre eles, e suas espessuras. As primeiras foram tratadas como variáveis contínuas e as últimas como discretas.

O modelo foi aplicado para otimização de torres variando-se a sua altura, o número de segmentos e a presença ou não da restrição na frequência fundamental. Em todas as soluções o diâmetro no topo da torre convergiu para o limite mínimo de 1,0 m.

O aumento do número de segmentos permitiu uma modelagem mais refinada da torre, e conseqüentemente redução no peso total. As restrições relativas aos critérios de resistências tanto do esforço normal com o momento fletor, quanto do esforço cortante foram atendidas com folga. Em todas as soluções a restrição de deslocamento no topo apresentou-se ativa, provavelmente em virtude da esbelteza da estrutura.

Não foram observadas mudanças significativas na solução pela presença da restrição da frequência fundamental. Este fato pode ser explicado devido à necessidade da elevação da rigidez da torre em função da restrição do deslocamento e da diminuição da massa em decorrência da função objetivo, levando assim ao aumento da frequência natural.

REFERÊNCIAS

- Bazeos, N., et al. (2002). Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower. *Engineering Structures - Vol. 24*, pp. 1015-1025.
- Cook, R., et al. (2001). *Concepts and applications of finite analysis*. 4a. Ed. Winesconsin: Wiley.
- DWIA. (2009). Danish Wind Industry Association. Acesso em 05 de 05 de 2009, disponível em <http://www.windpower.org>.
- Feijó P. Bruno et al. (2009). Otimização de torres de aço para geradores eólicos utilizando algoritmos genéticos. CILAMCE, 2009.
- Feijó P. Bruno (2010). Otimização de torres de aço para geradores eólicos. Dissertação de Mestrado - UFC
- Lavassas, I., et al. (2003). Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower. *Engineering Structures*, pp. 1097-1106.
- Mathworks, Inc. MATLAB/The Language of Technical Computing – Version 7.6, USA, 2008.
- NBR 6123. (1988). Forças Devido ao Vento em Edificações. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 8800. (2008). Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Negm, H. M. et al. (2000). Structural design optimization of wind turbine towers. *Computer & Structures*, pp. 649-666.
- Simulia. ABAQUS/Standard User's Manual – Version 6.9, Providence, RI, USA, 2009.
- Parente Jr., E. (2004). Software: Sistema de Análise por Elementos Finitos. SAEF.
- Uys, P. et al. (2007). Optimization of a steel tower for a wind turbine structure. *Engineering Structures - Vol. 29*, pp. 1337-1342.
- Yoshida, P. (2006). Wind turbine tower optimization method using genetic algorithm. *Wind Engineering - Vol 30*, pp. 453-470.