



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Alan da Silva Sirqueira

Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas

Rio de Janeiro
2008

Alan da Silva Sirqueira

Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas



Dissertação apresentada ao PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Co-orientador (es): Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTCB

C837 Sirqueira, Alan da Silva.

Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas /
Alan da Silva Sirqueira – 2007.
112 f.

Orientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco.
Co-orientador (es): Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.
José Guilherme Santos da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia.

1. Aço – Estruturas. 2. Turbinas a vento. I. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves
da Silva . II. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. III . Silva, José Guilherme
Santos da. IV.Universidade do Estado do Rio de Janeiro. V Título.

CDU 681.511

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação

Assinatura

Data

Alan da Silva Sirqueira

Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas

Dissertação apresentada ao PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 02 de Abril de 2008

Banca Examinadora:

Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD – Presidente/Orientador
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Luciano R. Ornelas de Lima, DSc – Co-orientador Faculdade
de Engenharia da UERJ

Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc – Co-orientador
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Sebastião A. L. de Andrade, PhD
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Raul Rosas e Silva, PhD
Faculdade de Engenharia da PUC-Rio

Rio de Janeiro

2008

AGRADECIMENTOS

À fé em Deus, por ter dado força e coragem para superar os obstáculos para a concretização deste trabalho.

A minha esposa, Patrícia, pelo incentivo, carinho e paciência nos momentos mais difíceis.

Em memória aos meus pais que contribuíram de forma grandiosa na minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Pedro Vellasco, pela assistência, conhecimento e experiência transmitidos ao longo do trabalho.

Aos Professores Luciano Rodrigues e Prof. José Guilherme que sempre se colocaram a disposição para a realização deste trabalho.

Ao amigo João Jesus do Santos pelo incentivo e ajuda nos momentos de maiores dificuldades.

Aos demais professores e funcionários da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e aos funcionários do LABBAS, que apoiaram para a realização deste trabalho.

A CAPES – Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro.

Quero que se saiba que o pouco que aprendi até agora não é quase nada em comparação com o que ignoro, e que não desanimo de poder aprender. (...)

René Descartes

RESUMO

SIRQUEIRA, Alan da Silva. *Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de Turbinas Eólicas*. Rio de Janeiro, 2008. 112f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

O aumento do consumo de energia para atender às necessidades da população e das indústrias, trás a tona uma problemática lógica que se refere ao esgotamento das atuais fontes de energia, o que evidencia a necessidade de se investir em pesquisas que busquem aprimorar fontes de energia renovável e estudos que apontem para novas formas de captação de energia. Uma das alternativas de contornar este problema tem sido a utilização da energia oriunda da ação do vento. A transformação da força do vento em energia elétrica é realizada através de torres de aço com turbina eólica. A presente dissertação, visando acrescentar informações no meio técnico-científico sobre o comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas, analisou uma torre modelo MM92 da Repower. Inicialmente, foi apresentada uma sugestão para o dimensionamento de uma torre eólica baseada nos preceitos do Eurocode para análise numérica desenvolvida neste trabalho, foi elaborado um modelo de elementos finitos baseado na plataforma Ansys capaz de reproduzir com fidelidade o comportamento da torre eólica submetida ao carregamento produzido pelo vento nas pás da hélice. O modelo numérico estudado é constituído por elementos finitos de casca e considera os efeitos das não-linearidades do material e geométrica. Também foi desenvolvido neste trabalho uma análise dinâmica com o objetivo de se avaliar as frequências naturais, os modos de vibração (análise de autovalores e autovetores) bem como uma análise harmônica e transiente para verificar a resposta dinâmica da torre no domínio do tempo. O resultado obtido no estudo da parcela dinâmica mostra que a resposta da estrutura pode ser determinante no seu comportamento. Nesse caso, a utilização de uma análise estrutural estática pode resultar no mau dimensionamento da torre e, conseqüentemente, em possíveis acidentes. A análise não-linear efetuada permitiu verificar o fenômeno de flambagem local na parede da torre sujeita a compressão, que deve ser levado em consideração durante a execução do projeto da torre eólica.

Palavras-chave: Torres eólicas. Dimensionamento de torre eólica. Carregamento do vento. Estruturas de aço.

ABSTRACT

The increasing demand for electricity required by individual and industrial consumers brings back the issues related to the exhaustion of the existing fossil energy sources and leads to the evident needs for investments in research topics that focus on improving, developing available renewable energy sources or even creating some novel energy renewable alternatives. One of the alternatives to deal with this problem is the utilization of the wind power. The transformation of the wind forces into electrical energy is made by wind turbines supported by steel towers. The present dissertation investigates and analyses a typical wind tower created to support a Repower MM92 wind turbine aiming to better understand its structural response. Initially a suggestion for a wind tower structural design based on the Eurocode 3 recommendations is presented and discussed. The developed numerical model was conceived based on finite element simulation performed with the aid of the Ansys Program. The numerical model is capable of accurately reproducing the wind tower structural response when subjected to the load action imposed by the wind forces acting on the wind blades. The developed numerical model was created using shell finite elements and considers geometrical and material non-linearities. The present investigation also contemplated a dynamic analysis aiming to evaluate the natural frequencies and associated vibration modes (modal analysis) as well as a transient harmonic analysis to evaluate the wind tower dynamic response along the time domain. The dynamic results indicated that its significant influence on the wind tower structural response. This conclusion indicates that if only a static design is made the wind tower safety could not be warranted and could lead to possible wind-related accidents. The developed non-linear analysis enabled to determine that one of the wind tower ultimate limit states is associated to the local buckling of the wind tower wall, under compressive forces, and its effects must be considered on the tower structural design.

Keywords: Wind towers. Wind tower structural design. Wind loads. Steel structures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Torre instalada no município de Osório (RS) [2].....	4
Figura 1.2 - Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no Nordeste do Brasil [1].....	5
Figura 1.3 - Torre eólica avaliada [3].....	6
Figura 1.4 – Resultados da análise das tensões de cisalhante máxima e Von Mises em MPa [3].....	6
Figura 1.5 – As quatro primeiras freqüências naturais da torre [3].....	7
Figura 1.6 - Configuração da estrutura da torre e dos modelos em elemento finitos [4].....	8
Figura 1.7 – Distribuição de tensões de Von Mises em MPa junto a abertura da porta [4].....	8
Figura 2.1 - Isopletas de velocidade do vento da NBR 6123 [7].....	11
Figura 2.2 – Representação da ação do vento sobre uma torre eólica.....	13
Figura 2.3 – Flambagem num elemento bi-apoiado.....	14
Figura 2.4 – Configuração inicial senoidal.....	15
Figura 2.5 – Relação carga-deslocamento lateral [9]	16
Figura 2.6 – Resultados de ensaios experimentais em peças reais [9].....	17
Figura 2.7 – curvas de flambagem segundo Eurocode 3, parte 1-1 [5].....	19
Figura 2.8 – Seleção da curva de flambagem [9].....	20
Figura 2.9 – Comportamento de um elemento submetido à flexão composta plana.....	21
Figura 3.1 - Representações da torre eólica MM92 da Repower [8].....	28
Figura 3.2 - Esquema de ligação e do enrijecedor [8].....	29
Figura 3.3 - Parte superior da torre MM92 [8].....	30
Figura 3.4 - Elemento finito SHELL181 implementado no programa ANSYS[11].....	31
Figura 3.5 - Detalhe estrutural e modelo em elemento finito.....	32
Figura 3.6 - Curva tensão versus deformação.....	34
Figura 3.7 - Processo de iteração de Newton-Raphson	36
Figura 4.1 – Distribuição das tensões de Von Mises (em Pa) para um carregamento de 308,45kN...38	
Figura 4.2 - Modo de vibração correspondente à primeira freqüência natural do modelo estrutural: flexão no plano XY.....	40
Figura 4.3 - Modo de vibração correspondente à segunda freqüência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ.....	40
Figura 4.4 - Modo de vibração correspondente à terceira freqüência natural do modelo estrutural: torção.....	41
Figura 4.5 - Modo de vibração correspondente à quarta freqüência natural do modelo estrutural: flexão no plano XY.....	41
Figura 4.6 - Modo de vibração correspondente à quinta freqüência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ.....	42
Figura 4.7 - Modo de vibração correspondente à sexta freqüência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ.....	42
Figura 4.8 - Fator amplificação dinâmico.....	44

Figura 4.9 - Variação dos deslocamentos translacionais horizontais no tempo e ao longo da altura do modelo estrutural.....	46
Figura 5.1 – Possíveis posições para aplicação de carregamento.....	47
Figura 5.2 – Curva carregamento versus o deslocamento para o vento a 0°.....	48
Figura 5.3 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1327,65 kN e deslocamento de 2,21 m.....	49
Figura 5.4 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1491,00 kN e deslocamento de 2,56 m.....	50
Figura 5.5 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1559,92 kN e deslocamento de 2,70 m.....	50
Figura 5.6 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 4 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 832,38 kN e deslocamento de 2,80 m.....	51
Figura 5.7 – Curva carregamento versus o deslocamento para o vento a 90°.....	52
Figura 5.8 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1324,56 kN e deslocamento de 2,20m.....	53
Figura 5.9 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1497,06 kN e deslocamento de 2,50m.....	53
Figura 5.10 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1595,50 kN e deslocamento de 2,79m.....	54
Figura 5.11 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 4 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1245,33 kN e deslocamento de 2,85m.....	54
Figura 5.12 – Curva carregamento versus o deslocamento para o vento a 45°.....	55
Figura 5.13 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.12– Carga aplicada de 1217,30 kN e deslocamento de 2,02m.....	56
Figura 5.14 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 1419,93 kN e deslocamento de 2,37m.....	57
Figura 5.15 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 1542,73 kN e deslocamento de 2,66m.....	57
Figura 5.16 – Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) correspondente ao ponto 4 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 738,28 kN e deslocamento de 2,74m.....	58
Figura 5.17 – Curvas carregamento versus deslocamento para a torre eólica estudada.....	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – VALORES PARA O CÁLCULO DE N_{RK} , $M_{I,RK}$ E $M_{I,ED}$	24
TABELA 4.1 – FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS.....	39
TABELA 5.1 – CARREGAMENTO E DESLOCAMENTOS MÁXIMOS PARA AS TRÊS POSIÇÕES DEFORÇA ANALISADO.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS

Eurocode European Committee for Standardi Station

UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

FEN Faculdade de Engenharia

ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras S.A

NBR Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0	parâmetro de amortecimento proporcional a matriz de massa
a_1	parâmetro de amortecimento proporcional a matriz de rigidez
b	menor dimensão horizontal de uma edificação
e	amplitude máxima do deslocamento lateral do elemento
e_0	amplitude máxima do deslocamento lateral inicial de um elemento
$f_{eq,Rd}$	força resistente no estado limite de plastificação
f_y	tensão de escoamento
i	raio de giração
h	altura de uma edificação
p	expoente da lei potencial de variação de S_2
$q(z)$	pressão dinâmica do vento em função da altura
$q(z)$	pressão dinâmica de projeto do vento em função da altura
y	eixo do elemento
y_0	deslocamento inicial segundo y
z	cota acima do terreno
z_r	altura de referência: $z_r=10m$
A	área total da seção
A_{eff}	área efetiva da seção
C	matriz de amortecimento do sistema
E	modulo de elasticidade
FAD	fator de amplificação dinâmico
I	momento de inércia
K	rigidez do corpo
L	comprimento de um elemento
L_{cr}	comprimento de flambagem
M	matriz de massa do sistema
M_y	momento fletor em torno do eixo y
M_z	momento fletor no eixo z
M_{Ed}	momento fletor de cálculo atuante
$M_{N,Rd}$	momento resistente reduzido, devido à interação com o esforço axial
$M_{N,y,Rd}$	momento plástico resistente reduzido em torno do eixo y
$M_{N,z,Rd}$	momento plástico resistente reduzido em torno do eixo z
$M_{pl,Rd}$	momento resistente plástico de uma seção
M_{uy}	momento fletor último em torno do eixo y

M_{uz}	momento fletor último em torno do eixo z
$M_{y,Ed}$	momento fletor atuante em torno do eixo y
$M_{z,Ed}$	momento fletor atuante em torno do eixo z
N	esforço axial
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente a flambagem por flexão N_{cr}
	carga crítica elástica de flambagem por flexão (carga crítica de Euler) $N_{c,Rd}$
	valor de cálculo do esforço axial de compressão resistente
N_{ed}	esforço axial atuante
N_k	valor característico do esforço axial resistente
N_u	esforço axial último
S_1	fator topográfico
S_3	fator baseado em conceitos estatístico
V	velocidade média do vento
W_y	módulo de flexão segundo y
W_z	módulo de flexão segundo z
$W_{el,y}$	módulo elástico de flexão segundo y
$W_{el,z}$	módulo elástico de flexão segundo z
$W_{eff,y}$	módulo elástico efetivo de flexão segundo y
$W_{eff,z}$	módulo elástico efetivo de flexão segundo z
$W_{pl,y}$	módulo plástico de flexão segundo y
$W_{pl,z}$	módulo plástico de flexão segundo z
	fator de imperfeição generalizado
	fator de redução para o modo de flambagem
χ_y	fator de redução devido a flambagem por flexão em torno do eixo y
χ_z	fator de redução devido a flambagem por flexão em torno do eixo z
χ_{LT}	fator de redução devido a flambagem loção
	coeficiente dependente de f_y
	imperfeição geométrica equivalente de uma estrutura
	forma modal
F_f	fator parcial de carregamento da fadiga
M	fator de resistência
γ	coeficiente de segurança
γ_M	coeficiente parcial de segurança
M_f	fator parcial de resistência da fadiga
	coeficiente de esbeltez normalizado

λ	coeficiente de esbeltez de referência
σ	tensão normal
σ_c	tensão de escoamento
σ_{eqEd}	tensão atuante equivalente de Von Mises
σ_{eqRd}	tensão resistente equivalente de Von Mises
σ_{Edx}	tensão normal máxima atuante
β	coeficiente de amplificação dinâmica
γ_i	taxa de amortecimento do modo i
ω_i	freqüência natural de vibração
ω_{oi}	freqüência natural circular do modo i
M_{zE}	acréscimo de momento fletor atuante em torno do eixo z
M_{yE}	acréscimo de momento fletor atuante em torno do eixo y
d	
E	constante equivalente da amplitude da tensão espectral considerada
R	tensão da fadiga associado ao detalhe da categoria e ao número de ciclo da tensão espectral considerados.

Sumário

Introdução.....	3
1.1. Generalidades.....	3
1.2. Revisão Bibliográfica.....	5
1.3. Motivação.....	9
1.4. Objetivo.....	9
1.5. Escopo do Trabalho.....	10
2. Dimensionamento de Torre Eólica.....	11
2.1. Obtenção da Carga do Vento.....	11
2.2. Determinação da Resposta Dinâmica Provocada pela Turbulência Atmosférica.....	12
2.3. Dimensionamento a Compressão da Torre Eólica..	13
2.4. Dimensionamento a Flexão Composta da Torre Eólica.....	20
2.5. Verificação de Estruturas Formadas por Elemento de Casca.....	24
2.5.1. Estado Limite de Plastificação.....	24
2.5.2. Estado de Plastificação devido a Cargas Cíclicas.....	25
2.5.3. Estado de Flambagem.....	26
2.5.4. Estado de Fadiga.....	26
3. Caracterização do Modelo Numérico.....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Características da Torre Eólica MM92 [8].....	27
3.3. Modelo Computacional.....	30
3.4. Hipóteses Simplificadoras.....	32
3.5. Modelagem do Amortecimento.....	33
3.6. Análises Realizadas.....	34
3.6.1. Análise Estática Linear.....	34
3.6.2. Análise Dinâmica.....	34
3.6.3. Análise Não-Linear.....	35
4. Resultados – Análise Linear Estática e Dinâmica.	37
4.1. Introdução.....	37
4.2. Análise Linear Estática.....	37
4.3. Análise Dinâmica.....	38
4.3.1. Análise dos Autovalores e Autovetores.....	39
4.3.2. Análise Harmônica.....	43
4.3.3. Análise Transiente.....	44
5. Análise Estática Não-Linear.....	47
5.1. Introdução.....	47
5.2. Força aplicada como um deslocamento na direção do eixo x – vento a 0°.....	48
5.3. Força aplicada como um deslocamento na direção do eixo z – vento a 90°.....	51

5.4. Força aplicada como um deslocamento a 45° graus da direção do eixo x e z – vento a 45°	55
6. Considerações Finais.....	60
6.1. Introdução.....	60
6.2. Conclusão.....	60
6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	61
Referências Bibliográficas.....	62
Anexo A. Rotina Computacional para Modelagem da Torre MM92 da Repower.....	64
Anexo B. Geometria da Torre MM92 da Repower.....	94

Introdução

1.1. Generalidades

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível amplamente. A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através da aplicação de conhecimentos da indústria aeronáutica. Os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência de petróleo e carvão. Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foram desenvolvidos [1]. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano (1999) [1]. Na Dinamarca, a contribuição da energia eólica é de 12% da energia elétrica total produzida. No norte da Alemanha (região de Schleswig Holstein), a contribuição eólica já passou de 16% e a União Européia tem como meta gerar 10% de toda a eletricidade a partir do vento até 2030 [1].

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito de forma tradicional com a utilização de cata-ventos múltiplos para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado.

Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de medidas de vento com modernos anemógrafos computadorizados [1]. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. A região sul possui o maior parque eólico da América Latina e do Brasil e um dos mais avançados do mundo em tecnologia situado no Rio Grande do Sul (RS), no município de Osório. O empreendimento, iniciado em 2005, irá quintuplicar a energia eólica produzida atualmente no País, colocando o Brasil no mapa mundial do desenvolvimento sustentável. A Figura 1.1 representa uma das vinte e cinco torres eólicas instaladas no município de Osório no Rio Grande do Sul [2].



Figura 1.1 - Torre instalada no município de Osório (RS) [2]

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, confirmado através de medidas de vento precisas realizadas recentemente, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Conforme mencionado anteriormente, as análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do Brasil mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 – US\$ 80 por MWh, [1].

De acordo com estudos da ELETROBRAS, o custo da energia elétrica gerada através de novas usinas hidroelétricas construídas na região amazônica será bem mais alto que os custos das usinas implantadas até hoje. Quase 70% dos projetos possíveis deverão ter custos de geração maiores do que a energia gerada por turbinas eólicas [1]. Outra vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada com habitat natural.

A energia eólica poderá também resolver o grande dilema do uso da água do Rio São Francisco no Nordeste. Grandes projetos de irrigação às margens do rio envolvendo a sua transposição para outras áreas podem causar um grande impacto no volume de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, consequentemente, prejudicar o fornecimento de energia para a região. Entretanto, observando a Figura 1.2, percebe-se que as maiores velocidades de vento no Nordeste do Brasil ocorrem justamente em meses onde o fluxo de água do Rio São Francisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas na região

Nordeste poderão produzir grandes quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água do Rio São Francisco.

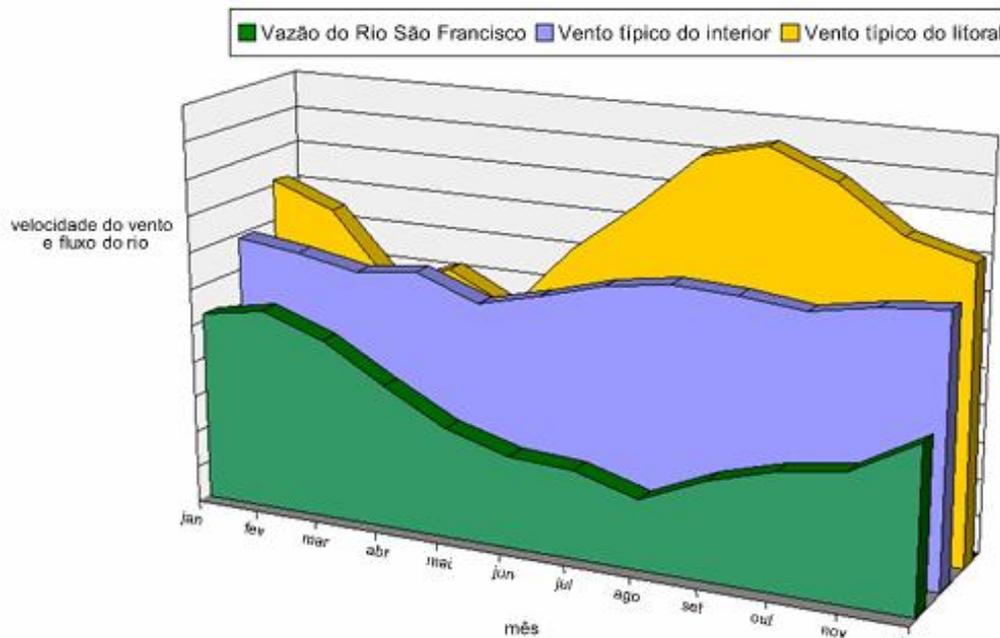


Figura 1.2 - Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no Nordeste do Brasil [1]

1.2. Revisão Bibliográfica

Em 2002, Bazeos et al [3] publicou um artigo em que analisou uma torre eólica de 38 m de altura dividida em três partes, conforme ilustra a Figura 1.3. O sistema de ligação por parafuso é utilizado para a união das três partes que formam os flanges. A deformação e a capacidade de carregamento foram decorrentes dos efeitos estático e dinâmico. Na avaliação do carregamento os efeitos da gravidade, da torre em operação e das condições aerodinâmica, foram considerados.

Na análise estática os autores observam que as máximas tensões de cisalhamento, ocorrem mais acentuadamente nas proximidades da abertura da porta com valores inferiores a 100 MPa. Do mesmo modo, nesta mesma região a tensão máxima de Von Mises não excede a 211 MPa. A Figura 1.4 ilustra uma ampliação da região da abertura com as distribuições das tensões cisalhamento máximas e de Von Mises, respectivamente.

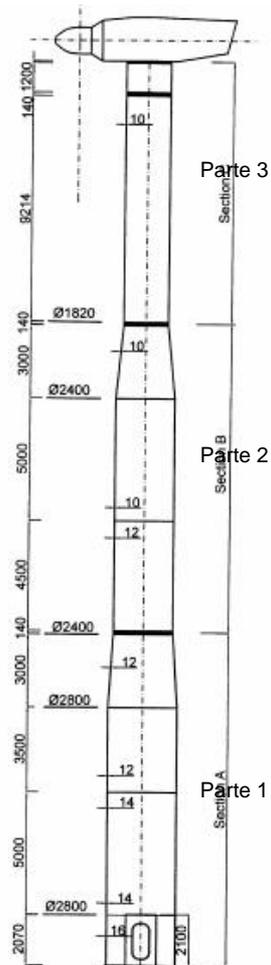


Figura 1.3 - Torre eólica avaliada [3]

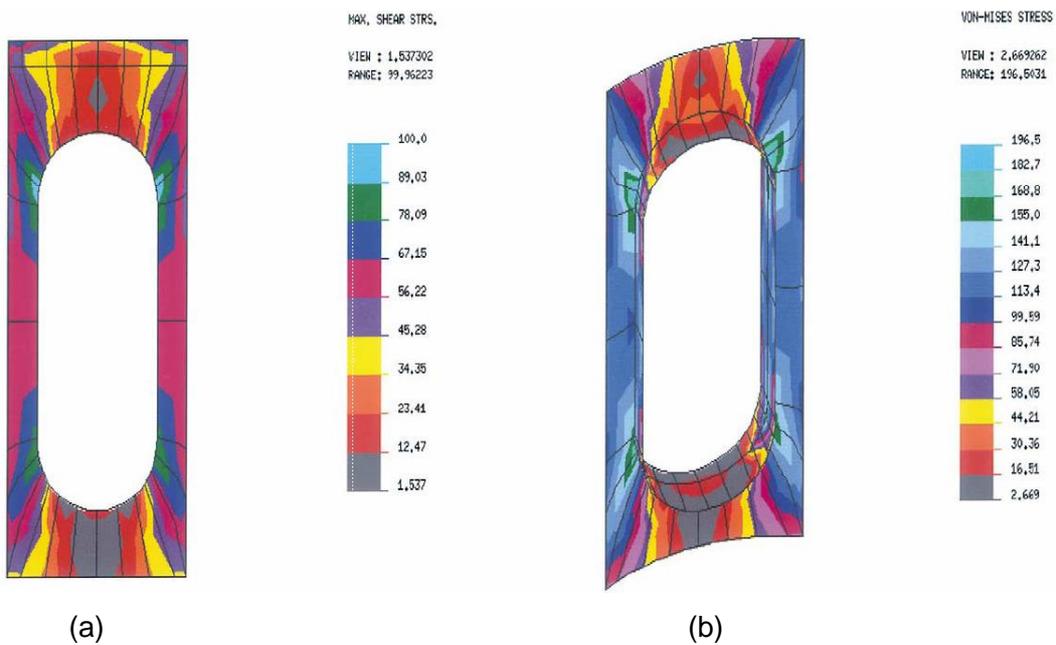


Figura 1.4 – Resultados da análise das tensões cisalhantes máximas e Von Mises em MPa [3]

Na análise dinâmica normalmente os efeitos da carga do vento são considerados como a única fonte de perturbações dinâmicas. A Figura 1.5 mostra o comportamento da torre em termos de frequências naturais, não considerando a influência da turbina, da hélice e do rotor. Os autores concluem com o estudo que a maior parte destas estruturas de torres eólicas numa análise sísmica, não produz nenhuma resposta crítica.

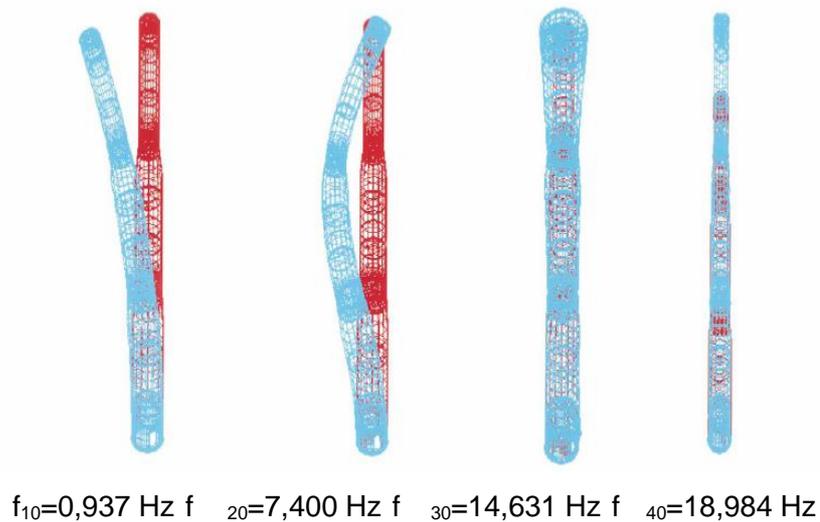


Figura 1.5 – As quatro primeiras frequências naturais da torre [3]

Em 2003, Lavassas et al, [4] com o intuito de avaliar o efeito da forma geométrica de uma torre, estudou o comportamento estrutural em um protótipo de torre eólica com uma altura de 44 m e geometria de um tronco cilíndrico variando a seção e a rigidez ao longo da altura. A Figura 1.6 (a) ilustra a configuração descrita da estrutura. O modelo em elementos finitos da torre é apresentado na Figura 1.6 (b) e (c). No primeiro emprega-se o elemento de casca com 5208 nós sendo quatro nós por elemento recorrendo da sua utilização na análise estática. Na Figura 1.6 (b) acrescentou-se o elemento de fundação, onde foram empregados mais 3270 elementos. Os autores seguiram as recomendações prescritas no Eurocode 3, parte 1-1 [5] e basearam-se em resultados de outras publicações para torres eólicas [3]. Utilizando um método de tentativa e erro para encontrar a melhor relação projeto/resistência e baseado no método dos estados limites, os autores concluíram que na parte inferior da torre predominava o estado limite de plastificação e na parte superior o estado limite de flambagem. Pela Figura 1.7 a seguir pode-se observar a distribuição das tensões de Von Mises junto a abertura da porta.

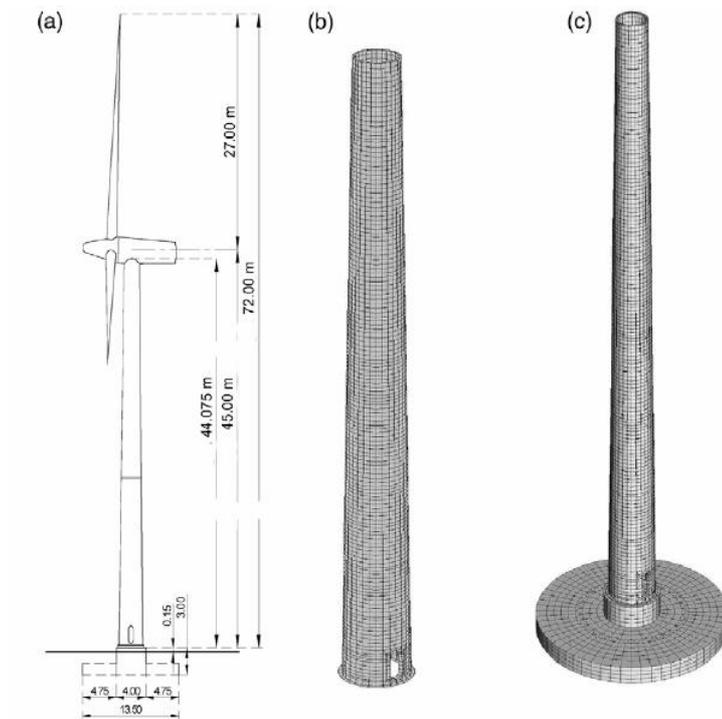


Figura 1.6 - Configuração da estrutura da torre e dos modelos em elemento finitos [4]

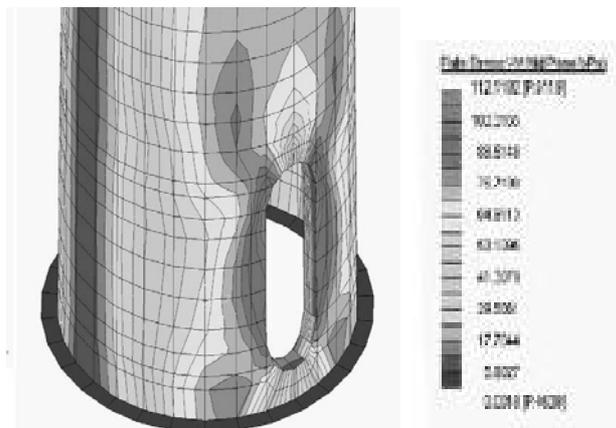


Figura 1.7 – Distribuição de tensões de Von Mises em MPa junto a abertura da porta [4]

Uys et al, [6] em 2006 publicou um artigo em que o objetivo era a otimização do custo para fabricação de uma torre eólica de aço. Os autores investigaram uma torre ligeiramente cônica de 45 m de altura dividida em três partes iguais, ligadas por solda. Todos os parâmetros para a fabricação da torre foram levados em consideração e no que tange ao carregamento, o efeito devido à ação dinâmica foi predominante. Analisando os resultados os autores concluíram que a efetiva redução do custo está relacionada com o número de

enrijecedores na torre, desde que a espessura da torre não dependa do número de enrijecedores.

Quanto aos efeitos aerodinâmicos na turbina eólica, encontram-se na literatura vários trabalhos técnico-científicos, porém estes fogem do escopo da presente dissertação.

1.3. Motivação

Atualmente existem poucas publicações de trabalho no meio técnico-científico sobre o comportamento estrutural das torres eólicas e de resultados experimentais. A isto soma-se a busca mundial em encontrar novas fontes de energia renovável. Estes aspectos foram as principais motivações para o desenvolvimento desta dissertação. Tradicionalmente, as grandes maiorias das investigações concentram-se somente no comportamento aerodinâmico da turbina ou na torre eólica, o que não representa informação necessária para uma análise sobre o comportamento estrutural da torre eólica.

1.4. Objetivos

O objetivo inicial deste trabalho foi o de propor um modelo computacional que represente de forma satisfatória o comportamento estrutural da torre eólica modelo MM92 da Repower [8]. Para tanto, algumas simplificações do modelo estrutural, foram consideradas de forma a permitir uma satisfatória avaliação da resposta estática e dinâmica para a torre eólica em estudo.

Os efeitos de não-linearidade do material e geométrica, peso próprio da torre e dos equipamentos necessários para a sua funcionalidade, e, bem como a ação do vento sobre as pás da torre são consideradas na metodologia de análise desenvolvida neste estudo.

A presente investigação foi desenvolvida em etapas: primeiramente, foi feita uma calibração do modelo computacional proposto nesta dissertação, comparada com resultados encontrados, a partir de medições experimentais em uma torre eólica de tamanho reduzido [12] no que tange às frequências naturais e modos de vibração. Posteriormente efetuou-se uma análise estática não-linear com o objetivo de investigar a resposta da torre em termos de estados limites últimos e de serviço.

1.5. Escopo do Trabalho

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos acadêmicos no que tange ao comportamento estrutural e a modelagem computacional das torres eólicas, especificou os principais objetivos deste trabalho além de apresentar uma pequena descrição do conteúdo de cada capítulo conforme pode ser observado a seguir.

No capítulo dois será apresentada uma proposta para dimensionamento de torres eólicas submetidas a ação do vento e do procedimento simplificado para obtenção da ação do vento atuante na torre.

No capítulo três são apresentadas as considerações e hipóteses simplificadoras no que tange à modelagem computacional, bem como o modelo estrutural utilizado nessa dissertação.

Nos capítulos quatro e cinco são apresentados os resultados obtidos na análise estática linear, dinâmica e estática não-linear, respectivamente, do modelo computacional.

Finalmente no capítulo seis, são tecidas as considerações finais com as principais conclusões obtidas além de algumas propostas para trabalhos futuros.

2. Dimensionamento de Torre Eólica

2.1. Obtenção da Carga do Vento

Um dos carregamentos mais importantes a ser considerado na análise das torres eólicas em aço tem como origem o vento. A NBR 6123 [7] cita que a obtenção da ação do vento pode ser interpretada como um efeito dinâmico devido à turbulência atmosférica.

O vento natural, o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média V , designada por rajadas. Admite-se que a velocidade média mantém-se constante durante um instante de tempo de 10 min ou mais, produzindo nas edificações, efeitos puramente estáticos, designado como resposta média. Já as flutuações da velocidade podem induzir em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, agora denominado como resposta flutuante.

O valor da velocidade média do vento depende, fundamentalmente, dos dados meteorológicos coletados. A velocidade média do vento é comumente fornecida pelas estações com base em uma hora de observação, ou seja, trata-se da velocidade média horária. Na falta de dados específicos do local em estudo é possível a determinação da velocidade média através da observação de isopletas de velocidade do vento, conforme a Figura 2.1.

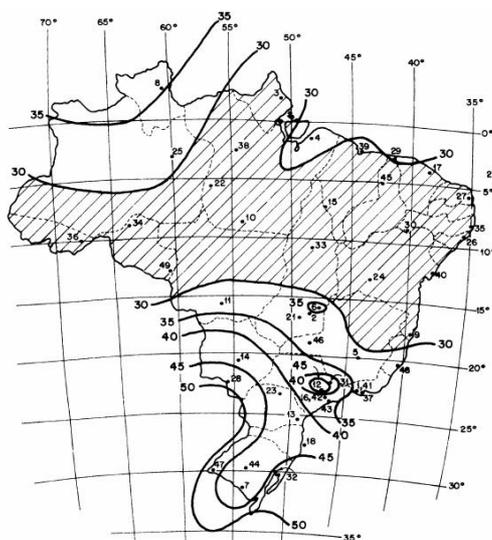


Figura 2.1 - Isopletas de velocidade do vento da NBR 6123 [7]

A norma NBR6123 [7] fornece, para todo o território nacional, as curvas de velocidade de uma rajada de 3s, medida a 10m de altura, associada a uma probabilidade anual de ocorrência de 2%. Neste trabalho adotou-se uma velocidade média de 36 m/s.

A resposta dinâmica total, igual a superposição das respostas média e flutuante, foi calculada segundo a NBR6123 [7].

2.2. Determinação da Resposta Dinâmica Provocada pela Turbulência Atmosférica

Considerando a torre eólica como uma estrutura de seção constante e de distribuição aproximadamente uniforme de massa, adotou-se o método simplificado para a determinação da resposta dinâmica. Este método é aplicado também a estruturas que tenham altura inferior a 150 metros e apoiadas exclusivamente na base.

A variação de pressão dinâmica em função da altura é expressa pela equação 2.1,

$$q(z) = q_0 \left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} \left(\frac{h}{z} \right)^p \quad (2.1)$$

onde

$$q_0 = \frac{\rho}{2} V^2 \quad (2.2)$$

e

$$V = 69,0 \sqrt{S_1 S_3} \quad (2.3)$$

na qual o primeiro termo da equação 2.1 corresponde à resposta média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante, sendo: q a pressão dinâmica de projeto do vento dada pela equação 2.2 em N/m^2 ;

V a velocidade de projeto dada pela equação 2.3 em m/s; o expoente p e o coeficiente b dependem da categoria de rugosidade do terreno; μ é coeficiente de amplificação dinâmica sendo função das dimensões da edificação; z_r a altura de referência igual a 10 m e z igual a variação da altura ao longo da torre.

O fator S_1 será tomado igual a 1,0, pois em geral as torres eólicas são instaladas em locais de terrenos planos ou fracamente acidentados.

Baseado em conceitos estatísticos e considerando o grau de segurança para torre eólica, o fator estatístico, S_3 , deve ser igual a 1,0.

A Figura 2.2 representa de forma simplificada a ação do vento empregada nesta dissertação. A ação do vento sobre as pás da hélice pode ser vista como um carregamento distribuído ao longo da área de atuação ver Figura 2.2 (a). Para simplificar, porém mantendo coerência nos resultados, adota-se uma força resultante equivalente ao carregamento distribuído, conforme a Figura 2.2 (b). Nesta figura, apresenta-se também a consideração do peso próprio.

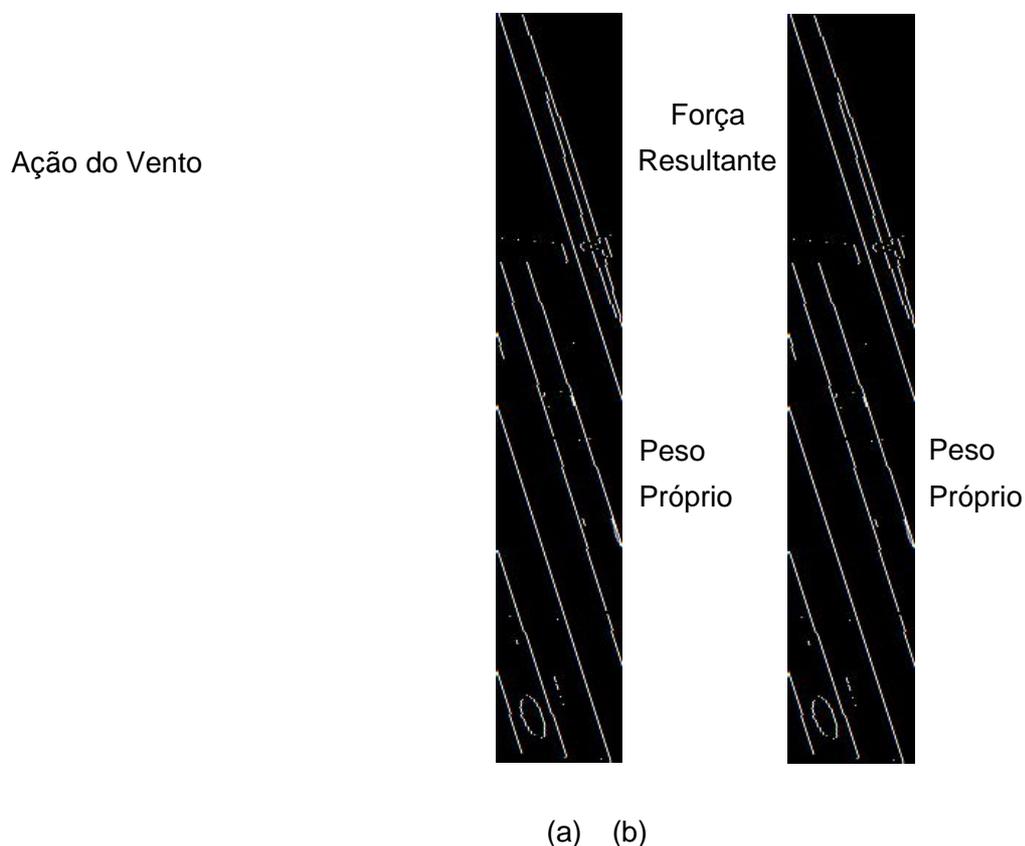


Figura 2.2 – Representação da ação do vento sobre uma torre eólica

2.3. Dimensionamento a Compressão da Torre Eólica

A flambagem é um fenômeno de instabilidade que se caracteriza pela ocorrência de grandes deformações transversais em elementos sujeitos aos esforços de compressão. Em

estruturas metálicas, este e outros fenômenos de instabilidade assumem particular importância, pois devido a grande resistência do aço, os elementos apresentam em geral esbelteza elevada [9].

Com base na teoria da estabilidade elástica, deduz-se a carga crítica elástica (carga crítica de Euler dada pela equação 2.4) – o valor do esforço axial para o qual o elemento passa a exibir deformações não axiais. O fenômeno de flambagem numa peça comprimida, isenta de imperfeições, é ilustrada de uma forma simplificada na Figura 2.3.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.4)$$

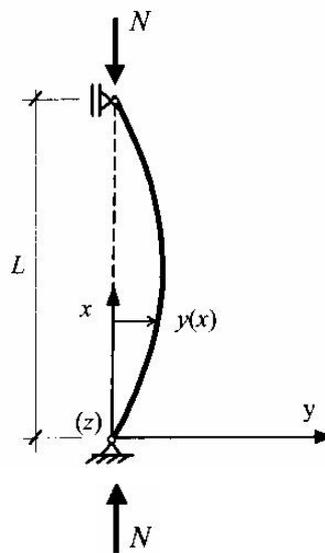


Figura 2.3 – Flambagem num elemento bi-apoiado

Porém, nas estruturas reais, as inevitáveis imperfeições, fazem com que o comportamento real de um elemento comprimido afaste-se do comportamento teórico. Nestas circunstâncias, a carga crítica em geral não é atingida. As imperfeições num elemento de uma estrutura real podem ser essencialmente de dois tipos: imperfeições geométricas (falta de linearidade, falta de verticalidade, excentricidade das cargas, entre outras) e imperfeições do material (comportamento não-linear, tensões residuais, entre outras).

Para mostrar o efeito das imperfeições geométricas, considera-se o elemento comprimido bi-rotulado ilustrado na Figura 2.4, com uma configuração geométrica inicial senoidal, traduzida pela equação 2.5:

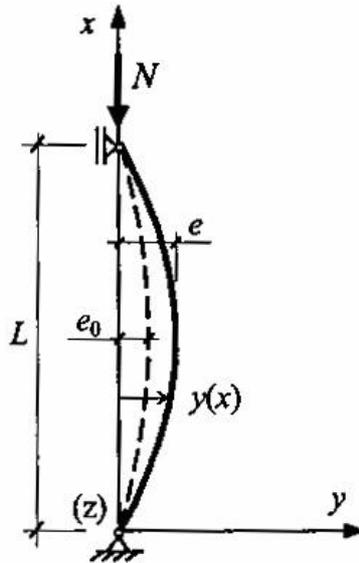


Figura 2.4 – Configuração inicial senoidal

$$y = e_0 \operatorname{sen} \frac{x}{L} \quad (2.5)$$

em que e_0 é a amplitude máxima do deslocamento lateral inicial de um elemento e L o comprimento de um elemento submetido a compressão.

A equação diferencial de equilíbrio de um elemento bi-rotulado, com a deformação inicial é dada pela equação 2.6:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + y(N - N_{cr}) = 0 \quad (2.6)$$

Com a substituição de y_0 pelo valor dado pela equação 2.5, a resolução da equação diferencial, tendo como condição $y(0) = 0$ e $y(L) = 0$, conduz à seguinte solução:

$$y = \frac{e_0}{N_{cr} - N} \operatorname{sen} \frac{x}{L} \quad (2.7)$$

sendo N_{cr} a carga crítica de Euler. Adicionando a equação 2.7 à equação 2.5 obtém-se a equação 2.8 da deformada total do elemento em função do valor do esforço axial atuante N :

$$y = y_0 + y = \frac{1}{4} \frac{N_{cr}}{N} e \operatorname{sen} \frac{x}{L} \quad (2.8)$$

onde o valor máximo, designado por e (obtido para $x=L/2$), é dado por:

$$e = \frac{e_0}{4} \frac{N}{N_{cr}} \quad (2.9)$$

O fato de o elemento apresentar uma deformada inicial tem como consequência a existência, mesmo para valores baixos de esforço axial N , de momentos fletores dados por:

$$M(x) = y''(x) = N \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} e_0 \sin \frac{x}{L} \quad (2.10)$$

Provocando um aumento gradual dos deslocamentos laterais. A relação entre o deslocamento lateral máximo, e , e o esforço axial aplicado N (equação 2.9) é traduzido graficamente na Figura 2.5.

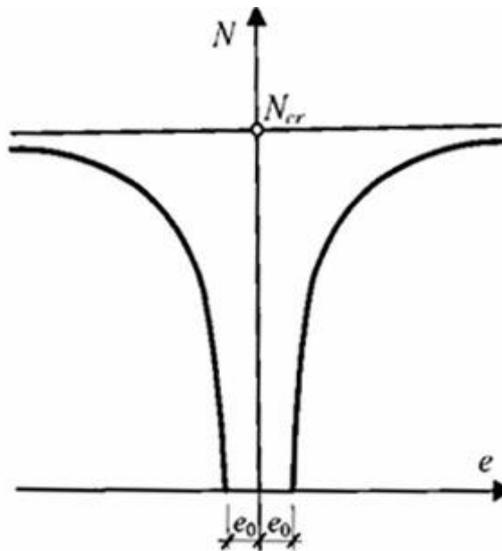


Figura 2.5 – Relação carga-deslocamento lateral [9]

Deste modo, conclui-se que num elemento com uma configuração inicial deformada, os deslocamentos começam a aumentar para valores abaixo do esforço axial N e tendem para infinito quando a carga aplicada tende para a carga crítica.

Para ilustrar a influência das imperfeições das peças reais, na Figura 2.6 são considerados os resultados de ensaios experimentais em barras axialmente comprimidas com diversos índices de esbeltez, com o comportamento teórico [9]. Com base na Figura 2.6 verifica-se que para valores baixos de $\bar{\lambda}$, o estado limite último de um elemento comprimido ocorre essencialmente por plastificação de seção, obtendo-se experimentalmente valores de $\frac{\sigma}{\sigma_c}$ superiores a 1, devido ao endurecimento do aço. Para valores de $\bar{\lambda}$ elevados, o estado último associado a carga máxima ocorre por flambagem em regime elástico, sendo as imperfeições pouco influentes. Para valores de $\bar{\lambda}$ intermediários, o colapso ocorre por instabilidade elasto-plástica, e é neste domínio de esbeltez que as imperfeições são mais influentes (os resultados experimentais afastam-se dos valores teóricos obtidos para elementos isentos de imperfeições).

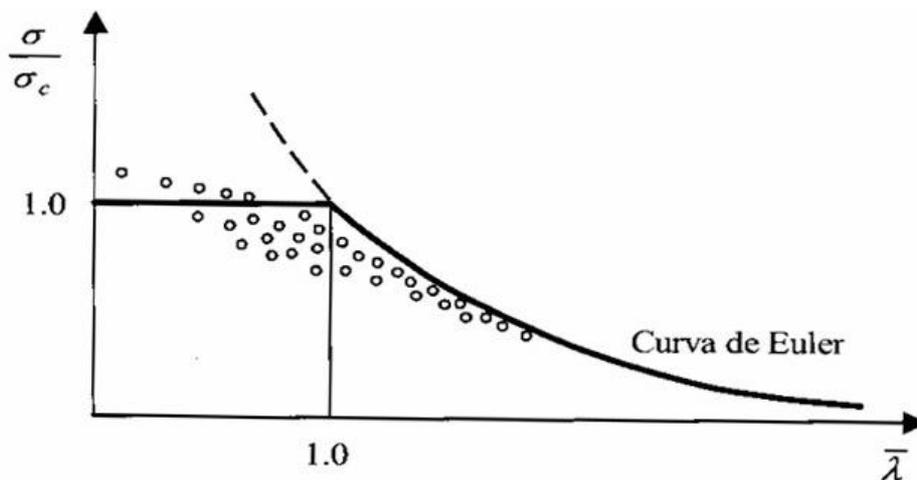


Figura 2.6 – Resultados de ensaios experimentais em peças reais [9]

De acordo com os padrões de verificação do Eurocode 3, parte 1-1 [5], a resistência das seções transversais de elementos axialmente comprimidos é verificada através da seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 0,1 \quad (2.11)$$

em que N_{Ed} é o valor de cálculo do esforço axial de compressão atuante e $N_{c,Rd}$ a resistência à flambagem por flexão do elemento. Dada pela eq. 2.12 e 2.13, respectivamente, consoante a classe da seção.

- Seções de classe 1, 2 ou 3

$$N_{Rdc} = \frac{A f_y}{M_0} \quad (2.12)$$

□ Seções de classe 4

$$N_{Rdc} = \frac{A_{eff} f_y}{M} \quad (2.13)$$

sendo A igual a área total da seção, A_{eff} a área efetiva da seção transversal de classe 4, f_y a tensão de escoamento do aço e M_0 o coeficiente de segurança.

Em elementos comprimidos deve-se adicionalmente verificar a condição da equação 2.14, sendo $N_{b,Rd}$ a resistência à flambagem por flexão do elemento. Dada pela equação 2.15 e 2.16 consoante a classe da seção.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rdb}} \leq 0.1 \quad (2.14)$$

□ Seções de classe 1, 2 ou 3

$$N_{Rdb} = \frac{A f_y}{M} \quad (2.15)$$

□ Seções de classe 4

$$N_{Rdb} = \frac{A_{eff} f_y}{M} \quad (2.16)$$

onde χ é o fator de redução para o modo de flambagem relevante e χ_{M1} o coeficiente parcial de segurança, definido de acordo com o Eurocode 3, parte 1-1 [5]. O coeficiente χ é obtido através da seguinte equação:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}}, \text{ mas } 0,5 \leq \chi \leq 1,0 \quad (2.17)$$

Na expressão 2.17, $\chi = 5 \left[0 + \left(\frac{2}{\lambda} \right)^2 \right]$ e λ é o coeficiente de esbeltez normalizado, dado por:

□ Seção 1, 2 ou 3

$$\chi = \frac{A f_y}{N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

□ Seção 4

$$\chi = \frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{A_{eff}}{A} \frac{1}{\lambda} \quad (2.19)$$

em que χ é um fator de imperfeição generalizado, N_{cr} é a carga crítica elástica (carga de Euler) para o plano mais condicionante, L_{cr} é o comprimento de flambagem correspondente,

i é o raio de giração e $\lambda = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \frac{L_{cr}}{i}$, sendo $\lambda = 235 \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{E}{f_y}}$.

As imperfeições reais da estrutura são incluídas no processo de dimensionamento à compressão através do fator de imperfeição χ , que toma os valores 0,13, 0,21, 0,34, 0,49 e 0,79 para as curvas a, b, c, d, e e, respectivamente. Estas curvas podem ser traduzidas matematicamente pela equação 2.17 e são ilustradas graficamente na Figura 2.7.

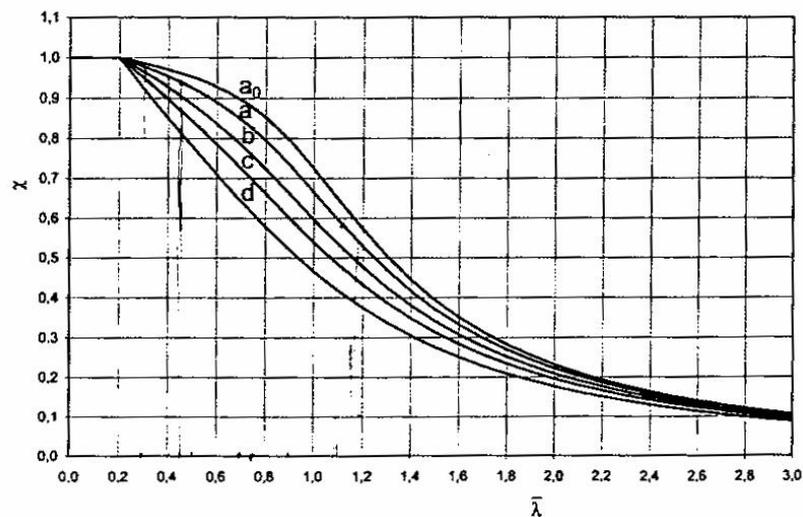


Figura 2.7 – curvas de flambagem segundo Eurocode 3, parte 1-1 [5]

O fator de imperfeição χ associada à curva de flambagem adotado no dimensionamento de um dado elemento metálico, depende de da geometria das seções

transversais, do processo de fabricação e do plano de flambagem condicionante, conforme descreve-se na Figura 2.8.

Secção	Geometria	Eixo de flexão	Curva de encurvadura			
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460		
Laminadas I ou H		$h/b \geq 1.2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a	a_0
				z-z	b	a_0
		$h/b \leq 1.2$	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
				z-z	c	a
				y-y	b	a
				z-z	c	a
$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a		
		z-z	c	a		
$h/b \leq 1.2$	$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	c		
		z-z	d	c		
Soldadas I ou H			$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	b
				z-z	c	c
			$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y	c	c
				z-z	d	d
Tubulares			Laminadas a quente	qq.	a	a_0
			Enformadas a frio	qq.	c	c
Soldadas ocas			Em geral	qq.	b	b
				Cordões: $a > 0.5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	qq.	c
U, T e sólidas				qq.	c	c
Secções L				qq.	b	b

Figura 2.8 – Seleção da curva de flambagem [9]

2.4. Dimensionamento a Flexão Composta da Torre Eólica

O comportamento de elementos estruturais sujeitos à flexão composta, resulta da combinação dos efeitos da flexão e do esforço axial. Em elementos com esbelteza elevada,

submetidos à flexão composta com compressão, o colapso tende a ser por flambagem por flexão ou por flambagem local.

Num elemento submetido a flexão composta, para além dos deslocamentos e momentos de primeira ordem (obtidos com base na posição inicial), existem deslocamentos e momentos secundários adicionais, que devem ser considerados na análise e dimensionamento. A Figura 2.9 ilustra o comportamento de uma viga coluna através de um deslocamento e_0 , submetido à flexão e compressão; o diagrama de momentos fletores representado inclui os momentos de primeira ordem, acrescidos dos momentos de segunda ordem resultantes do acréscimo de deformação transversal.

O comportamento de um elemento submetido à flexão composta com compressão resulta de uma interação entre fenómeno de instabilidade e plasticidade, sendo ainda bastante influenciado pelas imperfeições geométricas e dos materiais. Tendo em conta elevado grau de complexidade associado a este tipo de análise, as expressões regulamentares para verificação da segurança de elementos submetidos à flexão composta com compressão, baseiam-se em fórmulas de interação (M-N), calibradas com base em resultados experimentais e numéricos, do tipo:

$$\frac{N}{N_u} + \frac{M_y}{M_{uy}} + \frac{M_z}{M_{uz}} = 0,1 \quad (2.20)$$

sendo N , M_y e M_z os esforços atuantes e N_u , M_{uy} e M_{uz} os esforços resistentes, equivalentes pelo fenómeno de instabilidade associado. Nestas fórmulas surgem coeficientes que permitem entrar com a influência dos efeitos de segunda ordem e com a forma do diagrama de momentos fletores.

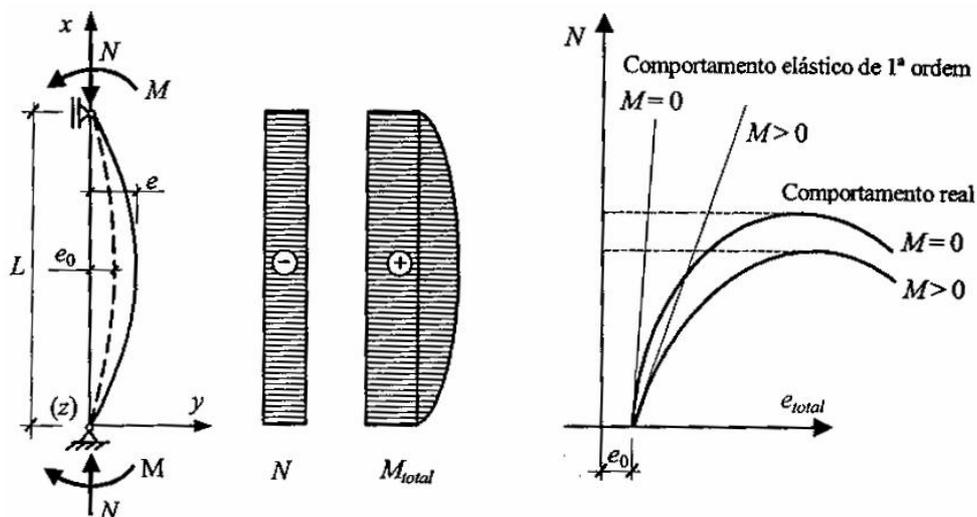


Figura 2.9 – Comportamento de um elemento submetido à flexão composta plana

De acordo com o Eurocode 3, parte 1-1 [5], a verificação da segurança de um elemento submetido a flexão composta é feita em duas etapas:

- Verificação da resistência das seções transversais ;
- Verificação da resistência à flambagem por flexão ou flambagem local.

A resistência das seções transversais é obtida com base na sua capacidade plástica (em seções de classe 1 e 2) ou elástica (seções de classe 3 ou 4). No sub-capítulo 6.2.9 do Eurocode 3, parte 1-1 [5] são fornecidas diversas fórmulas de iteração entre o momento fletor e o esforço axial em regime plástico e em regime elástico, aplicáveis à maior parte das seções utilizadas em estruturas metálicas correntes.

Em seções de classe 1 ou 2 deve ser verificada a seguinte condição:

$$M_{Ed} = M_{RdN} \quad (2.21)$$

onde M_{Ed} é o momento fletor de cálculo atuante e $M_{N,Rd}$ representa o momento resistente reduzido, devido à iteração com o esforço axial.

Em seções circulares ocas, o momento plástico reduzido pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - n \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right) \quad (2.22)$$

sendo n o parâmetro definido por $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$ N_{Ed} esforço axial atuante e $N_{pl,Rd}$ o esforço axial plástico resistente.

Numa seção submetida à flexão composta desviada, a iteração de esforços pode ser verificada através da seguinte relação:

$$\frac{M_{Edy}}{M_{RdyN}} + \frac{M_{Edz}}{M_{RdzN}} = 0,1 \quad (2.23)$$

em que e_y e e_z são parâmetros dependentes da forma da seção e $M_{N,y,Rd}$ e $M_{N,z,Rd}$ são os momentos plásticos resistentes reduzidos em torno de y e z, respectivamente avaliados. Em 6.2.9.1 do Eurocode 3, parte 1-1 [5] são indicados os valores de e_y e e_z para a seção circular oca, ou seja, $e_y = e_z = 0$

Em seções de classe 3 ou 4, a verificação da flexão composta consiste na verificação da seguinte condição:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{f_y}{M_0} \quad (2.24)$$

em que $\sigma_{x,Ed}$ é a tensão normal máxima, avaliada através de uma análise elástica de tensões, com base na seção total em seções de classe 3, e numa seção efetiva reduzida em seções de classe 4. O cálculo da área efetiva, bem como da excentricidade resultante, em seções de classe 4, deve ser efetuada de acordo com a Eurocode 3, parte 1-1 [5].

A verificação da segurança em relação à flambagem por flexão e à flambagem local, num elemento com seção transversal duplamente simétrica, submetido à flexão composta com compressão, é efetuada através das seguintes condições:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} = 0,1 \quad (2.25)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} = 0,1 \quad (2.26)$$

onde N_{Ed} , $M_{z,Ed}$ são os valores de cálculo do esforço axial de compressão e dos momentos fletores máximos em torno de y e z, respectivamente; $M_{z,Ed}$ e $M_{y,Ed}$ são os momentos

devidos à variação do centro de gravidade em seções de classe 4; η_y e η_z são os fatores de redução devido a flambagem por flexão em torno do eixo y e z, respectivamente, de acordo com o item 6.3.1 do Eurocode 3, parte 1-1 [5]; η_{LT} é o fator de redução devido a flambagem local, de acordo com o item 6.3.2 do Eurocode 3, parte 1-1 [5]; η_{yy} , η_{yz} , η_{zy} , η_{zz} são fatores de iteração dependentes dos fenômenos de instabilidade e de plasticidade envolvidos, obtidos de acordo com o Anexo A do Eurocode 3, parte 1-1 [5] (Método 1) ou

W_i e M_{Edi} estão de acordo com a Tabela 2.1, dependentes da classe da seção transversal do elemento em análise.

No Eurocode 3, parte 1-1 [5] são apresentados dois métodos para o cálculo dos fatores de iteração η_{yy} , η_{yz} , η_{zy} , η_{zz} : o método 1, desenvolvido por um grupo de investigadores Franco-Belga e o método 2, desenvolvido por um outro grupo de investigadores Austro-Alemão.

Tabela 2.1 – Valores para o cálculo de N_{RK} , $M_{i,Rk}$ e $M_{i,Ed}$

Classe	1	2	3	4	
f_y	A	A	A	A	f_{eff}
$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
M_{Edy}	0	0	0	e	$N_{y} N_{Ed}$
M_{Edz}	0	0	0	e	$N_{z} N_{Ed}$

2.5. Verificação de Estruturas Formadas por Elemento de Casca

O Eurocode 3, parte 1-6 [14] é usualmente aplicado em elementos estruturais formados por chapa de aço que possuam espessura menor que as dimensões de comprimento e largura com ou sem enrijecedores.

A definição dos valores característicos de resistência da estrutura pode ser feito através do Eurocode 3, parte 1-1 [5], fazendo-se necessária uma verificação nos estados limites últimos relativos a:

- limites de plastificação;
- plastificação cíclica;
- flambagem;
- fadiga.

2.5.1. Estado Limite de Plastificação

O estado limite de plastificação representa a capacidade da estrutura para em às ações atuantes, sem exceder a tensão de escoamento. Por outro lado a tensão de ruptura será considerada quando houver uma tensão que provoque a falha em uma das seções transversais.

A tensão resistente no estado limite de plastificação será dada pela equação 2.27:

$$f_{eqRd} = \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (2.27)$$

onde o fator de resistência γ_M sugerido pelo Eurocode 3, parte 1-6 [14] é de 1,1.

A equação 2.28 define a verificação do estado limite de plastificação.

$$f_{eqRd} = f_{eqRd} \quad (2.28)$$

onde f_{eqRd} é o valor da tensão equivalente de Von Mises dada pela equação 2.29:

$$f_{eqEd} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.29)$$

A classificação das seções transversais dos elementos estruturais traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma seção é influenciada por fenômenos de flambagem local. Enquanto que numa seção compacta as zonas comprimidas podem plastificar completamente, numa seção esbelta isso pode não ocorrer devido aos fenômenos de flambagem local.

2.5.2. Estado de Plastificação devido a Cargas Cíclicas

O estado limite de plastificação cíclicas é a capacidade da estrutura para resistir à repetição de carregamento cíclico proveniente de tensões de tração e de compressão em pontos críticos da estrutura. O aparecimento de fissuras locais e de ruptura é provocado pela superação da capacidade de absorção de energia do material.

A força equivalente de Von Mises f_{eqRd} é dada pela equação 2.230

$$f_{eqRd} = \frac{f_{yd}}{2} \quad (2.30)$$

A verificação deste estado limite de plastificação deve satisfazer a equação 2.31

$$f_{eqEd} = f_{eqRd} \quad (2.31)$$

O valor de f_{eqEd} é expresso pela equação 2.32:

$$f_{eqEd} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.32)$$

2.5.3. Estado de Flambagem

O estado limite de flambagem representa a condição da estrutura para resistir totalmente ou parcialmente a grandes deslocamentos normais a superfície da casca, causado pela perda de estabilidade a compressão ou a força de cisalhamento da superfície da parede da casca.

Dependendo do carregamento e da força atuante, uma ou mais verificações deverão ser feitas:

$$x_{Ed} = x_{Rd}; \quad E_d = R_d; \quad x_{Ed} = x_{Rd} \quad (2.33)$$

2.5.4. Estado de Fadiga

O estado limite de fadiga corresponde a capacidade da estrutura para resistir ao ciclo de repetição do carregamento. A verificação para este estado tem que satisfazer a equação 2.34:

$$F_E = R_{Mf} \quad (2.34)$$

onde: F_f é o fator parcial de carregamento da fadiga; M_f é o fator parcial de resistência da fadiga; E é a constante equivalente da amplitude da tensão espectral considerada e R é a tensão da fadiga associado ao detalhe da categoria e ao número de ciclo da tensão espectral considerados.

A apresentação das características da torre eólica modelo MM92 da Repower [8], do modelo numérico utilizado com as simplificações adotadas e os tipos de análise realizadas na presente dissertação serão apresentados no capítulo seguinte.

3. Caracterização do Modelo Numérico

3.1. Introdução

O presente capítulo é destinado à descrição detalhada das simulações computacionais desenvolvidas nessa dissertação. Primeiramente, são abordadas as características da torre eólica estudada e o seu modelo estrutural propriamente dito. A seguir serão discutidas as metodologias de análise empregadas.

3.2. Características da Torre Eólica MM92 [8]

A torre eólica de aço estudada nesta dissertação refere-se ao modelo MM92 da Repower [8], presente em diversos países como Espanha, Portugal e Alemanha possuindo uma capacidade de gerar 2 MW de energia elétrica. A produção de energia elétrica está diretamente vinculada a velocidade do vento na região onde as torres estão instaladas. O modelo MM92 começa a produzir energia a partir de uma velocidade de 3 m/s e interrompe sua produção quando atinge uma velocidade de 24 m/s. Este modelo de torre tem atualmente uma das melhores tecnologias de captação de energia eólica.

O modelo MM92 [8] possui um formato de um tronco cônico vazado dividido em três partes com a finalidade de facilitar o transporte e a montagem. A primeira possui uma altura de 21,77 m, diâmetro na base de 4,30 m e no topo de 3,917 m, a segunda uma altura de 26,62 m, diâmetro na base de 3,917 m e no topo de 3,45 m e, finalmente, uma terceira com altura de 2,78 m com diâmetro na base de 3,45 m e no topo de 2,96 m, totalizando uma altura de 76,20 m. A Figura 3.1 ilustra as divisões da torre e um modelo da torre MM92 [8] possuindo um diâmetro externo máximo de 4300 mm localizado na base e 2955 mm no topo da torre. A espessura da parede da torre varia ao longo de sua altura entre 30 mm na base e 12 mm no topo. Na Figura 3.1 (b) pode-se observar uma igualdade na medida dos diâmetros, isto se faz necessário para se ter na superfície externa da torre uma continuidade, ou seja, uma superfície plana.

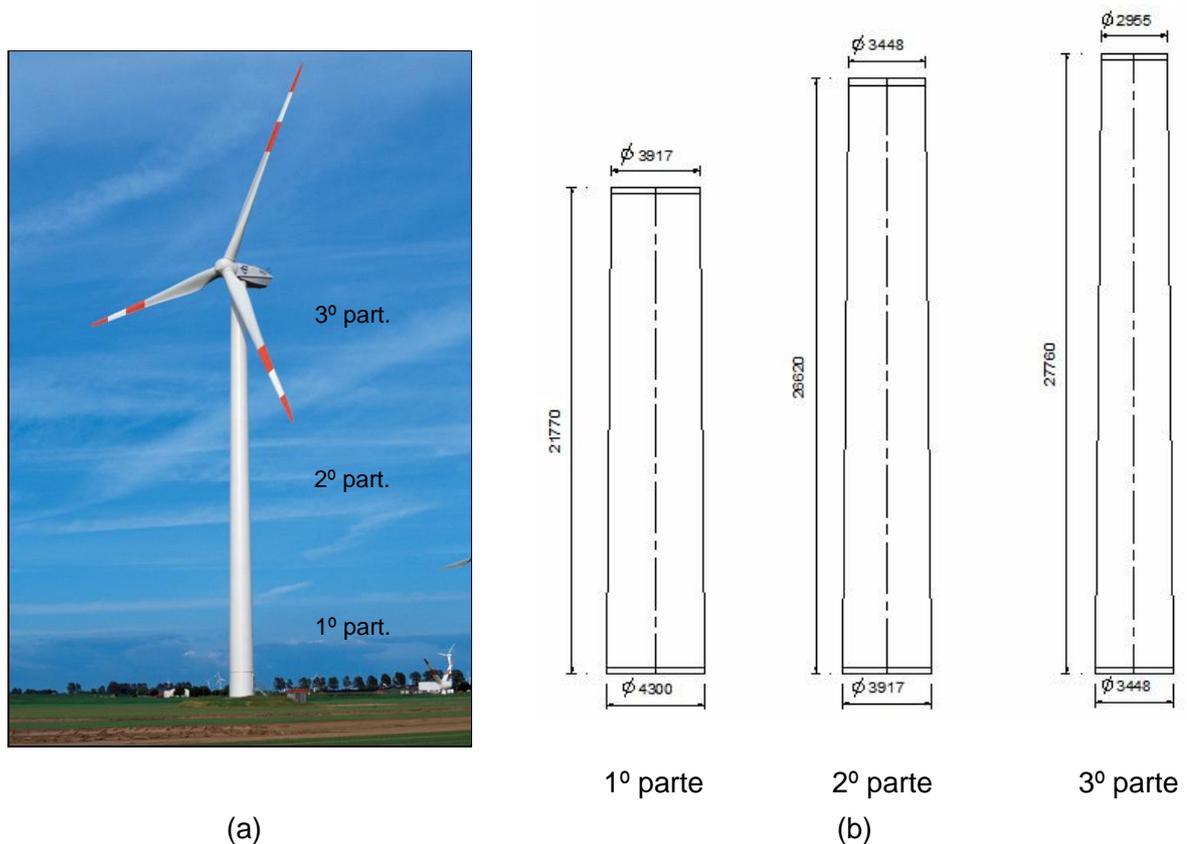


Figura 3.1 - Representações da torre eólica MM92 da Repower [8]

O sistema de ligação por aparafusamento é o utilizado para conectar as partes da torre. Na torre investigada nesta dissertação emprega-se um total de 464 parafusos com diâmetro de 45 mm para ligação da primeira parte com a fundação e com a segunda, de 39 mm ligando a segunda com a terceira parte e de 30 mm ligando a terceira parte com o topo. Na ligação das partes da torre surgem os enrijecedores, em virtude da espessura dos flanges de ligação ser superior à da parede da torre. A Figura 3.2 ilustra um dos flanges de ligação utilizada na torre e o enrijecedor criado pela ligação partes da torre são conectadas por meio de flanges e por possuírem espessuras maiores em relação à torre passam a existir nesta região os enrijecedores. A Figura 3.2 representa de forma esquemática um enrijecedor utilizado na torre. Existem duas aberturas na torre, uma para acesso interno (maior) e outra para ventilação (menor), ambas têm o formato de uma elipse com enrijecedor perpendicular à abertura ver Figura 3.2.

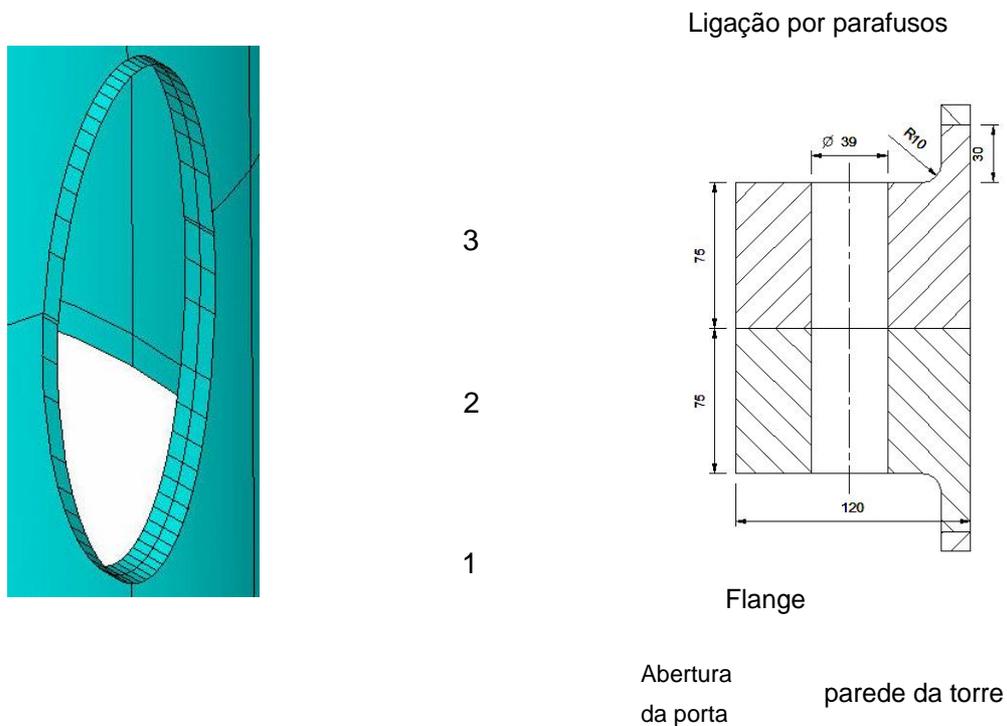


Figura 3.2 - Esquema de ligação e do enrijecedor [8].

A parte superior da torre é composta por três pás de hélice medindo cada uma 45,20 m fabricadas com resina plástica reforçadas com fibra de vidro e pesando cada uma 800 kg. As pás são transportadas separadamente e engastadas ao rotor através de parafusos criando, quando em funcionamento, uma superfície variada de 6.720 m². O rotor da torre é responsável em fazer girar a turbina e consequentemente, produzir a energia elétrica. A nacelle é o conjunto de todos os equipamentos mecânicos e elétricos localizados na parte superior da torre, pesando 6900 kg. A

Figura 3.3 ilustra a nacelle, o rotor e as pás da hélice da torre modelo MM92 [8]. A parede da torre, dos flanges e do enrijecedor da abertura da porta são fabricados em aço S355 que possui tensão de escoamento de 355MPa e um módulo de elasticidade de 205 GPa.

Nacelle

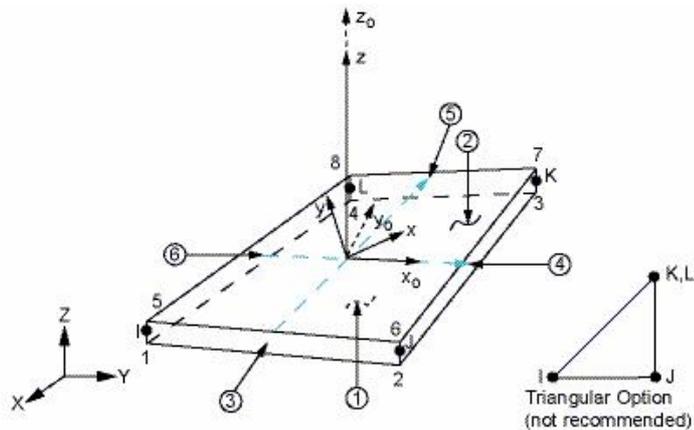


Figura 3.3 - Parte superior da torre MM92 [8]

3.3. Modelo Computacional

Os modelos numéricos foram elaborados com base no método dos elementos finitos utilizando-se elementos de casca SHELL181 presente na biblioteca de elementos do programa Ansys versão 10.0 [11]. Este elemento é adequado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentem espessuras finas e médias. O elemento SHELL181 é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z. Trata-se de um elemento adequado para a modelagem de problemas estruturais que envolvam análise linear e não-linear física e geométrica. Na Figura 3.4, apresenta-se este elemento que foi utilizado na elaboração dos modelos em elementos finitos desta dissertação.

Não-linearidades físicas e geométricas foram incorporadas aos modelos em elementos finitos, a fim de se mobilizar totalmente a capacidade de resistência da torre a esforços normais, de cisalhamento e de flexão, devido à ação de esforços globais. Adicionalmente, a utilização de não-linearidade geométrica permite a previsão de grandes deformações, considerando a redistribuição de carregamento na torre após o escoamento inicial.



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

x = Element x-axis if ESYS is provided.

Figura 3.4 - Elemento finito SHELL181 implementado no programa ANSYS[11]

As condições de contorno da torre eólica de aço foram simuladas nos modelos numéricos pela restrição do grau de liberdade apropriado, sendo considerado o impedimento da rotação e translação dos eixos x , y e z , ou seja, uma base engastada. As malhas dos modelos de elementos finitos foram definidas através de testes de validação de modelagem, isto é, as análises modais dos modelos foram realizadas com diversas densidades de malhas e à medida que as malhas iam sendo refinadas, as repostas das análises iam variando. Quando os resultados convergiram para os resultados experimentais [12], ou seja, não apresentaram variações significativas nos resultados, as malhas foram consideradas como aceitáveis. O modelo final adotado foi constituído por 17094 elementos e 17124 nós, conforme apresentado na Figura 3.5 (a). Na modelagem das aberturas das portas foram consideradas todas as suas características geométricas e também os enrijecedores, ver Figura 3.5 (c). As pás das hélices, o rotor e a nacelle foram representados por um elemento de casca, conforme Figura 3.5 (c), com densidade equivalente aos respectivos pesos.

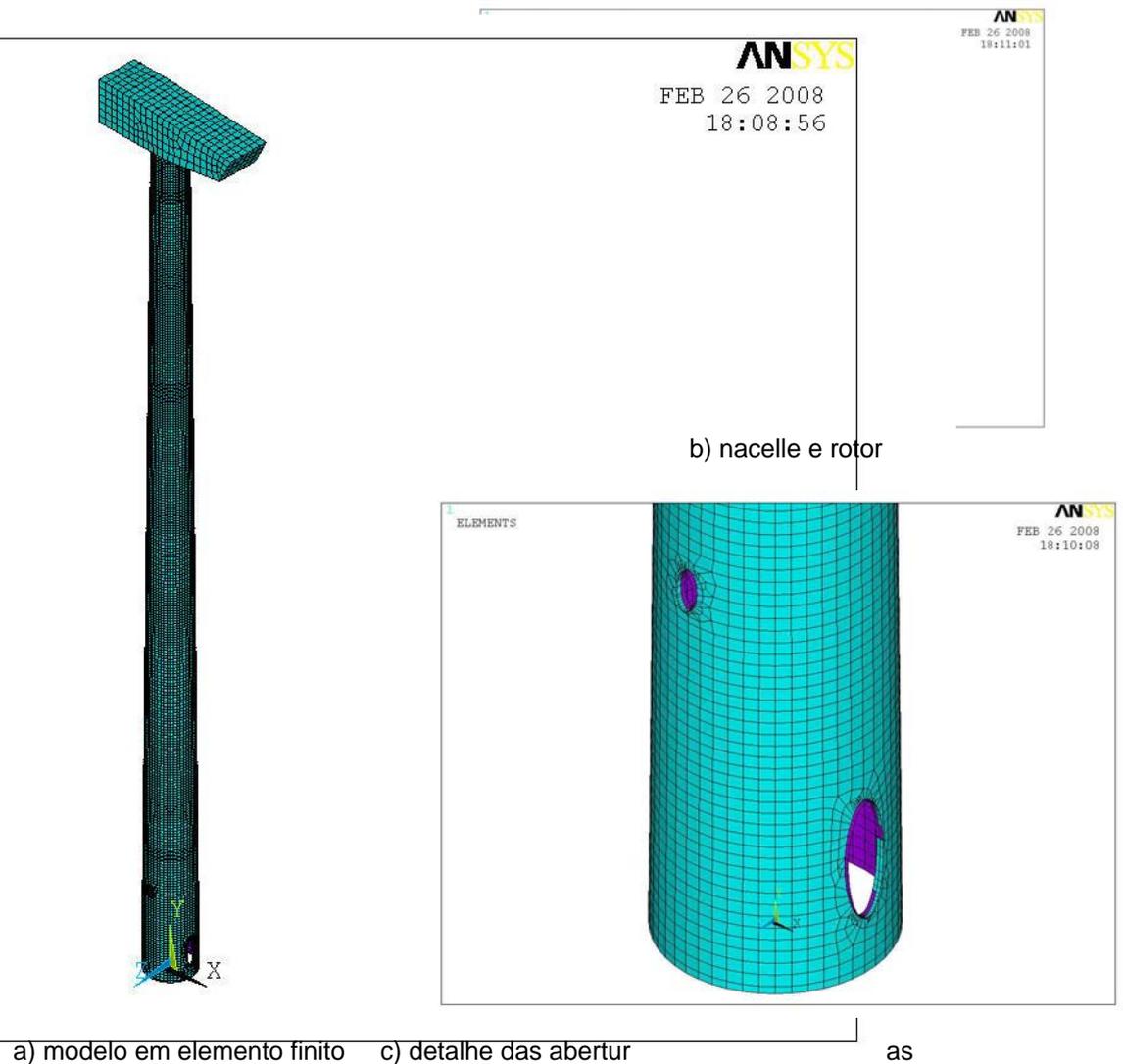


Figura 3.5 - Detalhe estrutural e modelo em elemento finito

3.4. Hipóteses Simplificadoras

Objetivando-se a implementação computacional de um modelo matemático, mediante o emprego do método dos elementos finitos, de forma a traduzir mais realisticamente o efeito da torre eólica estudada na dissertação foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- a) assume-se a hipótese clássica de Bernoulli na qual se considera que a seção transversal dos elementos permanece plana e normal ao eixo baricêntrico destes, antes e após as deformações. Os efeitos de empenamento e distorção das seções não foram considerados nesta modelagem;

- b) considera-se que as tensões impostas não causam plastificação na seção transversal dos elementos. Todavia, efeitos de segunda ordem foram levados em conta na análise;
- c) considera-se que a ligação das partes da torre não sofre o efeito de cisalhamento.
- d) o material da nacelle, rotor e hélice foram considerados como possuindo um comportamento linear-elástico e isotrópico.
- e) na parede da torre, no flange e no enrijecedor da abertura das portas o modelo numérico tem um comportamento elasto-plástico bilinear com um encruamento de 5%.

3.5. Modelagem do Amortecimento

A matriz de amortecimento, C , é geralmente expressa em termos de taxas de amortecimento obtidas experimentalmente, através de ensaios dos sistemas estruturais ou de suas componentes constituídos do mesmo material, devido à dificuldade de se avaliar fisicamente essa matriz. É usual se utilizar a matriz de amortecimento do tipo proporcional ou de Rayleigh [15], cuja matriz C é proporcional a matriz de rigidez e de massa.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (3.1)$$

Em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular, dada em rad/s, a equação 3.1 pode ser reescrita como:

$$c_i = \frac{a_0}{2} + \frac{a_1 \omega_i}{2} \quad (3.2)$$

onde c_i é a taxa de amortecimento do modo i e ω_i é a frequência natural circular do modo $i = 2 \pi f_{ni}$. Isolando os termos a_0 e a_1 da Equação 3.2 para duas frequências naturais, tem-se:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & \omega_2^2 - \omega_1^2 \\ \omega_2^2 - \omega_1^2 & \omega_2^2 - \omega_1^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$a = 2\zeta\omega_1 - a_1\omega_1^2 \quad (3.4)$$

Portanto, a partir da definição de duas frequências naturais, pode-se determinar o valor dos parâmetros a_0 e a_1 , que definem a matriz de amortecimento. Nesta dissertação foram consideradas as duas primeiras frequências naturais da estrutura para o cálculo dos parâmetros a_0 e a_1 .

3.6. Análises Realizadas

3.6.1. Análise Estática Linear

Na análise estática considera-se o aço da torre com o elástico, conforme o gráfico da Figura 3.6, O objetivo da análise estática foi determinar o máximo deslocamento ocorrido na torre eólica provocada por uma carga concentrada aplicada no centro do rotor, representando a força resultante do vento atuando nas pás da hélice, conforme descrito no segundo capítulo desta dissertação.

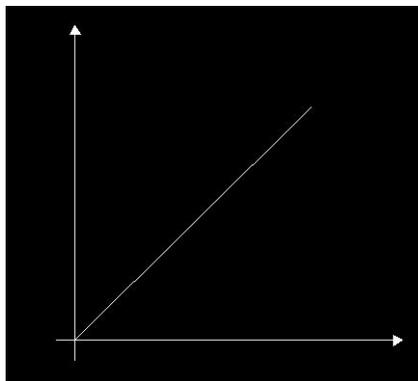


Figura 3.6 - Curva tensão versus deformação

3.6.2. Análise Dinâmica

Ao longo do presente estudo, foram desenvolvidas análises de autovalores e autovetores, harmônicas e análises transiente. As análises de autovalores e autovetores

constituíram uma fase inicial do estudo, onde pode-se determinar os parâmetros importantes de uma estrutura tais como: freqüências naturais e modos de vibração.

Na análise harmônica, a resposta permite prever o comportamento dinâmico da estrutura sob carregamento cíclico. Isto permite verificar quais os valores decorrentes que podem gerar ressonância na estrutura, fadiga ou outros efeitos. Qualquer carga cíclica produz uma resposta dinâmica estacionária (função temporal conhecida). A análise da resposta harmônica é uma técnica usada para determinar a resposta de uma estrutura sob a ação de cargas que variam harmonicamente com o tempo, conforme a Equação 3.5

$$(\sin \omega t + \phi) \quad (3.5)$$

onde ω é a freqüência de excitação em termos de ciclos por tempo e ϕ é o ângulo de fase. A idéia do processo foi calcular a resposta da estrutura para várias freqüências e obter um gráfico da resposta (deslocamento nodal) em função da freqüência. Os picos de resposta são identificados no gráfico e as tensões podem ser analisadas para esses valores. Picos na resposta ocorrem quando as freqüências das forças se igualam às freqüências naturais da estrutura. Esta fase é muito importante, pois é através dela que se obtém a contribuição dos modos que participam da resposta para um certo tipo de carregamento.

Na análise transiente, é determinada a resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de vários tipos de carregamento dependentes do tempo. Pode-se utilizar esse tipo de análise para determinar a variação no tempo dos deslocamentos, esforços e tensões como resposta de uma combinação da ação de cargas estáticas, harmônicas e transientes. Nesta análise, o amortecimento considerado é do tipo proporcional ou de Rayleigh [15], sendo a matriz de amortecimento montada a partir dos parâmetros a_0 e a_1 , que são coeficientes, relacionados com a matriz de massa e a matriz de rigidez, respectivamente. Esses parâmetros são determinados em função das taxas de amortecimento, visto em capítulo anterior desta dissertação.

3.6.3. Análise Não-Linear

Visando a obtenção do comportamento global da torre eólica mais próximo da realidade, efetuou-se uma análise não-linear da mesma.

A análise de não-linear completa foi executada no modelo estrutural que usa a não-linearidade do material e a geométrica. A carga foi aplicada em termos de deslocamento no centro de nacelle de torre. O princípio para o estudo da análise não-linear consiste em provocar um deslocamento no centro do rotor da torre. Na análise numérica estática não-linear realizada, a não-linearidade do material foi considerada através do critério de

plastificação de Von Mises por meio de uma lei constitutiva tensão versus deformação bilinear de forma a exibir um comportamento elasto-plástico com um encruamento de 5%. Adotou-se um módulo de elasticidade para o aço de 205 GPa e uma tensão de escoamento de 355 MPa. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange atualizado.

O programa Ansys 10.0 [11] utiliza o método de Newton-Raphson para resolução do sistema de equações não-lineares. Este método se baseia na divisão da carga em uma série de incrementos, sendo aplicados em vários passos de carga. Em cada passo de carga uma configuração de equilíbrio é gerada e um novo incremento é aplicado e uma nova configuração de equilíbrio até se concluir o número total de incrementos.

A Figura 3.7 a seguir, ilustra um exemplo do processo de iteração pelo método Newton-Raphson, onde na abscissa estão os u_i e u_{i+1} , valores de passos que após a iteração obterá a convergência e na ordenada os respectivos valores de carregamento.

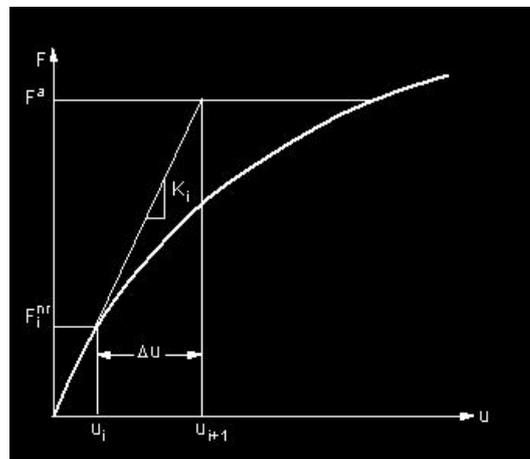


Figura 3.7 - Processo de iteração de Newton-Raphson

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos para uma análise linear estática e dinâmica na torre eólica modelo MM92 da Repower [8].

4. Análise Dinâmica

4.1. Introdução

Conforme citado no capítulo dois dessa dissertação, este parágrafo apresenta os resultados obtidos na análise linear estática e dinâmica. A análise estática teve como objetivo avaliar a coerência do modelo em termos de uma análise preliminar. Já a análise dinâmica serviu inicialmente para calibração do modelo comparando-se a frequência fundamental obtida numericamente com valores experimentais fornecidos por Rebelo e Silva [12]

4.2. Análise Linear Estática

A Figura 4.1 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises ao longo da torre, pela ação do vento de velocidade média de 36 m/s provocando um carregamento de 308,45 kN aplicado no centro do rotor, conforme descrito no segundo capítulo dessa dissertação item 2.2. Nesta análise observa-se que a maior tensão de Von Mises (97,2 MPa) foi obtida junto à abertura da porta da torre e esta não excede o valor da tensão de escoamento do aço de 355 MPa. O maior deslocamento ocorre no ponto de aplicação do carregamento, ou seja, no centro do rotor, com valor de 51 cm. A Figura 4.1 ilustra também a distribuição das tensões de Von Mises nos enrijecedores onde se encontram os menores das tensões de Von Mises.

Conforme citado anteriormente, as maiores tensões de Von Mises foram localizadas na região da abertura da porta e as menores no topo da torre este fato se justifica pela diferença na rigidez do material adotado para a nacelle em relação ao da parede da torre. Também verificam-se valores menores nos enrijecedores, evidenciando-se sua necessidade.

Para uma verificação do estado limite de utilização em torres metálicas correntes segundo o Eurocode 3, parte 3-2 [16], o deslocamento máximo permitido no topo dessas estruturas é representado pela equação 4.1.

$$\sigma_{\text{adm}} \leq \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\gamma} \quad (4.1)$$

onde h representa a altura da torre.

Utilizando-se os dados da torre eólica modelo MM92 da Repower [11] na equação 4.1, encontra-se um valor de 1,53 m superior aos 0,51 m provocados pela ação do vento.

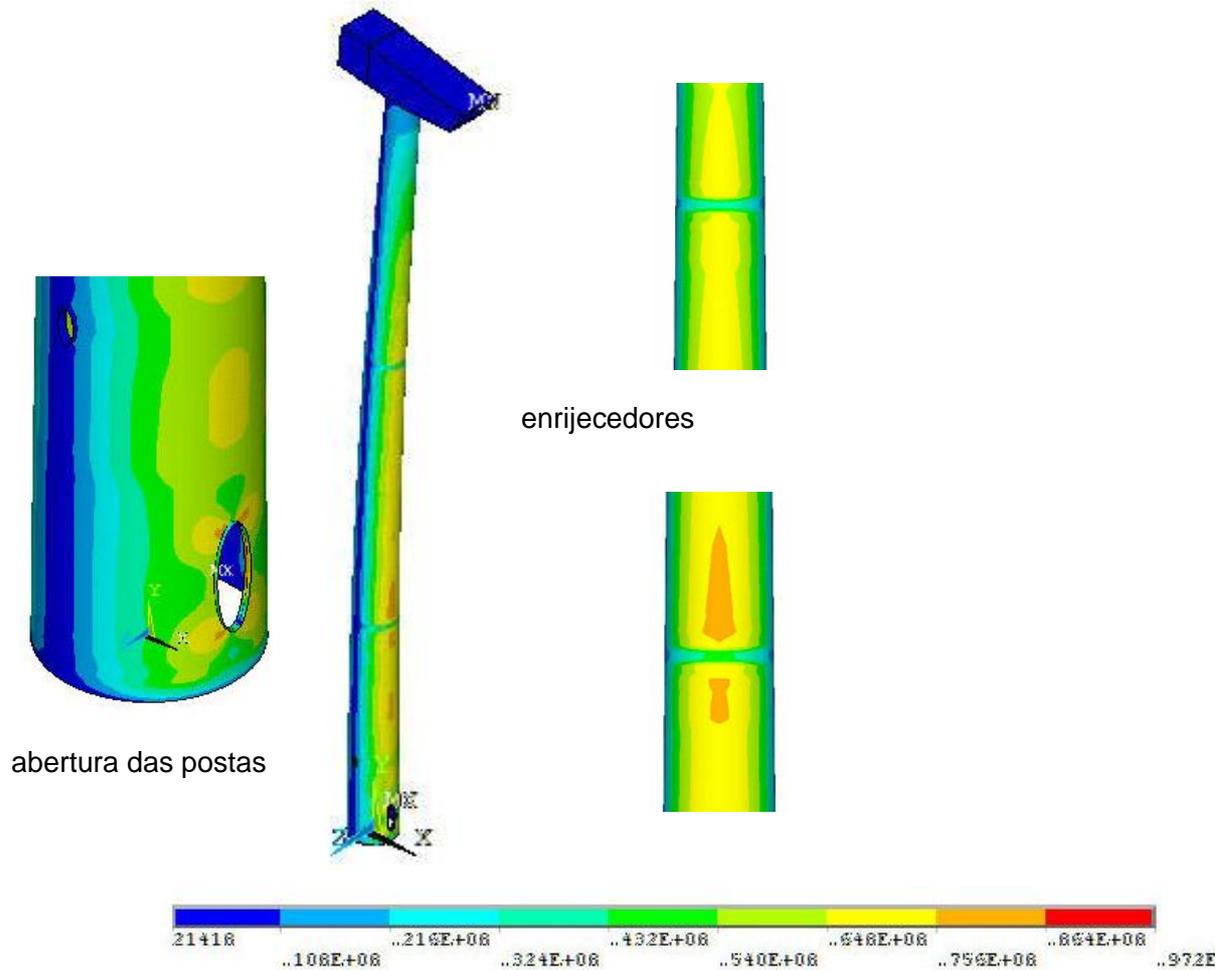


Figura 4.1 – Distribuição das tensões de Von Mises (em Pa) devido ao carregamento de 308,45 kN

4.3. Análise Dinâmica

Serão apresentados os resultados obtidos, mediante a modelagem computacional do modelo estrutural em estudo, referentes à análise dos autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração). Na sequência, procede-se a uma análise harmônica, objetivando identificar quais as frequências do modelo que apresentam maior participação na resposta dinâmica. Finalmente, após a definição das características dinâmicas da estrutura, uma análise transiente é realizada, de forma a verificar a resposta do sistema no domínio do tempo.

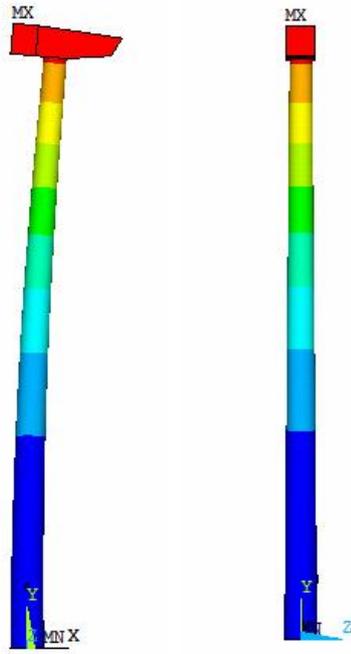
4.3.1. Análise dos Autovalores e Autovetores

Com base nas simulações numéricas realizadas, são determinadas as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) da torre eólica em estudo. Inicialmente, a Tabela 4.1 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente [12] com aqueles obtidos mediante o emprego da metodologia de análise desenvolvida nesta dissertação. A partir da calibração dos resultados numéricos, são mostrados na Tabela 4.1 os valores das seis primeiras frequências naturais, obtidas via análise numérica.

Tabela 4.1 – Frequências Fundamentais

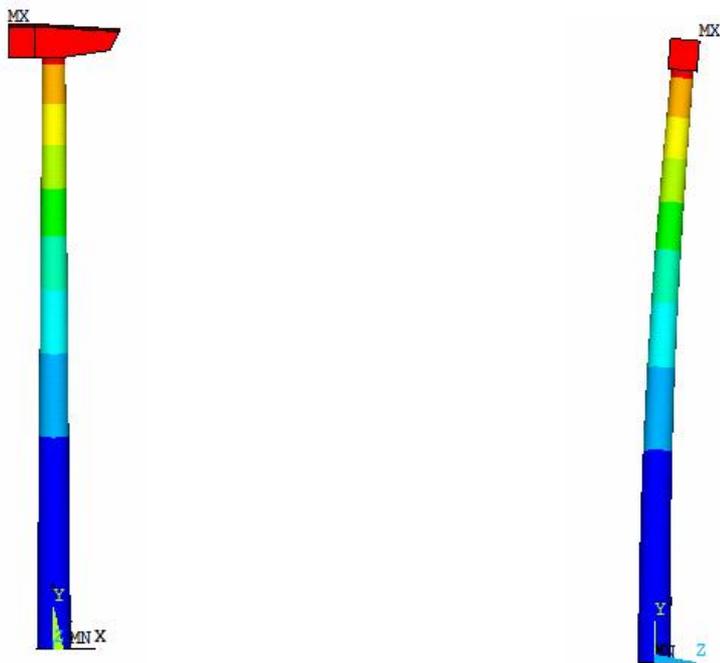
Frequências	Análise Numérica (Hz)	Experimental [12] (Hz)	Erro (%)
f_{01}	0,36	0,34	6,54
f_{02}	0,36	0,34	6,18
f_{03}	2,59	2,77	6,42
f_{04}	2,64	2,79	5,43
f_{05}	2,89	-	-
f_{06}	7,90	-	-

Na Tabela 4.1 pode-se observar, que os resultados fornecidos pelo modelo numérico são muito próximos daqueles correspondentes ao teste experimental [12], apresentando diferenças aceitáveis, sob o ponto de vista numérico. Tal fato demonstra a coerência e a consistência dos resultados obtidos, com base no emprego do modelo computacional desenvolvido no presente estudo. Na sequência do texto, são apresentados os seis primeiros modos de vibração da torre v Figura 4.2 à Figura 4.7.



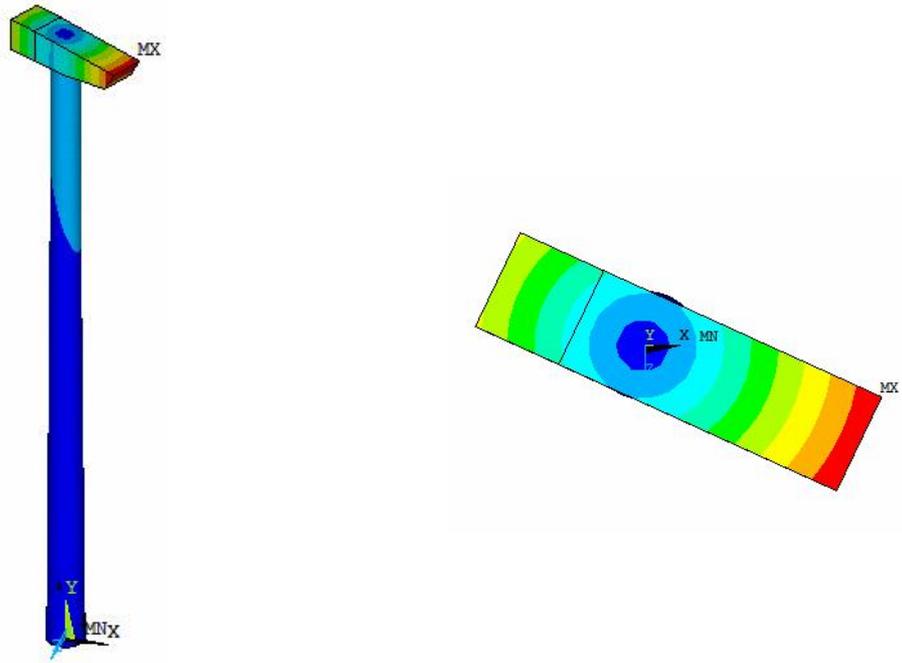
(a) Vista Lateral (b) Vista Frontal

Figura 4.2 - Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural do modelo estrutural: flexão no plano XY



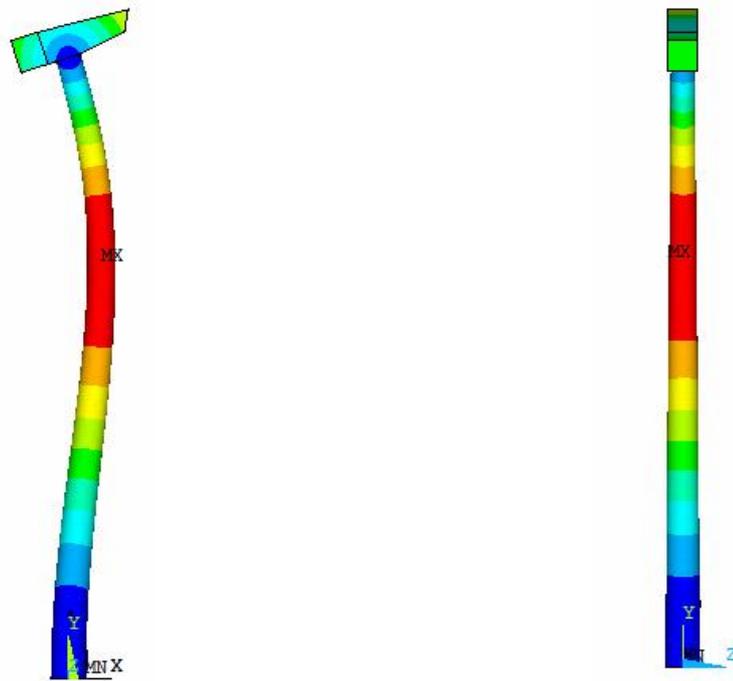
(a) Vista Lateral (b) Vista Frontal

Figura 4.3 - Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ



(a) Vista Lateral (b) Vista Frontal

Figura 4.4 - Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural do modelo estrutural: torção



(a) Vista Lateral (b) Vista Frontal

Figura 4.5 - Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural do modelo estrutural: flexão no plano XY

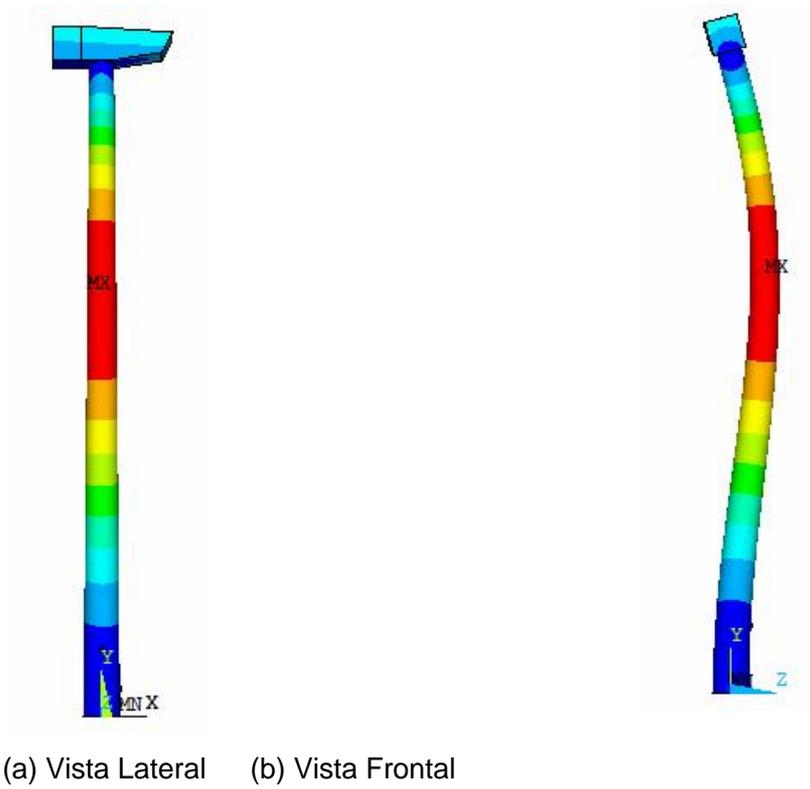


Figura 4.6 - Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ

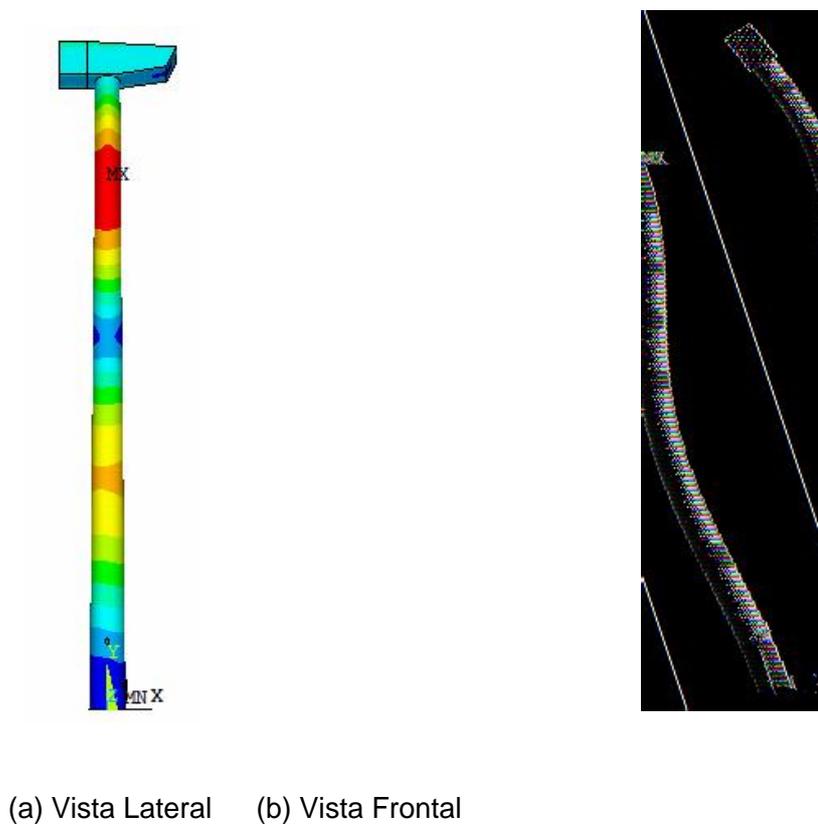


Figura 4.7 - Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural do modelo estrutural: flexão no plano YZ.

Da Figura 4.2 à Figura 4.7 ilustram-se os seis primeiros modos de vibração do modelo estrutural. A Figura 4.2 mostra a primeira frequência natural com valor igual a 0,36 Hz ($f_{01}=0,36\text{Hz}$) associado a uma flexão no plano XY. A Figura 4.3 representa a segunda frequência natural com valor igual a 0,36 Hz ($f_{02}=0,36\text{Hz}$), associada ao primeiro modo de flexão no plano YZ. Na Figura 4.4 o terceiro modo de vibração é apresentado com um valor de frequência natural igual a 2,59 Hz ($f_{03}=2,60\text{ Hz}$), associado ao primeiro modo de torção. A quarta frequência natural ilustrada pela Figura 4.5 tem valor igual a 2,64 Hz ($f_{04}=2,64\text{ Hz}$) e está associada ao segundo modo de flexão na direção do eixo XY. A quinta frequência natural representada pela Figura 4.6 tem valor igual a 2,89 Hz ($f_{05}=2,89\text{ Hz}$), associado ao segundo modo de flexão na direção do eixo YZ. Finalmente a sexta frequência natural ilustrada pela Figura 4.7 que tem valor igual a 7,90 Hz ($f_{06}=7,90\text{ Hz}$) está associada ao terceiro modo de flexão no plano YZ.

4.3.2. Análise Harmônica

A análise harmônica constitui uma fase importante da modelagem, pois é com base neste estudo que podem ser determinados quais os modos de vibração que contribuem de forma mais significativa para a resposta dinâmica da estrutura.

Assim sendo, apresenta-se na Figura 4.8 o espectro de resposta da torre em estudo, em termos do fator de amplificação dinâmico, FAD, obtido através da relação entre os deslocamentos dinâmico e estático ($FAD = v_D/v_E$). Este espectro de resposta apresenta em sua abscissa o parâmetro de frequência, β , o qual representa a razão obtida entre a frequência de excitação, ω , e a frequência fundamental da estrutura, ω_{01} , como mostra a Figura 4.8.

A análise harmônica foi realizada com base na aplicação de uma carga $P \sin(\omega t + \phi)$, com $P = 308,45\text{ kN}$). O valor da amplitude, P , igual a 308,45 kN, corresponde a ação vento, de forma simplificada, atuando sobre as pás da torre eólica, conforme descrito detalhadamente no segundo capítulo desta dissertação. As frequências de excitação, ω , foram variadas considerando-se um intervalo de 0 à 20 Hz. A Figura 2.2 (b) ilustra o ponto de aplicação do carregamento dinâmico sobre a torre.

Com base no gráfico apresentados na Figura 4.8, percebe-se claramente que, na medida em que o valor do parâmetro de frequência, β , tende à unidade (valor unitário, $\beta = 1$), o nível da amplificação é bastante elevado, denotando a coincidência entre a frequência fundamental da torre eólica ($f_{01} = 0,36\text{Hz}$) e a da excitação, caracterizando a ressonância.

Tal fato indica que a influência do primeiro modo de vibração na resposta desse modelo é preponderante em relação aos demais. Com base neste estudo, pode-se dizer que a torre comporta-se como uma viga engastada e livre. Há ainda, a existência de outros picos

no gráfico, Figura 4.8, associados aos modos de vibração mais elevados do sistema, com pequena participação na resposta dinâmica do modelo.

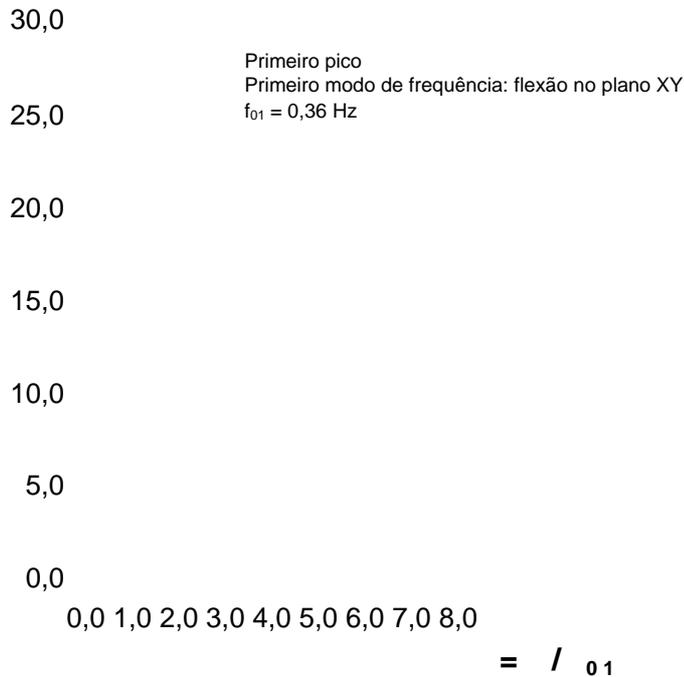


Figura 4.8 - Fator amplificação dinâmica

4.3.3. Análise Transiente

Na análise transiente, é determinada a resposta dinâmica de um sistema estrutural qualquer sob a ação de vários tipos de carregamento dependentes do tempo. Pode-se, ainda, utilizar esse tipo de análise para obter-se a variação da resposta dinâmica do modelo, ao longo do tempo (deslocamentos, esforços e tensões).

Nesta dissertação, foi considerada, novamente, uma carga determinística senoidal $P \sin(\omega t + \phi)$, com $P = 308,45 \text{ kN}$, variando ao longo do tempo, representativa da ação do vento sobre as pás da torre, de forma simplificada.

Basicamente, a excitação dinâmica é composta por um harmônico ressonante aplicado no centro do rotor da torre de aço Figura 2.2 (b). A frequência de excitação é feita igual à frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 0,36 \text{ Hz}$). O ângulo de fase, ϕ , foi adotado como sendo nulo e o valor da amplitude, P , igual a $308,45 \text{ kN}$, que corresponde a ação vento, de forma simplificada, atuando nas pás da torre eólica, de acordo com a Figura 2.2 (b).

Para a integração das equações de movimento foi utilizado o algoritmo de Newmark [13] e foi adotado um intervalo de integração, Δt , igual a 0,002 s ($\Delta t = 0,002$ s). Ressalta-se que o coeficiente de amortecimento, ζ , adotado nesta investigação foi igual a 1,5% ($\zeta = 1,5\%$) [10].

O amortecimento é simulado como sendo do tipo proporcional ou de Rayleigh [15], sendo a matriz de amortecimento montada a partir dos parâmetros a_0 e a_1 , que são coeficientes relacionados com a matriz de massa e a matriz de rigidez do sistema, respectivamente. Esses parâmetros são determinados em função da taxa de amortecimento, de acordo com as equações 3.3 e 3.4 desta dissertação, e seus respectivos valores são iguais a: $a_0 = 0,0603$ e $a_1 = 0,00159$.

A Figura 4.9 apresenta a seguir, vários gráficos, ao longo da altura da torre, correspondentes aos deslocamentos translacionais horizontais no tempo, mediante a aplicação da carga dinâmica no centro do rotor, conforme ilustrado na Figura 2.2 (b).

Os gráficos dos deslocamentos, apresentados na Figura 4.9, indicam que a resposta dinâmica na torre diminui gradativamente com o tempo, devido à influência do amortecimento estrutural.

No primeiro gráfico, Figura 4.9 (a) observa-se, claramente, uma nítida predominância da frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 0,36\text{Hz}$), correspondente ao primeiro modo de flexão, com período de vibração igual a 2,78 s ($T_{01} = 2,78$ s).

Observam-se, também, nos demais gráficos, Figura 4.9 (b) até (d), a influência de modos de vibração mais elevados da torre que causam oscilações na resposta do sistema, mas sem produzir efeitos máximos.

Evidentemente, a modelagem do carregamento do vento atuante sobre a estrutura, considerada nesta dissertação, foi bastante simplificada. Basicamente, o objetivo desta análise dinâmica consiste, principalmente, na avaliação dos aspectos qualitativos da resposta do modelo. Os aspectos quantitativos do problema necessitam ainda serem investigados em trabalhos futuros e para tal a modelagem da excitação dinâmica necessita ser refinada.

Nesta dissertação também foi realizada uma análise estática não-linear da torre eólica modelo MM92 da Repower [8], sendo tratado no próximo capítulo.

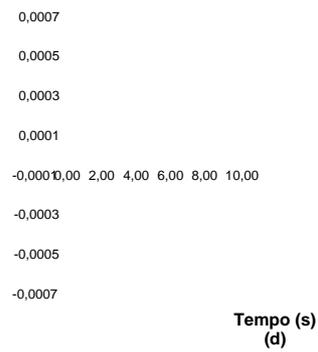
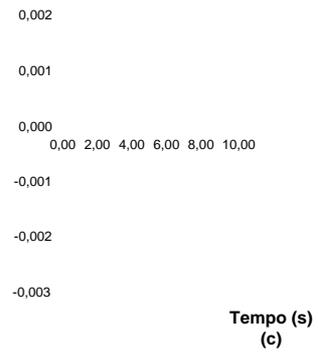
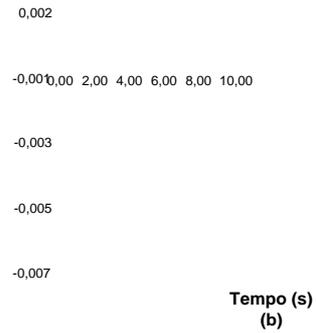
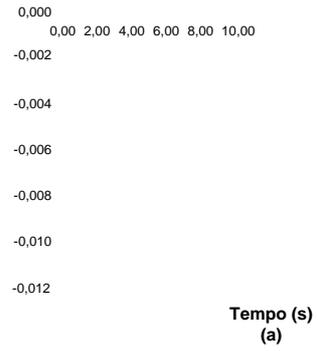


Figura 4.9 - Variação dos deslocamentos translacionais horizontais no tempo e ao longo da alta do modelo estrutural

5. Análise Estática Não-Linear

5.1. Introdução

A análise não-linear foi executada a partir da aplicação de deslocamento no centro do rotor da torre na direção do eixo x (vento a 0°), na direção do eixo z (vento a 90°) e a 45° graus da direção entre os eixos x e z (vento a 45°). A Figura 5.1 ilustra as três diferentes posições da nacelle adotada nesta dissertação para a aplicação de carregamento. Isto se justifica pelo fato da nacelle da torre ter a mesma direção do vento. As análises tiveram o cuidado de considerar para cada uma das três posições estudadas tensões de compressão nas áreas de abertura da torre.

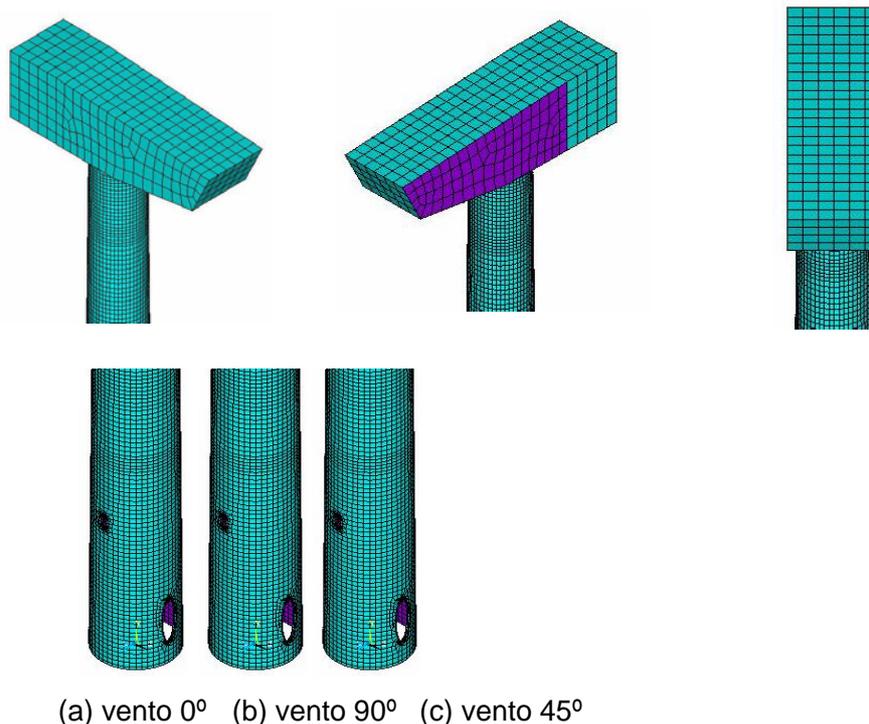


Figura 5.1 – Possíveis posições para aplicação de carregamento

Vale ressaltar que devido a não-simetria da torre e em função das aberturas, torna-se necessário considerar estes três carregamentos de forma a se obter o comportamento global da torre para situações mais próximas do real.

Como citado anteriormente a obtenção dos resultados utilizou-se do método dos elementos finitos com ajuda do programa computacional Ansys 10.0 [11]. As respostas da estrutura são avaliadas através da elaboração de gráficos em termos de carregamento kilo-

Newtons (kN) versus deslocamentos em metros (m). Os resultados da análise não-linear são expostos a seguir, para cada tipo de simulação da posição da turbina.

5.2. Força aplicada como um deslocamento na direção do eixo x – vento a 0°

A Figura 5.2 exibe um gráfico de carregamento atuante no centro do rotor da torre versus o deslocamento no ponto de aplicação da carga simulando a transmissão da ação do vento sobre as pás da hélice, para a turbina na posição do vento a 0°, Figura 5.1 (a), formando uma zona de compressão na abertura da porta.

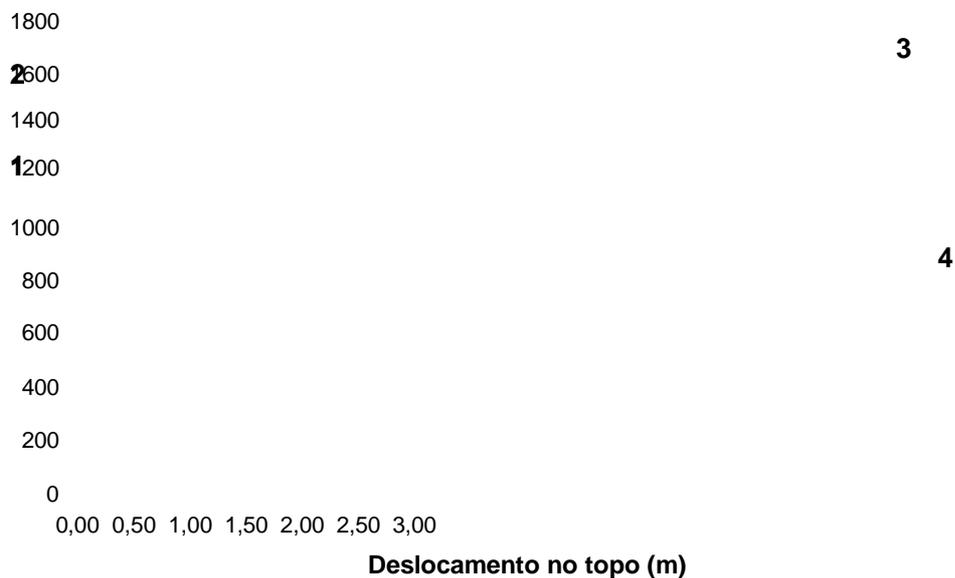


Figura 5.2 – Curva carregamento versus o deslocamento para o vento a 0°

A Figura 5.3 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises correspondente ao ponto 1 da Figura 5.2, onde observa-se o início do surgimento de valores dessas tensões próximos da tensão de escoamento entre os enrijecedores e na região próxima a abertura da porta, correspondendo a um carregamento aplicado de 1327,65 kN. Na Figura 5.4, correspondente ao ponto 2 da Figura 5.2 para um carregamento aplicado de 1491,00 kN e deslocamento de 2,56m pode-se observar que há um aumento de regiões com valores de tensões de Von Mises iguais a tensão de escoamento do material indicando o início de plastificação da seção crítica da torre, porém ainda não comprometendo a estrutura da mesma. A ocorrência de flambagem local pode ser observada na Figura 5.5 para um

deslocamento aplicado de 2,703 m correspondente a um carregamento de 1559,92 kN referente ao ponto 3 da Figura 5.2. Observa-se na Figura 5.5 que a plastificação ao redor da abertura da porta continua a aumentar. Com o deslocamento máximo de 2,80m e um carregamento de 832,38 kN, a região onde a flambagem local ocorreu apresenta uma deformação elevada e surge uma nova distribuição para as tensões de Von Mises, ver Figura 5.6 o que causa um alívio nas regiões onde havia grandes concentrações de tensões. Observa-se pelo detalhe na abertura da porta, uma região em compressão devido à direção do vento utilizada, ou seja, 0° , coincide com a direção paralela ao eixo x.

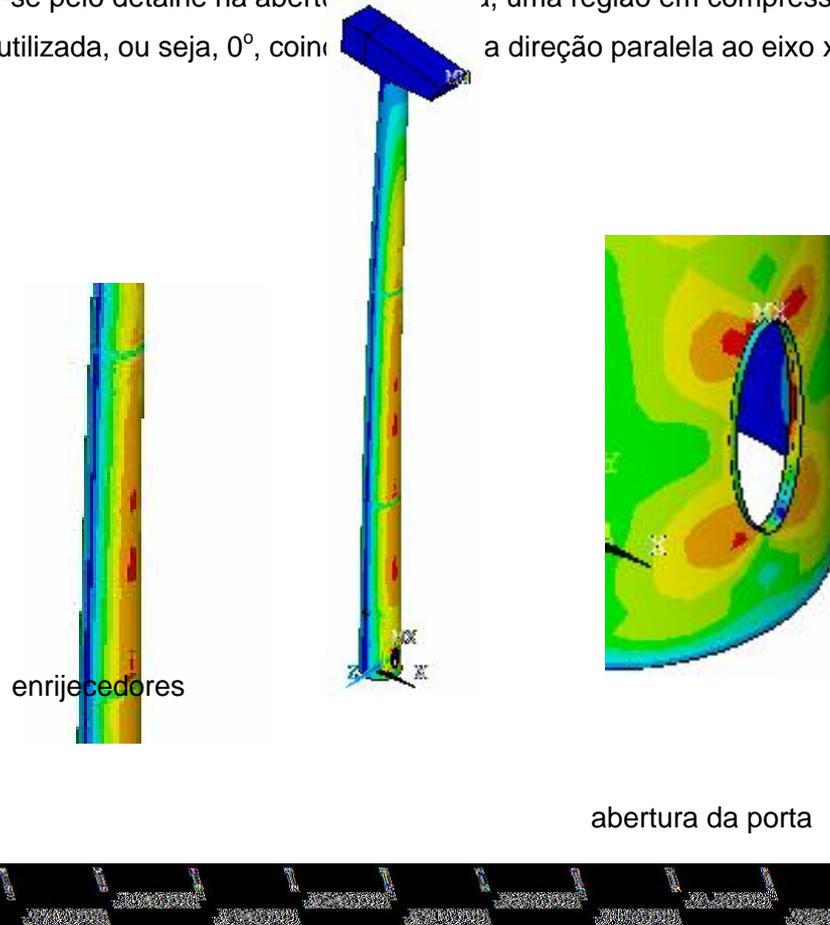


Figura 5.3 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1327,65 kN e deslocamento de 2,21 m

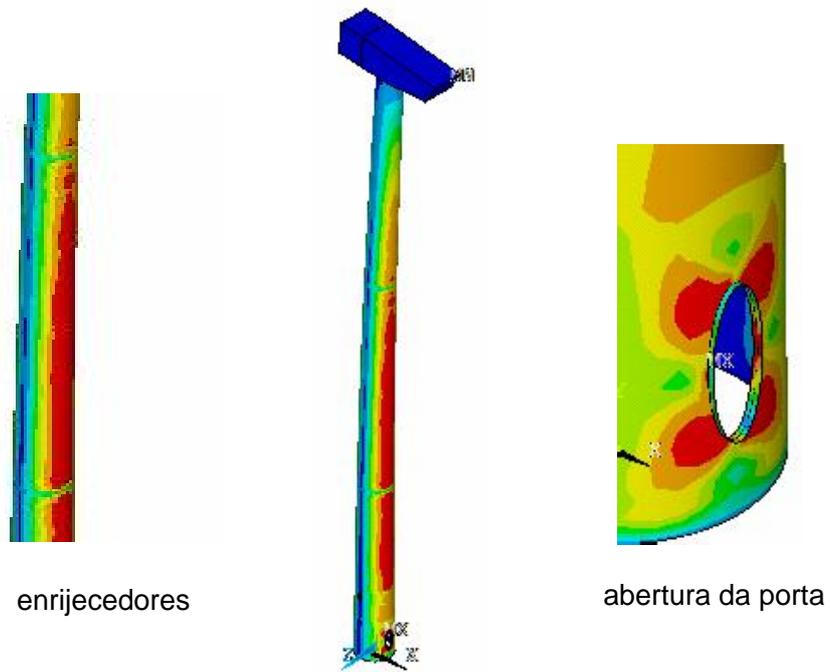


Figura 5.4 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1491,00 kN e deslocamento de 2,56 m

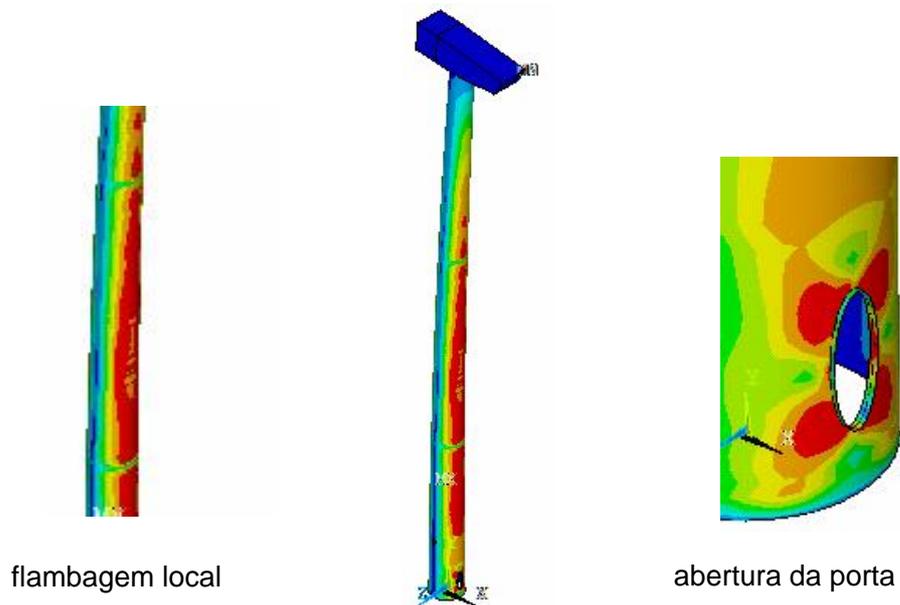
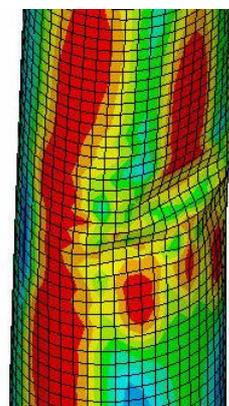


Figura 5.5 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 1559,92 kN e deslocamento de 2,70 m



flambagem local



abertura da porta



Figura 5.6 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 4 da Figura 5.2 – Carga aplicada de 832,38 kN e deslocamento de 2,80 m

5.3. Força aplicada como um deslocamento na direção do eixo z – vento a 90°

Na Figura 5.7 apresenta-se um gráfico referente ao carregamento a 90° agindo no centro do rotor da torre versus o deslocamento no ponto de aplicação da carga resultante da ação do vento sobre as pás da hélice. A turbina da torre está na direção z formando uma zona de compressão na abertura de ventilação, ver a Figura 5.1 (b).

Da Figura 5.8 á Figura 5.11 são apresentadas as distribuições das tensões de Von Mises para os outros níveis de carregamento apresentados na Figura 5.7.

Observando a distribuição das tensões de Von Mises da Figura 5.8 referente ao ponto 1 do gráfico da Figura 5.7, pode-se verificar que o nível de carregamento de 1324,56 kN fez surgir na torre algumas regiões com a tensão de Von Mises aproximando-se da tensão de escoamento na região da abertura de ventilação e entre os enrijecedores.

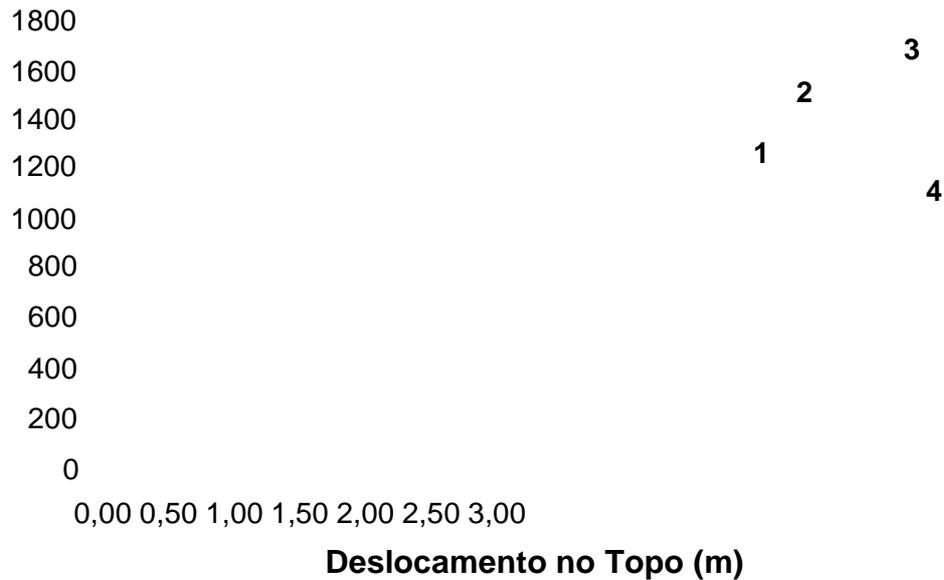


Figura 5.7 – Curvas carregamento do vento versus o deslocamento para o vento a 90°

Na Figura 5.9 o nível de carga aplicado foi de 1497,06 kN com deslocamento correspondente de 2,50m referindo-se ao ponto 2 da Figura 5.7, onde pode-se constatar que a torre nas mesmas regiões descritas anteriormente, apresenta um aumento de regiões com ocorrência de plastificação. Posteriormente, quando o deslocamento aplicado atinge o valor de 2,79m correspondente ao ponto 3 da Figura 5.7, ocorre a flambagem local na região entre os enrijecedores. Numa região próxima, da abertura de ventilação conforme pode ser observado na Figura 5.10. Aplicando um deslocamento máximo de 2,85m, ver Figura 5.11, correspondente a um carregamento de 1245,33 kN a região onde a flambagem local se iniciou apresenta valores significativos da tensão de Von Mises, criando uma nova distribuição para as tensões em outras regiões causando um alívio nas outras partes da torre, como por exemplo, na abertura de ventilação. Nota-se pelos detalhes nesta abertura, uma concentração de tensão.

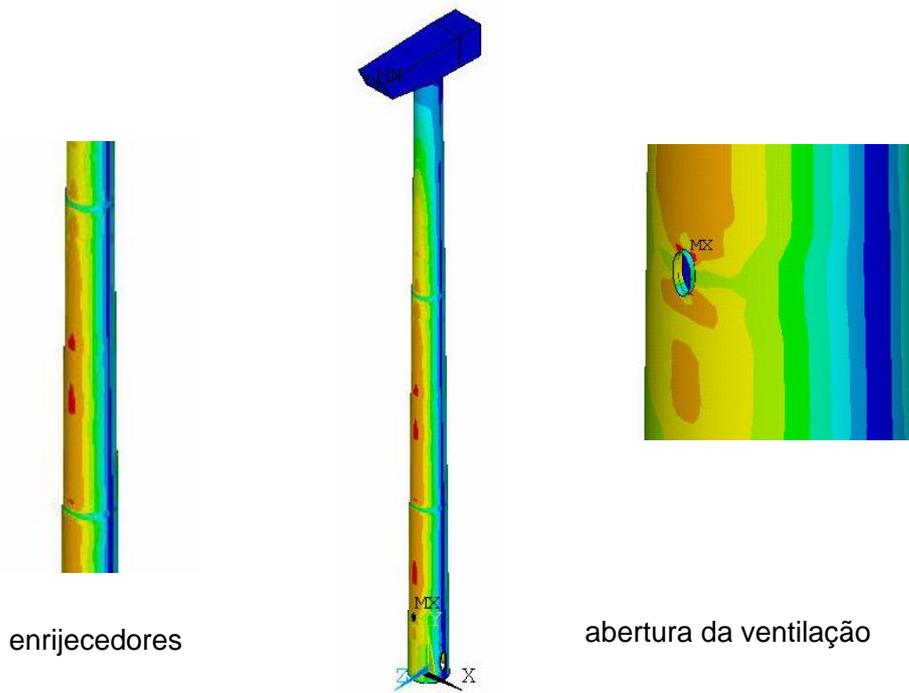


Figura 5.8 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1324,56 kN e deslocamento de 2,20m

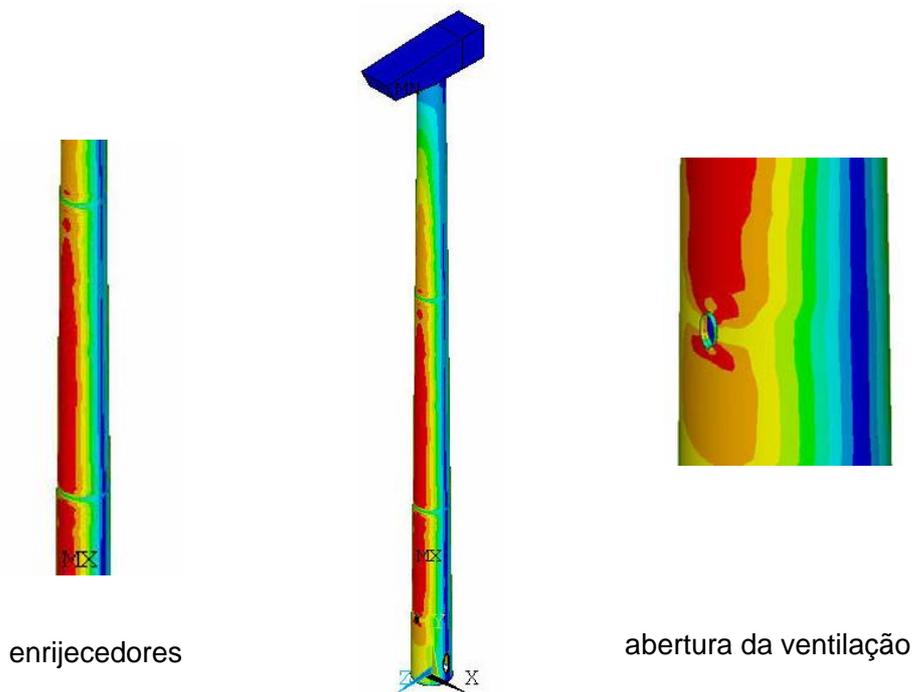


Figura 5.9 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1497,06 kN e deslocamento de 2,50m

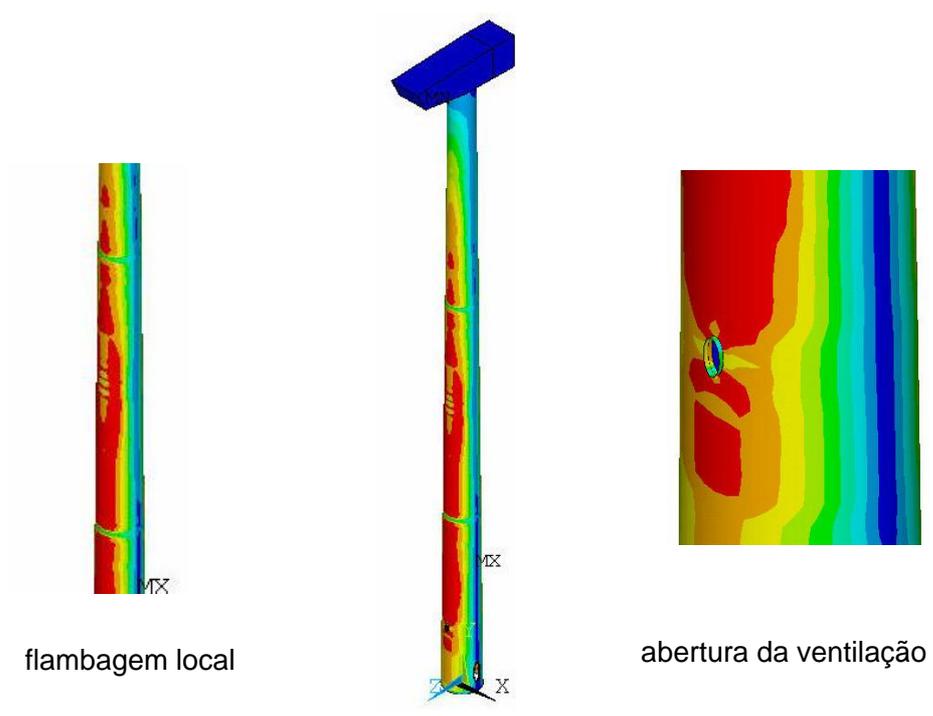
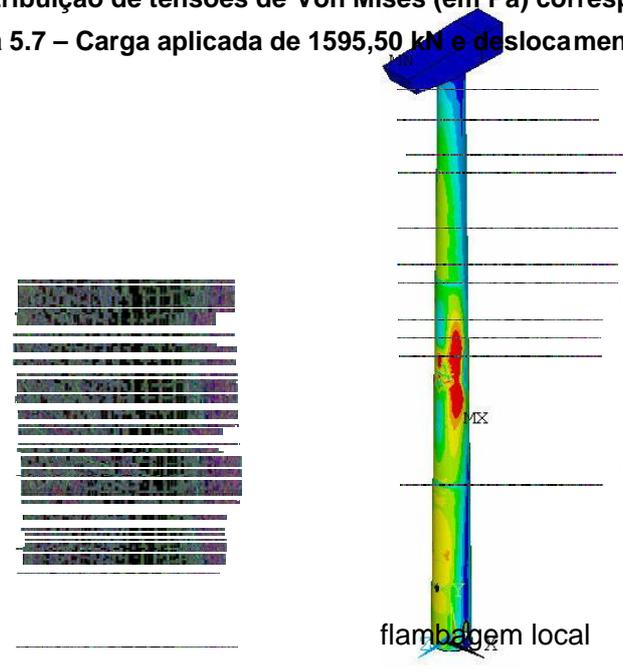
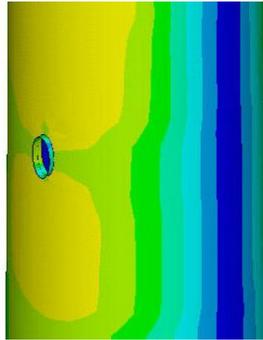


Figura 5.10 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.7 – Carga aplicada de 1595,50 kN e deslocamento de 2,79m.



abertura da ventilação



**Figura 5.11 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 4 da
Figura 5.7 – Carga aplicada de 1245,33 kN e deslocamento de 2,85m**

5.4. Força aplicada como um deslocamento a 45° graus da direção do eixo x e z – vento a 45°

A Figura 5.12 ilustra um gráfico de carregamento agindo no centro do rotor da torre versus o deslocamento no ponto de aplicação da carga concentrada resultante da ação do vento sobre as pás da hélice. A turbina da torre está a 45° graus da direção entre os eixos x e y formando uma zona de compressão entre as aberturas da porta e da ventilação, ver a Figura 5.1 (c).

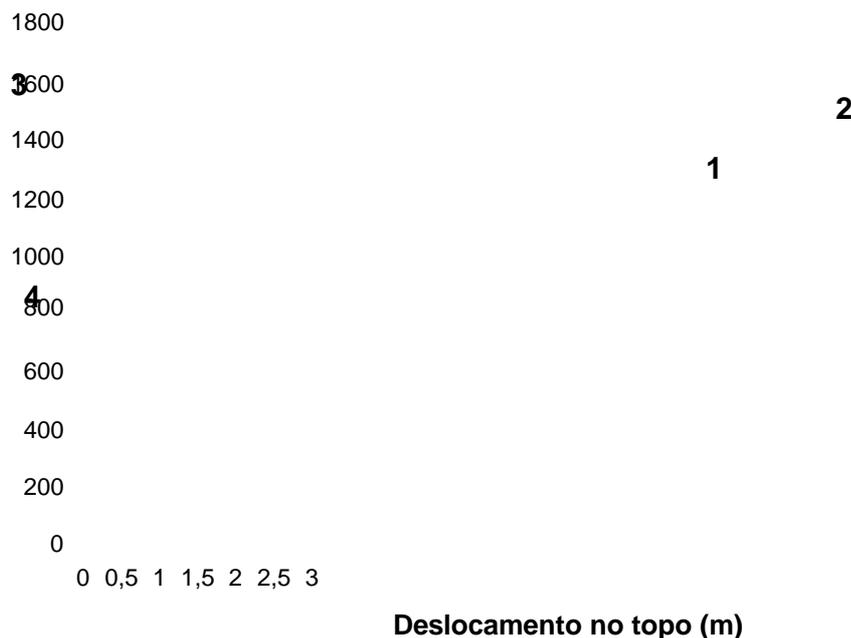


Figura 5.12 – Curva carregamento versus o deslocamento para o vento a 45°

Da Figura 5.13 à Figura 5.16 são apresentadas as distribuições das tensões de Von Mises ao longo da torre para níveis de carregamento correspondentes aos pontos em destaque no gráfico da Figura 5.12.

A Figura 5.13 referente a ponto 1 da Figura 5.12, ilustra o aparecimento de tensões de Von Mises elevadas entre os enrijecedores da torre, para um carregamento de 1217,30 kN com deslocamento de 2,02m. Analisando-se a Figura 5.14 referente ao ponto 2 da Figura 5.12 com carregamento de 1419,93 kN para um deslocamento de 2,37m, percebe-se que há um aumento na distribuição das tensões de Von Mises entre os enrijecedores da torre. Na Figura 5.15 referente ao ponto 3 da Figura 5.12 observa-se o aparecimento de uma flambagem local com carregamento máximo de 1542,73 kN e com deslocamento

correspondente a 2,66 m. E na Figura 5.16 referente ao ponto 4 da Figura 5.12 observa-se a deformação da seção devido a flambagem local e também a redistribuição das tensões ao longo da torre, para um carregamento de 738,28 kN com deslocamento de 2,74m. Nos detalhes da abertura da porta e da ventilação não há uma concentração intensa de tensões como ocorrida anteriormente, devido a direção da atuação do vento.

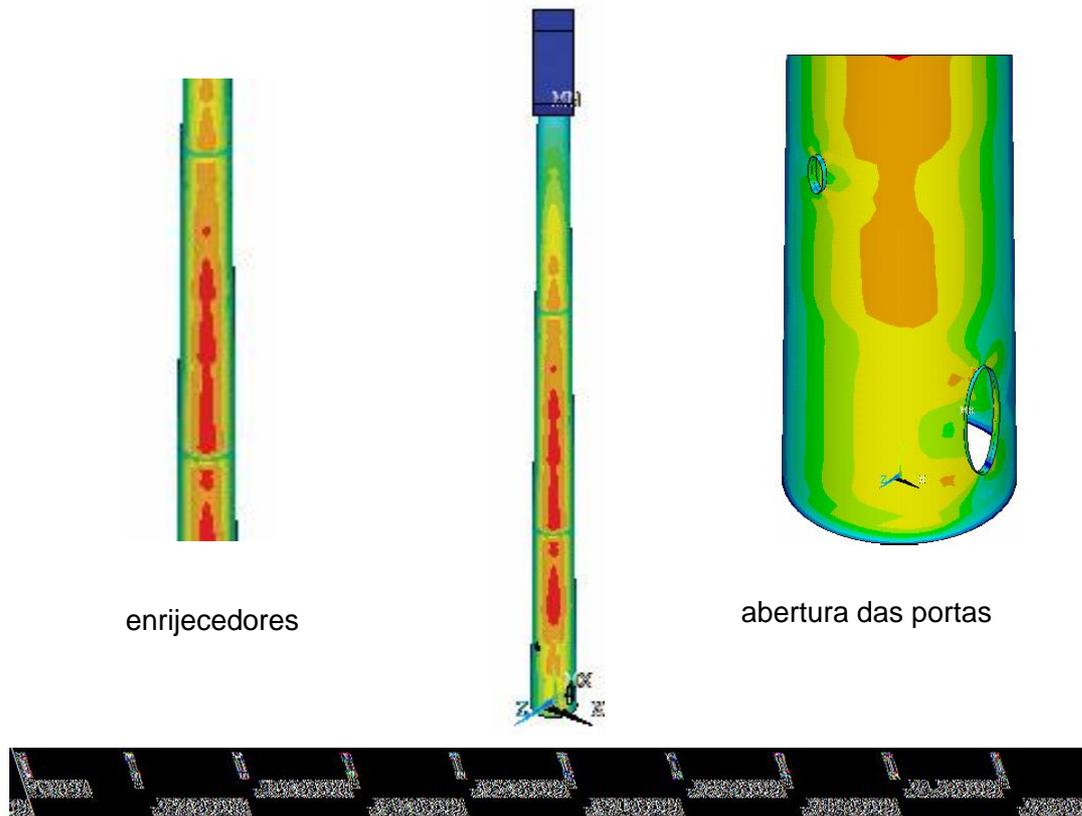


Figura 5.13 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 1 da Figura 5.12– Carga aplicada de 1217,30 kN e deslocamento de 2,02m

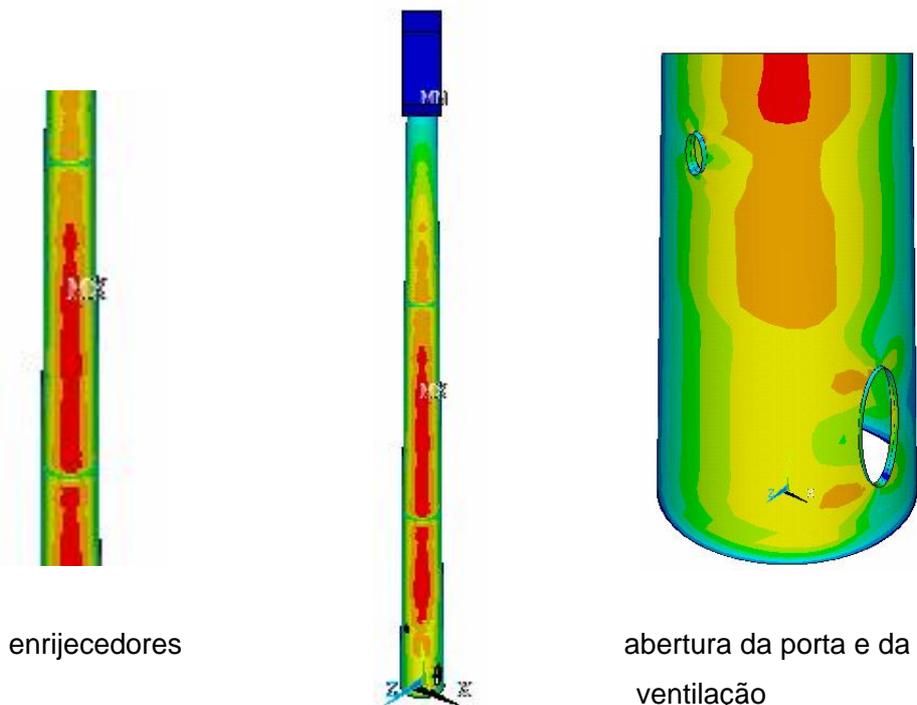


Figura 5.14 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 2 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 1419,93 kN e deslocamento de 2,37m

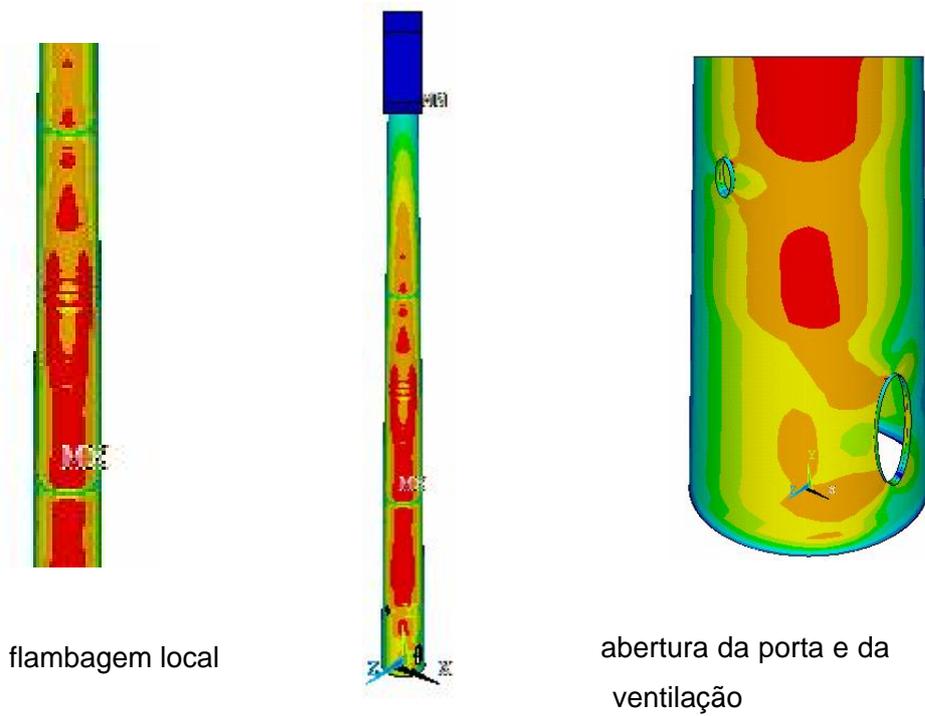


Figura 5.15 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 3 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 1542,73 kN e deslocamento de 2,66m

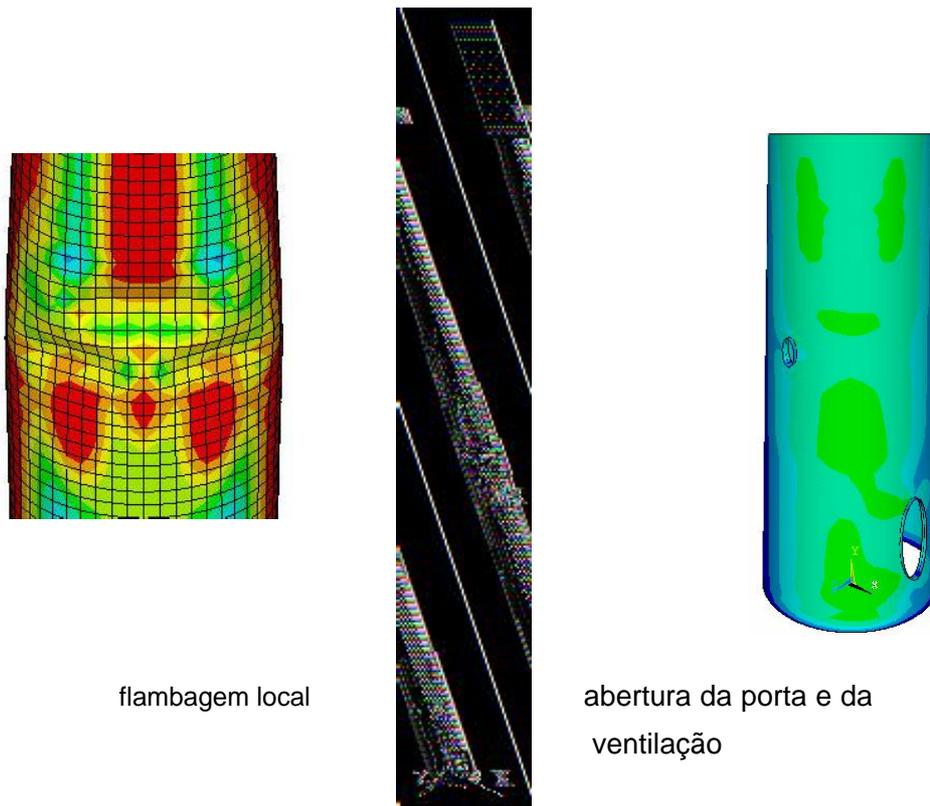


Figura 5.16 – Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) correspondente ao ponto 4 da Figura 5.12 – Carga aplicada de 738,28 kN e deslocamento de 2,74m

A Figura 5.17 ilustra as três curvas, já apresentadas anteriormente, de carregamento versus deslocamento para as três situações de carregamento consideradas na análise estática não-linear nesta dissertação. A Tabela 4.1 informa os valores máximos de carregamento com seus deslocamentos correspondentes. Da observação do gráfico da Figura 5.17 pode-se notar que a ação do vento a 90° representou a maior carga última, seguida da ação do vento a 0° e finalmente, do carregamento para vento a 45° . Pode-se observar pela Tabela 4.1 que a diferença entre a resistência máxima e mínima é de 3,52%.

Uma sugestão para solucionar o aparecimento da flambagem local na torre eólica modelo MM92 da Repower [8] poderia ser a adoção de enrijecedores nos locais e/ou o aumento na espessura da parede da torre onde ocorreu a flambagem local. As aberturas da torre foram os locais onde se iniciou o escoamento na torre. Para os casos avaliados foi resolvido este problema, uma nova configuração de enrijecedores ou o aumento da espessura da parede próximo das aberturas deve ser efetuado.

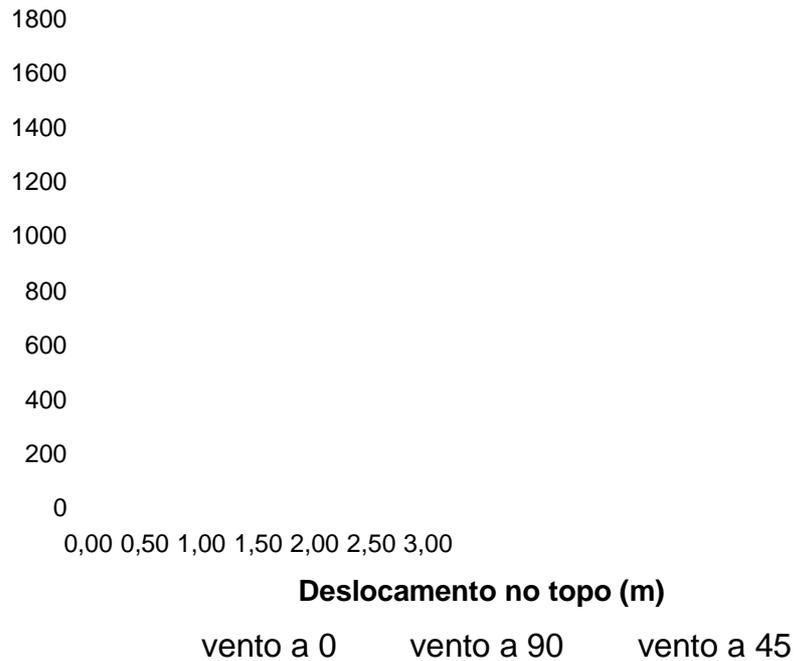


Figura 5.17 – Curvas carregamento versus deslocamento para a torre eólica estudada

Tabela 5.1 – Carregamento e deslocamentos máximos para as três posições de força analisado

	Direção da ação do vento		
	0°	90°	45°
Carregamento Máximo (kN)	1559,92	1595,50	1542,73
Deslocamento. Máximo Correspondente (m)	2,70	2,78	2,66

No próximo capítulo da presente dissertação serão apresentados as conclusões finais e as propostas de possíveis trabalhos relacionado a torre eólica.

6. Considerações Finais

6.1. Introdução

Esta dissertação teve como objetivo o estudo do comportamento estático e dinâmico de uma torre eólica modelo MM92 da Repower [8]. Esta avaliação foi executado, por meio do emprego de técnicas usuais de discretização, via métodos dos elementos finitos.

Os comportamentos estático não-linear e dinâmico foram analisados através da aplicação de carregamento que simulam a ação do vento sobre as pás da hélice da torre analisada.

Este trabalho foi dividido em três fases distintas. Em uma primeira etapa foram realizadas análises lineares do comportamento estático da torre. A etapa seguinte contemplou a modelagem dinâmica para diversos tipos de análise, como a harmônica e a transiente. Na última etapa uma análise não-linear física e geométrica foi realizada.

Os resultados das respostas estática e dinâmicas das torres eólica modelo MM92 da Repower [8] foram apresentados em termos de deslocamento e tensões máximas atuantes na torres.

6.2. Conclusões

O método numérico dos elementos finitos demonstrou-se bastante útil e preciso na avaliação do comportamento estrutural da torre eólica estudada. Sua utilização mostrou-se eficaz na previsão das análises estática, dinâmica e não linear quando comparada com resultados experimentais.

Foi verificado nesta pesquisa que o carregamento resultante, avaliado no segundo capítulo, não gerou uma tensão maior que a tensão de escoamento fato que a princípio garante a sua segurança estrutural, todavia esta afirmação deve ser tomada com cuidado dado à aproximação feita dos carregamentos de vento atuante na torre eólica.

A influência do primeiro modo de vibração na resposta deste modelo é preponderante em relação aos demais. Com base neste estudo, pode-se dizer que a torre comporta-se como uma viga engastada e livre. Há ainda, a existência de outros picos no

gráfico, associados aos modos de vibração mais elevados do sistema, com pequena participação na resposta dinâmica do modelo.

Foi também possível concluir que na análise transitente o modelo numérico apresentou o comportamento esperado fato que corrobora o modelo adotado e as simplificações feitas.

Mostrou-se que a torre eólica do modelo estudado, numa análise não-linear apresentou seu colapso decorrente de um estado limite último associado a flambagem local. Os valores de tensão máxima mostraram ter pouca variação quando a direção do carregamento aplicado foi variado, simulando as possíveis direções do vento incidente na torre eólica.

6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir relacionam-se algumas sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o tema aqui tratado e outros correlatos.

- a) Realizar estudos experimentais em torre eólicas em modelo reduzido para que seja possível obter respostas dinâmicas em termos de deslocamentos e com isso validar os resultados numéricos obtidos;
- b) Avaliar outros tipos de geometria de torre eólica, composta por outros tipos de materiais;
- c) Aperfeiçoar o modelo numérico da torre;
- d) Medições experimentais em modelo de torre reais;
- e) Investigar os enrijecedores quanto a sua utilização e posicionamento ao longo da torre;
- f) Realizar um estudo sobre a ligação aparafusada dos enrijecedores;
- g) Simular as condições de apoio com modelo e avaliando a interação solo x estrutura;
- h) Executar uma análise paramétrica deste modelo de torre variando sua altura e dimensões da seção transversal;

- i) Modelo não-deterministo das carga de vento;
- j) Perfil de carga ao longo da altura;
- k) Análise dinâmica não-linear.

Referências Bibliográficas

1. Centro Brasileiro de Energia Eólica, Disponível em < http://www.eolica.org.br/index_por.html >. Acesso em: 24 de Janeiro de 2008.
2. Prefeitura Municipal de Osório, Disponível em < <http://www.osorio.rs.gov.br/?static=eol/eolica1.htm> >. Acesso em 15 de Outubro de 2008.
3. N. BAZEOS, G.D. HATZIGEORGIU, I.D. HONDROS, H. KARAMANEAS, D.L. KARABALIS, D.E. BESKOS, **Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower**, Engineering Structures, vol. 24, p.1015-1025, 2002.
4. LAVASSAS, G. NIKOLAIDIS, P. ZERVAS, E. FTHIMIOU, I.N. DOUDOUMIS, C.C. BANIOPOULOS, **Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower**, Engineering Structures, vol. 25, p.1097-1106, 2003.
5. CEN, Eurocode 3: **Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for building**, EN 1993 1-1, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
6. P. E. Uys, J. Farkasb, K. J´armaib, F. van Tonde ra, **Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure**, Engineering Structures, vol. 29, p.1337-1342, 2007.
7. NBR 6123, Forças Devidas ao Vento em Edificações , ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988.

8. Repower Systems AG, Disponível em <
http://www.repower.de/fileadmin/download/produkte/PP_MM92_uk.pdf >.
Acessado em 20 de Janeiro de 2007.
9. A. D. Simões, Rui, Manual de dimensionamento de estrutura metálicas, Coleção Construção Metálica e Mista, cmm Press, Coimbra, 2007
10. Reis, A. e Camotim, D. – Estabilidade Estrutura I, McGraw-Hill, Lisboa, 2001.
11. Ansys 10.0, User's Manual, 2001
12. Rebelo, C., Silva, L. A. P. S. da. Measurement Plan of a Wind Steel Tower in Espinhaço de Cão, Lagos, Algarve, Portugal (Revision 1). HIST WIN - High-Strength Steel Tower for Wind Turbines. Civil Engineering Department, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, 11p, 2007.
13. NEWMARK N. M. (1959), A method of computation for structural dynamics, Journal of engineering mechanics division, v.85, p.67-94.
14. CEN, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-6: General rules: Strength and Stability of Shell Structures, EN 1993 1-6, European Committee for Standardization, Brussels,2004.
15. CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; Dynamics of Structures; McGraw-Hill, 634p, 1993.
16. CEN, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 3-2: Tower, masts and chimneys – Chimneys,, EN 1993 3-2, European Committee for Standardization, Brussels,2004.

Anexo A. Rotina Computacional para Modelagem da Torre MM92 da Repower

A seguir, é apresentada a rotina computacional des envolvida em Ansys 10.0 [11] para a geração da torre em elementos finitos. Os comentários são precedidos pelo caractere “!”, conforme a convenção do próprio Ansys 10.0 [11]. O formato do texto foi alterado para facilitar a visualização das instruções de programação.

```
!
#
$%
! &' (%)
)
# $%
!
```

\$ %*

)

%

!

"

% \$%

% % + \$

)

\$

!,) -

!,) .

/

0 \$

0 \$

% 0 \$

+ 0 \$ *

0 \$ %

* 0 \$ +

0 \$ ++

0 \$

0 \$

0 \$

0 \$

0 \$ %

% 0 \$

+ 0 \$ +

0 \$ %

* 0 \$

0 \$ %

0 \$

0 \$

0 \$ *

0 \$ +*

0 \$ +

% 0 \$

+ 0 \$*

0 \$**

* 0 \$*+

0 \$*

0 \$

0 \$
% 0 \$ **
% 0 \$ +
% 0 \$
%% 0 \$
%+ 0 \$+
% 0 \$+

0 \$
0 \$
0 +\$
% 0 \$
+ 0 \$
0 \$
* 0 \$
0 +\$*
0 *\$ *
0 \$
0 \$*
0 \$
0 +\$
% 0 \$
+ 0 % \$
0 % \$+
* 0 %%\$
0 % \$
0 % \$
0 + \$
0 +% \$+
0 + \$
0 + \$
% 0 + \$+
+ 0 \$
0 %\$%
* 0 \$
0 \$
0 * \$
0 *%\$
% 0 * \$%+
% 0 **\$
% 0 * \$
%% 0 \$
%+ 0 \$
% 0 +\$

%* 0 \$
% 0 *\$

% 0 \$ %
* 0 \$ *
0 \$
+ 0 \$ +
% 0 \$ %
0 \$
0 \$
0 \$
0 \$
0 \$
0 \$
0 \$
* 0 \$ *
0 \$
+ 0 \$ +
% 0 \$ %
0 \$
* 0 \$ *
0 \$
0 \$
0 \$
0 \$
+ 0 \$ +

% *	% *	% *	% *	% *
+ %	+ %	+ %	+ %	+ %
*	*	*	*	*
+ %	+ %	+ %	+ %	+ %
*	*	*	*	*

+ + + + +

!, 1 #

1
1
1 %
1 +
1 %
1 * +
1
1 *
1
1
1
1
1
1 %
1 +
1 %
1 * +
1
1 *
1
1
1
1
1 %
1 +
1 %
1 * +
1
1 *
1
1 %
1 %
1 % %
1 % %
1 % + %
1 % % %

1	%*		%+
1	%		%
1	%		%*
1	%		%
1	+		
1	+		
1	+		
1	+%	%	
1	++	+	%
1	+		+
1	+*	*	
1	+		*
1	+		
1	+		
1			
1			
1			
1	%		
1	+	%	%
1		+	+
1	*		
1		*	*
1			
1			
1	*		
1	*		
1	*		
1	*%		
1	*+		%
1	*	%	+
1	**	+	
1	*		*
1	*	*	
1	*		
1			
1			%
1		%	%
1	%	%	%
1	+	%	%%
1		%%	%+
1	*	%+	%
1		%	%*
1		%	%

) 1 #

+ +

+ +
 + +%
 +% ++
 ++ +
 + +*
 +* +
 + +
 + +
 +

%
 % +
 + *
 *

*
 * *
 * *
 * *%
 *% *+
 *+ *
 * **
 ** *
 * *
 * *
 *

%
 % +
 + *
 *

!,

- 2 2
*)

0 *

- !,

	%*	-	2	2
	% %*	-	2	2
%	% + %*	-	2	2
+	+ %*	-	2	2

		* %*	-	2	2
*	*	%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		% %*	-	2	2
%	%	+ %*	-	2	2
+	+	%*	-	2	2
		* %*	-	2	2
*	*	%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		% %*	-	2	2
%	%	+ %*	-	2	2
+	+	%*	-	2	2
		* %*	-	2	2
*	*	%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		%*	-	2	2
		% %*	-	2	2
%	%	% %*	-	2	2
%	%	% %*	-	2	2
%	%	% % %*	-	2	2
% %	% %	%+ %*	-	2	2
%+	%+	% %*	-	2	2
%	%	%* %*	-	2	2
%*	%*	% %*	-	2	2
%	%	% %*	-	2	2
%	%	% %*	-	2	2

+

!, 1 #

1		\$%		
1		\$		
1		%\$		
1	%	\$%	\$+	
1	+	\$%	3 \$+	
1		%\$	\$ %	

1 * %\$ * \$ *
& %\$ \$
1 %\$ % % \$
1 %\$ \$
1 %\$+* \$
1 %\$+ % + \$
1 %\$% % \$ +
1 % %\$% * + \$
1 + %\$ %\$
1 %\$ %* + %\$%
1 * %\$ %\$*
1 \$ * * %\$
1 \$ *% \$+
1 %\$ 3 \$ %
1 %\$ * 3 \$ *
& %\$ 3 \$
1 %\$ % % 3 \$
1 % %\$ 3 \$
1 + %\$+* 3 \$
1 %\$+ % + 3 \$
1 * %\$% % 3 \$ +
1 %\$% * + 3 \$
1 %\$ 3 %\$
1 %\$ %* + 3 %\$%
1 % %\$ 3 %\$*
1 % \$ * * 3 %\$
1 % \$ *% 3 \$+
1 %% \$ *+ 3 \$+
1 %+ \$ % + 3 %\$
& % \$ + 3 %\$*
1 %* \$* % * 3 %\$%
1 % \$ % 3 %\$
1 % \$+ % * 3 \$
1 % %\$ *+ 3 \$ +
1 + %\$%* * 3 \$
1 + \$ + 3 \$
1 + \$ 3 \$
1 +% \$ 3 \$
1 ++ \$ 3 \$
1 + \$ 3 \$ *
1 +* \$ % 3 \$ %
1 * \$ *+ \$+
1 \$ % + %\$
& \$ + %\$*
1 \$* % * %\$%
1 * \$ % %\$
1 \$+ % * \$

1	+	\$%	*+	\$	+
1	%	\$%%*	*	\$	
1		\$	+	\$	
1		\$		\$	
1		\$		\$	
1	+	\$		\$	
1	+	\$		\$	*
1	+	\$	%	\$	%

) 1 #

%

*

*

+

+

%

%

*

*

%

%

+

+

*

*

%

%

%

%

%

%

+

+

%%%

%%%

%+

%+

%

%

%*

%*

%

%

%

% %
% +
+ +
+ +
+ +%
+% ++
++ +
+ +*
+*
+ +
+ +
+

%
% +
+ *
*
*
* %

4

1 % \$%
%
) % + *
) % +
) * %
) % % %% %+ % %*
) % % % + + +
) +% ++ + +* + +
) + % +
) * * *
) * * *% *+ * **
) * * *

%
% %

1 + \$ \$%
1 + \$ + \$%
1 \$ \$%
+

+
) * % % % + %* %
) *+ *+ *++ *+* *+ *
) * * + * * * ** **
) **+ *** ** * * * +
) * * * * * * + * +
) * * *
) * * % * * * *
) * % * * * * * %
) *
) %
) %
) % * *
) * *
) %* %* %*+ %* %* * %
) *+ *+ *++ *+* *+ * %
) * * + * * * ** ** %
) **+ *** ** * * * + %
) * * * * * * + * + %
) * * * %
) * * % * * * * %
) * % * * * * * % %
) * %
) % %
) * * % %
) * * %
 %

%

!, 1 #

1 * \$ *
 1 * \$ %
 1 * \$
 1 * % \$ \$ *
 1 * + 3 \$ \$ *
 1 * \$ % \$ %* *
 1 * * \$ \$ %* +
 & * \$ \$ % % *
 1 * \$ \$ % + +
 1 * \$ % \$ **
 1 * \$ \$ % +
 1 * \$ \$ * *

1 * \$ \$
 1 * %* 3 \$ % \$%* *
 1 * % 3 \$ \$%* +
 & * %+ 3 \$ \$%% *
 1 * %% 3 \$ \$% + +
 1 * % 3 \$ % \$ **
 1 * % 3 \$ \$ %+
 1 * % 3 \$ \$ * *
 1 * 3 \$ \$
 1 * 3 \$ % \$ +
 1 * 3 \$ \$ *+
 & * % 3 \$ \$ %
 1 * + 3 \$ \$* *
 1 * 3 \$ % \$* %
 1 * * 3 \$ \$ % **
 1 * 3 \$ \$ * +
 1 * 3 \$ \$ *
 1 * \$ % \$ +
 1 * \$ \$ *+
 & * \$ \$ %
 1 * \$ \$* *
 1 * * \$ % \$* %
 1 * \$ \$ % **
 1 * + \$ \$ * +
 1 * % \$ \$ *

) 1 #

* *
 * * *
 * * *
 * *
 * *
 * *
 * *
 * *
 * *
 * * %
 * % * %
 * % * +
 * + *
 * * *
 * * *
 * *
 * *
 * *
 * *
 * *

* *
 * * %
 * % * +
 * + *
 * * *
 * * *
 * * *
 * * *
 * * +
 * + *
 * * %
 * % * %
 * % * %
 * % * %%
 * %% * %+
 * %+ * %
 * % * %*
 * %* *

4

& \$ *
 *
) + % +
) % + +
) * +
) % + * % +
) % %+ %* % + + +
) ++ +* % + + +

+
*

+
 1 \$ * \$
 1 \$ * \$
 1 % \$ * \$
 %
 %
) ** * + %
) % %* + ++ +* %
) + + * %
) * * * % %
) + * %
) + * ** %
) ** * +
) % %* + ++ +*
) + + *

) * * * %
) + *
) + * **
%

)

!, 1 #

1 3 \$+ % % 3 \$ *
1 \$ % 3 \$ *
1 \$ ++ \$ 3 \$ *
1 % \$ + \$% * 3 \$ *
1 + 3 \$+ % \$ 3 \$ *

) 1 #

%
% +
+
1 3 \$+ % % \$ *

) % * + * * * *
*

1
% * + * * *
+ ** **% ** *

- , 5

- , 2 2 2 5 0 \$ -
6

5 - , 2 2 2 5

5 - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 + *
5 +
5
5

5 # - , 2 2 2 5

5 # % - , 2 2 2 5

5 # + - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # * - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # % - , 2 2 2 5

5 # + - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # * - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # - , 2 2 2 5

5 # % - , 2 2 2 5

5 # +
- , 2 2 2 5

5 #
- , 2 2 2 5

5 # *
- , 2 2 2 5

5 #
- , 2 2 2 5

5 #
- , 2 2 2 5

5 #
- , 2 2 2 5

5 # %
- , 2 2 2 5

5 # %
- , 2 2 2 5

5 # %
- , 2 2 2 5

5 # %%
- , 2 2 2 5

5 # %+
- , 2 2 2 5

%

5 - , 2 2 2 5

5 # %*
- , 2 2 2 5

5 %
+
5

5

- , -

5 #

5 #

5

5

5

5

5

5

5

5

5

*
5 +

#

#

#

5

5

5 **

%
5

%
% +
% +
5

%
5

+ + *
5

5 *

5 % *
5

5 *

5 # +

5 # * *

5 # *

5 #

5 #

5 #

5 #

5 #

5 # %

5 # % +

5 # +

5 # *

5 # *

5 #

5 #

5 #

5 #

#

5

5 *
5
5 +
% * %
5

5 # % +

5 # +

5 # *

5 # *

5 #

5 #

5 # %

5 # % %
%

5 # % %

5 # % %%

5 # * %% %+

5 # %+ %

5 # % %*

- ,)

%
5

5 *
5 ** *
5 *
5 **
5 **+ *
5 *
5 * *

5 **
5 ** *
5 **% +
5 + *
5 * + +
5 * * *

) 1 /

!, 1 #

1 3 \$ % 3 \$ *

) 1 #

7

) * * + *

+ + +

- ,

5 %

5 %

5 +

5 + *

#

*

+% *

#

*

% %

1 #

#

8

#

#

*
%

+
+
%
*

*

+

#

+

#

#

#

#

#

*

#

#

%

#

%

#

+

#

%

%

#

% %+

#

+

%+ %

#

% %*

#

#

#

#

% **

% %

#

%

% **

#

%

% %

%

% % % +

#

%

%

#

%

% % % +

#

+

% +

+

* *

#

#

#

% +

#

* *

)

#

+ *

% %%

#

% *

*
%
+

#

Anexo B. Geometria da Torre MM92 da Repower

A Figura B.1 ilustra as três partes da torre com suas medidas, a seguir, exibe a Figura B.2 referente as características geométricas do rotor, a Figura B.3 ilustra as características geométricas da pá da hélice e finalmente a Figura B.4 representa as características geométricas da nacelle.

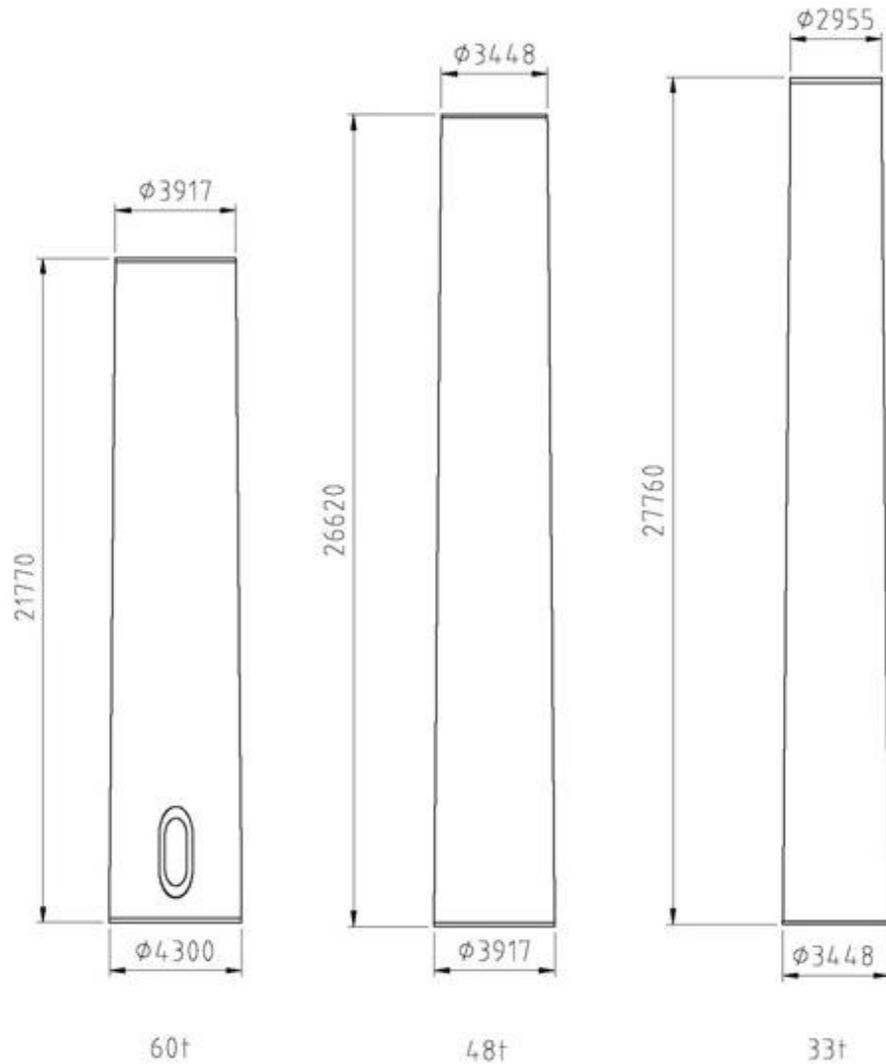


Figura B 1 – As três partes da torre MM92 da Repower

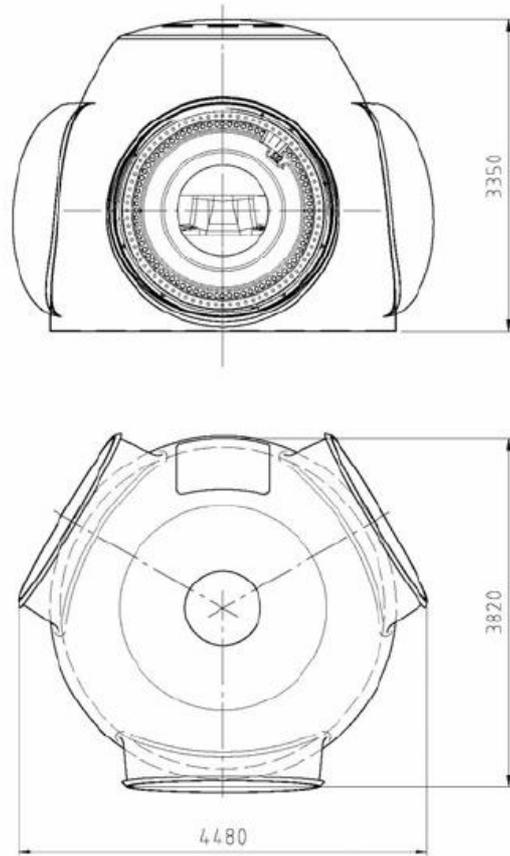


Figura B 2 – Rotor da torre MM92 da Repower

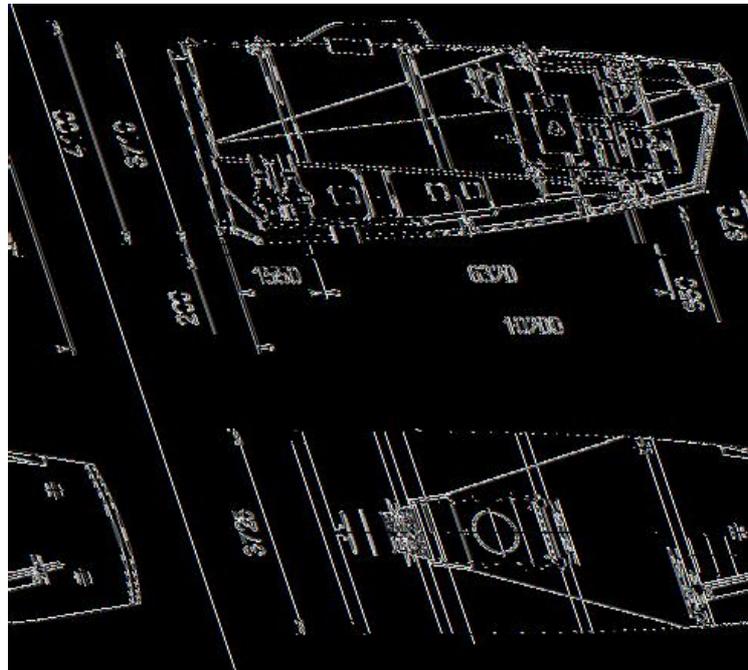


Figura B 4 – A nacelle da torre MM92 da Repower

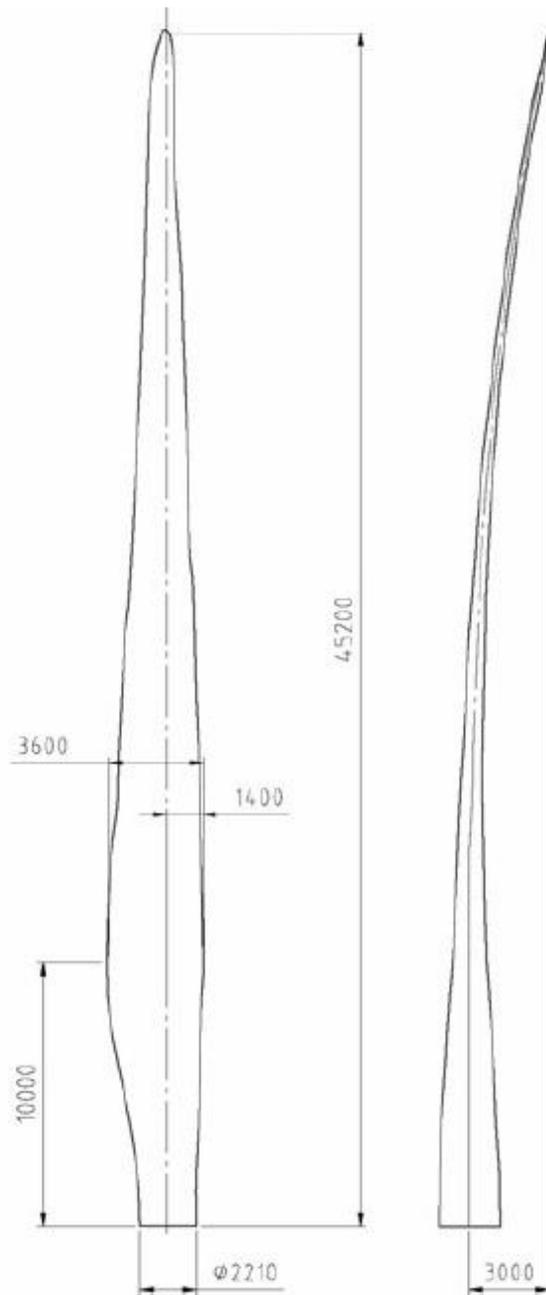


Figura B 3 – A pá da hélice da torre MM92 da Repower