



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE TORRES DE AÇO PARA SUPORTE DE TURBINAS EÓLICAS

Assessment of the Dynamic Behavior of Wind Turbine Steel Towers

Leandro Rocha Machado de Oliveira (1); Rodrigo Bird Burgos (2); José Guilherme Santos da Silva (2)

(1) Aluno de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(2) Professor Doutor, DSc, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

E-mail para Correspondência: jgss@uerj.br; rburgos@eng.uerj.br; leandro.engcivil23@gmail.com

Resumo: A demanda crescente por energia no mundo e o avanço tecnológico das últimas décadas, alinhados à necessidade de se obter uma energia que impacte minimamente no meio ambiente, impulsionaram um grande desenvolvimento de energias provenientes de fontes renováveis, tais como: ventos, marés e o sol. Nesse contexto, a energia eólica se mostrou bastante promissora, pois se trata de uma energia inesgotável com baixo impacto ambiental. Assim sendo, este trabalho de pesquisa objetiva o estudo da resposta estrutural estática e dinâmica de uma torre de aço para suporte de uma turbina eólica modelo MM92 da Repower. A modelagem numérica da estrutura investigada foi realizada através do emprego do programa computacional ANSYS, a partir do emprego de técnicas usuais de discretização, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), levando-se em conta o efeito da interação solo-estrutura sobre o comportamento estrutural da torre eólica investigada. A análise da resposta dinâmica não determinística da torre é realizada para diferentes velocidades do vento, tendo em mente uma avaliação crítica sobre os valores máximos dos deslocamentos e tensões de Von Mises. Finalmente, os resultados obtidos ao longo do estudo são comparados com os valores limites fornecidos por normas e recomendações internacionais de projeto.

Palavra-Chave: Torres eólicas; Dinâmica estrutural; Interação solo-estrutura.

Abstract: The growing demand for energy around the world and the technological advances of the last decades, aligned with the need to obtain energy that minimize the impacts on the environment, has driven a large development of renewable energies such as: winds, tides and the sun. In this context, wind energy has shown to be very promising, since it is an inexhaustible energy with low environmental impact. This way, this research work aims to study the static and dynamic structural response of a Repower MM92 wind turbine steel tower. The numerical modelling of the investigated structure was performed using the ANSYS computational program, based on usual discretization techniques with the aid of the Finite Element Method (FEM), taking to account the soil-structure interaction effect on the wind turbine steel tower behaviour. The wind turbine steel tower nondeterministic dynamic analysis was made considering different wind velocities, having in mind a critical assessment of the maximum displacements and Von Mises Stress values. Finally, the obtained results are compared with the limiting values provided by international design standards and recommendations.

Keywords: Wind towers, Structural dynamics, Soil-structure interaction.



1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia e o avanço tecnológico das últimas décadas, alinhados com a necessidade de se obter uma energia que impacte minimamente no meio ambiente, impulsionou uma onda de desenvolvimento de energias proveniente de fontes renováveis, tais como: ventos, marés e o sol. Nesse contexto, o desenvolvimento da energia eólica evoluiu significativamente nas últimas décadas, transformando os moinhos de ventos do século XVII, para as estruturas esbeltas atuais, que suportam aerogeradores com peso da ordem de 100 tf.

Considerando-se o nível de esbeltez apresentados pelos novos modelos de torres eólicas, torna-se necessário e relevante o estudo do comportamento estrutural dinâmico não determinístico desses sistemas, pois estas torres são submetidas a cargas dinâmicas cada vez mais elevadas e mais frequentes a partir do aumento da altura dessas torres.

Assim sendo, este estudo investiga a resposta estrutural dinâmica de uma torre de aço cônica com 76,15 metros de altura, para suporte de aerogerador modelo MM92 da Repower Repower Systems (2008), quando submetido à ação não determinística do vento para perfis de velocidades distintas. Além da ação dinâmica não determinística do vento, as cargas atuantes consideradas para a análise da torre são: o peso próprio, as forças do rotor e, ainda, o efeito causado pelo desprendimento de vórtices é investigado.

A investigação desenvolvida considera o efeito proveniente da interação solo estrutura sob a resposta estrutural dinâmica da torre eólica em estudo. Investiga-se a resposta dinâmica da torre verificando os valores dos deslocamentos máximos da estrutura e as tensões máximas. Esses valores máximos são comparados com os valores limites recomendados por normas correntes de projeto.

2 MODELO NÃO DETERMINÍSTICO DO VENTO

As propriedades do vento são instáveis, e tem variação aleatória. A consideração determinística é inadequada. Todavia, pode-se levantar a hipótese que para a geração dos históricos de carregamento, o fluxo de vento é unidirecional, estacionário e homogêneo. Isso implica que a direção do fluxo principal é constante no tempo e no espaço. Suas características não se alteram durante o período de realização da simulação. Portanto é necessário gerar funções de tempo associadas à parte flutuante do vento. Essas funções de tempo podem ser geradas com base em uma série de Fourier utilizando o espectro de Kaimal.

No presente trabalho utilizou-se o espectro de potência de Kaimal (Figura 1), pois o mesmo considera a altura “z” na determinação da densidade espectral do vento. A parcela flutuante do vento é decomposta em um número finito de harmônicos, funções proporcionais às frequências ressonantes da estrutura e com ângulos de fase aleatórios. Assumiu-se uma faixa de frequência definida na análise modal e também considerou-se que um dos harmônicos presentes na carga dinâmica não determinística coincide com a frequência fundamental do estrutura, enquanto os demais harmônicos da excitação são múltiplos do harmônico ressonante.

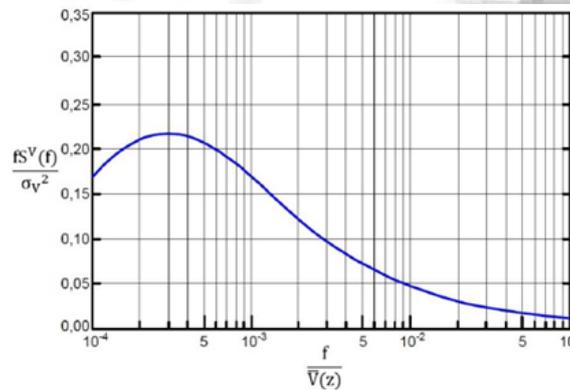


Figura 1 - Espectro de potência do vento de Kaimal

A amplitude de cada harmônico é obtida usando o espectro de Kaimal e é dado pelas Eqs. (1) e (2). A velocidade de fricção é determinada pela Eq.(3).

$$\frac{fS^V(f,y)}{u_*^2} = \frac{200x}{(1+50x)^{5/3}} \quad (1)$$

$$x(f,y) = \frac{fy}{V_y} \quad (2)$$

$$u_* = \frac{k\overline{V}_y}{\ln(y/y_0)} \quad (3)$$

Onde:

$S^V(f)$ – densidade espectral de energia na frequência f ;

f – frequência (Hz);

x – frequência adimensional;

V_y – velocidade média do vento na cota y e acima do nível do terreno (m/s);

k – constante de Kármán;

u_* – velocidade de fricção ou velocidade de corte no escoamento do vento;

y_0 – comprimento de rugosidade;

Baseado em uma única função harmônica, a parcela flutuante do vento pode ser representada pela Eq. (4), com v_0 representando a velocidade básica do vento. Em sequência, assumindo que a parcela flutuante do vento está associada ao processo aleatório estacionário com média igual a zero e considerando também uma superposição das ondas harmônicas, as flutuações podem ser expressas como na Eq. (5). A amplitude das funções no domínio do tempo é dada pela Eq. (6).

$$v(t) = v_0 \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (5)$$



$$a_i = \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \quad (6)$$

Onde:

N – número de divisões no espectro de potência;

f_i – frequência em Hz;

Δf – incremento da frequência em Hz;

θ_i – ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π ;

Os resultados são obtidos considerando o vento atuando na estrutura durante um intervalo total de 10 minutos (600 segundos). Na Figura 2 é apresentado a variação da força do vento em um mesmo ponto da estrutura para cada perfil de velocidades: 24 m/s, 40 m/s e 70 m/s, sendo possível evidenciar o caráter aleatório da ação do vento, apesar das diferentes intensidades.

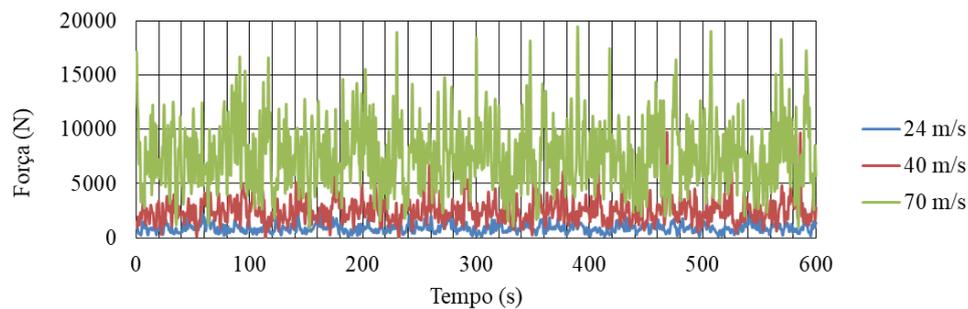


Figura 2 - Forças dinâmicas não determinísticas aplicadas no topo da torre eólica no domínio do tempo

3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

Em seu trabalho de pesquisa, Sirqueira (2008) estudou o comportamento estrutural da torre de aço para suporte de uma turbina modelo MM92 da Repower, com capacidade de geração de 2 MW de energia elétrica, começando sua produção a partir de uma velocidade de 3 m/s e interrompendo a mesma quando atinge uma velocidade de 24 m/s. O suporte para a turbina eólica é feito de aço com as seguintes características: módulo de elasticidade (E_s) 205 GPa, tensão de escoamento (f_y) de 355 MPa, densidade (γ_s) de 78,5 KN/m³ e o coeficiente de Poisson (ν_s) de 0,3. A sapata de concreto armado tem as seguintes características: módulo de elasticidade (E_c) 30 GPa, tensão de escoamento (f_{ck}) 16 MPa, densidade (γ_c) de 25,5 KN/m³ e Poisson (ν_c) de 0,2.

O suporte tem espessura variável ao longo de sua altura com 30 mm na base e 12 mm no topo, possui o formato de um tronco cônico vazado dividido em três partes conforme mostra a Figura 3. A fundação da estrutura, vista em planta, é uma sapata octogonal inscrita numa circunferência de 17 m de diâmetro e com altura constante de 2,5 m conforme mostra a Figura 3. Os carregamentos atuantes na torre eólica são: o peso próprio, forças geradas no rotor, forças provenientes do vento e o desprendimento de vórtices.

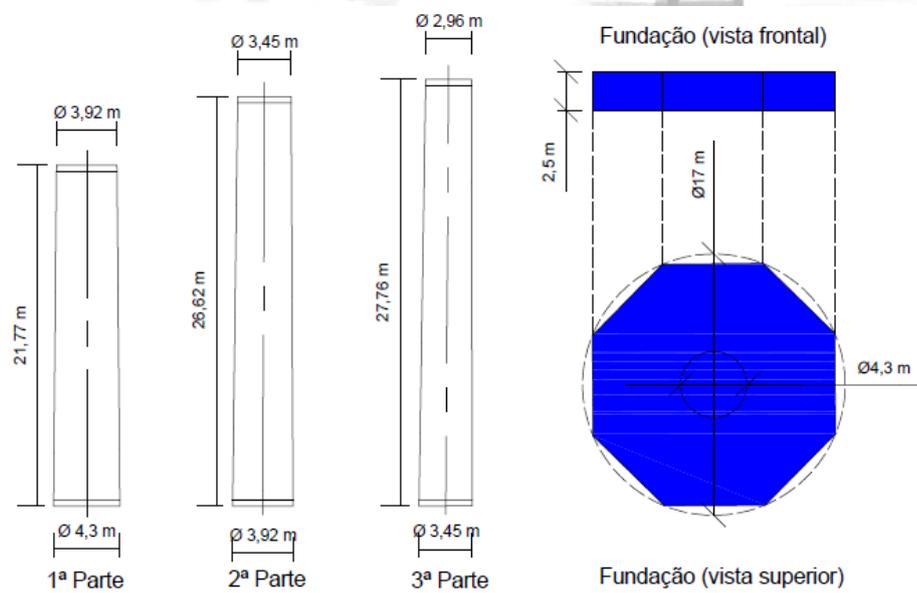


Figura 3 - Características geométricas do suporte de aço e da fundação

Para considerar o peso próprio da torre, foram modelados: a torre para suporte da turbina com peso específico do aço de 78,5 KN/m³, o gerador com peso específico de 23,24 KN/m³, o rotor com peso específico de 32,00 KN/m³ e a fundação em sapata com peso específico do concreto armado de 25,5 KN/m³. O peso específico das hélices foi computado no rotor, pois elas estão presas em seu eixo.

Umut et al (2011), baseado no artigo de Bazeos et al (2002) onde o autor calcula as forças do rotor para uma turbina de 450 kW, calculou por interpolação linear as forças geradas no rotor para uma turbina de 3 MW. Oliveira (2017) calculou também essas forças para uma turbina de 2 MW para dois casos: operacional e sobrevivência. A Figura 4 mostra esquematicamente os carregamentos atuantes devido às forças no rotor e a Tabela 1 mostra os valores dessas forças para esses casos.

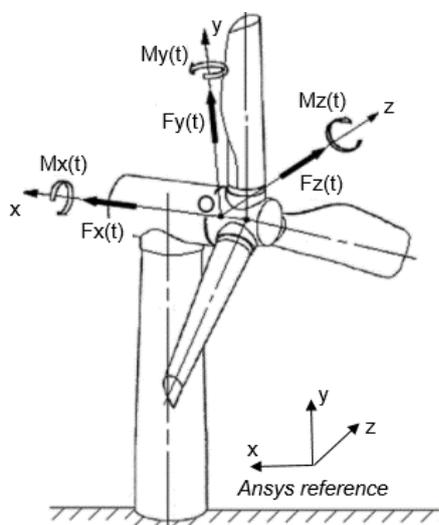


Tabela 1 - Forças do rotor (2 MW)

Forças	Operacional (3m/s < v < 24 m/s)	Sobrevivência (v > 24 m/s)
F _x (kN)	181,7	510,3
F _y (kN)	544,6	0
F _z (kN)	0,1	0,11
M _x (kNm)	367,2	220
M _y (kNm)	14,1	14,3
M _z (kNm)	219,8	184,5

Figura 4 - Forças do rotor

A torre em estudo foi dividida em 30 seções ao longo de sua altura para aplicação da força proveniente do vento não determinístico. Para tal, foi gerada uma única série para cada um dos três perfis de velocidades: 24 m/s, 40 m/s e 70 m/s.

Oliveira (2017) investigou a resposta dinâmica da referida torre considerando o vento atuando em três direções: 0°, 45° e 90°, onde foi observada como situação mais crítica de incidência ventos a 0°. Por este motivo, no presente artigo considerou-se o vento atuando somente na direção de 0° (direção do eixo x), conforme mostra a Figura 5.



Figura 5 - Direção de aplicação da força proveniente do vento não determinístico

O desprendimento de vórtices é um fenômeno que ocorre quando um corpo é submetido a um escoamento com certa velocidade. Na região que ocorre o deslocamento da camada limite surge uma esteira na parte traseira do referido corpo devido às forças cisalhantes geradas ao perderem quantidade movimento pelo choque com a parede da estrutura.

Gerrard (1966) descreveu a modelagem do desprendimento de vórtice no escoamento em torno de um cilindro, mostrando que o principal elemento responsável pelo desprendimento de vórtices é a interação mútua entre as duas camadas cisalhantes geradas pelo desprendimento da camada limite. A Equação (7) mostra quando o efeito do desprendimento de vórtices precisa ser investigado (Eurocódigo 1, 2005).

$$\frac{l}{d} > 6 \tag{7}$$

Onde :

- l - plano perpendicular da maior direção de incidência do vento (altura da torre);
- d - plano perpendicular da menor direção de incidência do vento (diâmetro médio da torre);

Conforme ilustrado na Eq. (8), o mesmo não precisa ser investigado quando (Eurocódigo 1):

$$V_{cr} = 1,25 V_m \tag{8}$$



Onde :

V_{cr} - é a velocidade crítica do vento para o modo 1 (modo de flexão);

V_m - é a velocidade média do vento de 10 minutos característicos na seção transversal onde ocorre o efeito vórtice;

A torre eólica em estudo tem a relação $l/d > 6$, logo deve ser investigada com relação ao efeito devido ao desprendimento de vórtices. Segundo o Eurocódigo 1, o desprendimento de vórtices tem caráter sinusoidal, logo é razoável modelar a alteração de vórtice que cria uma excitação harmônica normal ao fluxo de vento como mostra a Eq. (9) descrita abaixo:

$$F_k = \frac{1}{2} \rho V^2 \text{sen}(2\pi n t) \quad (\text{KN/m}^2) \quad (9)$$

Onde :

F_k - carga de vento cruzado por unidade de área devido ao desprendimento de vórtices

ρ - massa específica do ar (1.225 Kg/m^3) ou em peso específico ($12,25 \text{ N/m}^3$)

V - velocidade crítica (= V_{cr}) (m/s^2)

A velocidade crítica (V_{cr}) é função do raio da seção transversal (b), da frequência natural de ressonância da estrutura (n_i) e do número de Strouhal (St) e é dada pela Eq. (10).

$$V_{cr} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

Onde:

b - diâmetro da seção transversal (adotado o diâmetro médio igual 3,63 m)

$n_{i,y}$ - frequência natural de ressonância da estrutura (f_{01}).

St - número de Strouhal (0,18 para seções cilíndricas)

Calculada a velocidade crítica, chega-se as forças ao longo do tempo que perturbam a estrutura devido ao desprendimento de vórtices, conforme mostrado na Figura 6.

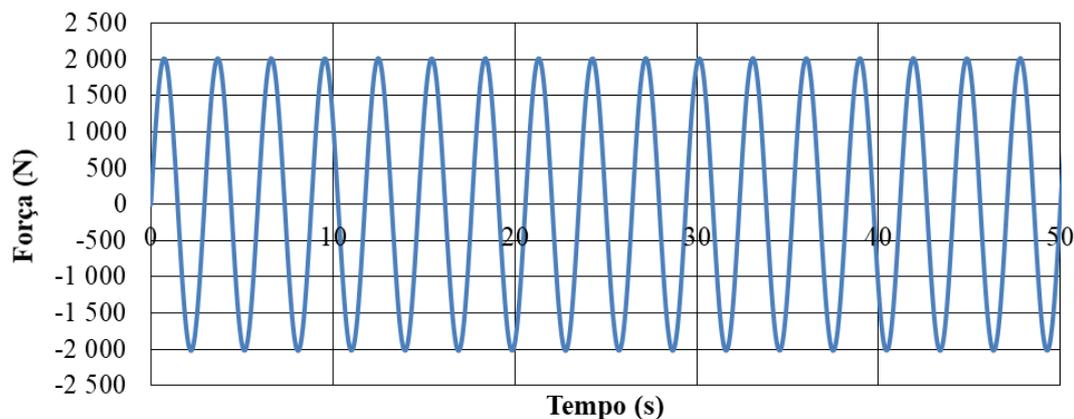


Figura 6 - Forças devido ao desprendimento de vórtices



4 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DA TORRE

O modelo numérico foi elaborado com base no método dos elementos finitos utilizando-se para a torre e a nacelle o elemento finito de casca SHELL181 (ANSYS 2015), para a sapata de concreto armado o elemento finito tetraédrico sólido SOLID72 (ANSYS 2015) e para a interação solo estrutura o elemento finito de mola COMBIN39 (ANSYS 2015).

O elemento de casca SHELL181 (ANSYS 2015) é adequado para análise de estrutura compostas por cascas que apresentam espessuras finas e médias, o mesmo tem 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.

O elemento tetraédrico sólido SOLID72 (ANSYS 2015) é o elemento adequado para a modelagem de malhas irregulares, caso da nossa sapata em concreto armado, o mesmo possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó: as translações nas direções nodais X, Y e Z e as rotações sobre as direções nodais X, Y e Z. Trata-se do elemento adequado na modelagem da sapata, pois pela natureza do modelo estrutural a mesma trabalha por gravidade e no caso de torres eólicas a rigidez rotacional da fundação tem maior importância, ou seja, a sapata tende a se movimentar como corpo rígido.

O elemento de mola COMBIN39 (ANSYS 2015) é o elemento usado para a modelagem da interação solo estrutura, pois dá a possibilidade de computar a não linearidade da rigidez do solo, onde essa rigidez poderá ser escrita em termos de uma curva formada pela relação entre as forças aplicadas na mola e os seus respectivos deslocamentos. O elemento tem dois nós com três graus de liberdade por nó: as translações nas direções nodais X, Y e Z. Foi escolhida a opção para trabalhar com o elemento longitudinalmente.

A rigidez das molas foi adotada de acordo com o módulo de elasticidade do solo, E_s , e é baseada no coeficiente de reação do subleito K_z definido de acordo com a Eq. (11) de (Bowles 1988, Adhikari e Bhattacharya 2011):

$$K_z = \frac{E_s}{B(1-\nu_s)} \quad (\text{KN/m}^3) \quad (11)$$

Onde :

K_z – rigidez do solo (KN/m³);

E_s – módulo de elasticidade do solo (300 MPa);

ν_s – coeficiente de Poisson do solo (0,3);

B – diâmetro da fundação (=17 m)

Na modelagem das aberturas na torre foram consideradas todas as suas características geométricas e também os enrijecedores. As hélices, o rotor e a nacelle foram representados por um elemento de casca com densidade equivalente as suas respectivas massas. Para representar corretamente o comportamento físico do engaste entre a torre e a fundação foi necessário que os nós do elemento de casca da torre se conectassem aos nós do elemento sólido da sapata. O modelo final adotado foi constituído por 72399 elementos, 43339 nós e 160764 graus de liberdade, conforme apresentado na Figura 7.

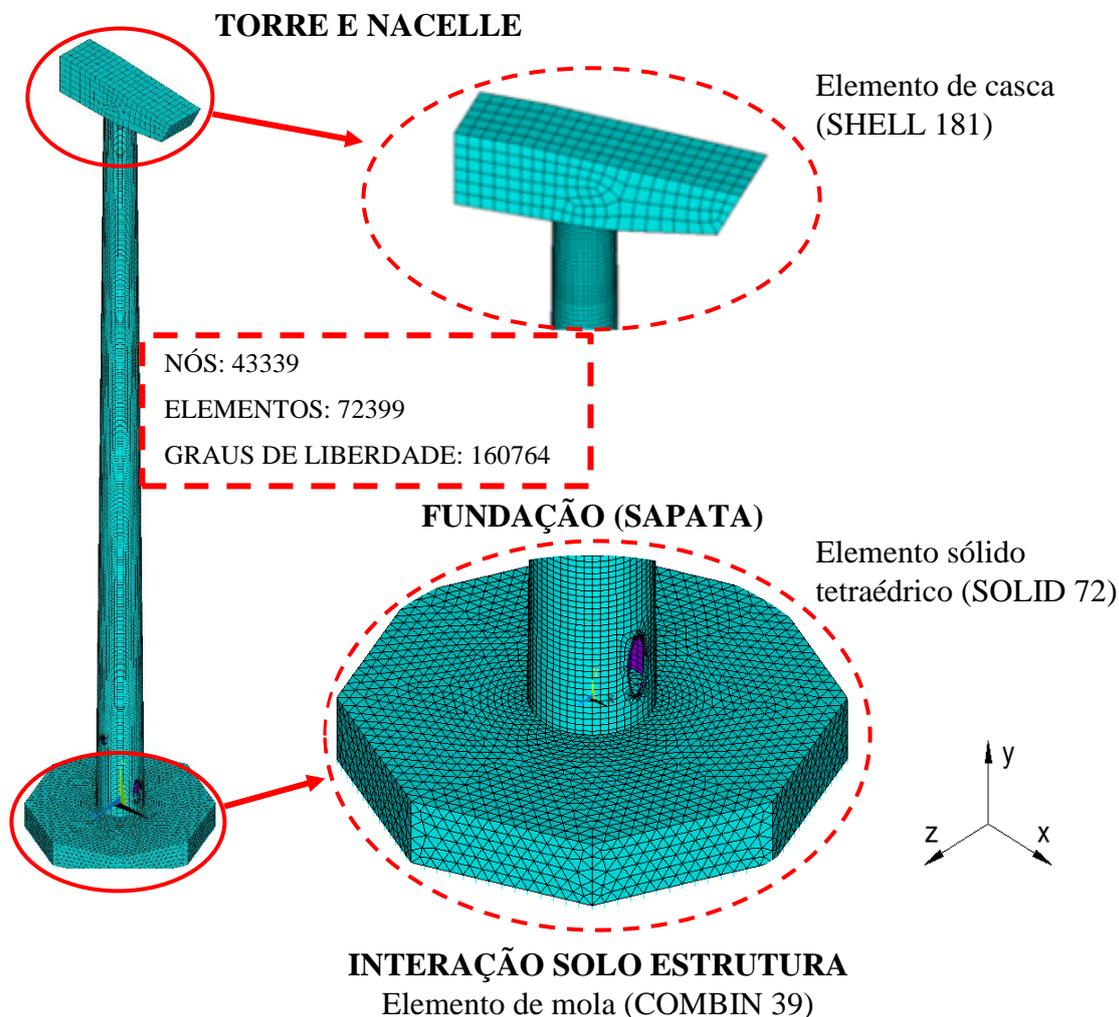


Figura 7 - Modelagem da torre eólica MM92 da Repower

5 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Quando um agente externo excitador fornece periodicamente energia a um sistema é possível ocorrer a coincidência da frequência de excitação com uma das frequências naturais do sistema, conseqüentemente o modo natural de vibração é excitado e amplificado, fazendo com que o sistema vibre com grandes amplitudes.

A análise modal utiliza toda a massa da estrutura e sua flexibilidade para encontrar vários períodos em que pode naturalmente entrar em ressonância. Esses períodos de vibração são muito importantes de se observar para adequar a engenharia às cargas dinâmicas que podem estar presentes durante a vida da estrutura (terremotos, ação do vento, de marés, vibração devido a motores de máquinas e etc.). É necessário que a frequência natural da construção não coincida com a frequência dessas cargas dinâmicas.

Em seguida, a Tabela 2 exibe os valores das frequências naturais referentes aos quatro primeiros modos de vibração dos quatro modelos numéricos investigados: MN-I (apoios rígidos), MN-II (fundação em sapata com base engastada), MN-III (fundação em sapata com base elástica discreta variável) e MN-IV (fundação em sapata com base elástica discreta média) bem como as frequências dos quatro primeiros modos da análise experimental feita por Rebelo et. al (2012). Com base nos resultados apresentados, verifica-se que as duas primeiras frequências naturais dos quatro modelos estruturais são inferiores a 1 Hz, pois trata-se de uma estrutura de grande esbelteza. Este fato evidencia a necessidade do estudo de seu comportamento dinâmico.

Tabela 2 - Frequências naturais dos modelos estruturais

Frequências Naturais	MN-I (apoios rígidos)	MN-II (fundação em sapata com base engastada)	MN-III (fundação em sapata com base elástica discreta variável)	MN-IV (fundação em sapata com base elástica discreta média)	Testes Experimentais
f_{01}	0,354 Hz	0,346 Hz	0,346 Hz	0,340 Hz	0,340 Hz
f_{02}	0,355 Hz	0,348 Hz	0,348 Hz	0,342 Hz	0,343 Hz
f_{03}	2,517 Hz	2,510 Hz	2,515 Hz	2,449 Hz	2,767 Hz
f_{04}	2,604 Hz	2,524 Hz	2,520 Hz	2,515 Hz	2,794 Hz

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, dependendo do tipo de modelagem da fundação, os modelos apresentam pequenas variações nas suas quatro primeiras frequências, indo do mais rígido MN-I até o menos rígido MN-IV. Além disso, as formas modais entre os modelos estudados não mudam. A Figura 8 mostra os modos de vibração do modelo MN-IV, pois este se mostra o mais próximo da realidade quando comparado ao experimental. Tais formas modais estão correlacionadas com as quatro primeiras frequências naturais apresentadas anteriormente.

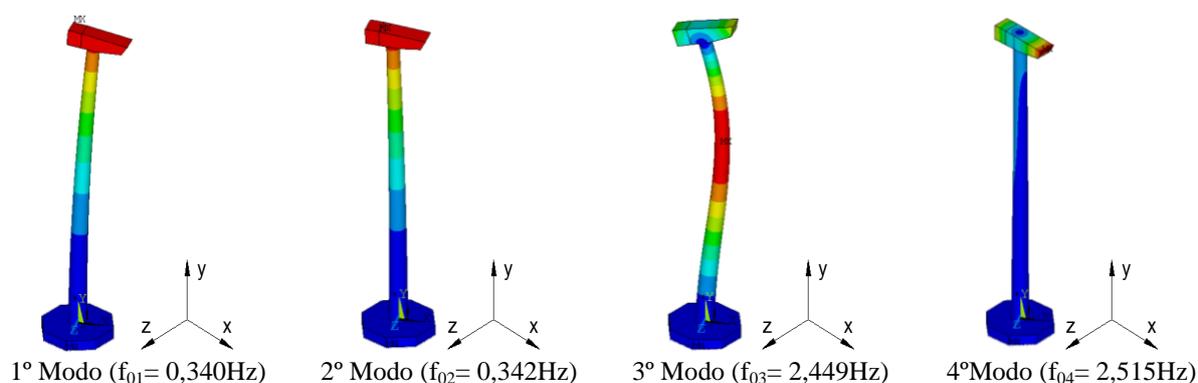


Figura 8 - Modelo estrutural (MN-IV): 1º, 2º, 3º e 4º modos de vibração

A Tabela 3 apresenta o que ocorre fisicamente com referência a cada modo de vibração de cada um dos quatro modelos numéricos investigados. Pode-se observar que não ocorrem modificações significativas nos modos de vibração da estrutura e pode-se concluir que o efeito da interação solo-estrutura não afetou qualitativamente os modos de vibração.

Tabela 3 - Modos de vibração de dos modelos numéricos

Frequências	Modo de vibração			
	MN-I	MN-II	MN-III	MN-IV
f_{01}	Flexão em XY	Flexão em XY	Flexão em XY	Flexão em XY
f_{02}	Flexão em XZ	Flexão em XZ	Flexão em XZ	Flexão em XZ
f_{03}	Torção em Y	Torção em Y	Torção em Y	Torção em Y
f_{04}	Flexão em XY	Flexão em XY	Flexão em XY	Flexão em XY

6 ANÁLISE DINÂMICA NÃO DETERMINÍSTICA

Utilizou-se o programa de elementos finitos ANSYS (2015), para realizar as análises dinâmicas de vibração forçada sobre o modelo numérico MN-IV. O mesmo foi escolhido pelo fato da frequência natural ser igual a encontrada na experimental, e é exatamente essa frequência (0,34 Hz) que comanda o problema relacionados a ressonância.

As cargas consideradas na referida análise foram: peso próprio, forças devido ao rotor, forças geradas pelo efeito de desprendimento de vórtices e a ação do vento (não determinístico) que foi aplicado a 0° (direção do eixo x). Os resultados das análises dinâmicas para as três velocidades e os deslocamentos translacionais horizontais máximos são obtidos nos nós do topo da torre ($h = 78,1$ m) conforme mostram as Figuras 9, 10 e 11.

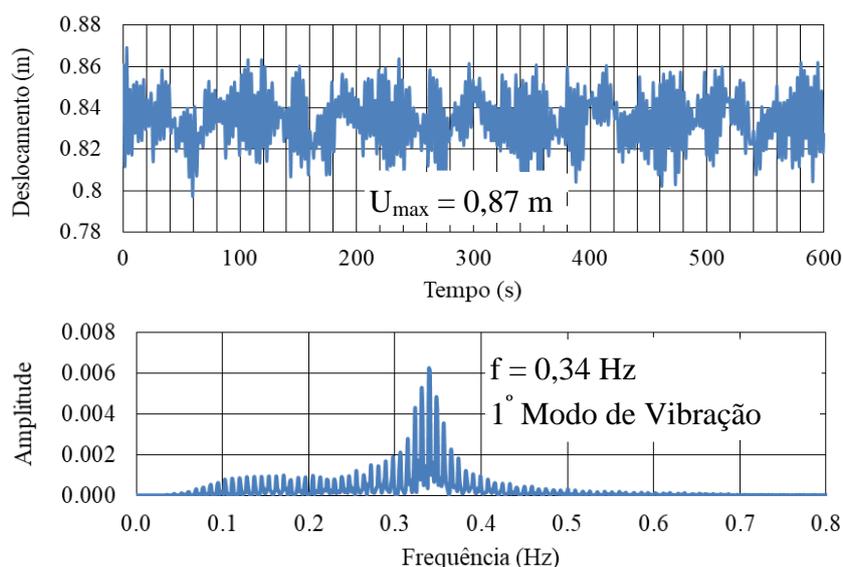


Figura 9 - Deslocamento no domínio do tempo e da frequência para $V=24$ m/s

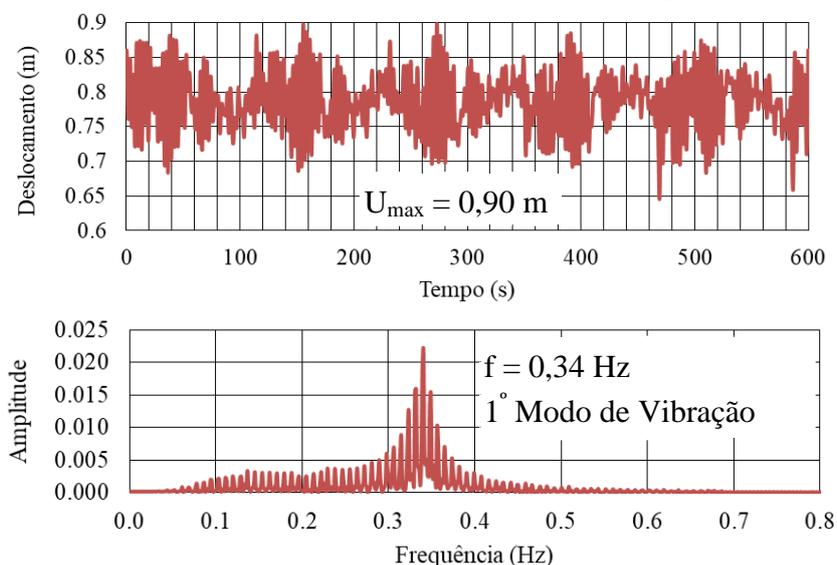


Figura 10 - Deslocamento no domínio do tempo e da frequência para $V=40 \text{ m/s}$

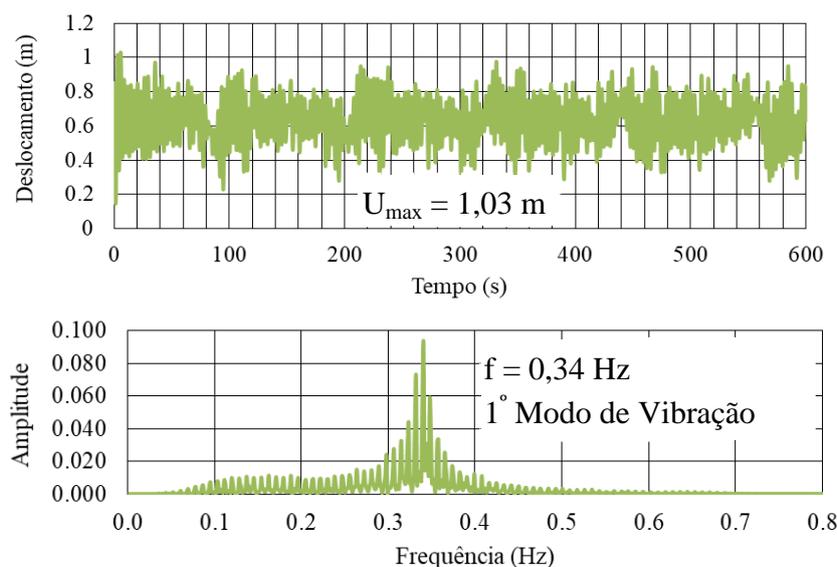


Figura 11 - Deslocamento no domínio do tempo e da frequência para $V=70 \text{ m/s}$

Para todos os perfis de velocidade de vento, os deslocamentos no domínio da frequência, obtidos através da transformada de Fourier, mostram que o pico de transferência de energia está associado a ressonância com valor da frequência natural da estrutura (0,34 Hz), relacionada ao 1º modo de vibração, flexão no plano XY.

Os valores dos deslocamentos máximos para cada perfil de velocidade devem ser apurados com o acréscimo de mais séries para um tratamento estatístico afim de se observar a convergência desses valores. As tensões máximas de Von Mises, acontecem na abertura da torre para as três velocidades estudadas, conforme mostram as Figuras 12, 13 e 14.

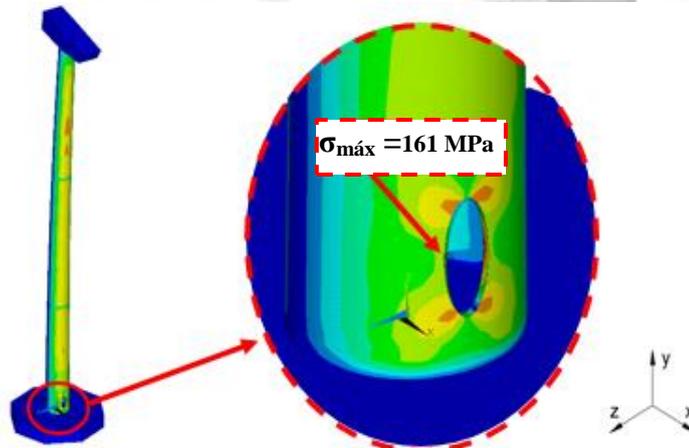


Figura 12 - Tensão máxima de Von Mises: $\sigma_{\text{máx}} = 161 \text{ MPa}$ para $V=24 \text{ m/s}$

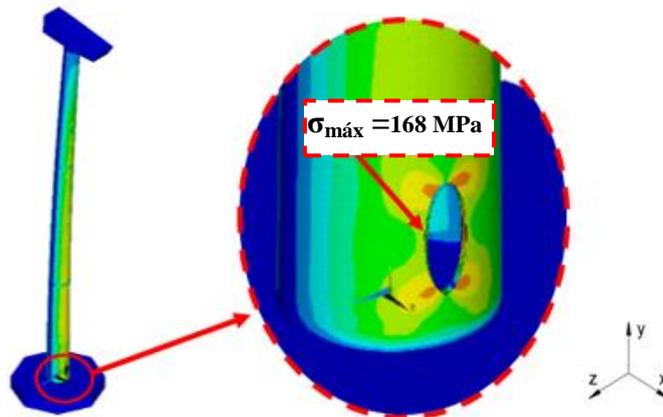


Figura 13 - Tensão máxima de Von Mises: $\sigma_{\text{máx}} = 168 \text{ MPa}$ para $V=40 \text{ m/s}$

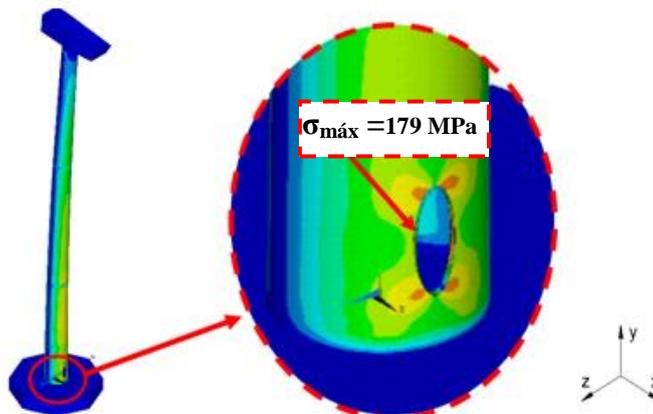


Figura 14 - Tensão máxima de Von Mises: $\sigma_{\text{máx}} = 179 \text{ MPa}$ para $V=70 \text{ m/s}$



CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é o verificar de que forma a interação solo-estrutura pode influenciar na resposta estrutural dinâmica de uma torre eólica. Assim sendo, foram estudados quatro tipos de modelagem para a torre investigada e foi escolhida para a análise dinâmica aquela cuja resposta dinâmica (análise modal) mais se aproximou dos resultados dos testes experimentais.

Em relação aos quatro modelos numéricos desenvolvidos, pode-se verificar que não houve mudança significativa nas formas dos modos de vibração. Todavia, existem alterações nos valores das frequências naturais dos modelos. Estes valores diminuem para os primeiros quatro modos de vibração partindo do modelo I (mais rígido) até o modelo IV (menos rígido).

Com referência à análise dinâmica não determinística (análise de vibração forçada), considerando-se os três perfis de velocidades (24 m/s, 40 m/s e 70 m/s), o principal pico de transferência de energia da resposta do sistema ocorre em relação a frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 0,34$ Hz), associada ao 1º modo de vibração da torre, com flexão no plano XY.

Os deslocamentos translacionais horizontais máximos para as três velocidades em estudo apresentam valores da ordem de 0,87 m (24 m/s), 0,90 m (40 m/s) e 1,03 m (70 m/s), respectivamente. No que diz respeito à verificação do estado limite de utilização em torres metálicas correntes segundo o Eurocódigo 3 (2004), o deslocamento máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$) permitido no topo dessas estruturas é representado pela razão da altura da torre (h) sobre 50. Para a torre em estudo, $\delta_{m\acute{a}x} = 78,1/50 = 1,56$ m, demonstrando que para as três velocidades investigadas, os deslocamentos máximos encontrados estão de acordo com o limite permitido.

As tensões máximas de Von Mises ocorrem na abertura da torre de aço, no que diz respeito as três velocidades investigadas neste trabalho de pesquisa (24 m/s, 40 m/s e 70 m/s), com valores máximos iguais a 161 MPa (24 m/s), 168 MPa (40 m/s) e 179 MPa (70 m/s), respectivamente, sendo que estes valores de tensão são inferiores ao valor da tensão de escoamento do aço da torre metálica ($f_y = 355$ MPa), evidenciando assim, que apesar das velocidades de vento elevadas, a estrutura da torre trabalha no regime elástico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país (CAPES, CNPq e FAPERJ) que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSYS, Inc. *Theory reference* (version 16.2), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1988.



Bowles, J.E., *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill. 1988.

Bazeos N., Hatzigeorgiou G.D., Karabalis D.L., *Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower*. *Engineering Structures* 24: 1015-1025. 2002.

CEN, Eurocode 1: *Action in structures – Part 1-4: General actions – wind actions*. 1991-1-4.2010.

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.

Gerrard J. H., *The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies*. *Journal of Fluid Mechanics*. June 1966 – pp. 401-413.

Rebelo C., Veljkovic M., Simões da Silva L., Simões R. and Henriques J., *Structural monitoring of a wind turbine steel tower - part I: system description and calibration*. *Wind and structures* 15(4): 1-15. 2012.

REPOWER SYSTEMS AG, *Mechanical design wind tower MM92 Repower*. Product description. 2008.

Silva JGS e Oliveira B. A. S., *Evaluation of the nondeterministic dynamic structural response of three-dimensional wind turbine steel towers*, paper, Civil Engineering Post-Graduate Programme (PGECIV), State University of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brazil, 2017.

Siqueira, A. S., *Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas*. Rio de Janeiro, 2008. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PGECIV), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. 2008.

Umut O., Akbas. B., Shen J., *Design issues of wind turbine towers*, paper, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011, Leuven, Belgium, 4-6 July 2011.