



MODELO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE TORRES TRELIÇADAS EM CONCRETO ARMADO PARA TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

Luiz Antonio Soares de Souza

lasouza@uel.br

Univ. Estadual de Londrina, Brasil

Carlos Chastre Rodrigues

Válter José da Guia Lúcio

chastre@fct.unl.pt

vlucio@fct.unl.pt

CEris, ICIST, FCT - Univ. Nova de Lisboa, Portugal.

Sueli Tavares de Melo Souza

suelisouza@utfpr.edu.br

Univ. Tecnológica do Paraná, Brasil

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software para análise de torres treliçadas em concreto armado, pós-tensionada por tirantes externos, com a finalidade de suporte para turbinas eólicas de eixo horizontal, em ambiente offshore. A torre está sujeita às ações gravitacionais, aerodinâmicas, hidrodinâmicas. Desenvolveu-se um código computacional, em linguagem MATLAB, específico para este tipo de torre. As dificuldades de uma análise tridimensional mais complexa foram reduzidas propondo-se um modelo simplificado bi-dimensional utilizando-se elementos de pórtico plano. As cargas de vento são variadas segundo o espectro de von Karman. Para as ondas marítimas e correntes são implementados o espectro de Pierson-Moskowitz e o de JONSWAP. As cargas hidrodinâmicas são avaliadas pela equação de Morison. Estas cargas são integradas ao longo dos elementos estruturais e transformadas em cargas nodais equivalentes. A análise é realizada no domínio do tempo com algoritmo de Newmark. Este software, por ser específico para este tipo de torre, possui facilidades na introdução de dados e na modelagem da estrutura. Com estas estratégias o modelo apresentou bons resultados para a avaliação de cargas, cálculo de frequências naturais, resposta de deslocamentos, esforços e reações.

Palavras chaves: Torre Offshore, Turbinas Eólicas, Ações Aerodinâmicas, Ações Hidrodinâmicas, Frequência Natural.

1 INTRODUÇÃO

A demanda cada vez maior de energia faz com que o homem esteja sempre à procura de novas soluções para a sua produção.

A energia eólica apresenta-se como uma solução sustentável a médio e longo prazo, por se tratar de uma fonte de energia renovável, limpa e inesgotável. É considerada atualmente como a de menor impacto ambiental e não impede o desenvolvimento da indústria agropecuária nas áreas onde esta instalada. O crescimento desta energia tem sido exponencial no Mundo e em particular na Europa. No Brasil, a utilização maior esta na região nordeste, mas o Estado do Paraná possui uma única usina eólica, composta por cinco torres que produzem 2,5 MW, ou seja, 1,42% da energia produzida no Estado. Existe um projeto aprovado desde 1999 para a construção de mais três parques que poderão gerar 170,2 MW, que suprirá quase toda a necessidade de energia do estado (Jornal de Londrina, 2014).

O sucesso da energia eólica no futuro próximo passa pelo desenvolvimento de turbinas cada vez mais potentes, com o conseqüente aumento da altura das torres e da dimensão das pás. Em 1990 as turbinas tinham capacidade de produzir 500kW, com torres de 54m de altura, em 2005 atingiram-se turbinas com 5MW com torres de 114m de altura.

Contudo, com o crescimento da energia eólica onshore, em especial na Europa e possivelmente no Brasil, os melhores lugares para a produção de energia começam a ficar densamente ocupadas, o que não é sustentável em termos ambientais. Além disso, a solução estrutural tradicional, em tubo de aço e mais recentemente em aduelas de concreto pré-fabricado acaba por ter suas dimensões transversais limitadas a 4,3m por questões de transporte, e também devido a problemas de segunda ordem e frequências naturais, acabam limitando a altura entre os 100 e 130 m.

A instalação de parques eólicos offshore apresenta como vantagem um rendimento da ordem de 20% na geração de energia, pelo fato de não haver barreiras físicas. Alguns países que apresentam boas características para a produção de energia eólica em offshore, com um mar pouco profundo junto à costa, começaram a apresentar projetos de parques eólicos offshore. Nestes parques a profundidade da água varia entre os 10 e os 30m, tendo-se implementado ou projetado alguns tipos de fundações, designados como “monopile”, fundações diretas, “jacket”, “tripod” e “suction caisson”. Para atender alguns países onde o offshore relativamente profundo, surgiu algumas soluções flutuantes para as eólicas. Estas estruturas, segundo os seus “autores” destinam-se a ser utilizadas em zonas com profundidades superiores a 70m tendo um custo extremamente elevado.

Considerando o exposto acima, existe em termos de concepção, a oportunidade de desenvolver um tipo de solução estrutural que permita ocupar a região existente entre os 10 a 30m de profundidade das soluções existentes e os 70m de profundidade das soluções flutuantes. Assim, surgiu a idéia de desenvolver uma solução estrutural que permitisse apoiar a fundação no fundo do mar para profundidades até os 70m.

Neste sentido os autores Lucio e Chastre (2012), idealizaram uma torre pré-fabricada em concreto e pós-esforçada, a qual se apresenta como uma possível alternativa às torres existentes.

A torre idealizada possui três ou mais montantes pré-fabricados, contraventados por travessas em diversos níveis e por diagonais ligando os diferentes níveis (Fig. 1). Esta solução tem a vantagem de permitir a rápida construção de torres, utilizando elementos facilmente

transportáveis, com redução dos custos de produção, transporte, montagem e manutenção. Além disso, permite liberdade na escolha da geometria da torre, facilitando a sua otimização, tanto em termos de capacidade resistente como no controle da sua frequência natural de vibração, em especial devido à sua geometria treliçada.



Figura 1. Torre idealizada de concreto pré-fabricada (Lucio e Chastre 2012).

Este trabalho dedicou-se essencialmente a desenvolver um software específico para análise estrutural de torres treliçadas de concreto armado pré-moldado, para suporte de turbinas de produção de energia eólica offshore.

Cargas dinâmicas como vento, correntes marítimas, onda e sismos são aspectos fundamentais a ser considerado no projeto de estruturas offshore (Bezeos, 2002; Dalhoff, Argyriadis e Klose, 2007). Estas cargas desempenharão um papel importante na verificação do estado limite último da estrutura, na operação da turbina eólica em si e na necessária manutenção da estrutura, causadas por danos de fadiga induzidos (Harte e Van Zijl, 2007). Como a componente dinâmica do carregamento não pode ser negligenciada na concepção de estruturas offshore, é importante encontrar métodos que possam quantificar e minimizar o nível de vibração na estrutura (Amarante e Cismasiu, 2010).

Este software, por ser específico para este tipo de torre, possui facilidades na introdução de dados e na modelagem da estrutura. Permite variações do nível do mar, geometrias e carregamentos.

2 MODELO BIDIMENSIONAL

Considerando-se a simetria da torre tridimensional, uma face lateral é modelada por elementos bidimensionais formando um portico ligados por pilares, vigas e tirantes cruzados. O nível médio do mar é indicado pela linha MSL e a profundidade da água representada por d como ilustra a Fig. 2, abaixo:

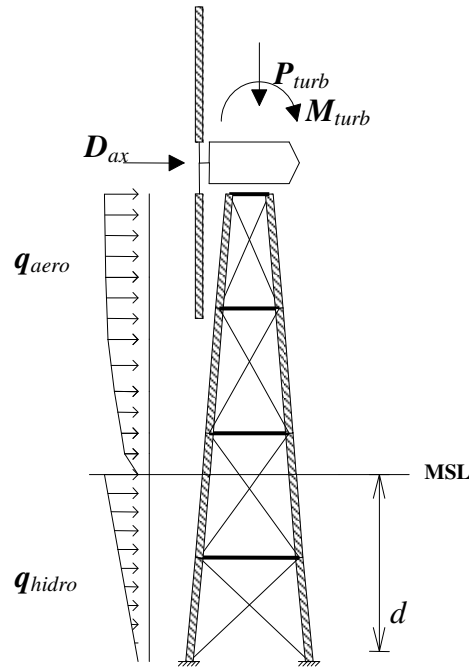


Figura 2. Modelo bidimensional e cargas atuantes.

As cargas atuantes na torre são: peso próprio, peso e momentos devido à excentricidade da turbina (P_{turb} e M_{turb}); cargas de vento composta por duas parcelas: força horizontal na turbina (D_{ax}) e pressão nos elementos estruturais da torre (q_{aero}); e cargas hidrodinâmicas formadas por correntes marítimas (q_{hidro}) e ondas.

3 FORMULAÇÃO MATRICIAL

A equação de equilíbrio dinâmico em forma matricial é dada por:

$$\mathbf{K}\mathbf{U}^t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}^t + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}^t = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

Onde, $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez global, $\mathbf{C}$ é a matriz de amortecimento, $\mathbf{M}$ é a matriz de massa, $\mathbf{F}(t)$ é o vetor de cargas dependente do tempo, $\mathbf{U}^t$ o vetor de deslocamentos em função do tempo, e o ponto superior representa a ordem da derivada no tempo.

3.1 Matrizes $\mathbf{K}$, $\mathbf{M}$ e $\mathbf{C}$

As matrizes $\mathbf{K}$ e $\mathbf{M}$ são obtidas a partir da contribuição das matrizes de cada elemento de pórtico plano (Gere e Weaver, 1981). Adotou-se para os elementos a matriz de massa consistente (Cook, 1989). Maiores detalhes são descritos em Souza et al. (2015).

A matriz de amortecimento é obtida por uma combinação linear de $\mathbf{K}$ e $\mathbf{M}$, de acordo com exposto em Bathe (1996), da seguinte forma:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{K} + \beta \mathbf{M}. \quad (2)$$

Onde α e β são coeficientes de Rayleigh, dependentes taxa de amortecimento da 1ª. e 2ª. frequência natural.

3.2 Vetor de Cargas

O vetor de cargas $\mathbf{F}(t)$ é composto pelas cargas permanente (F_{perm}) e pelas cargas variáveis no tempo formado pelas parcelas aerodinâmicas (F_{aero}) e hidrodinâmicas (F_{hidro}).

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_{perm} + \mathbf{F}_{aero} + \mathbf{F}_{hidro} \quad (3)$$

As cargas permanentes não apresentam grandes dificuldades para serem avaliadas. O vetor é formado pelas cargas de peso proprio dos elementos estruturais, da turbina e pás e pelas cargas de pós tensão aplicadas aos tirantes. Também deve-se levar em conta o momento gerado pela excentricidade do peso da turbina.

As cargas aerodinâmicas de vento são composta por duas parcelas: força horizontal atuando na turbina ($\mathbf{D}_{ax}$) e pressão atuando nos elementos estruturais da torre ($\mathbf{q}_{aero}$).

A velocidade média do vento $V(z)$ ao longo da altura z é representado por uma função logarítmica, na forma de:

$$V(z) = V_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (4)$$

Onde V_{ref} e z_{ref} são velocidade e altura de referencia, medidas com instrumentos meteorologicos e z_0 é definido como rugosidade da superfície, onde a velocidade é zero. A variação da velocidade do vento com o tempo dependerá da intensidade de turbulencia (TI), que é função do desvio padrão da velocidade média e das frequências sinusoidais de flutuação. Nesta trabalho utilizou-se o espectro de Von Karman, e maiores detalhes pode ser obtido em Manwell, McGowan e Rogers (2009).

3.2.1. Força horizontal na turbina

Para quantificar a carga horizontal nas turbinas utilizou-se a teoria da quantidade de movimento de elementos de pá (BEM- *Blade Element Momentum Theory*), que resulta da

combinação da teoria do disco atuante e da teoria dos elementos de pá. Detalhes desta teoria é mostrada em Manwell, McGowan e Rogers (2009). A força horizontal é escrita como:

$$D_{ax}(t) = \frac{1}{2} C_{Dax} \cdot \rho_{ar} \cdot A_d \cdot V_0^2 \quad (5)$$

Onde: C_{Dax} é o coeficiente de força axial obtido pela BEM; A_d é a área do disco atuante das pás; V_0 é a velocidade do vento não perturbada e ρ_{ar} é a densidade do ar.

3.3. Ações de vento na torre

A carga resultante do vento por unidade de comprimento ao longo de cada elemento estrutural, é dada por:

$$q_{aero}(z, t) = \frac{1}{2} C_{ae} \cdot \rho_{ar} \cdot D(z) \cdot [V_{rel}(z, t)]^2 \quad (6)$$

Sendo: C_{ae} o coeficiente de arrasto (dependente da forma, rugosidade e nº. de Reynolds); $D(z)$ é a dimensão frontal ao vento e $V_{rel}(z, t)$ a velocidade relativa do vento em relação a torre.

3.4. Ações de hidrodinâmicas

A velocidade da corrente marítima induzida pelo vento na superfície do mar é expressa pela lei exponencial:

$$U_{corrente}(z) = U_{C0} \left(\frac{z+d}{d} \right)^{1/7} \quad (7)$$

Com: $U_{corrente}(z)$ a velocidade na elevação z para $-d \leq z \leq 0$; U_{C0} é a velocidade da corrente no MSL(ver Fig. 2).

A velocidade da corrente sofre variações ao longo do tempo, pois dependem de períodos e comprimento das ondas. Portanto, devem ser representadas por algum espectro de potência. Neste trabalho foi implementado o espectro de Pierson-Moskowitz e o JONSWAP (Gerven,2011). Através da equação de Morison, estabelece-se a carga hidrodinâmica por unidade de comprimento do elemento:

$$q_{hidro}(z, t) = f_i + f_d = \frac{\pi}{4} C_M \cdot \rho_w D^2 \cdot |\dot{U}_{rel}(z, t)| + \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_w D \cdot |U_{rel}(z, t)| U_{rel}(z, t) \quad (8)$$

sendo: f_i força de inércia hidrodinâmica; f_d força de arrasto hidrodinâmica; D o diâmetro do pilar; $U_{rel}(z, t)$ e $\dot{U}_{rel}(z, t)$ são velocidade e aceleração horizontal relativa das partículas; C_M e C_D são coeficientes de inércia e arrasto hidrodinâmico respectivamente e dependem do número de Reynolds, cujos valores característicos são $C_M = 2,0$ e $C_D = 0,7$.

O código permite a análise para cada caso de carregamento separadamente, assim quando as cargas de vento e as cargas marítimas atingem a torre em planos diferentes, os efeitos podem ser adequadamente superpostos.

4 INTEGRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

A integração no domínio do tempo segue o esquema estabelecido por Newmark, considerando a aceleração média em cada intervalo de tempo Δt . Assim, os deslocamentos são descritos por:

$$U^{t+\Delta t} = U^t + \Delta t \dot{U}^t + \frac{\Delta t^2}{2} \left(\frac{\ddot{U}^t + \ddot{U}^{t+\Delta t}}{2} \right) \quad (9)$$

A formulação completa deste algoritmo é detalhada em Bathe (1996). A escolha deste esquema de integração se deve pelo fato de ser incondicionalmente estável, mas para uma boa precisão de resultados, recomenda-se:

$$\Delta t \leq \frac{10}{2\pi \cdot f_{\max}} \quad (10)$$

Onde $f_{\max}$ é a maior frequência natural do modelo (Souza, 1997).

5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Como estratégia de desenvolvimento do código computacional, procurou-se elaborar um software de fácil utilização, com introdução de dados mínimos necessários para a análise. Desta forma, tomou-se como base o código RECAL (Cerdeira, 2004), que foi desenvolvido para análise de torres tipo "monopiles". Assim algumas rotinas foram adaptadas e migradas para este novo código possibilitando modelar uma estrutura bi-dimensional, principalmente os módulos de avaliação e quantificação da força horizontal na turbina, das pressões aerodinâmicas e hidrodinâmicas. O código computacional desenvolvido possui as seguintes características:

- Escrito em linguagem de computação MATLAB;
- Elemento de pórtico plano para modelagem das barras;
- Matriz de massa consistente;
- Integração no domínio do tempo por Método Implícito de Newmark;
- Avaliação das cargas aerodinâmicas no domínio do tempo;
- Avaliação das cargas hidrodinâmicas no domínio do tempo;
- Cálculo de frequências naturais por iteração inversa;
- Integração das cargas ao longo do elemento para cálculo de esforços equivalentes a cada instante pela regra de Simpson;
- Permite variar o nível médio do mar com a alteração de apenas um dado de entrada;

6 EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de demonstrar a utilização do programa e aferir os resultados, analisou-se uma torre fictícia de três tramos, e que também foi analisada tridimensional com o programa SAP2000 para efeito de comparação. A torre tem 34,0m de altura total. Admitiu-se o nível médio do mar em 15m. Para a modelagem bidimensional, tem-se 6 pilares, 3 vigas e 6 tirantes, que resultam em 15 elementos e 8 nós e 24 graus de liberdade. A Fig. 3 mostra a forma da torre e na Tabela 1 encontram-se as dimensões. Para a modelagem tridimensional utilizou-se 12 pilares, 12 vigas e 24 tirantes, que resultam em 48 elementos e 16 nós e 96 graus de liberdade.

6.1 Geometria e materiais

Os pilares são em concreto armado com seção circular vazada; as vigas retangulares em concreto armado. Os tirantes são em barras de aço DYWIDAG com 47 mm de diâmetro, e foram tensionados por uma força de 500 kN.

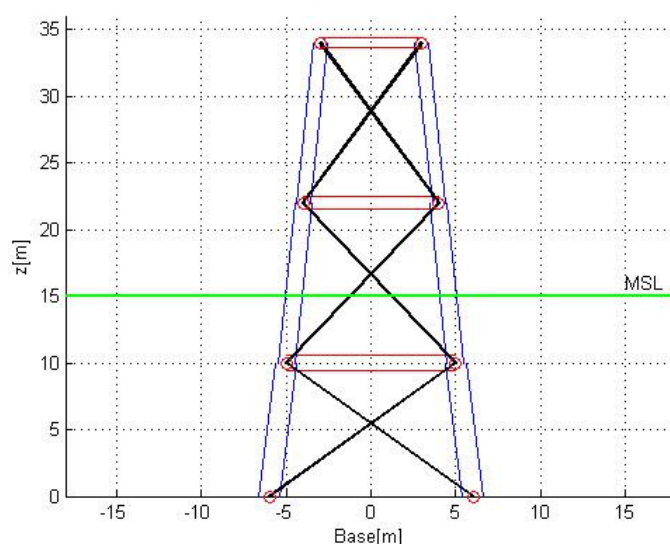


Figura 3. Geometria da torre de três tramos.

A aceleração da gravidade $g=9.81 \text{ m/s}^2$.

Tabela 1. Dimensões da torre.

Tramo	Dimensões da Torre		Seção Pilares		Seção da Viga	
	Cota Z [m]	Base[m]	D_{ext} [m]	Esp.[m]	base [m]	Altura [m]
0	0,	12,0	1,2	0,5		
1	10,	10,0	1,0	0,4	0,5	1,1
2	22,	8,0	0,8	0,3	0,5	1,0
3	34,	6,0			0,4	0,8

Os materiais possuem as seguintes propriedades:

Aço: $E_a=2.1 \times 10^{11}$ Pa, $\nu=0,3$ e $\rho_a=7850$ Kg/m³;

Concreto: $E_c=2.5 \times 10^{10}$ Pa, $\nu_c=0,2$ e $\rho_c=2500$ Kg/m³

6.2 Características do vento

Velocidade media de referencia do vento, $V_{ref}=9,0$ [m/s]; $Z_{ref}=3.0$ [m] (altura de referencia acima do MSL); $T_I=0,15$ [-] (intensidade da turbulência); $z_0=0,0002$ [m] (rugosidade da superfície do mar); $\rho_{hoA}=1,250$ [kg/m³] (densidade de massa do ar); $C_{Daero}=0,7$ [-] (coef. de arrasto para os pilares); $C_{Daerob}=0,8$ [-] (coef. de arrasto para as vigas);

6.3 Características do mar

Nível médio do mar (MSL), $d = 15,0$ [m]; $U_{c0} = 0,2$ [m/s] (velocidade da corrente de água na superfície); $\rho_{hoW}=1025,0$ [kg/m³] (densidade de massa da água); $C_M=2,0$ [-]; (coeficiente de inércia); $C_D=0,7$ [-] (coeficiente de arrasto); espectro de onda adotado: Pierson-Moskowitz.

6.4 Dados da turbina:

Altura acima do MSL $Z_{hub}=21,0$ [m]; $R=18.0$ [m] (raio das pás); $N_b=3$ (Numero de pás); $m_{turb}=50000,0$ [kg] (Massa da turbina); $X_{CoG}=0,5$ m (coordenada x do centro de massa da turbina); $V_{ci}=3.5$ [m/s] (velocidade inicial de funcionamento); $V_r=13$ [m/s] (velocidade nominal); $V_{co}=30$ [m/s] (velocidade de corte); $P_r=300000,0$ [W] (potência Nominal); $\omega_{rn}=0,50$ [rad/s] (velocidade angular nominal); $\theta_{a_n}=-2,4^\circ$; (angulo nominal da lâmina);

6.5 Parametros da simulação

Incremento de tempo $dt=0,010$ [s]; $t_{sim}=10,0$ [s] (tempo de simulação); $damp1=0,001$ [-] (taxa de amortecimento para a 1a. frequência); $damp2=0,0005$ [-] (taxa de amortecimento para a 2a. frequência);

Com estes parâmetros realizou-se 1000 iterações analisando-se o problema até um tempo total de 10 s, tempo este que se mostrou suficiente para amortecer as cargas permanentes, permanecendo a estrutura vibrando devido às cargas dinâmicas.

7 RESULTADOS

Com o objetivo apenas de aferir as respostas, analisou-se a torre submetidos a uma carga horizontal de 1000 kN aplicada isoladamente no topo da torre, mantida a carga de protensão nos tirantes. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos após o amortecimento das cargas, sendo δ_{ht} é o deslocamento horizontal no topo, em metros; RVe, RHe, RVd, e RHd são as reações verticais e horizontais no apoio esquerdo e direito, em Newtons.

Tabela 2. Resultados para carga horizontal aplicada no topo

	RECAL-T	SAP2000
δ_{ht} [m]	0,074	0,075
RHe [N]	$-8,32 \times 10^5$	$-8,30 \times 10^5$
RHd [N]	$-1,68 \times 10^5$	$-1,70 \times 10^5$
RVe [N]	$-2,83 \times 10^6$	$-2,83 \times 10^6$
RVd [N]	$2,83 \times 10^6$	$2,83 \times 10^6$

Como se pode observar, houve uma boa concordância de valores.

A seguir analisou-se a torre submetida apenas a cargas permanentes de peso próprio, peso da turbina incluindo as pás e protensão. Após o amortecimento das cargas, os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 3:

Tabela 3. Resultados para cargas permanentes

	RECAL-T	SAP2000
δ_{ht} [m]	$2,37 \times 10^{-4}$	$2,11 \times 10^{-4}$
RHe [N]	$-2,29 \times 10^5$	$-2,26 \times 10^5$
RHd [N]	$2,29 \times 10^5$	$2,26 \times 10^5$
RVe [N]	$1,039 \times 10^6$	$1,041 \times 10^6$
RVd [N]	$1,059 \times 10^6$	$1,061 \times 10^6$

Como se observa, houve uma boa concordância de valores.

A seguir analisou-se a torre submetida as cargas permanentes, carga de vento e cargas marítimas. Inicialmente o programa calcula os efeitos do vento na turbina, para a velocidade variando entre V_{ci} (velocidade inicial de funcionamento) até V_{co} (velocidade de corte). Estes valores são armazenados em um vetor para uso durante a análise no tempo. A Fig. 4 mostra os valores calculados pelo programa para: rotação das pás [RPM], potência gerada [Watts], ângulo de ataque das pás [graus] e força horizontal no eixo da turbina (D_{ax} [N]), em função da velocidade do vento.

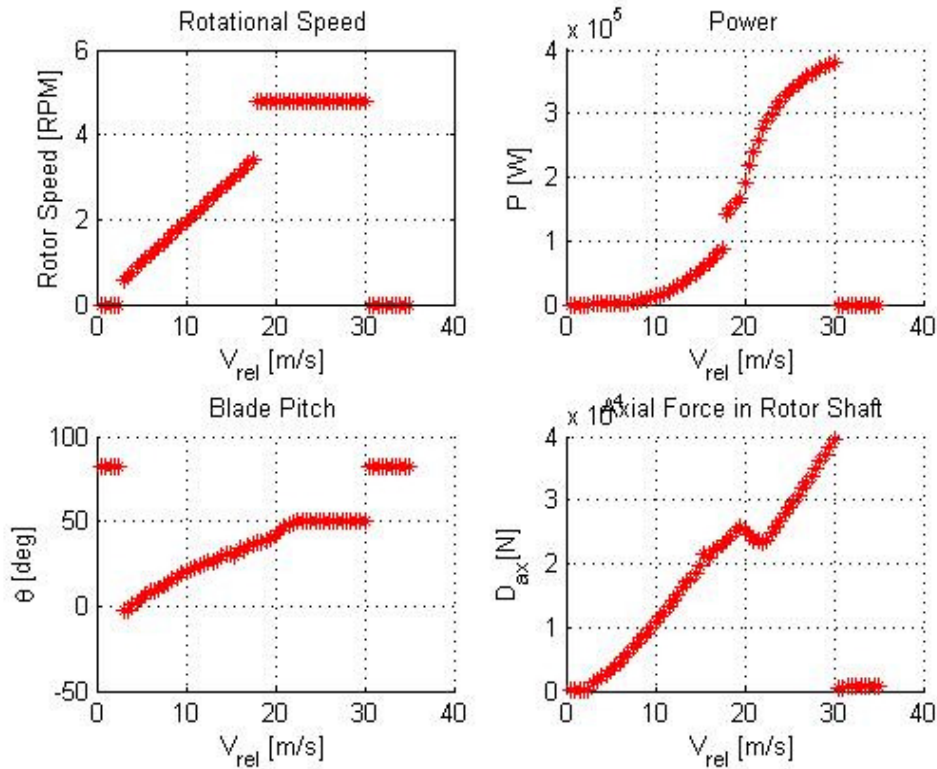


Figura 4. Efeitos da velocidade do vento na turbina.

A Fig. 5 mostra a variação da velocidade do vento gerado ao longo do tempo de acordo com o espectro de von Karman e a resultante de força horizontal na turbina, calculada pelo programa.

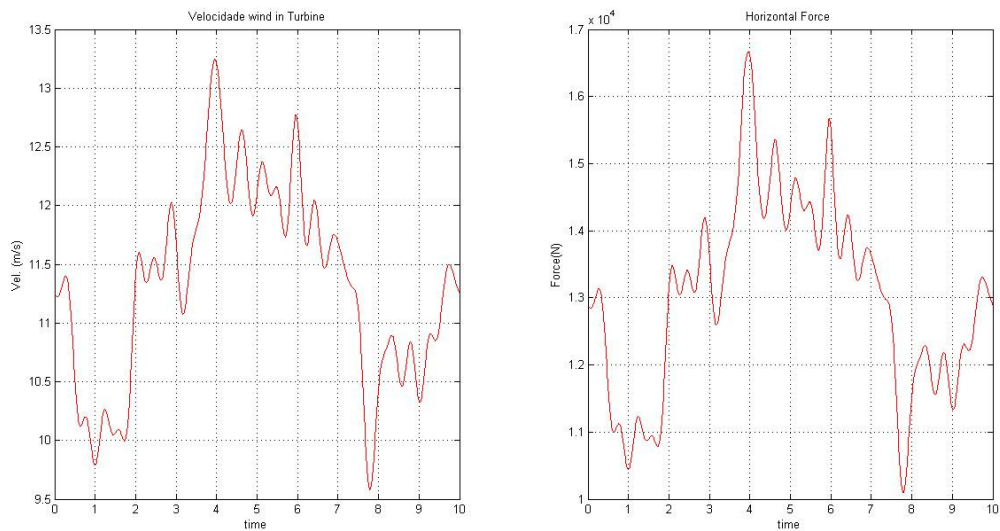


Figura 5. Velocidade do vento e força na turbina.

A Fig. 6 mostra o perfil do vento ao longo da altura da torre a partir do MSL, de acordo com o espectro de Von Karman. A linha azul representa à velocidade média do vento e em vermelho a variação do vento.

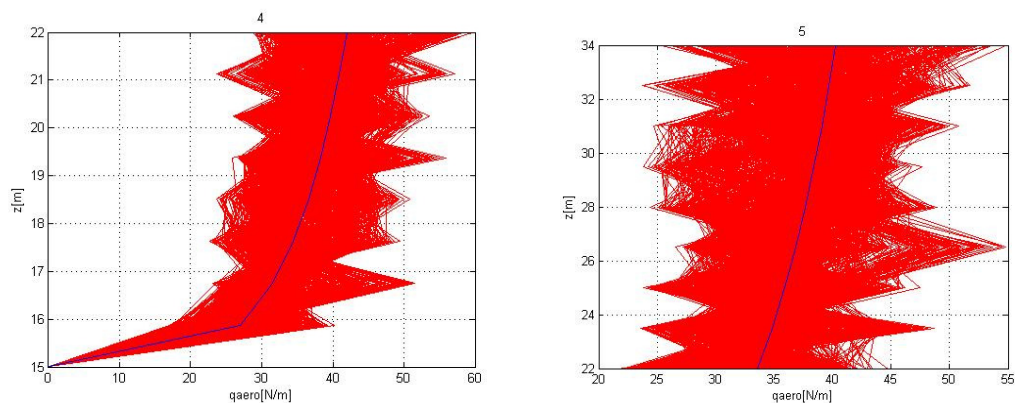


Figura 6. Espectro do vento ao longo da altura.

A Fig. 7 mostra a variação do vento ao longo do tempo no topo da torre, na altura de 34 metros.

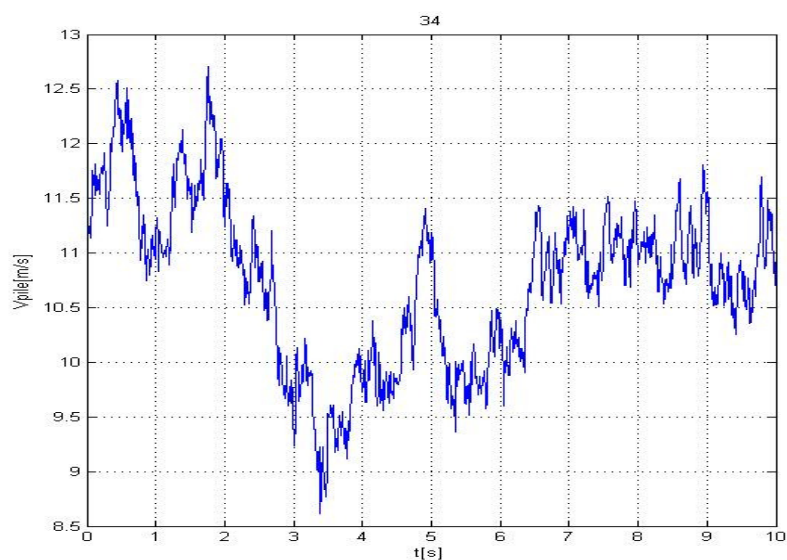


Figura 7. Espectro do vento ao longo do tempo no topo da torre.

A Fig. 8 mostra o perfil da velocidade média da corrente marítima na parte submersa da torre.

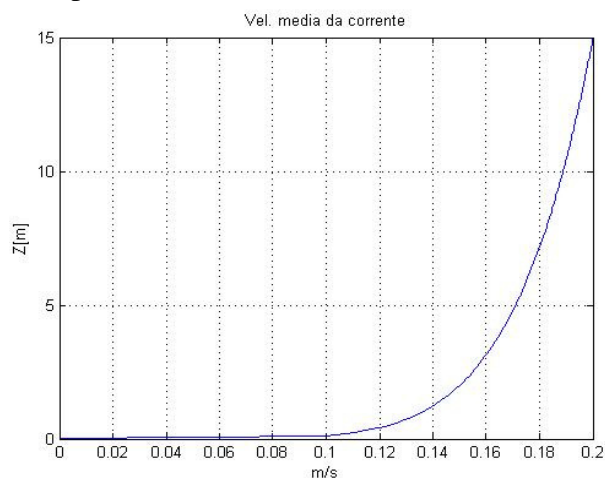


Figura 8. Perfil da velocidade media da corrente marítima.

A Fig. 9 mostra o perfil da onda marítima ao longo do tempo.

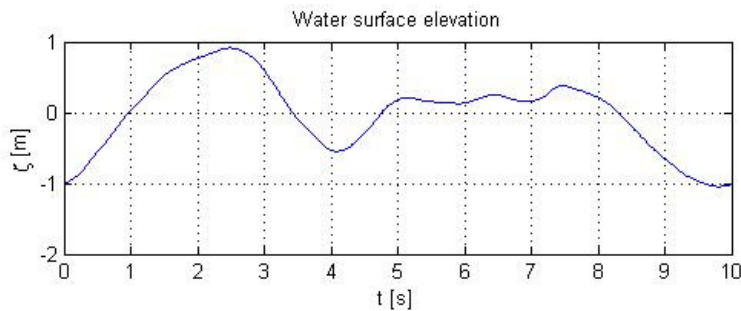


Figura 9. Perfil da onda ao longo do tempo.

A Tabela 4 mostra as frequências naturais obtidas pelo RECAL-T e pelo SAP2000 utilizando um modelo 3-D. Devido à simetria do modelo 3-D as frequências repetidas foram omitidas. Os números entre parênteses indicam a sequência obtida no modelo 2-D.

Tabela 4. Frequências naturais.

Frequencia Natural (Hz)	RECAL-T 2-D	SAP2000 3-D	Modo de vibração
1	2,169 (1)	2,106	flexão
2		2,270	torção
3	4,326(2)	3,987	flexão
4		4,404	torção
5		6,275	flexão fora do plano
6		6,550	torção
7	7,398(3)	9,948	flexão
8	63,977(18)	63,977	flexo tração

Na Fig. 10 estão ilustrados os primeiros modos de vibração. Pelos valores das frequências, de acordo com Gerven (2011) esta torre pode ser considerada entre rígida para muito-rígida. O modelo não contempla modos de torção, mas a análise tri-dimensional mostrou que as frequências de torção são maiores que as frequências de flexão. E, pelos tipos de carregamentos, acredita-se que o efeito de torção não será preponderante, entretanto ainda necessitam de maiores investigações para uma conclusão mais precisa. Não foi considerado o efeito de rotação das pás e da vibração da nacelle, entretanto a velocidade angular da pá para a potência máxima é de 5 RPM, conforme Fig. 4. Isto gera uma frequência de $f_p=0,512$ Hz, como são três pás resulta em $3f_p=1,535$ Hz, que é menor do que a 1ª frequência natural da

torre, e suas frequências estão fora da faixa de frequências das laminas, o que não deve oferecer risco de ressonância.

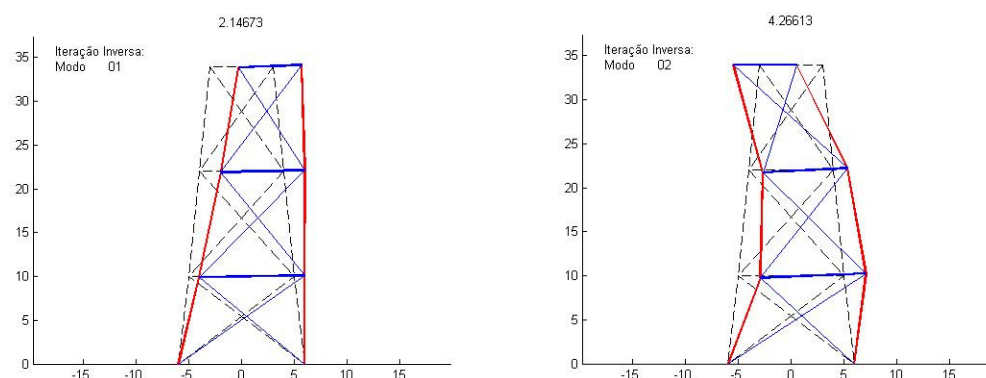


Figura 10. Modos de vibração para a 1a. e a 2a. frequência natural.

A Fig. 11 mostra o deslocamento horizontal e vertical, velocidade e aceleração no topo da torre ao longo do tempo. Em vermelho o nó à esquerda e em azul o nó à direita.

Percebe-se que os deslocamentos horizontais são relativamente pequenos em relação à altura da torre e os deslocamentos verticais são praticamente constantes.

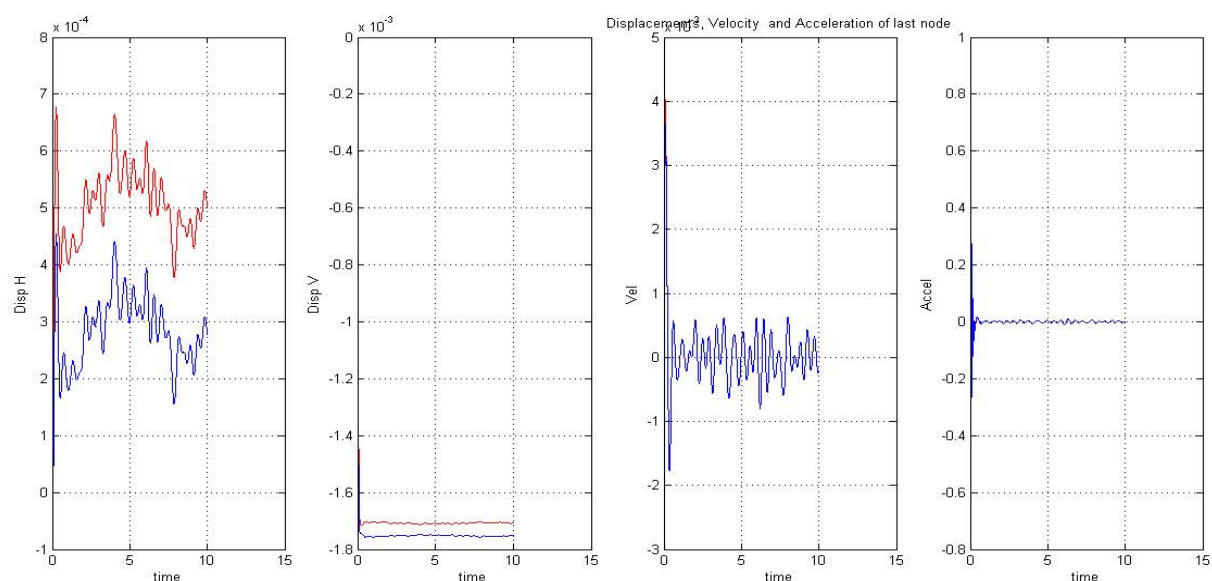


Figura 11. Deslocamentos, velocidade e aceleração no topo da torre [unidades: m,s].

A Fig. 12 mostra as reações. Em vermelho o apoio à esquerda e em azul o apoio à direita. Como se pode perceber grande parte das reações são causadas pelas cargas permanentes.

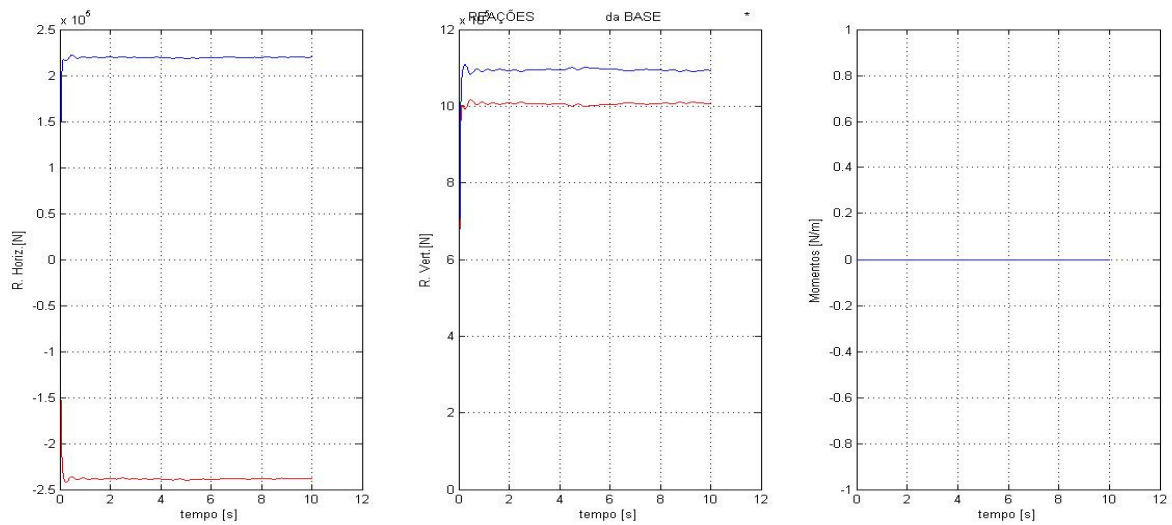


Figura 12. Reações na base da torre.

A seguir para apresentar a saída de resultados, são mostrados os esforços no sistema local para alguns elementos. Na Fig. 13 estão os esforços para o pilar esquerdo da base. Em vermelho os valores para extremidade inferior e em azul na extremidade superior.

Nota-se que o esforço normal é decisivo em relação aos outros esforços.

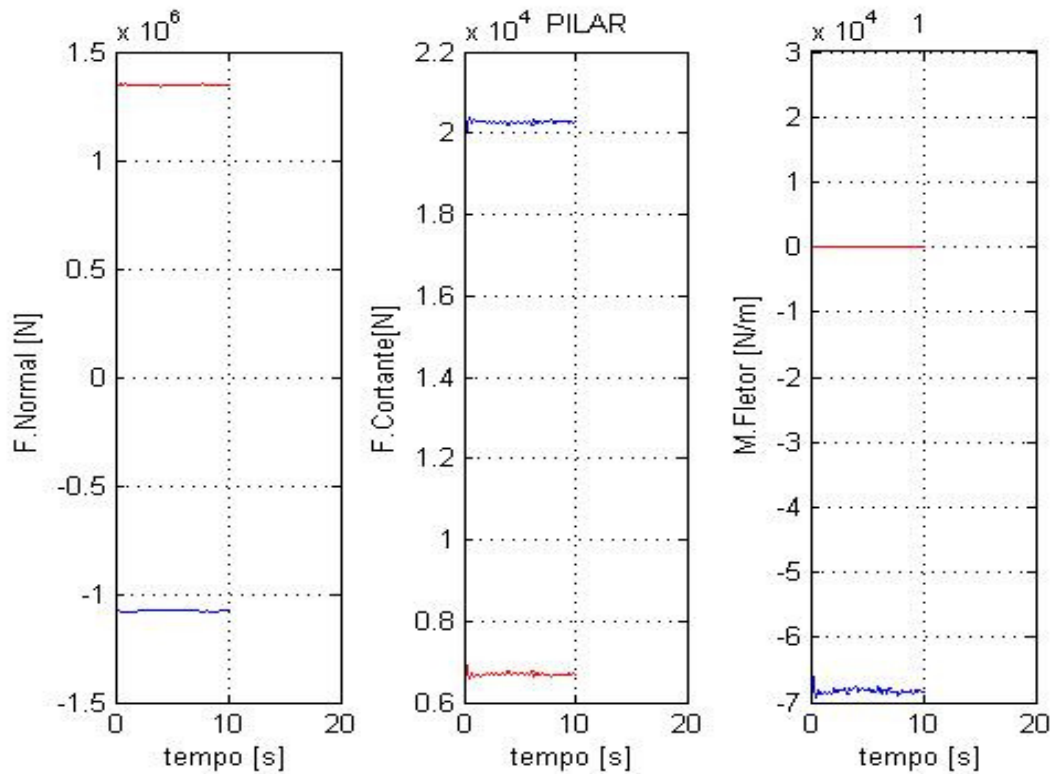


Figura 13. Esforços no pilar.

A Fig. 14 mostra os esforços no sistema local da viga do primeiro tramo. Em vermelho a extremidade esquerda e em azul na extremidade direita. Nas vigas predominou o momento fletor.

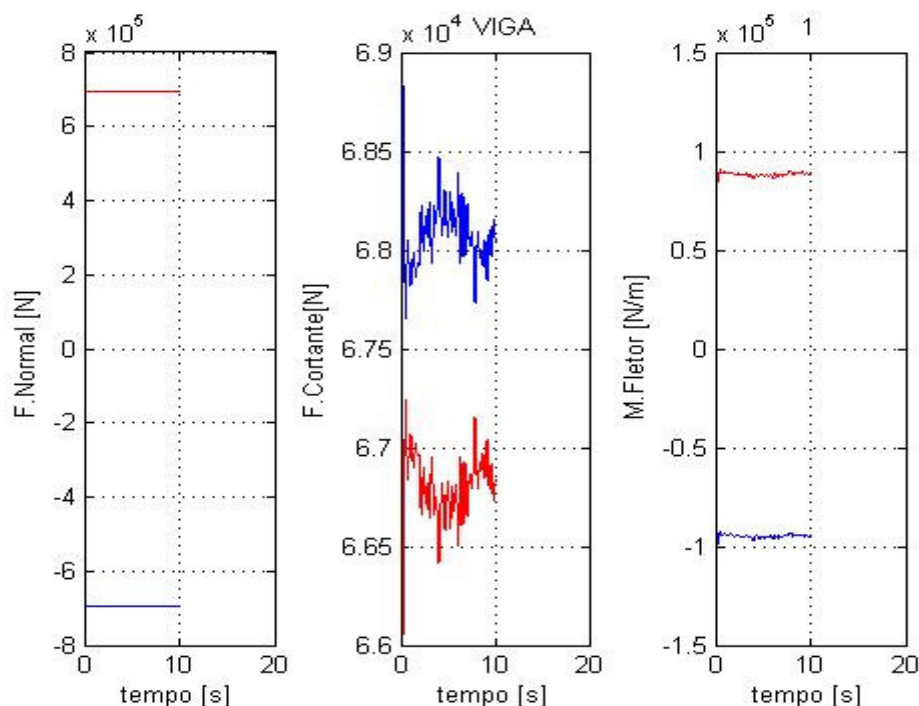


Figura 14. Esforços na viga.

A Fig. 15 mostra os esforços no sistema local do tirante esquerdo do primeiro tramo da base. Em vermelho a extremidade inferior e em azul na extremidade superior. Nos tirantes, o pré esforço aplicado (500 kN) foi suficiente para que não ocorresse compressão.

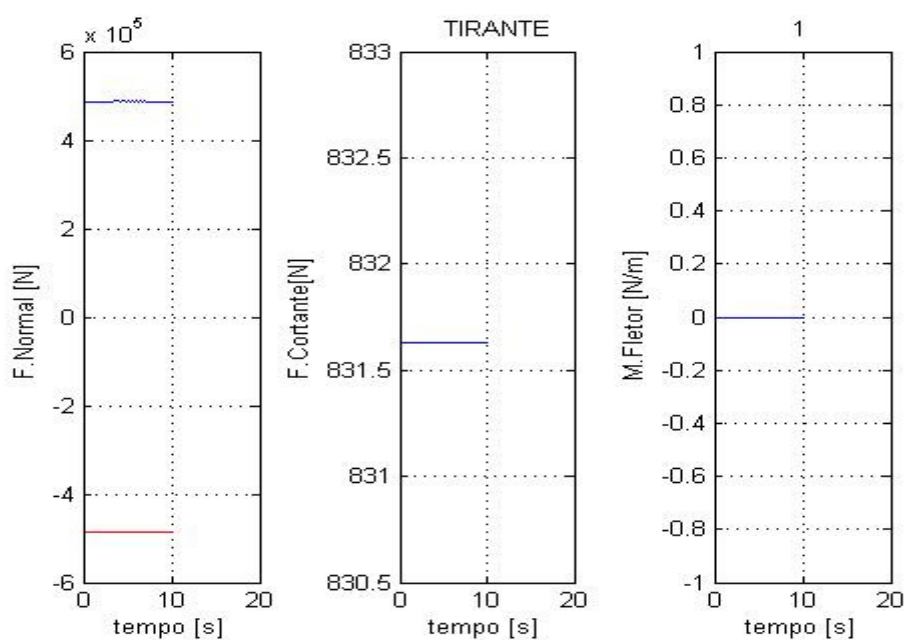


Figura 15. Esforços no tirante.

8 CONCLUSÕES

O código computacional desenvolvido propondo um modelo bidimensional possibilitou uma análise dinâmica no domínio do tempo do comportamento de torres treliçadas para suporte de turbinas eólicas offshore, sem necessidades de grande quantidade de dados. Apresentou boas aproximações para as frequências naturais, avaliou cargas permanentes de peso próprio e protensão. Também avaliou as cargas aerodinâmicas e hidrodinâmicas e permitiu variar o nível médio do mar (d) com a mudança de apenas um parâmetro. Como resposta calcula os modos de vibração, deslocamentos, reações e esforços nas barras ao longo do tempo.

Acreditamos que o software desenvolvido será de grande valia na análise do comportamento estrutural dinâmico de torres treliçadas, servindo de ferramenta para elaboração de projetos, sem ter que recorrer de imediato a uma análise tridimensional.

O modelo não contempla modos de torção, mas a análise tri-dimensional mostrou que as frequências de torção são maiores que as frequências de flexão. A torre pelas próprias características estruturais se mostrou muito rígida. Também pelas características das cargas dinâmicas, acredita-se que este efeito não será preponderante, entretanto ainda precisa-se de mais investigações.

Este tipo de torre proposto ainda esta sendo estudado pelos autores. Ensaios experimentais das ligações e em modelos reduzidos, ainda estão sendo realizados na Universidade Nova de Lisboa.

O código desenvolvido permitiu a análise de forma simples, eficiente e confiável de torres treliçadas pré-moldadas de concreto armado, apresentou bons resultados para a avaliação de cargas, cálculo de frequências naturais, resposta de deslocamentos, esforços e reações e coerentes com aqueles obtidos por modelos tri-dimensionais. Isto nos estimula a continuar o desenvolvimento deste código computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, à Universidade Estadual de Londrina (UEL) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina (UTFPR), Universidade Nova de Lisboa (UNL), que apóiam o desenvolvimento deste projeto.

Os autores são gratos ao CNPq Conselho Nacionais de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de bolsa de estudos no exterior.

REFERENCIAS

- Amarante Dos Santos, F.P. and C. Cismaşiu, *Comparison Between Two SMA Constitutive Models for Seismic Applications*. Journal of Vibration and Control, 2010. **16**(6): p. 897-914.
- Bathe K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.
- Bazeos, N., et al., *Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower*. Engineering Structures, 2002. **24**(8): p. 1015-1025.
- Cerda D. J.S., "Dynamics Response Calculations of Offshore Wind Turbine Monopile Support Structures". Thesis Report, Delf University of Technology, Nieuwegein, february 2004.
- Chastre, C. and V. Lúcio, *Precast Towers for Wind Energy Generators - Design issues*, in *Precast Concrete Towers for Wind Energy Generators*, Váler Lúcio, et al., Editors. 2012, Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa: Caparica, Portugal.
- Cook R. D., D. S. e M. E. Plesha, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, Jonh Wiley & Sons, 1989.
- Dalhoff, P., K. Argyriadis, and M. Klose, *Integrated Load and Strength Analysis for Offshore Wind Turbines with Jacket Structures*, in *European Offshore Wind 2007*. 2007.
- Gere J. M. e Weaver W. Jr., *Análise de Estruturas Reticuladas*, Ed. Guanabara Dois, 1981.
- Gerven F. van, *Optimising the Desing of a Steel Substruture for Offshore Wind Turbine in Deeper Waters*, Delf University of Technology, Nieuwegein, 2011.
- Harte, R. and G.P.A.G. Van Zijl, *Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007. **95**(9-11): p. 1079-1096.
- Jornal de Londrina, "Novo Parque Eólico no Paraná pode gerar 170,2 megawatts", pg 7, 24-03-2014, Londrina, Paraná.
- Manwell J., McGowan J.e Rogers A., *Wind Energy Explained*, New York:2a. Edição, Wiley, 2009.
- Matlab "<http://www.mathworks.com/products/matlab> .
- Souza L. A. e Moura C. A., *Diferença Finita de Quarta Ordem para Integração Explícita no Domínio do Tempo de Problemas Elastodinâmicos*, XVIII CILAMCE, V.1, pp. 263-272, Brasília, DF, 1997.
- Souza, L. A. S., Chastre, C. R., Lucio, V. & Souza, S. T. M., 2015. *Comportamento Dinâmico de Torres Treliçadas em Concreto Armado para Turbinas Eólicas Offshore*. *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Portugal, CD-Rom.