



## 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 Federal 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, de acordo com o proposto por Souza. 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 a 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 permitiam produzir 500kW, com torres de 54m de altura, em 2005 atingiu-se turbinas com 5MW com torres de 114m de altura.

Como soluções usuais são utilizadas tubos metálicos ou estruturas em parede de concreto pré-fabricado. 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 apresentam 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, começaram a surgir 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 configura 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 (figura 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.



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

Este trabalho dedicou-se essencialmente à 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 representado por  $d$ . como ilustra a figura 2, abaixo:

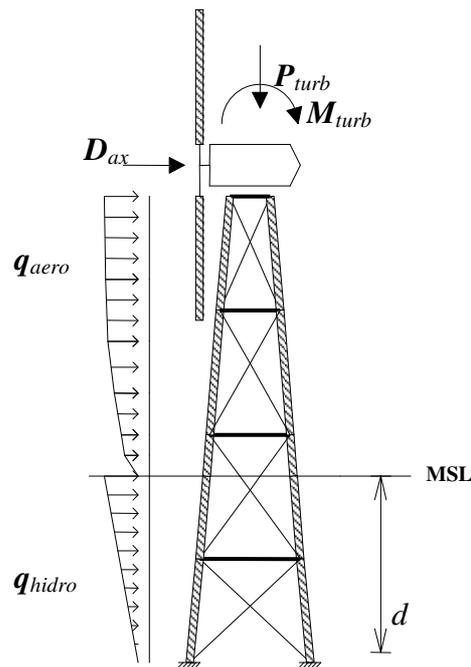


Figura 2. Modelo bidimensional e cargas atuantes.

As cargas atuantes na torre são: peso próprio, peso e momentos devido a 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  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de Rayleigh, dependentes taxa de amortecimento da 1<sup>a</sup>. e 2<sup>a</sup>. 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 formadas pelas parcelas aerodinâmicas ( $F_{aero}$ ) e hidrodinâmicas ( $F_{hidro}$ ).

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

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 das teorias do disco atuante e a 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  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar.

### 3.3. Ações de vento na torre

A carga resultante 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 figura 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  $C_D = 0,7$ .

## 4 INTEGRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

A integração no domínio do tempo segue esquema estabelecido por Newmark, considerando a média da aceleração em cada intervalo de tempo  $\Delta t$ . Este esquema é incondicionalmente estável e apresenta boa precisão para pequenos incrementos de  $\Delta t$  (Bathe,1996). Os deslocamentos são descritos por:

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

Introduzindo a relação (9) em (1), tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\hat{K} \cdot U^{t+\Delta t} = \hat{F} \quad (10)$$

com,

$$\hat{K} = \frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + K \quad (11)$$

e,

$$\hat{F} = F^{t+\Delta t} + M \left( \frac{4}{\Delta t^2} U^t - \frac{4}{\Delta t} \dot{U}^t + \ddot{U}^t \right) + C \left( \frac{2}{\Delta t} U^t - 3\dot{U}^t \right) \quad (12)$$

A solução do sistema de equações (10), resulta nos valores dos deslocamentos.

Apesar deste esquema de integração ser sempre estável, para uma boa precisão de resultados, recomenda-se:

$$\Delta t \leq \frac{10}{2\pi \cdot f_{\max}} \quad (13)$$

Onde  $f_{\max}$  é a máxima frequência natural da estrutura (Souza,1997).

## 5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Como estratégia de desenvolvimento do código computacional, procurou-se elaborar um software fácil de usar, 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 Newmak.
- Avaliação das cargas aerodinâmicas no domínio do tempo.
- Avaliação das cargas hidrodinâmicas no domínio do tempo.
- Calculo 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 demonstrar a utilização do programa e aferir os resultados, analisou-se uma torre 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. 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. Admitiu-se o nível médio do mar em 15m. A figura 3 mostra a forma da torre e na tabela 1 encontra-se as dimensões. Para a modelagem tridimensional utilizou 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.

Os materiais possuem as seguintes propriedades:

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

**Concreto:**  $E_c=2.5 \times 10^{10}$  Pa,  $\nu_c=0,2$  e  $\rho_c=2500$  Kg/m<sup>3</sup>

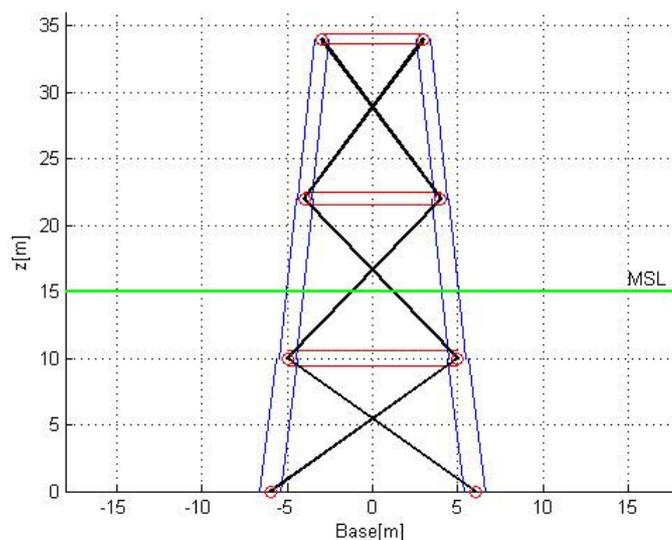


Figura 3. Geometria da torre três tramos.

A aceleração da gravidade  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>.

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
---	-----	-----	--	--	-----	-----

## 6.2 Características do vento

Velocidade média de referencia do vento,  $V_{ref}=9,0[m/s]$  ;  $z_{ref}=3.0 [m]$  (altura de referencia acima do MSL);  $TI=0,15 [-]$  (intensidade da turbulência);  $z_0=0,0002 [m]$  (rugosidade da superfície do mar);  $\rho_A=1,250 [kg/m^3]$  ( densidade de massa do ar);  $CD_{aero}=0,7 [-]$  (coef. de arrasto para os pilares);  $CD_{aerob}=0,8 [-]$  (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);  $\rho_W=1025,0 [kg/m^3]$  (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:

$z_{hub}=36,0 [m]$  (altura acima do MSL);  $R=18.0 [m]$  (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);  $\theta_{tan}=-2,4^\circ$ ; (angulo nominal da lâmina);

## 6.5 Parametros da simulação

$\Delta t=0,010 [s]$ ;  $t_{sim}=10,0 [s]$  (tempo de simulação);  $damp_1=0,001 [-]$  (taxa de amortecimento para a 1a. frequência);  $damp_2=0,0005 [-]$ (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 as cargas dinâmicas.

# 7 RESULTADOS

Inicialmente o programa calcula a força horizontal do vento na turbina, de acordo com as especificações, desde  $V_{ci}$  (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 figura 4 mostra propriedades da turbina em função da velocidade do vento, gerados pelo programa.

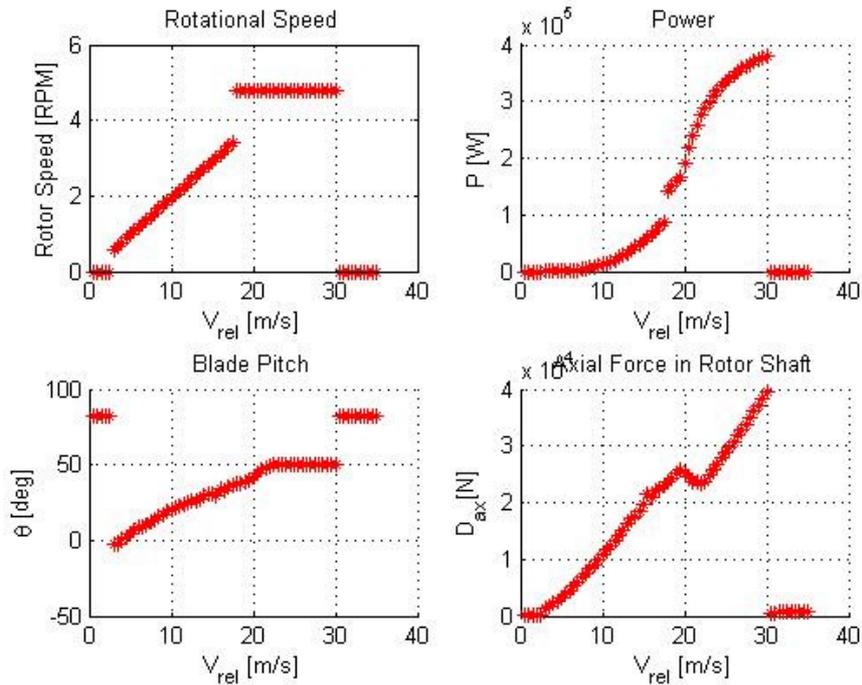


Figura 4. Resultados da análise da turbina em função da velocidade.

A figura 5 mostra a velocidade do vento e a força horizontal na turbina, devido ao vento ao longo do tempo gerado pelo espectro de von Karman, calculada pelo programa.

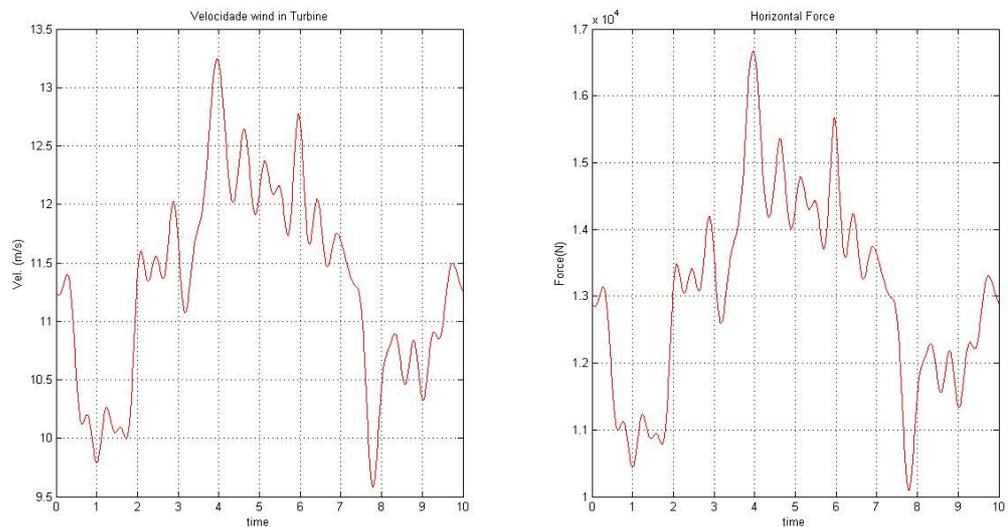
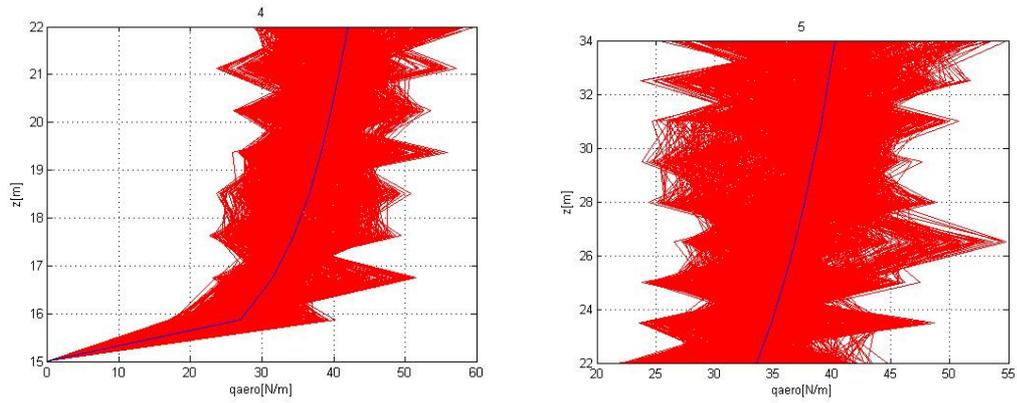


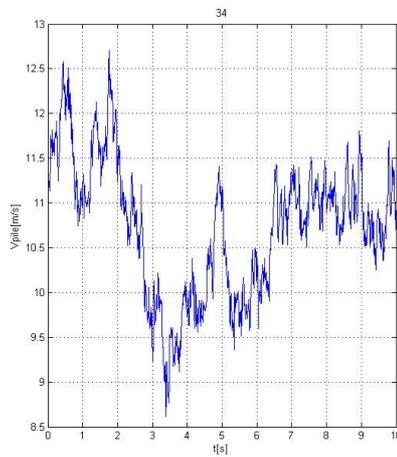
Figura 5. Velocidade do vento e força na turbina.

A figura 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 a velocidade média do vento.



**Figura 6. Espectro do vento ao longo da altura.**

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



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

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

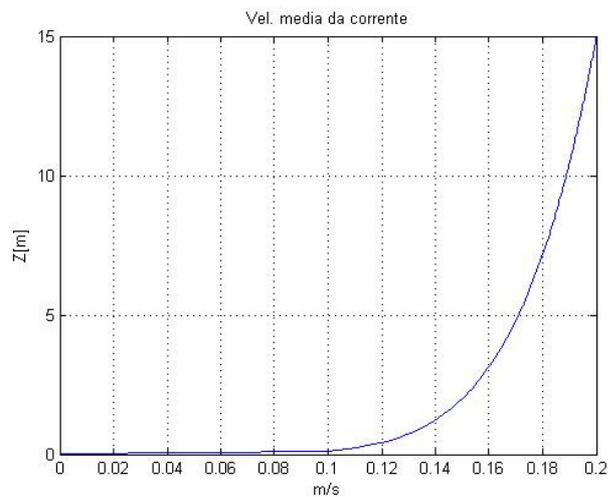


Figura 8. Perfil da velocidade média da corrente marítima.

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

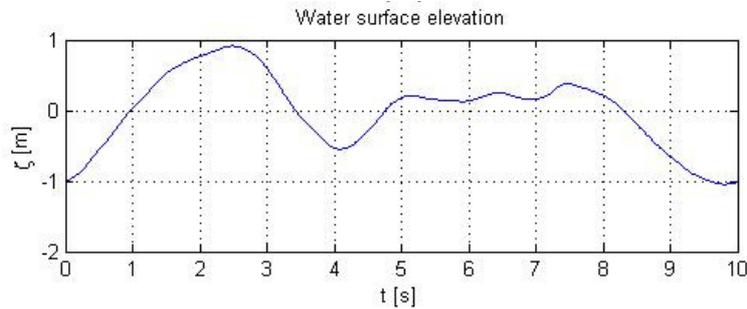


Figura 9. Perfil da onda ao longo do tempo.

A tabela 2 mostram as frequências naturais obtidas pelo RECAL e pelo SAP2000 utilizando um modelo 3D.

Tabela 2. Frequências naturais.

	$f_1$ [hz]	$f_2$ [hz]	$f_u$ [hz]
RECAL-T	2,169	4,326	80,289
SAP2000	2,106	4,404	63,77

De acordo com Gerven (2011) esta torre pode ser considerada entre rígida para muito-rígida, e suas frequências estão próximas das frequências das laminas, o que pode gerar danos.

Na figura 10 estão ilustrados os dois primeiros modos de vibração.

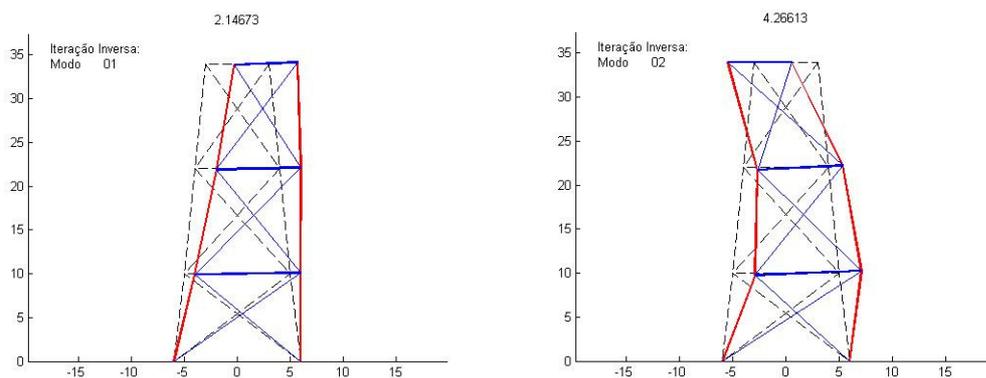


Figura 10. Modos de vibração para a 1a. e a 2a. frequência natural.

A figura 11 mostra os deslocamentos 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 a altura da torre.

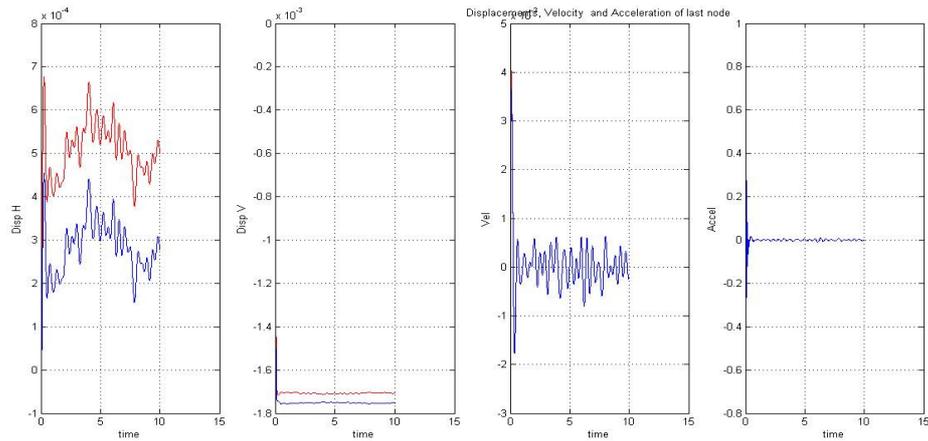


Figura 11. Deslocamentos, velocidade e aceleração no topo da torre [unidades: m,s].

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

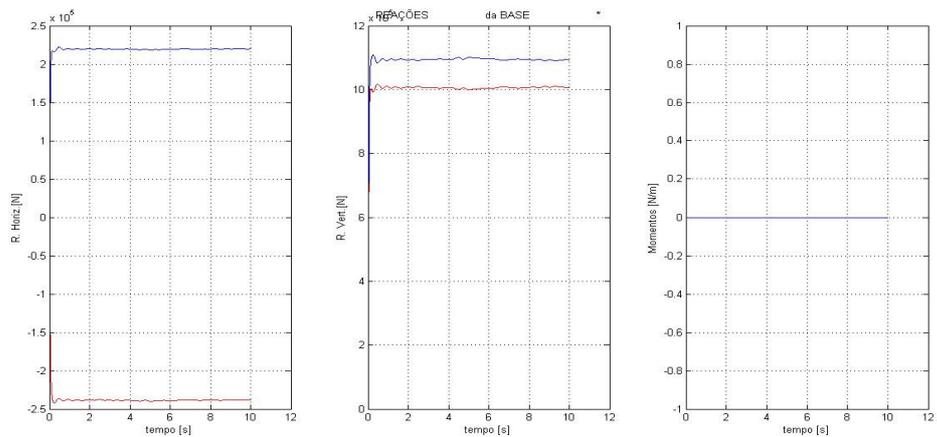


Figura 12. Reações na base da torre.

A figura 13 mostra os esforços no sistema local do pilar esquerdo da base. Em vermelho a extremidade inferior e em azul na extremidade superior. O esforço normal é decisivo em relação aos outros esforços.

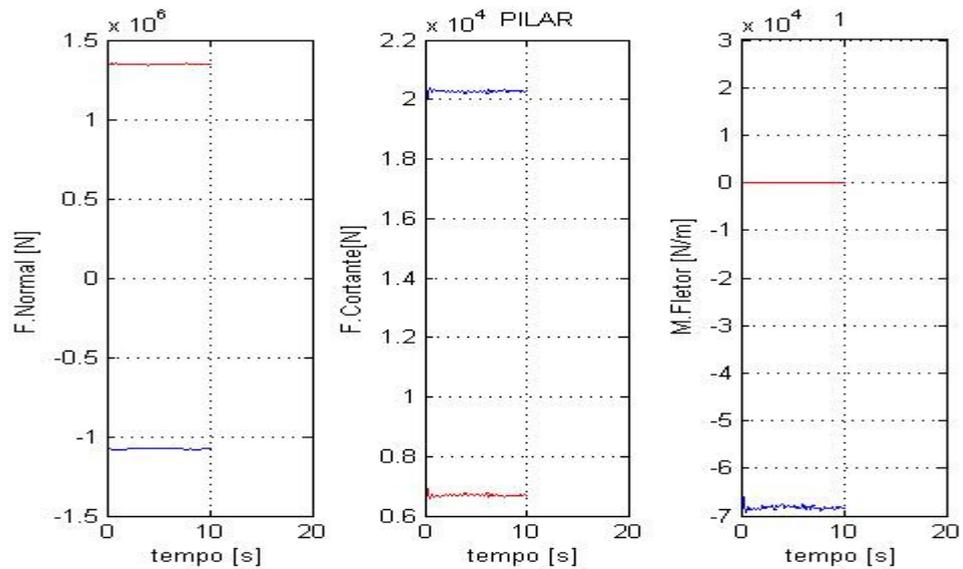


Figura 13. Esforços nos pilares.

A figura 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.

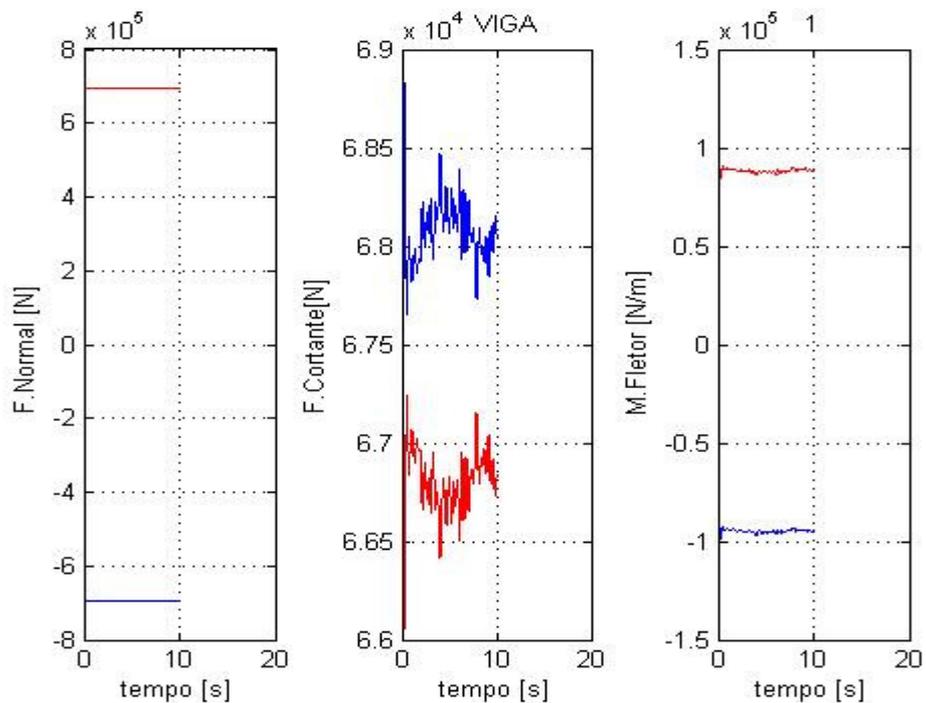


Figura 14. Esforços nas vigas.

A figura 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.

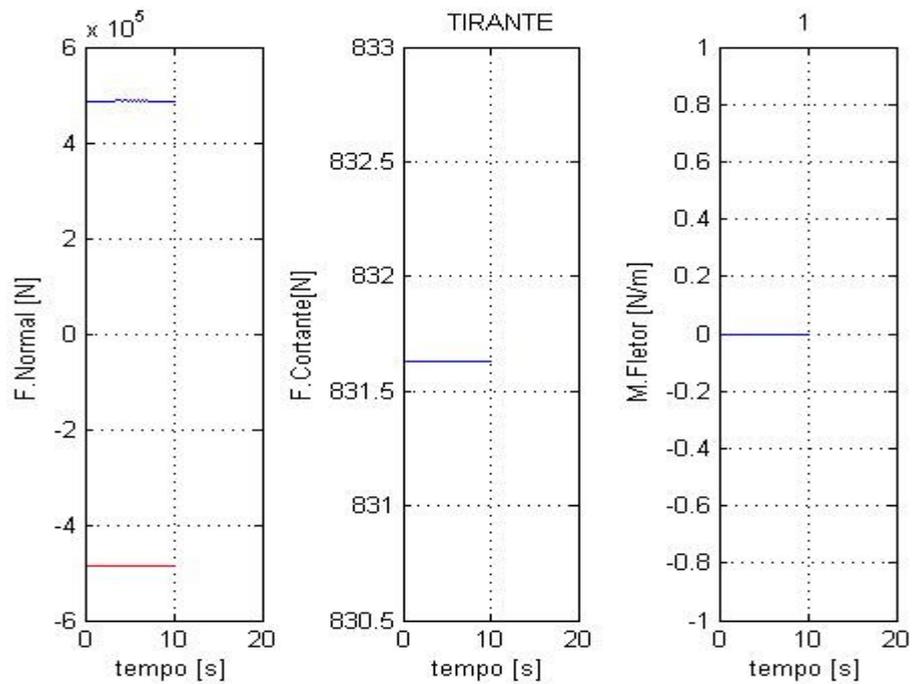


Figura 15. Esforços nos tirantes.

## 8 CONCLUSÕES

Com estas estratégias o modelo apresentou bons resultados para a avaliação de cargas, cálculo de frequências naturais, resposta de deslocamentos, esforços e reações.

Os resultados foram coerentes com aqueles obtidos usando modelos tri-dimensionais, o que nos estimula a continuar o desenvolvimento deste projeto.

O código desenvolvido permitiu a análise de forma simples, eficiente e confiável de torres treliçadas pré-moldadas de concreto armado.

## 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 Nacional 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*, Válder 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*, John 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 Design of a Steel Substructure 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.