



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Núria Alice Alves Silva Santos

Otimização de torre de aço para aerogerador eólico

Rio de Janeiro
2013

Núria Alice Alves Silva Santos

Otimização de torre de aço para aerogerador eólico

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador (es): Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro
Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro
2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, Núria Alice Alves Silva.
Otimização de torre de aço para aerogerador eólico / Núria
Alice Alves Silva Santos. - 2013.
114f.

Orientador: Francisco José da Cunha Pires Soeiro; José
Guilherme Santos da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Otimização estrutural - Dissertações. I.
Soeiro, Francisco José da Cunha Pires. II. Silva, José Guilherme
Santos da. III. Universidade do Estado do Rio. IV. Título.

CDU 624.04-048.34

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta dissertação, desde que citada à fonte.

Assinatura

Data

Otimização de Torre de Aço para Aerogerador Eólico

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 16 de outubro de 2013.

Banca Examinadora:



Prof. Francisco José da Cunha Pires Soeiro – Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. José Guilherme Santos da Silva.– Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Jayme Pereira de Gouvêa
Faculdade de Engenharia – UFF



Prof. Evandro da Silveira Goulart
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Noé e Fátima, que estiveram sempre ao meu lado nos bons e maus momentos, me dando apoio incondicional e compreensão necessária para que eu pudesse chegar ao fim de mais uma difícil jornada. Espero um dia poder retribuir a inesgotável dívida que tenho para convosco, por estarem presentes em todos os momentos da minha vida acadêmica e pessoal.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar pelo caminho certo e por me dar saúde, força e coragem para vencer meus desafios.

Aos meus pais, pela dedicação, atenção, pelas palavras de incentivo, pelo apoio moral e financeiro, e principalmente por acreditarem em mim.

Aos meus irmãos, pelos conselhos e pela preocupação.

Ao meu amigo e namorado Paulo, pelo companheirismo de todos os momentos, pela compreensão, pela amizade, por me apoiar e incentivar sempre.

As minhas amigas e companheiras, Darina, Lili, Zá e Silviane, que fizeram parte desta jornada agradeço pela preocupação constante, pela camaradagem e pelos momentos de descontração durante todo esse tempo.

Aos meus amigos e familiares, que mesmo distantes nesse momento, jamais poderia esquecê-los. Obrigada pela amizade.

Aos meus orientadores, Professor Francisco José da Cunha Pires Soeiro e Professor José Guilherme Santos da Silva, pela atenção, amizade, disponibilidade, paciência e conhecimentos transmitidos que não faltaram durante o curso de mestrado.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (PGECIV - UERJ), pelos ensinamentos e pela atenção dispensada.

Aos amigos da pós-graduação pelo companheirismo de durante todo o curso.

A UERJ porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

À FAPERJ pelo apoio financeiro.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao
seu tamanho original

Albert Einstein

RESUMO

Santos, Núria Alice Alves Silva. *Otimização de torre de aço para aerogerador eólico*. 2013. 11616f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Diversas formas de geração de energia vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de oferecer alternativas ecologicamente corretas. Neste contexto, a energia eólica vem se destacando na região Nordeste do Brasil, devido ao grande potencial dos ventos da região. As torres, que representam parcela significativa do custo total do sistema, tendem a crescer buscando ventos mais fortes e permitindo assim a utilização de aerogeradores com maior capacidade de geração de energia. Este trabalho tem como objetivo formular um modelo de otimização de torres tubulares de aço, para aerogeradores eólicos. Busca-se minimizar o volume total (custo, indiretamente), tendo como variáveis de projeto as espessuras da parede da torre. São impostas restrições relativas à frequência natural e ao comportamento estrutural (tensão e deslocamento máximo de acordo com recomendações da norma Europeia). A estrutura da torre é modelada com base no Método dos Elementos Finitos e o carregamento atuante na estrutura inclui os pesos da torre, do conjunto de equipamentos instalados no topo (aerogerador), e o efeito estático da ação do vento sobre a torre. Para verificação das tensões, deslocamentos e frequências naturais, foram utilizados elementos finitos de casca disponíveis na biblioteca do programa de análise ANSYS. Os modelos de otimização foram também implementados no módulo de otimização do programa ANSYS (design optimization), que utiliza técnicas matemáticas em um processo iterativo computadorizado até que um projeto considerado ótimo seja alcançado. Nas aplicações foram usados os métodos de aproximação por subproblemas e o método de primeira ordem. Os resultados obtidos revelam que torres para aerogeradores merecem atenção especial, em relação à concepção do projeto estrutural, sendo que seu desempenho deve ser verificado através de metodologias completas que englobem além das análises clássicas (estáticas e dinâmicas), incluam também as análises de otimização.

Palavras-chave: Torre tubular; Projeto ótimo; Otimização estrutural.

ABSTRACT

Different forms energy generation have been developed with the main goal of offering correct ecological alternatives. In this context, wind energy is highly prominent in the northeast Brazil, due to the potential wind in the region. The towers, which represent a significant portion of the total cost of the system tends to find strong winds and permit them to utilize wind turbines as a medium for the generating energy. This work shows an objective way to formulate an model of towers with steel turbines, for wind generation. The work seeks to minimize the total volume (cost, indirectly) with the wall thickness of the tower as design variables. Natural frequencies and structural behavior (allowable stresses and maximum displacement according to the European code) are the design constraints. The tower structure is modeled using the Finite Element Method and the applied loads are the total weight of the structure (including the tower and the wind turbine installed on the top) and the static effect of the wind on the tower. To determine the stresses, displacements and natural frequencies shell elements available in the ANSYS analysis program were used. Optimization models were also implemented using the ANSYS design optimization modulus which uses mathematical programming techniques to find the optimum structure. The first order and sub problem methods were used in the developed applications. The obtained results show that the towers for wind generators deserve special attention related to the conception of the structural project. Its performance has to be verified by a complete methodology that embodies the classical analysis (static and dynamics) and also the optimization analysis.

Keywords: Tubular tower; Optimal design; Structural optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fotos dos parques eólicos do município de Osório [24].	18
Figura 2 - Configuração dos modelos em elementos finitos [7].	21
Figura 3 - Modelos das torres em elementos finitos [11].	23
Figura 4 - Aerogeradores de eixo vertical	27
Figura 5 - Aerogeradores de eixo horizontal [24].	27
Figura 6 - Evolução dos aerogeradores de eixo horizontal [22].	28
Figura 7 - Configuração de um aerogerador de eixo horizontal.	29
Figura 8 - Torre do tipo treliça.	32
Figura 9 - Torre do tipo estaiada.	32
Figura 10 - Montagem de torre pré-fabricada de concreto [11].	33
Figura 11 - Procedimentos de montagem de torre eólica tubular [10].	34
Figura 12 - Modelo de carregamento utilizado na análise estática linear.	35
Figura 13 - Esquema de representação da ação do vento.	36
Figura 14 - Isopletas de velocidade básica	40
Figura 15 - Curva tensão versus deformação	44
Figura 16 - Representação da torre MM92 [21].	54
Figura 17 - Esquema de representação das ligações	55
Figura 18 - Parte superior do modelo MM92 [21].	56
Figura 19 - Elemento finito de casca SHELL 181 [19].	57
Figura 20 - Malha de elemento finito da torre.	58
Figura 21 - Deslocamento translacional horizontal na direção X	59
Figura 22 - Distribuição das tensões de von Mises	60
Figura 23 - Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural.	62
Figura 24 - Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural.	63
Figura 25 - Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural.	63
Figura 26 - Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural.	64
Figura 27 - Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural.	64
Figura 28 - Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural.	65
Figura 29 - Regiões de domínio viável e inviável	71
Figura 30 - Mínimo local e global [20]	71
Figura 31 - Esquema geral de projeto ótimo	73

Figura 32 - Definição do arquivo de dados.....	85
Figura 33 - Segunda tela de definição do arquivo de dados.	86
Figura 34 - Definição das variáveis de projeto.	86
Figura 35 - Definição das variáveis de estado.....	87
Figura 36 - Definição da função objetivo.	88
Figura 37 - Seleção do método de otimização.	89
Figura 38 - Tela de resumo das configurações da rotina.	90
Figura 39 - Listagem de valores de todo processo iterativo.	91
Figura 40 - Menu de extração dos gráficos.	92
Figura 41 - Esquema de representação dos parâmetros da função linear.	94
Figura 42 - Variação dos parâmetros do Modelo 1 ao longo das iterações	105
Figura 43 - Variação dos parâmetros do Modelo 2 ao longo das iterações	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos da NBR 6123 [1].....	38
Tabela 2 – Valores do fator estatístico S_3 recomendados pela NBR 6123[1].....	39
Tabela 3 – Variação dos valores z, q, d e F_1	42
Tabela 4 – Frequências naturais da estrutura.....	61
Tabela 5 – Comandos básicos da linguagem APDL.....	84
Tabela 6 – Definição das variáveis de projeto.....	102
Tabela 7 – Definição da função objetivo.....	102
Tabela 8 – Definição das restrições de projeto (Modelo 1).....	102
Tabela 9 – Definição das restrições de projeto (Modelo 2).....	102
Tabela 10 – Valores iniciais e limites das variáveis de projeto (Modelo 1).....	103
Tabela 11 – Valores iniciais e limites das restrições de projeto (Modelo 1).....	103
Tabela 12 – Valor inicial da função objetivo (Modelo 1).....	103
Tabela 13 – Valores iniciais e ótimos das variáveis de projeto (Modelo 1).....	104
Tabela 14 – Valores iniciais e ótimos das restrições de projeto (Modelo 1).....	104
Tabela 15 – Valor inicial e ótimo da função objetivo (Modelo 1).....	104
Tabela 16 – Valores iniciais e limites das variáveis de projeto (Modelo 2).....	106
Tabela 17 – Valores iniciais e limites das restrições de projeto (Modelo 2).....	106
Tabela 18 – Valor inicial da função objetivo (Modelo 2).....	107
Tabela 19 – Valores iniciais e ótimos das variáveis de projeto (Modelo 2).....	107
Tabela 20 – Valores iniciais e ótimos das restrições de projeto (Modelo 2).....	107
Tabela 21 – Valor inicial e ótimo da função objetivo (Modelo 2).....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Swanson Analysis Systems
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APDL	ANSYS Parametric Design language
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Salvo Brito
GUI	Graphical User Interface
Eurocode	European Committee for Standardization
PGECIV	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área efetiva da estrutura sujeita à ação do vento
a	vetor das acelerações
d	diâmetro da estrutura
C_a	coeficiente de arrasto
CO ₂	dióxido de carbono
⁰ C	grau Celsius
d^k	direção de busca na iteração
F	força do vento
F_r	parâmetro meteorológico da norma
F_g	força global do vento
f	frequência da estrutura
f(x)	função objetivo
$f^{(j-1)}$	configuração da iteração anterior
$f^{(b)}$	melhor configuração encontrada
G	módulo de elasticidade transversal
GPa	Gigapascal
g_j	restrição de desigualdade
h	altura do edifício
h_k	restrição de igualdade
K	matriz de rigidez do sistema
kW	Kilowatts
kN	Kilonewton
M	matriz de massa do sistema
m	Metros
mm	Milímetro

MW	Megawatts
MPa	Megapascal
m/s	metro por segundo
N	Newton
N/m ²	newton por metro quadrado
n	número de graus de liberdade
p	parâmetro da norma
Q	escalar adimensional
q	pressão dinâmica do vento
q_l	pressão dinâmica distribuída do vento
$q(z)$	variação da pressão dinâmica do vento
rad/s	radianos por segundo
S_1	fator topográfico
S_2	fator de rugosidade do terreno
S_3	fator estatístico
S_j	valor mínimo do escalar adimensional
t	Tempo
T	tamanho do passo
u	vetor dos deslocamentos
V_0	velocidade básica do vento
V_k	velocidade característica do vento
\overline{V}_p	velocidade de projeto
z	altura do edifício
Z_r	altura de referência
x	vetor das variáveis de projeto
X^0	projeto inicial

X^k	configuração de iteração
X^{k+1}	próxima configuração de projeto
Φ_i	vetor dos deslocamentos nodais
θ	ângulo de fase

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	TORRES E AEROGERADORES EÓLICOS	26
1.1	Tipos e componentes de aerogeradores	26
1.2	Torres	31
2	ANÁLISES E VERIFICAÇÕES	35
2.1	Ações	36
2.1.1	Ação do vento em estruturas	36
2.1.1.1	Recomendações da norma NBR 6123[1]	37
2.1.1.2	Determinação das forças estática devidas ao vento	40
2.1.2	Peso próprio	43
2.2	Análises realizadas	43
2.2.1	Análise estática linear	43
2.2.2	Análise de vibração livre	44
2.3	Verificações de segurança	47
2.3.1	Força axial resistente de cálculo	48
2.3.2	Flambagem local	49
2.3.3	Momento fletor resistente de cálculo	50
2.3.4	Força cortante resistente de cálculo	51
2.3.5	Deslocamento do topo	52
3	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	53
3.1	Considerações iniciais	53
3.2	Característica da torre investigada	53
3.3	Modelo numérico-computacional	56
3.4	Resultado das análises	59
3.4.1	Análise estática linear	59
3.4.2	Análise dos autovalores e autovetores	61
4	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	66
4.1	Introdução	66
4.2	Histórico da otimização estrutural	66
4.3	Introdução ao problema de otimização estrutural	67
4.4	Definições básicas	67

4.4.1	Variáveis de projeto	68
4.4.2	Função objetivo	69
4.4.3	Restrições.....	69
4.5	Formulação do problema de otimização	70
4.6	Domínio viável e inviável	70
4.7	Algoritmos para otimização estrutural	72
4.7.1	Classificação dos algoritmos	73
5	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL NO PROGRAMA ANSYS	75
5.1	Generalidades	75
5.2	Métodos de otimização	76
5.2.1	Método de primeira ordem.....	76
5.2.2	Método de aproximação por subproblemas.....	79
5.3	Entrada de dados para otimização no ANSYS	82
5.3.1	Linguagem de programação própria (APDL)	83
5.3.2	Interface gráfica do utilizador (GUI)	84
6	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO	93
6.1	Modelo 1 de otimização	95
6.2	Modelo 2 de otimização	98
6.3	Aplicações	100
6.3.1	Aplicação do modelo 1	102
6.3.2	Aplicação do modelo 2	105
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
7.1	Introdução	109
7.2	Conclusões	109
7.3	Sugestões para trabalhos futuros	111
	REFERÊNCIAS	112

INTRODUÇÃO

A energia produzida a partir da força dos ventos tem sido aproveitada desde a antiguidade para mover barcos impulsionados por velas, ou também para fazer funcionar a engrenagem de moinhos, ao mover as suas pás. Nos moinhos de vento a energia eólica era transformada em energia mecânica na moagem de grãos ou para bombear água. Os primeiros moinhos de ventos, usados para moer grãos surgiram na antiga Pérsia, no primeiro milênio antes de Cristo. O conceito de se usar a energia do vento para moer grãos se espalhou rapidamente ao longo do Oriente Médio e foi largamente utilizado antes que o primeiro moinho de vento aparecesse na Europa. No princípio do século XI d.C., os cruzados europeus levaram o conceito para a casa e daí surgiram os famosos moinhos de vento Holandeses, usados na sua grande maioria para drenar água das terras baixas de volta aos rios.

A utilização desta fonte de energia para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há mais de 30 anos. No início da década de 1970, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência de petróleo e carvão. Através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração da energia eólica evoluíram rapidamente em termos de ideias e conceitos preliminares, para produtos de alta tecnologia gerando mais de 50.000 novos empregos e uma sólida indústria de componentes e equipamentos.

A energia eólica teve grande aceitação social e passou a ser reconhecida mundialmente como uma alternativa privilegiada para a geração de eletricidade diante do aquecimento global, uma vez que não emite dióxido de carbono. O Comitê Internacional de Mudanças Climáticas prevê que sejam instalados 30.000 megawatts até o ano 2030, data em que a união Europeia pretende gerar cerca de 10 % de toda a energia que consome a partir do vento. Atualmente existem 85 mil turbinas eólicas em operação no mundo. A Espanha é o quinto maior produtor mundial de energia eólica, perdendo apenas para Alemanha, Dinamarca, Estados Unidos e a Índia.

No Brasil, um dos destaques na produção de energia a partir dos ventos, são os Parques Eólicos localizados no município de Osório, no Estado Rio Grande do Sul. Os parques eólicos de Osório formam o maior complexo gerador de energia a partir do vento da América Latina. O empreendimento tem uma potência instalada de 150 megawatts. São 75 aerogeradores, de dois megawatts cada, instalados no alto de torres com mais ou menos 100 metros de altura. Tais estruturas estão distribuídas igualmente ao longo dos três parques que integram o projeto: Osório, Sangradouro e Índios com área total de 13.000 hectares (130 km²).

A Figura 1 representa algumas das 75 torres eólicas instaladas nos parque do município de Osório.



Figura 1 – Fotos dos parques eólicos do município de Osório [24].

As obras de construção dos parques tiveram início em Setembro de 2005 e em Abril de 2006 foram inauguradas as primeiras 25 torres. Entre Junho e Dezembro do mesmo ano, sequencialmente, todos 75 aerogeradores passaram a operar comercialmente. Segundo a Ventos do Sul Energia, empresa constituída para a implantação dos parques eólicos de Osório, o custo da obra foi R\$ 670 milhões, ou seja, R\$ 4,46 milhões por MW instalado e R\$ 13,1 milhões por MW efetivo. O fator de capacidade da usina é 34 %, superior à média mundial que é em torno dos 30 %.

A utilização da energia eólica comporta numerosas vantagens face às energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis. Dentre as vantagens da energia eólica podem-se ressaltar as principais: é uma fonte renovável, não emite gases de efeito de estufa, gases poluentes e nem gera resíduos na sua operação, o que a torna uma fonte de energia de baixíssimo impacto ambiental.

Como desvantagens no emprego da energia eólica, os seguintes pontos costumam ser citados como causas: alteração da paisagem do local da instalação (considerada uma poluição visual), mortandade de pássaros (se as usinas forem colocadas em rotas migratórias), dificuldade de armazenamento, diferença entre a capacidade instalada e a efetivamente gerada e por fim a emissão de nível de ruídos de baixa frequência, que podem ser causadoras de algum incômodo e de interferência nos sinais de transmissão de TV locais.

Os equipamentos responsáveis pela produção de energia eólica podem ser divididos em aerogerador (rotor e nacelle) e torre. Com esse grande aumento da produção mundial nos últimos anos, esses equipamentos (aerogeradores) vem se tornando cada vez maiores e com maior capacidade de geração de energia exigindo assim torres cada vez mais elevadas e robustas para acesso a ventos de maior velocidade.

As torres que suportam os aerogeradores são elementos muito importantes no conjunto, pois além de terem grande importância como elementos estruturais têm uma participação significativa no custo total dos equipamentos. As concepções dos projetos destas estruturas tiveram início com torres treliçadas passaram para torres cilíndricas e evoluíram, finalmente para as torres tubulares cônicas. No que diz respeito ao material a predominância tem caído no aço, mas o concreto tem sido também utilizado nos modos armado, protendido ou pré-moldado.

Considerando-se o desenvolvimento das torres para aerogeradores

apresentado recentemente, estas estruturas necessitam ter o seu comportamento estrutural investigado, de forma que sejam garantidos projetos cada vez mais seguros e com um custo de fabricação cada vez menor.

Em decorrência, têm sido desenvolvidos alguns trabalhos relacionados com torres para aerogeradores eólicos, dentre os quais, os mais relevantes são detalhados a seguir.

Em 2000, Negn e Maalawi [5] realizaram um estudo onde apresentaram modelos de otimização estrutural de uma torre tubular de aço para turbina eólica composta por segmentos cilíndricos. No estudo foram utilizadas como variáveis de projeto a área, o raio de giração e o comprimento de cada segmento. Os autores avaliaram o comportamento de quatro funções objetivo diferentes: maximização das frequências; maximização da relação rigidez/peso; minimização do peso. Foram utilizadas restrições limitando as tensões: garantindo que uma deflexão máxima não fosse ultrapassada: evitando a ocorrência de ressonâncias; bem como limitando a massa total. Também foram implementadas restrições laterais no diâmetro médio e na espessura da torre para garantir que não ocorresse instabilidade local.

Em 2002, Bazeos *et al.*[6] realizaram um estudo onde analisaram via método dos elementos finitos um protótipo de uma torre de aço cônica de 38m de altura, dividida em três partes, com diâmetro inferior de 2,8 m e superior de 1,82m. Consideraram nas análises além do peso próprio da torre, cargas estáticas provenientes da ação do vento e ações provenientes do aerogerador. Os autores levaram também em consideração as cargas dinâmicas devido às ações sísmicas e constataram que as máximas tensões de Von Mises ocorreram nas proximidades da abertura da porta com valores inferiores a 211 MPa.

Em 2003, Lavassas *et al.* [7] realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o efeito da forma geométrica de uma torre nos resultados das análises. Os autores basearam-se nas recomendações prescritas na norma europeia, Eurocode 3, e resultados obtidos em outros trabalhos e desenvolveram o protótipo e a análise de uma torre cônica de aproximadamente 44 metros de altura. No projeto a torre era dividida em duas partes, Figura 2 (a), com capacidade de suportar um aerogerador de 1 MW. O diâmetro inferior e superior da torre era de 3,30 m e 2,10 m, respectivamente, e a espessura das chapas variavam de 18 mm a 10 mm. Para a realização das análises foram consideradas ações provenientes do vento, sismos e peso próprio e foram criados dois modelos utilizando elementos finitos de casca. No

primeiro modelo, Figura 2 (b), os autores realizaram uma análise estática linear desconsideraram os efeitos da fundação; no segundo modelo, Figura 2 (c), foram modeladas a torre mais a fundação, e realizada uma análise não-linear.

Através Figura 2 podem-se observar as características do protótipo bem como os dois modelos em elementos finitos.

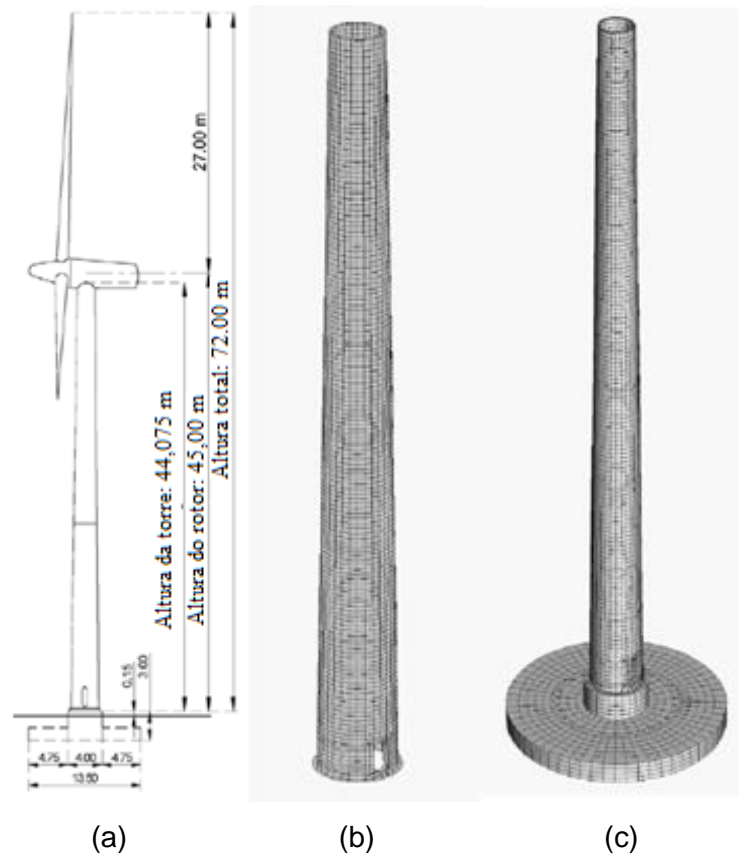


Figura 2 – Configuração dos modelos em elementos finitos [7].

Em 2006, Yoshida [8] publicou um artigo em que o objetivo era a minimização do peso de uma torre, pois segundo ele, o custo desta estrutura vem se mantendo em torno de 20% a 30% do custo total do empreendimento de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica. Yoshida então otimizou uma torre de seção cônica de 80 m de altura com os valores dos diâmetros da base e do topo prefixados em 4,2 m e 2,5 m, respectivamente. Foram consideradas na análise cargas oriundas de abalos sísmicos e tempestade obtidas através de um programa de simulações aeroelásticas. No que tange a otimização propriamente dita, o autor utilizou na busca da solução ótima a técnica de algoritmo genético inspirada na biologia

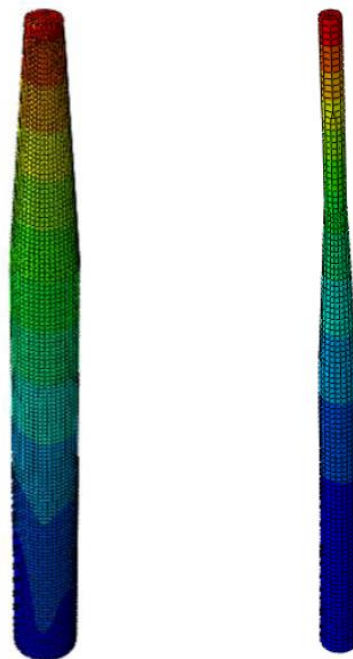
evolutiva. Como variáveis de projeto foram utilizadas parâmetros como as espessuras e diâmetros dos segmentos. Utilizou-se na otimização do problema a minimização da função peso, como sendo função objetivo. As restrições foram os limites de segurança para compressão; a frequência natural e restrições de fadiga.

Em 2007, Uys *et al.* [9] realizaram a otimização do custo total de uma torre cônica de aço, levemente cônica de 45 m de altura, dividida em três segmentos, com diâmetros da base de 3,30 m, variando linearmente até o diâmetro do topo de 2,10 m. Foram utilizados enrijecedores a fim de evitar deformações excessivas e considerado a carga do vento atuando ao longo da estrutura, de acordo com especificações da norma europeia. Na análise de otimização foram usados como variáveis de projetos as espessuras das chapas, o número e dimensões dos enrijecedores e restringidos a flambagem local e global. Utilizaram como função objetivo a função custo, composta pelos custos do material e custos de todo o processo de fabricação. Os autores concluíram que redução do custo esta diretamente relacionada com o número de enrijecedores, ou seja, que o custo aumenta à medida que se aumenta o número de enrijecedores na torre.

Em 2010, Feijó *et al.* [10] realizaram a otimização do custo total de uma torre tubular para aerogeradores eólicos. No estudo apresentaram uma formulação para otimização do projeto de uma torre de aço constituída de segmentos tubulares tronco de cone. O objetivo do estudo era achar o custo mínimo, minimizando o peso total da torre. As variáveis de projeto utilizadas foram os diâmetros e espessuras dos segmentos. Foram utilizadas como restrições a rigidez, resistência e estabilidade de acordo com recomendações de norma, as frequências naturais, o processo de fabricação e transporte. As análises: estática linear e de vibração livre foram realizadas utilizando elementos finitos de viga e supondo a torre engastada na base. O problema de otimização foi resolvido usando o algoritmo genético e os resultados obtidos foram comparados com soluções alcançadas em outros trabalhos.

Em 2011, Lima [11], em sua dissertação de mestrado, apresenta a formulação de um modelo de otimização de torres tubulares de aço para aerogeradores, composta de segmentos em tronco de cone. Na investigação buscou-se a solução de peso mínimo, tendo como variáveis de projeto os diâmetros externos e as espessuras de chapa características de cada segmento. O autor utilizou restrições relativas às frequências naturais, a limitações de transporte e geométricas. O conjunto nacele/rotor foi modelado como uma massa rígida fixada no topo da torre, e

o carregamento atuante na estrutura incluiu os pesos da torre, do conjunto rotor-nacele, e o efeito estático da ação do vento sobre a torre. As soluções obtidas foram analisadas utilizando elementos finitos de casca do programa de análise ABAQUS. Os modelos de otimização foram implementados no MATLAB e, devido à natureza discreta das variáveis de projeto e às descontinuidades de funções de restrições, utilizou-se na solução técnicas de algoritmos genéticos. A Figura 3 apresenta dois modelos em elementos finitos, respectivos aos modelos TTC45 e TTC60 utilizados na análise de otimização.



(a) Modelo TTC 45 (b) Modelo TTC 60

Figura 3 – Modelos das torres em elementos finitos [11].

Motivação e objetivos

É notório que o planeta está sofrendo consequências de anos de desenvolvimento desordenado e irresponsável. Contudo, a cada dia aumenta a consciência ambiental, tanto dos governantes como da população mundial. Assim, as leis socioambientais vêm ficando mais exigentes, forçando o desenvolvimento de novas tecnologias que substituam as já existentes que se enquadrem na nova conjuntura ambiental. Além do apresentado somam-se as frequentes oscilações dos

preços dos produtos derivados de petróleo e os protocolos mundiais firmados, constantemente, para proteção ambiental e redução do nível de CO₂ na atmosfera.

No contexto energético, vêm sendo desenvolvidas, várias formas de energias com o objetivo de oferecer um desenvolvimento sustentável, ou seja, um desenvolvimento com consumo consciente e utilizando fontes naturais limpas e renováveis, preservando o meio ambiente.

Dentre as fontes naturais renováveis, denominadas de “Energias Verdes” pode-se citar a energia produzida a partir do vento, que vem se destacando devido a sua grande disponibilidade, renovabilidade e custo zero para obtenção de suprimentos. Porém, como desvantagens do emprego da energia eólica, tem-se o elevado custo das torres que suportam os aerogeradores que, segundo Yoshida [8], vem se mantendo em torno de 20% a 30% do empreendimento.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a apresentação de um modelo para otimização de torres de aço tubulares, compostas de segmentos em troncos de cone destinadas a aerogeradores eólicas. Os objetivos específicos são: a minimização do volume total da torre, dada sua relevância no custo; avaliar os efeitos das restrições de tensão máxima, deslocamento máximo e frequência natural fundamental no modelo; resolver o problema de otimização com base na utilização do programa ANSYS.

Estrutura da dissertação

O presente capítulo apresentou os fatos que motivaram a realização deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos e uma breve descrição do conteúdo do presente estudo.

O primeiro capítulo apresenta um histórico da evolução dos aerogeradores e da capacidade instalada no mundo, bem como os tipos existentes e as principais partes que os compõem. Também são apresentados os principais tipos de torres utilizados, suas principais vantagens e desvantagem.

No capítulo dois são apresentadas as análises e verificações de segurança. Inicialmente são apresentadas as ações atuantes sobre a torre, as normas e recomendações de projeto propostas pela norma brasileira no que tange a edifícios submetidos a ação do vento, e a seguir são descritas as análises e a formulação

para determinação dos esforços conforme recomendações da norma brasileira e europeia.

No capítulo três é apresentado o modelo estrutural investigado, através de uma descrição detalhada do mesmo, com o intuito de se apresentar as suas características, bem como o material empregado. Apresenta-se também o modelo numérico utilizado nesta dissertação, assim como as propriedades do elemento finito utilizado para a construção do modelo computacional. Ao fim do capítulo são apresentados os resultados da análise estática linear e da análise dos autovalores e autovetores do modelo estrutural em questão.

No capítulo quatro é apresentada a introdução aos problemas de otimização estrutural e suas definições básicos para a correta formulação dos problemas. É também apresentada neste capítulo um breve resumo da história da otimização estrutural e abordado os conceitos de domínio viável e inviável.

No capítulo cinco é apresentado de forma geral como é feita a otimização estrutural empregando-se o programa ANSYS. São apresentadas duas formas de execução do processo de otimização (linguagem APDL e interface gráfica do utilizador), assim como as características dos dois métodos disponíveis no programa.

O capítulo seis descreve os dois modelos de otimização utilizados neste trabalho e apresenta os resultados obtidos nas aplicações. No primeiro modelo utiliza-se o método de primeira ordem e as restrições estão relacionadas à resposta estática da estrutura. Já no segundo modelo é usado o método de aproximação por subproblema e as restrições estão relacionadas às frequências naturais.

Finalmente, no capítulo sete, apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além das considerações e algumas sugestões para a continuação do trabalho aqui desenvolvido.

1 TORRES E AEROGERADORES EÓLICOS

Os aerogeradores possuem classificação baseada em seu tipo de eixo e podem ser suportadas por diferentes tipos de torre. Neste capítulo serão apresentadas algumas vantagens e desvantagens desses componentes, assim como as definições imprescindíveis à compreensão e formulação do problema de otimização de torre, propósito final deste estudo.

1.1 Tipos e componentes de aerogeradores

Os aerogeradores são classificados quanto à posição do eixo do seu rotor e podem ser divididos em duas categorias: aerogeradores verticais e aerogeradores horizontais.

Os aerogeradores de eixo vertical são equipamentos simples, tendem a ser mais seguros, mais fáceis de construir e por serem montados próximos ao solo lidam melhor com as condições de turbulências atmosférica. As torres que suportam estes aerogeradores são normalmente torres baixas permitindo a instalação de todo o dispositivo de conversão de energia na base. Estes tipos de aerogeradores não necessitam de mecanismo de direcionamento e tem uma velocidade de arranque mais baixa, em comparação com os aerogeradores de eixo horizontal, o que lhes dá vantagens em condições de vento reduzido.

Por outro lado, os equipamentos de eixo vertical, não são tão eficientes como os aerogeradores de eixo horizontal. Isso acontece porque o vento junto ao solo é de fraca intensidade, o que implica um menor rendimento deste tipo de aerogerador.

Em geral, este tipo aerogerador é especialmente indicado para meios urbanos, pois além de ser silencioso, aproveita o vento mesmo que a direção deste não seja constante e haja a formação de turbilhões, o que acontece com muita frequência em áreas com edifícios, árvores e outros obstáculos.

A Figura 4 mostra alguns exemplos de aerogeradores de eixo vertical.



(a) rotor de 5 lâminas curvas

(b) rotor Darrieus

(c) rotor de Savonius

Figura 4 – Aeroeradores de eixo vertical.

Atualmente, os equipamentos de grande porte disponíveis, são em esmagadora maioria máquinas tripás de eixo horizontal, mas também podem ser monopás, bipás, quadripás e múltipás. A Figura 5 mostra aeroeradores de eixo horizontal com rotores de três e múltiplas pás.



(a) Rotor de múltiplas pás

(b) Rotor com três pás

Figura 5 – Aeroeradores de eixo horizontal [24].

Os rotores de múltiplas pás são bastante utilizados, mas são aplicados praticamente para o bombeamento de água. Possuem baixa potência, que é limitada pela área do seu rotor. Assim, não são indicados para a geração de energia elétrica.

Os rotores de duas ou três pás são utilizados em todos os aerogeradores modernos. Proporcionam uma grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor. Contudo necessitam de ventos com velocidade mais elevadas.

Até 2005, a capacidade da maior parte de aerogeradores instaladas ou em instalação no mundo tinha diâmetro de rotor entre 60 m e 90 m (diâmetro da circunferência definida pelo movimento circular das pontas das pás), com capacidade nominal de energia variando entre 1MW e 3MW. À época estavam em desenvolvimento (protótipo) as turbinas de 5 MW com um diâmetro de rotor de 120 m.

A Figura 6, considerando a capacidade de geração de energia elétrica, mostra a evolução das turbinas eólicas comerciais nas últimas três décadas. Porém a grande evolução tanto na comercialização como na tecnologia, como no tamanho dos aerogeradores, ocorreu nos últimos 15 anos, como pode ser observado.

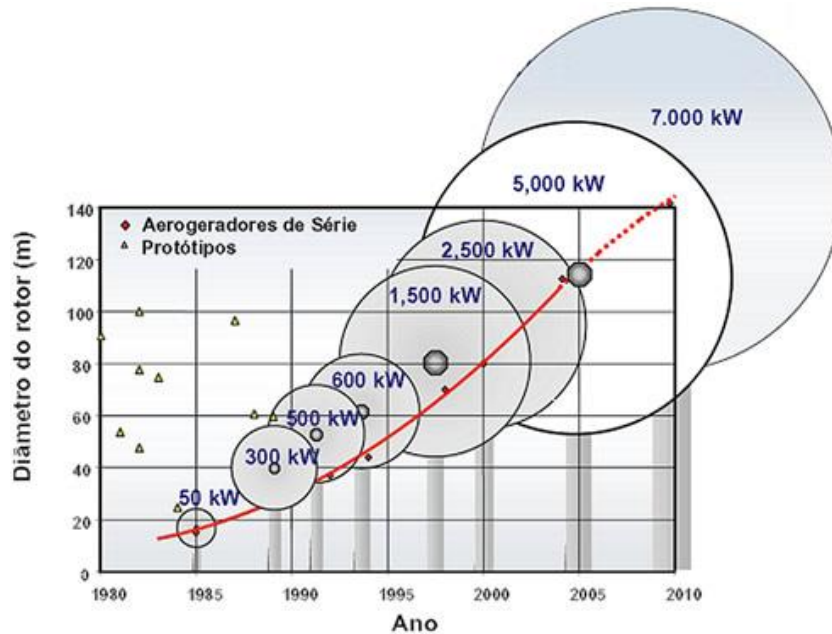


Figura 6 – Evolução dos aerogeradores de eixo Horizontal [22].

Uma visualização do conjunto de equipamentos que constituem um sistema de transformação de energia eólica em energia elétrica facilita o entendimento dos

principais componentes. A Figura 7 ilustra um aerogerador de eixo horizontal com as principais partes que o compõe, que são:

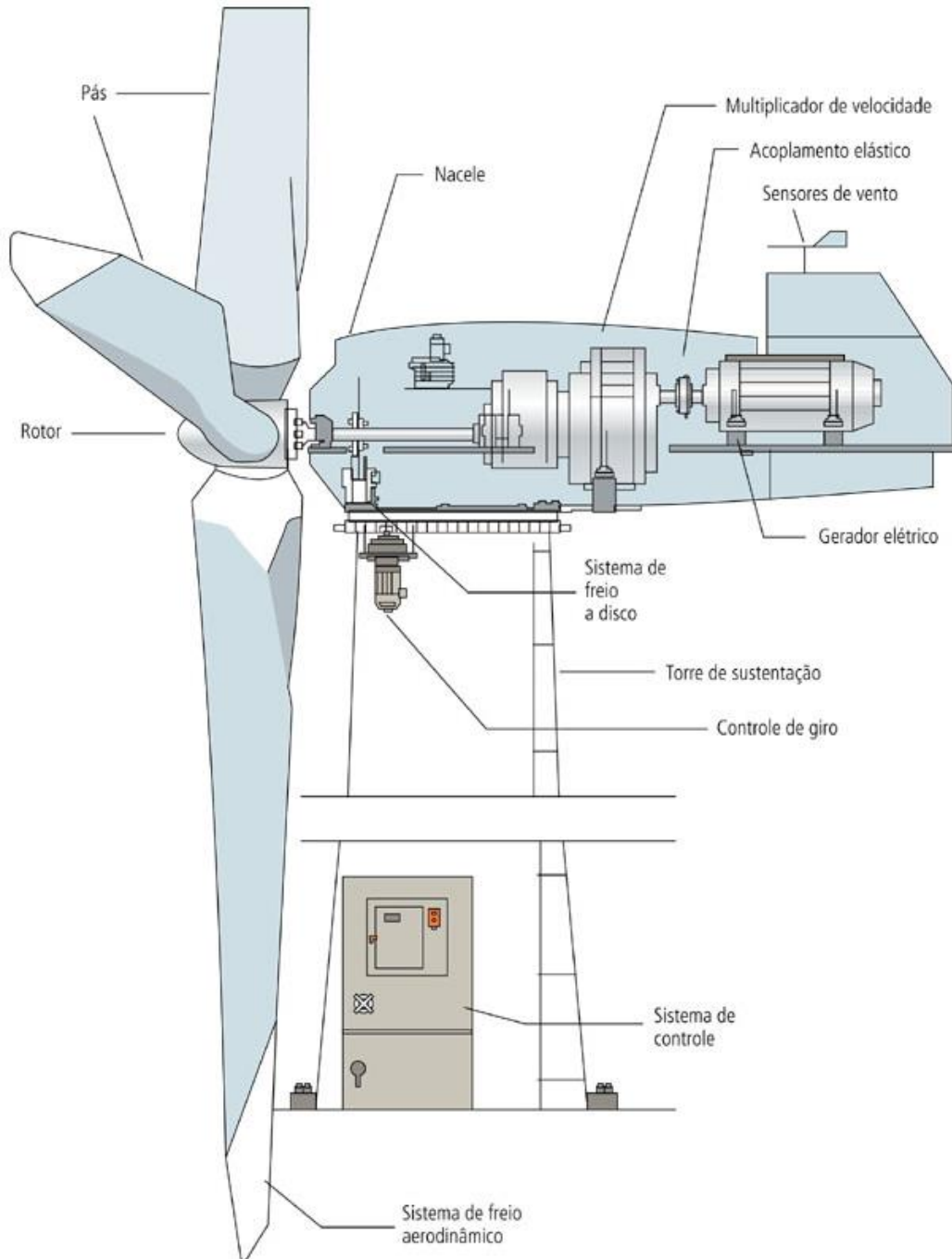


Figura 7 – Desenho esquemático de um aerogerador de eixo horizontal [23].

Na sequência são definidos vários componentes importantes do conjunto de equipamentos de um aerogerador eólico, de forma a esclarecer suas influências no funcionamento do sistema e permitir melhor compreensão do conjunto:

- a) Pás, cubo - A maioria dos geradores eólicos possui duas ou três pás. Estas peças aerodinâmicas são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica a frente do aerogerador denominada cubo. As pás assemelham-se a asas de aviões e são responsáveis pela interação com o vento e conversão de parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Dependendo de suas dimensões e da altura do rotor, podem ser fabricadas com vários tipos de materiais, como por exemplo: fibra de vidro reforçada com epóxi, alumínio e com fibras de carbono.
É relevante ressaltar que o cubo é uma peça construída em aço de alta resistência, com rolamentos para fixação das pás.
- b) Controle de giro – Responsável por direcionar o aerogerador à medida que o vento muda de direção, garantindo que o rotor voltado para a direção do vento.
- c) Rotor - É o conjunto das pás e o cubo, que acopla as pás e o cubo ao eixo do aerogerador.
- d) Sensor de vento - É o equipamento responsável por medir a direção do vento e comunicar ao controlador de giro.
- e) Sistema de controle – É responsável por iniciar e parar o funcionamento do gerador, garantindo que o aerogerador trabalhe dentro de uma faixa limite de velocidade dos ventos, para evitar desgastes e danos ao sistema.
- f) Caixa multiplicadora - A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, tem por finalidade transmitir a energia mecânica transferida do eixo do rotor para o gerador. No projeto tradicional de turbinas eólicas a caixa de transmissão fica entre o gerador e o rotor sincronizando a baixa velocidade angular do rotor à velocidade mais elevada dos geradores convencionais.
- g) Geradores - Os geradores são a parte realmente responsável por produzir a energia elétrica. Eles são responsáveis pela transformação da energia

mecânica de rotação em energia elétrica, através de equipamentos que realizam a conversão eletromecânica.

- h) Sistema de trava do rotor – Equipamento de controle instalado entre o gerador e a caixa multiplicadora, que tem como objetivo reduzir a velocidade de rotação do eixo, ou até mesmo parar o seu funcionamento, sempre que a velocidade do rotor ultrapassar valores pré-estabelecidos.
- l) Torre – É o elemento necessário para sustentação e posicionamento do aerogerador na altura conveniente para o seu funcionamento, recebendo ações oriundas do próprio gerador, ações diretas como vento, peso próprio, entre outras.

Além dos componentes dos definidos acima, também são partes de um aerogerador o anemômetro, que mede a velocidade do vento e transmite os dados para o sistema de controle.

1.2 Torres

Com a grande evolução da potência dos aerogeradores, tornando cada dia maiores e mais potentes, se fez necessário a busca de ventos de maiores intensidades e com fluxos mais constantes. Conseqüentemente as dimensões das torres que suportam estas turbinas estão cada vez maiores.

As torres podem ser fabricadas de diversos materiais e formas. Entre as principais estão as tubulares, que podem ser feitas em aço ou em concreto, as treliçadas e as estaiadas, ambas fabricadas em aço.

As torres do tipo treliça, Figura 8, são formadas por perfis cantoneiras de aço, soldadas nos extremos formando os nós das ligações, seu peso é mais ou menos 50% menos se comparada com torre do tipo tubular, o que lhe confere boa vantagem. Entretanto, o emprego desse tipo de torre agride a paisagem natural, e com o passar dos anos acabou inviabilizada em decorrência das cargas dinâmicas que passaram a ser consideradas atuando sobre estas estruturas.



Figura 8 – Torre do tipo treliça [11].

As torres estaiadas são geralmente recomendadas para aerogeradores pequenos, Figura 9, na qual um mastro de aço apoia-se em uma base e mantém-se na vertical com o auxílio de cabos de aço, fixados no topo e distribuídos até as fundações, assegurando a estabilidade da estrutura em qualquer direção. Possuem como vantagem o baixo custo de fabricação, mas uma das suas principais desvantagens é a necessidade de uma grande área livre ao seu redor para a fixação dos cabos.



Figura 9 – Torre do tipo estaiada [11].

Posteriormente surgiram as primeiras torres construídas com concreto moldado “in loco”. Mas devido ao excessivo tempo gasto até o término da construção das mesmas, levou alguns fabricantes, tendo em vista a redução do tempo, a se especializarem na fabricação de torres em concreto pré-moldados. A Figura 10 mostra a instalação de uma torre de concreto pré-fabricada instalada no parque eólico de Peñablanca, na Espanha.



Figura 10 – Montagem de torre pré-fabricada de concreto [11].

Mais recentemente associando a forma estrutural às boas propriedades do aço, surgiram as torres em configuração geométrica tubular, tipo casca, confeccionadas a partir de chapa de aço, depois evoluindo para a configuração em troco cone. Atualmente com o uso de aerogeradores de grande porte são montadas torres tubulares de aço com mais de 100 metros de altura.

As torres tubulares fabricadas em aço são habitualmente, divididas em segmentos (cilíndricos ou cônicos) com 20 a 30 metros de comprimento cada, soldados ou aparafusados internamente. As limitações de comprimento são

impostas normalmente devido à dificuldade de transporte do local de fabricação ao local de instalação, como também a dificuldade de montagem.

Na Figura 11, pode-se observar como é feita a montagem dos segmentos que constituem uma torre eólica tubular.



Figura 11 – Procedimentos de montagem dos segmentos de uma torre eólica tubular [11].

O custo das torres que suportam aerogeradores tem uma influência significativa no valor total estimado do investimento. Assim, a fase de projeto da torre passa a possuir uma grande importância, pois uma redução no custo pode ser significativa para o custo final da energia.

2 ANÁLISES E VERIFICAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos de análise e verificações de projeto estrutural de torres eólicas. De início são apresentadas as ações e procedimentos de análise estática linear e de análise de vibração livre, e em seguida verificações de segurança específicas para o dimensionamento de estruturas de aço, segundo a NBR 8800 e a norma Eurocode 3.

As verificações de segurança são baseadas em critérios das normas NBR 8800 e Eurocode 3, que levam em consideração o estado limite último, e o estado limite de serviço da estrutura.

Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura durante toda a sua vida útil, relativo às ações mais desfavoráveis a que são submetidas. Já o estado limite de serviço diz respeito ao desempenho da estrutura nas suas condições normais de utilização.

A Figura 12 ilustra as condições de carregamento do modelo investigado, cujas cargas representam: P_{aero} o peso do aerogerador, PP o peso próprio da torre, F_{vento} a força estática resultante do vento que incidi ao longo da torre.

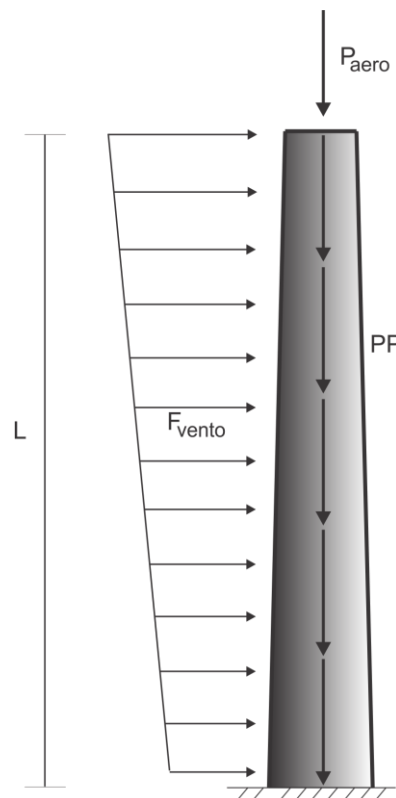


Figura 12 – Modelo de carregamento utilizado na análise estática linear.

2.1 Ações

Neste estudo, além das cargas oriundas do vento foram levadas também em consideração na avaliação da resposta estática da estrutura, o peso próprio e o peso dos equipamentos responsável pela produção de energia eólica, conjunto cubo/pás/nacele (aerogerador), localizados na parte superior da torre.

2.1.1 Ação do vento em estruturas

O vento é produzido por diferenças de pressões e do deslocamento de massas de ar na atmosfera. As diferenças de pressão podem causar movimentos que variam de brisas a violentos furações. Define-se o termo barlavento como sendo a região de onde sopra o vento em relação à estrutura, e sotavento a região oposta àquela de onde o vento esta soprando (Figura 13). Como mostra a Figura 13, as ações do vento podem exercer nas torres efeitos de pressões e sucções, causando muitas vezes efeitos indesejáveis. Vento a barlavento produz sobre a estrutura um esforço de pressão empurrando-a na direção e sentido em que sopra, já o vento a sotavento produz um esforço de sucção vertical puxando-a na sua direção e sentido.

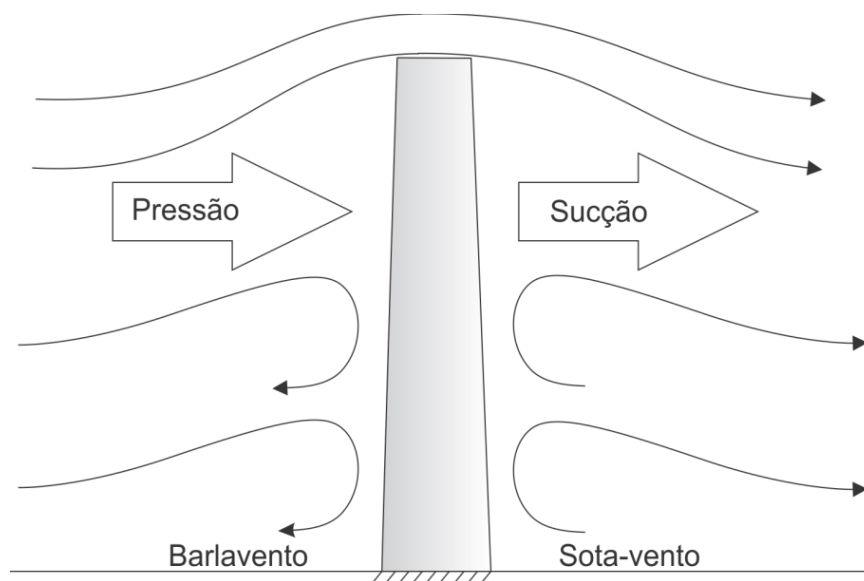


Figura 13 – Esquema de representação da ação do vento.

A ação do vento é composta por uma parcela constante (velocidade média) e por uma parcela flutuante (rajadas), cuja velocidade varia em torno da velocidade média. Admite-se que a velocidade média do vento mantém-se constante durante de mais ou menos 10 minutos, produzindo nas estruturas efeitos puramente estáticos, designados como resposta média. Já as flutuações da velocidade podem induzir em estruturas muito flexíveis, especialmente em estruturas altas e esbeltas, oscilações muito importantes na direção da velocidade média. O vento pode não ser um problema em estruturas baixa e pesadas, porém em estruturas altas e esbeltas é uma das ações mais importantes a ser determinada no projeto de estrutura.

Para realizar a análise, tomou-se como referência para o carregamento proveniente das ações do vento, as recomendações da norma brasileira NBR 6123 [1], analisando-as como forças estáticas.

2.1.1.1 Recomendações da norma NBR 6123

De acordo com a norma de ventos NBR 6123 (1988) [1], as forças estáticas do vento são determinadas a partir da velocidade básica do vento que é estabelecida dependendo da localização da construção dentro do território brasileiro. A velocidade básica (V_0) é a velocidade de uma rajada de três (03) segundos, que ultrapassa em média esse valor uma vez em 50 anos, medida a 10m de altura em um terreno aberto e plano. Os valores das velocidades básicas (V_0) do vento no Brasil são fornecidas através de curvas de igual velocidade denominadas isopletas (Figura 14). Na elaboração do mapa de isopletas foram usados dados processados estatisticamente, com base nos valores de velocidades máximas anuais medidos em cerca de 49 cidades brasileiras.

No projeto estrutural, a velocidade usada nos cálculos é a velocidade característica. Para o cálculo da velocidade característica do vento (V_k) é necessária a determinação dos seguintes fatores: fator topográfico S_1 , fator S_2 que leva em consideração características do terreno e da edificação, e o fator estatístico S_3 . Assim, a velocidade característica do vento pode ser expressa pela seguinte equação:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (1)$$

O fator topográfico definido como fator S_1 , leva em consideração as variações do relevo do terreno nos arredores de onde a estrutura está localizada. Para terrenos planos ou fracamente acidentados, $S_1=1,0$. Quando se tem morros ou taludes, o fator S_1 varia em função da altura medida e da inclinação do morro ou talude. Para vales profundos protegidos de vento de qualquer direção, S_1 assume o valor de 0,9.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação em estudo. Este fator S_2 é determinado definindo uma categoria (rugosidade do terreno) e uma classe de acordo com as dimensões da edificação. De acordo com a NBR 6123 [1], o fator de rugosidade pode ser calculado pela seguinte equação:

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2)$$

Onde, b , F_r e p são parâmetros meteorológicos encontrados na Tabela 1 e z representa a cota (dimensão estrutural) acima do nível geral do terreno.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos (NBR 6123 [1]).

Categoria	Z_g (m)	Parâmetro	Classe		
			A	B	C
I	250	B	1,1	1,11	1,12
		P	0,06	0,065	0,070
II	300	B	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		P	0,085	0,09	0,10
III	350	B	0,94	0,94	0,93
		P	1,10	1,105	0,115
IV	420	B	0,86	0,85	0,84
		P	0,12	0,125	0,135
V	500	B	0,74	0,73	0,71
		P	0,15	0,16	0,175

O terceiro fator para se determinar a velocidade característica do vento, é o fator S_3 , denominado fator estatístico, pois como o próprio nome diz, é baseado em conceitos estatísticos e considera além do grau de segurança requerido a vida útil da edificação. Este fator é definido dependendo do uso da edificação e os valores mínimos que podem ser adotados estão definidos na Tabela 2 [1].

Tabela 2 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 recomendados pela NBR 6123 [1].

1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Para o cálculo da pressão dinâmica ou pressão de obstrução do vento a norma NBR 6123 [1] adota condições normais de temperatura e pressão, 15^oC e 1atm, respectivamente. Assim a partir da velocidade característica do vento (V_k) pode-se determinar a pressão dinâmica pela seguinte equação, sendo q dada em N/m² e V_k em m/s.

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (3)$$

A força global (F_g) do vento sobre uma estrutura é determinada pela soma vetorial de todas as forças que atuam sobre a mesma. A componente da força global na direção do vento é obtida pela Expressão (4), onde A corresponde a área frontal efetiva, q é a pressão dinâmica e C_a é o coeficiente de arrasto previsto na Tabela 10 da NBR 6123 [1].

$$F_a = C_a q A \quad (4)$$

A Figura 14 mostra o gráfico das isopletas, ou seja, as linhas de mesma velocidade básica do vento no Brasil, em intervalos de 5m/s.

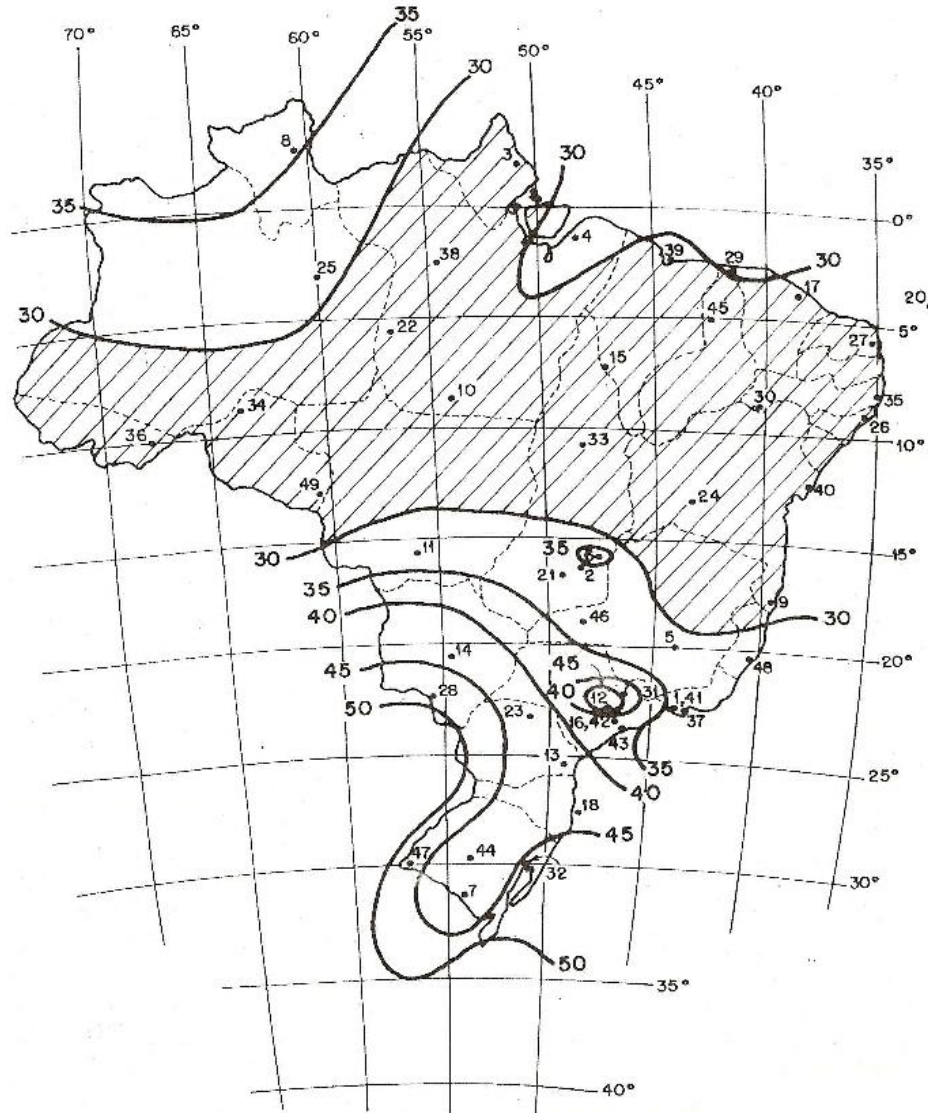


Figura 14 - Isopletas de velocidade básica V_0 (m/s) no Brasil (NBR 6123 [1]).

2.1.1.2 Determinação das forças estáticas devidas ao vento

Neste estudo foi considerado apenas o efeito estático da atuação do carregamento devido ao vento, com sua modelagem baseada na NBR 6123 [1]. As cargas devido ao vento foram aplicadas no modelo utilizando-se o conceito básico de carregamento equivalente.

Para a modelagem da ação do vento foram adotados os seguintes parâmetros de projeto:

Velocidade básica do vento: $V_0 = 35$ m/s (Região do Rio de Janeiro)

Fator topográfico: $S_1 = 1,0$

Categoria do terreno: $S_2 =$ Categoria II, Classe C ($b = 1,0$; $F_r = 0,95$ e $p = 0,10$)

Fator estatístico: $S_3 = 0,95$ (Grupo 3)

Altura do edifício: $h = 75$ m

Coefficiente de arrasto: $C_a = 0,6$

Considerando a Expressão (2), o fator (S_2) que considera a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno pode ser determinado conforme a Equação (5), onde z representa a cota acima do nível do terreno:

$$S_2 = 0,95 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,10} \quad (5)$$

Uma vez definida, os fatores de ponderação S_1 , S_2 , S_3 são multiplicados pela velocidade básica (V_0) para ser obtida a velocidade característica do vento V_k . A velocidade característica do vento permite, então, determinar a pressão dinâmica (q). Como os coeficientes S_1 e S_3 são constantes deduz-se que a variação da pressão do vento (q) (Equação (3)), em relação à cota acima do nível do terreno, seguirá o comportamento do fator S_2 definido pela Equação (5), já que este varia com a altura z . Então:

$$q = 0,613 \left[1 \left(0,95 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,10} \right) 0,95 \right]^2 \quad (6)$$

Portanto, para cada altura de seção transversal da torre existe um valor próprio para a pressão dinâmica (q), variando de 0 (zero) a 75 metros, altura total da torre.

Multiplicando-se a pressão q (N/m^2) pelo diâmetro externo da torre, seção a seção, obtém-se a pressão distribuída por metro de comprimento (q_l) que atuará ao longo da altura. Então, o efeito da pressão dinâmica q dada em N/m^2 para a torre pode ser representado por uma carga distribuída q_l (N/m) atuando ao longo da sua

altura, considerando que a mesma seja formada por diversos segmentos de 1 metro de comprimento. Desta forma, obtém-se o valor de q_l (N/m) para uma dada cota z , multiplicando-se a correspondente pressão q (N/m²) pelo respectivo diâmetro externo (na seção de ordenada z).

Em consequência, a componente da força global que atua sobre a torre na direção do vento, dada pela Equação (4), também pode ser representada por uma força distribuída F_l (N/m) ao longo da torre, como resultado do produto da pressão dinâmica q_l (N/m) pelo coeficiente de arrasto C_a , previsto pela Tabela 10 da NBR 6123.

A Tabela 3 apresenta os dados referentes às variações dos seguintes valores para a torre investigada: altura (z), diâmetro (d), pressão do vento (q) e carga distribuída (F_l) na torre.

Tabela 3 – Variação dos valores de z , q , d e F_l para torre em tronco de cone.

Altura z (m)	Diâmetro d (m)	Pressão do vento na torre q (N/m ²)	Carga estática do vento na torre F_l (N/m)
76,20	2,956	669,5	2.108,8
71,4	3,040	657,2	2.129,3
66,7	3,124	641,5	2.150,5
61,9	3,208	625,3	2.166,5
57,2	3,292	608,4	2.176,5
52,4	3,376	590,7	2.179,9
47,6	3,460	576,0	2.177,2
42,9	3,544	556,5	2.166,0
38,1	3,628	535,5	2.144,8
33,3	3,712	512,8	2.111,5
28,6	3,796	492,9	2.074,2
23,8	3,880	465,5	2.010,7
19,1	3,964	440,5	1.942,6
14,3	4,048	403,9	1.826,7
9,5	4,132	357,6	1.657,3
4,8	4,216	290,40	1.378,7
0,0	4,300	0,00	0,00

2.1.2 Peso próprio

Nos cálculos foram considerados o peso próprio da torre como uma distribuída por unidade de comprimento, e o peso de todos os equipamentos mecânicos e elétricos concentrados no topo da torre. Não foram levadas em consideração massas não estruturais, como por exemplo, escada interna, cabos e quadros que implicariam em incremento no peso.

2.2 Análises realizadas

A análise estática e de vibração livre constituíram uma fase inicial do estudo, onde foram determinados parâmetros importantes da estrutura investigada tais como: esforços internos, deslocamentos, frequências naturais e modos de vibração.

2.2.1 Análise estática linear

A análise estática de uma estrutura tem como finalidade a obtenção de sua resposta às combinações das ações a que é submetida. Este tipo de análise é utilizada com o objetivo principal de quantificar a magnitude dos esforços internos, reações e deslocamentos da estrutura sob condições de carga estática. Evidentemente que a obtenção de bons resultados requer que o modelo de avaliação seja o mais próximo possível de suas reais condições de utilização.

Em virtude do material adotado (aço), o modelo pode ser considerado elástico linear ou elastoplástico. No modelo elástico linear, é admitido que as tensões são inferiores à tensão de escoamento do material, e dentro de certos limites, com a deformação progredindo proporcionalmente à tensão (Lei de Hooke), enquanto que no modelo de análise elastoplástico, admite-se a existência de plastificação em alguns pontos da estrutura, causando redistribuição de esforço. Neste caso, o comportamento tensão versus deformação do material é não linear e a análise é dita não linear. A não linearidade pode ser causada pelo comportamento do material, grandes deslocamentos e condições de contorno.

Neste estudo o material utilizado (aço) foi considerado elástico linear, homogêneo e isotrópico, conforme o gráfico da Figura 15, e a não linearidade física ou do material foram desconsiderados.

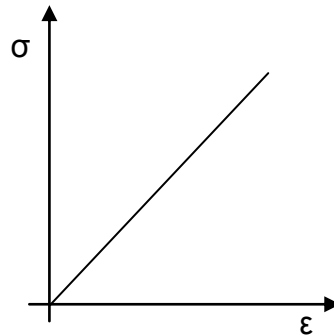


Figura 15 – Curva tensão versus deformação.

2.2.2 Análise de vibração livre

A torre e o aerogerador formam um sistema mecânico cujo comportamento sob ação do vento pode ser caracterizado por vibrações das pás e da torre havendo a possibilidade de ressonância devido à aproximação entre frequências naturais de vibração das pás e da torre. Sendo assim, um dos problemas a serem enfrentados no projeto deste sistema é o da vibração excessiva das pás e da torre que pode levar à fadiga dos materiais.

As ações do vento em torres, de um motor sobre uma base, das ondas do mar em estruturas Offshore, o impacto de cargas móveis sobre sistemas estruturais, são alguns exemplos de ações capazes de modificar a quantidade de movimento de uma estrutura. O estudo dessas modificações ocorridas na quantidade de movimento dos sistemas elásticos consiste na grande tarefa da dinâmica das estruturas.

A análise modal, ou análise de vibração livre, reflete o comportamento dinâmico básico da estrutura e constitui uma indicação de como a mesma responderá ao carregamento a que é submetida. A partir da análise de vibração livre, onde a estrutura vibra livremente, sem atuação de forças externas, podem-se

extrair parâmetros modais tais como as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração.

As frequências naturais são os parâmetros modais que indicam a taxa de oscilação da estrutura, após cessada a força externa que provocou o seu movimento. Em palavras similares, representa o quanto a estrutura vibra quando não há sobre a mesma forças aplicadas. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, sendo designada por um número real positivo, e cuja unidade mais comum é o Hertz. As estruturas possuem diversas frequências naturais, pois podem vibrar livremente em diversas direções. A frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas, designada por frequência fundamental.

Os modos de vibração são as configurações ou formas como o sistema pode oscilar, mantendo-se constante a relação entre os deslocamentos dos diversos pontos da estrutura. Para cada frequência natural existe um modo de vibração específico.

Os autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração) de um sistema podem ser determinados matematicamente, ou seja, pela via teórica. Assim tem-se que para um sistema qualquer submetido à vibração livre não amortecida, com vários graus de liberdade, pode ser escrita uma equação de movimento tal que,

$$M\mathbf{a} + K\mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

Onde, M é a matriz de massa, K é a matriz de rigidez, \mathbf{a} é o vetor das acelerações e \mathbf{u} é o vetor dos deslocamentos.

O problema geral de vibração livre pode ser considerado como um sistema de vários graus de liberdade em movimento harmônico simples, representado pela Expressão (8), onde, $\boldsymbol{\varphi}_i$ representa o vetor dos deslocamentos nodais, e θ é o ângulo de fase.

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\varphi}_i \text{sen}(\omega_{0i}t + \theta) \quad (8)$$

Derivando-se a equação (8) duas vezes, obtém-se:

$$a(t) = \omega_{0i}^2 \varphi_i \text{sen}(\omega_{0i}t + \theta) = -\omega_{0i}^2 u \quad (9)$$

Fazendo a substituição das equações (8) e (9) na equação (7), tem-se:

$$-\omega_{0i}^2 M \varphi_i \text{sen}(\omega_{0i}t + \theta) + K \varphi_i \text{sen}(\omega_{0i}t + \theta) = 0 \quad (10)$$

E uma vez que o termo seno é arbitrário, podendo o mesmo ser omitido, a Equação (10) pode ser reescrita como:

$$[K - \omega_{0i}^2 M] \varphi_i = 0 \quad (11)$$

Multiplicando-se os termos da equação acima por M^{-1} , obtém-se:

$$[M^{-1}K - \omega_{0i}^2] \varphi_i = 0 \quad (12)$$

Uma vez que φ_i não pode ser nulo, uma solução não trivial é somente possível se o determinante for nulo. Assim,

$$\|M^{-1}K - \omega_{0i}^2\| = 0 \quad (13)$$

A equação (13) é denominada de equação característica e suas raízes são os valores característicos, ou autovalores, e correspondem ao quadrado das frequências natural. A cada uma dessas raízes corresponde um vetor característico, Φ_i , ou autovetor, que representa o modo de vibração do referido sistema.

2.3 Verificações de segurança

Neste item serão apresentados os requisitos básicos que regem o projeto de estruturas tubulares de aço, com base no método dos estados limites (ELU e ELS), segundo a NBR 8800 [2] e a norma europeia Eurocode 3 [25].

Os estados limites são padrões determinados de comportamento da estrutura que não devem ser superados. As condições dos estados limite último dizem respeito à segurança da estrutura submetida às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional, e os estados limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura para condições normais de utilização [2].

No modelo investigado, o carregamento considerado gera na estrutura esforço normal de compressão (N) provocado pela massa do aerogerador, e esforços de momento fletor (M) e cortante (V), proveniente da ação do vento. Assim, faz-se necessário a verificação conforme critérios de resistência de estruturas submetidas a essa combinação de esforços solicitantes.

Dessa forma, para que o projeto satisfaça as exigências da NBR 8800 [2], é necessário que as seguintes condições sejam atendidas:

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2, \quad \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (14)$$

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2, \quad \frac{N_{sd}}{2 * N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (15)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (16)$$

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 de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável; $M_{Sd,z}$ e $M_{Sd,y}$ são momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal e $M_{Rd,z}$ e $M_{Rd,y}$

são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal; V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo; V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo.

2.3.1 Força axial resistente de cálculo

Para o cálculo da força axial resistente de cálculo (N_{Rd}), tem-se que:

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (17)$$

Onde:

χ - é o fator de redução associado à resistência à compressão

Q - é o fator de redução total associado à flambagem local

A_g - é a área bruta da seção transversal

f_y - tensão de escoamento

γ_{a1} - coeficiente de ponderação

O fator de redução χ é definido em função do índice de esbeltez reduzido (λ_0), definido como:

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5, \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (18)$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5, \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (19)$$

Onde

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (20)$$

N_e é a força axial de flambagem elástica, dada por:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (21)$$

Onde:

E - módulo de elasticidade

I - momento de inércia da seção transversal

KL - comprimento de flambagem, sendo $K=2$ para o modelo de estrutura engastada na base e livre no topo.

2.3.2 Flambagem local

Para prevenir a flambagem local de estruturas axialmente comprimidas, utilizando paredes de seção tubular circulares, a norma NBR 8800 aplica no cálculo de N_{Rd} o fator Q dado por:

$$\text{Para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y}, \quad Q = 1,00 \quad (22)$$

$$\text{Para } 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}, \quad Q = \frac{0,038}{\frac{D}{t}} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad (23)$$

Além disso, não é prevista a utilização de seções tubulares circulares com $\frac{D}{t}$

maior que $0,45 \frac{E}{f_y}$, isto é, deve-se ter:

$$\frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (24)$$

2.3.3 Momento fletor resistente de cálculo

Para determinar-se o momento fletor resistente de cálculo, utilizando seções tubulares circulares, considerando o estado limite de flambagem local de uma parede de tubo, tem-se:

$$\text{Para } \lambda \leq \lambda_p, \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (25)$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,021E}{\lambda} + f_y \right) W \quad (26)$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,33E}{\lambda} \right) W \quad (27)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (28)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (29)$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y} \quad (30)$$

Onde:

M_{pl} - é o momento de plastificação, que é definido como o produto do módulo de resistência plástico (Z) pela resistência ao escoamento do aço (f_y): $M_{pl} = Zf_y$.

Para seções tubulares de paredes finas, $Z = t.D^2$.

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação

λ_r - parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento

W - é o módulo de resistência elástico, sendo para uma seção tubular circular de parede fina definida por:

$$W = \pi t \frac{D^2}{4} \quad (31)$$

Para assegurar a validade de uma análise elástica, não se considera para o momento resistente valores maiores que o dado por:

$$M_{Rd} \leq \frac{1,50Wf_y}{\gamma_0} \quad (32)$$

Onde γ_0 é o coeficiente de ponderação da resistência.

2.3.4 Força cortante resistente de cálculo

Para efetuar-se a verificação do esforço cortante, deve-se determinar a força cortante atuante em um dos eixos centrais de inércia, estando os elementos sujeitos a combinações de esforços [2].

Assim, para elementos de seção tubular circulares, tem-se:

$$V_{Rd} = \frac{0,5\tau A_g}{\gamma_{a1}} \quad (33)$$

Sendo, τ_{cr} igual ao maior dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,6E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left(\frac{D}{t}\right)^4}} \leq 0,60f_y \quad (34)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78E}{\left(\frac{D}{t_d}\right)^{\frac{3}{2}}} \leq 0,60f_y \quad (35)$$

Onde:

D- é o diâmetro externo da seção transversal

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

L_y - é a distância entre as seções de forças cortantes máximas e nulas

A Equação (34) representa uma verificação relativa ao estado limite último de flambagem por cisalhamento. Já a equação (35) representa a verificação em relação ao estado limite último de escoamento. Assim, a mais crítica das duas situações é tomada na determinação da força cortante de cálculo.

2.3.5 Deslocamento no topo

A norma NBR 8800 não possui nenhuma recomendação específica para deslocamentos máximos admissíveis para o caso de torres como no modelo proposto. Deste modo, o deslocamento horizontal no topo do modelo, é tratado segundo considerações da norma europeia Eurocode 3 [25].

Para uma verificação do estado limite de utilização em torres metálicas correntes segundo o Eurocode 3, parte 3-2 [25], o deslocamento máximo permitido no topo dessas estruturas é representado pela Equação (36).

$$\delta_{\max} = \frac{h}{50} \quad (36)$$

Onde:

h - representa a altura da torre.

3 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, será apresentado o processo de modelagem numérico-computacional da torre estudada nesta dissertação. São abordados: as características da torre eólica MM92 [21], a sua discretização em elementos finitos e os resultados obtidos nas análises realizadas.

3.2 Características da torre

Nesta investigação, o modelo estrutural investigado corresponde a estrutura de uma torre eólica de aço estudada por Sirqueira [12]. A torre refere-se ao modelo MM92 da Repower [21], com capacidade de gerar 2 MW de energia elétrica, muito presente nos países europeus como Portugal, Espanha e Alemanha. O modelo MM92, fabricado pela empresa Repower [21] é um dos modelos de torre, atualmente, com uma das melhores tecnologias de captação de energia eólica. Este modelo começa a produzir energia a partir de uma velocidade de vento de 3m/s e interrompe sua produção quando a velocidade atinge os 24 m/s.

O modelo MM92 [21] de 76,20 metros de altura possui um formato de um tronco cônico vazado, dividido em três partes facilitando assim o transporte e a montagem. A primeira parte possui uma altura de 21,77 m, diâmetro na base de 4,30 m e no topo de 3,917 m, a segunda parte uma altura de 26,62 m, diâmetro na base de 3,45 m e no topo de 2,96 m e, por fim, a terceira parte com altura de 2,78 m, diâmetros na base e no topo, de 3,45 e 2,96 metros respectivamente.

A Figura 16 mostra as três partes da torre e um modelo de torre MM92 [21] com diâmetro externo máximo de 4300 mm localizado na base e 2955 mm na parte superior.

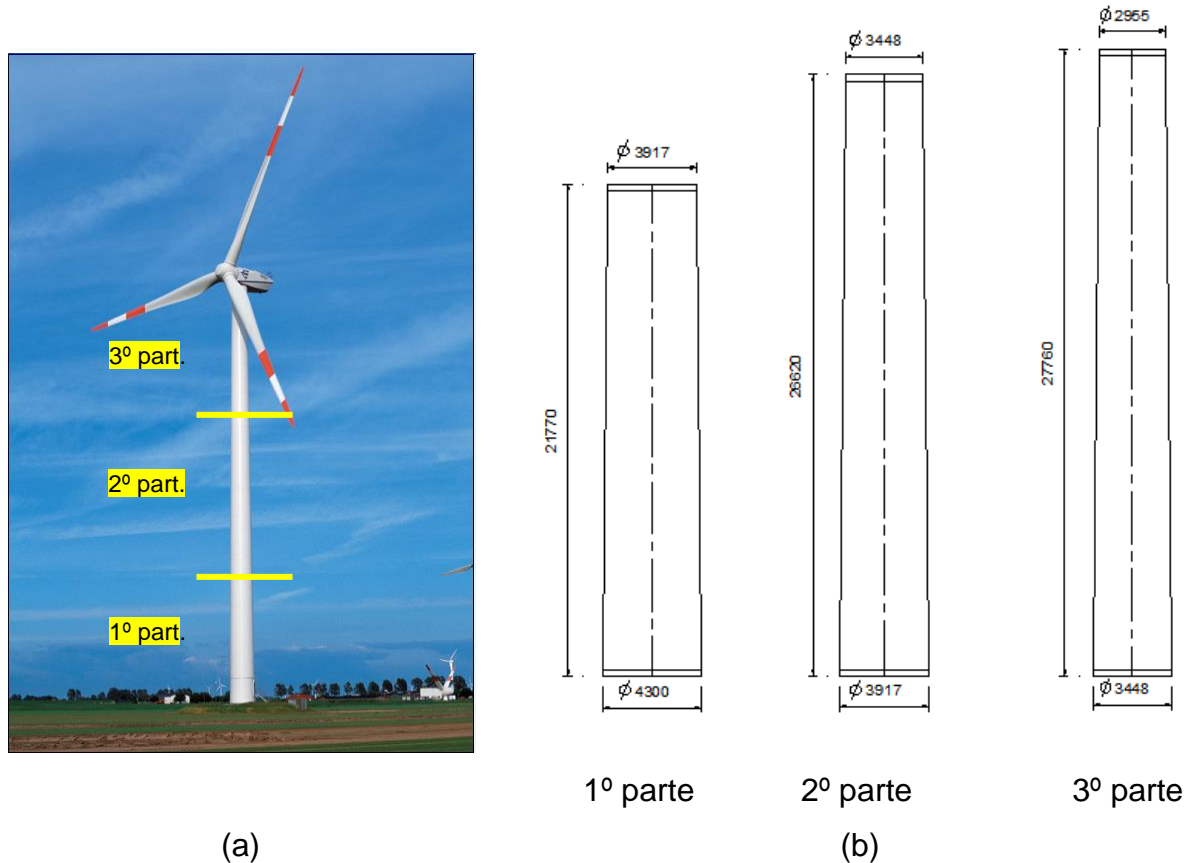


Figura 16 – Representação da torre eólica MM92 da Repower [12].

Na Figura 16 pode-se observar uma igualdade na medida dos diâmetros entre as partes que compõem a torre. Isto se faz necessário para se ter na superfície externa da torre uma continuidade, ou seja, uma superfície plana. A espessura da parede da torre varia ao longo da sua altura entre 30 mm na base e 12 mm no topo.

O sistema de ligação das três partes que constituem a torre é feita por aparafusamento. Emprega-se um total de 464 parafusos, parafusos com diâmetros de 45 mm para ligação da primeira parte com a fundação e com a segunda, parafusos de 39 mm ligando a segunda com a terceira parte e de 30 mm ligando a terceira parte com o topo.

Na ligação das partes da torre surgem os enrijecedores, em decorrência da espessura dos flanges de ligação ser superior ao da parede da torre. A Figura 17 representa de forma esquemática o sistema de ligação utilizado na torre e, uma das suas aberturas. No modelo MM92, existem duas aberturas, uma maior para acesso interno e outra para ventilação, ambas as aberturas têm o formato de uma elipse com enrijecedores perpendiculares, conforme a Figura 17.

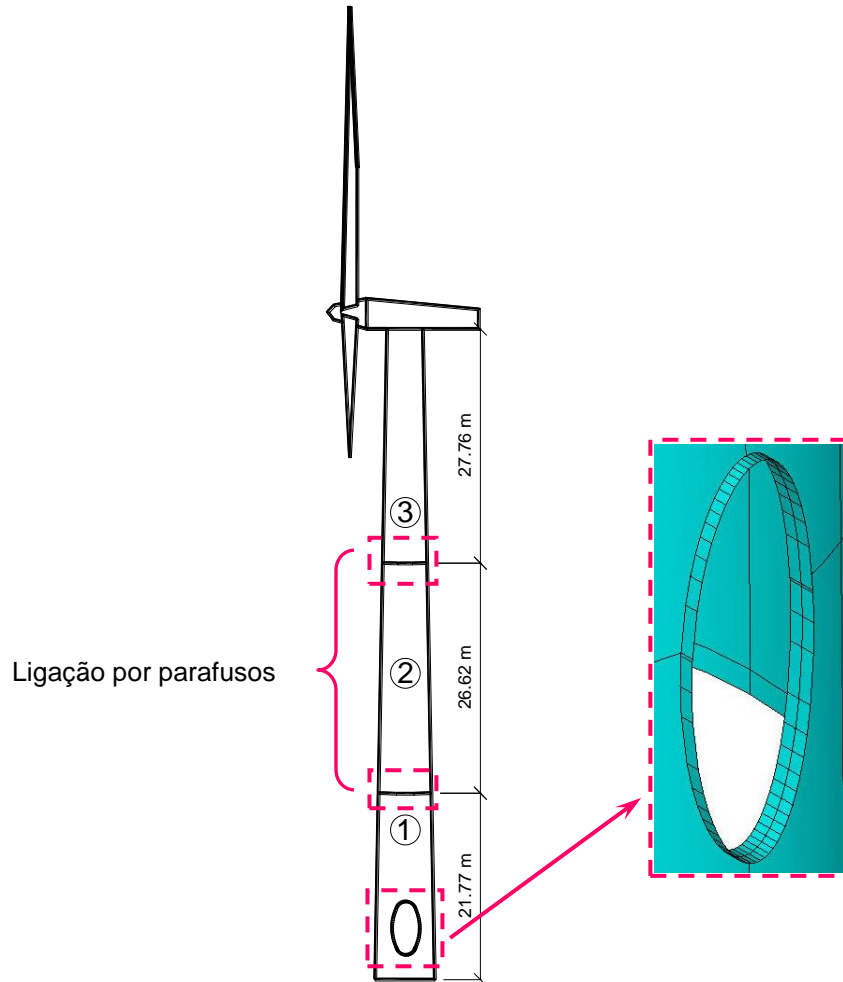


Figura 17 – Esquema de representação das ligações [12].

O aerogerador de eixo horizontal instalado na parte superior da torre é composto por três pás de hélice fabricadas com resina plástica e medindo cada uma 45,20m. As pás pesando cada uma 800 kg, são transportadas separadamente e engastadas ao rotor através de parafusos criando, quando em funcionamento, uma superfície variada de 6.720 m^2 . O rotor é a parte do aerogerador responsável em fazer girar a turbina e conseqüentemente, produzir a energia elétrica. O conjunto de todos os equipamentos mecânicos e elétricos localizados na parte superior da torre, pesando 6900 kg, dá-se o nome de nacele. A Figura 18 ilustra a nacele, o rotor e as pás da hélice da torre modelo MM92 [21]. A parede da torre, dos flanges e do enrijecedor da abertura da porta são fabricados em aço S355 que possui módulo de elasticidade de 205 GPa e uma tensão de escoamento de 355MPa.



Figura 18 – Parte superior do modelo MM92 [21].

As características da torre MM92 apresentadas neste item podem ser encontradas com maior detalhe no trabalho de Sirqueira [12].

3.3 Modelo numérico-computacional

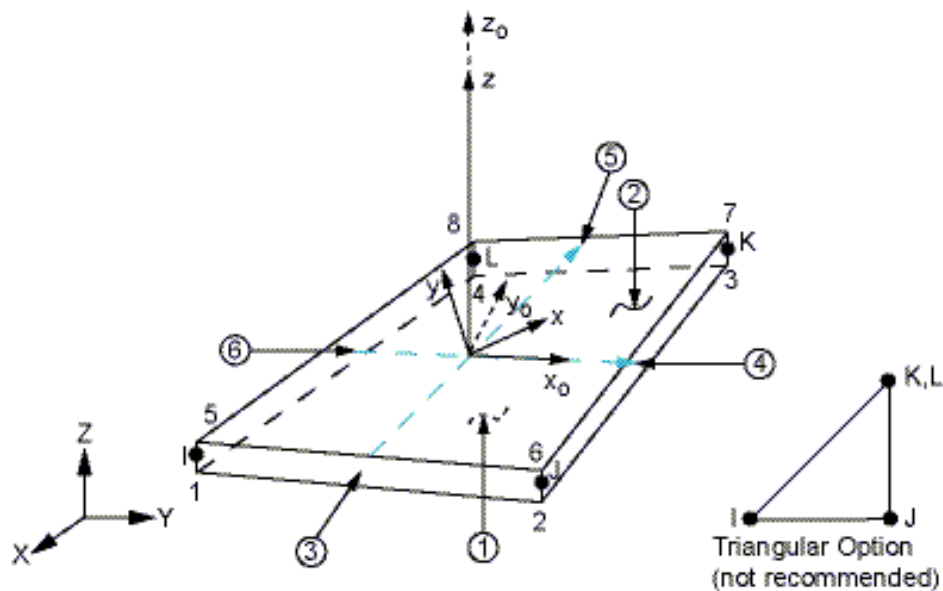
O foco principal deste trabalho é a otimização do volume do modelo de torre MM92[21]. Uma das principais etapas desta metodologia de projeto é a etapa de análise estrutural, que deve ser realizada de maneira eficiente, precisa e adequada para que a otimização ocorra de forma satisfatória.

No presente trabalho, a análise estrutural compreende o cálculo de respostas clássicas, como tensão e deslocamento e, adicionalmente, as frequências naturais. A implementação computacional relativa às análises estruturais foram realizadas empregando-se técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF). O MEF surgiu como ferramenta numérica para a solução de problemas de análise na indústria aeroespacial no começo da década de 50 e, devido a sua generalidade e versatilidade sua utilização foi abrangendo todas as áreas da engenharia. O método consiste, basicamente, em dividir o domínio do problema a ser analisado em partes discretas menores, processo este chamado de discretização, e em considerar funções aproximadoras nesses elementos.

Para os problemas de análise estrutural e otimização estrutural abordados, nesta dissertação, foi adotado o programa comercial ANSYS versão 12.1 [19].

Os modelos numéricos foram desenvolvidos com base no método dos elementos finitos utilizando-se elementos de casca SHELL 181 presente na biblioteca do programa ANSYS [19]. Este elemento é apropriado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentem espessuras médias e finas. O elemento SHELL 181 é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X,Y e Z. Trata-se de um elemento adequado para modelagem de problemas estruturais que envolvam análise linear e não linear física e geométrica.

A Figura 19 apresenta o elemento de casca SHELL 181 utilizado na elaboração dos modelos numéricos finitos deste estudo.



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.

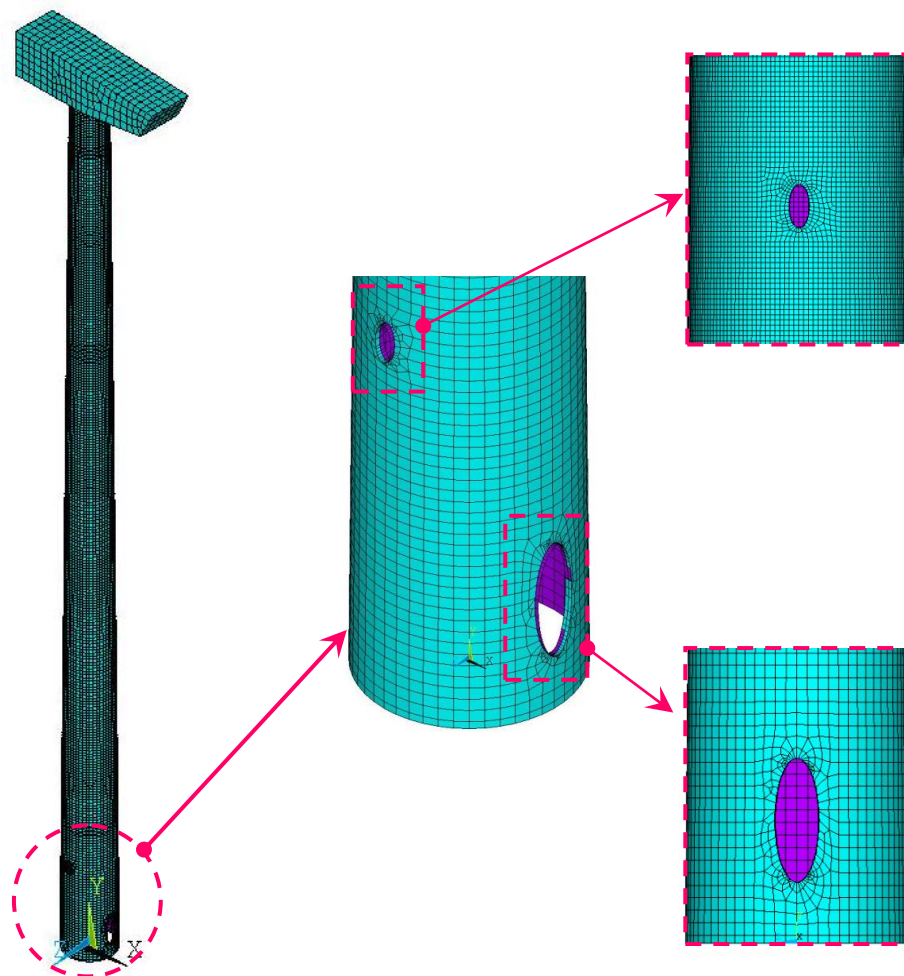
x = Element x-axis if ESYS is provided.

Figura 19 – Elemento finito SHELL 181 presente na biblioteca do programa ANSYS [19].

Nos modelos numéricos, as condições de contorno da torre de aço, foram simuladas pela restrição do grau de liberdade apropriado, sendo considerado o impedimento da rotação e translação dos eixos X, Y e Z, ou seja, uma base engastada.

As malhas dos modelos de elementos finitos foram definidas através de testes de validação de modelagem, isto é, a análise modal dos modelos foram realizadas

com diversos tamanhos de malhas até se obter um grau de refinamento adequado, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural. Para os modelos da torre, as malhas apresentaram resultados satisfatórios com dimensões 0,5 m, apresentando 16984 nós, 17010 elementos finitos de casca SHELL181. Na modelagem das aberturas das portas foram consideradas todas as suas características geométricas, ver Figura 20.



a) Modelo em elemento finito

b) Detalhe das aberturas

Figura 20 – Malha de elementos finitos da torre.

3.4 Resultado das análises realizadas

Como já foi dito a realização das análises constituíram uma fase inicial do estudo, onde foram determinados parâmetros importantes da estrutura investigada, como por exemplo, esforços internos, deslocamentos, frequências naturais, utilizados posteriormente na análise de otimização, objetivo final desta dissertação.

3.4.1 Análise estática linear

As Figuras 21 e 22 apresentam os resultados associados aos valores máximos da resposta, obtidos mediante realização da análise estática linear.

A Figura 21 mostra os deslocamentos translacionais horizontais ocorridos na torre, considerando-se as cargas permanentes e acidentais. Nesta Figura pode-se observar que o deslocamento horizontal máximo ocorre no topo da estrutura, com valor de 36,03 cm.

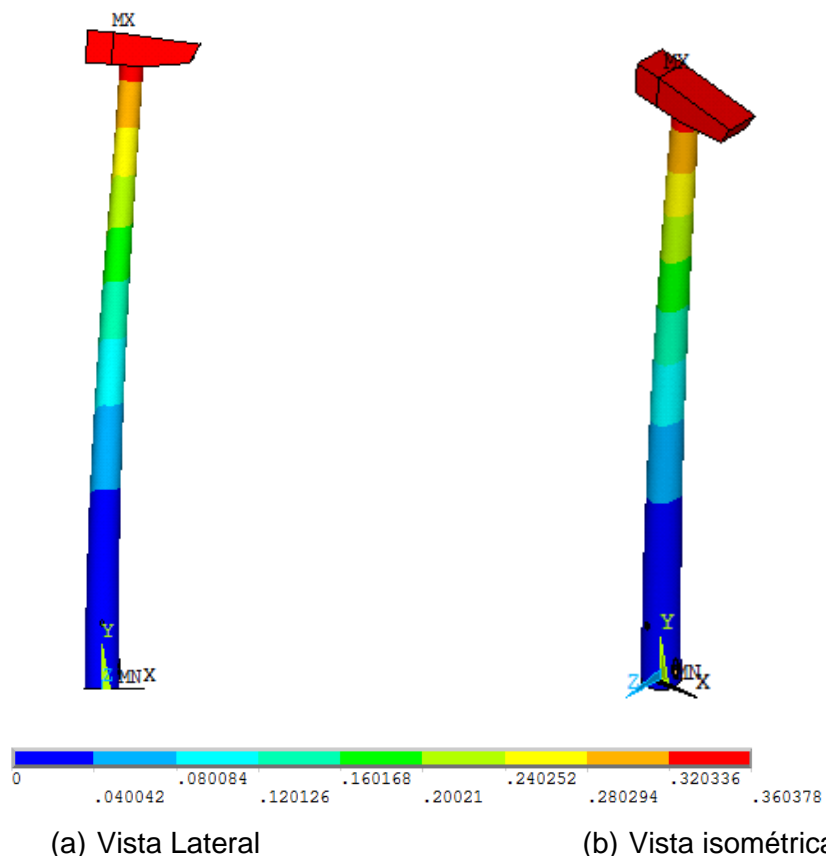


Figura 21 – Deslocamento translacional horizontal na direção X (em metro).

A norma europeia, Eurocode 3 [25], parte 3-2, recomenda que o deslocamento máximo no topo de torres metálicas esteja dentro do limite imposto pela Equação (37), onde h representa a altura da torre.

$$\delta_{\max} = \frac{h}{50} = 152\text{cm} \quad (37)$$

Com isso, pode-se afirmar que a estrutura atende ao requisito da norma Eurocode 3 [25][2], pois o deslocamento máximo obtido na análise é inferiores ao deslocamento máximo permitido pela referida norma que é de 152 cm.

Na sequência, são apresentados os resultados referentes aos esforços obtidos mediante análise estática linear da torre, considerando a aplicação do vento perpendicular ao plano YZ (direção X). A Figura 22 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises ao longo da torre, pela ação do vento de velocidade básica de 35 m/s provocando uma pressão dinâmica atuando ao longo da torre conforme descrito no segundo Capítulo 2 deste trabalho.

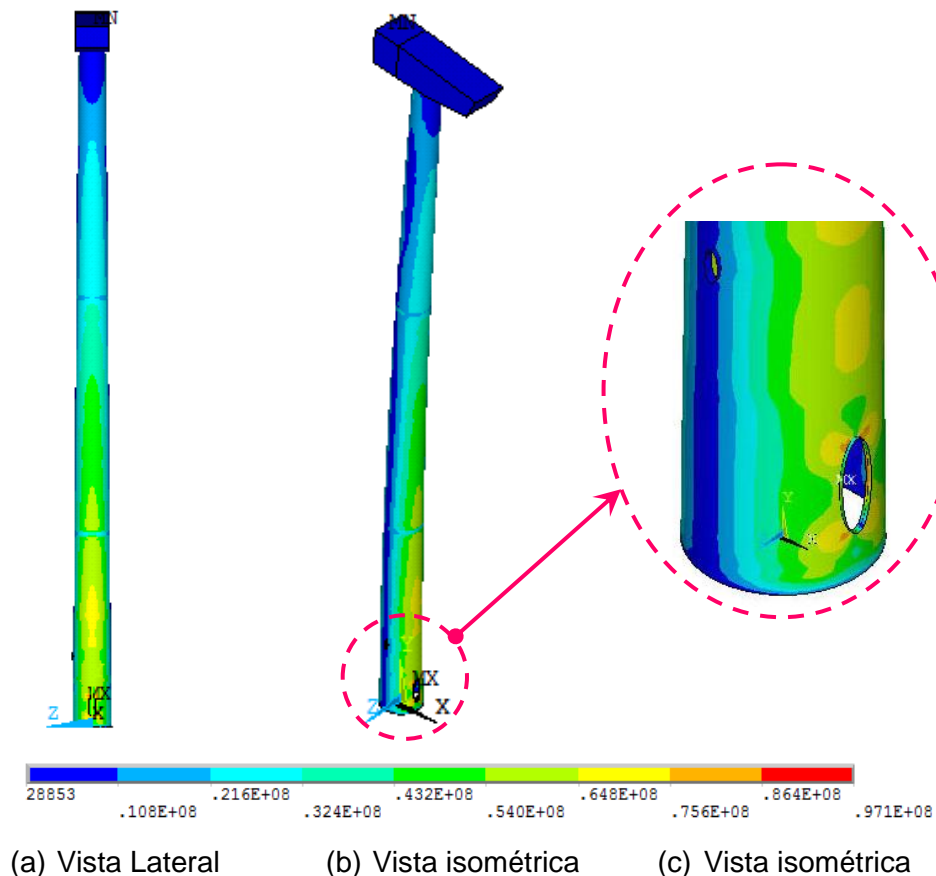


Figura 22 – Distribuição das tensões de von Mises (em Mpa).

Nesta análise observa-se que a maior tensão de von Mises (97,1 MPa) foi obtida junto à abertura da porta da torre e esta não excede o valor da tensão de escoamento do aço de 355 MPa.

3.4.2 Análises dos autovalores e autovetores

Neste item serão apresentados as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) referentes à torre MM92 investigada no presente estudo. Através da análise de vibração livre realizada, com o auxílio do programa computacional ANSYS foram obtidos os valores das primeiras frequências naturais e os respectivos modos de vibração do modelo numérico.

Cabe destacar, a importância da fase de interpretação e validação dos resultados, quando é feita a análise dos resultados obtidos, a fim de verificar se são satisfatórios ou não. Nesta etapa são fundamentais os conhecimentos teóricos, bem como a experiência do projetista.

Na Tabela 4 pode-se observar uma comparação feita entre os resultados obtidos experimentalmente [26] e os resultados obtidos pelo modelo numérico desenvolvido nesta dissertação. A partir da calibração dos resultados numéricos, são apresentados na Tabela 4 os valores das seis primeiras frequências naturais, obtidas via análise numérica.

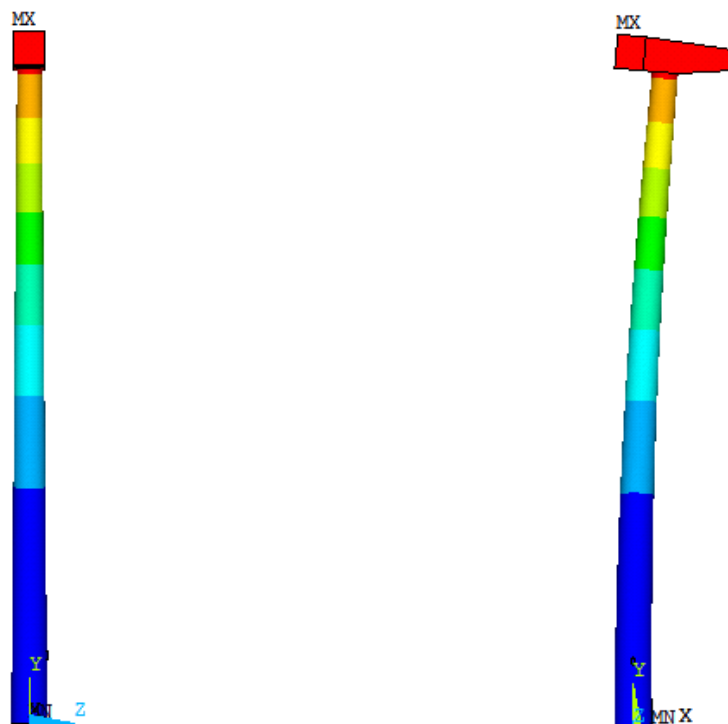
Tabela 4 – Frequências naturais da estrutura.

Frequências Naturais	Resultados		Erro Percentual (%)
	ANSYS [19]	Experimental [26]	
f_{01}	0,36 Hz	0,34 Hz	6,54
f_{02}	0,36 Hz	0,34 Hz	6,18
f_{03}	2,59 Hz	2,77 Hz	6,42
f_{04}	2,64 Hz	2,79 Hz	5,43
f_{05}	2,88 Hz	-	-
f_{06}	5,93 Hz	-	-

Analisando os resultados contidos na Tabela 4 verifica-se, que os resultados fornecidos pelo modelo numérico são muito próximos daqueles correspondentes ao teste experimental [26], apresentando diferenças aceitáveis, sob o ponto de vista numérico. Pode-se assim afirmar que os modelos numéricos desenvolvido no presente estudo apresentam resultados coerentes e confiáveis.

Em prosseguimento a análise, são apresentadas as seis primeiras formas modais referentes ao modelo estrutural, correspondentes às seis primeiras frequências naturais.

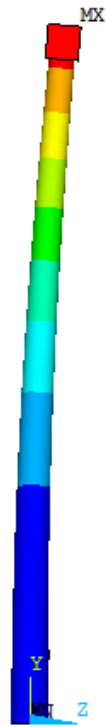
As Figuras 23 a 28 apresentam os seis primeiros modos de vibração da estrutura investigada. Observa-se que o primeiro modo de vibração da torre apresenta predominância dos efeitos de flexão em relação ao plano XY. Para o segundo modo de vibração verifica-se o predomínio dos efeitos de flexão no plano YZ. O terceiro modo de vibração apresenta característica predominante de torção, em torno do eixo global vertical Y. Novamente, verificam-se os efeitos de flexão no plano XY para o quarto modo de vibração. Por fim, o quinto e sexto modos de vibração apresentam a predominância dos efeitos de flexão no plano YZ.



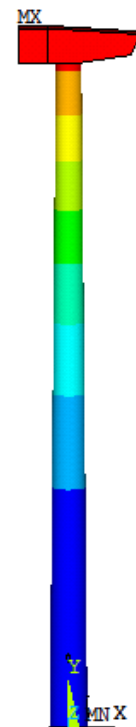
(a) Vista Frontal

(b) Vista Lateral

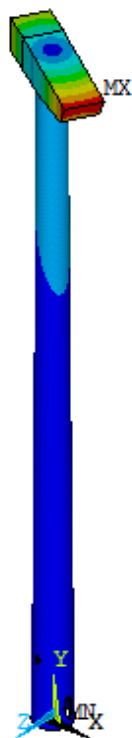
Figura 23 – Primeiro modo de vibração do modelo estrutural: $f_{01} = 0,36$ Hz.



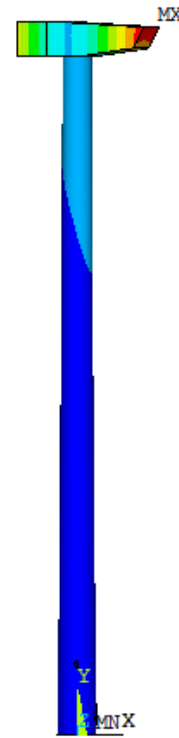
(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral

Figura 24 - Segundo modo de vibração do modelo estrutural: $f_{02} = 0,36$ Hz.

(a) Vista Isométrica



(b) Vista Lateral

Figura 25 - Terceiro modo de vibração do modelo estrutural: $f_{03} = 2,59$ Hz.



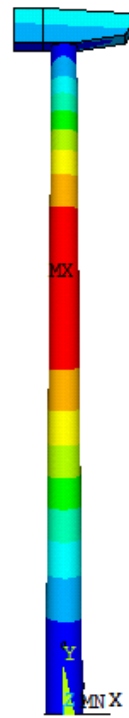
(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral

Figura 26 - Quarto modo de vibração do modelo estrutural: $f_{04} = 2,64$ Hz.

(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral

Figura 27 - Quinto modo de vibração do modelo estrutural: $f_{05} = 2,88$ Hz.

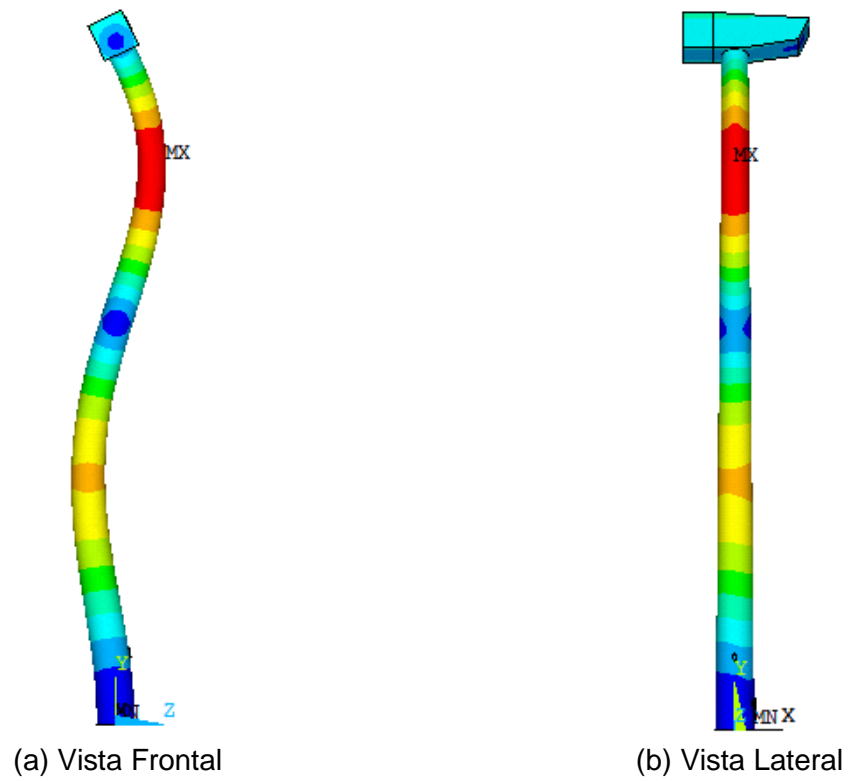


Figura 28 - Sexto modo de vibração do modelo estrutural: $f_{06} = 5,93$ Hz.

Neste capítulo, foram apresentadas as características do modelo MM92[21], o modelo numérico-computacional, os resultados da análise estática linear e por fim, as frequências naturais da estrutura (autovalores) e os modos de vibração (autovetores).

4 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

4.1 Introdução

O termo otimização, também conhecida como programação matemática refere-se ao estudo de problemas em que se busca extremizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis dentro de um conjunto viável. Em problemas de engenharia quando se consegue criar modelos matemáticos representativos dos respectivos sistemas em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar funções previamente definidas, visando encontrar uma solução ótima do problema.

4.2 Histórico da otimização estrutural

O conceito de otimização estrutural, foi aplicado pela primeira vez, por Maxwell em 1872. Naquela época enquanto, a maioria dos engenheiros preocupava em desenvolver modelos para calcular com precisão tensões mecânicas em configurações de pontes proposta, Maxwell resolveu seguir outra linha de pesquisa, decidiu obter um projeto de ponte que não falhasse e utilizasse menor quantidade de material. Mais tarde em 1904, Michell retomou a ideia de Maxwell, mas agora, aplicando o método em estrutura, com menor volume de material. Os problemas consistiam em minimizar o volume de estruturas formadas por barra (treliças) sujeitas a carregamentos aplicados em pontos do domínio e restrições de deslocamentos aplicados em outros pontos. Seus surpreendentes resultados são ainda hoje referência na teoria de otimização e também utilizados para aferir os programas comerciais de otimização estrutural.

Entretanto, após os resultados obtidos por Michell, a otimização estrutural praticamente não evoluiu até a década de 60, quando Schmit publicou o seu importante trabalho. O surgimento dos computadores no final desta década, somado ao desenvolvimento do método dos elementos finitos e da programação matemática possibilitou a criação de técnicas para a solução de problemas de otimização estrutural. Antes desse período eram apenas estudados casos baseados em soluções de derivadas de equações diferenciais resolvidas de forma analítica.

Na década de 70 um grande número de algoritmos de otimização começou a ser implementado para a solução de problemas não lineares. Na década de 80 surgiram os primeiros programas comerciais de otimização estrutural e os softwares de elementos finitos passaram a incorporar módulos de otimização.

De 1990 até os dias atuais, o método de otimização tornou-se disponível em diversos programas comerciais, sendo utilizado em outras áreas de engenharia além da engenharia mecânica.

4.3 Introdução ao problema de otimização estrutural

Um dos papéis principais do engenheiro consiste em buscar metodologias que melhorem o processo de projeto e obtenham resultados mais eficientes. A sistemática tradicional de projeto de estrutura consiste em um processo de tentativa e erro cuja eficiência depende da experiência, do conhecimento e da intuição do projetista. Ainda assim, não há garantias de que a melhor solução esteja entre as examinadas. Para fazer frente ao desafio de encontrar a melhor solução para um problema, surgiu o campo de pesquisa chamado otimização estrutural, que utiliza as técnicas matemáticas para encontrar a melhor configuração de um grupo de variáveis, escolhidos entre os parâmetros de projeto, e assim obter a solução ótima.

Existem basicamente três tipos de abordagem em otimização estrutural: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica. Na otimização paramétrica ou dimensional, são otimizados parâmetros discretos como dimensões da estrutura, mantendo a sua forma pré-definida. Na otimização de forma são alterados os contornos (internos e externos) da estrutura, ou seja, busca-se a forma ótima. A otimização topológica, consiste na determinação da distribuição ótima do material, dando origem a uma nova topologia.

Neste estudo, as variáveis de projeto são dimensões transversais (espessuras) das seções transversais, caracterizando assim uma otimização paramétrica ou dimensional.

4.4 Definições básicas

Na formulação de um problema de otimização basicamente, deseja-se minimizar ou maximizar uma função, a qual é denominada função objetivo. Esta função depende de determinados parâmetros que podem ser alterados durante o processo, chamados de variáveis de projeto. Porém, a maioria dos problemas é submetida a restrições para que o projeto seja considerado viável. Estas restrições são devido às leis da física, requisitos legais, limitações no orçamento e muitos outros fatores.

Os conceitos apresentados neste item podem ser encontrados com maior detalhe nos trabalhos de Arora, 1989 [16].

4.4.1 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto são o grupo de parâmetros usados para descrever o sistema e são expressos pelo seguinte vetor:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (38)$$

Do ponto de vista da otimização estrutural as variáveis de projeto são as variáveis que efetivamente o projetista pode modificar e alterar durante a concepção do projeto.

As variáveis de projeto podem representar certa dimensão que será alterada, como área da seção transversal de uma viga, espessura de uma chapa, casca ou membrana e a orientação das fibras de um material compósito.

A escolha das variáveis de projeto é importante para o sucesso da otimização estrutural. Recomenda-se usar o menor número de variáveis de projeto adequados para descrever a estrutura.

As variáveis de projeto são classificadas em variáveis de projeto discretas e variáveis de projeto contínuas. As variáveis de projeto discretas estão limitadas a valores isolados, enquanto as variáveis de projeto contínuas podem assumir qualquer valor. Em geral, o processo de otimização estrutural que utiliza variáveis de

projeto discretas é mais difícil de ser resolvido do que os que utilizam variáveis de projeto contínuas.

4.4.2 Função objetivo

A função objetivo é utilizada como medida da eficiência do projeto, sendo função das variáveis de projeto.

4.4.3 Restrições

As restrições são limitações impostas ao problema, que delimitam o espaço de busca para se obter uma solução ótima, viável e exequível. Essas restrições também devem depender das variáveis de projeto e podem ser definidas por normas técnicas, propriedade mecânicas dos materiais utilizados, limitações tecnológicas, geométricas, ou de outra natureza qualquer, de acordo com critérios considerados necessários ao projeto.

As restrições podem ser classificadas em três tipos: laterais, igualdade e desigualdade. As restrições laterais impõem limites superiores e inferiores nos valores das variáveis de projeto.

Considerando o conjunto de variáveis de projeto, Equação (39), uma restrição lateral é do tipo:

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \quad i = 1, \dots, n \quad (39)$$

Uma restrição de desigualdade é uma equação do tipo:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, n_g \quad (40)$$

A restrição de igualdade pode ser escrita da seguinte forma:

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, n_e \quad (41)$$

As restrições de igualdade ou desigualdade são em geral mais difíceis de serem implementadas. Enquanto que, as restrições de igualdade são representadas em problemas de otimização pelas equações de equilíbrio que a estrutura deverá satisfazer em termos das variáveis de projeto. As restrições de desigualdade são utilizadas, por exemplo, para restringir a tensão ou deslocamento em cada ponto da estrutura.

Procura-se evitar, na medida do possível, um número grande de restrições no problema, pois isso encarece consideravelmente o custo computacional do processo. Além disso, as restrições podem ser classificadas em locais e globais. As restrições de tensão e deslocamento são exemplo de restrições locais, pois podem ser impostas em pontos específicos da estrutura. A frequência natural é um exemplo de restrição global.

4.5 Formulação do problema de otimização

Um problema de otimização estrutural sujeito a restrições pode ser definido pela seguinte expressão:

$$\begin{array}{lll}
 \text{Minimizar} & f(x) & (42) \\
 \text{Sujeito a} & g_j(x) \leq 0, & j = 1, \dots, n_g \\
 & h_k(x) = 0 & k = 1, \dots, n_e
 \end{array}$$

Onde x indica o vetor das variáveis de projeto, $f(x)$ é a função a ser maximizada ou minimizada e as funções $g_j(x)$ e $h_k(x)$ são as funções que contém as restrições de igualdade e desigualdade impostas ao problema.

4.6 Domínio viável e inviável

Definido o problema de otimização, é necessário determinar a região de localização de sua solução. As restrições do projeto dividem o espaço de projeto em

dois domínios, domínio viável e domínio inviável. A Figura 29 apresenta um espaço de projeto bidimensional, onde cada eixo de coordenada representa uma variável de projeto X_i .

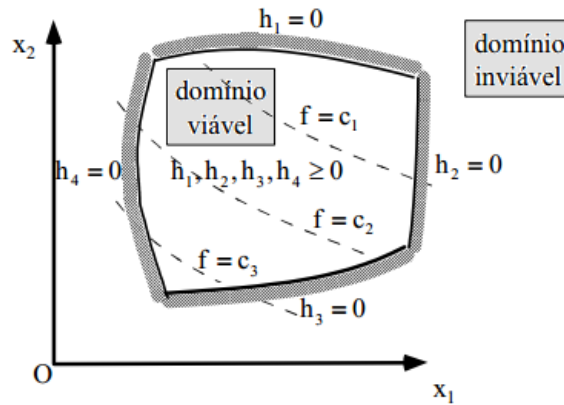


Figura 29 – Regiões de domínio viável e inviável [20].

Através do estudo do gráfico bidimensional da Figura 29, pode-se entender a influência das restrições na localização da solução ótima. Qualquer ponto no espaço é candidato a solução. Na grande maioria dos problemas de otimização, o mínimo da função é encontrado no limite entre os dois domínios, viável e inviável. No domínio viável todas as restrições são satisfeitas e pelo menos uma das restrições está ativa, enquanto no domínio inviável pelo menos uma das restrições é violada.

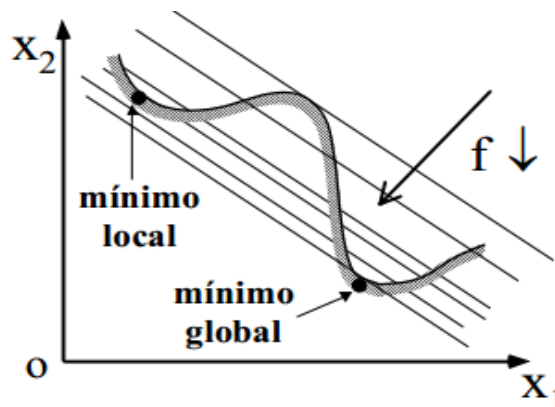


Figura 30 – Mínimo local e global [20].

A Figura 30 mostra as curvas de nível da função f e dependendo da função restrição surge o conceito de mínimo local e mínimo global. O mínimo local aparece

numa cavidade “secundária”. Em geral o problemas de otimização tem muitos mínimos locais e por muitas vezes os algoritmos estacionam em uma dessas cavidades.

4.7 Algoritmos para otimização estrutural

Como mencionado no início deste capítulo, a programação matemática estuda a extremização (minimização ou maximização) de uma função ou conjunto de funções. Os problemas resolvidos utilizando-se as técnicas de programação matemática podem ser lineares ou não lineares. Os primeiros ocorrem quando as relações matemáticas de um problema são todas lineares, tanto nas restrições como na função objetivo, e os segundos ocorrem quando a função objetivo e/ou alguma das restrições são não lineares.

Dada uma configuração inicial, X^0 , o projeto é melhorado iterativamente até alcançar um valor mínimo do objetivo ou um valor suficientemente próximo deste, ou seja, dentro do limite de tolerância pré-estabelecido. Para tal, utiliza-se uma equação recursiva do tipo da Expressão (43).

$$X^{k+1} = X^k + td^k \quad (43)$$

Onde:

X^k - configuração de iteração;

X^{k+1} - próxima configuração do projeto;

t - tamanho do passo na direção

d^k - direção de busca na iteração

Um esquema generalizado do procedimento iterativo de otimização estrutural é mostrado no fluxograma da Figura 31. Como se pode observar, a primeira etapa consiste em modelar o problema matemático através da definição das variáveis de projeto, da função a ser extremizada e das restrições que serão limitantes no projeto. A definição dos valores iniciais para todas as variáveis de projeto define o projeto inicial (X^0). A cada iteração são efetuados os cálculos da função objetivo e das

restrições e verifica-se a convergência do projeto a um mínimo até que os critérios de parada adotados sejam satisfeitos.

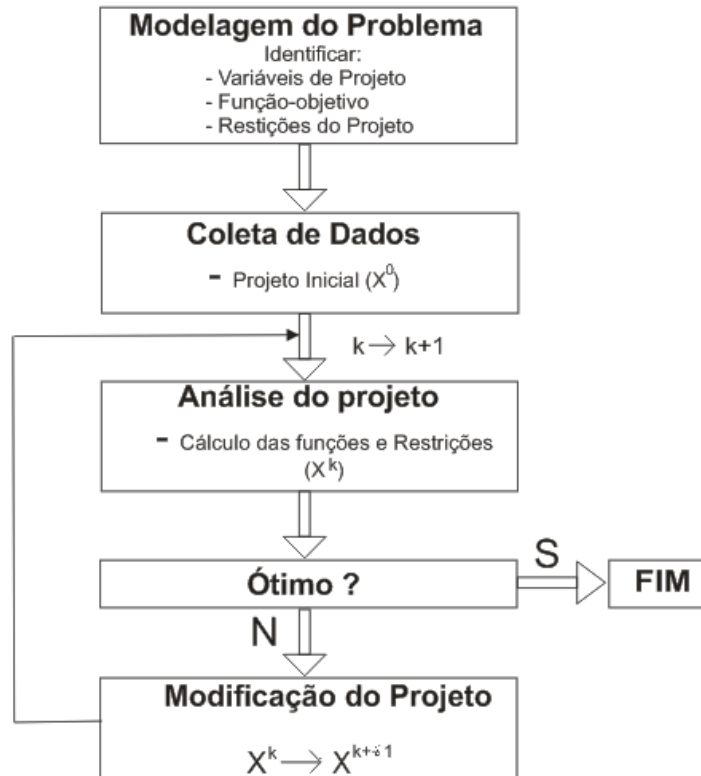


Figura 31 – Esquema geral de projeto ótimo.

4.7.1 Classificação dos algoritmos

Para solucionar um problema de otimização existem diversos métodos de programação matemática, definidos de acordo com as características da função objetivo e das restrições. Os métodos de programação matemática podem ser divididos quanto às funções envolvidas: linear ou não linear.

Na programação linear a função objetivo e as restrições são funções lineares das funções objetivo, enquanto na programação não linear a função objetivo ou pelo menos uma das restrições não são funções lineares das variáveis de projeto.

A programação linear apresenta facilidade de implementação, entretanto sua aplicação a problemas de otimização em engenharia é limitada, pois a maioria dos problemas reais é não linear. Quando é possível empregar programação linear, o método com maior aplicação é o Simplex.

Na programação não linear pode ser encontrada uma variedade de métodos para solução de problemas irrestritos, com restrições laterais, com restrições de desigualdade e restrições de igualdade.

Os problemas de otimização não linear irrestritos ocorrem com pouca frequência em aplicações práticas de engenharia. Alguns dos métodos requerem apenas informações sobre o valor da função objetivo, outros, utilizam a primeira ou segunda derivada. Estes são conhecidos como método de ordem zero, um e dois, respectivamente.

Os métodos Pattern Search e Powell são exemplos métodos de ordem zero. O método do Gradiente e do Gradiente Conjugado pertence à classe de métodos de primeira ordem, enquanto o Método de Newton é um exemplo típico de métodos de segunda ordem.

Os problemas de programação matemática que envolve funções não lineares com restrições são os de maior dificuldade de solução e podem ser divididos em duas classes: técnicas diretas e técnicas de transformação.

A técnica direta atua diretamente no problema restrito, através de uma sequência de minimizações unidimensionais, ao longo de direções viáveis. Pode-se citar como exemplo desta técnica o Método das Direções Viáveis, do Gradiente Reduzido Generalizado.

As técnicas de transformação, como o próprio nome diz, transformam um problema com restrições em um problema com restrições laterais, sendo as funções de penalidade exterior e interior e o Método do Multiplicador de Lagrange Aumentado as mais utilizadas.

5 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL NO PROGRAMA ANSYS

5.1 Generalidades

O ANSYS é um software de elementos finitos existente há mais de quarenta anos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. A capacidade do ANSYS inclui habilidades para resolver análises estática ou dinâmica, transmissão de calor, escoamento interno e externo de fluidos, otimização de estrutura entre outras aplicações.

Para resolver problemas de otimização estrutural o ANSYS divide o procedimento em quatro etapas principais: pré-processamento (Preprocessor), solução (Solution), pós-processamento (General Postprocessor) e otimização de projeto (Design Opt).

O módulo de otimização (Design Opt) é uma parte integrante do programa ANSYS empregado na determinação do projeto ótimo. Este módulo do ANSYS usa técnicas matemáticas que integram o ciclo de projeto manual em um processo iterativo computadorizado. Tal processo é realizado automaticamente até que um projeto ótimo seja alcançado. Enquanto trabalham para a obtenção de um projeto ótimo, as rotinas de otimização do ANSYS empregam três tipos de parâmetros: variáveis de projeto (Design Variables), restrições de projeto ou variáveis de estado (State Variables), e a função objetivo (Objective Function). Os valores destes parâmetros são modificados ao longo do processo iterativo até que o melhor resultado seja obtido.

De forma geral, o processo de otimização realizado dentro do otimizador do ANSYS se resume na execução dos seguintes passos: criar um arquivo de análise; especificar o arquivo de análise; declarar as variáveis de otimização; definir o método; iniciar a análise de otimização e visualizar os conjuntos de dados resultantes.

A execução do processo de otimização no programa ANSYS pode ser feito de duas maneiras: Utilizando a linguagem de programação própria, APDL (“ANSYS Parametric Design Language”) ou de forma interativa através da interface gráfica do usuário (GUI). A escolha de uma dessas formas de execução (APDL ou GUI) vai

dependem do conhecimento ANSYS do utilizador e de sua preferência para interagir com o programa.

No que diz respeito aos métodos de otimização, o programa ANSYS [19] disponibiliza para o processo de otimização estrutural três métodos: método de primeira ordem, método de aproximação por subproblemas, e o método implementado pelo usuário.

O método de primeira ordem (First Order Method) é um método que usa as informações de derivadas. Este método comparado ao método de aproximação é considerado mais preciso.

O método de aproximação por subproblemas (Subproblem Approximation Method) é um método avançado de ordem zero, não necessita do cálculo de derivada e pode ser eficientemente empregado na maior parte de problemas práticos de engenharia.

O método implementado pelo usuário (User-supplied Method) é uma rotina de otimização externa que pode ser usada em vez da lógica do otimizador do ANSYS.

Neste trabalho, são usados os métodos de primeira ordem e de aproximação por subproblema aplicados aos Modelos 1 e 2, respectivamente.

A seguir são apresentadas as principais características do método de primeira ordem e do método de aproximação por subproblemas, segundo o ANSYS, e na sequência descrito de forma resumida as formas de execução da otimização utilizando o programa.

5.2 Métodos de otimização

5.2.1 Método de primeira ordem

O Método de Primeira Ordem disponível no ANSYS, é um método que necessita do cálculo de derivadas, e cada iteração é composta de subiterações que incluem o cálculo da direção de busca e dos gradientes, ou seja, em cada iteração são realizados vários ciclos de análise.

Para o método de primeira ordem, o módulo de otimização do ANSYS possui um algoritmo que transforma um problema de otimização com restrição em um

problema sem restrição. Esta transformação é feita através de funções de penalidade, empregando a seguinte equação [19]:

$$Q(x, s) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left(\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) \right) \quad (44)$$

Onde:

Q - escalar adimensional, função objetivo irrestrita

P_x, P_g e P_h - penalidade aplicadas às variáveis de estado e variáveis de projeto

f_0 - referência o valor da função objetivo, definido para X^0

X - vetor que contém as variáveis de projeto X_n

q – parâmetro de superfície de resposta que verifica se as restrições estão sendo satisfeitas.

n – número de variáveis de projeto

As funções de penalidade exterior (P_x) são aplicadas às variáveis de projeto e funções de penalidade interior (P_g, P_h) são aplicadas às variáveis de estado (restrições de projeto).

Para cada iteração de otimização, um vetor de direção de busca $d^{(j)}$ é determinado. A iteração seguinte ($j+1$) é obtida a partir da Equação (45), onde o tamanho do passo S_j corresponde ao valor mínimo de Q na direção $d^{(j)}$.

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} + s_j d^{(j)} \quad (45)$$

O cálculo de S_j usa uma combinação de um algoritmo “golden-section” e uma técnica de interpolação quadrática local. O intervalo de variação de t é limitado pela Expressão (46), Onde S_j^* é o maior tamanho de passo possível na direção de busca para a iteração atual (calculado internamente pelo otimizador) e S_{\max} é tamanho de passo máximo na direção de busca.

$$0 \leq s_j \leq \frac{S_{\max}}{100} s_j^* \quad (46)$$

A minimização global da Expressão (44) baseia-se na geração sequencial de direções de busca e em ajustes internos do parâmetro de superfície q . Para a primeira iteração ($j=0$), a direção de busca é assumida como o gradiente da função objetivo irrestrita com sinal negativo, Equação (47).

$$d^{(0)} = -\nabla Q(x^{(0)}, q) = d_f^{(0)} + d_p^{(0)} \quad (47)$$

Na qual $q = 1$ e

$$d_f^{(0)} = -\nabla Q_f(x^{(0)}) \quad (48)$$

$$d_p^{(0)} = -\nabla Q_p(x^{(0)})$$

Como foi dito anteriormente, para cada iteração inicial a direção de busca é a direção gradiente. Para iterações subsequentes ($j > 0$), direções conjugadas são formadas de acordo com a fórmula de recursão de Polak-Ribiere.

$$d^{(j)} = -\nabla Q(x^{(j)}, q_k) + r_{j-1} d^{(j-1)} \quad (49)$$

Sendo r_{j-1} é dado pela Equação (50).

$$r_{j-1} = \frac{[\nabla Q(x^{(j)}, q) - \nabla Q(x^{(j-1)}, q)]^T \nabla Q(x^{(j)}, q)}{|\nabla Q(x^{(j-1)}, q)|^2} \quad (50)$$

Durante o processo de iterações, o algoritmo de primeira é reiniciado e várias procuras por “steepest descent” e direções conjugadas são executadas até que a convergência seja alcançada ou o número de iterações máximas é atingido. Essas duas condições são verificadas ao final de cada iteração.

A convergência da solução é assumida e o processo iterativo encerrado através dos critérios definidos nas Expressões (51) e (52).

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (51)$$

e

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (52)$$

Onde:

τ – tolerância da função objetivo

$f^{(j-1)}$ – configuração da iteração anterior

$f^{(b)}$ – melhor configuração encontrada até o momento

É também uma exigência que a iteração final de encerramento da otimização use uma busca por determinação do gradiente, caso contrário iterações adicionais são realizadas. A explicação mais detalhada do algoritmo de primeira ordem, disponibilizado pelo programa ANSYS, pode ser encontrada a partir do tópico Help (sistema de ajuda) do programa.

5.2.2 Método de Aproximação por subproblemas

O método de aproximação por subproblemas disponível no programa ANSYS é um método de ordem-zero avançado que usa aproximações (curvas de ajuste) para as restrições de projeto e a função objetivo.

No método de ordem zero, o programa utiliza somente os valores das variáveis dependentes (função objetivo e restrições de projeto) durante o processo de minimização e não de suas derivadas.

Existem dois conceitos triviais neste método: o uso de aproximações para a função objetivo e para as variáveis de estado, e a conversão do problema com restrições para um problema sem restrições utilizando funções de penalidade.

O programa calcula a função objetivo para várias configurações de variáveis de projeto e estabelece uma relação entre a função objetivo e as variáveis via regressão por mínimos quadrados. A curva resultante é uma aproximação sendo que, para cada iteração, é gerado um novo ponto que é posteriormente adicionado à

curva. Contudo é justamente esta aproximação que será minimizada (subproblema), ao invés da própria função a cada iteração. O processo de minimização ocorrerá até que a convergência seja alcançada ou o problema seja finalizado por outros critérios de parada.

As restrições de projeto são tratadas da mesma maneira. Uma aproximação é gerada para cada variável e atualizada ao fim de cada iteração.

O primeiro passo para minimizar o problema com restrições é representar cada variável dependente por uma aproximação, para função objetivo e similarmente para as variáveis de estado (restrições de projeto).

$$\hat{f}(x) \leq f(x) + error \quad (53)$$

$$\hat{g}(x) \leq g(x) + error \quad (54)$$

$$\hat{h}(x) \leq h(x) + error \quad (55)$$

A forma mais complexa para a qual as aproximações podem ser tomadas é a quadrática com termos cruzados. Utilizando o exemplo para a função objetivo,

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j \quad (56)$$

Ainda é permitido ao usuário o controle do tipo de regressão a ser utilizado: linear, quadrática ou quadrática somada de termos cruzados.

Feitas as aproximações, o problema de minimização restrito é transformado em um problema de minimização irrestrita por meio da seguinte expressão:

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 p_k \left(\sum_{i=1}^n X(x_i) + \left(\sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) \right) \right) \quad (57)$$

Onde:

X – é a função de penalidade usada para impor restrições às variáveis de projeto

G e H – são funções de penalidade aplicadas às variáveis de estado
 f_0 - referência o valor da função objetivo, definido para X^0
 n – número de variáveis de projeto

A busca pelo ponto ótimo da função aproximada sem restrições e então objetivada pela técnica de SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Techniques) a cada iteração. O índice “k” reflete o uso de subiterações conduzidas durante a solução do subproblema.

O algoritmo SUMT é utilizado para que se chegue ao valor mínimo para a função objetivo sem restrições.

A última etapa realizada a cada iteração é a determinação do vetor de variáveis de projeto a ser usada na iteração subsequencial (j+1). O vetor $x^{(j+1)}$ é determinado de acordo com a Equação (58)

$$x^{(j+1)} = x^{(b)} + C(\tilde{x}^{(j)} - x^{(b)}) \quad (58)$$

onde:

$x^{(b)}$ = vetor de variáveis de projeto ótimas

C = variável selecionada internamente, podendo variar entre 0 e 1, dependendo no número de configurações de projeto não viáveis.

As iterações do método de aproximação por subproblema continuarão até que a convergência seja alcançada ou o número máximo de iteração seja atingido.

A convergência é assumida e o processo iterativo encerrado quando um dos critérios definidos pelas Expressões 59, 60, 61 e 62, forem satisfeitos.

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (59)$$

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (60)$$

$$|x_i^{(j)} - x_i^{(j-1)}| \leq p_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (61)$$

$$\left| x_i^{(j)} - x_i^{(b)} \right| \leq p_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (62)$$

Onde:

τ – tolerância da função objetivo

p_i – número de variáveis de projeto

5.3 Entrada de dados para otimização no ANSYS

Como mencionado na introdução deste capítulo, o programa ANSYS disponibiliza duas formas de entrada de dados, para qualquer das etapas envolvidas nos processos de análise.

No que diz respeito ao processo de otimização, a entrada de dados pode ser feita de duas maneiras: utilizando o APDL (“ANSYS Parametric Design Language”) ou de forma interativa através da interface gráfica do usuário (GUI). A escolha de uma dessas formas de execução vai depender do conhecimento ANSYS do utilizador e sua preferência para interagir com o programa ANSYS.

Para iniciantes, o GUI (“Graphical User Interface”), pode ser a maneira mais fácil de utilizar o programa. Os comandos são apresentados na tela como botões em ambiente Windows e o usuário mantém uma relação interativa com o programa.

O APDL (“ANSYS Parametric Design Language”), é uma linguagem de programação própria do ANSYS, baseada na linguagem Fortran, através da qual torna-se possível automatizar o uso de comandos. Se o usuário estiver familiarizado com os comandos da linguagem APDL, pode realizar todo o processo de otimização por meio de arquivos de entrada de comando ANSYS e enviá-los ao programa por meio do menu “Read Input From”. Esta pode ser uma alternativa mais eficiente para análises complexas, que requerem tempo de execução extensa.

Alternativamente, os recursos interativos de otimização oferecem maior flexibilidade e retorno imediato para a revisão dos resultados das iterações. Ao realizar a otimização através da GUI, é importante, primeiramente, estabelecer o arquivo de análise para o seu modelo, salvo sob a extensão “Igw”. Em seguida, todas as operações dentro do módulo de otimização podem ser realizadas de forma interativa.

Na sequência, são descritas de forma breve, as duas formas de entrada de dados no ANSYS, tendo em vista a otimização de estrutura.

5.3.1 Linguagem de programação própria – APDL

Para a execução da otimização de uma estrutura utilizando-se apenas a linguagem de programação do ANSYS, são necessários dois arquivos de análise, criados com base na linguagem APDL e salvos sob a extensão txt.

O primeiro arquivo de análise (*.txt), ou arquivo de análise deve conter o modelo parametricamente definido caracterizando uma análise sequencial completa: pré-processamento, solução e pós-processamento. Na fase inicial de elaboração desse arquivo, antes de iniciar a fase de pré-processamento deve-se fazer a inicialização das variáveis, ou seja, deve-se atribuir valores iniciais aos parâmetros que serão utilizados como variáveis de projeto na fase de otimização. A este grupo de variáveis iniciais dá-se o nome de projeto inicial e representam o primeiro projeto a ser analisado no processo iterativo.

Na fase de pré-processamento são definidos os principais dados do modelo estrutural. Nesta fase define-se, o tipo de elemento finito a ser utilizado, a geometria da estrutura, o materiais de todos os seus componentes e por fim as características da malha de elementos finitos. Após o pré-processamento, na fase de solução, devem ser definidas as condições de contorno (hipóteses de carregamento e restrições do modelo) e o tipo de análise a ser efetuada.

Tendo em vista a utilização do módulo de otimização (Design Opt), devem constar ainda deste primeiro arquivo, na fase de pós-processamento, comandos próprios da ferramenta de otimização. Como exemplo, desses comandos, pode-se citar, o comando *GET (Get Scalar Data) usado na maioria dos problemas de otimização. Este comando “recupera” e armazena os valores dos dados de resposta em forma de parâmetros, para serem utilizados na análise de otimização. O seu deste comando é de fundamental importância para o sucesso da otimização.

Neste estudo, por exemplo, através do comando *GET (Get scalar data), foram extraídos e armazenados em forma de parâmetros valores dos seguintes dados de resposta: como tensão máxima, deslocamento máximo, frequências naturais, utilizados como restrições de projeto na fase de otimização.

Após o primeiro arquivo ter sido preparado. Deve-se criar um segundo arquivo também salvo sob a extensão “txt”, que contenha todos os comandos a serem executados na análise de otimização propriamente dita. Dentro deste arquivo devem ser definidas todas as variáveis de projeto, as variáveis de estado, a função objetivo, o método a ser utilizados e o número de iterações.

Com os dois arquivos prontos, define-se o diretório de trabalho, onde será rodada a análise e por meio menu “Read Input From”, aponta-se os arquivo a serem executados.

A Tabela 5, apresentada alguns comandos básicos da linguagem de APDL, que devem ser utilizados na elaboração dos arquivos.

Tabela 5 – Comandos básicos da linguagem APDL.

Comando	Descrição do comando
/PREP 7	Inicia o módulo de pré-processamento
/SOLU	Inicia o módulo de solução
/POST 1	Inicia o módulo de pós-processamento geral
GET	Recupera um valor de um item especificado e armazena o valor como um parâmetro escalar.
/OPT	Inicia o módulo de otimização
OPNAL	Define o arquivo de análise a ser utilizado para "looping" otimização.
OPVAR	Defini as variáveis de projeto,varáveis de estado e função objetivo
OPTYPE	Defino o tipo de método que vai ser usado no processo de otimização
OPEXE	Inicia o “looping” otimização a partir do arquivo de análise
OPLIST	Lista os valores dos parâmetros a cada iteração

5.3.2 Interface gráfica do utilizador - GUI

Para iniciantes ou usuários com pouca familiaridade com a linguagem APDL, no que se refere ao processo de otimização, o uso da interface gráfica (GUI) pode ser uma maneira mais fácil de utilizar o programa.

Para dar início ao processo de otimização, utilizando-se a interface gráfica, gera-se um arquivo texto (*.txt), contendo todos os dados referentes ao modelo e os parâmetros para análise de otimização.

O arquivo de análise (.txt) contém o modelo parametricamente definido, caracterizando uma análise sequencial completa: pré-processamento, solução e pós-processamento. Para a realização do processo iterativo de otimização define-se um arquivo de refinamento dos valores, que nada mais é que o arquivo de análise (*.txt) gerado até então, salvo sob a extensão (*.lgw). Neste processo iterativo, a viabilidade do projeto e as alterações das variáveis de projeto são avaliadas. Com estas mudanças são obtidas novas funções objetivo que são novamente avaliadas. Ao final de cada iteração, uma checagem por convergência é feita. Se os critérios de convergência forem satisfeitos, o processo iterativo de otimização estará completo.

A título de exemplo, a seguir serão ilustradas as etapas do processo de otimização utilizando-se a interface gráfica. Os dados mostrados nas Figuras 32 a 40, são baseados no Modelo 1 de otimização deste estudo, descrito com mais detalhes no próximo Capítulo.

A realização do processo de otimização utilizando-se a interface gráfica do ANSYS [19], pode ser dividido nos seguintes passos:

a) Entrada de dados

Uma vez executado o arquivo de dados para a análise, defini-se dentro do módulo de otimização do ANSYS o arquivo a ser utilizado no processo iterativo.

A Figura 32 e 33 mostra a designação do arquivo de dados no ANSYS.



Figura 32 – Definição do arquivo de dados.

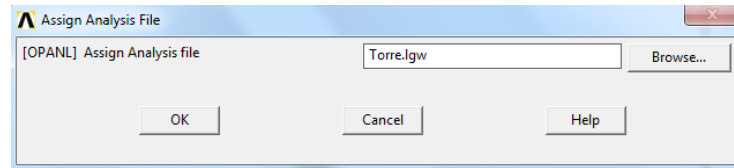


Figura 33 – Segunda tela de definição do arquivo de dados.

b) Definição das variáveis de projeto

As variáveis de projeto que sofrem alterações para resultar no projeto ótimo, são definidas dentro do módulo de otimização. Recomenda-se usar um número pequeno de variáveis de projeto ANSYS [19]. O uso de muitas variáveis de projeto pode aumentar as chances de convergir para um mínimo local da função objetivo.

A Figura 34 mostra como é feita a definição das variáveis de projeto utilizando a interface gráfica.

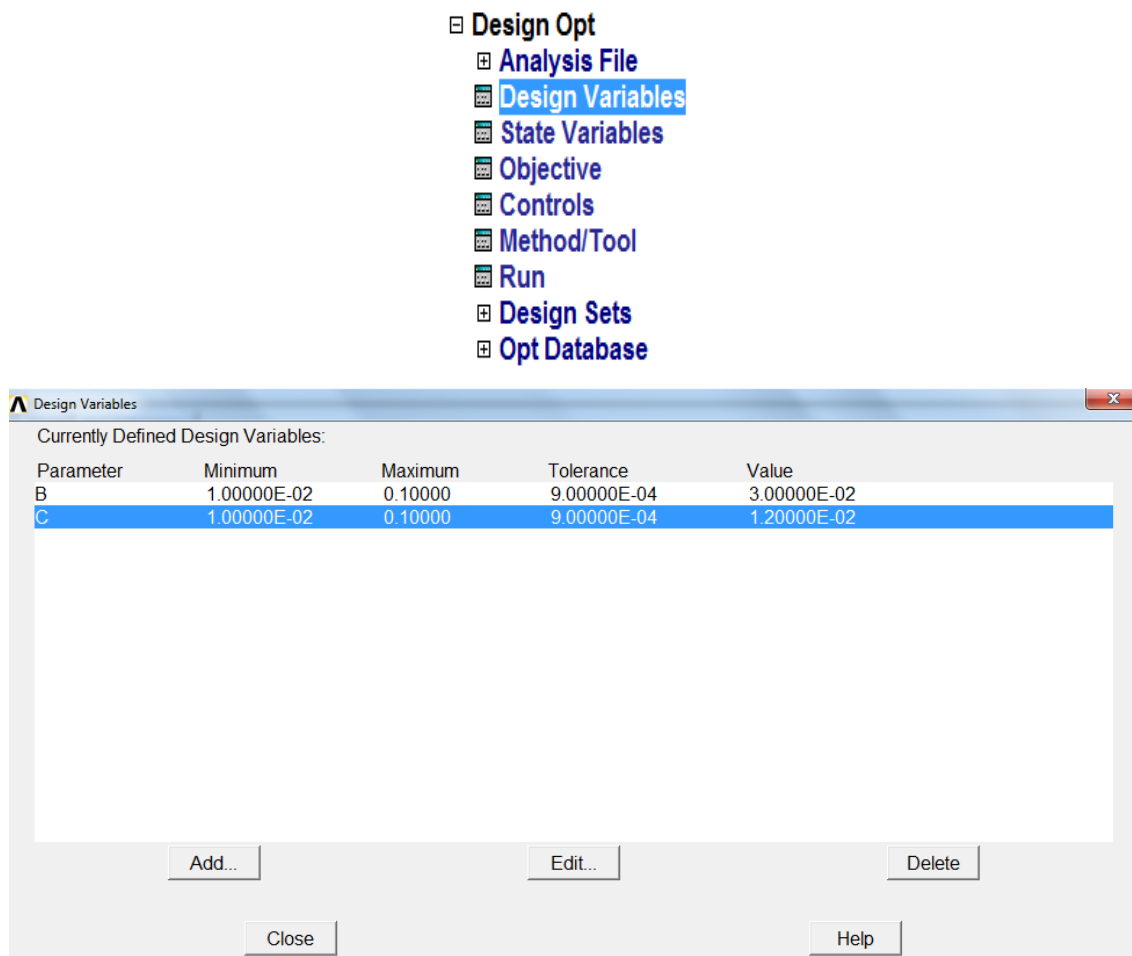


Figura 34 – Definição das variáveis de projeto (Design Variables).

A Figura 34 ainda mostra os parâmetros ou variáveis com seus valores máximos e mínimos. Uma tolerância deve ser assumida para cada variável para fins de checagem de convergência. Caso este valor de tolerância não seja definido pelo usuário, é preenchido automaticamente pelo programa.

c) Definição das variáveis de estado

As variáveis de estado geralmente representam uma resposta do problema e oferecem uma maneira de restringir a função objetivo. No caso do Modelo 1 de otimização, a tensão máxima de von Mises e o deslocamento máximo da torre, TMAX e DMAX, respectivamente foram as restrições impostas ao problema.

A Figura 35 mostra o processo de definição das variáveis de estado no ANSYS.

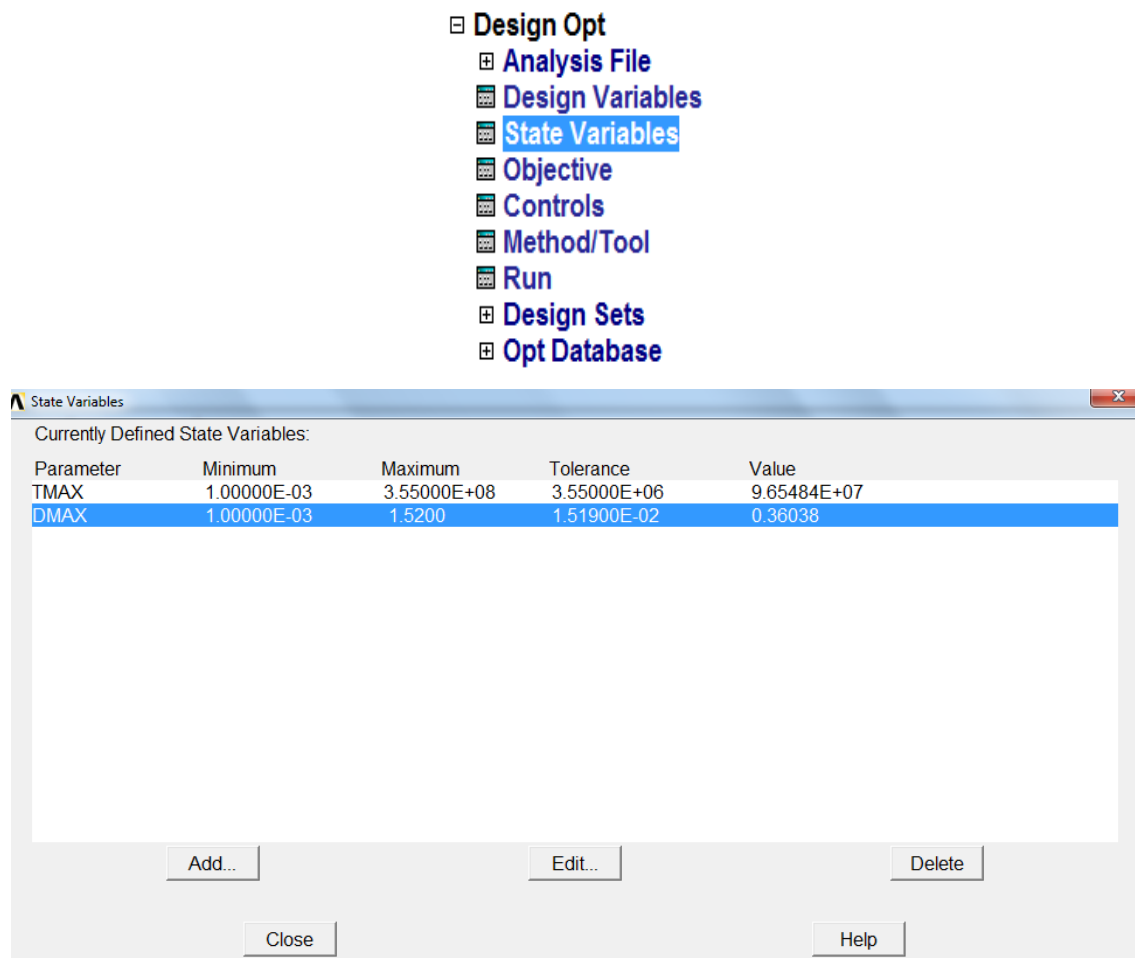


Figura 35 – Definição das variáveis de estado (State Variables).

Nota-se, por exemplo, que o valor da primeira iteração (projeto original) para o deslocamento máximo da torre foi 36,03 com e tomou-se um limite máximo de 152 cm tido como restrição para a função objetivo.

d) Definição da função objetivo

A função objetivo é responsável pela caracterização do projeto ótimo, ou seja, sua minimização dentro dos limites impostos pelas restrições, retorna o melhor valor para as variáveis de projeto.

As Figuras 36 mostram o processo de definição da função objetivo.

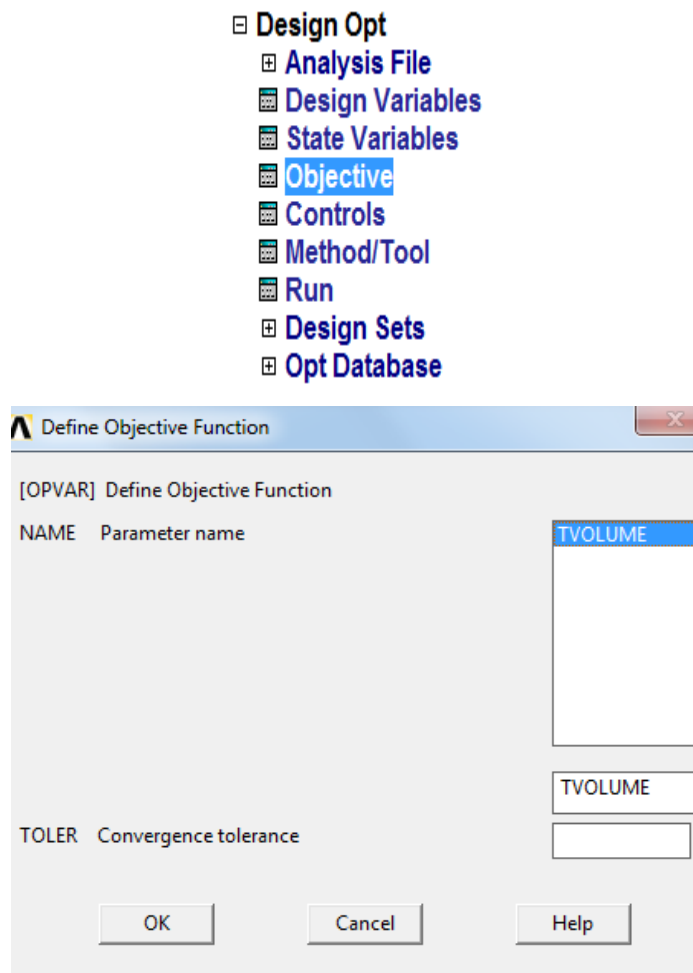


Figura 36 – Definição da função objetivo.

Neste caso, a função objetivo é dada pelo volume total expresso sob o parâmetro TVOLUME.

e) Definição do método de otimização

Na sequência, deve ser definido o método de otimização a ser empregado para o problema proposto.

A Figura 37 mostra o esquema de escolha do método para análise.

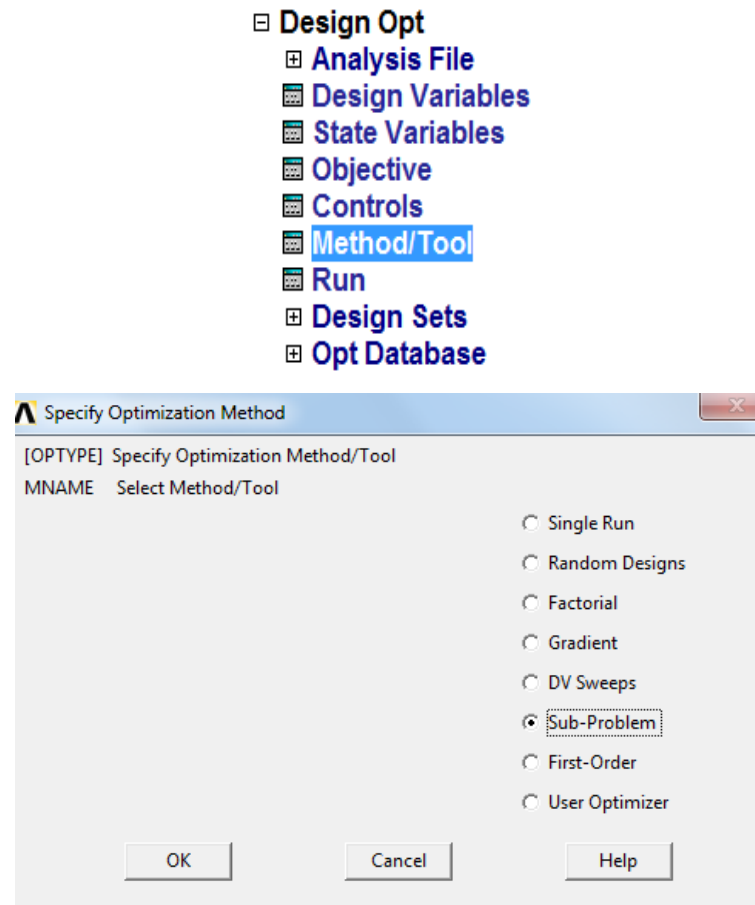


Figura 37 – Seleção do método de otimização.

Conforme mostrado na Figura 37, o método de aproximação por subproblema (Subproblem Approximation Method) foi escolhido.

f) Submissão da análise de otimização

Após todas as configurações anteriores serem determinadas, pode-se proceder à análise de otimização, iniciando-se da primeira iteração até a convergência do problema. Esta rotina pode ser acionada no menu "RUN". Em

seguida, uma tela com as configurações realizadas aparece de forma resumida. Após verificação aciona-se a rotina clicando em OK.

A Figura 38 mostra a caixa de texto que representa o início do processo iterativo de otimização no ANSYS.

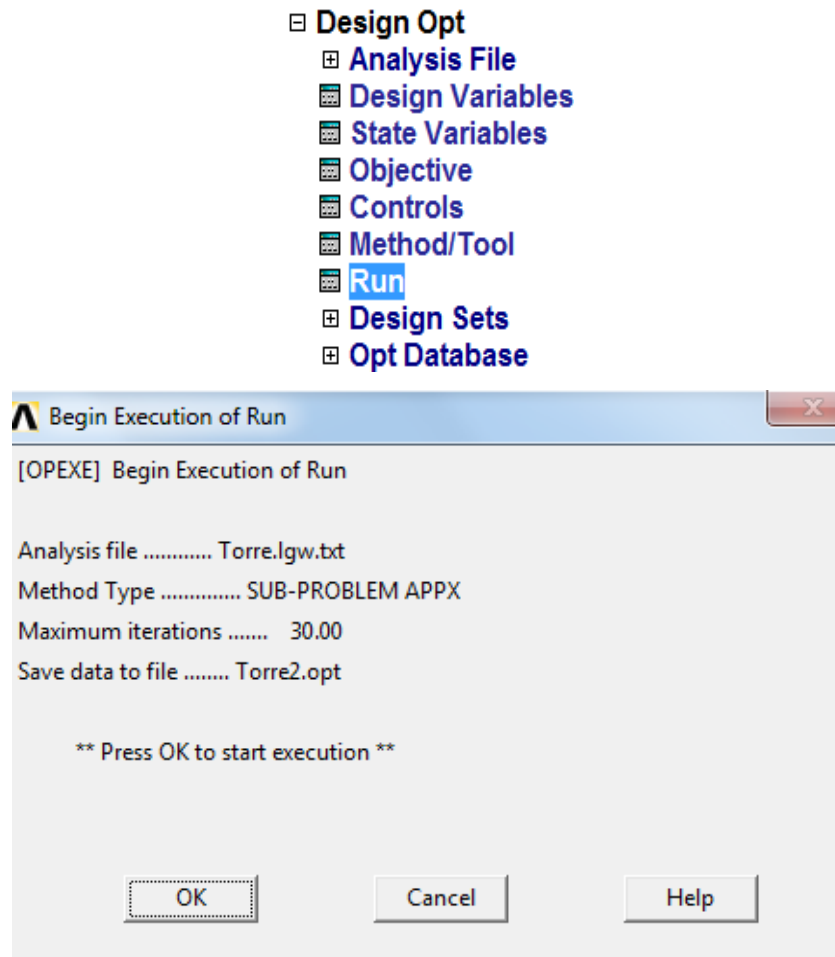


Figura 38 – Tela de resumo das configurações da rotina.

g) Resultados do processo iterativo

Uma vez que o problema de otimização é submetido para a análise, inicia-se um processo iterativo de busca ao ponto ótimo. Caso todas as configurações tenham sido executadas adequadamente, a uma mensagem de “RUN COMPLETED” é exibida, isto significa que a otimização convergiu para um valor dentro dos limites desejados.

Após a análise os resultados obtidos com a otimização podem ser extraídos em forma de listas e gráficos.

A Figura 39, ilustra o menu de solicitação das listas dos parâmetros em cada iteração.

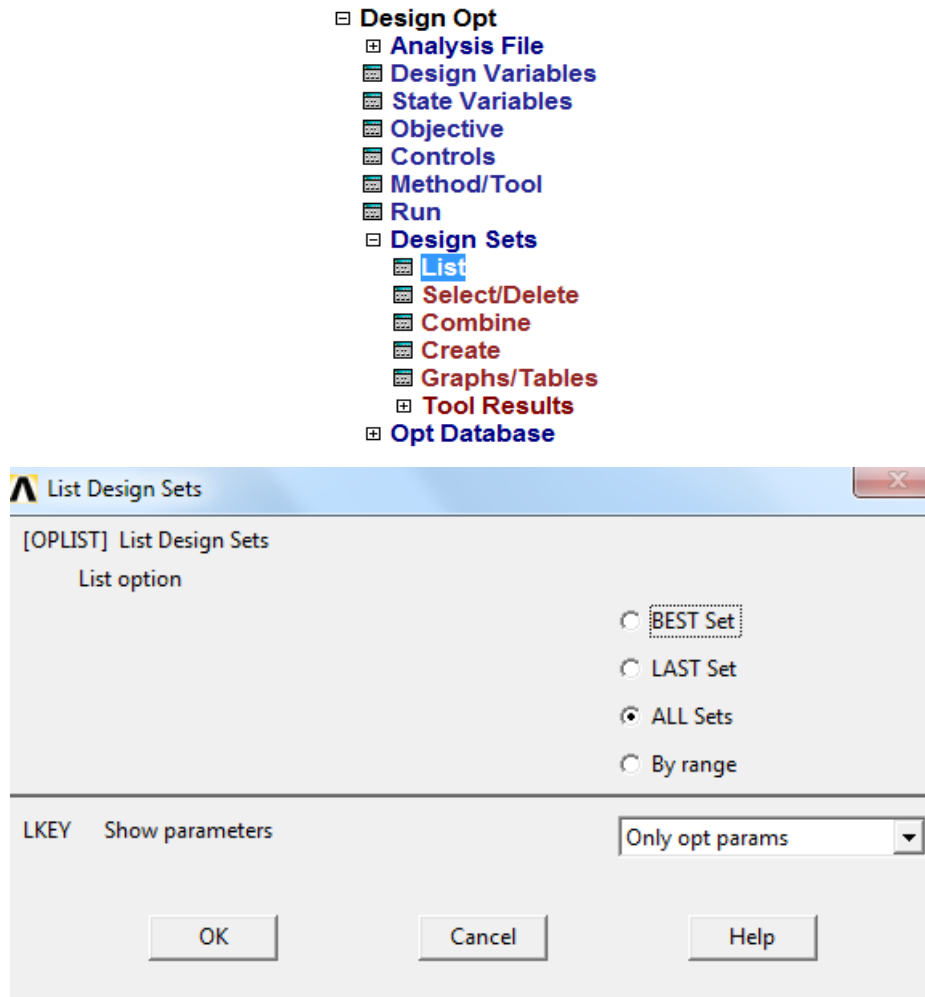


Figura 39 – Listagem de valores de todo processo iterativo.

Além das listas de iterações, outros dados podem ser extraídos como, por exemplo, os gráficos representativos das variações de valores dos parâmetros ao longo de cada ciclo de iteração.

Estes gráficos podem ser obtidos através do menu “Graphs/Tables”. Selecionando-se na opção “XVAROPT” o parâmetro a ser representado no eixo de coordenadas X e em “NVAR” os valores a serem representados no eixo de coordenadas Y.

A Figura 40 ilustra a tela de seleção dos parâmetros a serem representados em cada eixo de coordenadas do gráfico.

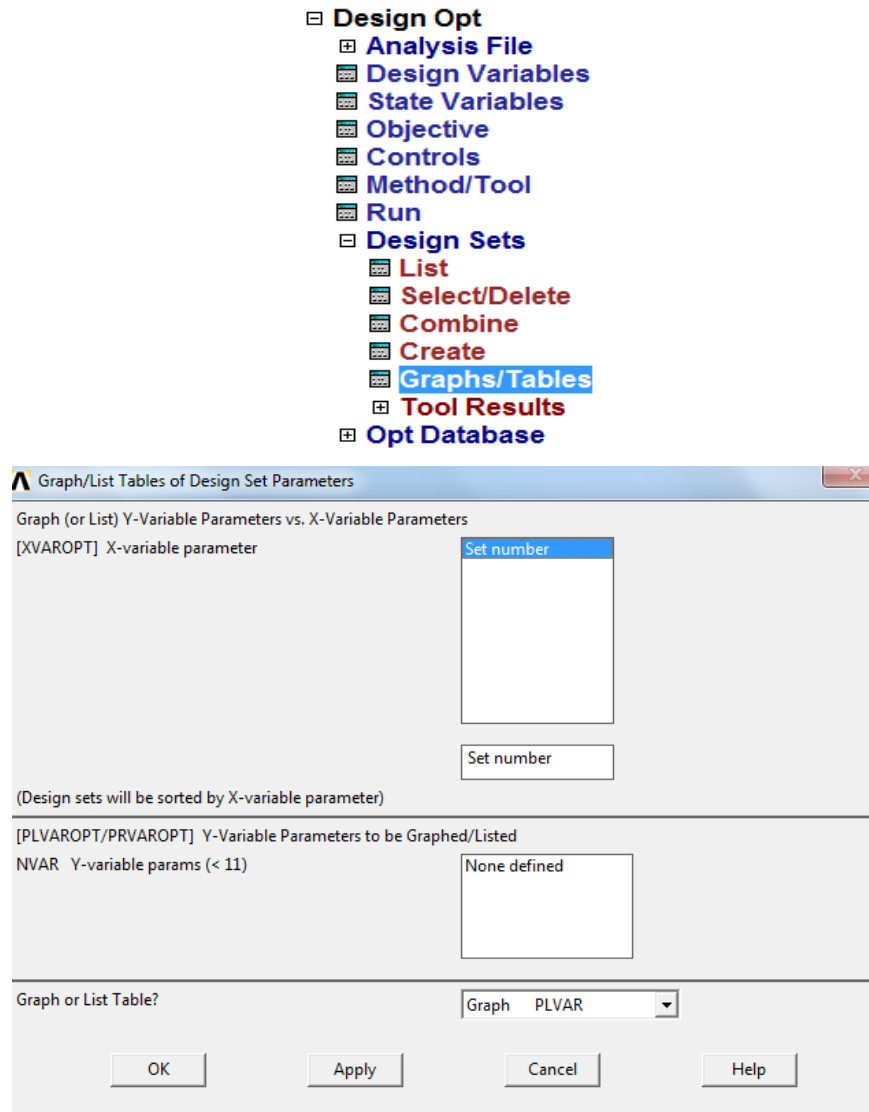


Figura 40 – Menu de extração dos gráficos.

6 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Para o modelo de torre tubular de aço, composta de segmentos em tronco de cone MM92[21] da Repower, foram efetuados duas aplicações distintas, variando alguns parâmetros e o método de otimização para cada aplicação.

O objetivo dos dois problemas de otimização compreende a minimização do volume da torre MM92[21] (custo, indiretamente), com imposição de restrições relativas à tensão, ao deslocamento do topo e às frequências naturais. As características gerais da torre proposta neste trabalho são:

Estrutura torre relativo à MM92[21];

- altura 76,20 m;
- diâmetro externo da base e do topo, 4,30 e 2,96, respectivamente;
- espessura variando longitudinalmente, de 30 mm na base a 12 mm no topo;
- modelo engastado na base e livre no topo;
- fabricada com chapa de aço;
- composta de segmentos tubulares em tronco de cone;
- consideração das aberturas das portas;
- análises estruturais através do MEF, utilizados elementos finitos de casca;
- realização da análise de linear estática para obtenção das tensões e deslocamento do topo;
- realização da análise modal para obtenção das frequências naturais;

Uma consideração importante na metodologia proposta neste trabalho se refere às espessuras das seções transversais que estão associados a valores padronizados do mercado. Neste trabalho, visando a utilização do módulo de otimização, e a obtenção de um projeto ótimo viável do ponto de vista geométrico, implementou-se no modelo numérico uma função linear, Expressão (61), de forma que as dimensões de cada seção sejam compatíveis com a variação que ocorre na estrutura real e que a cada iteração realizada seja também garantida a linearidade da superfície da torre, isto é, que a cada iteração a superfície externa da parede da torre se mantenha plana e linear.

A Figura 41 ilustra o esquema dos parâmetros usados na função linear implementada no modelo numérico.

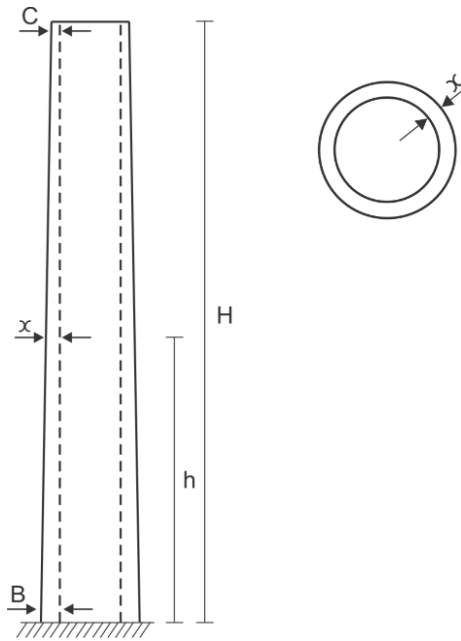


Figura 41 – Esquema de representação dos parâmetros usados na função linear.

A função utilizada para garantir a linearidade da superfície externa da torre é dada por:

$$\frac{x - C}{H - h} = \frac{B - C}{h} \quad \therefore \quad x = \frac{(B - C)(H - h)}{H} + C \quad (63)$$

Onde:

B – espessura da base da torre

C – espessura do topo da torre

H – altura total da torre

x - espessura da seção

h – altura da seção

Em seguida, são apresentadas as características dos modelos de otimização utilizados nas duas aplicações. Como já foi dito, os modelos de otimização são referentes à torre MM92[21], descrita no terceiro capítulo deste estudo, e diferenciam-se basicamente entre si pelas restrições e métodos utilizados.

Os dois problemas de otimização estudados são numerados como Modelo 1 e Modelo 2 e suas modelagens matemáticas são abordadas da forma que se segue.

6.1 Modelo 1 de otimização

A finalidade deste primeiro modelo é buscar uma torre com menor volume possível, uma vez que para estruturas em aço, na grande maioria dos casos, o custo está relacionado diretamente com o volume da estrutura.

Como passo precedente à realização do processo de otimização, foi necessária a obtenção de valores iniciais das restrições mecânicas (tensões e deslocamentos) conforme discutido nos Capítulos 3, deste estudo.

Considerou-se, neste modelo inicial, os esforços provenientes de uma carga axial distribuída de compressão produzida pela massa do aerogerador, P_{nac} , localizado na extremidade superior da torre, de uma carga trapezoidal aplicada ao longo da torre, provenientes da ação do vento, e do peso próprio como discutido no Capítulo 2.

No processo de otimização deste modelo utiliza-se o algoritmo de primeira ordem disponível no módulo de otimização de ANSYS. Este problema de minimização do volume considerando restrições mecânicas é um dos modelos mais clássico da otimização estrutural, e seu modelo matemático é representado pelas equações seguintes.

A função objetivo sendo o volume é dada por:

$$vol(x) = \sum_{j=1}^s AL \quad (64)$$

Onde:

s - número de seção

L – comprimento da seção

A – área da seção transversal tubular, dada pela Equação (65), onde r é o raio da seção, t é a espessura da chapa.

$$A = 2\pi r t \quad (65)$$

As variáveis de projeto utilizadas, neste modelo, foram as espessuras da seção transversal da base e do topo da torre, B e C, respectivamente (Figura 41). As

espessuras da parede da torre foram consideradas variáveis do tipo discretas, uma vez que dependem das disponibilidades das espessuras de chapas produzidas comercialmente.

Na forma vetorial, as variáveis de projeto podem ser representadas como:

$$x = \{B, C\} \quad (66)$$

Foram considerados no Modelo 1 de otimização as seguintes restrições de desigualdade:

a) Restrição de deslocamento horizontal no topo da torre, dada por:

$$\delta \leq \delta_{adm} \quad (67)$$

Sendo:

δ - deslocamento máximo da torre

δ_{max} - deslocamento máximo horizontal admissível

A NBR 8800 [2] não possui nenhuma recomendação específica para deslocamentos máximos admissíveis para o caso de torres como no modelo proposto, porém, a norma europeia, Eurocode 3 [25], recomenda que o deslocamento máximo no topo de torres metálicas esteja dentro do limite imposto pela Equação (68).

$$\delta_{max} = \frac{h}{50} = 152cm \quad (68)$$

Onde:

δ_{max} - deslocamento máximo recomendado pela norma Eurocode 3 [25]

h – representa a altura da torre

b) Restrição referente à tensão máxima equivalente, que resume todas as tensões multidirecionais. Esta restrição é representada pela Equação (69), onde σ é

a tensão máxima de von Mises na torre e σ_{Rd} representa a tensão resistente no estado limite ultimo segundo a Eurocode 3.

$$\sigma \leq \sigma_{Rd} \quad \therefore \quad \sigma_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_M} \chi \quad (69)$$

Onde:

f_y - tensão de escoamento do aço

γ_M - fator de segurança

χ - coeficiente de redução

Assim, pode-se descrever o problema de otimização do Modelo 1 como:

Minimizar a função:

$$vol(x) = \sum_{j=1}^S AL \quad (70)$$

Sujeito às restrições:

$$\delta \leq \delta_{adm} \quad (71)$$

$$\sigma \leq \sigma_{Rd} \quad (72)$$

$$x_i \leq x \leq x_s \quad (73)$$

Onde:

x - é o vetor que contém as variáveis de projeto, definido por:

$$x = \{B, C\} \quad (74)$$

x_i e x_s são, respectivamente, os vetores contendo os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto, para que a solução seja viável, e impedindo que as espessuras sejam inferiores às espessuras das chapas de aço disponíveis no mercado.

6.2 Modelo 2 de otimização

Neste item, é apresentado o segundo problema de otimização referente à torre MM92[21]. De forma análoga ao caso do Modelo 1, o dimensionamento é realizado com o objetivo de minimizar o volume, e com isso, a máxima economia possível do projeto. Neste modelo considera-se as mesmas variáveis de projeto do Modelo 1, dimensões da seção transversal do modelo real, e são consideradas duas restrições de projeto relativas às frequências naturais, obtidas na análise modal da estrutura em questão.

Para a minimização de volume da torre proposta neste modelo, utilizou-se o método de aproximação por subproblemas disponível no programa ANSYS [19]. Este método é um método avançado de ordem zero, que não necessita do cálculo de derivadas e pode ser eficientemente aplicado na maior parte dos problemas de engenharia.

O segundo problema de otimização considera o dimensionamento ótimo das seções transversais da torre adotando apenas a primeira e terceira frequência natural como restrição. O modelo matemático para este problema é representado pelas equações que se seguem.

A função objetivo do problema sendo o volume é dada por:

$$vol(x) = \sum_{j=1}^s AL \quad (75)$$

Onde:

s - número de seção

L – comprimento da seção

A – área da seção transversal tubular, dada pela Equação (76), onde r é o raio da seção, t é a espessura da chapa.

$$A = 2\pi r t \quad (76)$$

Como foi mencionado anteriormente, as variáveis de projeto utilizadas, neste modelo foram as mesmas utilizados no modelo anterior. As espessuras da parede da torre foram consideradas variáveis do tipo discretas, uma vez que dependem das disponibilidades das espessuras de chapas produzidas comercialmente.

Assim, as variáveis de projetos podem ser representadas como:

$$x = \{B, C\} \quad (77)$$

Para as restrições de projeto foram adotadas as frequências naturais da estrutura, obtidos via análise de autovalores, conforme exposto no Capítulo 3 deste estudo.

- a) Restrição da frequência natural fundamental de vibração livre da torre (f_1), limitada a uma frequência limite mínima ($f_{\min 1}$), dada por:

$$f_1 \geq f_{\min 1} \quad (78)$$

Onde:

f_1 - frequência natural do primeiro modo de vibração

$f_{\min 1}$ - frequência limite mínima considerada com valor igual a 0,1 Hz

- b) Restrição referente à terceira frequência natural da estrutura (f_3), limitada a uma frequência mínima ($f_{\min 3}$), dada por:

$$f_3 \geq f_{\min 3} \quad (79)$$

Onde:

f_3 - frequência natural do terceiro modo de vibração

$f_{\min 3}$ - frequência limite mínima considerada com valor igual a 0,1 Hz

Assim, pode-se resumir o modelo matemático como:

Minimizar a função:

$$vol(x) = \sum_{j=1}^S AL \quad (80)$$

Sujeito às restrições:

$$f_1 \geq f_{\min 1} \quad (81)$$

$$f_3 \geq f_{\min 3} \quad (82)$$

$$x_i \leq x \leq x_s \quad (83)$$

Onde:

x - é o vetor que contém as variáveis de projeto, definido por:

$$x = \{B, C\} \quad (84)$$

x_i e x_s são, respectivamente, os vetores contendo os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto, para que a solução seja viável, e impedindo que as espessuras sejam inferiores às espessuras das chapas de aço disponíveis no mercado.

6.3 Aplicações

A metodologia de dimensionamento ótimo proposta nesta dissertação é exemplificada pela aplicação de dois problemas estruturais. Os problemas considerados possuem diferenças associada às restrições e métodos de otimização utilizados.

De acordo com os problemas estruturais abordados no presente estudo, dois tipos de análise estrutural são necessárias: análise estática linear e análise dos autovalores (frequências naturais).

O primeiro projeto ótimo, Modelo 1, considera duas restrições mecânicas obtidas da análise estática linear, a tensão máxima e o deslocamento máximo da torre, e o Modelo 2 restrições obtidas da análise de autovalores (frequências naturais). Neste caso, todas as restrições consideradas nos problemas são restrições de desigualdade.

A função objetivo, para os dois problemas, é o volume total da estrutura, buscando-se deste modo, a minimização do volume de material e, com isso máxima economia possível do projeto.

As variáveis de projeto, são as dimensões transversais (espessuras) das seções da torre, caracterizando assim uma otimização dimensional.

As espessuras das chapas, usualmente, estão associadas a valores padronizados do mercado e gabaritos dos fabricantes. Assim sendo, neste trabalho, estas são variáveis discretas de acordo com disponibilidade do produto no mercado.

No programa utilizado nesta dissertação, ANSYS[19], é necessário que se estabeleça pelo menos o limite superior para as variáveis de projeto e o limite inferior ou superior, ou ainda, ambos, entre os quais se deseja delimitar a variação das restrições. Além dessas considerações, é preciso configurar os critérios de parada do algoritmo otimizador e adotar tolerâncias para os valores das variáveis de projeto, das restrições de projeto e da função objetivo.

Para otimização estrutural o programa ANSYS [19] disponibiliza dois tipos de algoritmo para atender a uma ampla variedade de problemas. Neste trabalho, é usado o método de primeira ordem para o primeiro problema de otimização (Modelo 1) e, para o segundo problema (Modelo 2) é utilizado o algoritmo de aproximação por subproblema, que comparado com o de primeira ordem, é considerado menos eficiente.

Na Tabela 6, são definidas as variáveis de projeto, e na Tabela 7, a função objetivo. Todos os parâmetros definidos nas Tabelas 6 e 7 são considerados nos dois problemas de otimização estudados.

Tabela 6 – Definição das variáveis de projeto.

Variável	Descrição	Unidade
B	Espessura da base	mm
C	Espessura do topo	mm

Tabela 7 – Definição da função objetivo.

Função	Descrição	Unidade
vol	Volume	m^3

Na Tabela 8, são definidas as restrições de projeto para o Modelo 1 de otimização e na Tabela 9 as restrições relacionadas às frequências naturais impostas no Modelo 2 de otimização.

Tabela 8 – Definição das restrições de projeto (Modelo 1).

Restrições	Descrição	Unidade
δ	Deslocamento máximo	m
σ	Tensão máxima	MPa

Tabela 9 – Definição das restrições de projeto (Modelo 2).

Restrições	Descrição	Unidade
f_1	Frequência Fundamental	Hz
f_3	Terceira Frequência	Hz

6.3.1 Aplicação do Modelo 1

Neste item são apresentadas as otimizações da torre MM92[21], considerando restrições relativas à resposta estática da estrutura (tensão e deslocamento).

Como passo prévio à realização do processo de otimização, é necessário que se definam os valores iniciais das variáveis de projeto. Como mencionado anteriormente, os valores iniciais dessas variáveis foram determinados de acordo com as espessuras das seções transversais da torre MM92[21] da Repower, apresentada no Capítulo 3, deste estudo.

Os limites para as variáveis de projeto são adotados, a fim de se manter as espessuras das chapas dentro dos limites de valores comerciais disponíveis. Desta forma, o limite inferior adotado para as espessuras é 0,005 m. O limite superior que é também uma exigência do ANSYS [19] é, neste caso, adotado como igual a 0,030 m para a variável B e 0,012 m para a variável C.

Os valores iniciais e limites das variáveis de projeto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores iniciais e limites das variáveis de projeto.

Variável	Valor inicial	Limite inferior	Limite Superior
B (mm)	30	5	30
C (mm)	12	5	12

A obtenção dos valores iniciais das restrições mecânicas (tensão e deslocamento) é feita conforme explicado no Capítulo 3. Para a tensão máxima, o limite é definido pela tensão resistente enquanto que para o deslocamento máximo o limite é dado por norma (Eurocode 3 [25]), conforme a Equação (68), que neste caso é de 1,52m. Os valores iniciais e os limites das restrições de projeto são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores iniciais e limites das restrições de projeto.

Restrições	Valor inicial	Limite inferior	Limite Superior
δ (m)	0,360	-	1,52
σ (MPa)	97,1	-	255

A função objetivo a ser otimizada, que representa o volume total da torre MM92[21], tem o valor inicial apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Valor inicial da função objetivo.

Função	Valor inicial
$vol(m^3)$	17,910

O processo de otimização começa com os valores iniciais das variáveis de projeto do problema, que servem de dados de entrada para o módulo de análise de estática. No módulo de otimização, é feita o cálculo do gradiente de todas as funções consideradas no modelo. A partir desses cálculos, o problema com restrições é transformado em um problema sem restrições e, a cada iteração, a viabilidade e a convergência são verificadas até que se atinja a configuração ótima.

Os resultados obtidos para a torre MM92, considerando o Modelo 1 de otimização são apresentados nas Tabelas 13 a 15 mostradas a seguir.

Tabela 13 – Valores iniciais e ótimos das variáveis de projeto.

Variável	Valor inicial	Valor ótimo
B (mm)	30	11,98
C (mm)	12	9,82

Tabela 14 – Valores iniciais e ótimos das restrições de projeto.

Restrições	Valor inicial	Valor ótimo
δ (m)	0,360	0,7153
σ (MPa)	97,1	245,6

Tabela 15 – Valor inicial e ótimo da função objetivo.

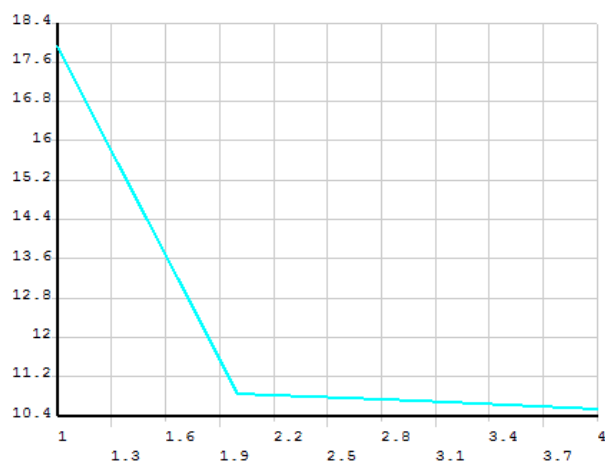
Função	Valor inicial	Valor ótimo
vol (m ³)	17,910	10,539

Ao longo do processo de otimização, foram realizadas quatro iterações, obtendo-se na quarta iteração o valor ótimo da função objetivo equivalente a 58,84% do volume inicial. A variação do valor do volume ao longo das iterações pode ser vista na Figura 42 (a), onde se observa uma curva monotonicamente decrescente.

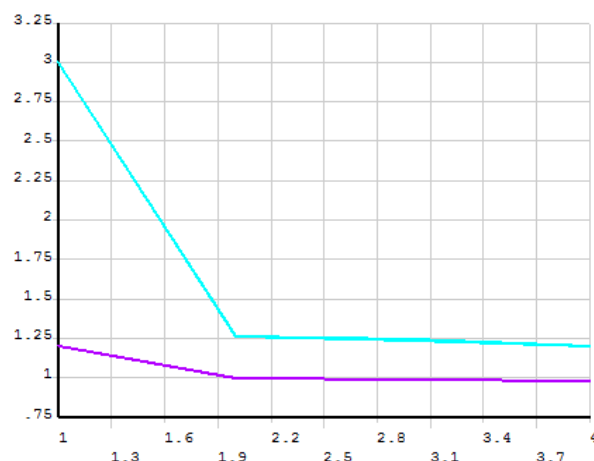
Ao final da otimização, a restrição de projeto de tensão atingiu o valor de 245,6 MPa, equivalente a 96,31% do seu limite, enquanto que a restrição do deslocamento máximo atingiu o valor de 0,7153 m, equivalente a 47,05% do seu

limite. Portanto, o resultado ótimo encontrado não teve nenhuma de suas restrições plenamente ativas.

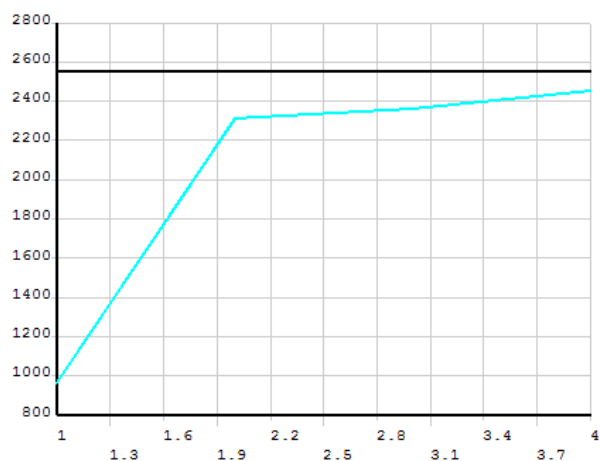
Na Figura 42 são mostrados os gráficos que ilustram as variações dos parâmetros, utilizados no processo de otimização ao longo das nove iterações.



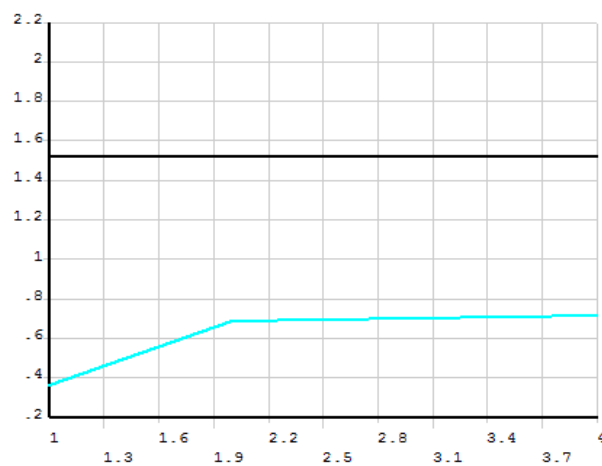
(a) Variação do volume versus iterações



(b) Variáveis de projeto versus iterações



(c) Variação da tensão versus iterações



(d) Variação do deslocamento versus iterações

Figura 42 – Variação dos parâmetros do Modelo 1 ao longo das iterações.

6.3.2 Aplicação do modelo 2

Neste item, é apresentado o dimensionamento ótimo da torre MM92[21], considerando restrições relativas às frequências naturais. O Modelo 2 de otimização foi também implementado no programa ANSYS[19], empregando-se o MEF. O

processo de otimização, foi realizado através de programação em linguagem APDL e a extração dos resultados foi feita por meio da interface gráfica.

Como passo prévio à realização do processo de otimização, é necessário que se definam os valores iniciais das variáveis de projeto. Os valores iniciais das variáveis de projeto associadas às espessuras das seções transversais da estrutura, são determinados de acordo com as características geométricas da torre MM92[21] da Repower, apresentadas capítulo 3, deste estudo.

Os limites para as espessuras são adotados, a fim de se manter as espessuras das chapas dentro dos limites de valores comerciais disponíveis. Assim, o limite inferior adotado para as espessuras é 0,005 m. O limite superior é uma exigência do ANSYS [19], e neste caso adotado como igual a 0,030 m para a variável B e 0,012 m para a variável C.

. Os valores iniciais e limites das variáveis de projeto são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores iniciais e limites das variáveis de projeto.

Variável	Valor inicial	Limite inferior	Limite Superior
B (mm)	30	5	30
C (mm)	12	5	12

Os valores iniciais de restrições são obtidos conforme explicado no item 3.4.2 do Capítulo 3. Quanto à frequência natural fundamental de vibração (f_1), limitada a uma frequência limite mínima ($f_{\min 1}$), com valor igual a 0,1Hz, enquanto que a terceira frequência natural da estrutura (f_3), é limitada a uma frequência mínima ($f_{\min 3}$), com valor de 0,1 Hz. Esses valores iniciais e os limites das restrições de projeto são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores iniciais e limites das restrições de projeto.

Restrições	Valor inicial	Limite inferior	Limite Superior
f_1 (Hz)	0,36	0,1	-
f_3 (Hz)	2,59	0,1	-

O valor inicial da função objetivo, a ser otimizada no Modelo 2 de otimização é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Valor inicial da função objetivo.

Função	Valor inicial
$vol (m^3)$	17,910

Os resultados obtidos para a torre MM92, considerando o Modelo 2 de otimização são apresentados a seguir nas Tabelas 19 a 21. Os valores das variáveis de projeto, no projeto inicial e no projeto ótimo, são apresentados na Tabela 19, das restrições de projeto, na Tabela 20 e da função objetivo, na Tabela 21.

Tabela 19 – Valores iniciais e ótimos das variáveis de projeto.

Variável	Valor inicial	Valor ótimo
B (mm)	30	9,93
C (mm)	12	5,82

Tabela 20 – Valores iniciais e ótimos das restrições de projeto.

Restrições	Valor inicial	Valor ótimo
f_1 (Hz)	0,36	0,18
f_3 (Hz)	2,59	1,46

Tabela 21 – Valor inicial e ótimo da função objetivo.

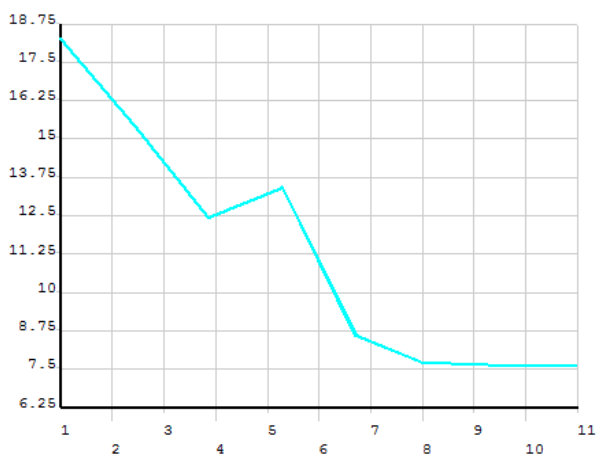
Função	Valor inicial	Valor ótimo
$vol (m^3)$	17,910	7,789

Ao longo do processo de otimização, foram realizadas onze iterações, tendo sido a ótima a 11^a e obtendo-se o valor ótimo da função objetivo equivalente a 43,48% do volume inicial. A variação do valor do volume ao longo das iterações pode ser vista na Figura 43 (a), onde se observa uma curva decrescente.

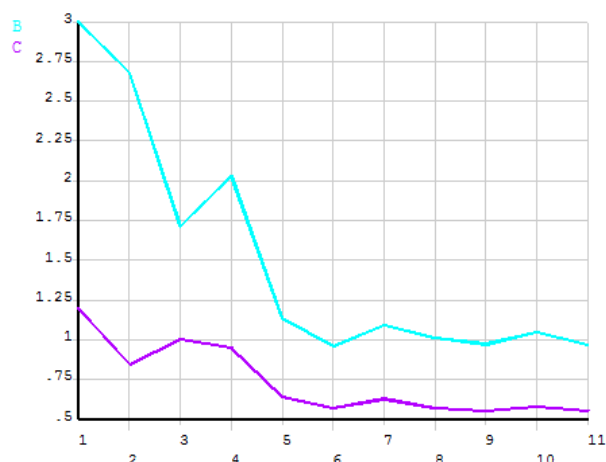
Na iteração ótima, as restrições de projeto das frequências naturais atingiram valores de 0,18 e 1,46 Hz, permanecendo distantes dos seus limites mínimo de 0,1

Hz. Portanto, o resultado ótimo encontrado não teve nenhuma de suas restrições ativas.

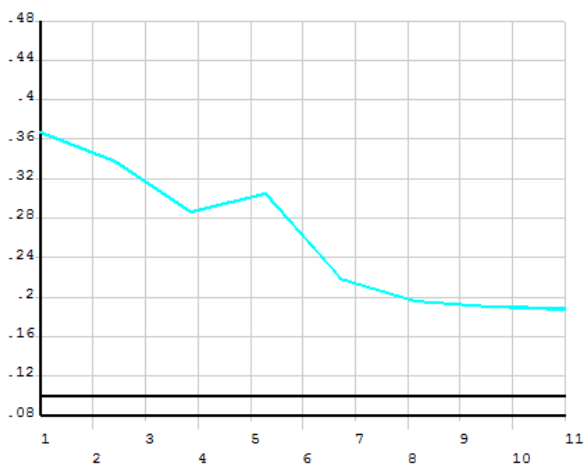
Na Figura 43 são mostrados os gráficos que ilustram as variações dos parâmetros, utilizados no processo de otimização ao longo das onze iterações.



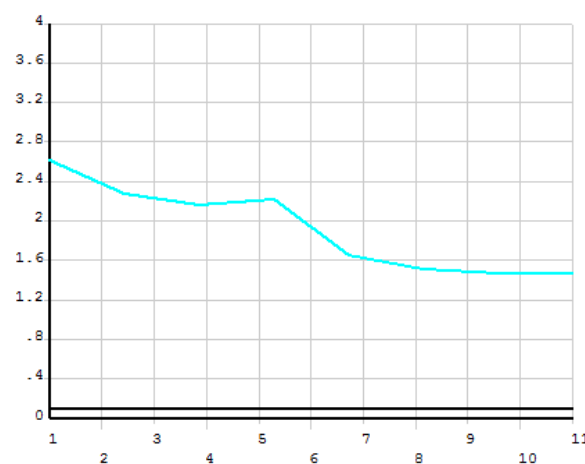
(a) Variação do volume versus iterações



(b) Variáveis de projeto versus iterações



(c) Variação da frequência 1 versus iterações



(d) Variação da frequência 3 versus iterações

Figura 43 – Variação dos parâmetros do Modelo 2 ao longo das iterações.

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das análises de otimização dos modelos computacionais desenvolvidos. Foram obtidos os valores ótimos da função objetivo, permitindo uma redução de mais de 40 % do volume da estrutura investigada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Introdução

O objetivo deste trabalho de pesquisa é formular o problema de otimização da torre eólica modelo MM92 da Repower [21], submetidos à ação do vento. Para tal, este estudo aborda todo o desenvolvimento do modelo numérico, via método dos elementos finitos com base na utilização do programa ANSYS [19].

Este trabalho foi dividido em três fases distintas. Em uma primeira etapa foram realizadas análises lineares do comportamento estático da torre, onde os resultados foram apresentados em termos de deslocamento e tensões máximas atuantes na torre. Na etapa seguinte foi realizada uma análise de autovalores e autovetores, e a última etapa contemplou a modelagem de otimização, propriamente dita, onde as restrições de projeto foram resultados obtidos nas primeiras duas etapas.

7.2 Conclusões

Como foi dito na introdução deste capítulo, este estudo buscou realizar a otimização da torre eólica modelo MM92 [21], visto que as torres correspondem cerca de 20% a 30% do custo de todo do empreendimento [8].

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os aerogeradores, relatando a história de sua evolução, desde os primeiros moinhos de ventos surgidos na antiga Pérsia até os potentes modelos atuais. Descreveram-se os tipos existentes de aerogeradores bem como as principais partes que os compõem. Foram apresentados os principais tipos de torres utilizadas, apontado suas características, vantagens e desvantagens.

O modelo de carregamento representativo das ações do vento foram estudados e implementados, de forma simplificada, com o objetivo de simular as forças horizontais devidas à ação do vento sobre a estrutura. Foi verificado que o carregamento das ações do vento, avaliado no segundo capítulo, não gerou uma tensão maior que a tensão de escoamento do material fato que a princípio garante, de certa forma, a sua segurança estrutural.

Para o modelo MM92 [21] realizaram-se verificações de segurança baseados nos estados limites últimos e estado limite de serviço, e apresentou-se os critérios recomendados pela NBR 8800 [2] e Eurocode 3 [25]. Foram descritos os parâmetros necessários para que fossem determinadas as cargas de vento que atuam na estrutura segundo a NBR 6123 [1].

No que se refere aos deslocamentos horizontais da estrutura, observou-se que comparando os resultados obtidos a partir do modelo numérico, com as recomendações da norma Eurocode 3 [25], verifica-se que o valor para o deslocamento estático horizontal (36,03 cm) atende ao critério da referida norma, sendo o deslocamento máximo permitido de 152 cm.

Os resultados das análises de vibração livre da estrutura revelaram que o mesmo apresenta uma frequência fundamental baixa, pois se trata de uma estrutura muito esbelta. Foi observado, também, que o primeiro modo de vibração da torre apresenta predominância dos efeitos de flexão em torno dos eixos globais horizontais X e Y, respectivamente. No segundo modo vibração verifica-se os efeitos de flexão em relação ao plano YZ. O terceiro modo de vibração apresenta característica predominante de torção, em torno do eixo global vertical Y. O quarto modo de vibração apresenta, novamente, predominância dos efeitos de flexão no plano XY.

No que diz respeito à otimização, foi desenvolvido dois modelos de otimização referentes à torre eólica MM92 da Repower [25]. No primeiro modelo o carregamento foi tratado de forma estática, considerando-se a ação do vento sobre a torre, a carga de compressão axial referente à massa do aerogerador concentrada no topo da torre e o seu peso próprio. No segundo modelo foi realizada análise de vibração livre extraíndo-se as frequências naturais. Nos dois modelos de otimização buscou-se a minimização do volume total da torre, dada sua relevância no custo total do sistema de energia. Foram empregadas como variáveis de projeto, as espessuras das paredes dos segmentos, tratadas como variáveis discretas. Como funções de restrições foram consideradas, as exigências do Eurocode 3 relativas ao deslocamento máximo, a tensão máxima (Modelo 1), além de restrições relacionadas com a geometria e com a frequência natural (Modelo 2).

Na aplicação prática dos modelos de otimização foi utilizada a ferramenta de otimização do software ANSYS [19]. Para tal, utilizaram-se dois métodos distintos: método de primeira ordem e o método de aproximação por subproblemas.

Quanto ao otimizador utilizado pelo programa ANSYS e seus algoritmos, faz-se uma boa avaliação, visto que os todos apresentaram resultados considerados satisfatórios. As soluções obtidas guardam coerência proporcional entre si, demonstrando razoabilidade, principalmente nas comparações dos resultados obtidos em relação à redução do volume total.

Como conclusões gerais mais significativas, foi observada uma redução de mais de 40% da torre investigada, respeitando-se nos casos os limites máximos propostos nos dois problemas.

Portanto, com os resultados obtidos pode-se dizer que as torres para aerogeradores merecem atenção especial, em relação à concepção do projeto estrutural, sendo que seu desempenho deve ser verificado através de metodologias completas que englobem além das análises clássicas (estáticas e dinâmicas), incluam também as análises de otimização.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o tema aqui tratado, de forma itemizada:

- a) Acrescentar novas considerações para os carregamentos da torre, como carregamento dinâmico e carregamentos provenientes do funcionamento do aerogerador;
- b) Realizar um estudo utilizando funções objetivo alternativas, considerando o custo dos materiais, de fabricação, de mão de obra ou mesmo de uma modelagem multiobjetivo;
- c) Investigar o efeito da ação do vento nas pás e sua interação com a ação na torre;
- d) Incluir novas variáveis de projeto, como por exemplo, o comprimento ou até os raios de cada segmento;
- e) Analisar a interação solo-estrutura;
- f) Considerar restrições relativas à verificação de segurança baseadas em critérios estabelecidos pela norma Brasileira (por exemplo a NBR 8800);
- g) Utilizar outros tipos de algoritmos;

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1990. 66p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 247p.
- [3] ARORA, J. S. Structural Optimization - Guide to Structural Optimization. 4th ed., Wiscconsin-Madison, USA, 1996. 349p.
- [4] KIRSCH, U. Structural Optimization – Optimum Structural Design, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1981.
- [5] NEGN, H. M., MAALAWI, K. Y., Computer e Structures – Structures Design Optimization of Wind Turbine Tower, 2000.
- [6] BAZEOS, G.D. HATZIGEORGIOU, I.D. HONDROS, H. KARAMANEAS, D.L. KARABALIS, D.E. BESKOS, Engineering Structures - Static, Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower, 2002.
- [7] LAVASSAS, G. NIKOLAIDIS, P. ZERVAS, E. FTHIMIOU, I.N. DOUDOUMIS, C.C. BANIOPOULOS, Engineering Structures - Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1- MW Wind Turbine Tower, 2003.
- [8] YOSHIDA, P.E., Wind Engineering – Wind Turbine Tower Optimization Method Using Genetic Algorithm, 2006.
- [9] UYS, P.E, FRAKASB, J'ARMIAIB, J. K., VAN TONDERA F., Engineering Structures - Optimization of a Steel Tower for a Wind turbine Structure, 2007.

- [10] FEIJO PINHO FEIJO. Otimização estrutural de torres de aço tubulares para geradores eólicos. Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil. Universidade Federal do Ceará. 2010.
- [11] LIMA, BAPTISTA CARDOSO ATHAYDE. Contribuição para otimização estrutural de torres tubulares de aço para de turbinas eólicas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil. Universidade Federal do Ceará. 2011.
- [12] SIRQUEIRA, A. S. Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas. Dissertação de Mestrado. Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [13] ANSYS, Inc. Design Optimization Seminar (version 5.0), 1993.
- [14] CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; Dynamics of Structures; McGraw-Hill, 1993. 634p.
- [15] CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.
- [16] ARORA, J. S. Introduction to Optimum Design; McGraw-Hill, 1989.
- [17] REKLAITIS, G.V., RAVINARAN, A. and RAGSDELL. Engineering Optimization – Methods and Applications, Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1983.
- [18] FLETCHER, R., Practical Methods of Optimizations. 2nd ed., Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1987.
- [19] ANSYS, Inc. Theory Reference (version 12.1), 2009.

- [20] SILVA, EMÍLIO CARLOS NELLI. Otimização Aplicada ao projeto de sistemas mecânicos. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [21] REPOWER SYSTEMS. Disponível em: <http://www.repower.de/fileadmin/download/produkte/PP_MM92_uk.pdf> Acessado em 16 de Abril de 2013.
- [22] CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 28 de Junho de 2013.
- [23] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>> Acesso em 15 de Julho de 2013.
- [24] Ventos do Sul Energia. Disponível em: <<http://www.ventosdosulenergia.com.br>> Acesso em 18 de Julho de 2013.
- [25] CEN, EUROCODE 3: Design of Steel Structures, Parte 3-2, Tower, masts chimneys. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [26] REBELO, C., SILVA, L. A. P. S. da. Measurement Plan of a Wind Steel Tower in Espinhaço de Cão, Lagos, Algarve, Portugal. HISTWIN – High-Strength Steel Tower for Wind Turbines. Civil Engineering Department, Faculty of sciences and Technology, University of Coimbra, 2007.11p.