

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES ANEMOMÉTRICA E DE SUSTENTAÇÃO
DE TURBINAS EÓLICAS**

RICARDO FREITAS VERGARA

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Jorge Alberto Almeida, Dr. Engenharia Mecânica.

RIO GRANDE, NOVEMBRO DE 2005.

Com amor para Iolanda Freitas Vergara,
minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Em reconhecimento a contribuição que recebi para tornar possível a realização deste trabalho, gostaria de agradecer:

- aos autores e pesquisadores citados no texto e referencia bibliografia pela pesquisa e compartilhamento do conhecimento;
- ao orientador Jorge Alberto Almeida pelo foto de confiança;
- a funcionária da secretaria do curso em Engenharia Oceânica Nilza Teresinha Loureiro Rodrigues acima de tudo pela amizade e aos funcionários da oficina mecânica da FURG Cláudio Omar Andrade Kucharski e Devanir José Oliveira pelo apoio técnico de hardware e software;
- a minha família e amigos pelo apoio e compreensão;
- e acima de tudo a “Deus” por mais uma vitória.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise estrutural desenvolvida de torres utilizadas em projetos para determinar o potencial eólico da região em estudo (torre anemométrica) e na instalação de turbinas eólicas na altura de projeto (torres de sustentação reticulada e tubular).

Determinando as forças e momentos atuantes, assim como as frequências e modos naturais de vibração das torres através das técnicas utilizadas pela mecânica clássica e pelo método dos elementos finitos, para a análise estrutural segundo os critérios de falha por fadiga e flambagem na situação normal de trabalho e quando a estrutura encontra-se sob a ação de uma força harmônica.

ABSTRACT

This work presents developed structural analysis of towers used in projects to determine the "aeolian" potential of the region in study (anemometric tower) and in the installation of aeolian turbines later on in the project (towers of reticulated and tubular sustentation).

Determining the acting forces and moments, as well as the frequencies and natural ways of vibration of the towers through the techniques used in classic mechanics and the method of finite elements, for the structural analysis according to criteria of breakdown due to fatigue and errors that occur due to unwanted motion in the normal situation of work and when the structure is under the action of a harmonic force.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE FIGURAS	
1. INTORDUÇÃO	17
1.1. OBJETIVO	18
1.2. JUSTIFICATIVA	19
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	20
2.1. FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	20
2.1.1. Energia dos oceanos	21
2.1.2. Energia geotérmica	22
2.1.3. Energia da biomassa	22
2.1.4. Energia de células de hidrogênio	23
2.1.5. Energia solar	23
2.1.6. Energia dos ventos – Energia eólica	24
2.2. ENERGIA EÓLICA	24
2.2.1. Origem dos ventos	24
2.2.2. História da energia eólica	28
2.2.3. Situação atual da produção de energia eólica no mundo	32
2.2.4. Equipamentos para conversão da energia eólica	33
3. ANÁLISE ESTRUTURAL	39
3.1 CRITÉRIOS DE FALHA ESTRUTURAL	40
3.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	44
3.3. TORRE ANEMOMÉTRICA	63
3.3.1 Análise estrutural da torre anemométrica	75
3.4 TORRE RETICULADA DE SUSTENTAÇÃO	98
3.4.1 Análise estrutural da torre reticulada de sustentação	107
3.4.2 Análise estrutural da torre devido à ação de uma força harmônica	122
3.5 TORRE TUBULAR DE SUSTENTAÇÃO	127

3.5.1 Análise estrutural da torre tubular de sustentação	130
3.5.2 Análise estrutural devido à ação de uma força harmônica	147
4. CONCLUSÃO	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
ANEXO A: Desenho esquemático da torre anemométrica	CD
ANEXO B: Determinação das forças e momentos internos atuantes na torre anemométrica, segundo Ansys 5.4.	CD
ANEXO C: Resultado final das forças e momentos internos atuantes na torre anemométrica	CD
ANEXO D: Teste de fadiga para os cabos de fixação da torre anemométrica	CD
ANEXO E: Teste de fadiga das barras redondas constituintes da torre anemométrica	CD
ANEXO F: Teste de fadiga para as cantoneiras de abas iguais constituintes da torre anemométrica	CD
ANEXO G: Teste de flambagem para os elementos estruturais da torre anemométrica	CD
ANEXO H: Teste de fadiga para o pino central, base e hastes ancoras da torre anemométrica.	CD
ANEXO I: Determinação das frequências e modos naturais de vibração da torre anemométrica, segundo Ansys 5.4.	CD
ANEXO J: Desenho esquemático da torre reticulada de sustentação	CD
ANEXO K: Determinação das forças e momentos internos atuantes na torre reticulada de sustentação, segundo Ansys 5.4.	CD
ANEXO L: Resultado final das forças e momentos internos atuantes da torre reticulada de sustentação	CD
ANEXO M: Teste de fadiga para as cantoneiras de abas iguais constituintes da torre reticulada de sustentação	CD
ANEXO N: Teste de flambagem para as cantoneiras de abas iguais quando submetidos à ação de forças externas atuantes.	CD
ANEXO O: Determinação das frequências e modos naturais de vibração da torre reticulada de sustentação, segundo Ansys 5.4.	CD

ANEXO P: Determinação das forças e momentos internos atuantes na torre reticulada de sustentação devida ação de uma força harmônica, segundo Ansys 5.4.	CD
ANEXO Q: Teste de fadiga para as cantoneiras de abas iguais constituintes da torre reticulada de sustentação devido à ação de uma força harmônica.	CD
ANEXO R: Teste de flambagem para as cantoneiras da abas iguais constituintes da torre reticulada de sustentação devido à ação de uma força harmônica.	CD
ANEXO S: Determinação das frequências e modos naturais de vibração da turre tubular de sustentação, segundo Ansys 5.4.	CD
ANEXO T: Determinação da forças e momentos internos atuantes na torre tubular de sustentação devido à ação de uma força harmônica, segundo Ansys 5.4.	CD

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área frontal efetiva.
$A_{S.T.}$	Área da secção transversal.
C_a	Coefficiente de arraste.
CD	Coefficiente de arraste.
E	Módulo de elasticidade.
F	Força axial.
F_a	Força de arraste.
FP	Força peso.
$f_{Máxima}$	Flecha máxima.
G	Módulo de elasticidade transversal.
g	Aceleração da gravidade.
$i_{Mínimo}$	Raio de giração mínimo
$I_{S.T.}$	Momento de inércia da secção transversal.
$J_{S.T.}$	Momento de inércia polar da secção transversal.
k	Constante de rigidez.
$L_{f_{Torre}}$	Comprimento de flambagem.
M	Momento fletor
N	Coefficiente de segurança.
n	Rotações.
P	Potência.
$P_{Crítica.Euler}$	Carga crítica de Euler.
P_{cr}	Carga crítica
q	Pressão dinâmica do vento ou carga distribuída.
Re	Número de Reynolds
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno.
S_3	Fator estatístico
$SMIS1$	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a força axial

	atuante no elemento.
SMIS2	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a força cortante atuante no elemento na direção “y”.
SMIS3	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a força cortante atuante no elemento na direção “z”.
SMIS4	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a momento torsor.
SMIS5	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a momento fletor em relação ao eixo “y”.
SMIS6	Nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar a momento fletor em relação ao eixo “z”.
$S_n 10^6$	Limite mínimo de resistência à fadiga.
S_U	Limite de ruptura.
T	Torque ou momento torsor.
V	Força cortante.
V_k	Velocidade característica do vento local, obtida pela equação 3.8.
V_o	Velocidade básica do vento local.
α	Ângulo de incidência do vento
δ	Variação do comprimento.
ϵ	Deformação específica do elemento.
θ	Ângulo de torção.
λ	Vetor unitário.ou índice de esbeltez.
ρ	Massa específica do ar.
σ	Tensão normal devido à força axial e/ou momento fletor.
τ	Tensão de cisalhamento devido à força cortante e/ou momento torsor.
ν	Viscosidade cinemática do ar
\emptyset	Índice de área exposta.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Nomenclatura das forças e momentos segundo Ansys 5.4	61
Tabela 3.2: Perfis utilizados na torre anemométrica	64
Tabela 3.3: Fator S_2	68
Tabela 3.4: Fator S_3	69
Tabela 3.5: Tensão devido à força SMIS1 nos pontos de análise	83
Tabela 3.6: Coordenada dos pontos da secção transversal da barra redonda	84
Tabela 3.7: Tensão devido aos momentos fletores SMIS5 e SMIS6 nos pontos de análise da barra de secção circular	84
Tabela 3.8: Tensão devido às forças cortantes SMIS2 e SMIS3 nos pontos de análise para barra de secção circular.	86
Tabela 3.9: Distância dos pontos em análise com relação à linha neutra para as barras de secção circular.	87
Tabela 3.10: Tensão devido ao momento de torção SMIS4 nos pontos de análise para as barras de secção circular.	87
Tabela 3.11: Coordenada dos pontos da secção transversal das cantoneiras de abas iguais	90
Tabela 3.12: Tensão devido aos momentos fletores SMIS5 e SMIS6 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais.	90
Tabela 3.13: Tensão devido às forças cortantes SMIS2 e SMIS3 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais.	94
Tabela 3.14: Tensão devido ao momento de torção SMIS4 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais.	95
Tabela 3.15: Característica dos perfis da torre anemométrica.	97
Tabela 3.16: Dados técnicos da turbina eólica.	106
Tabela 3.17: Forças e momentos atuantes na turbina eólica	106
Tabela 3.18: Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto.	108
Tabela 3.19: Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto na situação 2.1.	109

Tabela 3.20: Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” na situação 2.1.	109
Tabela 3.21: Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 2.2.	110
Tabela 3.22: Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 2.2.	110
Tabela 3.23: Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 3.1.	111
Tabela 3.24: Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 3.1.	111
Tabela 3.25: Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 3.2.	113
Tabela 3.26: Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 3.2.	113
Tabela 3.27: Coordenada dos pontos da secção transversal das cantoneiras de abas iguais.	118
Tabela 3.28: Característica dos perfis da torre reticulada de sustentação.	121
Tabela 3.29: Freqüências naturais da torre reticulada de sustentação.	122
Tabela 3.30: Perfil tubular 16in.	128
Tabela 3.31: Freqüências naturais da torre tubular de sustentação	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Radiação solar e rotação planetária	24
Figura 2.2: Células de circulação.	26
Figura 2.3: Capacidade energética do vento acumulada (MW) instalada na União Européia.	31
Figura 2.4: Capacidade acumulada instalada e capacidade instalada por ano, MW.	31
Figura 2.5: Distribuição mundial da produção da energia eólica em 2004.	32
Figura 2.6: Turbina eólica.	33
Figura 3.1: Perfis de velocidade do vento.	39
Figura 3.2: Comprimento livre de flambagem.	42
Figura 3.3: Domínio do contínuo da estrutura.	44
Figura 3.4: Sistema de molas unidimensionais.	45
Figura 3.5: Relação força – deslocamento para o Elemento (a).	45
Figura 3.6: Relação força – deslocamento para o Elemento (b).	46
Figura 3.7: Equação matricial do sistema de molas.	48
Figura 3.8: Sistema de massas deslocadas.	49
Figura 3.9: Condições de contorno na equação matricial do conjunto de molas.	49
Figura 3.10: Elemento tipo Beam 3D elastic 04, Ansys 5.4.	51
Figura 3.11: Graus de liberdade do elemento viga.	52
Figura 3.12: Esforços no elemento viga devido ao deslocamento transversal.	54
Figura 3.13: Esforços no elemento viga devido ao giro angular.	55
Figura 3.14: Momento de torção no elemento viga.	56
Figura 3.15: Determinação da matriz de rigidez do elemento viga com 04 graus de liberdade.	58
Figura 3.16: Elemento tipo Link 3D bilinear 10, Ansys 5.4.	60
Figura 3.17: Elemento tipo Mass21 Structural Mass, Ansys 5.4.	61
Figura 3.18: Nomenclatura das forças e momentos segundo Ansys 5.4.	62

Figura 3.19: Módulos da torre anemométrica.	63
Figura 3.20: Torre anemométrica e instrumentos de medição.	63
Figura 3.21: Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de secção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados.	66
Figura 3.22: Isopletas da velocidade básica V_o (m/s).	70
Figura 3.23: Condições de contorno dos cabos “BP” e “CP”.	72
Figura 3.24: Deslocamento pré-tensionada.	77
Figura 3.25: Deslocamento vento favor.	79
Figura 3.26: Deslocamento vento contra.	80
Figura 3.27: Pontos analisados na secção transversal das barras redondas.	82
Figura 3.28: Pontos analisados na secção transversal das cantoneiras de abas iguais.	88
Figura 3.29: Distribuição da tensão de cisalhamento na secção transversal da cantoneira de abas iguais devido a uma força cortante.	92
Figura 3.30: Tensão de cisalhamento resultante devido à força cortante com mesmo sentido e sentido contrário ao eixo “y”.	93
Figura 3.31: Tensão de cisalhamento resultante devido à força cortante com mesmo sentido e sentido contrário ao eixo “z”.	93
Figura 3.32: Barras de paredes finas.	95
Figura 3.33: Conjunto torre reticulada de sustentação.e turbina eólica.	98
Figura 3.34: Vistas para área da sombra da torre reticulada de sustentação.	100
Figura 3.35: Turbina eólica instalada sobre uma torre reticulada de sustentação.	104
Figura 3.36: Forças e momentos atuantes na turbina eólica.	107
Figura 3.37: Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 2.1.	109
Figura 3.38: Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 2.2.	110
Figura 3.39: Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 3.1.	111
Figura 3.40: Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 3.2.	112
Figura 3.41: Deslocamento parada.	114
Figura 3.42: Deslocamento vento positivo.	115

Figura 3.43: Deslocamento vento negativo.	116
Figura 3.44: 1º modo natural de vibração da torre reticulada – turbina eólica.	123
Figura 3.45: Força harmônica.	126
Figura 3.46: Conjunto torre tubular de sustentação.e turbina eólica.	127
Figura 3.47: Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para cilindros e esferas com superfícies lisas.	129
Figura 3.48: Diagrama de corpo livre da torre tubular de sustentação.	131
Figura 3.49: Direção das forças e momentos de reação da torre tubular de sustentação.	133
Figura 3.50: Secção transversal da torre tubular de sustentação.	135
Figura 3.51: Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular.	138
Figura 3.52: Espectro de tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular.	139
Figura 3.53: Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular.	140
Figura 3.54: Espectro de tensões normais atuantes no ponto 02 da secção transversal da torre.	143
Figura 3.55: Espectro de tensões normais ideais atuantes no ponto 02 da secção transversal da torre.	144
Figura 3.56: 1º modo natural de vibração do conjunto torre tubular – turbina eólica.	148
Figura 3.57: Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular devido à força harmônica.	153
Figura 3.58: Espectro de tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular a força harmônica.	155
Figura 3.59: Espectro de tensões ideais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular a força harmônica.	156
Figura 4.1: Ponto de coeficiente de segurança mínimo.	158

1. INTRODUÇÃO

A energia ao longo da história da humanidade é um dos fatores determinantes para o desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais é cada vez maior a necessidade energética para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover os desenvolvimentos econômicos, sociais e culturais.

É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industriais, mas principalmente naquelas em vias de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas, uma vez que, o mundo se encontra, com as crises de petróleo, pela dificuldade na construção de centros hidrelétricos, termoelétricos de carvão mineral, xisto, usinas nucleares e outras.

Esta situação fez com que muitos países buscassem por fontes alternativas de energia, tais como, energia solar, energia dos oceanos, geotérmica, das células de hidrogênio, biomassa e dos ventos.

A fonte de energia alternativa que possui maior disseminação é a baseada no aproveitamento da energia dispersa nas massas de ar em movimento na atmosfera chamada *Energia Eólica*.

Para aproveitá-la na forma de trabalho útil, é necessário convertê-la em energia mecânica através de equipamentos que, de acordo com a aplicação desejada, permitem o seu aproveitamento na forma elétrica, potencial, torque, etc...

A energia eólica é renovável, ou seja, em função das condições climáticas é constantemente gerada e não poluente, pois não emite resíduos tóxicos na atmosfera e afeta minimamente o ecossistema.

As vantagens sistema de energia eólica com relação aos métodos tradicionais, usinas térmicas, nucleares e hidroelétricas, são:

- ⇒ Tempo requerido para aprovar e construir projetos de geração eólica é muito mais curto, permitindo assim, uma maior flexibilidade para acompanhar o crescimento da demanda;
- ⇒ Usinas eólicas não emitem resíduos na atmosfera, nem produzem resíduos tóxicos ou radiativos;

- ⇒ Permitem a combinação da produção de eletricidade com outras atividades econômicas como a criação de gado, agricultura, aqüicultura e outras;
- ⇒ Não exige água para produção de energia, permitindo a instalação em regiões áridas ou semi-áridas;
- ⇒ Não queimam combustíveis fósseis, sendo assim, não sofre influência da flutuação do preço dos combustíveis no mercado, permitindo uma melhor previsibilidade de seus custos de operação;
- ⇒ O tamanho médio de usinas eólicas é de pequeno porte, permitindo uma melhor distribuição das fontes de geração pelo território nacional e uma maior rapidez para construção e reconstrução, o que pode ser encarado como uma estratégia de segurança nacional.
- ⇒ A produção de energia através de usinas eólicas proporciona as fontes tradicionais de energia à possibilidade de economizarem suas fontes de energia, por exemplo, na forma de carvão, coluna da água, etc...

A grande desvantagem do uso da energia eólica é a sua dependência do comportamento aleatório do vento que impedem que a energia gerada a partir dos ventos, possa ser considerada constante necessitando assim, que ela faça parte de um misto de abastecimento capaz de compensar a sua aleatoriedade (Olinto, 2001).

Contudo, para longos períodos a energia eólica apresenta uma característica estacionária permitindo uma previsão através de métodos estatísticos, que justificam a sua utilização.

1.1 OBJETIVO

Análise das torres anemométrica e de sustentação de turbinas eólicas baseando-se nos critérios de falha estrutural por fadiga, flambagem e deformações em função das forças, momentos e deslocamentos internos atuantes em cada elemento que surge devido às condições de trabalho a qual são submetidas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tão importante quanto determinar o potencial eólico de uma dada região para se obter a escolha da turbina eólica que obterá a melhor relação custo-benefício é verificar através de uma análise estrutural se equipamentos (rotor e componentes da nacela) e elementos estruturais (torres e cabos) utilizados apresentam resistência mecânica às situações de esforços as quais são submetidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

A energia tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover os desenvolvimentos econômicos, sociais e culturais.

É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em vias de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas e prementes.

As fontes alternativas de energia surgem como uma solução viável para a atual situação em que o mundo se encontra, com as crises de petróleo, pela dificuldade de construção de centrais hidroelétricas, termoelétricas, carvão mineral, xisto, usinas nucleares e outras formas de energia sujas (não renováveis), como são classificadas, em via de que a utilização destas geram uma grande degradação ambiental o qual é incontestável do ponto de vista social, econômico e humano.

Construir uma hidroelétrica hoje significa desabitatar e destruir uma grande área verde.

Estes acontecimentos têm de certa forma, fortalecido o movimento em busca de novas fontes alternativas de energia como a energia eólica, solar, dos oceanos, geotérmica e de outras mais.

O termo *Fontes Alternativas de Energia* não deriva apenas de uma alternativa eficiente, ele é sinônimo de uma energia limpa, pura, não poluente, a principio inesgotável e que pode ser encontrado em qualquer lugar, pelo menos, a maioria na natureza (Núcleo de Energia Alternativa, 2004).

2.1.1 Energia dos oceanos

Existem várias formas potenciais de aproveitamento da energia dos oceanos: energia das marés, energia associada ao diferencial térmico (OTEC - sigla inglesa para conversão da energia térmica dos oceanos) e energia das ondas (Enerlink, 2004).

➤ Energia das marés

A maré é uma consequência da atração que a lua e o sol exercem sobre a terra, e é justamente a amplitude das marés, ou seja, a diferença entre o nível de maré alta e da maré baixa, que constitui o fator que possibilita o aproveitamento dessa fonte de energia.

Quando a maré é alta, a água enche o reservatório, passando através de turbinas produzindo assim energia elétrica, quando a maré baixa o reservatório é esvaziado fazendo com que a água volte a passar através da turbina em sentido contrário produzindo assim, energia elétrica (Núcleo de Energia Alternativa, 2004).

➤ Energia térmica dos oceanos

Os oceanos cobrem cerca de setenta por cento (70%) da superfície terrestre, isso os tornam os maiores coletores e armazenadores de energia solar do planeta.

Em um dia 60 milhões de Km² de mar tropical absorvem radiação igual em energia a 250 bilhões de barris de petróleo, um décimo dessa energia seria capaz de suprir toda a necessidade energética mundial.

É uma proposta de tecnologia que converte a energia solar armazenada em energia elétrica, através de diferença térmica natural dos oceanos, ou seja, o fato de que camadas diferentes do oceano possuem temperaturas diferentes, e que esta diferença de temperatura entre a superfície morna e o fundo frio do oceano seja superior a vinte graus Celsius (20⁰c).

Trata-se de uma fonte alternativa de energia, uma vez que, a fonte é o sol, e que apresenta uma produção ininterrupta de energia elétrica ao contrário da energia solar e eólica (Geocities, 2004).

➤ Energia das ondas

Atualmente a energia das ondas é uma das formas de energia dos oceanos que apresenta maior potencial de exploração, em teoria, se fosse possível equipar os litorais do planeta com conversores energéticos, as centrais elétricas existentes poderiam ser desativadas.

Basta pensar que uma onda de três metros de altura contém pelo menos 25 KW de energia por metro de frente (Geocities, 2004).

A energia das ondas tem origem direta no efeito dos ventos, os quais são gerados pela radiação solar incidente.

2.1.2 Energia geotérmica

Energia geotérmica é o calor retido debaixo da crosta terrestre, calor este trazido à superfície na forma de vapor ou água quente, criada quando a água flui através dos lençóis subterrâneos próximos a rochas aquecidas, e usados diretamente para o aquecimento de casa e prédios ou convertida em energia elétrica (Geocities, 2004).

2.1.3 Energia da biomassa

O biodigestor é um sistema utilizado para a produção de gás natural (Metano-CH₄), através de um processo anaeróbico na degradação de polímeros orgânicos derivados de matéria biodegradável, resíduos alimentícios, esgoto, substrato da cana-de-açúcar, vinhaça, esterco orgânico e demais materiais biodegradáveis.

Em países europeus e asiáticos como a Alemanha e China desenvolvem-se a técnica da produção de bio-gás na eliminação de resíduos de esgoto.

O gás produzido tem suas aplicações na iluminação, uso em fogões, geladeiras e motores de Ciclo-Otto (Núcleo de Energia Alternativa, 2004).

2.1.4 Energia de células de hidrogênio

A célula a combustível se baseia no uso de hidrogênio como combustível onde é possível obter energia em grande quantidade, além disso, o produto da queima do hidrogênio é água, que não polui de forma alguma.

O hidrogênio é o combustível principal dos foguetes que levam o ônibus espacial até a órbita onde baterias de hidrogênio, também chamadas de células de combustível alimentam o sistema elétrico da espaçonave, onde único produto dessa bateria é água pura aproveitada pela tripulação como bebida.

Embora o conhecimento do princípio de funcionamento da célula de combustível ser bastante antigo, o entendimento de como ela realmente funciona é relativamente recente.

As vantagens desse sistema são inúmeras, mas a principal está na possibilidade de fornecimento de energia na forma constante e ilimitada (Núcleo de Energia Alternativa, 2004).

2.1.5 Energia solar

Uma das mais antigas formas de energia utilizada pelo homem, da qual se transforma a energia solar em energia elétrica (Enerlink, 2004).

As duas formas mais usuais de se extrair a energia solar são:

➤ Solar Fotovoltaico: é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico).

O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial, nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

➤ Termo Solar: são sistemas que utilizam a energia do sol para o aquecimento de água, para as mais diversas aplicações.

2.1.6 Energia dos ventos – Energia eólica

O vento é uma fonte de energia inesgotável e que vem sendo utilizada durante muitos séculos.

O processo de obtenção de energia eólica consiste em transformar a energia cinética contida nas massas de ar em energia elétrica através de turbinas eólicas ou em energia mecânica através de aeromotores.

Apesar de não ser uma fonte de energia alternativa capaz de manter o abastecimento energético constante devido à variação da velocidade dos ventos, é um dos sistemas mais utilizados e estudado no mundo dentre as fontes de energia alternativa aqui citados.

2.2. ENERGIA EÓLICA

2.2.1. Origem dos ventos

O vento, ar em movimento, tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária, como mostra a figura 2.1.

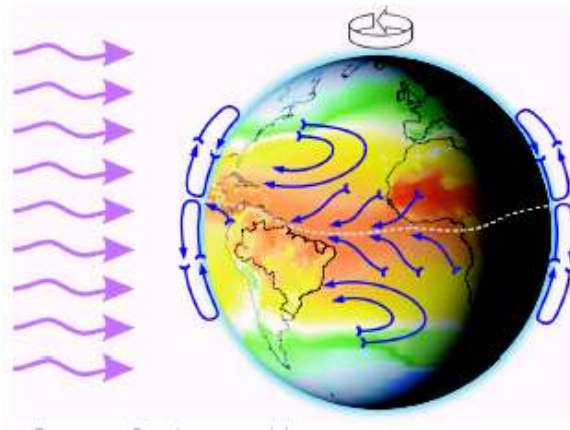


Figura 2.1 - Radiação solar e rotação planetária (Atlas do potencial eólico Brasileiro, 2004)

A radiação solar que incide sobre a Terra aquece a superfície de forma desigual fazendo com que o ar da atmosfera, especialmente aquele contido em baixas altitudes, seja aquecido de maneira desigual (densidades diferentes).

Assim, nos locais onde a atmosfera absorve maior radiação solar, o ar se aquece, expandindo-se e tornando-se mais leve (menos denso).

Com isso se eleva, fazendo com que o ar das zonas onde há um menor aquecimento (mais densas) se mova para tomar o lugar deste.

Onde há ascendência do ar, é formada uma zona de baixa pressão, também conhecida por ciclone, ao passo que onde o ar desce é gerada uma zona de alta pressão ou anticiclone.

O ar então se desloca das zonas de alta pressão para a zona de baixa pressão junto à superfície da Terra, retornando por regiões mais altas da atmosfera formando células de circulação.

Baseando-se neste fenômeno pode-se imaginar duas importantes células de circulação do ar na atmosfera, uma devido a maior quantidade de energia absorvida nas zonas tropicais em relação aos pólos, próximo ao Equador, onde o ar sobe forçando uma corrente vinda dos pólos junto à superfície.

Assim, para o hemisfério sul, o vento sopra de sul para norte junto à superfície, retornando em maiores altitudes na direção norte-sul, enquanto que no hemisfério norte o vento junto à superfície sopra na direção norte-sul e retorna de sul para norte fechando a célula de circulação.

Entretanto o ar que se move em direção aos pólos perde temperatura rapidamente e, após percorrer um terço da distância, a temperatura já é suficientemente baixa e o ar começa um movimento de descida.

Parte dessa massa de ar move-se então, em direção ao Equador formando uma célula de circulação tropical, também denominada por célula de Hadley, sendo que o restante se dirige ao pólo junto à superfície da Terra.

Em seu movimento sofre um novo aquecimento e assume novamente um movimento ascendente formando uma célula temperada.

Uma parcela do ar ascendente toma a direção do pólo formando uma célula polar, essas principais células compõem o modelo das três células.

Porém, devido à rotação da Terra, o ar em movimento está sujeito aos efeitos da força de Coriolis (Gustave Gaspard Coriolis *1792 †1843) que no hemisfério sul desvia a trajetória do escoamento para a esquerda e no hemisfério norte, para a direita (Wind Power, 2004).

Sendo assim cada uma das seis células de circulação descritas acima (três em cada hemisfério) sofre esse efeito.

Na região compreendida pela célula de Hadley, nas latitudes de até 30 graus, ao sul o vento toma uma direção de sudeste e ao norte de nordeste, conhecidos por ventos alísios.

Nas latitudes moderadas o vento é desviado tomando no hemisfério norte a direção de sudoeste e no hemisfério sul de noroeste.

Esse vento característico costuma ser denominado de vento ocidental, enquanto que nas células polares o vento segue orientação semelhante aos ventos alísios.

A figura 2.2 de mostra a formação dessas células.

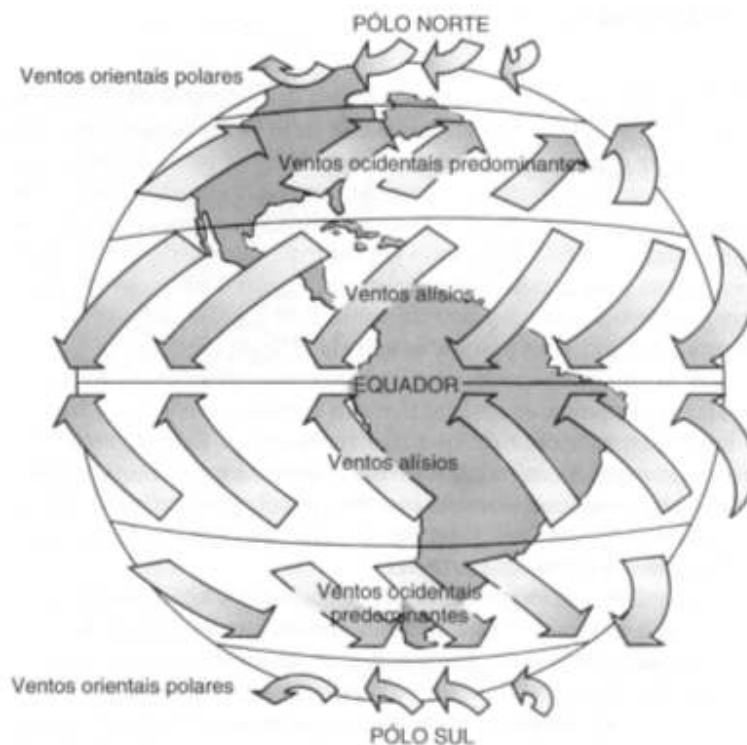


Figura 2.2 - Células de circulação

Os padrões de circulação descritos acima seriam válidos apenas para uma esfera homogênea com igual distribuição de radiação solar.

Como o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, assim variações sazonais na distribuição de radiação solar recebida na sua superfície acarretam variações também sazonais na intensidade e direção dos ventos.

Além disso, a superfície da Terra possui enormes variações em sua estrutura, distribuída em áreas coberta por oceanos, mares, lagoas, florestas, montanhas e diferentes tipos de solos, que afetam o fluxo do ar de diversas formas:

⇒ Diferença nas quantidades de radiação solar absorvida;

⇒ Diferenças nas quantidades de umidade presente no ar;

⇒ Variações nos campos de pressão.

Essas variações conduzem a diferenciais que afetam os ventos globais e geram muitos dos ventos locais, que também podem ocorrer sobre bases sazonais ou diárias, conduzidos por variações nos aquecimentos e resfriamentos locais, como por exemplo, a brisa marinha e os ventos das montanhas.

A brisa marinha é um exemplo particular de vento gerado por efeitos locais, nas regiões costeiras, durante o dia as massas de ar sobre os oceanos e mares permanecem frias em relação àquela situada sobre a massa continental, pois grande parte da energia radiante proveniente do sol é usada para fazer evaporar a água ou é absorvida por ela própria.

Por outro lado, o continente absorve uma menor quantidade de radiação solar permitindo que o ar sobre ele tenha sua temperatura elevada, gerando uma corrente ascendente.

Desta forma uma corrente do ar frio sobre a água, mais denso, se desloca em direção a terra.

Durante a noite, em face da menor capacidade calorífica da terra, a temperatura sobre ela cai mais rapidamente do que sobre a água.

Assim, uma corrente de vento da terra para o mar é formada, geralmente a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marinha devido a menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

A velocidade da brisa marinha depende diretamente da diferença entre as temperaturas do mar e da terra, podendo também ser afetada pela passagem de sistemas

atmosféricos, podendo assim, atingir valores muito significativos, com velocidades de até 8m/s a 10m de altura e penetrando sobre a terra por vários quilômetros, a altura de sua ocorrência em geral não ultrapassa 100m.

Outro exemplo de ventos gerados localmente são aqueles característicos de zonas montanhosas.

Quando o lado do vale é aquecido durante o dia o ar sobe a encosta, fazendo com que o ar mais frio desça sobre o vale para substituir o ar que subiu.

À noite, a direção dos ventos é invertida e o ar frio desce das montanhas se acumulando no fundo dos vales (Wind Power, 2004).

2.2.2 História da energia eólica

Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas certamente ocorreram há milhares de anos no Oriente.

Eram provavelmente máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto sobre placas ou velas para produzir trabalho.

Estima-se que a partir da Idade Média (de 476 a 1453 DC) o homem passou a utilizar em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações devido a maior eficiência das máquinas eólicas.

Possivelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI.

O certo é que no século XIV, na Holanda, essas máquinas já apresentavam grande evolução técnica e de capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serviços de serrarias e bombeamento d'água.

Na época da descoberta do Brasil, em 1500, havia milhares de moinhos de vento por toda a Europa, da Península Ibérica aos países nórdicos.

Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram largamente expandida a sua aplicação na Europa como na fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, em produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem.

Com a expansão do uso de máquinas a vapor, com a Revolução Industrial (século XVIII-XIX), os moinhos de vento europeus entraram num gradual desuso.

Outro surto de aplicação em larga escala de máquinas eólicas deu-se nos Estados Unidos, no século XIX.

Após a abolição da escravatura naquele país, em 1863, iniciasse a disseminação da utilização do cata-vento múltipla pás para bombeamento d'água.

Cata-ventos múltiplas pás chegaram a ser produzida industrialmente em escalas de centenas de milhares de unidades por ano, através de diversos fabricantes, o que possibilitou preços acessíveis a grande parte da população.

Ao mesmo tempo em que constituiu num importante fator da economia, muitos historiadores atribuem parcela do sucesso e da rapidez da expansão colonizadora do Oeste à disponibilidade de cata-ventos múltipla pás de baixo custo, que facilitaram o acesso à água e a fixação de apoios em grandes áreas áridas ou semi-áridas.

Estima-se que mais de seis milhões de cata-ventos múltiplas pás já foram produzidos no mundo.

O uso do cata-vento múltiplas pás expandiu-se pelos diversos continentes, inclusive no Brasil.

Para a geração de energia elétrica, também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciando uma ampla utilização de pequenas turbinas eólica para carregar baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural.

Entre 1930 e 1960, milhares dessas turbinas eólicas foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países.

A produção dessas máquinas foi desativada gradualmente nas décadas de 1950 e 1960, à medida que as redes de eletrificação passaram a dominar o atendimento rural.

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe há diversas décadas.

Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser).

Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, investiram em pesquisa sobre utilização da energia eólica para a geração elétrica.

Entretanto, foi partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólico para geração de energia elétrica atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economia.

O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas nascentes indústrias do setor, em regime de competição, alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo, especialmente com vias remuneração pela energia produzida.

Características também marcantes desse processo foram:

- ⇒ Devido a modularidade, o investimento em geração elétrica passou a ser acessível a uma nova e ampla gama de investidores;
- ⇒ Devido à produção em escalas industriais crescentes, o aumento de capacidade unitária das turbinas e novas técnicas construtivas, possibilitaram reduções graduais e significativas no custo do quilowatt instalado e, conseqüentemente, no custo de geração;
- ⇒ O principal problema ambiental inicial, impacto das pás em pássaros, praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte com velocidades angulares menores dos rotores.

Por se mostrar uma forma de geração praticamente inofensiva ao meio ambiente, sua instalação passou a simplificar os minuciosos, e demorados estudos ambientais requeridos pelas fontes tradicionais de geração elétrica, bastando em muitos casos, aos poderes concedente a delimitação das áreas autorizadas para sua instalação.

Esse último fato, aliado às escalas industriais de produção de turbinas, tornou a geração de energia eólico-elétrica uma das tecnologias de maior crescimento na expansão da capacidade geradora (Atlas do potencial eólico Brasileiro, 2004).

A figura 2.3 apresenta a evolução cumulativa da capacidade eólico-elétrica instalada na União Européia, até 31/12/2004.

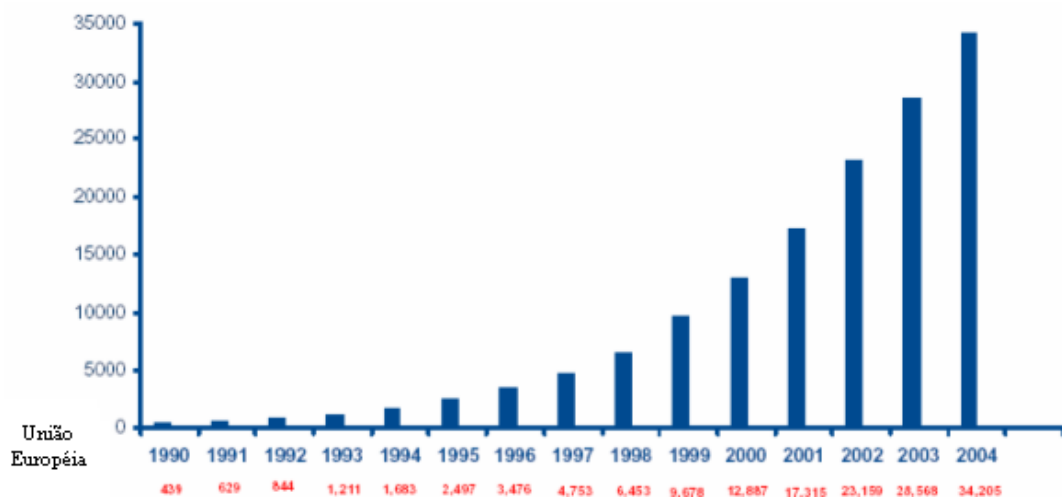


Figura 2.3 - Capacidade energética do vento acumulada (MW) instalada na União Européia (European Wind Energy Association, 2005)

A figura 2.4 mostra a evolução da energia eólica instalada na Alemanha, sendo este é o país com a maior capacidade instalada no mundo nos últimos quatorze anos.

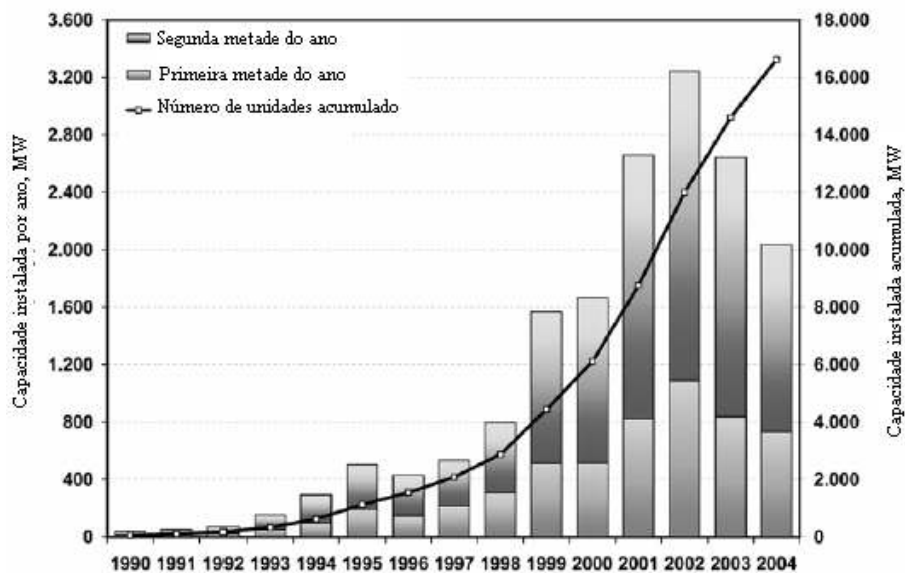


Figura 2.4 - Capacidade acumulada instalada e capacidade instalada por ano, MW (International Energy Agency, 2005)

2.2.3 Situação atual da produção de energia eólica no mundo

No ano de 2004 a indústria de geração de energia através de turbinas eólicas obteve um crescimento de 20% equivalente à potência instalada de 7.976 MW, fechando o ano com uma potência instalada de aproximadamente 47.317MW.

Os países que apresentaram crescimento significativo na capacidade instalada total de energia eólica são Alemanha (16.629MW), Espanha (8.263MW), Estados Unidos da América (6.740MW), Dinamarca (3.117MW) e Índia (3.000MW), (Global Wind Energy Council, 2005).

O mapa mundial da energia elétrica produzida através da energia eólica ficou assim definido em 2004 como mostra a figura 2.5:

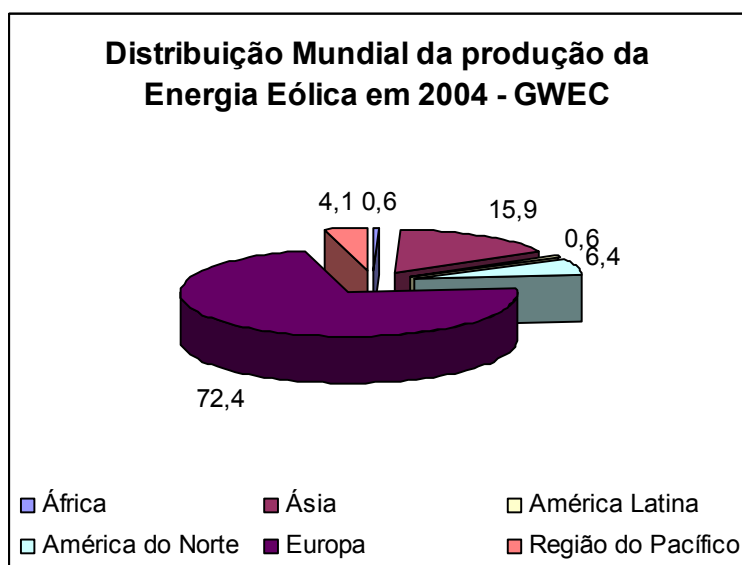


Figura 2.5 - Distribuição mundial da produção da energia eólica em 2004 (Global Wind Energy Council , 2005)

2.2.4 Equipamentos para conversão da energia eólica

Componentes existentes na turbina eólica necessária para converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica, como mostra a figura 2.6.

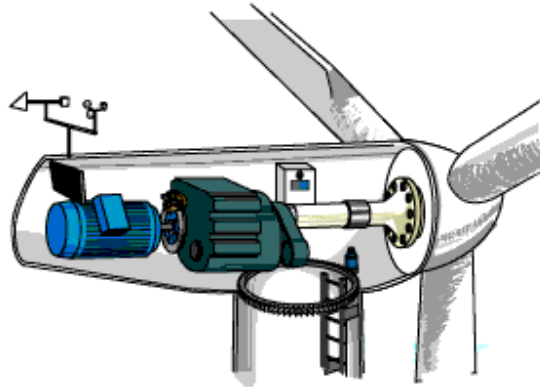


Figura 2.6 – Turbina eólica (Global Wind Energy Council , 2005)

➤ Gerador

O gerador de uma turbina eólica é o componente responsável pela transformação da energia mecânica, fornecida pelo rotor da turbina, em energia elétrica.

Na maioria das aplicações, as turbinas eólicas estão ligadas a linhas de distribuição que necessitam de energia com tensão e frequência constante, para isto, são utilizadas duas configurações:

⇒ Turbinas eólicas com velocidade variável e frequência constante (VVFC):

São turbinas que operam próximas de sua máxima eficiência, entretanto esse sistema costuma apresentar uma relação custo - benefício economicamente inviável, pois existe a necessidade do controle da excitação e de um conversor de estado sólido para converter a potência à frequência variável em potência a frequência constante, além de um complexo sistema de controle de velocidade na turbina.

Esta configuração é muito comum em turbinas eólicas de corrente contínua de pequeno porte que fornecem energia para um sistema de acumulação.

⇒ Turbinas eólicas com velocidade constante frequência constante (VCFC):

Em virtude de um melhor equilíbrio custo-benefício e facilidade de construção este é o tipo de sistema mais amplamente utilizado.

Dividindo-se em:

- Gerador assíncrono (indução): Mais utilizado devido a sua maior simplicidade e menor custo. Dispensa a regulação de velocidade, exceto para evitar que o rotor alcance a velocidade de fuga ou a sobrecarga do gerador.
- Gerador síncrono: Possuem um custo mais elevado, e deve ser acoplado a uma turbina de velocidade constante.

As turbinas eólicas de grande porte (acima de 100-150 quilowatts) a tensão gerada pela turbina é geralmente de corrente alterna trifásico de 690 V (C. A.).

A corrente é emitida subseqüentemente através de um transformador ao lado da turbina eólica (ou do interior a torre) para elevar a tensão, em alguns lugares entre 10.000 e 30.000 volts, dependendo do padrão na rede elétrica local.

Os grandes fabricantes fornecem modelos de turbina eólica de 50 hertz (para o sistema elétrico existente na maioria do mundo) e modelos de 60 hertz (para o sistema elétrico existente na América).

Existe ainda a necessidade de um sistema de resfriamento para o gerador, onde na maioria de turbinas isto é realizado encapsulando o gerador em um duto, usando um ventilador grande para refrigerar o gerador por meio do ar.

Alguns fabricantes usam sistema de refrigeração à água, além de possuir uma forma mais compacta também apresenta algumas vantagens na eficiência elétrica, mas apresenta a desvantagem de necessitar de um radiador na nacele, para que o calor absorvido pela água possa ser transferido para o ambiente externo.

➤ Sistema de transmissão

Os geradores utilizados em turbinas eólicas de grande porte não possuem acoplamento direto entre eixo da turbina e do gerador, pois é praticamente inviável pelo ponto de vista econômico e peso do equipamento. Nesses casos é necessário que se

empregue um sistema de transmissão que multiplique a rotação da turbina adaptando-a a necessidade do gerador.

Os sistemas multiplicadores mais utilizados são caixas com engrenagens helicoidais, planetários e hidráulicos. Embora alguns fabricantes utilizem para turbinas de médio e pequeno porte, configurações com acoplamento direto entre eixo da turbina e do gerador. Nesses casos perde-se com o custo mais elevado de um gerador de múltiplos pólos, mas evita-se as perdas mecânicas do sistema de transmissão (Wind Power, 2004).

➤ **Aerofólio:**

O projeto do rotor de uma turbina eólica deve ser desenvolvido visando obter o mínimo custo para a energia produzida. Para isso é necessária uma análise multidisciplinar que leve em conta aspectos como um modelo aerodinâmico, um modelo estrutural, modelos de custo de fabricação e de materiais, utilização das melhores opções de componentes para turbinas. Associados a isso devem estar às características do vento do local onde ela será instalada.

Em geral o mínimo custo para a energia é alcançado com altas velocidades do rotor, a qual sofre restrição com relação ao ruído.

São equipamentos sujeitos aos efeitos do atrito, características esta de grande importância, pois as turbinas eólicas devem funcionar por longos períodos resultando em acúmulo de insetos e sujeiras em sua superfície.

➤ **Sistema de controle de potência**

As turbinas eólicas são projetadas para produzir energia elétrica tão barata quanto possível. As turbinas eólicas conseqüentemente são projetadas geralmente de modo que seu rendimento máximo seja alcançado com velocidade máxima de vento em torno de 15m/s (30 nós ou 33 mph). É possível projetar turbinas para velocidade máxima de vento acima de 15m/s o problema é que ventos fortes são muito raros e conseqüentemente será raro às vezes em que esta turbina trabalhará na potência nominal, tornando-se assim um projeto economicamente inviável.

No caso de ventos mais fortes é necessário, portanto desperdiçar a parte da energia adicional do vento a fim de evitar danificar a turbina do vento (Wind Power, 2004).

O método de controle de tensão pode ser feito de diferentes formas:

⇒ Controle de Passo

A turbina eólica possui um controlador eletrônico que verifica a taxa de energia gerada. Quando a taxa de energia se torna demasiadamente elevada, limita-se um sinal ao mecanismo de passo das pás fazendo que o ângulo de ataque das pás seja modificado do vento, em torno de uma linha central longitudinal do seu próprio eixo.

Esta ação é executada durante a operação normal da turbina, conferindo as pás alguns graus cada vez que a velocidade do vento mudar, a fim de manter as pás do rotor no ângulo que maximize o rendimento da turbina eólica para qualquer velocidade de vento.

Este sistema de controle é geralmente operado hidráulicamente (Wind Power, 2004).

⇒ Controle por Stall Passivo

As turbinas controladas pelo mecanismo de stall (passivo) possuem suas pás fixas no cubo central em um ângulo determinado, e os perfis das pás do rotor são projetados aerodinamicamente para assegurar o surgimento de turbulência no lado da lâmina do rotor que não está enfrentando o vento quando este se torna demasiadamente elevado. Esta turbulência faz com que exista um desprendimento da camada limite existente sobre a superfície da pá que lhe confere a força de sustentação responsável pelo giro do rotor da turbina eólica, sendo este fenômeno conhecido como STALL.

Observando-se as pás de turbinas eólicas controladas por stall, é possível notar que a pá está ligeiramente torcida enquanto você se move ao longo de sua linha longitudinal central.

Isto é feito em parte a fim de assegurar que o rotor pare gradualmente ao contrário de abruptamente quando a velocidade de vento alcança valores críticos.

A vantagem básica do controle por stall é que não existe a necessidade de partes móveis no rotor para o giro das pás, evitando assim sistemas de controle complexos.

Como desvantagem, o controle por stall apresenta problemas aerodinâmicos muito complexos de projeto, e desafios relacionados às forças dinâmicas a qual toda a estrutura estará sujeita, por exemplo, evitar vibração induzida pelo stall.

Atualmente 2/3 das turbinas eólicas que estão sendo instaladas no mundo operam utilizando este sistema de controle de potencia (Wind Power, 2004).

⇒ Controle por Stall Ativo

Turbinas eólicas de grande porte (1MW) estão sendo desenvolvidas com mecanismo de controle por stall ativo. A técnica utilizada por este sistema de controle é semelhante ao sistema de controle do passo da pá. A única diferença está no sentido de giro das pás quando velocidades de vento são atingidas, a fim de evitar a sobrecarga do gerador, o ângulo de ataque das pás do rotor é aumentado para fazer com que o rotor não atinja velocidades elevadas de giro.

Com relação ao sistema de controle por stall passivo este sistema apresenta uma precisão maior na energia gerada.

Uma vantagem que sistema de controle por stall ativo apresenta é a possibilidade da turbina eólica funcionar quase que exatamente com a mesma potência gerada em todas as velocidades elevadas do vento.

O controle por stall passivo terá uma energia elétrica produzida menor do que a nominal quando a mesma estiver sujeita a velocidades de vento acima da projetada, uma vez que as pás do rotor entram em um stall mais profundo.

O mecanismo de controle de potência por stall ativo opera geralmente utilizando sistema hidráulico ou motores deslizantes elétricos (Wind Power, 2004).

⇒ Outros sistemas para o controle de potência

Algumas turbinas eólicas mais velhas usam os ailerons (aletas - Flaps) para controlar a energia do rotor, apenas com aletas para alterar a geometria das pás assim como os utilizados em aviões para lhes fornecer uma maior força de sustentação extra para a decolagem.

Outra técnica utilizada em turbinas eólicas com potência máxima de 1kW é o sistema de controle por guinada da turbina eólica (Wind Power, 2004).

➤ **Materiais de fabricação**

Os materiais mais empregados para a fabricação das pás de turbinas eólicas são aço, alumínio e materiais compósitos de madeiras, fibra de vidro e fibra de carbono.

Uma pá deve ser leve o suficiente para minimizar as cargas inerciais e giroscópicas as quais contribuem para a fadiga da pá e atender os requisitos de rigidez e resistência mecânica.

O material ideal para a fabricação da pá deve apresentar uma boa relação de resistência por peso e atender requisitos de custo e facilidade de fabricação.

O aço e o alumínio apresentam uma ótima resistência mecânica, mas por outro lado, tem problemas de baixa resistência a fadiga.

A fibra de carbono apresenta as melhores propriedades de resistência e rigidez mecânicas, peso e resistência à fadiga, contudo, não é amplamente utilizada face ao seu alto custo e dificuldades de manuseio.

Sendo assim, nos últimos dez anos à parte dos rotores de turbinas eólicas de grande porte são fabricadas de plásticos reforçados de fibra de vidro, GRP, isto é poliéster de fibra de vidro ou epoxy reforçado a fibra de vidro.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural das torres anemométrica e de sustentação de turbinas eólicas baseia-se nos testes de falha estrutural por fadiga, flambagem e deformação plástica para duas situações de trabalho a qual as torres são submetidas:

⇒ Regime normal de funcionamento (torre anemométrica e de sustentação);

⇒ Ação de uma força harmônica (torre de sustentação).

Entre as forças externas atuantes uma é devido à ação do vento que apresenta um perfil logaritmo de velocidade do vento ao longo da camada limite. Para esta situação será considerado um perfil constante do vento como mostra a figura 3.1 que proporciona uma maior segurança.

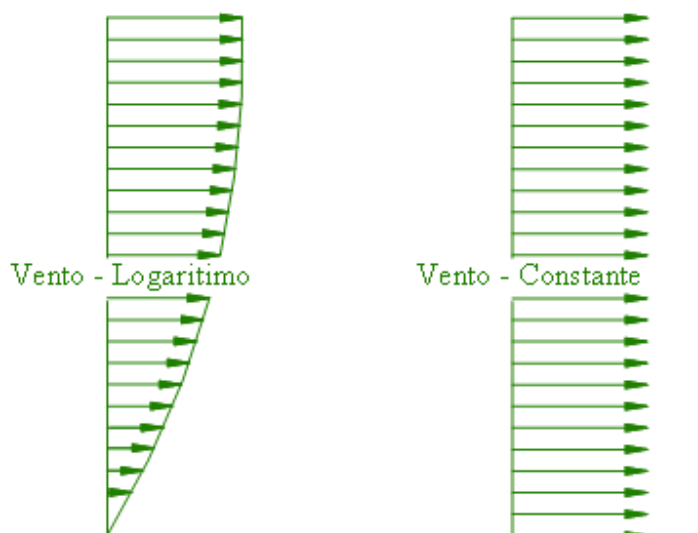


Figura 3.1 - Perfis de velocidade do vento

Em função das condições de contorno utiliza-se o método de elementos finitos empregado pelo programa Ansys 5.4 para determinar as forças, momentos e deslocamentos internos atuantes em cada elemento estrutural das torres.

3.1 CRITÉRIOS DE FALHA ESTRUTURAL

Uma vez determinadas às forças, momentos e deslocamentos internos máximos e mínimos aplica-se os critérios de falha estrutural segundo:

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

Este critério verifica se a estrutura possui uma deformação que satisfaz a relação linear de tensão x deformação que rege o estado de deformação elástica da estrutura em função da tensão de escoamento característica do material utilizado, onde o coeficiente de segurança mínima aceita é de 1,5.

Isto significa que cessado a causa da deformação a estrutura retorna a posição inicial, situação esta que não ocorre quando ocorre uma deformação plástica que caracteriza a falha estrutural das torres neste trabalho.

➤ Critério de falha estrutural por fadiga

A análise estrutural em função do critério de falha por fadiga utiliza o método de Von Mises-Goodman empregando os valores máximos e mínimos de força e momento internos atuantes obtidos. Admitindo um comportamento cíclico para os resultados obtidos obtém-se uma análise mais conservadora, onde o coeficiente de segurança mínima aceita de 1,5.

➤ Critério de falha estrutural por flambagem

Ao sofrer a ação de uma carga axial de compressão, a peça perde a sua estabilidade, sem que o material tenha atingido o seu limite de escoamento.

Este colapso ocorrerá sempre na direção do eixo de menor momento de inércia de sua secção transversal.

O teste é feito baseando-se nas expressões do suíço Leonard Euler (*1707 - †1783), se o índice de esbeltez da torre for maior do que o índice de esbeltez de Euler, obtido pela equação 3.1.

$$\lambda_{\text{Euler}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{Limite.Escoamento}}}} \quad (3.1)$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade;

$\sigma_{\text{Limite.Escoamento}}$: Limite de escoamento.

Índice de esbeltez da torre é definido através da relação entre o comprimento de flambagem ($L_{f_{\text{Torre}}}$) e o raio de giração mínimo da secção transversal da peça, expresso pela equação 3.2.

$$\lambda_{\text{Torre}} = \frac{L_{f_{\text{Torre}}}}{i_{\text{Mínimo}}} \quad (3.2)$$

Onde:

λ_{Torre} : Índice de esbeltez da torre;

$i_{\text{Mínimo}}$: Raio de giração mínimo, expresso pela equação 3.3:

$$i_{\text{Mínimo}}^2 = \frac{I_{\text{Torre}}}{A_{\text{S.T.}}} \quad (3.3)$$

$L_{f_{\text{Torre}}}$: Comprimento livre de flambagem, em função do tipo de fixação das extremidades, a peça apresenta diferentes comprimentos livres de flambagem, como mostra a figura 3.2.

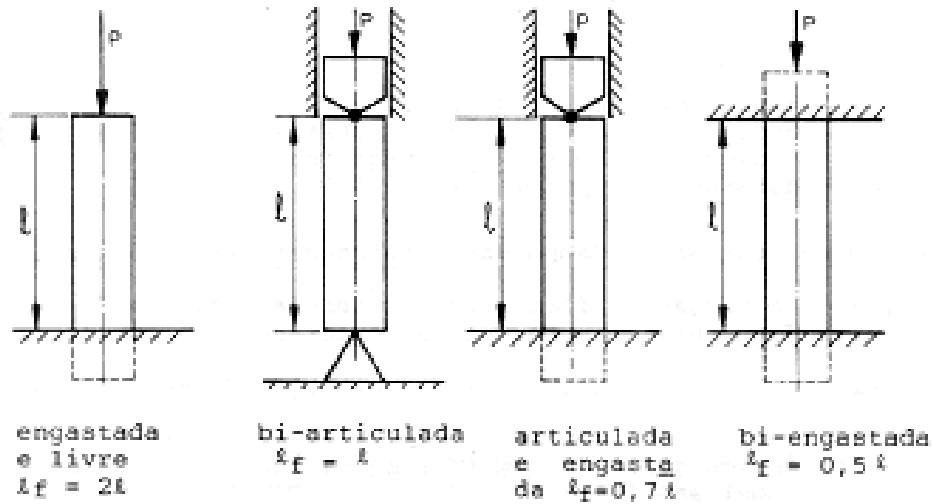


Figura 3.2 - Comprimento livre de flambagem
(Melconiam, 1988)

\Rightarrow Se $\lambda_{Torre} > \lambda_{Euler}$:

A carga crítica de Euler para torre é expresso pela equação 3.4:

$$P_{Crítica.Euler.Torre} = \frac{\pi^2 \cdot E_{Torre} \cdot I_{Torre}}{L_{f_{Torre}}^2} \quad (3.4)$$

Onde:

$P_{Crítica.Euler.Torre}$: Carga crítica de Euler para torre;

P_{cr} : Carga crítica;

E_{Torre} : Módulo de elasticidade da torre;

I_{Torre} : Momento de inércia da secção transversal da torre;

$L_{f_{Torre}}$: Comprimento livre de flambagem da torre.

Coefficiente de segurança para torre segundo o critério de falha por flambagem, segundo Euler é expresso pela equação 3.5:

$$N_{Flambagem.Torre} = \frac{F_{Crítica.Euler.Torre}}{F_{compressão.Torre}} \quad (3.5)$$

\Rightarrow Se $\lambda_{Torre} < \lambda_{Euler}$:

Se esta condição é satisfeita utiliza-se a condição de flambagem em barras no campo das deformações *Elasto-Plásticas* que ocorre quando a tensão de flambagem ultrapassa a tensão de proporcionalidade do material, situação em que a fórmula de Euler perde a sua validade.

$$\sigma_{Fl} = 240 - 0,0046.\lambda^2 \quad \text{Para } \lambda \leq 105 \quad (3.6)$$

$$\sigma_{Fl} = \frac{\pi.E}{\lambda^2} \quad \text{Para } \lambda > 105 \quad (3.7)$$

Coefficiente de segurança da torre segundo o critério de falha por flambagem, segundo critério é expresso pela equação 3.8:

$$N_{Flambagem.Torre} = \frac{\sigma_{Fl.Torre}}{\sigma_{compressão.Torre}} \quad (3.8)$$

Onde o coeficiente de segurança mínima aceita de 1,5.

As forças e momentos internos atuantes assim como as frequências e modos naturais de vibração das torres serão obtidos através do *Método de Elementos Finitos* empregado pelo programa Ansys 5.4 para este trabalho.

3.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A base do método de elementos finitos para a análise de um meio contínuo pode ser resumida da seguinte maneira. Pequenas partes chamadas de elementos subdividem o domínio da estrutura como mostra a figura 3.3. Estes elementos são interconectados em um número finito de pontos em cada elemento chamado de nós. Assume-se uma solução geral das equações governantes para cada elemento do domínio. A solução específica para cada elemento é uma função da solução dos valores nos nós.

A aplicação da forma de solução geral para todos os elementos resulta em um número finito de equações algébricas para solucionar os valores nodais desconhecidos.

Devido a este tipo de subdivisão da estrutura, pode-se formular equações para cada elemento finito separadamente, as quais devem ser combinadas de tal forma que se obtenha a solução de todo o sistema físico.

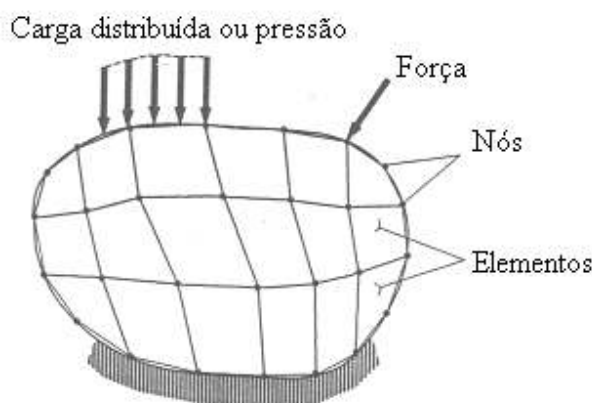


Figura 3.3 - Domínio do contínuo da estrutura.

A operação fundamental do método de elementos finitos é ilustrada para análise linear de um sistema massa-mola unidimensional, conforme mostra a figura 3.4.

Cada mola é um elemento que tem um nó em cada extremidade e conecta com outro elemento por nós comuns. Cada nó possui um grau-de-liberdade "U" que são os deslocamentos nodais e encontram-se sob ação das forças " F_A ", " F_B " e " F_C " que deformam a estrutura.

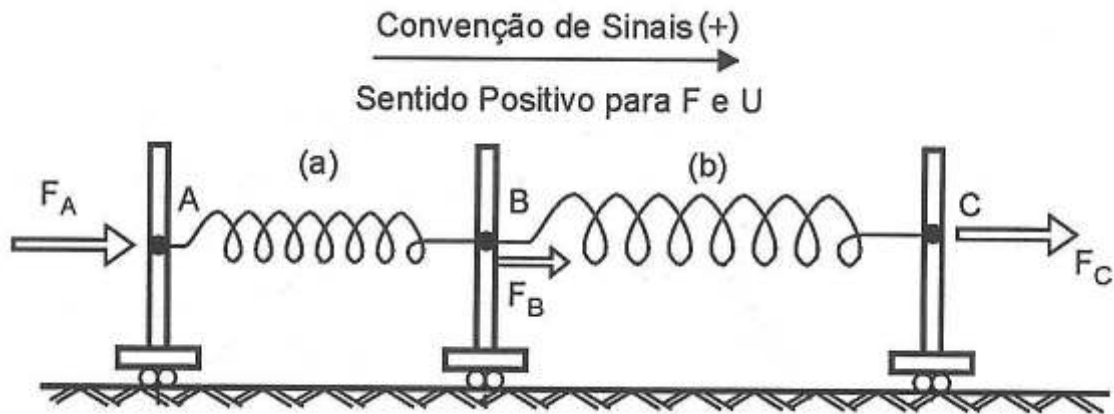


Figura 3.4 - Sistema de molas unidimensionais (Alves, 2000)

A relação força – deslocamento para o elemento (a), com relação à figura 3.5, é descrita pelas equações 3.9 3.10:

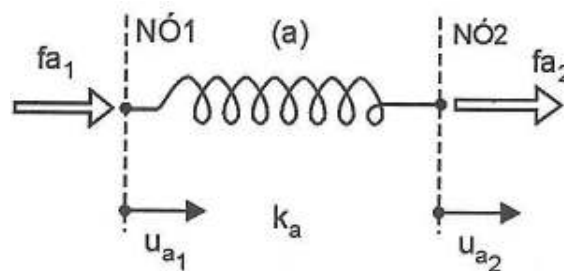


Figura 3.5 - Relação força – deslocamento para o Elemento (a) (Alves, 2000)

$$f_{a_1} = k_a \cdot u_{a_1} - k_a \cdot u_{a_2} \quad (3.9)$$

$$f_{a_2} = -k_a \cdot u_{a_1} + k_a \cdot u_{a_2} \quad (3.10)$$

Na forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} f_{a_1} \\ f_{a_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{a_1} \\ u_{a_2} \end{Bmatrix}$$

Representando na forma compactada temos:

$$\{f\} = [k]\{u\}$$

Onde:

$[k]$: Matriz de rigidez do elemento;

$\{u\}$: Vetor de deslocamentos nodais;

$\{f\}$: Vetor de força interna nodal.

A relação força – deslocamento para o elemento (b), com relação à figura 3.6, é descrita pelas equações 3.11 3.12:

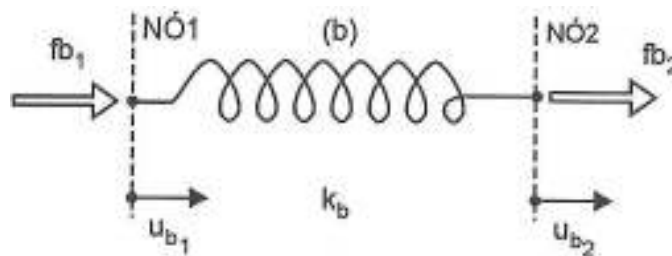


Figura 3.6 - Relação força – deslocamento para o Elemento (b) (Alves, 2000)

$$f_{b_1} = k_b \cdot u_{b_1} - k_b \cdot u_{b_2} \quad (3.11)$$

$$f_{b_2} = -k_b \cdot u_{b_1} + k_b \cdot u_{b_2} \quad (3.12)$$

Na forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} f_{b_1} \\ f_{b_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{b_1} \\ u_{b_2} \end{Bmatrix}$$

Representando na forma compactada temos:

$$\{f\} = [k]\{u\}$$

Onde:

$[k]$: Matriz de rigidez do elemento;

$\{u\}$: Vetor de deslocamentos nodais;

$\{f\}$: Vetor de força interna nodal.

As componentes de força nas equações dos elementos são forças internas nos nós produzidos pelos elementos quando os nós deslocam-se. Aplicando as equações de equilíbrio em cada nó e “ F_i ” a força externa no nó “ i ”, tem-se:

Nó A:

$$f_{a_1} = F_A \quad (3.13)$$

Nó B:

$$f_{a_2} + f_{b_1} = F_B \quad (3.14)$$

Nó C:

$$f_{b_2} = F_C \quad (3.15)$$

Substituindo as equações dos elementos 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12, nas equações 3.13, 3.14 e 3.15 respectivamente, caracterizando-se o processo de montagem, obtém-se as equações estruturais dadas por:

$$\begin{aligned} k_a \cdot u_{a_1} - k_a \cdot u_{a_2} &= F_A \\ -k_a \cdot u_{a_1} + k_a \cdot u_{a_2} + k_b \cdot u_{b_1} - k_b \cdot u_{b_2} &= F_B \\ -k_b \cdot u_{b_1} + k_b \cdot u_{b_2} &= F_C \end{aligned}$$

Identificando o comportamento dos deslocamentos:

$$\begin{aligned} u_{a_1} &= U_A \\ u_{a_2} = u_{b_1} &= U_B \\ u_{b_2} &= U_C \end{aligned}$$

Estas equações podem ser escritas na forma matricial, portanto:

$$\begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \\ F_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_a & -k_a & 0 \\ -k_a & k_a + k_b & -k_b \\ 0 & -k_b & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{Bmatrix}$$

Representando na forma compactada temos:

$$\{F\} = [K]\{U\}$$

Onde:

$\{F\}$: Matriz coluna que contém as forças nodais aplicadas no modelo da estrutura;

$[K]$: Matriz de rigidez da estrutura;

$\{U\}$: Matriz coluna que contém os deslocamentos nodais a serem determinados.

É interessante observar quais são os termos que estão contidos nessa matriz, como mostra a figura 3.7.

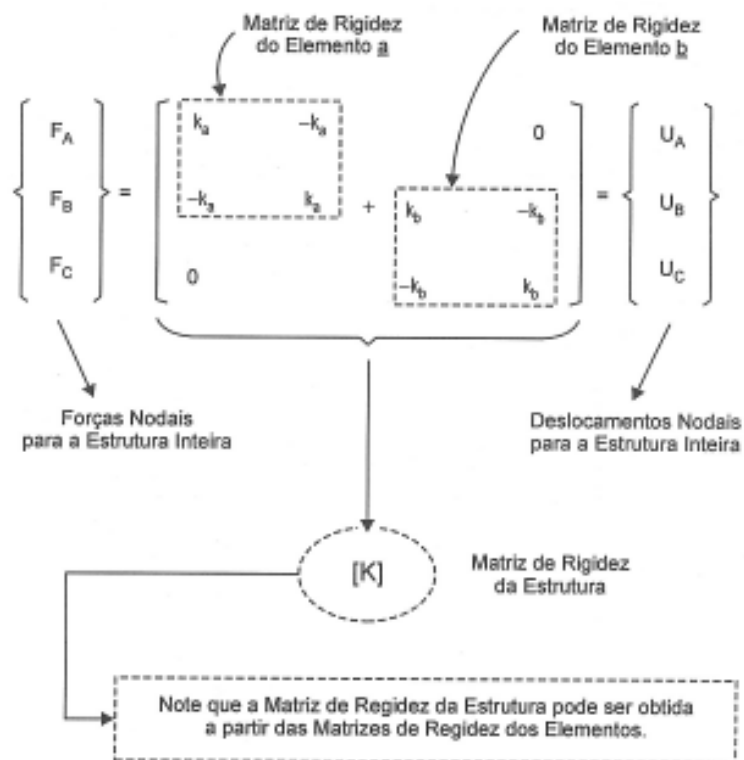


Figura 3.7 - Equação matricial do sistema de molas.

Para o caso particular, como mostra a figura 3.8.

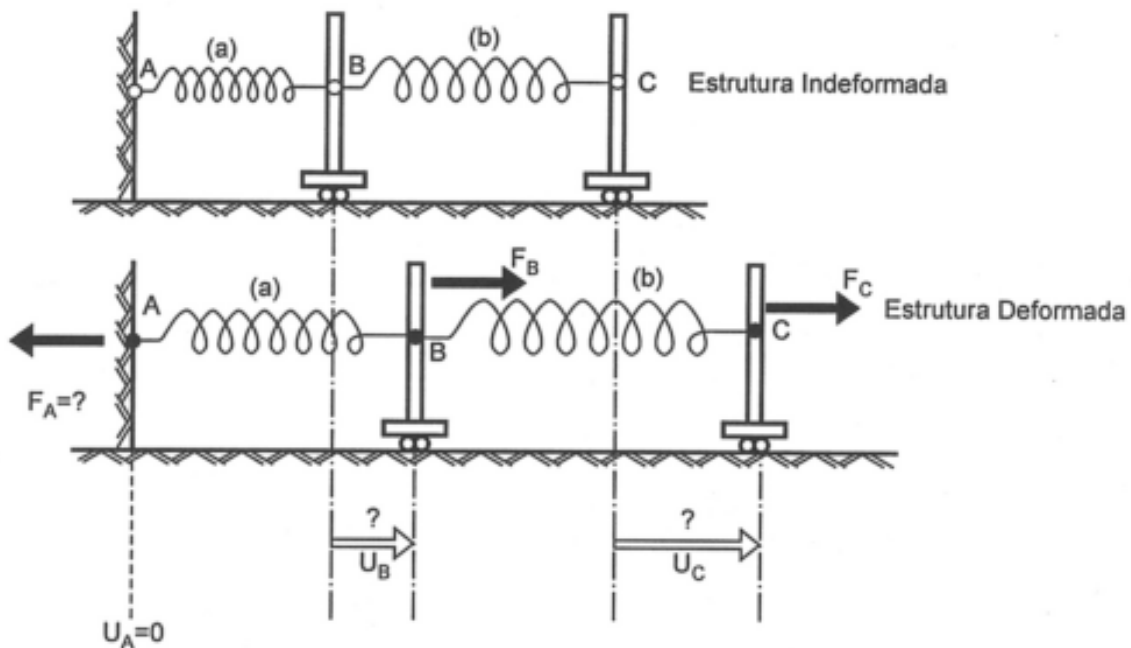


Figura 3.8 - Sistema de massas deslocadas (Alves, 2000)

As constantes de mola são conhecidas e, por consequência, todos os termos da matriz de rigidez. As forças aplicadas são conhecidas e os deslocamentos nodais são as variáveis a determinar pelo conjunto de três equações, como mostra a figura 3.9.

$$\begin{matrix}
 \text{Reação} \\
 \text{Desconhecida} \\
 (?) \\
 \begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \\ F_C \end{Bmatrix} \\
 \text{Forças} \\
 \text{Nodais} \\
 \text{Aplicadas} \\
 \text{Conhecidas}
 \end{matrix}
 =
 \begin{matrix}
 \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\
 \begin{bmatrix} k_a & -k_a & 0 \\ -k_a & k_a+k_b & -k_b \\ 0 & k_b & -k_b \end{bmatrix} \\
 \text{Pedaço da Matriz que} \\
 \text{Relaciona Forças Aplicadas} \\
 \text{e Deslocamentos Incógnitas}
 \end{matrix}
 -
 \begin{matrix}
 \text{Deslocamento} \\
 \text{Imposto Conhecido} \\
 \begin{Bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{Bmatrix} \\
 \text{Deslocamento} \\
 \text{a Determinar} \\
 (?)
 \end{matrix}
 \end{matrix}$$

Figura 3.9 - Condições de contorno na equação matricial do conjunto de molas (Alves, 2000)

Efetuada a multiplicação das matrizes temos:

$$\{F_A\} = [k_a] \{U_A\} + [-k_a \quad 0] \begin{Bmatrix} U_B \\ U_C \end{Bmatrix}$$
$$\begin{Bmatrix} F_B \\ F_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_a \\ 0 \end{bmatrix} \{U_A\} + \begin{bmatrix} k_a + k_b & -k_b \\ k_b & -k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_B \\ U_C \end{Bmatrix}$$

Condição de contorno:

$$U_A = 0$$

Portanto:

$$\{F_A\} = [-k_a \quad 0] \begin{Bmatrix} U_B \\ U_C \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{Bmatrix} F_B \\ F_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_a + k_b & -k_b \\ k_b & -k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_B \\ U_C \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

A solução das equações 3.16 e 3.17 proporcionam os valores dos deslocamentos nodais (U_B e U_C) e força de reação (F_A).

A partir do cálculo dos deslocamentos nodais, temos o movimento relativo entre dois nós de cada elemento e, como consequência, a sua condição deformada. A força interna em cada elemento poderá ser contabilizada, pois conhecemos para o elemento de mola a Lei de Comportamento do Material, ou seja, a relação entre Força Interna e Deformação Interna ao Elemento, que é dada pela equação 3.18.

$$F = k.d \quad (3.18)$$

Onde:

F: Força interna;

k: Constante de mola;

d: Deformação da mola.

É importante observar que a força interna é calculada elemento por elemento separadamente, a partir dos deslocamentos conhecidos para o contorno do elemento. Ou seja, a força interna é calculada a partir do conhecimento dos deslocamentos nodais.

Este exemplo ilustra os passos fundamentais do método de elementos finitos aplicado aos elementos do tipo “Beam 3D elastic 04”, “Link 3D bilinear 10” e “Mass21 Structural Mass” que serão utilizados na análise estrutural das torres anemométrica e sustentação de turbinas eólicas pelo programa Ansys 5.4.

⇒ Elemento tipo Beam 3D elastic 04:

Viga é um elemento que pode transmitir além de forças axiais e momentos fletores, forças cortantes e momentos torsores, apresentando assim, seis graus de liberdade em cada nó, translação e rotação segundo o sistema cartesiano “x”, “y” e “z”, como mostra a figura 3.10.

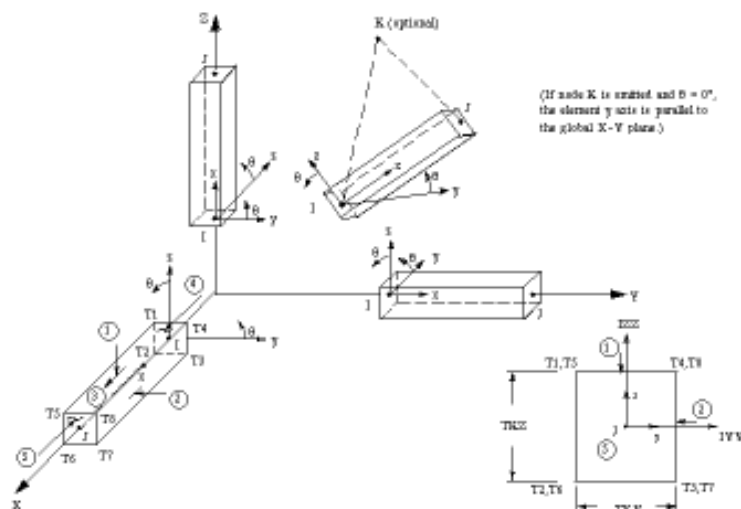


Figura 3.10 - Elemento tipo Beam 3D elastic 04, Ansys 5.4

Para se verificar a complexidade na determinação da matriz de rigidez das torres será obtida a matriz de rigidez do elemento viga para o caso mais geral, com 12 graus de liberdade, como mostra a figura 3.11.

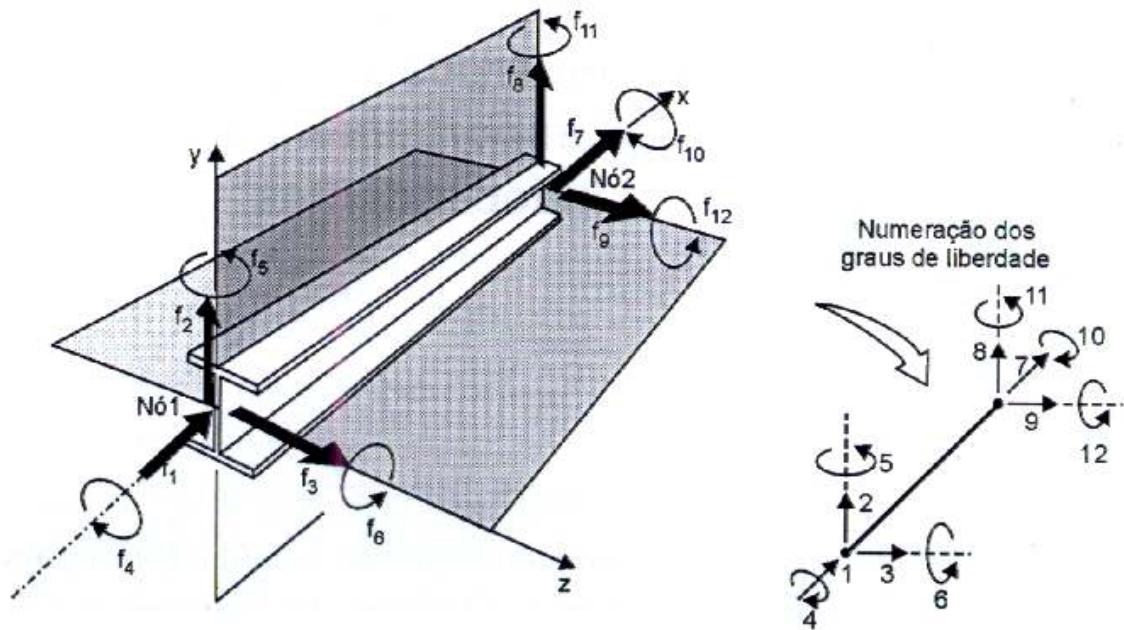


Figura 3.11 - Graus de liberdade do elemento viga
(Alves, 2000)

- Coeficiente de rigidez devido a forças axiais:

Quando o elemento é submetido a uma força axial surge no elemento tensão de tração ou compressão obtida pela equação 3.19.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.19)$$

Onde:

σ : Tensão de tração - compressão;

F: Força axial;

A: Área da secção transversal do elemento.

A deformação específica do elemento “ ϵ ” é definida como a relação da variação do comprimento pelo comprimento inicial do elemento, segundo a equação 3.20.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3.20)$$

Onde:

ε : Deformação específica do elemento;

δ : Variação do comprimento;

L: Comprimento inicial do elemento.

Usando a análise linear de tensão x deformação, o relacionamento é definido pela Lei de Hook através da equação 3.21.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.21)$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do elemento.

Combinado as equações 3.19, 3.20 e 3.21 e simplificando:

$$F = \left(\frac{A.E}{L} \right) . \delta$$

Note que a equação 3.4 é similar à equação linear de uma mola, com mostra a equação 3.22.

$$F = k.\delta \quad (3.22)$$

Onde:

k: Coeficiente de rigidez da mola.

Portanto a constante de rigidez do elemento quando submetido a uma força axial é obtido pela equação 3.23.

$$k_{\text{Força.Axial}} = \frac{A.E}{L} \quad (3.23)$$

- Coeficiente de rigidez devido a momentos fletores e forças cortantes:

Obtido através da resistência dos materiais, que considera as forças que surgem nas vigas quando se impõe um deslocamento “ δ ” qualquer, ou ângulo “ θ ” qualquer, dentro das hipóteses das pequenas deflexões, como mostram as figuras 3.12 e 3.13.

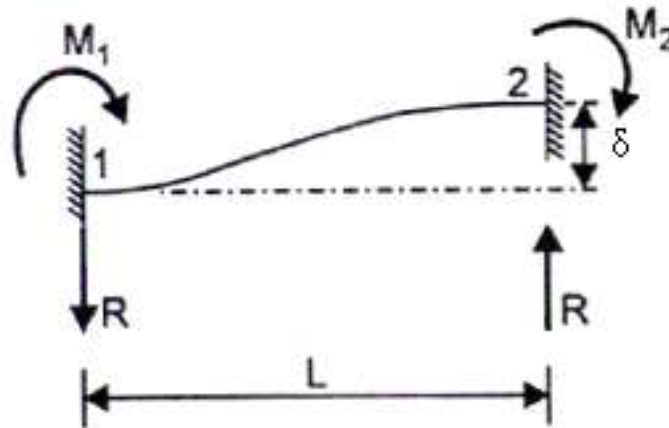


Figura 3.12 - Esforços no elemento viga devido ao deslocamento transversal (Alves, 2000)

$$M_1 = M_2 = \left(\frac{6.E.I}{L^2} \right) \delta \quad (3.24)$$

$$R = \left(\frac{12.E.I}{L^3} \right) \delta \quad (3.25)$$

Onde:

M: Momento fletor;

R: Força cortante.

Note que a equação 3.24 e 3.25 são similares à equação linear de uma mola, com mostra a equação 3.22, portanto os coeficiente de rigidez da barra quando submetida a momento fletor e força cortante devido a um deslocamento “ δ ” são obtidos pelas equações 3.26 e 3.27.

$$k_{\text{Momento.Fletor}} = \frac{6.E.I}{L^2} \quad (3.26)$$

$$k_{\text{Força.Cortante}} = \frac{12.E.I}{L^3} \quad (3.27)$$

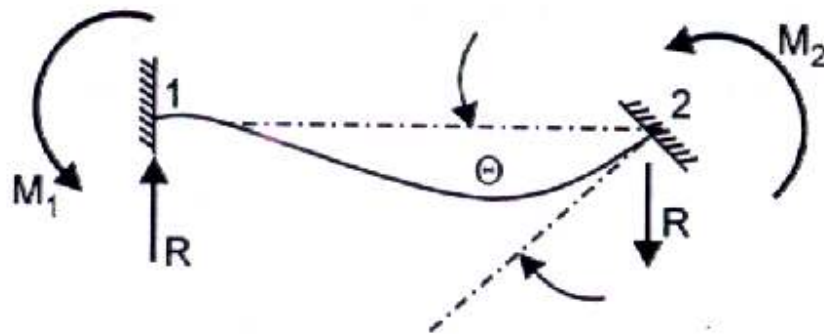


Figura 3.13 - Esforços no elemento viga devido ao giro angular (Alves, 2000)

$$M_1 = \left(\frac{2.E.I}{L} \right) . \theta \quad (3.28)$$

$$M_2 = \left(\frac{4.E.I}{L} \right) . \theta \quad (3.29)$$

$$R = \left(\frac{6.E.I}{L^2} \right) . \theta \quad (3.30)$$

Onde:

θ : ângulo de giro.

Note que a equação 3.28, 3.29 e 3.30 são similares à equação linear de uma mola, com mostra a equação 3.22, portanto os coeficiente de rigidez da barra quando submetida a momento fletor e força cortante devido a uma deslocamento angular “ θ ” são obtidos pelas equações 3.31, 3.32 e 3.33.

$$k_{\text{Momento.Fletor.01}} = \frac{2.E.I}{L} \quad (3.31)$$

$$k_{\text{Momento.Fletor.02}} = \frac{4.E.I}{L} \quad (3.32)$$

$$k_{\text{Força.Cortante}} = \frac{6.E.I}{L^2} \quad (3.33)$$

- Coeficiente de rigidez devido a momentos torsores:

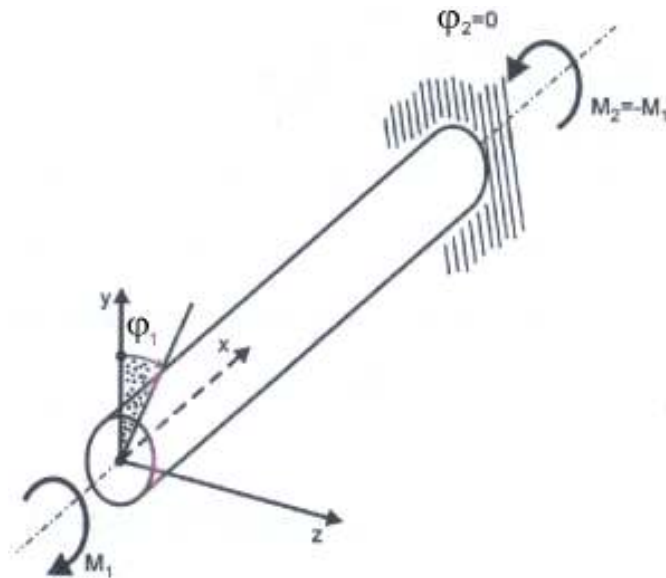


Figura 3.14 - Momento de torção no elemento viga
(Alves, 2000)

A barra em torção, como mostra a figura 3.14, trabalha como uma “mola torcional”, portanto o momento torçor é obtido pela equação 3.141.

$$T = \frac{G.J}{L} \cdot \varphi \quad (3.34)$$

Onde:

T: Torção;

G: Módulo de elasticidade transversal;

J: Momento de inércia a torção;

φ : Ângulo de torção;

L: Comprimento da viga.

Note que a equação 3.34 é similar à equação linear de uma mola, com mostra a equação 3.22, portanto o coeficiente de rigidez da barra quando submetida a momento de torção é obtida pela equação 3.35.

$$K_{\text{Momento.Torsor}} = \frac{G.J}{L} \quad (3.35)$$

A matriz de rigidez do elemento tipo viga representam relações de causa e efeito, a causa é um deslocamento unitário imposto em um grau de liberdade, e os efeitos são as forças que surgem nos graus de liberdade do elemento devido a esse deslocamento.

O coeficiente k_{ij} da matriz de um elemento finito representa a força no grau de liberdade “i” devido ao deslocamento unitário imposto ao grau de liberdade “j”, mantendo-se os outros graus de liberdade bloqueados.

Podemos então determinar os coeficientes da matriz de rigidez do elemento de viga, impondo deslocamentos unitários isoladamente nos diversos graus de liberdade, e “medindo” as forças que surgem nos graus de liberdade de elemento. Essa idéia é mostrada na figura 3.15.

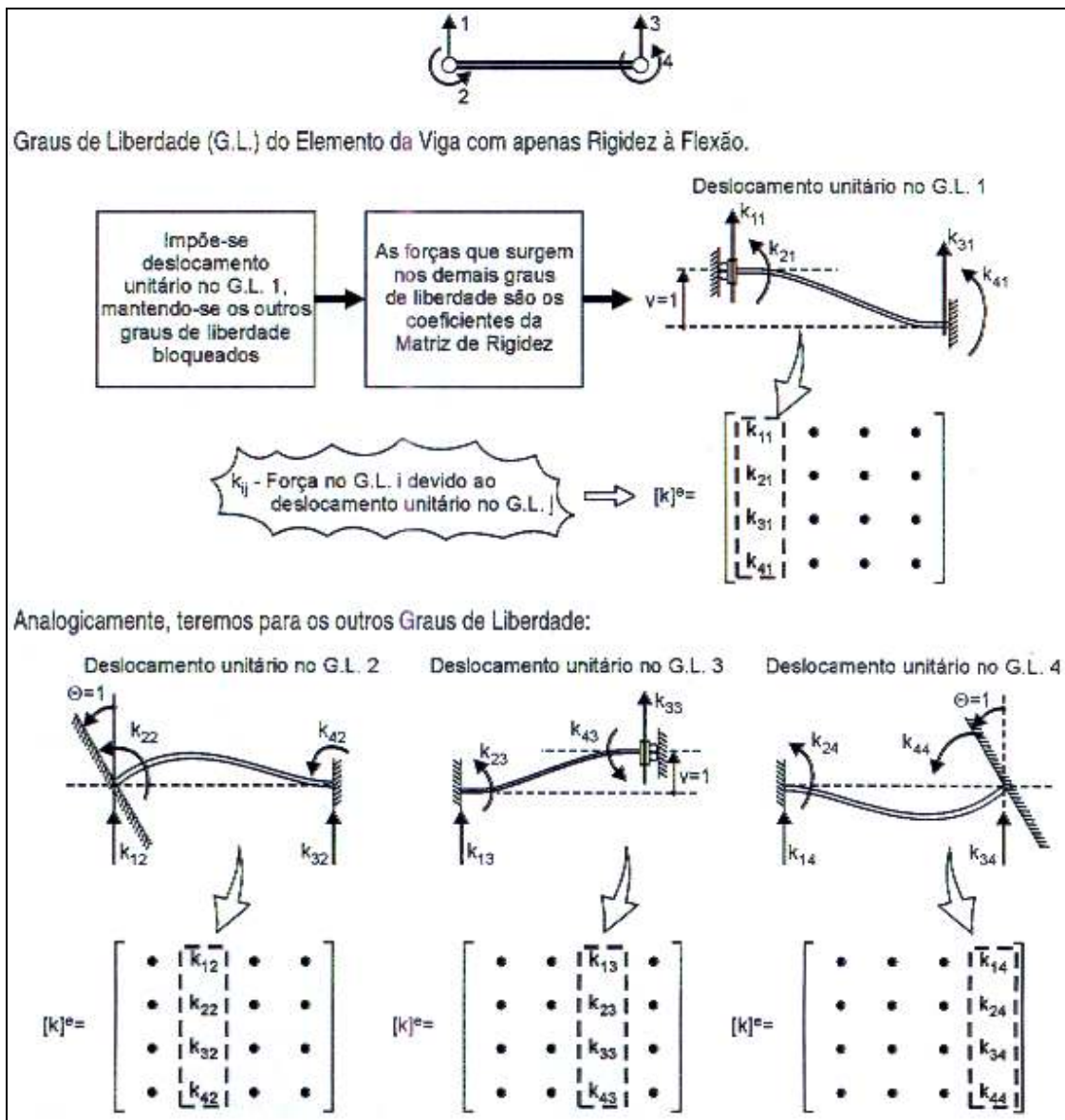


Figura 3.15 - Determinação da matriz de rigidez do elemento viga com 04 graus de liberdade (Alves, 2000)

Portanto, a matriz de rigidez do elemento viga, no caso mais geral, com 12 graus de liberdade:

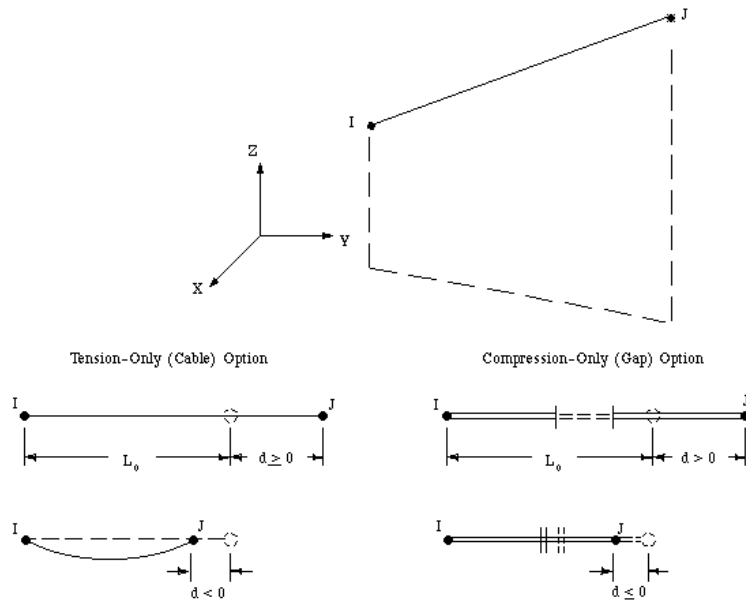


Figura 3.16 - Elemento tipo Link 3D bilinear 10, Ansys 5.4

A obtenção da matriz de rigidez do elemento tipo link segue o mesmo princípio utilizado para o elemento tipo barra.

⇒ Elemento tipo Mass21 Structural Mass:

É um elemento de ponto que tem até seis graus de liberdade: translações no nó nas direções “x”, “y”, e “z” e rotações sobre o nó segundo as direções “x”, “y” e “z”, como mostra a figura 3.17.

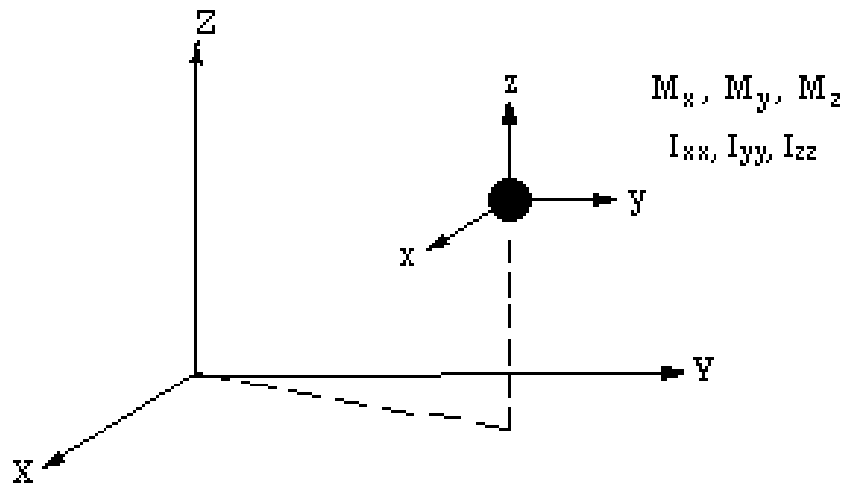


Figura 3.17 - Elemento tipo Mass21 Structural Mass,
Ansys 5.4

Podendo ser nomeados massas e momentos de inércias para cada direção das coordenadas.

A nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4 para representar as forças e momentos atuantes em cada nó são apresentados na tabela 3.1, como mostra a figura 3.18.

Tabela 3.1 - Nomenclatura das forças e momentos segundo Ansys 5.4

Pela mecânica geral	Pelo Ansys 5.4
Força na direção “x” – Fx	SMIS1
Força na direção “y” – Fy	SMIS2
Força na direção “z” – Fz	SMIS3
Momento com relação ao eixo “x” – Mx	SMIS4
Momento com relação ao eixo “y” – My	SMIS5
Momento com relação ao eixo “z” – Mz	SMIS6

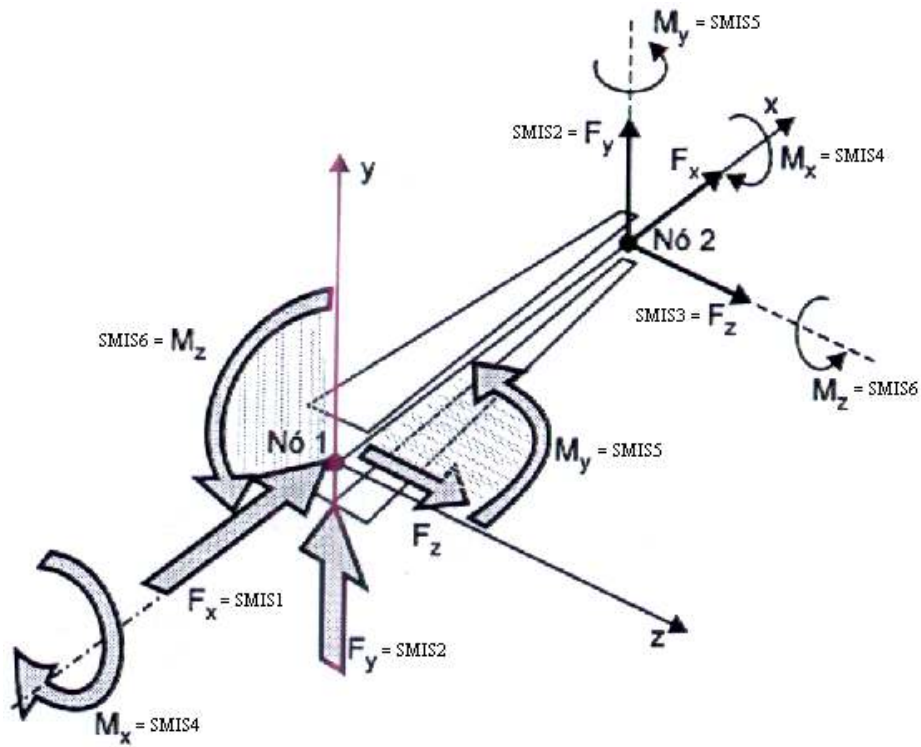


Figura 3.18 - Nomenclatura das forças e momentos segundo Ansys 5.4

3.3. TORRE ANEMOMÉTRICA

Elemento estrutural constituído por módulos reticulados fixados através de ligações aparafusadas composta por barras de secção circular ($\varnothing 7\text{mm}$) e cantoneiras de abas iguais ($25 \times 25 \times 4\text{mm}$ e $20 \times 20 \times 3\text{mm}$) soldadas entre si, como mostra a figura 3.19.

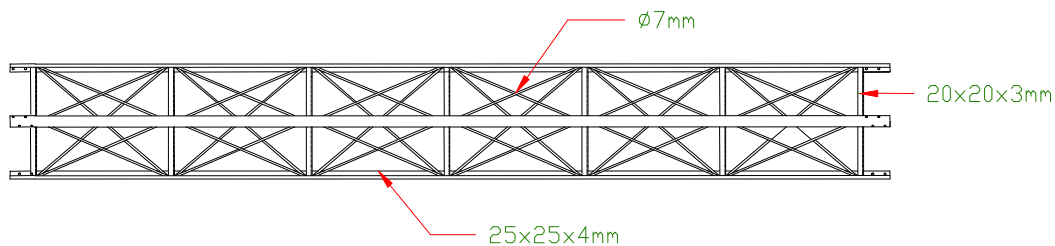


Figura 3.19 – Módulos da torre anemométrica

A torre utilizada é constituída de quatro módulos obtendo uma altura de 12 m sustentados através de cabos fixados a torre e hastes ancoras distantes 120° um do outro.

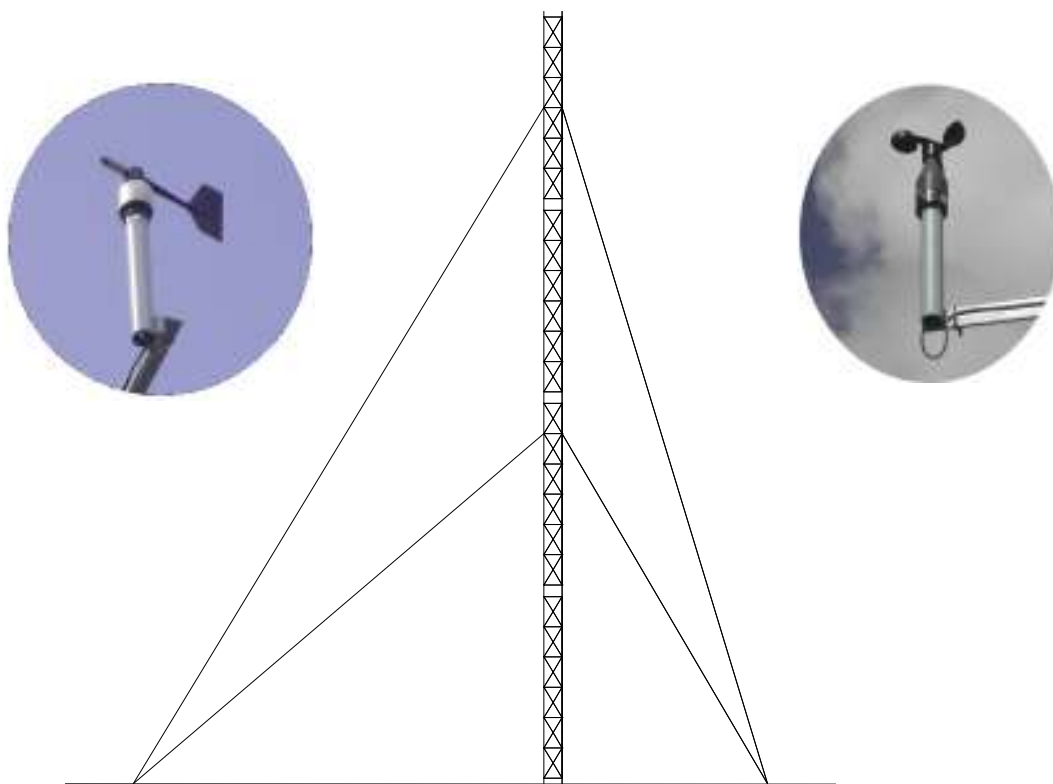


Figura 3.20 – Torre anemométrica e instrumentos de medição

A torre anemométrica, como mostra a figura 3.20, tem como finalidade sustentar o anemômetro e o medidor de direção do vento para registrar e armazenar a direção e velocidade do vento, onde a torre é instalada, neste caso a cidade de Rio Grande no estado do Rio Grande do Sul, utilizado para determinar o potencial eólico da região e o projeto que deverá ser executado para se obter o melhor aproveitamento da energia cinética contido nas massas de vento.

As forças externas atuantes sobre a estrutura da torre:

- ⇒ Força devido ao peso próprio da estrutura;
- ⇒ Força devida ação do vento sobre a estrutura;
- ⇒ Força devido ao pré-tensionamento dos cabos.

➤ Força devido ao peso próprio da estrutura

Segue na tabela 3.2 a descrição do material de aço 1020 utilizado para construção da torre anemométrica, exceto peso de solda, parafusos e suporte para fixação dos cabos utilizados, que terão seus pesos compensados através do coeficiente de ponderação, desenho construtivo encontra-se no anexo (A).

Tabela 3.2 - Perfis utilizados na torre anemométrica

Descrição	Dimensões	Comprimento [m]	Quantidade	Peso un. [Kg/m]	Peso [Kg]
Cantoneiras longitudinais	25x25x4mm	03	12	1,45	52,2
Cantoneiras transversais	20x20x3mm	0,35	84	0,88	25,9
Barras circulares na diagonal	7mm (1/4")	0,586	144	0,3	25,32

Utilizando um coeficiente de ponderação para ações normais permanentes, o peso total da estrutura a ser considerado é obtido pela equação 3.36.

$$FP_{Torre} = 1,4.(Massa\ total).g \quad (3.36)$$

$$FP_{Torre} = 1419,04N$$

Onde:

FP_{Torre} : Força peso da torre;

g : Aceleração da gravidade, $9,8m/s^2$.

➤ Força devida ação do vento sobre a estrutura

A componente da força global na direção do vento, força de arraste, é obtida pela equação 3.37.

$$Fa_{Torre} = Ca_{Torre} \cdot q_{Vento} \cdot Ae_{Torre} \quad (3.37)$$

Onde:

Fa_{Torre} : Força de arraste da torre;

Ca_{Torre} : Coeficiente de arrasto da torre;

Ae_{Torre} : Área frontal efetiva da torre;

q_{Vento} : Pressão dinâmica do vento.

⇒ Determinação da área efetiva da torre anemométrica

Área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento, “área da sombra”, obtida pela equação 3.38.

$$Ae_{Torre} = \sum A_{Frontal.Elementos.Torre} \quad (3.38)$$

Onde:

$A_{Frontal.Elementos.Torre}$: Área frontal dos elementos constituintes da torre perpendicular à direção do vento.

$$Ae_{Torre} = 2.(25mm.12000mm) + 48.(7mm.586mm) + 28.(20mm.350mm)$$

$$Ae_{Torre} = 992896mm^2$$

⇒ Determinação do coeficiente de arrasto da torre anemométrica ($C_{a\text{Torre}}$)

Para torres reticuladas constituídas por barras prismáticas de faces planas, com cantos vivos ou levemente arredondados, os valores do coeficiente de arrasto “Ca” para vento incidindo perpendicularmente a uma das faces, são obtidas por interpolação no gráfico da figura 3.21.

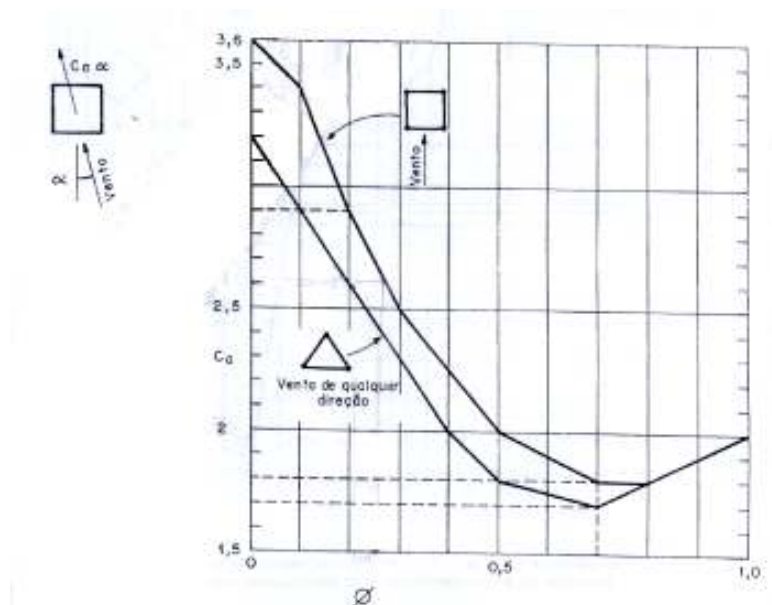


Figura 3.21 - Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados

Onde:

ϕ_{Torre} : Índice de área exposta é a razão entre a área frontal efetiva de um reticulado e a área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado, segundo a equação 3.39.

$$\phi_{\text{Torre}} = \frac{A_{e\text{Torre}}}{A_{\text{Contorno.Torre}}} \quad (3.39)$$

Onde:

$A_{\text{Contorno.Torre}}$: Área contorno da torre, obtida pela equação 3.40.

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = \text{base.altura} \quad (3.40)$$

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = 350\text{mm}.12000\text{mm}$$

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = 4200000\text{mm}^2$$

Utilizando a equação 3.39 para o cálculo do índice da área exposta da torre anemométrica.

$$\phi_{\text{Torre}} = \frac{A_{e_{\text{Torre}}}}{A_{\text{Cheia.Torre}}}$$

$$\phi_{\text{Torre}} = \frac{894448\text{mm}^2}{4200000\text{mm}^2}$$

$$\phi_{\text{Torre}} = 0,24$$

Utilizando o valor calculado do índice da área exposta da torre na figura 3.3, obtemos o coeficiente de arrasto para torre reticulada de seção triangular equilátera, formada por barra prismática de cantos vivos ou levemente arredondada, portanto.

$$Ca_{\text{Torre}} = 2,5$$

⇒ Determinação da pressão aerodinâmica do vento (q_{Vento})

O valor de pressão aerodinâmica do vento é definido pela equação 3.41.

$$q_{\text{Vento}} = 0,613.V_k^2 \quad (3.41)$$

Onde:

V_k : Velocidade característica do vento local, obtida pela equação 3.42.

$$V_k = S_1.S_2.S_3.V_o \quad (3.42)$$

Onde:

S_1 : Fator topográfico, leva em consideração as variações do relevo do terreno que são determinadas em função das seguintes situações:

a: Terreno plano ou fracamente acidentado;

b: Taludes e morros;

c: Vales profundos protegidos de ventos de qualquer direção.

Portanto:

$$S_1 = 1,0$$

S_2 : Fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da torre.

- Rugosidade do terreno: para este critério a torre anemométrica enquadra-se na categoria IV, onde a cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.
- Dimensões da torre: a torre anemométrica enquadra-se na classe A, onde todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m.
- Altura do terreno: O fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura “z” acima do nível geral do terreno.

Tabela 3.3 - Fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04

140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,33	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Através de interpolação dos valores fornecidos em 10 e 15m na tabela 3.2, obtemos.

$$S_2 = 0,879023$$

S_3 : Fator estatístico é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura. Segundo a definição, a velocidade básica é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência médio de 50 anos.

A probabilidade de que a velocidade “ V_o ” seja igualada ou excedida neste período é de 63%.

Tabela 3.4 - Fator S_3

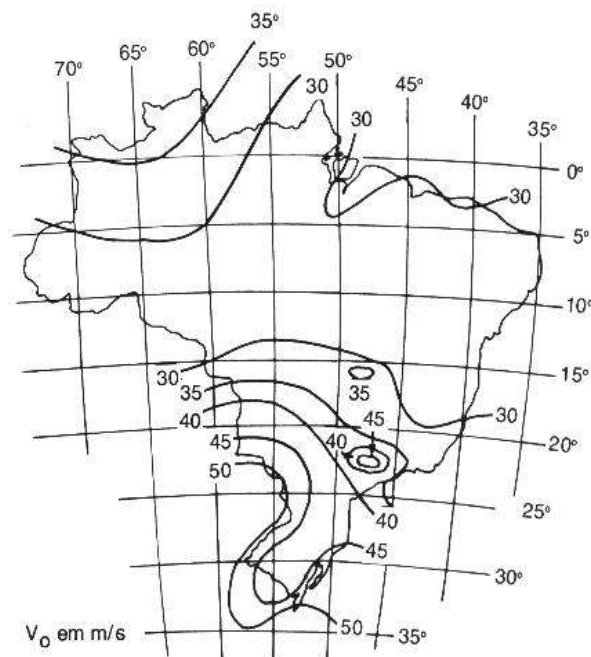
Grupo	Descrição	S_3
01	Edificação cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
02	Edificação para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
03	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95

04	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
05	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 01 a 03 durante a construção.	0,83

O caso em estudo se enquadra no grupo 03 como edificação e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.), conforme a tabela 3.3:

$$S_3 = 0,95$$

V_o : Velocidade básica do vento local é determinada pelo gráfico da figura 3.22.



Isopletas das rajadas de três segundos – NBR-6123

Figura 3.22 - Isopletas da velocidade básica V_o (m/s)

Utilizando a equação 3.42.

$$V_k = 1,0,879 \cdot 0,95 \cdot 50 \text{ m/s}$$

$$V_k = 41,7525 \text{ m/s}$$

A pressão aerodinâmica do vento (q_{Vento}) local é obtida pela equação 3.41.

$$q_{\text{Vento}} = 0,613 \cdot (41,7525 \text{ m/s})^2$$

$$q_{\text{Vento}} = 1068,625 \text{ N/m}^2$$

O valor obtido para a pressão aerodinâmica do vento é utilizado para a determinação da força de arraste atuantes na torre anemométrica e de sustentação da turbina eólica, uma vez que, este depende exclusivamente de características topográficas e estatísticas da ocorrência dos ventos na região onde a turbina eólica será instalada.

A força de arraste da torre anemométrica é obtida pela equação 3.37.

$$F_{a_{\text{Torre}}} = (2,5 \cdot 1068,625 \text{ N/m}^2 \cdot 992896 \text{ mm}^2) \frac{\text{m}^2}{1000000 \text{ mm}^2}$$

$$F_{a_{\text{Torre}}} = 2652,6 \text{ N}$$

➤ Força devido ao pré-tensionamento dos cabos

Utilizando cabos com alma de aço, classificação 07 fios e dois níveis de fixação da torre nos pontos "B" e "C", com três cabos por nível espaçadas de 120°, admitindo-se uma flecha máxima em cada vão igual a 10mm, como mostra a figura 3.23 (Pissarenko, 1975).

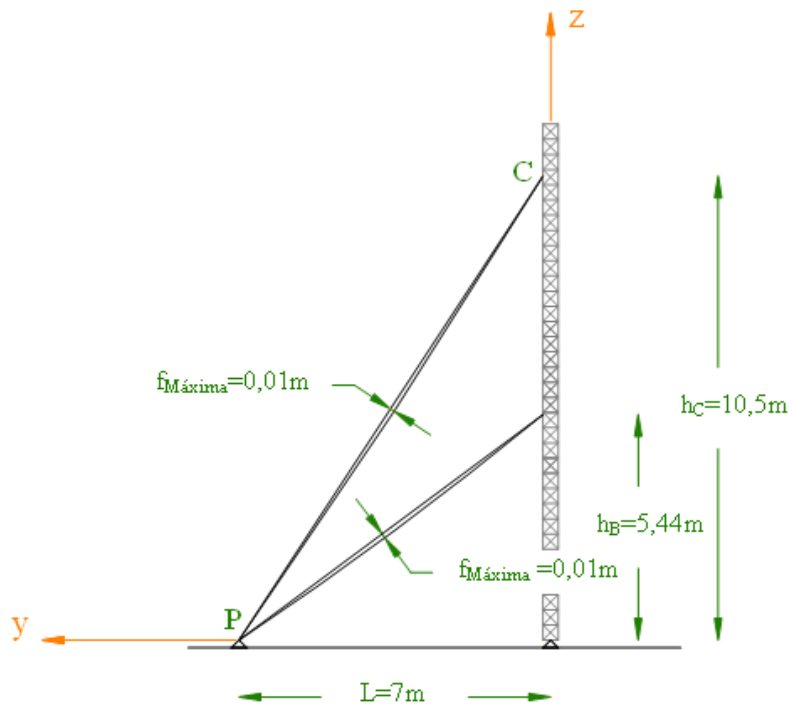


Figura 3.23 - Condições de contorno dos cabos “BP” e “CP”

⇒ Força de pré-tencionamento no cabo “BP”

A coordenada da flecha máxima do cabo “BP” na direção “y” é obtida pela equação 3.43.

$$y_B = \frac{L}{2} \quad (3.43)$$

Onde:

y_B : Coordenada da flecha máxima do cabo “BP” na direção “y”;

L: Distância entre o ponto de fixação das hastes ancora e a torre anemométrica.

A coordenada da flecha máxima do cabo “BP” na direção “z” é obtida pela equação 3.44.

$$z_B = \frac{h_B}{2} - f_{Máxima} \quad (3.44)$$

Onde:

z_B : Coordenada da fecho máxima do cabo “BP” na direção “z”;

$f_{Máxima}$: Flecha máxima.

$$z_B = \frac{5,44m}{2} - 0,01m$$
$$z_B = 2,73m$$

A componente horizontal da força de pré-tencionamento do cabo “BP” é obtido pela equação 3.45.

$$z_B = \left(\frac{q_{Cabo} \times L}{2 \times H_B} + \frac{h_B}{L} \right) \times y_B - \frac{q_{Cabo} \times y_B^2}{2 \times H_B} \quad (3.45)$$

Onde:

H_B : Componente horizontal da força de pré-tencionamento do cabo “BP”.

q_{Cabo} : Carga peso por unidade de comprimento do cabo, 1,8N/m.

$$2,73m = \left(\frac{1,8N/m \times 7m}{2 \times H_B} + \frac{5,44mm}{7m} \right) \times 3,5m - \frac{1,8N/m \times (3,5m)^2}{2 \times H_B}$$
$$H_B = 1102,5N$$

Força de pré-tensionamento é obtida pela equação 3.46.

$$F_{Máximo.Cabo.BP} = \sqrt{H_B^2 + \left(\frac{q_{Cabo} \times L}{2} + \frac{H_B \times h_B}{L} \right)^2} \quad (3.46)$$

Onde:

$F_{Máxima.Cabo.BP}$: Força máxima de pré-tensionamento no cabo “BP”.

$$F_{Máximo.Cabo.BP} = \sqrt{(1102,5N)^2 + \left(\frac{1,8N/m \times 7m}{2} + \frac{1102,5N \times 5,44m}{7m} \right)^2}$$
$$F_{Máximo.Cabo.BP} = 1400,16N$$

⇒ Força de pré-tencionamento no cabo CP

Aplicando as expressões de (3.43) a (3.46) para o cabo “CP”, a coordenada da flecha máxima do cabo “CP” na direção “y” é obtida pela equação 3.43.

$$y_c = \frac{L}{2}$$

Onde:

y_c : Coordenada da flecha máxima do cabo “CP” na direção “z”.

A coordenada da flecha máxima do cabo “CP” na direção “z” é obtida pela equação 3.44.

$$z_c = \frac{h_c}{2} - f_{\text{Máxima}}$$

Onde:

z_c : Coordenada da flecha máxima do cabo “CP” na direção “y”.

$f_{\text{Máxima}}$: Flecha máxima.

$$z_c = \frac{10,5\text{m}}{2} - 0,01\text{m}$$

$$z_c = 5,26\text{m}$$

A componente horizontal da força de pré-tencionamento do cabo “CP” é obtido pela equação 3.45.

$$z_c = \left(\frac{q_{\text{Cabo}} \times L}{2 \times H_c} + \frac{h_c}{L} \right) \times y_c - \frac{q_{\text{Cabo}} \times y_c^2}{2 \times H_c}$$

Onde:

H_c : Componente horizontal da força de pré-tencionamento do cabo “CP”.

q_{Cabo} : Carga peso por unidade de comprimento do cabo, 1,8N/m.

$$5,26\text{m} = \left(\frac{1,8\text{N/m} \times 7\text{m}}{2 \times H_c} + \frac{10,5\text{mm}}{7\text{m}} \right) \times 3,5\text{m} - \frac{1,8\text{N/m} \times (3,5\text{m})^2}{2 \times H_c}$$

$$H_C = 1102,5\text{N}$$

Força de pré-tensionamento é obtida pela equação 3.46.

$$F_{\text{Máximo.Cabo.CP}} = \sqrt{H_C^2 + \left(\frac{q_{\text{Cabo}} \times L}{2} + \frac{H_C \times h_C}{L} \right)^2}$$

Onde:

$F_{\text{Máximo.Cabo.CP}}$: Força máxima de pré-tensionamento no cabo “CP”.

$$F_{\text{Máximo.Cabo.CP}} = \sqrt{(1102,5\text{N})^2 + \left(\frac{1,8\text{N/m} \times 7\text{m}}{2} + \frac{1102,5\text{N} \times 10,5\text{m}}{7\text{m}} \right)^2}$$

$$F_{\text{Máximo.Cabo.CP}} = 1992,81\text{N}$$

3.3.1 Análise estrutural da torre anemométrica

O coeficiente de segurança baseando-se nos critérios de falha por fadiga, flambagem e deformação elástica dos elementos constituintes da torre, uma vez que, existem forças necessárias para manter unidas todas as partes da torre conhecidas como *Forças Internas*.

Para a determinação destas forças será utilizado o programa Ansys 5.4 que se baseia no *Método de Elementos Finitos* (Alves, 2000).

➤ Determinação das forças, momentos e deslocamentos internos na torre anemométrica

As *Forças* e os *Deslocamentos Internos* nos elementos que constituem a torre anemométrica serão obtidos em função das seguintes situações a qual a torre é submetida:

⇒ Torre submetida somente ao pré-tensionamento dos cabos (sem vento);

⇒ Torre submetida ao pré-tensionamento dos cabos e força devido à ação do vento com mesmo sentido do eixo “y”;

⇒ Torre submetida ao pré-tensionamento dos cabos e força devido à ação do vento com sentido contrário ao eixo “y”.

Os passos necessários para obtenção das forças internas e modelagem da torre anemométrica encontram-se no anexo “B”.

Considera-se a força de arraste da torre sendo aplicada nos nós situados sobre os elementos que representam as cantoneiras longitudinais, dadas por:

$$F_{a_{\text{Torre}}} = 2652,6\text{N}$$

No momento que se faz a instalação da torre anemométrica os cabos de fixação são submetidos a uma força de pré-tensionamento, no programa Ansys 5.4 esta força é considerada na forma de deformação específica que esta força causa nos cabos obtida através da equação 3.47 (Beer, 1982).

$$\varepsilon_i = \frac{F_{\text{Pré-tensionamento}}}{A_{\text{Cabo}} \cdot E_{\text{Cabo}}} \quad (3.47)$$

Onde:

ε : Deformação específica;

$F_{\text{Pré-tensionamento}}$: Força de pré-tensionamento;

A_{Cabo} : Área da secção transversal do cabo;

E_{Cabo} : Módulo de elasticidade do cabo.

Deformação específica nos cabos “BP”, utilizando a equação 3.47:

$$\varepsilon_{\text{BP}} = \frac{1400,16\text{N}}{22,64 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot 142,1 \cdot 10^9 \text{N/m}^2}$$
$$\varepsilon_{\text{BP}} = 4,352 \cdot 10^{-4}$$

Deformação específica nos cabos “CP”, utilizando a equação 3.47:

$$\varepsilon_{\text{CP}} = \frac{1992,81\text{N}}{22,64 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot 142,1 \cdot 10^9 \text{N/m}^2}$$
$$\varepsilon_{\text{CP}} = 6,194 \cdot 10^{-4}$$

Considerando a geometria da torre e as características geométricas e mecânicas dos elementos que a compõem, assim como as condições de contorno, determina-se das forças internas atuantes na torre.

Este processo é descrito passo a passo no anexo (B) e os resultados encontram-se no anexo (C).

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

Os resultados obtidos de deformação dos elementos constituintes da torre anemométrica encontram-se no anexo C para cada uma das situações de trabalho consideradas.

⇒ Torre submetida somente ao pré-tensionamento dos cabos (sem vento)

A figura 3.24 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre anemométrica.

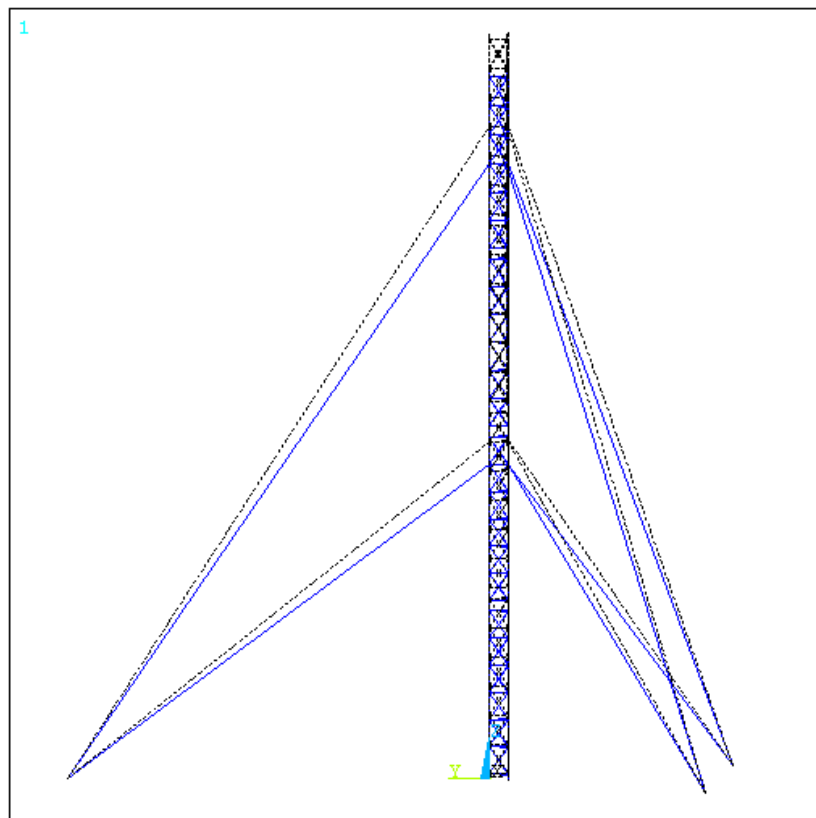


Figura 3.24 - Deslocamento pré-tensionada

O elemento 142, cantoneira 20x20x3mm com 350mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,47463E-03mm.

Aplicando a equação 3.48 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando submetida somente ao esforço de pré-tensionamento dos cabos.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta} \quad (3.48)$$
$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 350 \text{ mm}}{207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,00048 \text{ mm}}$$
$$N_{\text{Deformação}} = 740$$

⇒ Torre submetida ao pré-tensionamento dos cabos e força devido à ação do vento com mesmo sentido do eixo “y”.

A figura 3.25 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre anemométrica.

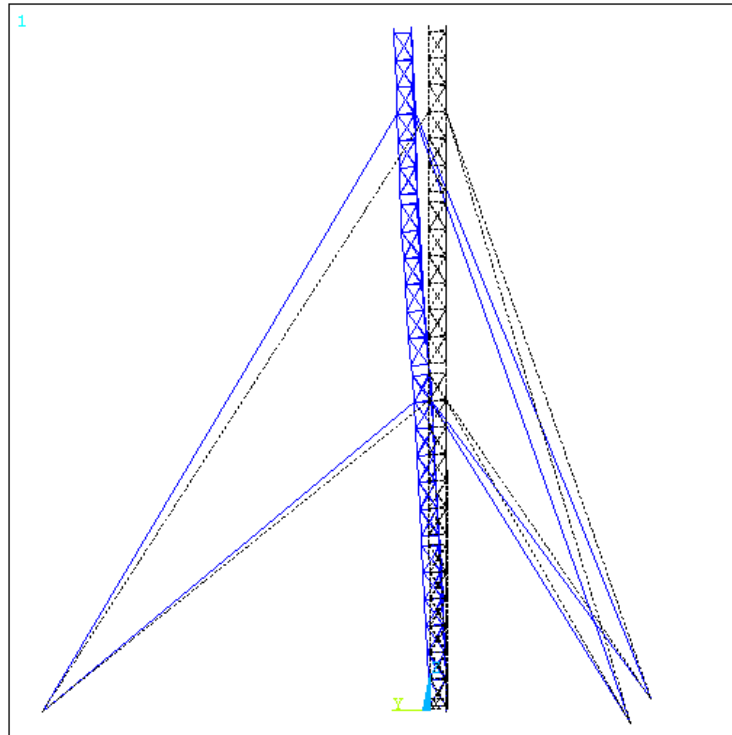


Figura 3.25 - Deslocamento vento favor

O elemento 161, cantoneira 20x20x3mm com 350mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,73844E-02 mm.

Aplicando a equação 3.48 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando submetida somente ao esforço de pré-tensionamento dos cabos.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta}$$

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 350 \text{ mm}}{207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,0074 \text{ mm}}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 48$$

⇒ Torre submetida ao pré-tensionamento dos cabos e força devido à ação do vento com sentido contrário ao eixo “y”.

A figura 3.26 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre anemométrica.

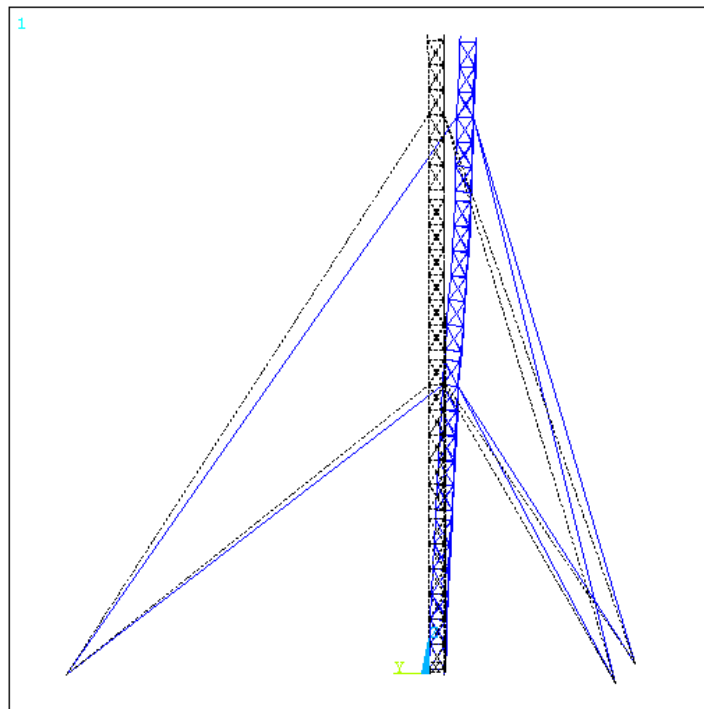


Figura 3.26 - Deslocamento vento contra

O elemento 162, cantoneira 20x20x3mm com 350mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,73844E-02mm.

Aplicando a equação 3.48 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando submetida somente ao esforço de pré-tensionamento dos cabos.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta}$$
$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210\text{N/mm}^2 \cdot 350\text{mm}}{207 \cdot 10^3 \text{N/mm}^2 \cdot 0,0074\text{mm}}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 48$$

Portanto, em função do critério de falha estrutural por deformação elástica, conclui-se que a torre anemométrica apresenta um coeficiente de segurança mínimo de 48. Sendo assim depois de cessado o efeito da ação do vento a torre retorna ao seu estado inicial apresentando um coeficiente de segurança mínimo de 740 devido à ação do pré-tensionamento dos cabos.

➤ Critério de falha estrutural devido à fadiga

Os coeficientes de segurança dos elementos são obtidos através da determinação das tensões atuantes na secção transversal de cada elemento, aplicando-se o critério de falha por fadiga segundo a teoria de Von Mises-Goodman para cada ponto específico pertencente à secção.

Em função das forças e momentos que surgem segundo os eixos principais locais e a geometria dos elementos estruturais (barras de secção circular, cantoneiras de abas iguais e cabos de aço), determinamos as tensões atuantes.

⇒ Critério de falha por fadiga para os cabos

Os cabos de aço “CP” e “BP” encontram-se submetidos apenas a esforço de tração obtida através da equação 3.49:

$$\sigma_{\text{Tração}} = \frac{F}{A_{\text{Elemento}}} = \frac{\text{SMIS1}}{A_{\text{Elemento}}} \quad (3.49)$$

Onde:

F: Força axial;

SMIS1: Equivalente a força “F” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

A_{Elemento} : Área da secção transversal do elemento.

A tabela (D.1) no anexo (D), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, assim como as forças máxima e mínima que cada elemento é submetido.

Aplicando-se a equação 3.49 determinam-se às tensões máximas, mínimas e posteriormente às tensões média e alternada apresentada na tabela (D.2) no anexo (D).

A tabela (D.3) no anexo (D) apresenta as tensões média e alternada idéias, assim como o coeficiente de segurança de cada cabo constituinte da torre anemométrica obtido através da teoria de falha por fadiga.

Os cabos com relação ao critério de falha por fadiga apresentam um coeficiente de segurança mínimo de 2,27, portanto a torre não apresenta falha estrutural nos cabos devido ao regime de trabalho a qual é submetida.

⇒ Critério de falha por fadiga para as barras de aço redondas

O coeficiente de segurança para as barras de secção circular será obtido em função dos três pontos de análise como mostra a figura 3.27.

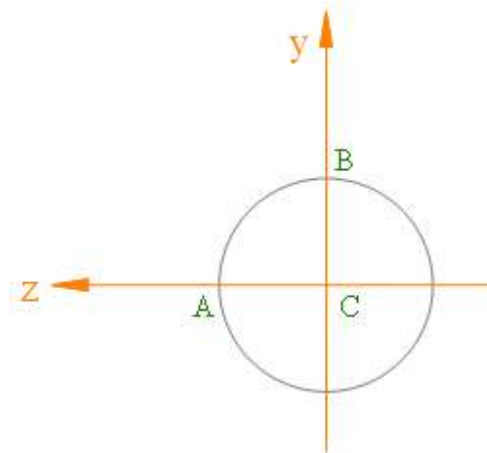


Figura 3.27 - Pontos analisados na secção transversal das barras redondas

As barras apresentam-se submetida aos esforços de tração - compressão e cisalhamento.

- Tensão de tração - compressão

A tensão de tração - compressão em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”.

A tensão axial em cada elemento devido à força axial “SMIS1” é obtida pela equação 3.50:

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm F}{A_{\text{Elemento}}} = \frac{\pm \text{SMIS1}}{A_{\text{Elemento}}} \quad (3.50)$$

Onde:

F: Força axial de tração ou compressão;

SMIS1: Equivalente a força “F” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

A_{Elemento} : Área da secção transversal do elemento.

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de sollicitação cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Tensão devido à força SMIS1 nos pontos de análise

Ponto	Força-SMIS1	
	(+)	(-)
A	Tração	Compressão
B	Tração	Compressão
C	Tração	Compressão

A tabela (E.1) no anexo (E), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças máximas e mínimas que cada elemento é submetido. As tensões máximas e mínimas são obtidas através da equação 3.50.

A tensão axial em cada elemento devido ao momento fletor “SMIS5” e “SMIS6”:

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm M.c}{I_{\text{Elemento}}} \quad (3.51)$$

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm \text{SMIS5}.c}{I_{\text{Elemento}}}$$

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm \text{SMIS6}.c}{I_{\text{Elemento}}}$$

Onde:

M: Momento fletor;

SMIS5 e SMIS6: Equivalentes aos momentos fletores “M” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

c: Distância entre a linha neutra da secção transversal ao ponto submetido à tensão devido ao momento fletor, apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Coordenada dos pontos da secção transversal da barra redonda

Ponto	Distância do ponto com relação à linha neutra-c [mm]	
	Eixo-y	Eixo-z
A	3,5	0
B	0	3,5
C	0	0

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de sollicitação que cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Tensão devido aos momentos fletores SMIS5 e SMIS6 nos pontos de análise da barra de secção circular.

Ponto	Momento fletor-SMIS5		Momento fletor-SMIS6	
	(+)	(-)	(+)	(-)

A	Tração	Compressão	0	0
B	0	0	Compressão	Tração
C	0	0	0	0

A tabela (E.2) no anexo (E), apresenta os resultados obtidos em cada simulação os momentos fletores máximos e mínimos segundo cada direção e sentido para que se possa determinar os valores de tensões máximas e mínimas em cada ponto da secção transversal da barra circular através da equação (3.51).

A tabela (E.3) no anexo (E) apresenta a soma vetorial das tensões para cada ponto da secção transversal de cada elemento devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”, assim como, as tensões médias e alternadas.

- Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” e ao momento de torção “SMIS4”.

A tensão de cisalhamento em cada elemento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” é obtida pela seguinte equação:

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{4.V}{3.A_{\text{Elemento}}} \quad (3.52)$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{4.SMIS2}{3.A_{\text{Elemento}}}$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{4.SMIS3}{3.A_{\text{Elemento}}}$$

Onde:

V: Força cortante;

SMIS2 e SMIS3: Equivalentes às forças cortantes “V” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

A_{Elemento} : Área do elemento.

A tensão de cisalhamento independe de sinal, mas devido ao fato de que a tensão de cisalhamento resultante em cada ponto da secção transversal é obtida pela superposição de efeito, é necessária uma análise para determinar o sentido da tensão, como mostra a tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Tensão devido às forças cortantes SMIS2 e SMIS3 nos pontos de análise para barra de secção circular

Ponto	Força cortante-SMIS2		Força cortante-SMIS3	
	(+)	(-)	(+)	(-)
A	τ .Cisalhamento	τ .Cisalhamento	0	0
B	0	0	τ .Cisalhamento	τ .Cisalhamento
C	τ .Cisalhamento	τ .Cisalhamento	τ .Cisalhamento	τ .Cisalhamento

A tabela (E.4) no anexo (E), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças cortantes máximas e mínimas em função do sentido, a qual cada elemento é submetido.

Com base nos resultados, aplica-se para cada ponto pertencente à secção transversal da barra circular a equação 3.52 e o respectivo sinal que indica o sentido da tensão em cada ponto, que auxilia no momento da superposição de efeitos.

A tensão de cisalhamento em cada elemento devido ao momento de torção “SMIS4” é obtida através da equação 3.53.

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{T.c}{J_{\text{Elemento}}} \quad (3.53)$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{\text{SMIS4.c}}{J_{\text{Elemento}}}$$

Onde:

T: Momento de torção;

SMIS4: Equivalente ao momento de torção “T” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

J_{Elemento} : Momento de inércia polar do elemento.

c: Distância do baricentro da secção transversal a ponto de análise, apresentadas na tabela 3.9 para cada ponto da secção.

Tabela 3.9 - Distância dos pontos em análise com relação à linha neutra para as barras de secção circular

Ponto	Distância do ponto de análise e a linha neutra-c [mm]
A	3,5
B	3,5
C	0

O sentido da tensão de cisalhamento devido ao momento de torção “SMIS4”, como mostra a tabela 3.10:

Tabela 3.10 - Tensão devido ao momento de torção SMIS4 nos pontos de análise para as barras de secção circular

Ponto	Momento de torção-SMIS4			
	(+)		(-)	
	Eixo “y”	Eixo “z”	Eixo “y”	Eixo “z”
A	(-)	0	(+)	0
B	0	(+)	0	(-)
C	0	0	0	0

A tabela (E.5) no anexo (E), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, os momentos torsores máximos e mínimos para cada sentido segundo o eixo “x” local do elemento, assim como, as tensões cisalhantes máximas e mínimas para cada sentido obtidas utilizando a equação 3.53.

A tabela (E.6) no anexo (E) apresenta a soma vetorial das tensões para os pontos “A” e “B” da secção transversal de cada elemento devido às forças cortantes “SMIS2” e

“SMIS3” e ao momento de torção “SMIS4”, o ponto “C” não necessita este tipo de análise, uma vez que, a tensão de cisalhamento devido ao momento de torção ser nulo neste ponto.

As tensões cisalhantes resultantes máximas e mínimas obtidas para cada ponto da secção, assim como, as tensões médias e alternadas são apresentadas na tabela (E.7) no anexo (E).

O coeficiente de segurança para cada ponto das barras circulares constituintes da torre anemométrica segundo a teoria de falha por fadiga são apresentados na tabela (E.8) no anexo (E).

As barras de secção circular com relação ao critério de falha por fadiga apresentam um coeficiente de segurança mínimo de 10,04, portanto a torre não apresenta falha estrutural nas barras devido ao regime de trabalho a qual é submetida.

⇒ Critério de falha por fadiga para as cantoneiras de abas iguais

O coeficiente de segurança para as cantoneiras de abas iguais serão obtidas em função dos três pontos de análise como mostra a figura 3.28.

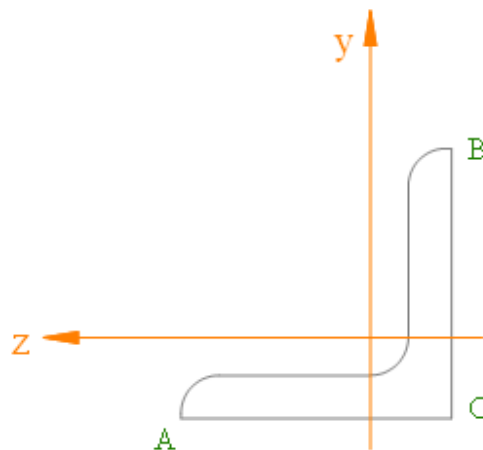


Figura 3.28 - Pontos analisados na secção transversal das cantoneiras de abas iguais

As cantoneiras apresentam-se submetida aos esforços de tração - compressão e cisalhamento.

- Tensão de tração - compressão

A tensão de tração - compressão em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”.

A tensão axial em cada elemento devido à força “SMIS1” é obtida pela equação 3.54:

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm F}{A_{\text{Elemento}}} = \frac{\pm \text{SMIS1}}{A_{\text{Elemento}}} \quad (3.54)$$

Onde:

F: Força axial de tração ou compressão;

SMIS1: Equivalente a força “F” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

A_{Elemento} : Área da secção transversal do elemento.

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de sollicitação cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.6.

A tabela (F.1) no anexo (F), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças máximas e mínimas que cada elemento é submetido.

Os resultados obtidos na simulação em que a torre apresenta o vento com o mesmo sentido do eixo “y” para as barras de secção redonda é mostrado na figura 3.1.

As tensões máximas e mínimas são obtidas aplicando a equação (3.54).

A tensão axial em cada elemento devido ao momento fletor “SMIS5” e “SMIS6”:

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm M.c}{I_{\text{Elemento}}} \quad (3.55)$$

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm \text{SMIS5}.c}{I_{\text{Elemento}}}$$

$$\sigma_{\text{Tração / Compressão}} = \frac{\pm \text{SMIS6}.c}{I_{\text{Elemento}}}$$

Onde:

M: Momento fletor;

SMIS5 e SMIS6: Equivalentes aos momentos fletores “M” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

c: Distância entre a linha neutra da secção transversal ao ponto submetido à tensão devido ao momento fletor, como mostra a tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Coordenada dos pontos da secção transversal das cantoneiras de abas iguais

Cantoneira	Ponto	Distância do ponto com relação à linha neutra-c [mm]	
		Eixo – y	Eixo – z
25x25x4mm	A	17,4	7,6
	B	7,6	17,4
	C	5,6	5,6
20x20x3mm	A	14	6
	B	6	14
	C	4,5	4,5

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de solicitação cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Tensão devido aos momentos fletores SMIS5 e SMIS6 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais

Ponto	Momento fletor-SMIS5		Momento fletor-SMIS6	
	(+)	(-)	(+)	(-)
A	Tração	Compressão	Tração	Compressão
B	Compressão	Tração	Compressão	Tração
C	Compressão	Tração	Tração	Compressão

A tabela (F.2) no anexo (F), apresenta os resultados obtidos em cada simulação os momentos fletores máximos e mínimos segundo cada direção e sentido para que se possa determinar os valores de tensões máximas e mínimas em cada ponto da secção transversal da barra circular através da equação 3.55.

Os resultados obtidos na simulação em que a torre apresenta o vento com o mesmo sentido do eixo “y” para as barras de secção redonda são mostrados nas figuras 3.5 e 3.6.

A tabela (F.3) no anexo (F) é utilizada para determinar a tensão máxima e mínima atuantes no ponto “C”.

A tabela (F.4) no anexo (F) apresenta a soma vetorial das tensões para cada ponto da secção transversal de cada elemento devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”, assim como, as sus respectivas tensões médias e alternadas.

- Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” e ao momento de torção “SMIS4”.

A tensão de cisalhamento para cantoneira de abas iguais devido às forças “SMIS2” e “SMIS3” baseia-se na teoria do carregamento assimétrico em barras de paredes finas, onde figura 3.29 mostra a distribuição da tensão de cisalhamento na secção transversal da cantoneira de abas iguais.

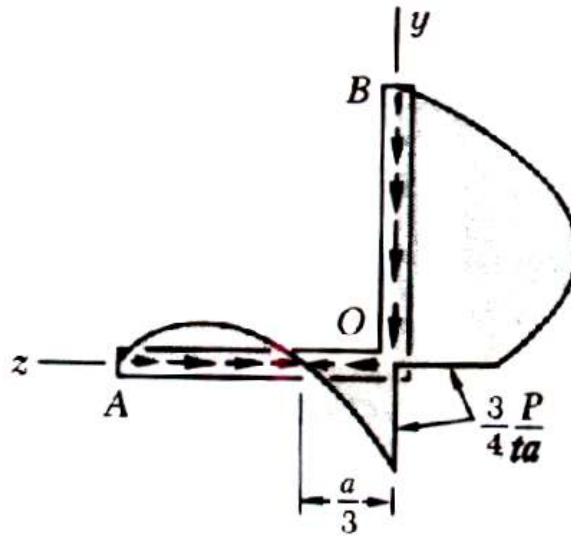


Figura 3.29 - Distribuição da tensão de cisalhamento na secção transversal da cantoneira de abas iguais devido a uma força cortante (Beer, 1982)

Em função dos pontos utilizados para análise conclui-se que a tensão de cisalhamento nos pontos “A e B” são nulos.

Para o ponto “C” com relação ao exemplo verifica-se que a tensão devido ao cisalhamento é obtida pela equação 3.56.

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{3.F}{4.a.t} \quad (3.56)$$

Onde:

F: Força cortante;

a: Comprimento da aba da cantoneira;

t: Espessura da cantoneira.

Como os elementos estruturais encontram-se submetidos a forças cortante na direção “y” e “z” respectivamente SMIS2 e SMIS3, a tensão de cisalhamento apresenta as seguintes situações que devem ser consideradas para a determinação da tensão de cisalhamento resultante.

Força cortante na direção do eixo “y”, como mostra a figura 3.30:

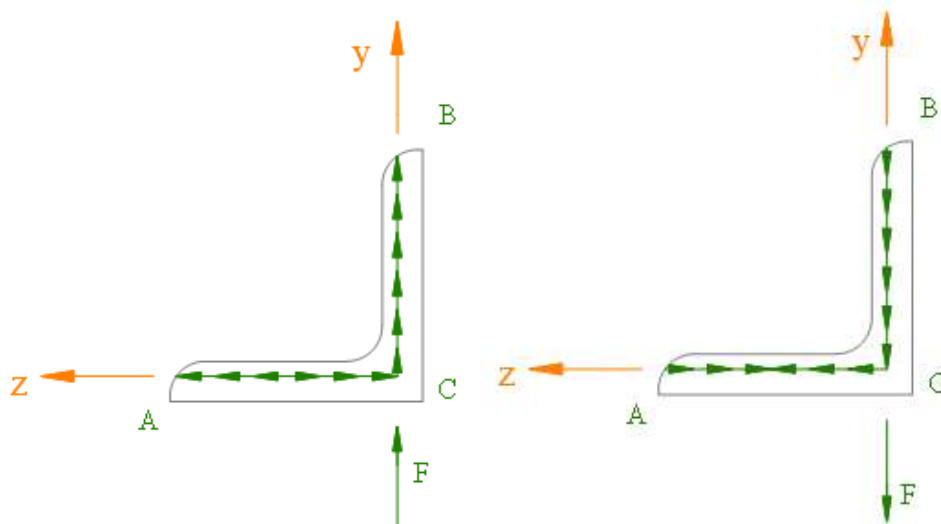


Figura 3.30 - Tensão de cisalhamento resultante devido à força cortante com mesmo sentido e sentido contrário ao eixo “y”

Força cortante na direção do eixo “z”, como mostra a figura 3.31:

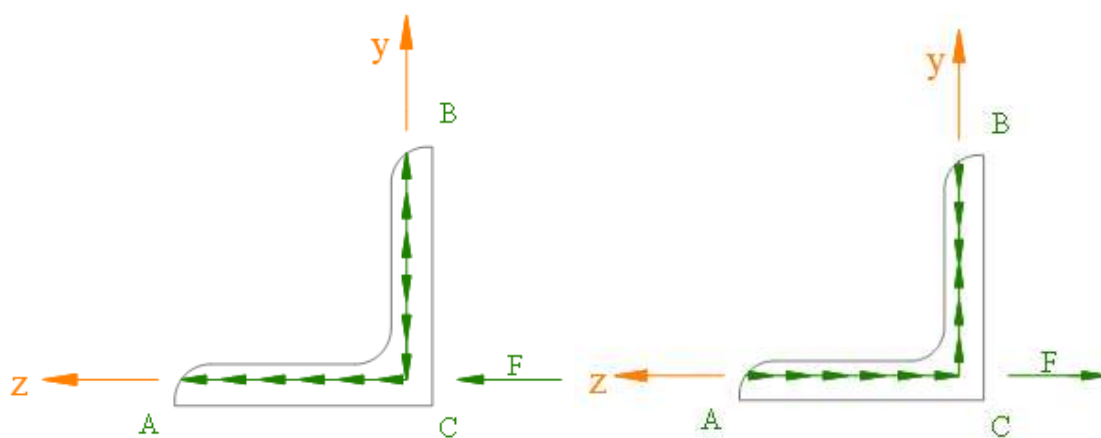


Figura 3.31 - Tensão de cisalhamento resultante devido à força cortante com mesmo sentido e sentido contrário ao eixo “z”

Análise do sentido da tensão para o ponto “C” da secção transversal da cantoneira de abas iguais, devido às forças de corte “SMIS2” e “SMIS3” é determinada em função da

regra da mão direita, onde o sinal é obtido com relação ao sentido do eixo “x” local do elemento, como mostra a tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Tensão devido às forças cortantes SMIS2 e SMIS3 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais

Ponto	Força cortante-SMIS2		Força cortante-SMIS3	
	(+)	(-)	(+)	(-)
A	0	0	0	0
B	0	0	0	0
C	T.Cisalhamento	-τ.Cisalhamento	-τ.Cisalhamento	τ.Cisalhamento

A tabela (F.5) no anexo (F), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças cortantes máximas e mínimas em função do sentido, a qual cada elemento é submetido.

Os resultados obtidos na simulação em que a torre apresenta o vento com o mesmo sentido do eixo “y” para as barras de secção redonda são mostrados nas figuras 3.2 e 3.3.

Com base nos resultados, aplica-se para cada ponto pertencente à secção transversal da cantoneira de abas iguais a equação 3.56 e o respectivo sinal que indica o sentido da tensão em cada ponto, que auxilia no momento da superposição de efeitos.

A tensão de cisalhamento devido à torção em barras não circulares de paredes finas submetidas à torção baseia-se na *Teoria da Elasticidade* (Beer, 1982) associada teoria da membrana, obtido pela equação 3.131.

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{T}{0,33.a.b^2} \quad (3.57)$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento}} = \frac{\text{SMIS4}}{0,33.a.b^2}$$

Onde:

T: Momento de torção;

SMIS4: Equivalente ao momentos torsor “T” segundo a nomenclatura utilizada pelo programa Ansys 5.4;

As constantes “a” e “b” são obtidas como mostra a figura 3.32.

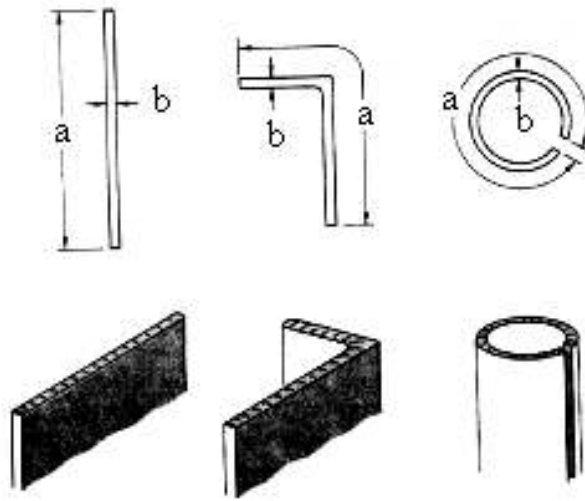


Figura 3.32 - Barras de paredes finas (Beer, 1982)

Análise do sentido da tensão de cisalhamento para cada ponto da secção transversal da cantoneira de abas iguais, devido ao momento de torção “SMIS4”, como mostra a tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Tensão devido ao momento de torção SMIS4 nos pontos de análise para cantoneira de abas iguais

Ponto	Momento de torção-SMIS4			
	(+)		(-)	
	Eixo y	Eixo z	Eixo y	Eixo z
A	$-\tau$.Cisalhamento	0	T .Cisalhamento	0
B	0	T .Cisalhamento	0	$-\tau$.Cisalhamento
C	T .Cisalhamento		$-\tau$.Cisalhamento	

A tabela (F.6) no anexo (F), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, os momentos torskor máximos e mínimos para cada sentido segundo o eixo “x” local do

elemento, assim como, as tensões cisalhantes máximas e mínimas para cada sentido, obtidas através da equação 3.57.

A tabela (F.7) no anexo (F) apresenta a superposição de efeitos para o ponto “C” da secção transversal de cada elemento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” e ao momentos torsor “SMIS4”, os pontos “A” e “B” não necessitam este tipo de análise, uma vez que, a tensão de cisalhamento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” serem nulas nestes pontos

As tensões cisalhantes resultantes máximas e mínimas obtidas para cada ponto da secção, assim como, as tensões médias e alternadas são apresentadas na tabela (F.8) no anexo (F).

O coeficiente de segurança para cada ponto das barras circulares constituintes da torre anemométrica segundo a teoria de falha por fadiga são apresentados na tabela (F.9) no anexo (F).

As cantoneiras de abas iguais com relação ao critério de falha por fadiga apresentam um coeficiente de segurança mínimo de 2,43 para o perfil 25x25x4mm e 5,02 para o perfil 20x20x3mm, portanto a torre não apresenta falha estrutural nas cantoneiras devido ao regime de trabalho a qual é submetida.

➤ Critério de falha por flambagem para os elementos estruturais da torre

O teste é feito baseando-se nas expressões Euler, se o índice de esbeltez para cada elemento da torre for maior do que o índice de esbeltez de Euler, aplicando a equação 3.58.

$$\lambda_{\text{Euler}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2}{210 \text{ N/mm}^2}}$$
$$\lambda_{\text{Euler}} = 98,63$$

Índice de esbeltez de cada elemento é definido através da relação entre o comprimento de flambagem (L_{Elemento}) e o raio de giração mínimo da secção transversal da peça expresso pela equação 3.60, sendo que:

Área da secção transversal é obtida como mostra a tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Característica dos perfis da torre anemométrica

Elemento estrutural	$I_{\text{Elemento}} [\text{mm}^4]$	$A_{S.T.} [\text{mm}^2]$
Cantoneira 25x25x4mm	4000	185
Cantoneira 20x20x3mm	1500	112
Barra circular $\varnothing 7\text{mm}$	118	38

\Rightarrow Se $\lambda_{\text{Elemento}} > \lambda_{\text{Euler}}$:

A carga crítica de Euler para os elementos constituintes da torre, obtida pela equação 3.4.

Coefficiente de segurança para os elementos constituintes da torre segundo o critério de falha por flambagem, obtido pela equação 3.5.

\Rightarrow Se $\lambda_{\text{Elemento}} < \lambda_{\text{Euler}}$:

Segundo a norma ABNT NB 14 aço, conforme as equações 3.6 e 3.7.

Coefficiente de segurança para os elementos constituintes da torre segundo o critério de falha por flambagem, obtido pela equação 3.8.

Os resultados obtidos para cada elemento encontram-se no anexo (G), onde para os perfis utilizados na construção da torre anemométrica com relação ao teste de flambagem apresentarão um coeficiente de segurança mínimo de 5,57 para o perfil 25x25x4mm, 450 para o perfil 20x20x3mm e 11,01 para barra de secção redonda para os esforços a qual são submetidos.

Portanto, es perfis estruturais utilizados para montagem da torre anemométrica não apresenta falha estrutural devido ao regime de trabalho a qual é submetia.

3.4 TORRE RETICULADA DE SUSTENTAÇÃO

Elemento estrutural fornecido pela empresa Kepler Weber S/A constituído por cantoneiras de abas iguais fixadas através de ligações aparafusadas atingindo uma altura de 9,2m. Sendo utilizada para sustentar a turbina WINDTOWER WT7, instalada na Estação Marinha de Agricultura - FURG localizada na praia do Cassino da cidade de Rio Grande no estado do Rio Grande do Sul, como mostra a figura 3.33.



Figura 3.33 - Conjunto torre reticulada de sustentação.e
turbina eólica

As forças externas atuantes sobre a estrutura da torre reticulada:

- ⇒ Força devido ao peso próprio da estrutura;
- ⇒ Força devida ação do vento sobre a estrutura;
- ⇒ Força devida ação da turbina eólica sobre a estrutura.

➤ Força devido ao peso próprio da torre

O desenho e a descrição do material utilizado para construção da torre reticulada de sustentação da turbina eólica encontra-se no anexo (J) apresentando o peso de cada elemento estrutural.

Utilizando um coeficiente de ponderação para compensar a utilização de acessórios, o peso total da estrutura a ser considerado para cálculo é obtido através da equação 3.58:

$$FP_{\text{Torre}} = 1,4 \cdot (\text{Massa total}) \cdot g \quad (3.58)$$

$$FP_{\text{Torre}} = 10773 \text{ N}$$

➤ Força devida ação do vento sobre a torre

A componente da força global na direção do vento, força de arrasto Fa_{Torre} , é obtida pela equação 3.59:

$$Fa_{\text{Torre}} = Ca_{\text{Torre}} \cdot q \cdot Ae_{\text{Torre}} \quad (3.59)$$

Onde:

Ca_{Torre} : Coeficiente de arrasto da torre;

Ae_{Torre} : Área frontal efetiva da torre;

q_{Vento} : Pressão dinâmica do vento, determinada no item 3.1.1.2, $q_{\text{Vento}} = 1068,625 \text{ N/m}^2$.

⇒ Determinação da área frontal efetiva da torre reticulada de sustentação (Ae_{Torre}):

Para determinar a área da projeção ortogonal da estrutura sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área de sombra”) serão consideradas três possibilidades, como mostra a figura 3.34.

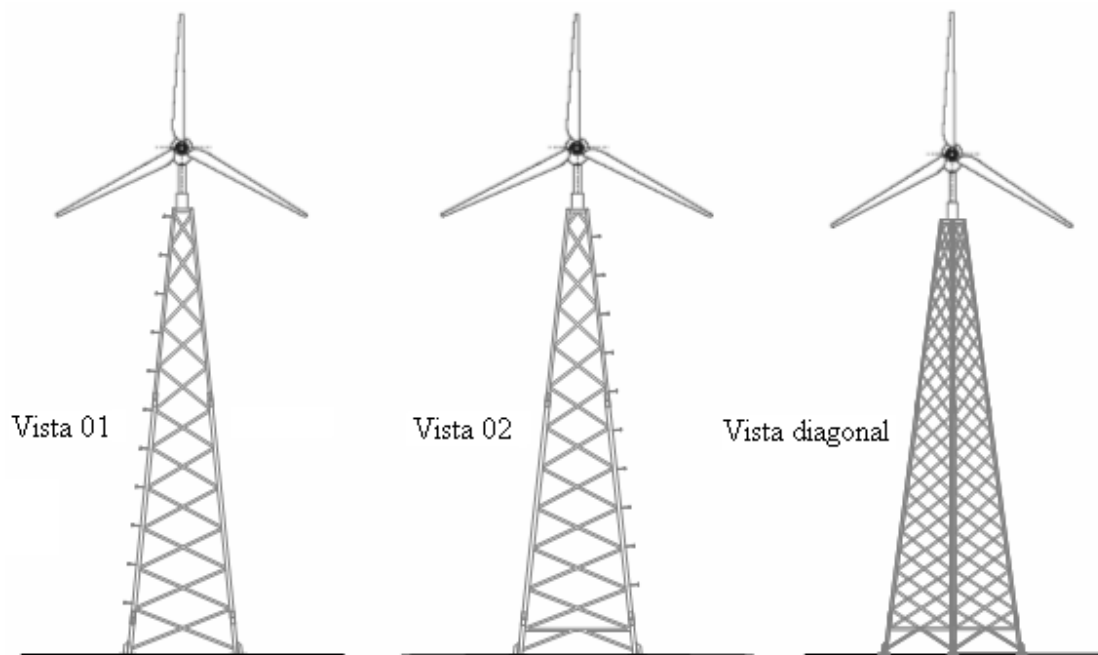


Figura 3.34 - Vistas para área da sombra da torre reticulada de sustentação

- Área efetiva segundo a vista 01:

$$A_{\text{Vista.01}} = \sum A_{\text{Elementos.vista.01}} \quad (3.60)$$

$$A_{\text{Vista.01}} = 2690000\text{mm}^2$$

- Área efetiva segundo a vista 02:

$$A_{\text{Vista.0.2}} = \sum A_{\text{Elementos.vista.02}} \quad (3.61)$$

$$A_{\text{Vista.02}} = 2790000\text{mm}^2$$

- Área efetiva segundo a vista diagonal:

$$A_{\text{Vista.diagonal}} = \sum A_{\text{Elementos.vista.diagonal}} \quad (3.62)$$

$$A_{\text{Vista.diagonal}} = 7749890\text{mm}^2$$

A força de arraste da torre reticulada de sustentação segundo a equação 3.59 é diretamente proporcional à área efetiva da torre reticulada de sustentação, sendo assim, será utilizado no cálculo:

$$A_{\text{Vista.diagonal}} = 7749890\text{mm}^2$$

⇒ Determinação do coeficiente de arrasto da torre reticulada de sustentação ($C_{a\text{Torre}}$)

Para torre reticulada de sustentação de seção quadrada o coeficiente de arrasto do vento incidindo com um ângulo α_{Vento} em relação à perpendicular à face de barlavento, $C_{a\alpha_{\text{Vento}}}$, é obtido pela equação 3.63.

$$C_{a\alpha_{\text{Vento}}} = K\alpha_{\text{Vento}} \cdot C_a \quad (3.63)$$

Onde:

$$K\alpha_{\text{Vento}} = 1 + \frac{\alpha_{\text{Vento}}}{125} \quad 0^\circ < \alpha_{\text{Vento}} < 20^\circ \quad (3.64)$$

$$K\alpha_{\text{Vento}} = 1,16 \quad 20^\circ < \alpha_{\text{Vento}} < 45^\circ \quad (3.65)$$

O coeficiente de arrasto é determinado em função do índice de área exposta obtida pela razão entre a área frontal efetiva da torre reticulada de sustentação (área da vista diagonal) pela área do contorno da torre.

Área do contorno da torre reticulada de sustentação é determinada pela equação 3.66:

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = \left(\frac{(\text{base.maior} + \text{basemenor}) \cdot \text{altura}}{2} \right) \quad (3.66)$$

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = \left(\frac{(2902\text{mm} + 471\text{mm}) \cdot 9120\text{mm}}{2} \right)$$

$$A_{\text{Contorno.Torre}} = 15380880\text{mm}^2$$

Portanto o valor encontrado para o índice de área exposta é obtido através da equação 3.67:

$$\phi_{\text{Torre}} = \frac{A_{\text{Vista.diagonal}}}{A_{\text{Contorno.Torre}}} \quad (3.67)$$

$$\phi_{\text{Torre}} = \frac{7749890\text{mm}^2}{15380880\text{mm}^2}$$

$$\phi_{\text{Torre}} = 0,5$$

Utilizando o valor calculado de J_{Torre} na figura 3.3, obtemos o coeficiente de arrasto, Ca , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados, obtemos:

$$Ca_{\text{Torre}} = 2,0$$

Aplicando este valor na equação (3.73) e substituindo na equação (3.59):

$$Fa_{\text{Torre}} = (1,16 \cdot 2,0 \cdot 0,613 \cdot (41,7525\text{m/s})^2 \cdot 7749890\text{mm}^2) \frac{1\text{m}^2}{1000000\text{mm}^2}$$

$$Fa_{\text{Torre}} = 19213,61\text{N}$$

➤ Força devida ação da turbina eólica sobre a torre

Primeiramente serão calculadas as forças que surgem atuando diretamente na turbina eólica, que serão posteriormente transferidas para o topo da torre reticulada de sustentação como forças devido à turbina eólica.

⇒ Força devido ao peso próprio:

$$FP_{\text{Turbina}} = m_{\text{Turbina}} \cdot g \quad (3.68)$$

$$FP_{\text{Turbina}} = 280\text{Kg} \cdot 9,8\text{m/s}^2$$

$$FP_{\text{Turbina}} = 2744\text{N}$$

⇒ Força de arraste da turbina eólica

A turbina eólica possui dois regimes de funcionamento, que serão considerados para a determinação da força de arraste na turbina eólica.

- Máxima velocidade de vento em operação: com velocidades de ventos superiores à 25m/s a turbina eólica fica fora de operação, a força de arraste determinada pela equação 3.69 (Munson, 1997).

$$F_{a_{Turbina}} = \frac{C_{D_{Turbina}} \cdot \rho_{ar} \cdot A_{p_{Pás.Turbina}} \cdot V^2}{2} \quad (3.69)$$

Onde:

$F_{a_{Turbina}}$: Força de arraste da turbina eólica;

$C_{D_{Turbina}}$: Coeficiente de arraste da turbina eólica (0,5);

ρ_{ar} : Massa específica do ar (1,23Kg/m³);

$A_{p_{Pás.Turbina}}$: Área projetada coberta pelas pás da turbina eólica.

Para turbina eólica, MORATEC WT7, que possui comprimento das pás de 2,675m, como mostra a figura 3.40, a área projetada é obtida pela equação 3.70.

$$A_{p_{Pás.Turbina}} = \pi \cdot r_{Turbina}^2 \quad (3.70)$$

$$A_{p_{Pás.Turbina}} = \pi \cdot (2,675m)^2$$

$$A_{p_{Pás.Turbina}} = 22,48m^2$$

A força de arraste resultante na turbina eólica aplicando a equação 3.69:

$$F_{a_{Turbina}} = 0,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,23Kg/m \cdot (25m/s)^2 \cdot 22,48m^2$$

$$F_{a_{Turbina}} = 4320N$$

- Velocidade máxima do vento local: considerando ventos com rajadas de 3 segundos, para edificações, a isopleta para a região de Rio Grande apresenta velocidades máxima da ordem de 50m/s., como mostra a figura 3.4.

Nesta situação a turbina eólica esta parada, área projetada é obtida pela equação 3.71:

$$A_{p_{Turbina}} = 3 \cdot A_{Turbina} \cdot D_{Turbina} \quad (3.71)$$

Onde:

$A_{p_{Turbina}}$: Área projetada da turbina eólica;

“ $A_{Turbina}$ ” e “ $D_{Turbina}$ ” conforme figura (3.73).

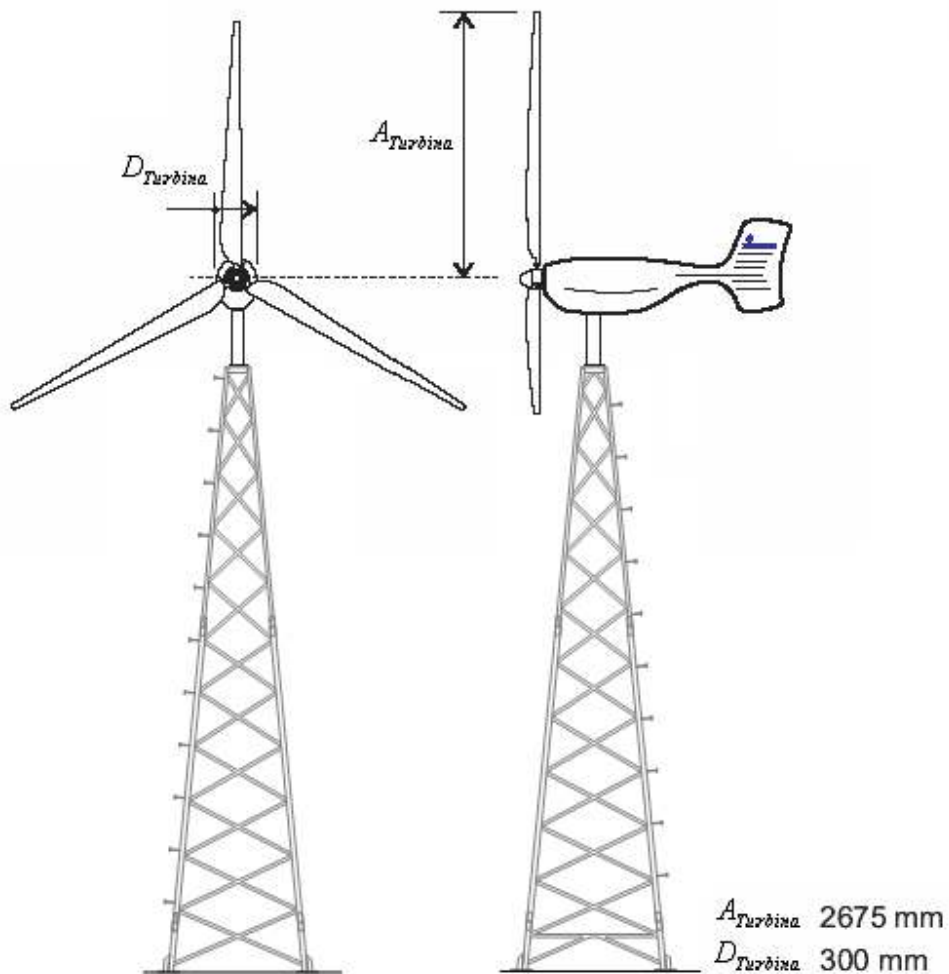


Figura 3.35 - Turbina eólica instalada sobre uma torre reticulada de sustentação

$$A_{p_{Turbina}} = 3 \cdot 2,675 \text{m} \cdot 0,3 \text{m}$$

$$A_{p_{Turbina}} = 2,4 \text{m}^2$$

A força de arraste resultante na turbina eólica utilizando a equação 3.69.

$$F_{a_{Turbina}} = \frac{C_{D_{Turbina}} \cdot \rho_{ar} \cdot A_{p_{Turbina}} \cdot V^2}{2}$$
$$F_{a_{Turbina}} = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \text{Kg/m}^3 \cdot 2,4 \text{m}^2 \cdot (50 \text{m/s})^2$$
$$F_{a_{Turbina}} = 3690 \text{N}$$

A força de arrasto que surge na turbina eólica devido à ação do vento pela pior hipótese:

$$F_{a_{Turbina}} = 4320 \text{N}$$

⇒ Força de guinada da turbina eólica:

Além da força de arrasto atuando na turbina eólica existe ainda a força necessária para re-orientar a mesma na direção do vento, força esta que surge no leme da turbina eólica é obtida pela equação 3.72 (Munson, 1997).

$$F_{Guinada} = C_{D_{Turbina}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot V^2 \cdot A_{Leme.Turbina} \cdot \text{sen}(\alpha_{Vento}) \quad (3.72)$$

Onde:

ρ : Massa específica do ar;

$A_{Leme.Turbina}$: Área do leme da turbina eólica ($0,45 \text{m}^2$);

α_{Vento} : Ângulo de incidência do vento.

Na situação de maior sollicitação, $C_{D_{Turbina}} = 1$, $V = 50 \text{ m/s}$ e $\alpha_{Vento} = 90^0$, portanto, aplicando a equação 3.82.

$$F_{Guinada} = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \text{Kg/m}^3 \cdot (50 \text{m/s})^2 \cdot 0,45 \text{m}^2$$
$$F_{Guinada} = 692 \text{N}$$

Esta força é igual à inércia do rotor, que se opõem à mudança de direção, portanto a força que age lateralmente na turbina devido à força de guinada:

$$F_{Guinada} = 1384N$$

⇒ Momento de frenagem na turbina eólica:

Momento que surge no instante em que os freios da turbina eólica são acionados. A tabela 3.16 apresenta os dados técnicos utilizados para determinar o momento de frenagem.

Tabela 3.16 – Dados técnicos da turbina eólica

Potência máxima no eixo	10KW
Rotação	265rpm

Torque resultante na frenagem é determinado pela equação 3.73.

$$P_{Turbina} = n \cdot T_{Frenagem} \quad (3.73)$$

$$T_{Frenagem} = \frac{P_{Turbina}}{n}$$

$$T_{Frenagem} = M_{Frenagem} = \frac{10Kw}{265RPM}$$

$$T_{Frenagem} = M_{Frenagem} = \frac{10Kw}{265RPM}$$

$$M_{Frenagem} = 2262,31N.m$$

A tabela 3.17 apresenta as forças e momentos que surgem na turbina eólica que serão transmitidas para o topo da torre reticulado de sustentação:

Tabela 3.17 – Forças e momentos atuantes na turbina eólica

$F_{P_{Turbina}}$	2744N
$F_{a_{Turbina}}$	4320N
$F_{Guinada}$	1384N

M_{Frenagem}	2262,31N.m
-----------------------	------------

A figura 3.36 mostra a direção, sentido e ponto de aplicação das forças e momentos atuantes na turbina eólica.

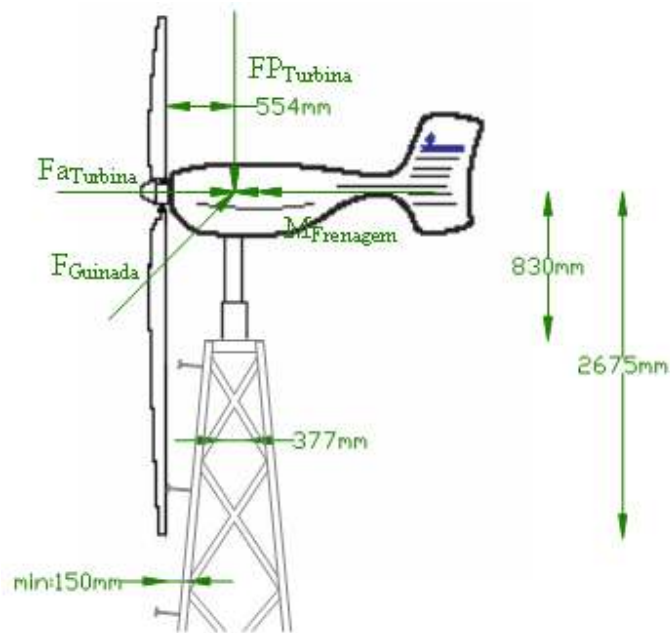


Figura 3.36 - Forças e momentos atuantes na turbina eólica

3.4.1 Análise estrutural da torre reticulada de sustentação

Neste item é determinado o coeficiente de segurança baseando-se nos critérios de falha por fadiga, flambagem e deslocamento de todos os elementos constituintes da torre, uma vez que, existem forças necessárias para manter unidas todas as partes da torre conhecidas como *Forças Internas*.

- Determinação das forças, momentos e deslocamentos internos atuantes

As *Forças Internas e Deslocamentos* atuantes nos elementos que constituem a torre reticulada de sustentação serão determinados em função das seguintes situações a qual a torre é submetida:

⇒ Situação de ausência de vento

A força considerada nesta situação é a força peso da turbina eólica, como mostra a tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto

Descrição	Força/Momento [N]	Módulo/Direção/Sentido		
		“x”	“y”	“z”
FP _{Turbina}	2744	00	00	-2744

⇒ Situação em que o vento possui direção 45^0 com relação ao eixo “x” e sentido positivo dos eixos “x” e “y”:

Apresenta duas situações extras devido à força de guinada, como mostram as figuras 3.37 e 3.38:

- Situação 2.1:

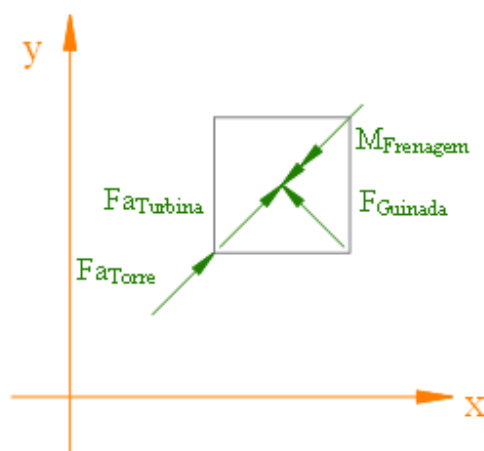


Figura 3.37 - Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 2.1

As forças e momentos atuantes em cada nó do conjunto torre reticulada – turbina eólica são apresentadas na tabela 3.19 em função da figura 3.37:

Tabela 3.19 - Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto na situação 2.1

Descrição	Força/Momento [N]/[N/mm]	Módulo/Direção/Sentido		
		“x”	“y”	“z”
$F_{PTurbina}$	2744	0	0	-2744
$F_{aTurbina}$	4320	3054.7	3054.7	0
$F_{Guinada}$	1384	-978.64	978.64	0
$M_{Freagem}$	2262310	-1599694.74	-1599694.74	0
$F_{aTurbina}$	19213.6	98.45	98.45	0

Tabela 3.20 - Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” na situação 2.1

Descrição	Módulo/Direção/Sentido da força resultante [N]		
	“x”	“y”	“z”

$F_{aTurbina}+F_{Guinada}$	2076.06	4033.34	0
----------------------------	---------	---------	---

- Situação 2.2:

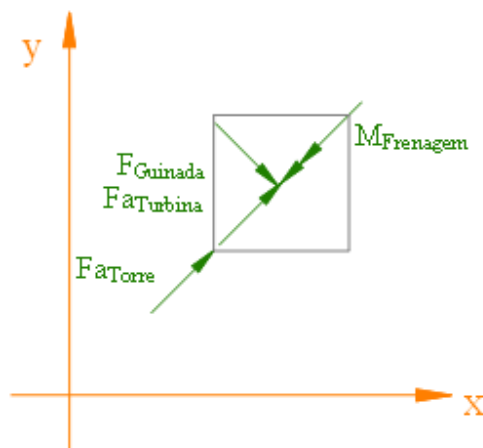


Figura 3.38 - Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 2.2

As forças e momentos atuantes em cada nó do conjunto torre reticulada – turbina eólica são apresentadas na tabela 3.21 em função da figura 3.38:

Tabela 3.21 - Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 2.2

Descrição	Força/Momento [N]/[N/mm]	Módulo/Direção/Sentido		
		“x”	“y”	“z”
$F_{PTurbina}$	2744	0	0	-2744
$F_{aTurbina}$	4320	3054.7	3054.7	0
$F_{Guinada}$	1384	978.64	-978.64	0
$M_{Frenagem}$	2262310	-1599694.74	-1599694.74	0
$F_{aTurbina}$	19213.6	98.45	98.45	0

Tabela 3.22 - Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 2.2

Descrição	Módulo/Direção/Sentido da força resultante [N]		
	“x”	“y”	“z”
$F_{a_{Turbina}} + F_{a_{Guinada}}$	4033.34	2076.06	0

⇒ Situação em que o vento possui direção 45° com relação ao eixo “x” e sentido negativo dos eixos “x” e “y”:

Apresenta duas situações extras devido à força de guinada, como mostram as figuras 3.39 e 3.40:

- Situação 3.1:

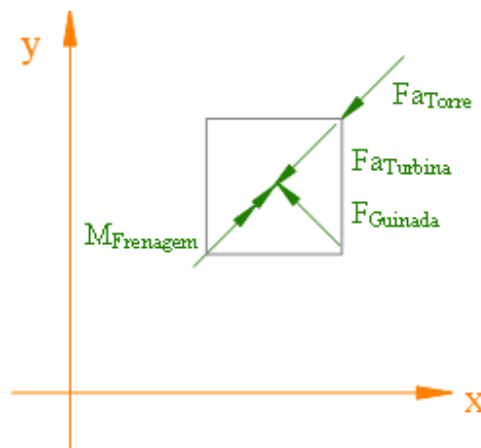


Figura 3.39 - Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 3.1

As forças e momentos atuantes em cada nó do conjunto torre reticulada – turbina eólica são apresentadas na tabela 3.23 em função da figura 3.39.

Tabela 3.23 - Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 3.1

Descrição	Força/Momento [N]/[N/mm]	Módulo/Direção/Sentido		
		“x”	“y”	“z”
$F_{P_{Turbina}}$	2744	0	0	-2744
$F_{a_{Turbina}}$	4320	-3054.7	-3054.7	0
$F_{Guinada}$	1384	-978.64	978.64	0
$M_{Frenagem}$	2262310	1599694.74	1599694.74	0
$F_{a_{Turbina}}$	19213.6	-98.45	-98.45	0

Tabela 3.24 - Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 3.1

Descrição	Módulo/Direção/Sentido da força resultante [N]		
	“x”	“y”	“z”
$F_{a_{Turbina}} + F_{Guinada}$	-4033.34	-2076.06	0

- Situação 3.2

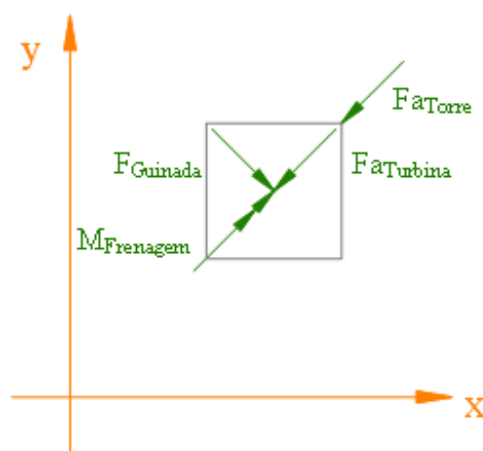


Figura 3.40 - Forças e momentos aplicados no conjunto, situação 3.2

As forças e momentos atuantes em cada nó do conjunto torre reticulada – turbina eólica são apresentadas na tabela 3.25 em função da figura 3.40.

Tabela 3.25 - Condição inicial de forças e momentos aplicados no conjunto para situação 3.2

Descrição	Força/Momento [N]/[N/mm]	Módulo/Direção/Sentido		
		“x”	“y”	“z”
$F_{P_{Turbina}}$	2744	0	0	-2744
$F_{a_{Turbina}}$	4320	-3054.7	-3054.7	0
$F_{Guinada}$	1384	978.64	-978.64	0
$M_{Frenagem}$	2262310	1599694.74	1599694.74	0
$F_{a_{Turbina}}$	19213.6	-98.45	-98.45	0

Tabela 3.26 - Força resultante na turbina eólica nas direções “x” e “y” para situação 3.2

Descrição	Módulo/Direção/Sentido da força resultante [N]		
	“x”	“y”	“z”
$F_{a_{Turbina}} + F_{Guinada}$	-2076.06	-4033.34	0

Os passos necessários para obtenção das forças interna e modelagem da torre reticulada de sustentação encontram-se no anexo “K”.

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

⇒ Situação de ausência de vento

A figura 3.41 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre de sustentação reticulada.

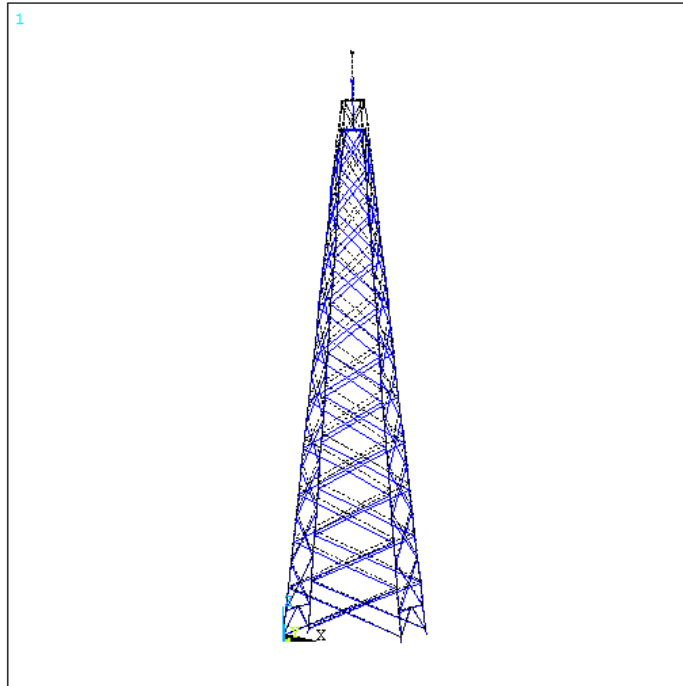


Figura 3.41 - Deslocamento parada

O elemento 127, cantoneira 44,45x44,45x4,76mm com 628mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,55563E-02mm.

Aplicando a equação 3.74 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando não se encontra sob ação do vento.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta} \quad (3.74)$$

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 628 \text{ mm}}{205 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,0056 \text{ mm}}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 115$$

⇒ Situação em que o vento possui direção 45° com relação ao eixo “x” e sentido positivo dos eixos “x” e “y”:

A figura 3.42 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre de sustentação reticulada para as duas situações que foram consideradas.

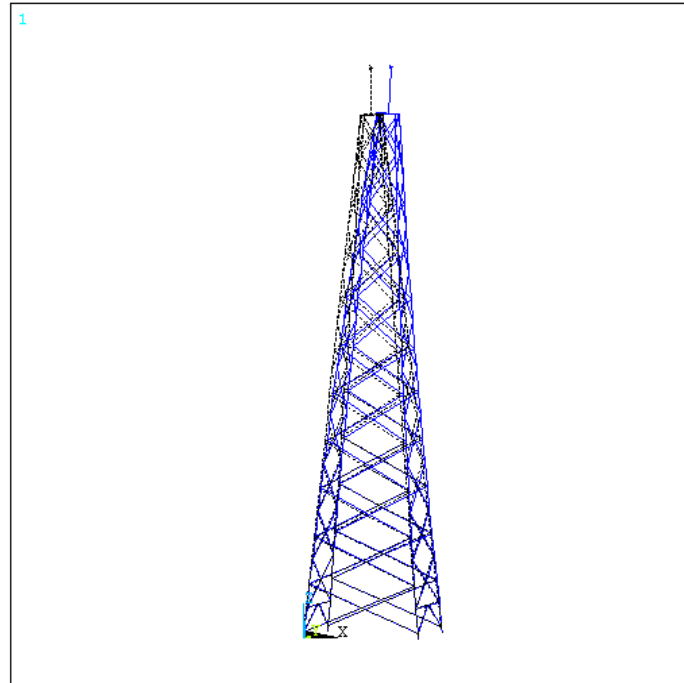


Figura 3.42 - Deslocamento vento positivo

O elemento 106, cantoneira 44,45x44,45x4,76mm com 396mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,91288mm para as duas situações apresentadas.

Aplicando a equação 3.74 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando não se encontra sob ação do vento.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta}$$
$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 396 \text{ mm}}{205 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,913 \text{ mm}}$$
$$N_{\text{Deformação}} = 4,4$$

⇒ Situação em que o vento possui direção 45^0 com relação ao eixo “x” e sentido negativo dos eixos “x” e “y”:

A figura 3.43 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre de sustentação reticulada para as duas situações que foram consideradas.

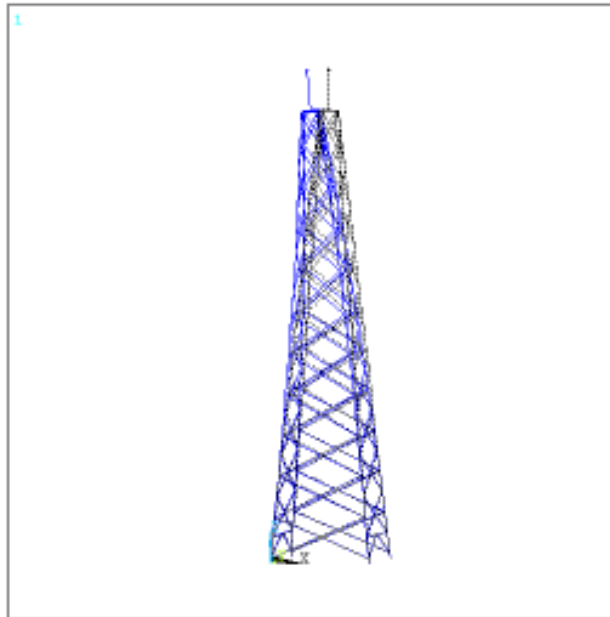


Figura 3.43 - Deslocamento vento negativo

O elemento 103, cantoneira 44,45x44,45x4,76mm com 396mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,91288mm para as duas situações apresentadas.

Aplicando a equação 3.74 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando não se encontra sob ação do vento.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta}$$
$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 396 \text{ mm}}{205 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,913 \text{ mm}}$$
$$N_{\text{Deformação}} = 4,4$$

Portanto, em função do critério de falha estrutural por deformação elástica, conclui-se que a torre reticulada de sustentação apresenta um coeficiente de segurança mínimo de 4,4. Sendo assim depois de cessado o efeito da ação do vento a torre retorna ao seu estado inicial apresentando um coeficiente de segurança mínimo de 114, devido à ação do peso próprio do conjunto torre-turbina eólica.

➤ Critério de falha estrutural devido à fadiga

Em função dos resultados obtidos em cada uma das situações, determinamos as forças e momentos máximo e mínimo atuantes em cada elemento.

Forças e momentos internos utilizados para calcular o coeficiente de segurança em cada elemento constituinte da torre através do teste por fadiga segundo a teoria de Von Mises-Goodman.

Em função das forças e momentos que surgem segundo os eixos principais locais e geometria dos elementos estruturais, determinamos as tensões atuantes.

A torre é composta apenas por cantoneiras de abas iguais, portanto em função da geometria da secção transversal é utilizada a equação adequada para a determinação das tensões.

⇒ Critério de falha por fadiga para as cantoneiras de abas iguais

O coeficiente de segurança para as cantoneiras de abas iguais serão obtidas em função dos três pontos de análise como mostra a figura 3.28.

As cantoneiras apresentam-se submetidos aos esforços de tração - compressão e cisalhamento.

- Tensão de tração - compressão

A tensão de tração - compressão em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”.

A tensão axial em cada elemento devido à força “SMIS1” é obtida pela equação 3.54.

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de sollicitação cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.10, em função da figura 3.28.

A tabela (M.1) no anexo (M), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças máximas e mínimas que cada elemento é submetido, assim como, as tensões máximas e mínimas aplicando a equação (3.54).

A tensão axial em cada elemento devido ao momento fletor “SMIS5” e “SMIS6” é obtido através da equação 3.55.

Sendo que a distância entre a linha neutra da secção transversal ao ponto submetido à tensão devido ao momento fletor, como mostra a tabela 3.27.

Tabela 3.27 - Coordenada dos pontos da secção transversal das cantoneiras de abas iguais

Cantoneira	Ponto	Distância do ponto com relação à linha neutra-c [mm]	
		Eixo-y	Eixo-z
76,2x76,2x6,35mm	A	21,34	54,86
	B	54,86	21,34
	C	18,165	18,165
50,8x50,8x4,76mm	A	14,48	36,32
	B	36,32	14,48
	C	12,1	12,1
76,2x76,2x4,76mm	A	20,58	55,62
	B	55,62	20,48
	C	18,2	18,2

44,45x44,45x4,76mm	A	12,95	31,5
	B	31,5	12,95
	C	10,57	10,57

Através da análise do sinal da função é possível determinar que tipo de solicitação cada ponto da secção transversal do elemento está submetido, como mostra a tabela 3.27 devido aos momentos fletores SMIS5 e SMIS6 nos pontos de análise.

A tabela (M.2) no anexo (M), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, os momentos fletores máximos e mínimos segundo cada direção e sentido para que se possa determinar os valores de tensões máximas e mínimas em cada ponto da secção transversal da cantoneira de abas iguais através da equação 3.55.

A tabela (M.3) no anexo (M) é utilizada para determinar a tensão máxima e mínima atuantes no ponto “C”.

A tabela (M.4) no anexo (M) apresenta a soma vetorial das tensões para cada ponto da secção transversal de cada elemento devido à força axial “SMIS1” e aos momentos fletores “SMIS5” e “SMIS6”, assim como, as sus respectivas tensões médias e alternadas.

- Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento em cada ponto da secção transversal do elemento estrutural é determinada em função da superposição das tensões devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” e ao momento de torção “SMIS4”.

A tensão de cisalhamento em cada elemento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” é obtida através da equação 3.56.

A tensão de cisalhamento para cantoneira de abas iguais devido às forças SMIS2 e SMIS3 baseia-se na teoria do carregamento assimétrico em barras de paredes finas, apresentado no item 3.3.

Análise do sentido da tensão para o ponto “C” da secção transversal da cantoneira de abas iguais, devido às forças de corte “SMIS2” e “SMIS3” é determinada em função da regra da mão direita, onde o sinal é obtido com relação ao sentido do eixo “x” local do elemento, como mostra a tabela 3.26.

A tabela (M.5) no anexo (M), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, as forças cortantes máximas e mínimas em função do sentido, a qual cada elemento é submetido.

Com base nos resultados, aplica-se para cada ponto pertencente à secção transversal da cantoneira de abas iguais a equação 3.56 e o respectivo sinal que indica o sentido da tensão em cada ponto, que auxilia no momento da superposição de efeitos.

A tensão de cisalhamento em cada elemento devido ao momento de torção “SMIS4” em barras não circulares de paredes finas submetidas à torção baseia-se na *Teoria da Elasticidade* associada teoria da membrana, obtida através da equação 3.57.

Análise do sentido da tensão de cisalhamento para cada ponto da secção transversal da cantoneira de abas iguais, devido ao momento de torção “SMIS4”, como mostra a tabela 3.16.

A tabela (M.6) no anexo (M), apresenta os resultados obtidos em cada simulação, os momentos torsor máximos e mínimos para cada sentido segundo o eixo “x” local do elemento, assim como, as tensões cisalhantes máximas e mínimas para cada sentido.

A tabela (M.7) no anexo (M) apresenta a soma vetorial das tensões para o ponto “C” da secção transversal de cada elemento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” e ao momentos torsor “SMIS4”, os pontos “A” e “B” não necessitam este tipo de análise, uma vez que, a tensão de cisalhamento devido às forças cortantes “SMIS2” e “SMIS3” serem nulas nestes pontos.

As tensões cisalhantes resultantes máximas e mínimas obtidas para cada ponto da secção, assim como, as tensões médias e alternadas são apresentadas na tabela (M.8) no anexo (M).

O coeficiente de segurança para cada ponto das barras circulares constituintes da torre anemométrica segundo a teoria de falha por fadiga são apresentados na tabela (M.9) no anexo (M).

As cantoneiras de abas iguais da torre reticulada de sustentação com relação ao teste de fadiga apresentarão um coeficiente de segurança mínimo de 135,42 para o perfil 76,2x76,2x6,35mm, 3,3 para 50,8x50,8x4,76mm, 1,87 para 76,2x76,2x4,76 e 6,3 para 44,45x44,45x4,76mm para os esforços a qual são submetidos.

➤ Critério de falha por flambagem para os elementos estruturais da torre

O teste é feito baseando-se nas expressões Euler, se o índice de esbeltez para cada elemento da torre for maior do que o índice de esbeltez de Euler, aplicando a equação 3.1.

$$\lambda_{\text{Euler}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{207.10^3 \text{ N/mm}^2}{210 \text{ N/mm}^2}}$$
$$\lambda_{\text{Euler}} = 98,63$$

Índice de esbeltez de cada elemento é definido através da relação entre o comprimento de flambagem ($L_{f\text{Elemento}}$) e o raio de giração mínimo da secção transversal da peça expresso pela equação 3.60, sendo que:

Área da secção transversal é obtida como mostra a tabela 3.28.

Tabela 3.28 - Característica dos perfis da torre reticulada de sustentação

Elemento estrutural	$I_{\text{Elemento}} [\text{mm}^4]$	$A_{\text{S.T.}} [\text{mm}^2]$
Cantoneira 76,2x76,2x6,35mm	209025	929
Cantoneira 50,8x50,8x4,76mm	46720	458
Cantoneira 76,2x76,2x4,76mm	159750	710
Cantoneira 44,45x44,45x4,76mm	400	31684

⇒ Se $\lambda_{\text{Elemento}} > \lambda_{\text{Euler}}$:

A carga crítica de Euler para os elementos constituintes da torre, obtida pela equação 3.4.

Coefficiente de segurança para os elementos constituintes da torre segundo o critério de falha por flambagem, obtido pela equação 3.5.

⇒ Se $\lambda_{\text{Elemento}} < \lambda_{\text{Euler}}$:

Utiliza-se a condição de flambagem em barras no campo das deformações *Elasto-Plásticas* que ocorre quando a tensão de flambagem ultrapassa a tensão de proporcionalidade do material, situação em que a fórmula de Euler perde a sua validade.

Coefficiente de segurança para os elementos constituintes da torre segundo o critério de falha por flambagem, obtido pela equação 3.8.

Os resultados obtidos para cada elemento encontram-se no anexo (N), onde para os perfis utilizados na construção da torre reticulada de sustentação com relação ao teste de flambagem apresentarão um coeficiente de segurança mínimo de 10942 para o perfil 76,2x76,2x6,35mm, 4,6 para 50,8x50,8x4,76mm, 3,7 para 76,2x76,2x4,76 e 33 para 44,45x44,45x4,76mm para os esforços a qual são submetidos.

3.4.2 Análise estrutural da torre devido à ação de uma força harmônica

Esta análise baseia-se na determinação das forças, momentos e deformações internas que surgem na torre quando submetida a uma força harmônica devido a uma massa desbalanceada na extremidade das pás do rotor da turbina eólica na frequência de oscilação igual à primeira frequência natural do conjunto torre reticulada – turbina eólica.

Para isto é necessário investigar se a primeira frequência natural do conjunto encontra-se dentro da faixa de rotação do rotor da turbina eólica 0 a 4,42Hz.

Os passos necessários para determinação das frequências naturais e modos de vibração encontram-se no anexo (O) e as cinco primeiras frequências apresentadas na tabela 3.29.

Tabela 3.29 - Frequências naturais da torre reticulada de sustentação

Modo	Frequência (Hz)
1	0.1808
2	0.18103

3	0.79331
4	0.79861
5	0.84564

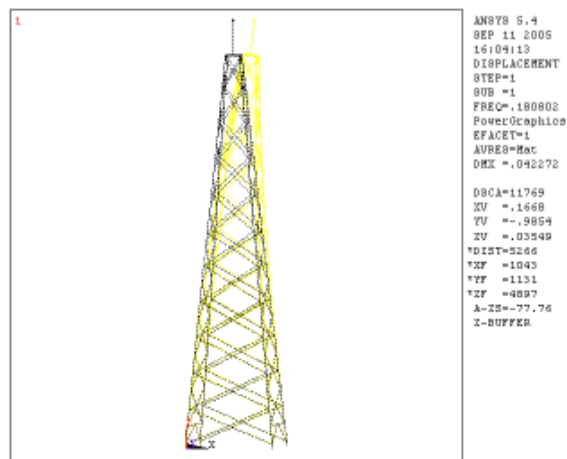


Figura 3.44 - 1º modo natural de vibração da torre reticulada – turbina eólica

Verifica-se que dentro da faixa de frequência de rotação da turbina eólica existem 81 frequências naturais de oscilação do conjunto.

A massa desbalanceada é a mesma utilizada para torre reticulada de sustentação, de 100gr com uma frequência de oscilação igual ao primeiro módulo natural de vibração do conjunto de 0,1808Hz, determinando assim a força harmônica que neste caso é a força centrípeta.

O modelo utilizado para a determinação das frequências naturais da torre é o mesmo modelo sendo que a força harmônica é aplicada diretamente no nó que representa a localização da turbina eólica, os passos para determinação dos esforços neste capítulo são apresentados no anexo (T).

Em função da resposta a força harmônica será possível obter as forças e momentos internos atuantes, para a determinação do coeficiente de segurança da torre tubular de sustentação segundo os critérios de falha utilizados neste trabalho.

A força harmônica que atua no sistema proposto é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de excitação, ou seja, as rotações do rotor da turbina eólica, e obtida segundo a equação 3.75 que surge devido à massa desbalanceada no rotor na frequência de excitação igual à frequência natural de 0,1808Hz.

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = m_{\text{Desbalanceada}} \cdot r \cdot W^2 \quad (3.75)$$

Onde:

$m_{\text{Desbalanceada}}$: Massa desbalanceada;

r : Distância entre o centro de giração e o centro da massa da massa desbalanceada;

W : Velocidade angular obtida através da equação 3.76.

$$W = 2 \cdot \pi \cdot N_{\text{Rotação}} \quad (3.76)$$

Onde:

$N_{\text{Rotação}}$: Velocidade rotacional.

Utilizando a frequência natural de 0,1808Hz na equação 3.76 e substituindo na equação 3.75 considerando uma massa desbalanceada de 100gr a uma distância de 2,675m do centro de giração.

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = m_{\text{Desbalanceada}} \cdot r \cdot (2 \cdot \pi \cdot N_{\text{Rotação}})^2$$

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = 0,1\text{Kg} \cdot 2,675\text{m} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,1808\text{RPS})^2$$

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = 0,345\text{N}$$

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = m_{\text{Desbalanceada}} \cdot r \cdot W^2 \quad (3.77)$$

Onde:

$m_{\text{Desbalanceada}}$: Massa desbalanceada;

r : Distância entre o centro de giração e o centro da massa da massa desbalanceada;

W : Velocidade angular;

$$W = 2.\pi.N_{\text{Rotação}} \quad (3.78)$$

Onde:

$N_{\text{Rotação}}$: Velocidade rotacional.

Utilizando a frequência natural de 0,1808Hz na equação 3.78 e substituindo na equação 3.77 considerando uma massa desbalanceada de 100gr a uma distância de 2,675m do centro de giração.

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = m_{\text{Desbalanceada}} . r . (2.\pi.N_{\text{Rotação}})^2$$
$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = 0,1\text{Kg} . 2,675\text{m} . (2.\pi . 0,1808\text{RPS})^2$$
$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = 0,345\text{N}$$

Os passos necessários para a obtenção das forças e momentos internos encontram-se no anexo (P).

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

A figura 3.45 mostra os deslocamentos sofridos pelos elementos constituintes da torre de sustentação reticulada.

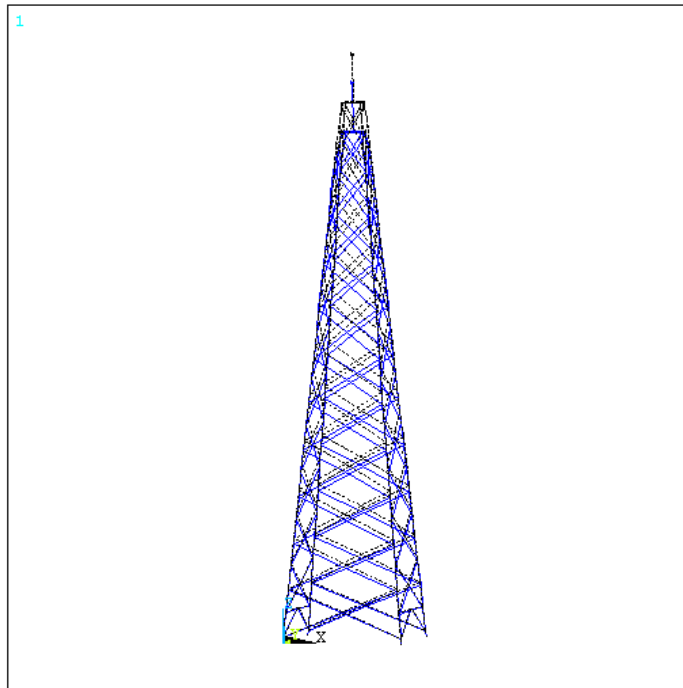


Figura 3.45 – Força harmônica

O elemento 127, cantoneira 44,45x44,45x4,76mm com 628mm de comprimento, apresenta o deslocamento máximo sofrido pelos elementos constituintes da torre anemométrica de 0,55563E-02mm.

Aplicando a equação 3.74 determina-se o coeficiente de segurança da torre quando não se encontra sob ação do vento.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}} \cdot L}{E \cdot \delta} \quad (3.74)$$

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210 \text{ N/mm}^2 \cdot 628 \text{ mm}}{205 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,0056 \text{ mm}}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 115$$

Aplicando os mesmos procedimentos na análise estrutural desenvolvida anteriormente determinamos os coeficientes de segurança para cada elemento constituinte da torre reticulada de sustentação, segundo os critérios de falha por fadiga, anexo (Q) com valor mínimo de segurança igual a 910,4 e falha por flambagem, anexo (R) com valor mínimo de segurança igual a 1403.

3.5 TORRE TUBULAR DE SUSTENTAÇÃO

As torres do tipo tubular para sustentação de turbinas eólicas, como mostra a figura 3.46, são as mais utilizadas no mundo tanto por aspectos estéticos como por aspectos de proteção de operadores contra condições adversas de tempo e temperatura.

Portanto será apresentada a análise estrutural para este tipo de torre, para as mesmas condições utilizadas na torre reticulada de sustentação.



Figura 3.46 - Conjunto torre tubular de sustentação.e turbina eólica.

Segundo o fabricante da turbina eólica, a haste tubular de sustentação deverá possuir um diâmetro externo de 377mm (14,84in), comercialmente encontramos tubos de 14in e 16in não possuindo assim no mercado tubos de 14,84in, portanto será utilizada uma haste tubular (aço 1020) com diâmetro nominal 16in Schedule n^o 40 com suas características apresentadas na tabela 3.30.

Tabela 3.30 – Perfil tubular 16in

Diâmetro externo [mm]	Diâmetro interno [mm]	Peso / metro [Kg/m]	Área [mm ²]	Momento de inércia [mm ⁴]
406,4	381	114	15710	304,5.10 ⁶

As forças externas atuantes sobre a estrutura da torre:

- ⇒ Força devido ao peso próprio da estrutura;
- ⇒ Força devida ação do vento sobre a estrutura;
- ⇒ Força devida ação da turbina eólica sobre a estrutura.

➤ Força devido ao peso próprio da torre

Utilizando uma torre tubular de sustentação com uma altura de 12m, e considerando um coeficiente de segurança para compensar o material que será utilizado para a base da turbina e outros de 1%.

$$FP_{\text{Torre}} = 1,01 \cdot (\text{Massa total}) \cdot g \quad (3.79)$$

$$FP_{\text{Torre}} = 13540,5N$$

➤ Força devida ação do vento sobre a torre

A componente da força global na direção do vento, força de arrasto da torre tubular de sustentação, Fa_{Torre} , é obtida pela seguinte equação 3.80.

$$Fa_{\text{Torre}} = Ca_{\text{Torre}} \cdot q_{\text{Vento}} \cdot Ae_{\text{Torre}} \quad (3.80)$$

Onde:

Ca_{Torre} : Coeficiente de arrasto da torre;

Ae_{Torre} : Área frontal efetiva da torre;

q_{Vento} : Pressão dinâmica do vento, determinada no item 3.3:

$$q_{\text{Vento}} = 1068,625 \text{ N/m}^2$$

⇒ Determinação do coeficiente de arrasto da torre tubular de sustentação ($C_{a_{\text{Torre}}}$)

Para torres tubulares de sustentação, o valor do coeficiente de arrasto é obtido em função do NÚMERO de REYNOLDS, como mostra a figura 3.47:

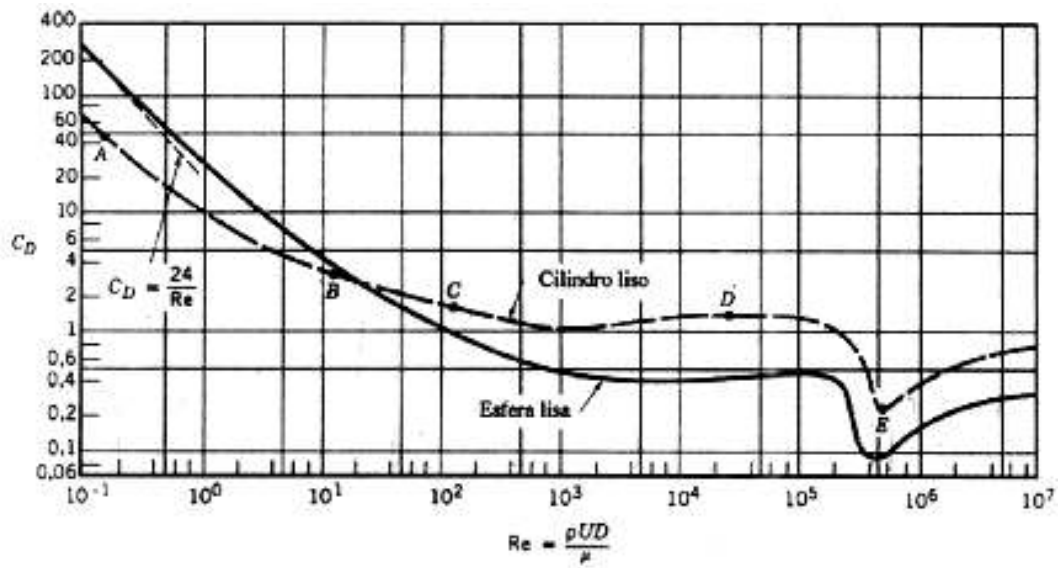


Figura 3.47 - Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para cilindros e esferas com superfícies lisas (Munson, 1997).

$$Re = \frac{U \cdot D_{\text{Torre}}}{\nu} \quad (3.81)$$

Onde:

U: Velocidade do vento: 50m/s;

D_{Torre} : Diâmetro da torre tubular de sustentação: 406,4mm;

ν : Viscosidade cinemática do ar na temperatura indicada (25^oC): $1,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$Re = 1,21 \cdot 10^6$$

Substituindo o valor calculado de “Re” encontrado na figura 3.47 determina-se o coeficiente de arrasto, Ca_{Torre} para torre tubular de sustentação:

$$CD_{Torre} = Ca_{Torre} = 0,5$$

Substituindo o valor encontrado do coeficiente de arraste na equação 3.80 determina-se o valor da força devida à ação do vento.

$$Fa_{Torre} = \left(0,5 \cdot 0,613 \cdot (41,7525 \text{ m/s})^2 \cdot (12000 \cdot 406,4) \cdot \text{mm}^2\right) \frac{\text{m}^2}{1000000 \text{ mm}^2}$$
$$Fa_{Torre} = 2605,74 \text{ N}$$

➤ Força devida ação da turbina eólica sobre a torre

O cálculo das forças atuantes na torre tubular de sustentação devido à turbina eólica são apresentados no item 3.2.1.3.

A tabela 3.21 apresenta as forças e momentos que surgem no topo da torre reticulada de sustentação devido à turbina eólica, que é a mesma que se aplica a torre tubular de sustentação.

3.5.1 Análise estrutural da torre tubular de sustentação

Para torre tubular de sustentação a determinação das forças, momentos e deslocamentos internos serão obtidos através do modo analítico, sendo que para análise estrutural devido à ação de uma força harmônica será desenvolvida utilizando o programa Ansys 5.4.

➤ Determinação das reações na base da torre tubular de sustentação

As forças e momentos que atuam na torre tubular de sustentação são aplicados com mostra a figura 3.48.

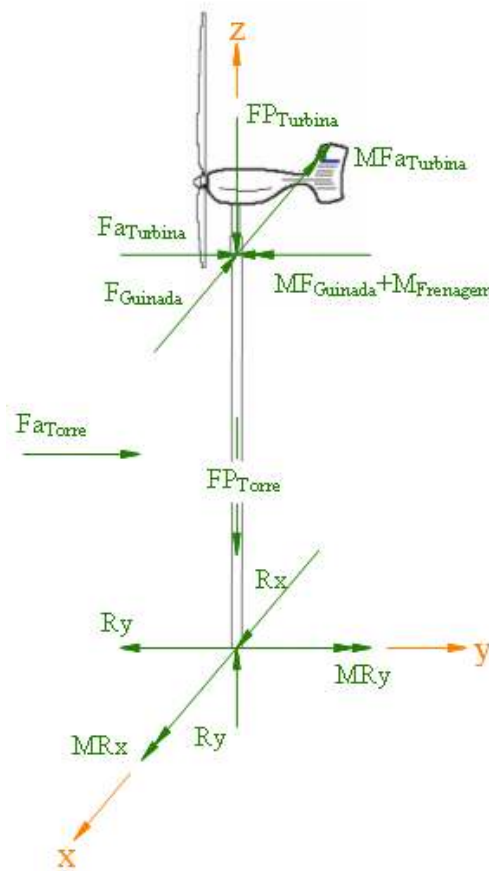


Figura 3.48 - Diagrama de corpo livre da torre tubular de sustentação

Condição de equilíbrio:

$$\sum F_x = 0 \quad (3.82)$$

$$R_x - F_{\text{Guinada}} = 0$$

$$R_x = 1384\text{N}$$

$$\sum F_y = 0 \quad (3.83)$$

$$-R_y + F_{a_{\text{Turbina}}} + F_{a_{\text{Torre}}} = 0$$

$$R_y = 4320\text{N} + 2605,74\text{N}$$

$$R_y = 6925,74\text{N}$$

$$\sum F_z = 0 \quad (3.84)$$

$$R_z - F_{P_{Torre}} - F_{P_{Turbina}} = 0$$

$$R_z = 13540,5N + 2744N$$

$$R_z = 16284,5N$$

$$\sum M_x = 0 \quad (3.85)$$

$$M_{R_x} - 6m.F_{a_{Torre}} - 12m.F_{a_{Turbina}} - M.F_{a_{Turbina}} = 0$$

$$M_{R_x} - 6m.2605,74N - 12m.4320N - 3585,6N.m = 0$$

$$M_{R_x} = 71060,04N.m$$

$$\sum M_y = 0 \quad (3.86)$$

$$M_{R_y} - M_{F_{Guinagem}} - M_{F_{Frenagem}} - 12m.F_{Guinada} = 0$$

$$M_{R_y} - 1148,72N.m - 2262,31N.m - 12m.1384N = 0$$

$$M_{R_y} = 20019,03N.m$$

A direção, módulo e sentido da força e momento resultantes da torre tubular de sustentação, como mostra a figura 3.49:

$$R_{xy} = 7062,7N$$

$$\beta_{xy} = 11,3^\circ$$

$$M_{R_{xy}} = 73826,1N.m$$

$$\alpha_{xy} = 74,3^\circ$$

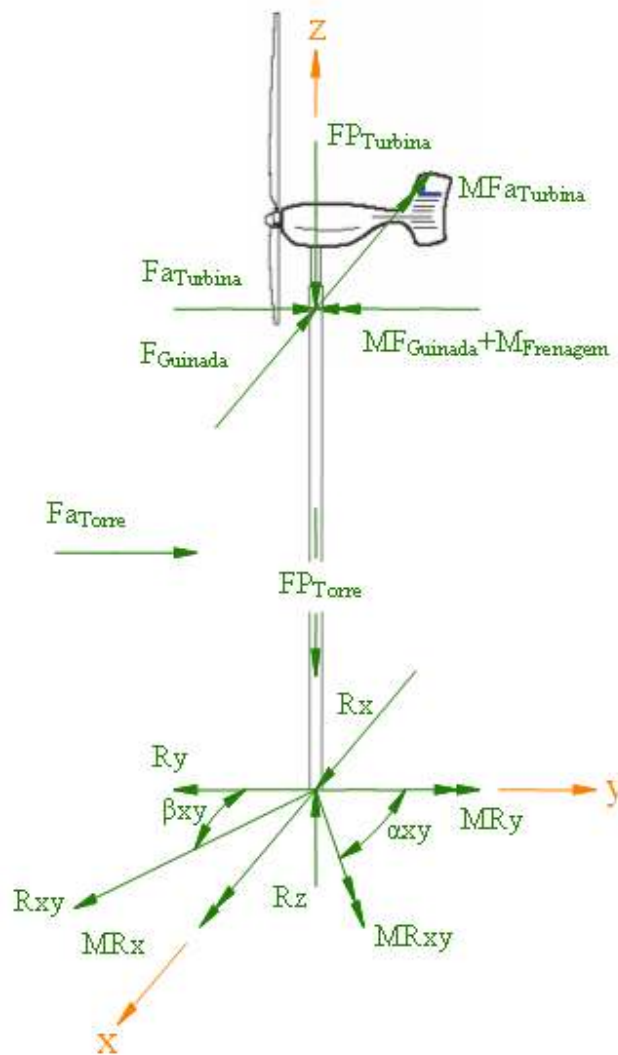


Figura 3.49 - Direção das forças e momentos de reação da torre tubular de sustentação.

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

O coeficiente de segurança devido à deformação sofrida pela torre tubular é obtido em função da tensão que surge devido ao momento fletor resultante através da equação 3.87.

$$\sigma_{\text{Deformação}} = \frac{MR_{xy} \cdot c}{I} \quad (3.87)$$

$$\sigma_{\text{Deformação}} = \frac{32 \cdot (406,4\text{mm}) \cdot (73826,1\text{N.m}) \cdot 1000\text{mm}}{\pi \cdot ((406,4\text{mm})^4 - (381\text{mm})^4)} \cdot \frac{1}{1\text{m}}$$

$$\sigma_{\text{Deformação}} = 49,22\text{N/mm}^2$$

Aplicando a equação 88 determina-se o coeficiente de segurança da torre para pior situação, no caso para o deslocamento máximo transversal devido ao momento fletor resultante.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}}}{\sigma_{\text{Deformação}}} \quad (3.88)$$

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210\text{N/mm}^2}{49,22\text{N/mm}^2}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 4,3$$

Portanto, em função do critério de falha estrutural por deformação elástica, conclui-se que a torre tubular de sustentação apresenta um coeficiente de segurança mínimo de 4,3 aceitável devido à ação do momento fletor resultante não ocorrendo assim deformação plástica.

➤ Critério de falha estrutural devido à fadiga

Os coeficientes de segurança da torre tubular de sustentação são determinados através do teste de falha por fadiga, segundo a teoria de Von Mises-Goodman, para os planos “ α ” e “ β ” segundo as direções respectivamente “ α_{xy} ” e “ β_{xy} ”, uma vez que o ângulo existente entre eles é de aproximadamente 90^0 , como mostra a figura 3.50.

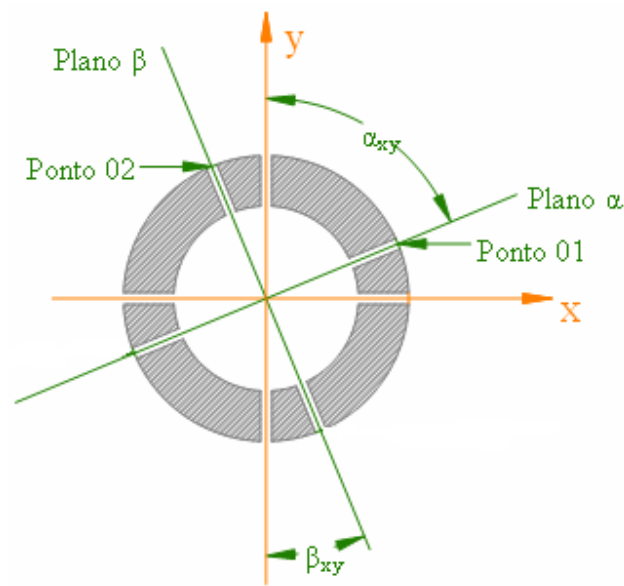


Figura 3.50 - Seção transversal da torre tubular de sustentação.

O material utilizado na montagem da torre é de aço 1020 que apresenta as seguintes características mecânicas:

- Limite de escoamento: 210N/mm^2 ;
- Módulo de elasticidade: 207.10^3N/mm^2 ;
- Coeficiente de Poisson: 0,292.

⇒ Coeficiente de segurança segundo plano α :

Com base nos resultados obtidos na determinação das reações, as seguintes tensões atuantes que surgem na torre tubular de sustentação, segundo o plano “ α ”:

- Tensão de compressão

A equação 3.89 define tensão de compressão atuante na torre tubular.

$$\sigma_{\text{Compressão.ST.01}} = \frac{-Rz}{\frac{\pi}{4} \cdot (\phi_{\text{Externo}}^2 - \phi_{\text{Interno}}^2)} \quad (3.89)$$

$$\sigma_{\text{Compressão.ST.01}} = \frac{-16284,5\text{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot ((406,4\text{mm})^2 - (381\text{mm})^2)}$$

$$\sigma_{\text{Compressão.ST.01}} = -1,04\text{N/mm}^2$$

- Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento aplicada na seção transversal da torre tubular de sustentação é obtida pela equação 3.90 (Beer, 1982).

$$\tau_{\text{Cisalhamento.ST.01}} = \frac{2 \cdot R_{xy}}{A_{S,T}} \quad (3.90)$$

Onde:

$A_{S,T}$: Área da seção transversal da torre tubular.

$$\tau_{\text{Cisalhamento.ST.01}} = \frac{4.7062,7\text{N}}{\pi \cdot \left(\left(\frac{406,4\text{mm}}{2} \right)^2 - \left(\frac{381\text{mm}}{2} \right)^2 \right)}$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento.ST.01}} = 0,9\text{N/mm}^2$$

Aplicando-se o teste de falha por fadiga para o ponto 01 da seção transversal da torre tubular de sustentação.

Tensões máxima e mínima no ponto 01 da seção transversal da torre tubular são obtidas pelas equações 3.91, 3.92, 3.93 e 3.94.

$$\sigma_{\text{Máxima.ST.01}} = \sigma_{\text{Compressão.ST.01}} \quad (3.91)$$

$$\sigma_{\text{Máxima.ST.01}} = -1,04\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Mínima.ST.01}} = \sigma_{\text{Compressão.ST.01}} \quad (3.92)$$

$$\sigma_{\text{Mínima.ST.01}} = -1,04\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{Máxima.ST.01}} = \tau_{\text{Cisalhante.ST01}} \quad (3.93)$$

$$\tau_{\text{Máxima.ST.01}} = 0,9\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{Mínima.ST.01}} = 0 \quad (3.94)$$

As tensões média e alternada normais aplicadas no ponto 01 da secção transversal da torre tubular de sustentação são obtidas pelas equações 3.95 e 3.96 respectivamente:

$$\sigma_{\text{Media.ST.01}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.ST.01}} + \sigma_{\text{Mínima.ST.01}}}{2} \quad (3.95)$$

$$\sigma_{\text{Media.ST.01}} = \frac{-1,04\text{N/mm}^2 - 1,04\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\sigma_{\text{Media.ST.01}} = -1,04\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.ST.01}} - \sigma_{\text{Mínima.ST.01}}}{2} \quad (3.96)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}} = \frac{-1,04\text{N/mm}^2 - (-1,04\text{N/mm}^2)}{2}$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}} = 0$$

Em função das tensões média e alternada normais determina-se o espectro das tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular como mostra a figura 3.51.

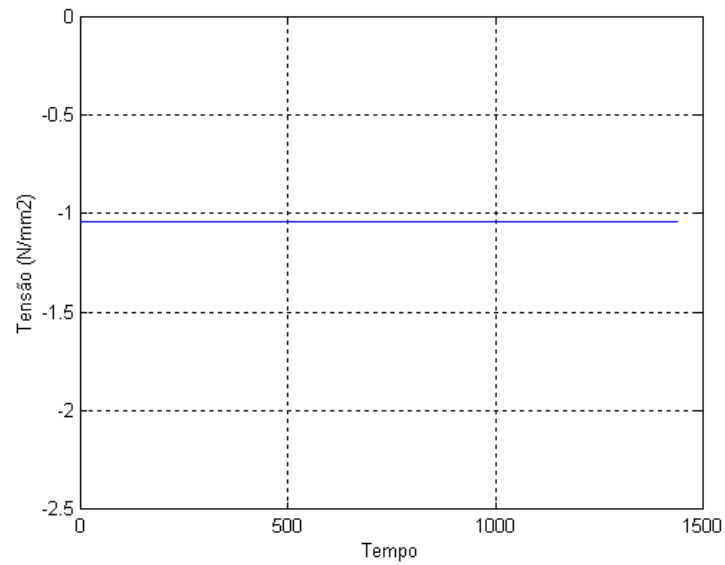


Figura 3.51 - Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular.

As tensões média e alternada cisalhantes aplicada na torre tubular são obtidas pelas equações 3.97 e 3.98 respectivamente:

$$\tau_{\text{Média.ST.01}} = \frac{\tau_{\text{Máxima.ST.01}} + \tau_{\text{Mínima.ST.01}}}{2} \quad (3.97)$$

$$\tau_{\text{Média.ST.01}} = 0,45\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{Alternada.ST.01}} = \frac{\tau_{\text{Máxima.ST.01}} - \tau_{\text{Mínima.ST.01}}}{2} \quad (3.98)$$

$$\tau_{\text{Alternada.ST.01}} = 0,45\text{N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada cisalhantes determina-se o espectro das tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular como mostra a figura 3.52.

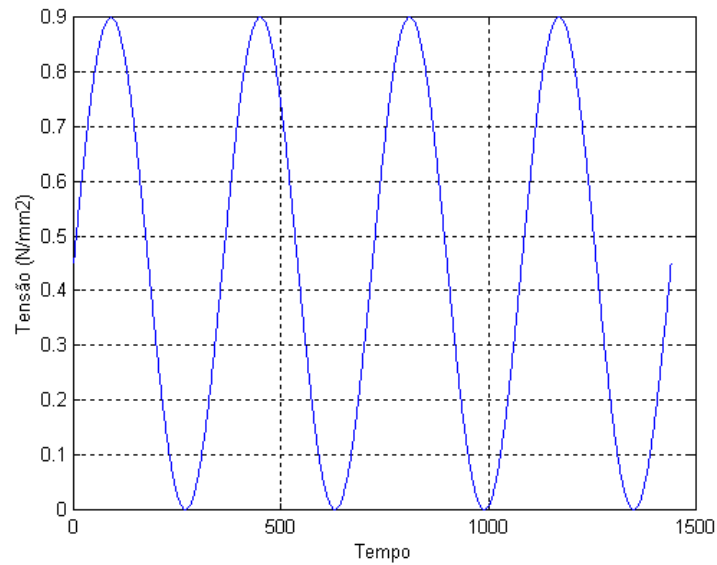


Figura 3.52 - Espectro de tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular

- Teoria de Von Mises:

As tensões média e alternada ideais para secção transversal da torre tubular são obtidas através das equações 3.99 e 3.100.

$$\sigma_{\text{Média.ST.01}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Média.ST.01}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Média.ST.01}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.99)$$

$$\sigma_{\text{Média.ST.01}}^{\text{Ideal}} = \left((-1,04 \text{ N/mm}^2)^2 + 3 \cdot (0,45 \text{ N/mm}^2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{\text{Média.ST.01}}^{\text{Ideal}} = 1,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Alternada.ST.01}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Alternada.ST.01}}^2 \right) \quad (3.100)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}}^{\text{Ideal}} = \left((0)^2 + 3 \cdot (0,45 \text{ N/mm}^2)^2 \right)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.01}}^{\text{Ideal}} = 0,78 \text{ N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada ideais determina-se o espectro das tensões idéias atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular como mostra a figura 3.53.

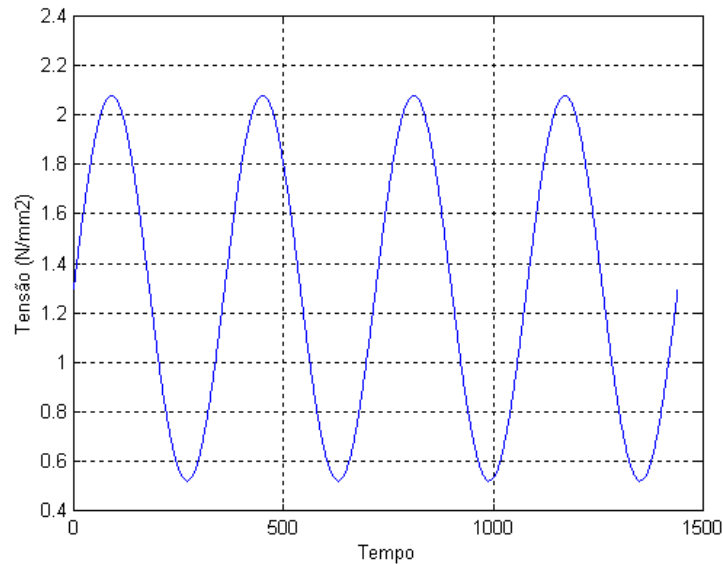


Figura 3.53 - Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular

- Teoria de Goodman:

O coeficiente de segurança para o ponto 01 da secção transversal da torre tubular é obtido através da equação 3.101.

$$\frac{\sigma_{\text{Média.ST.01}}^{\text{Ideal}}}{S_U} + \frac{\sigma_{\text{Alternada.ST.01}}^{\text{Ideal}}}{S_n 10^6} = \frac{1}{N_{\text{ST.01}}} \quad (3.101)$$

$$\frac{1,3\text{N/mm}^2}{380\text{N/mm}^2} + \frac{0,78\text{N/mm}^2}{190\text{N/mm}^2} = \frac{1}{N_{\text{ST.01}}}$$

$$N_{\text{ST.01}} = 132,8$$

A torre tubular com relação ao teste de fadiga para o ponto 01 da secção transversal apresenta resistência aos esforços a qual é submetida de 132,8.

⇒ Coeficiente de segurança segundo plano β

Com base nos resultados obtidos na determinação das reações, as seguintes tensões atuantes que surgem na torre tubular de sustentação, segundo o plano β :

- Tensão de compressão:

A tensão de compressão é definida pela equação 3.102.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Compressão.ST.02}} &= \frac{-R_z}{\frac{\pi}{4} \cdot (\phi_{\text{Externo}}^2 - \phi_{\text{Interno}}^2)} & (3.102) \\ \sigma_{\text{Compressão.ST.02}} &= \frac{-16284,5\text{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot ((406,4\text{mm})^2 - (381\text{mm})^2)} \\ \sigma_{\text{Compressão.ST.02}} &= -1,04\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

- Tensão de flexão:

A tensão de flexão é definida pela equação 3.103.

$$\sigma_{\text{Flexão.ST.02}} = \frac{MR_{xy} \cdot c}{I_{\text{Torre}}} \quad (3.103)$$

Onde:

c : Distância do ponto mais afastado da circunferência com relação à linha neutra de tensão.

I_{Torre} : Momento de inércia da seção transversal.

$$c = \frac{\phi_{\text{Externo}}}{2} \quad (3.104)$$

$$I_{\text{Torre}} = \frac{\pi \cdot \phi_i^4}{64} \quad (3.105)$$

$$\sigma_{\text{Flexão.ST.02}} = \frac{\pm 32 \cdot \phi_{\text{Externo}} \cdot MR_{xy}}{\pi \cdot \phi_i^4} \quad (3.106)$$

$$\sigma_{\text{Flexão.ST.02}} = \frac{\pm 32 \cdot \phi_{\text{Externo}} \cdot MR_{xy}}{\pi \cdot (\phi_{\text{Externo}}^4 - \phi_{\text{Interno}}^4)}$$

$$\sigma_{\text{Flexão.ST.02}} = \frac{\pm 32 \cdot (406,4\text{mm}) \cdot (73826,1\text{N.m})}{\pi \cdot ((406,4\text{mm})^4 - (381\text{mm})^4)} \cdot \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}}$$

$$\sigma_{\text{Flexão.ST.02}} = \pm 49,22\text{N/mm}^2$$

Tensões máxima e mínima aplicada no ponto “i” da seção transversal da torre tubular são obtidas pelas equações 3.107 e 3.108.

$$\sigma_{\text{Máxima.ST.02}} = \sigma_{\text{Flexão.ST.02}} - \sigma_{\text{Compressão.ST.02}} \quad (3.107)$$

$$\sigma_{\text{Máxima.ST.02}} = 49,22\text{N/mm}^2 - 1,04\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Máxima.ST.02}} = 48,18\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Mínima.ST.02}} = \sigma_{\text{Flexão.ST.02}} + \sigma_{\text{Compressão.ST.02}} \quad (3.108)$$

$$\sigma_{\text{Mínima.ST.02}} = -49,22\text{N/mm}^2 - 1,04\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Mínima.ST.02}} = -50,26\text{N/mm}^2$$

Tensões média e alternada aplicada no ponto 02 da seção transversal da torre tubular são obtidas pelas equações 3.109 e 3.110 respectivamente.

$$\sigma_{\text{Media.ST.02}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.ST.02}} + \sigma_{\text{Mínima.ST.02}}}{2} \quad (3.109)$$

$$\sigma_{\text{Media.ST.02}} = \frac{48,18\text{N/mm}^2 - 50,26\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\sigma_{\text{Média.ST.02}} = -1,04\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.ST.02}} - \sigma_{\text{Mínima.ST.02}}}{2} \quad (3.110)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}} = \frac{48,18\text{N/mm}^2 - (-50,26\text{N/mm}^2)}{2}$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}} = 49,22\text{N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada normais determina-se o espectro das tensões normais atuantes no ponto 02 da secção transversal da torre tubular como mostra a figura 3.54.

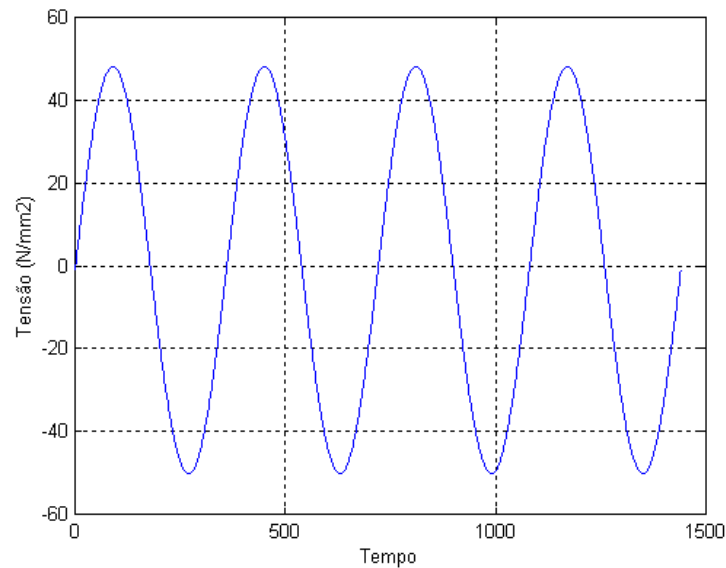


Figura 3.54 - Espectro de tensões normais atuantes no ponto 02 da secção transversal da torre

- Teoria de Von Mises

A tensão média e alternada ideal para o ponto 02 da secção transversal da torre tubular são obtidas através das equações 3.111 e 3.112:

$$\sigma_{\text{Média.ST.02}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Média.ST.02}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Média.ST.02}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.111)$$

$$\sigma_{\text{Média.ST.02}}^{\text{Ideal}} = \left((-1,04 \text{ N/mm}^2)^2 + 3 \cdot (0)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{\text{Média.ST.02}}^{\text{Ideal}} = 1,04 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Alternada.ST.02}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Alternada.ST.02}}^2 \right) \quad (3.112)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}}^{\text{Ideal}} = \left((49,22 \text{ N/mm}^2)^2 + 3 \cdot (0)^2 \right)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.ST.02}}^{\text{Ideal}} = 49,22 \text{ N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada ideais determina-se o espectro das tensões ideais atuante no ponto 02 da secção transversal da torre tubular como mostra a figura 3.55.

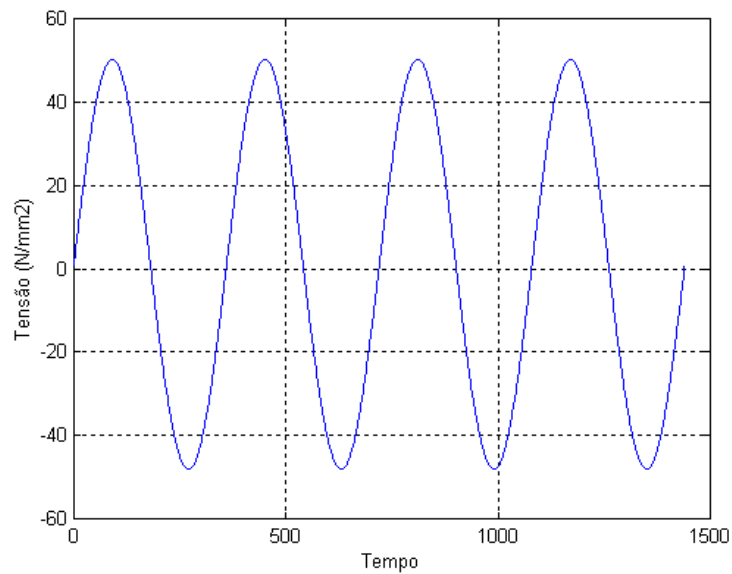


Figura 3.55 - Espectro de tensões normais ideais atuantes no ponto 02 da secção transversal da torre

- Teoria de Goodman:

O coeficiente de segurança para o ponto 02 da seção transversal da torre tubular é obtido através da equação 3.113.

$$\frac{\sigma_{\text{Média.ST.02}}^{\text{Ideal}}}{S_U} + \frac{\sigma_{\text{Alternada.ST.02}}^{\text{Ideal}}}{S_n \cdot 10^6} = \frac{1}{N_{\text{ST.02}}} \quad (3.113)$$

$$\frac{1,04\text{N/mm}^2}{380\text{N/mm}^2} + \frac{49,22\text{N/mm}^2}{190\text{N/mm}^2} = \frac{1}{N_{\text{ST.02}}}$$

$$N_{\text{ST.02}} = 3,82$$

A torre tubular com relação ao teste de fadiga para o ponto 02 da seção transversal apresenta resistência aos esforços a qual é submetida de 3,82.

➤ Critério de falha por flambagem da torre

O teste é feito baseando-se nas expressões Euler, se o índice de esbeltez para cada elemento da torre for maior do que o índice de esbeltez de Euler, aplicando a equação 3.58.

$$\lambda_{\text{Euler}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{207 \cdot 10^3 \text{N/mm}^2}{210 \text{N/mm}^2}}$$

$$\lambda_{\text{Euler}} = 98,63$$

Índice de esbeltez de cada elemento é definido através da relação entre o comprimento de flambagem (L_{Elemento}) e o raio de giração mínimo da seção transversal da peça expresso pela equação 3.60, sendo que, o momento de inércia da torre é de $304,5 \cdot 10^6 \text{mm}^4$ e a área igual a 15700mm^2 .

$$\lambda_{\text{Torre}} = 12000 \text{mm} \cdot \sqrt{\frac{15700 \text{mm}^2}{304,5 \cdot 10^6 \text{mm}^4}}$$

$$\lambda_{\text{Torre}} = 86,17$$

⇒ Como $\lambda_{\text{Elemento}} < \lambda_{\text{Euler}}$:

Utiliza-se a condição de flambagem em barras no campo das deformações *Elasto-Plásticas* que ocorre quando a tensão de flambagem ultrapassa a tensão de proporcionalidade do material, situação em que a fórmula de Euler perde a sua validade.

$$\sigma_{\text{Fl}} = 240 - 0,0046 \cdot \lambda^2 \quad \text{Para } \lambda \leq 105 \quad (3.114)$$

$$\sigma_{\text{Fl}} = \frac{\pi \cdot E}{\lambda^2} \quad \text{Para } \lambda > 105 \quad (3.115)$$

Portanto:

$$\sigma_{\text{Fl}} = 240 - 0,0046 \cdot (86,17)^2 \quad (3.116)$$

$$\sigma_{\text{Fl}} = 205,844 \text{ N/mm}^2$$

Coefficiente de segurança da torre segundo o critério de falha por flambagem, segundo critério é expresso pela equação 3.117:

$$N_{\text{Flambagem.Torre}} = \frac{\sigma_{\text{Fl.Torre}}}{\sigma_{\text{compressão.Torre}}} \quad (3.117)$$

$$N_{\text{Flambagem.Torre}} = \frac{205,844 \text{ N/mm}^2}{1,04 \text{ N/mm}^2}$$

$$N_{\text{Flambagem.Torre}} = 198$$

A torre tubular com relação ao critério de falha estrutural com relação a flambagem obteve um coeficiente de segurança de 198 satisfazendo assim o mínimo aceito para evitar o colapso estrutural.

3.5.2 Análise estrutural devido à ação de uma força harmônica

Esta análise baseia-se na determinação das forças, momentos e deformações internas que surgem na torre quando submetida a uma força harmônica devido a uma massa desbalanceada na extremidade das pás do rotor da turbina eólica na frequência de oscilação igual à primeira frequência natural do conjunto torre tubular – turbina eólica.

Para isto é necessário investigar se a primeira frequência natural do conjunto encontra-se dentro da faixa de rotação do rotor da turbina eólica 0 a 4,42Hz.

As frequências são determinadas por intermédio do software Ansys 5.4 que se baseia na teoria de elementos finitos. A modelagem do conjunto torre tubular-turbina eólica encontra-se no anexo (S) onde são utilizados os elementos do tipo “Beam 3D elastic 4” e “Mass 3D mass 21”, para representar respectivamente a haste tubular de sustentação e a turbina eólica, respeitando as características individuais de cada elemento da estrutura, os resultados obtidos para as seis primeiras frequências naturais são apresentadas na tabela 3.31.

Tabela 3.31 - Frequências naturais da torre tubular de sustentação

Modo	Frequência (Hz)
1	1.4744
2	1.4744
3	9.5377
4	9.5377
5	27.208
6	27.208

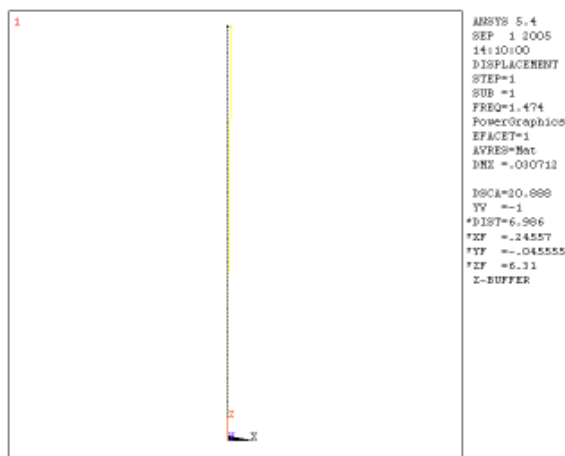


Figura 3.56 - 1º modo natural de vibração do conjunto torre tubular – turbina eólica

Verifica-se que dentro da faixa de frequência de rotação da turbina eólica existem 2 frequências naturais de oscilação do conjunto.

A massa desbalanceada é a mesma utilizada para torre reticulada de sustentação, de 100gr com uma frequência de oscilação igual ao primeiro módulo natural de vibração do conjunto de 1,4744Hz, determinando assim a força harmônica que neste caso é a força centrípeta.

O modelo utilizado para a determinação das frequências naturais da torre é o mesmo modelo sendo que a força harmônica é aplicada diretamente no nó que representa a localização da turbina eólica, os passos para determinação dos esforços neste capítulo são apresentados no anexo (T).

Em função da resposta a força harmônica será possível obter as forças e momentos internos atuantes, para a determinação do coeficiente de segurança da torre tubular de sustentação segundo os critérios de falha utilizados neste trabalho.

A força harmônica que atua no sistema proposto é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de excitação, ou seja, as rotações do rotor da turbina eólica, e obtida segundo a equação 3.118 que surge devido à massa desbalanceada no rotor na frequência de excitação igual à frequência natural de 1,4744Hz.

$$F_{\text{Centripeta.Rotor}} = m_{\text{Desbalanceada}} \cdot r \cdot W^2 \quad (3.118)$$

Onde:

$m_{\text{Desbalanceada}}$: Massa desbalanceada;

r: Distancia entre o centro de giração e o centro da massa da massa desbalanceada;

W: Velocidade angular:

$$W = 2 \cdot \pi \cdot N_{\text{Rotação}} \quad (3.119)$$

Onde:

$N_{\text{Rotação}}$: Velocidade rotacional.

A freqüência natural de 1,4744Hz na equação (3.119), substituindo na equação (3.118) considerando uma massa desbalanceada de 100gr a uma distância de 2,675m do centro de giração:

$$\begin{aligned} F_{\text{Centripeta.Rotor}} &= m_{\text{Desbalanceada}} \cdot r \cdot (2 \cdot \pi \cdot N_{\text{Rotação}})^2 \\ F_{\text{Centripeta.Rotor}} &= 0,1\text{Kg} \cdot 2,675\text{m} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1,4744\text{RPS})^2 \\ F_{\text{Centripeta.Rotor}} &= 22,96\text{N} \end{aligned}$$

Os resultados obtidos com o auxilio do software na freqüência de 1,4744Hz:

Força axial: 16284,5N;

Força cortante Fx: 2655,8N;

Momento fletor My: 2647,8N.m.

➤ Critério de falha estrutural por deformação elástica

O coeficiente de segurança devido à deformação sofrida pela torre tubular é obtido em função da tensão que surge devido ao momento fletor resultante na torre tubular de sustentação através da equação 3.120.

$$\sigma_{\text{Deformação}} = \frac{MR_{xy}.c}{I} \quad (3.120)$$

$$\sigma_{\text{Deformação}} = \frac{32.(406,4\text{mm})(2647,8\text{N.m})}{\pi.((406,4\text{mm})^4 - (381\text{mm})^4)} \cdot \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}} \quad (3.121)$$

$$\sigma_{\text{Deformação}} = 1,8\text{N/mm}^2$$

Aplicando a equação 3.122 determina-se o coeficiente de segurança da torre para pior situação, no caso para o deslocamento máximo transversal devido ao momento fletor resultante.

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}}}{\sigma_{\text{Deformação}}} \quad (3.122)$$

$$N_{\text{Deformação}} = \frac{210\text{N/mm}^2}{1,8\text{N/mm}^2}$$

$$N_{\text{Deformação}} = 117$$

Portanto, em função do critério de falha estrutural por deformação elástica, conclui-se que a torre tubular de sustentação apresenta um coeficiente de segurança mínimo de 117 aceitável devido à ação do momento fletor resultante não ocorrendo assim deformação plástica.

➤ Critério de falha estrutural devido à fadiga

Em função das forças e momentos que surgem na base da torre tubular devido à ação de uma força harmônica segundo programa Ansys 5.4.

Portanto surgem tensões de compressão, devido ao peso do conjunto e momento fletor, e tensões de cisalhamento devido à força cortante.

⇒ Tensão de compressão:

A tensão de compressão é definida pela equação 3.127.

$$\sigma_{\text{Compressão.Elemento.01}} = \frac{-Rz}{\frac{\pi}{4} \cdot (\phi_{\text{Externo}}^2 - \phi_{\text{Interno}}^2)} \quad (3.127)$$

$$\sigma_{\text{Compressão.Elemento.01}} = \frac{-16284,5N}{\frac{\pi}{4} \cdot ((406,4\text{mm})^2 - (381\text{mm})^2)}$$

$$\sigma_{\text{Compressão.Elemento.01}} = -1,04N / \text{mm}^2$$

⇒ Tensão de flexão:

A tensão de flexão é definida pela equação 3.128.

$$\sigma_{\text{Flexão.i.Elemento.01}} = \frac{M_{i.\text{Elemento.01}} \cdot c}{I_{\text{Torre}}} \quad (3.128)$$

Onde:

c: Distância do ponto mais afastado da circunferência com relação à linha neutra de tensão.

I_{Torre} : Momento de inércia da secção transversal.

$$c = \frac{\phi_{\text{Externo}}}{2} \quad (3.129)$$

$$I_{\text{Torre}} = \frac{\pi \cdot \phi_i^4}{64} \quad (3.130)$$

Tensões flexão máxima e mínima no elemento 01 da torre tubular:

$$\sigma_{i.\text{Flexão.Elemento.01}} = \frac{\pm 32 \cdot \phi_{\text{Externo}} \cdot M_{\text{Elemento.01}}}{\pi \cdot \phi_i^4} \quad (3.131)$$

$$\sigma_{i.\text{Flexão.Elemento.01}} = \frac{32 \cdot \phi_{\text{Externo}} \cdot M_{\text{Elemento.01}}}{\pi \cdot (\phi_{\text{Externo}}^4 - \phi_{\text{Interno}}^4)}$$

$$\sigma_{i,\text{Flexão.Elemento.01}} = \frac{\pm 32 \cdot (406,4\text{mm}) \cdot (2647,8\text{N.m}) \cdot 1000\text{mm}}{\pi \cdot ((406,4\text{mm})^4 - (381\text{mm})^4)} \cdot \frac{1}{1\text{m}}$$

$$\sigma_{i,\text{Flexão.Elemento.01}} = \pm 1,77\text{N/mm}^2$$

As tensões máxima e mínima normais aplicadas no ponto 01 da secção transversal da torre tubular de sustentação são obtidas pelas equações 3.132 e 3.133 respectivamente:

$$\sigma_{\text{MáximaElemento.01}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.Flexão.Elemento.01}} + \sigma_{\text{Compressão.Elemento.01}}}{2} \quad (3.132)$$

$$\sigma_{\text{Máxima.Elemento.01}} = \frac{0,73\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\sigma_{\text{Máxima.Elemento.01}} = 0,365\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{MínimaElemento.01}} = \frac{\sigma_{\text{Mínima.Flexão.Elemento.01}} - \sigma_{\text{Compressão.Elemento.01}}}{2} \quad (3.133)$$

$$\sigma_{\text{Mínima.Elemento.01}} = \frac{-2,81\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\sigma_{\text{Mínima.Elemento.01}} = -1,405\text{N/mm}^2$$

As tensões média e alternada normais aplicadas no ponto 01 da secção transversal da torre tubular de sustentação são obtidas pelas equações 3.134 e 3.135 respectivamente:

$$\sigma_{\text{MediaElemento.01}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.Elemento.01}} + \sigma_{\text{Mínima.Elemento.01}}}{2} \quad (3.134)$$

$$\sigma_{\text{Media.Elemento.01}} = \frac{0,365\text{N/mm}^2 - 1,405\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\sigma_{\text{Média.Elemento.01}} = -0,52\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}} = \frac{\sigma_{\text{Máxima.Elemento.01}} - \sigma_{\text{Mínima.Elemento.01}}}{2} \quad (3.135)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}} = \frac{0,365\text{N/mm}^2 - (-1,405\text{N/mm}^2)}{2}$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}} = 0,885\text{N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada normais determina-se o espectro das tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal como mostra a figura 3.57.

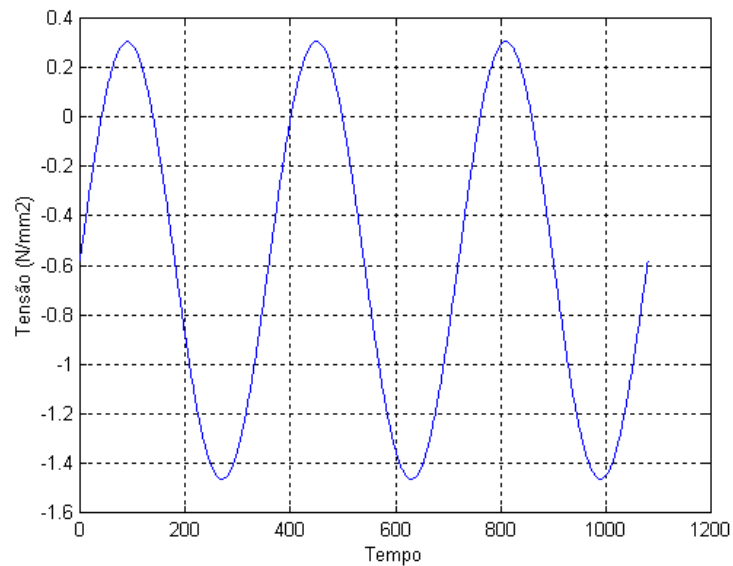


Figura 3.57 - Espectro de tensões normais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular devido à força harmônica

⇒ Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento é definida pela equação 3.136.

$$\tau_{\text{Cisalhamento.i.Elemento.01}} = \frac{2 \cdot V_{i.\text{Elemento.01}}}{A_{\text{Torre}}} \quad (3.136)$$

Tensões máxima e mínima de cisalhamento no elemento 01 da torre tubular:

$$\tau_{\text{Cisalhamento.Máxima.Elemento.01}} = \frac{2 \cdot V_{\text{Máxima.Elemento.01}}}{\frac{\pi}{4} \cdot (\phi_{\text{Externo}}^2 - \phi_{\text{Interno}}^2)} \quad (3.137)$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento.Máxima.Elemento.01}} = \frac{2.2655,8\text{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot ((406,4\text{mm})^2 - (381\text{mm})^2)}$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento.Máxima.Elemento.01}} = 1,06\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{Cisalhamento.Mínima.Elemento.01}} = 0 \quad (3.138)$$

As tensões média e alternada cisalhantes aplicada na torre tubular são obtidas pelas equações 3.139 e 3.140 respectivamente:

$$\tau_{\text{MediaElemento.01}} = \frac{\tau_{\text{Cisalhante.Máxima.Elemento.01}} + \tau_{\text{Cisalhante.Mínima.Elemento.01}}}{2} \quad (3.139)$$

$$\tau_{\text{Media.Elemento.01}} = \frac{1,06\text{N/mm}^2}{2}$$

$$\tau_{\text{Média.Elemento.01}} = 0,53\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{Alternada.Elemento.01}} = \tau_{\text{Média.Elemento.01}} \quad (3.140)$$

Em função das tensões média e alternada cisalhantes determina-se o espectro das tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal como mostra a figura 3.58.

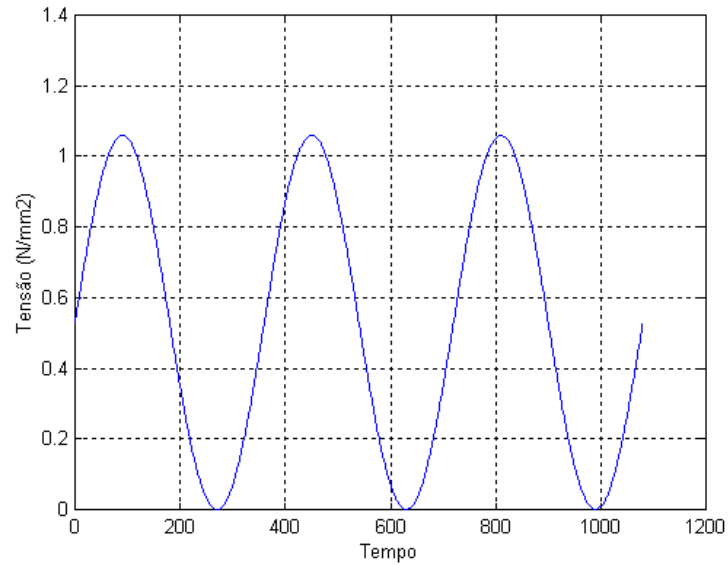


Figura 3.58 - Espectro de tensões cisalhantes atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular a força harmônica

⇒ Teoria de Von Mises

As tensões média e alternada ideais para secção transversal da torre tubular são obtidas através das equações 3.141 e 3.142:

$$\sigma_{\text{Média.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Média.Elemento.01}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Média.Elemento.01}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.141)$$

$$\sigma_{\text{Média.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = \left((-0,52 \text{ N/mm}^2)^2 + 3 \cdot (0,53 \text{ N/mm}^2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{\text{Média.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = 1,056 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = \left(\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{Alternada.Elemento.01}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.142)$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = \left((0,885 \text{ N/mm}^2)^2 + 3 \cdot (0,53 \text{ N/mm}^2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{\text{Alternada.Elemento.01}}^{\text{Ideal}} = 1,28 \text{ N/mm}^2$$

Em função das tensões média e alternada ideais determina-se o espectro das tensões ideais atuantes na torre tubular como mostra a figura 3.59.

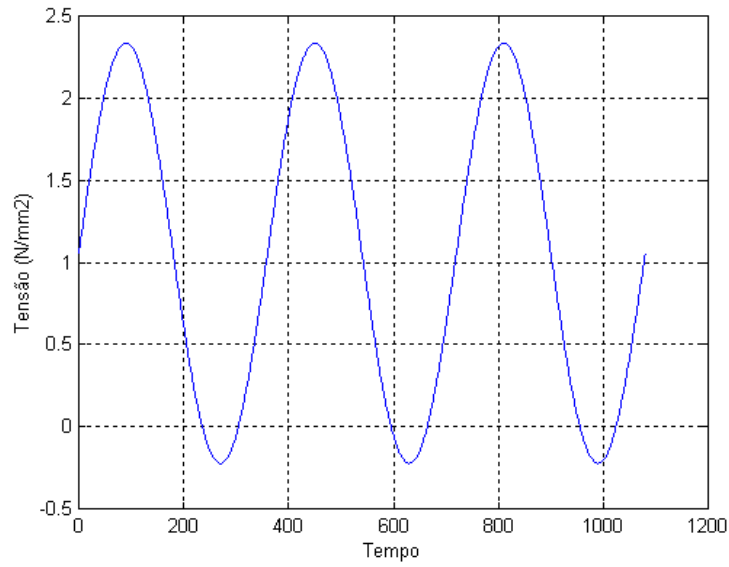


Figura 3.59 - Espectro de tensões ideais atuantes no ponto 01 da secção transversal da torre tubular a força harmônica

⇒ Teoria de Goodman

O coeficiente de segurança para o ponto 01 da seção transversal da torre tubular é obtido através da equação 3.143.

$$\frac{\sigma_{Média.Elemento.01}^{Ideal}}{S_U} + \frac{\sigma_{Alternada.Elemento.01}^{Ideal}}{S_n 10^6} = \frac{1}{N_{Elemento.01}} \quad (3.143)$$

$$\frac{1,056 N / mm^2}{380 N / mm^2} + \frac{1,28 N / mm^2}{190 N / mm^2} = \frac{1}{N_{Elemento.01}}$$

$$N_{Elemento.01} = 105,1$$

A torre tubular com relação ao teste de fadiga para o ponto 01 da seção transversal apresenta resistência aos esforços a qual é submetida de 105,1.

4.0. CONCLUSÃO

Em função dos critérios de falha por fadiga, flambagem e deformações plásticas utilizadas para análise estrutural das torres anemométrica e de sustentação de turbinas eólicas verifica que ambas apresentam coeficientes de segurança mínimo maior do que o mínimo admitido neste trabalho de 1,5.

A torre anemométrica apresenta coeficiente de segurança mínimo de 2,27, para os cabos de sustentação segundo o critério de falha estrutural por fadiga.

A torre reticulada de sustentação de turbinas eólicas em função das análises para as condições de trabalho a qual foi considerado, apresentando um coeficiente mínimo de 1,87 segundo o critério de falha estrutural por fadiga para o perfil estrutural 76,2x76,2x4,76 que representa as pernas da torre como mostra a figura 4.4, na condição de funcionamento normal da torre.

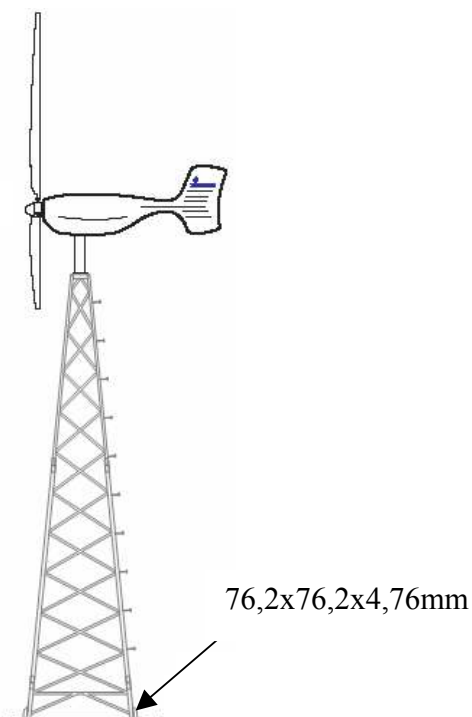


Figura 4.1 – Ponto de coeficiente de segurança mínimo

Esta situação pode ser amenizada se a torre não apresentar a característica de estrutura hiperestática na base.

A torre tubular de sustentação em função das condições de trabalho apresenta um coeficiente de segurança mínimo de 3,82 segundo o critério de falha estrutural por fadiga para condição de trabalho normal.

Portanto, as torres apresentam resistência estrutural para os critérios de falha por fadiga, flambagem e deformação plástica utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFIA

1. ALVES, Avelino Filho, Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000. 292p. ISBN 85-7194-741-4.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: Normatécnica, 1988. 66 p.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NB 14 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro: Normatécnica, 1986. 129 p.
4. Atlas do potencial eólico Brasileiro, disponível em www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico_brasil acesso em: 2004.
5. BARAN, Nicholas. Finite Element Analysis on Microcomputers, United States of America: Mc Graw-Hill Book Company, 1987. 256p. ISBN 0-07-033694-6.
6. BEER, Ferdinand Pierre. Resistência dos materiais, 2 edição. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1982. 649p.
7. BEER, Ferdinand P. e JOHNSTON, E. Russell Jr, Mecânica vetorial para engenheiros – estática. São Paulo: Mc. Graw-Hill do Brasil, 1973. 348p.
8. Enerlink, disponível em www.energiasrenavaveis.com acesso em: 2004.
9. European Wind Energy Association, disponível em www.ewea.org acesso em: 2005.
10. Geocities, disponível em <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/5534> acesso em: 2004.
11. Global Wind Energy Council, disponível em www.gnec.net acesso em: 2005.
12. GROEHS, Ademar Gilberto. Mecânica vibratória. São Leopoldo: UNISINOS, 1999. 650p. ISBN 85-7431-003-4.
13. International Energy Agency, disponível em <http://www.ieawind.org/AnnexXXIV.html> acesso em: 2005.
14. MELCONIAN, Sarkis, Mecânica técnica e resistência dos materiais. São Paulo: 4 edição, Érica, 1988. 341p. ISBN 085-7194-001-0
15. MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with Ansys. New

Jersey Prentice Hall, 1999. 527p. ISBN 0-13-785098-0

16. MUNSON, Bruce R. e Young, Donald F, Fundamentos da mecânica dos fluidos. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1997. 804p. ISBN 85-212-0142-7.
17. Núcleo de Energia Alternativa , disponível em <<http://www.nea.ufma.br/fae.php>> acesso em: 2004.
18. PISSARENKO, G. S., LAKOVLEV, A. P. & MATVEIEV, V. V., Prontuário de Resistência dos Materiais. U.R.S.S.: Mir Moscovo, 1975. 682p.
19. PROVENZA, Francesco. Projetista de máquinas – Protec. São Paulo: Editora F. Provenza, 1960. 6-07p.
20. OLINTO, Cláudio Rodrigues, Um estudo sobre métodos e técnicas para aproveitamento de energia do vento e uma avaliação de potencial eólico da região costeira do extremo sul do Rio Grande do S, Rio Grande, 2001 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG – Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
21. SHIGLEY, Joseph Edward, Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, editora S.A. 700p, volume 01. ISBN 85-216-0370-3.
22. THOMSON, Willian T. Teoria da vibração com aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 1978. 968p.
23. Wind power, disponível em <www.windpower.org> acesso em: 2004.