

## **UMA FERRAMENTA PORTÁTIL PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES PARA TORRES DE AEROGERADORES EÓLICOS**

GLAUCO JOSÉ DE OLIVEIRA RODRIGUES<sup>1\*</sup>, VAGNER PESSOA E SILVA FILHO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. em Engenharia Civil, Prof. Adjunto, UERJ, Rio de Janeiro-RJ, glauco.rodrigues@oi.com.br

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro-RJ, vagnerpsf@gmail.com

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016  
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** Dentre as matrizes disponíveis para geração de energia elétrica, a eólica tem se mostrado aquela que traz menos transtornos ao meio ambiente. O Brasil possui bom potencial eólico, ainda subutilizado nos dias de hoje, devido principalmente a questões relacionadas à deficiência tecnológica. No intuito de contribuir com a área de projeto estrutural de fundações de torres para aerogeradores eólicos, foi desenvolvida técnica de pré-dimensionamento estrutural. Para tanto, foram identificadas, automatizadas e validadas, fórmulas analíticas para determinação de esforços internos em placas circulares de espessura variável, apoiadas em base elástica, presentes na Teoria das Placas e Cascas, quando submetidas a solicitações externas centradas (Forças e momentos aplicados às três direções cartesianas possíveis), bem como aplicadas fórmulas já consolidadas de dimensionamento de estruturas em concreto armado. Este procedimento tem por objetivos principais: (i) auxiliar e servir como ponto de partida (pré-dimensionamento) para o projeto estrutural de fundações para torres de aerogeradores eólicos e, (ii) subsidiar a composição do custo do kWh de empreendimentos relacionados à implantação de parques eólicos com o fornecimento dos quantitativos iniciais aproximados destes elementos estruturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Placas; fundações; aerogeradores; pré-dimensionamento, energia eólica.

### **A TOOL PORTABLE TOOL FOR PRE-SIZING OF FOUNDATIONS FOR WIND TURBINES.**

**ABSTRACT:** Among the sources available for power generation, wind power has shown that it brings less inconvenience to the environment. Brazil has good wind potential, yet underutilized these days, mainly due to technological issues related to disability. In order to contribute to the field of structural design of foundations of towers for wind turbines, structural preliminary design technique was developed. Therefore, so identified, automated and validated analytical formulas for the determination of internal forces in circular plates of variable thickness, supported by elastic base present in the Theory of Plates and Shells, when subjected to focused external requests (applied forces and moments at three Cartesian possible directions) and applied sizing formulas already consolidated structures in reinforced concrete. This procedure is primarily to: (i) assist and serve as a starting point (pre-sizing) for the structural design of foundations for wind turbines towers, and (ii) Subsiding the composition of the cost of deployment-related developments kWh wind farms with the supply of initial quantitative approximate these structural elements.

**KEYWORDS:** Plates; foundations; wind turbines; pre-sizing, wind energy.

## INTRODUÇÃO

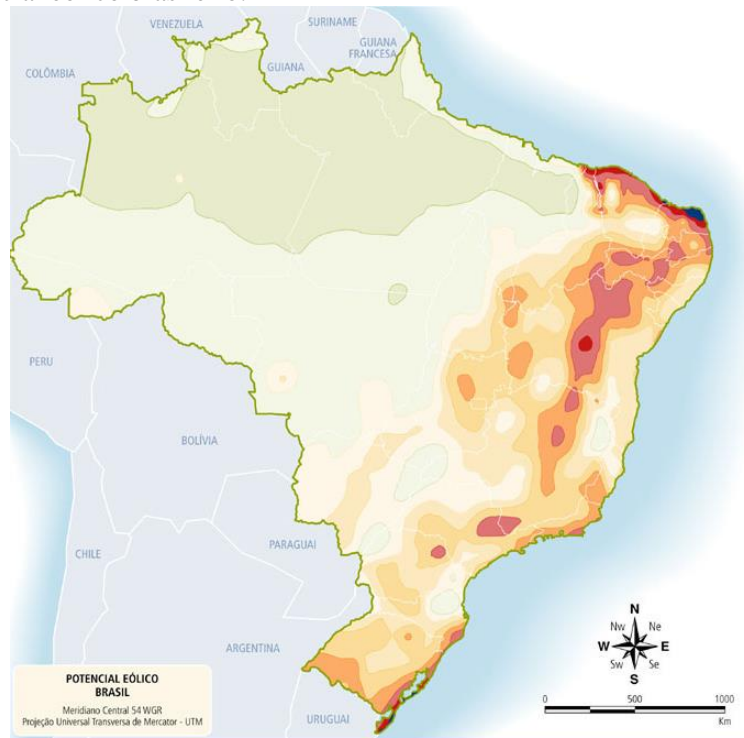
O Brasil tem enfrentado, nas últimas décadas, um grande paradoxo no que diz respeito à geração de energia, considerada um dos principais itens necessários ao desenvolvimento de uma nação.

Conforme se tem observado, a principal fonte da matriz energética de geração de energia no Brasil, a hidrelétrica, tem exposto suas deficiências. Para que sejam movimentadas as turbinas das usinas hidrelétricas, é necessário volume de água em seus reservatórios. Essa água é oriunda de seu ciclo natural, que por sua vez, depende da variável, quase sempre aleatória, das chuvas. Longos períodos de estiagem podem afetar consideravelmente o volume destes reservatórios, e, conseqüentemente, a capacidade geradora das usinas hidrelétricas.

As fontes termelétrica e nuclear, que representam uma parcela inferior na matriz geradora elétrica, são consideradas reserva estratégica do sistema interligado devido ao seu alto custo de operação face ao combustível utilizado (diesel e gás no caso das termelétricas, e urânio enriquecido no caso das nucleares), além dos riscos de danos ambientais em caso de ocorrência de acidentes operacionais.

Neste cenário, a energia eólica, dentre as matrizes energéticas ditas alternativas, surge como opção devido, principalmente, ao potencial eólico no território nacional notadamente nas Regiões Nordeste e Sul, conforme pode-se observar na Figura 1.

Figura 1. Potencial eólico brasileiro.



Classe de energia	Velocidade média do vento (m/s) 50 m acima do nível da superfície				
	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

**NOTAS:**  
 Mata indica áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas.  
 Campo aberto refere-se a áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas.  
 Zonas costeiras são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente no sentido mar-terra.  
 Morros são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo e de pouca vegetação ou pasto.  
 Montanhas representam áreas de relevo complexo com altas montanhas. O potencial eólico é dado para locais nos topos das montanhas em condições favoráveis para o fluxo de vento.

Partindo-se da análise da Tabela 1, pode-se observar ser quase injustificável um país com potencial de geração eólica tão alto como o Brasil, tendo em vista as suas dimensões continentais, possuir potência instalada inferior a países territorialmente muito menores, como o caso de Alemanha, Espanha, Reino Unido, Itália, França, Dinamarca, Portugal e Suécia.

Tabela 1. Potencial eólico instalado em alguns países (Final de 2013)

Lugar	País	Potência [MW]
01	China	91,412
02	Estados Unidos	61,091
03	Alemanha	34,250
04	Espanha	22,959 <sup>[41]</sup>
05	Índia	20,150
06	Reino Unido	10,531
07	Itália	8,552
08	França	8,254
09	Canadá	7,803
10	Dinamarca	4,772
11	Portugal	4,724
12	Suécia	4,470
13	Brasil	3,461
14	Polónia	3,390
15	Austrália	3,239
16	Turquia	2,959
17	Países Baixos	2,693
18	Japão	2,661
19	Romênia	2,600
20	Irlanda	2,037
21	México	1,917
22	Grécia	1,865
0	União Europeia	121,474
	Mundial	318,105

Por outro lado, o modelo atual de exploração comercial da geração de energia elétrica no Brasil, atendendo aos preceitos da Constituição da República para esta finalidade, baseia-se na criação de SPE's (Sociedades de Propósito Específico), criadas com a finalidade de participar nas chamadas públicas (leilões) como concorrentes: Aquela SPE que apresentar o menor custo de kWh é a vencedora do leilão e estará apta a investir na implantação de um parque eólico, e comercializar a energia gerada por este durante o tempo de concessão previsto.

Entretanto, algumas incertezas estão agregadas nos valores dos kWh apresentados pelas SPE's nos leilões de parques eólicos. Estas incertezas podem levar a superdimensionamento do valor do kWh, ocasionando a perda do leilão, ou ao subdimensionamento do mesmo, que pode levar a SPE vencedora a prejuízos financeiros ao longo do tempo de concessão.

Dentre os elementos que constituem uma torre eólica (mostrados na Figura 3), um dos itens que compõe o valor do kWh apresentado nos leilões é o custo da obra civil de implantação, e, dentro da obra civil, a estrutura das fundações das torres (item 1 da Figura 3 e Figura 4) é um dos de maior peso neste custo. No intuito de mitigar esta incerteza, o procedimento ideal seria o desenvolvimento e o detalhamento de um projeto estrutural completo destas fundações para levantamento de quantitativos. No entanto, por questões de alto custo e prazo exíguo, torna-se inviável a apresentação de um projeto estrutural detalhado na etapa pré-leilão, com as metodologias existentes para projeto de fundações para aerogeradores eólicos.

Figura 3. Componentes de uma turbina eólica

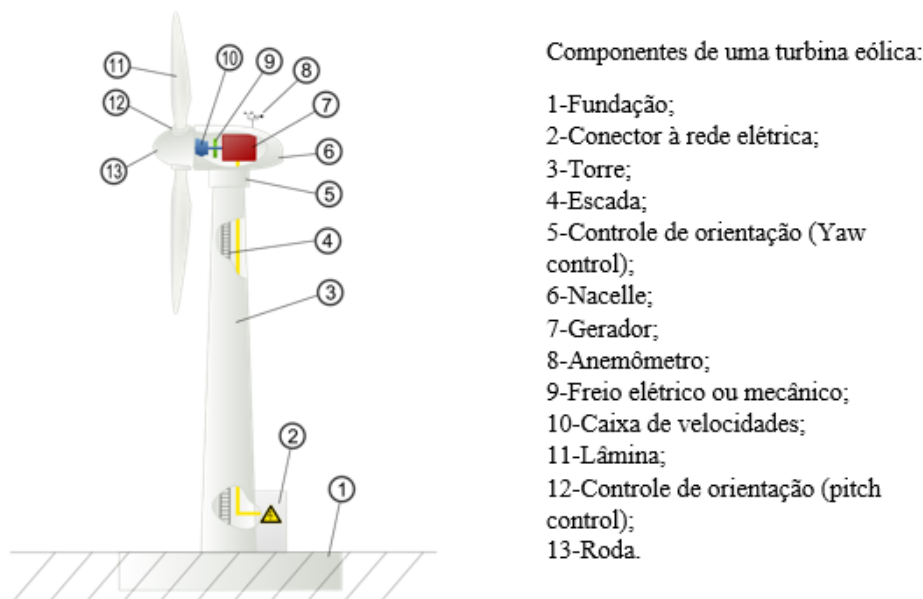
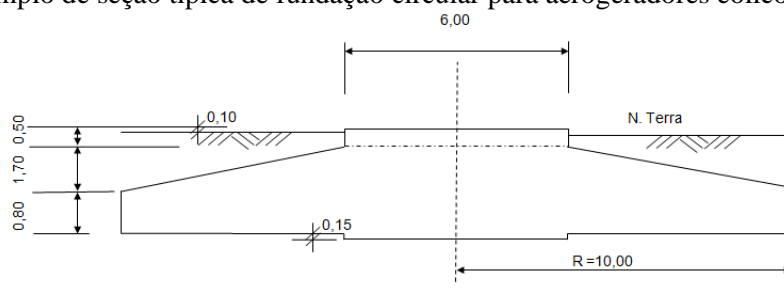


Figura 4. Exemplo de seção típica de fundação circular para aerogeradores eólicos



## OBJETIVOS

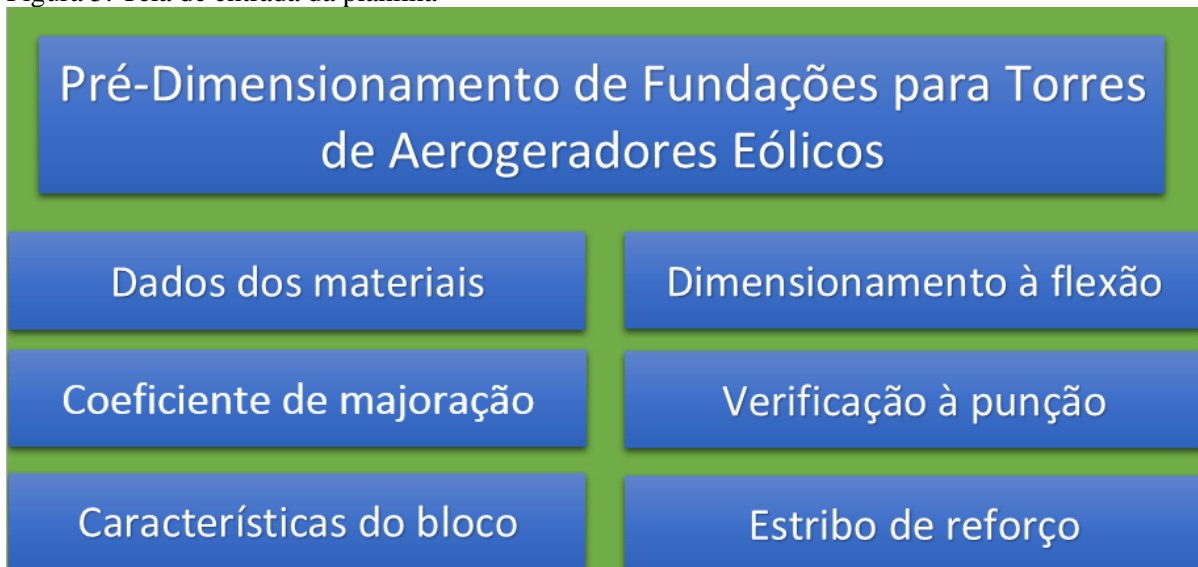
Este trabalho visa, portanto, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional portátil para pré-dimensionamento de fundações para torres de suporte à aerogeradores eólicos, baseada em formulações analíticas para obtenção dos esforços de dimensionamento, tanto no que diz respeito à na teoria das placas e cascas, quanto na teoria da elasticidade, bem como como nos preceitos básicos da NBR 6118 para dimensionamento de estruturas de concreto armado, e na NBR 6122, para dimensionamento de fundações. Esta ferramenta computacional portátil é alimentada com informações básicas, tais como: características mecânicas do conjunto torre / aerogerador, características do terreno de fundação, e propriedades dos materiais utilizados nos elementos em concreto armado (aço e concreto), visando fornecer estimativas dos quantitativos destes materiais nos elementos de modo a minimizar as incertezas no custo dos mesmos no valor do kWh a ser apresentado no leilão de energia. Este pré-dimensionamento estrutural em Concreto Armado, servirá como ponto de partida para uma posterior análise estrutural baseada no método dos elementos finitos para refinamento e dimensionamento estrutural definitivo.

## A PLANILHA DE CÁLCULO

Foi utilizada uma planilha de cálculo, a ser demonstrada nesse tópico, em busca da otimização do planejamento no pré-dimensionamento de fundações para torres de aerogeradores eólicos. Foi empregado um software para simulação teórica, uma vez que produz maior agilidade no processamento dos dados e confiabilidade nos cálculos descritos. Este item contém as etapas do dimensionamento estrutural do bloco, em concreto armado, com base na NBR-6118, os coeficientes parciais foram adotados segundo a norma, executando-se menções ao contrário. A análise estrutural do modelo numérico da base e da estaca foi realizada com o programa profissional de análise SAP2000.

Além das demais verificações e dimensionamentos realizados através de formulações para os problemas tratados, respeitando normas em vigor e literaturas técnicas. Começamos pela organização da tela inicial do programa composto por seis principais pastas:

Figura 5. Tela de entrada da planilha



Dados dos materiais: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Dados dos materiais. Nesta seção será informado dados dos materiais como por exemplo: Coeficiente de minoração da resistência do aço e Coeficiente de minoração da resistência do concreto.

Figura 7. Dados do dimensionamento estrutura do bloco

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DO BLOCO							
<b>DADOS DOS MATERIAIS</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
ys	(Coeficiente de minoração da resistência do aço)			1,15			
yc	(Coeficiente de minoração da resistência do concreto)			1,4			
<b>Requisitos Para a Garantia da Durabilidade</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
	Classe de Agressividade: III						
	Relação água/ cimento em massa:	$R_{ac} \leq$		0,55			
	Classe do concreto:	$C \geq$		30	Mpa		
	Limite de fissuração:	$W_{k\_lim}$		0,3	mm		
	Cobrimento nominal: $C_{nom}$			5	cm		
	Dím. máx. agregado graúdo:	$\phi_{agreg}$		1,2	$C_{nom}$		
		$\phi_{agreg}$		6	cm		
<b>Aço</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
fyk	(Aço CA50A)			500	MPa		
fyd		$0,1 \cdot f_{yk} / y_s$		43,48	kN/cm <sup>2</sup>		
Es				210000	Mpa		
<b>Concreto</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
yoonc				25	kN/m <sup>3</sup>		
fck	(Classe C30)			30	Mpa		
fod		$0,1 \cdot f_{ck} / y_c$		2,14	kN/cm <sup>2</sup>		
fctm		$0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3}$		2,90	Mpa		
fctk_inf		$0,7 \cdot f_{ctm}$		2,03	Mpa		
fctd_inf		$0,1 \cdot f_{ctk\_inf} / y_c$		0,14	kN/cm <sup>2</sup>		
Eci		$5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$		30672,46	MPa		
Ecs		$0,85 \cdot E_{ci}$		26071,59	MPa		
ce		$E_s / E_{cs}$		8,05			

Coefficiente de majoração: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Coeficiente de majoração. Nesta seção será informada dados de ações permanentes - ELU e ELS e Ações Variáveis – ELU e ELS.

Figura 8. Dados de Coeficiente de Majoração das Ações.

COEFICIENTE DE MAJORAÇÃO DAS AÇÕES							
<b>Ações Permanentes - ELU</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
yf_pd				1,4	(Desfavorável)		
yf_pf				1	(Favorável)		
<b>Ações Permanentes - ELS</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
yf_ps				1			
<b>Ações Variáveis - ELU</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
yf_v				1,4	(Desfavorável)		
<b>Ações Variáveis - ELS</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
yf_vs				1			

Características do bloco: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Características do bloco. Nesta seção será informada as características do bloco, volume, área da base, dimensão do pedestal. Exemplo: Número de lados do polígono = 8.

Figura 9. Dados da Características do bloco.

CARACTERÍSTICAS DO BLOCO							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
Bb	(Dimensão maior da base)			13,70	m		
Bpe	(Dimensão maior do pedestal)			5,0	m		
h1	(Altura menor da base)			1,30	m		
hi	(Altura do trecho inclinado da base)			0,40	m		
h2	(Altura maior da base)	$h1 + hi$		1,70	m		
hpe	(Altura do pedestal)			1,30	m		
H	(Altura total do bloco)	$h2 + hpe$		3,00	m		
n	(número de lados do polígono)			8			
<b>Dimensões dos Lados da Base (Polígono Regular)</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
rb	(Raio do polígono da base)	$Bb/2$		6,85	m		
lab	(Lado do polígono da base)	$2 * rb * \tan(\pi/n)$		5,67	m		
rpe	(Raio do polígono do pedestal)	$Bpe/2$		2,5	m		
lape	(Lado do polígono do pedestal)	$2 * rpe * \tan(\pi/n)$		2,07	m		
<b>Área no Plano Horizontal</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
Abase	(Área da seção da base)	$n * rb^2 * \tan(\pi/n)$		155,49	m <sup>2</sup>		
Ape	(Área da seção do pedestal)	$n * rpe^2 * \tan(\pi/n)$		20,71	m <sup>2</sup>		
<b>Volume do Bloco</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
Vpe		$Ape * hpe$		26,92	m <sup>3</sup>		
Vh1		$Abase * h1$		202,13	m <sup>3</sup>		
Vvar		$(1/6) * (Bb - Bpe) / 2 * (Bp * \tan(\pi/n) + 2 * Bpe * \tan(\pi/n)) * hi$		2,85	m <sup>3</sup>		
Vol	(Volume Total do Bloco)	$Vpe + Vh1 + n * Vvar + Ape * hi$		260,12	m <sup>3</sup>		
<b>Área de Forma</b>							
Variável	Descrição	Formula		Valor	Unidade	Modelo	Diferença
Aforma	Área de Forma	$n * lab * h1 + n * lape * hpe$		80,6	m <sup>2</sup>		

Dimensionamento à flexão: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Dimensionamento à flexão. Nesta seção será informado o cálculo da armadura principal de flexão. Exemplo: (Reação de Compressão na Estaca 1) =  $R_{kc1}$  = (Análise do SAP2000) = 1574,4 KN.

Figura 10. Dados do Dimensionamento à flexão.

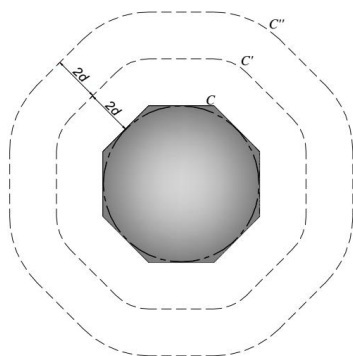
DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO							
$h(x) = x^2 - 2hi / (Bb - Bpe) + hi + Bb / (Bb - Bpe) + h1$							
Momento Fletor Faixa "1"							
Variável	Descrição	Formula	Valor	Unidade	Modelo	Diferença	
$R_{kc1}$	(Reação de Compressão na Estaca 1)	(Análise do SAP2000)	1574,40	kN			
$R_{kt1}$	(Reação de Tração Máxima Estaca 1)	(Análise do SAP2000)	290,1	kN			
$\Delta x1$	(Alavanca)		3,8	m			
$bw1$			194,7	cm			
$h_1$	(Altura da Seção)	$100 \cdot h / (0,5Bpe)$	170	cm			
$M_{dc1}$	(Momento Fletor na Faixa 1)	$100R_{kc1} \cdot \Delta x1 \cdot yf_v$	837580,80	kNm			
$M_{dt1}$	(Momento Fletor na Faixa 1)	$100R_{kt1} \cdot \Delta x1 \cdot yf_v$	154333,20	kNm			
Taxa de Armadura Mínima							
Variável	Descrição	Formula	Valor	Unidade	Modelo	Diferença	
$\rho_{a;w}$			0,035				
$\rho_i$		$w \cdot f_{od} / f_{yd} \cdot 100$	0,1725	%			
$\rho$		$\rho_i \cdot 0,15$	0,026	%			
$\rho_{min}$		$\max(\rho)$	0,172				
$\rho_{min}$			0,172	%			
$\phi$			25	mm			
$d'$	(Cobrimento Estrutural)	$C_{nom} + 2 \cdot \phi / 10$	10	cm			

Verificação à punção: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Verificação à punção. A Verificação à Punção será avaliada para três superfícies (C, C' e C'') representada na Figura.

Figura 11. Dados da Verificação à Punção

VERIFICAÇÃO À PUNÇÃO							
Perímetro, Solicitação e Seção Resistente de Cálculo							
Variável	Descrição	Formula	Valor	Unidade	Modelo	Diferença	
$d_{med}$		$100 \cdot (h1+h2) / 2 - d'$	140	cm			
$u$	(perímetro crítico em C)	$(8 \cdot l_{ape}) \cdot 100$	1656,85	cm			
$u'$	(perímetro crítico em C')	$u + 2 \cdot \tau \cdot (2d_{med})$	3416,15	cm			
$u''$	(perímetro crítico em C'')	$u + 2 \cdot (4d_{med})$	5175,44	cm			
$F_k$	(Máxima compressão (GE) + peso do pedestal)		3951	kN			
$M_k$	(Máxima momento resultante (GE))		56261,6	kNm			
$F_d$		$yf_v \cdot F_k$	5531,40	kN			
$M_d$		$100 \cdot yf_v \cdot M_k$	7876624	kNm			
$\alpha_v$		$1 - f_{ck} / 250$	0,88				
$\tau_{Rd2}$	(Para a superfície C)	$0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{od}$	0,509	kN/cm <sup>2</sup>			
$A_s$	(Área de aço na dimensão do pedestal)		500	cm <sup>2</sup>			
$bw$	(dimensão do pedestal)		500	cm			
$\rho_s$		$A_s / (d_{med} \cdot bw)$	0,0071	cm			
$\tau_{Rd1}$		$0,1 \cdot (0,13 \cdot (1 + (20/d_{med})^{1/2}) \cdot (100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck})^{1/3})$	0,050	kN/cm <sup>2</sup>			

Figura 12. Superfície Crítica.



Estribo de reforço: clique com botão esquerdo do mouse e será enviado para aba de Estribo de reforço. Nesta seção será informado o cálculo o cálculo do estribo junto aos chumbadores.  
Exemplo:  $Vd = \gamma_f \cdot V_k = 6703.20 \text{ KN}$ .

Figura 13. Dados de Estribo de reforço

ESTRIBO DE REFORÇO JUNTO AOS CHUMBADORES							
Variável	Descrição	Formula	Valor	Unidade	Modelo	Diferença	
bw			100	cm			
twu		$0.27 \cdot a_v \cdot f_{cd}$	0,509	kN/cm <sup>2</sup>			
d	(altura do bloco descontando o cobrimento)		270	cm			
Vk	(Cortante para 12 chumbadores que atuam em na faixa de 1 m.)		4788	kN			
Vd		$\gamma_f \cdot V_k$	6703,20	kN			
twd		$Vd / (bw \cdot d)$	0,248	kn/cm <sup>2</sup>			
twd/twu		(twd/twu < 1, Verificação Ok)	0,488				

## CONCLUSÕES

Foram aplicadas fórmulas analíticas capazes, baseadas e consolidadas, tanto na Teoria das Placas e Cascas quanto na Teoria da Elasticidade de determinar os esforços de corpo elástico, como por exemplo os momentos fletores radiais e circunferenciais em placas circulares, de espessura variável, apoiadas em base elástica;

Foram determinadas, utilizando-se a NBR 6118:2014, as áreas de aço necessárias para absorção das tensões trativas e cisalhantes oriundas dos esforços de dimensionamento estrutural em concreto armado, para que estas possam ser convertidas em bitola / espaçamento de barras de aço, e consequentemente detalhadas;

Foi determinado de maneira aproximada o consumo de quantitativo de materiais utilizados no pré-dimensionamento estrutural, para objetivando o custo das fundações de uma torre de aerogerador eólico, subsidiar a tomada de decisão na composição estimada do custo do kwh na implantação de um futuro potencial parque eólico.

## REFERÊNCIAS

- Weaver, Jr, William, Timoshenko, Stephen P. y Young, Donovan H. Vibration Problems in Engineering. Fifth. United Stated of America: John Wiley & Sons, 1990.
- Timoshenko, Stephen P. y Woinowsky-Krieger, S., Theory of Plates and Shells. Second. New York : McGraw-Hill, 1959.
- Timoshenko, S. y Goodier, J. N., Theory of Elasticity. New York : McGraw-Hill, 1934.
- Zienkiewicz, O. C. y Taylor, R. L., El Metodo de los Elementos Finitos. Cuarta. Madrid : McGraw-Hill, 1994. Vol. 1.
- Ventsel, Eduard y Krauthammer, Theodor, Thin Plates and Shells. New York : Marcel Dekker, 2001.
- Souza, V. C. M.; Cunha, A. J. P., Lajes em concreto Armado e Protendido, EDUFF, Niterói, 1998;
- ABNT NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, ABNT, Rio de Janeiro, 2014;
- Fusco, P. B., Estruturas de Concreto – Solicitações Normais, LTC, Rio de Janeiro, 1981;
- Alonzo, U. R., Exercícios de Fundações, Edgar Blücher, São Paulo, 2001;
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_Eólica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_Eólica), acessado em 06/06/2016.
- Microsoft Excel, v. 2010.