



ANÁLISE ESTÁTICA DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE FUNDAÇÕES RASAS DE AEROGERADORES

Robson Ribeiro

José Neres da Silva Filho

robsonribeiro620@gmail.com

jneres@ect.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil.

Avenida Senador Salgado Filho 3000 - Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Resumo. *O presente trabalho tem como objetivo comparar fundações superficiais de aerogeradores com geometria circular, quadrada e octogonal. Esse estudo comparativo foi parametrizado pelo volume concreto total de cada fundação, de forma a se sua eficiência em função somente da forma da fundação. Foram feitas análises utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) através do software SAP 2000. As fundações foram modeladas utilizando elementos de placa fina. O trabalho consiste em quatro estudos sendo eles: (a) comparação entre momentos fletores; (b) análise da variação do momento fletor com a mudança de módulo de reação vertical do solo; (c) comparação da rigidez rotacional e (d) a análise da variação da rigidez rotacional com a variação do módulo de reação vertical. Essas análises revelaram um melhor desempenho da fundação com geometria quadrada, apresentado os menores momentos fletores máximos e as maiores rigidezes rotacionais para toda a faixa de módulo de reação vertical considerada.*

Palavras-chave: *Aerogeradores, Fundações Rasas, Elementos finitos, Interação solo-estrutura.*

INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das fontes de energia limpa e renovável que vem ganhando mais destaque é a energia eólica. A busca pelo aumento da capacidade da geração desse tipo energia levou a um aumento do diâmetro dos rotores dos geradores eólicos, o que, necessariamente, demanda um aumento das estruturas de suporte desses geradores. Para não onerar demasiadamente os custos de instalação de parques eólicos, torres de suporte cada vez mais esbeltas vêm sendo construídas, requerendo fundações cada vez mais eficientes na transmissão das cargas para o solo, mantendo o equilíbrio do conjunto.

As fundações desse tipo de estrutura são submetidas a cargas altamente excêntricas e de grande magnitude, sendo importante analisar bem o sistema de transmissão de cargas entre a fundação e o solo, bem como o desenvolvimento dos esforços internos na estrutura da fundação. Tendo isso em vista, uma análise comparativa entre diferentes soluções de fundações superficiais de aerogeradores deve contemplar uma análise estática do sistema, adotando maneiras coerentes de se modelar a transmissão de esforços, além de comparar quantitativamente e qualitativamente os esforços internos encontrados.

Adicionalmente aos esforços internos, tem-se que um parâmetro extremamente importante que possui, inclusive, grande impacto no comportamento dinâmico do sistema, é a rigidez rotacional da fundação. Essa rigidez é função não apenas da deformabilidade do solo, mas também da rigidez da fundação. Diante disso, foram incluídos casos de estudo visando a comparação da rigidez rotacional para cada geometria de fundação e verificando o impacto da deformabilidade do solo (traduzida pelo módulo de reação vertical).

1 MODELOS DE ANÁLISE ESTÁTICA

No trabalho foram analisadas três geometrias de fundações superficiais de aerogereadores, sendo elas: circular, quadrada e octogonal. Todos os modelos foram feitos com o *software* SAP 2000 via Método dos Elementos Finitos (MEF). A seguir serão apresentadas considerações feitas relativas aos modelos de análise.

1.1 Propriedades geométricas dos modelos

As dimensões das fundações foram escolhidas considerando dois aspectos: o volume total de concreto e a rigidez das fundações.

Primeiramente, a escolha de manter um volume total de concreto parecido foi tomada pensando em se ter um parâmetro comparativo de eficiência das bases, elencando, de forma simplificada, seu volume total de concreto ao custo da fundação.

Por fim, a rigidez da fundação, que foi considerando de forma a se ter fundações flexíveis, isso por que esse tipo de fundação é melhor representado pelos elementos de placa fina utilizados na discretização dos modelos de elementos finitos das fundações. Para garantir essa flexibilidade foram consideradas expressões dimensionais presentes na NBR 6118 (2014) para obtenção de sapatas flexíveis. A Figura 1 mostra a vista em planta das três geometrias adotadas e um corte mostrando as principais dimensões das fundações. A Tabela 1 traz todas as dimensões adotadas, bem como o volume total de cada fundação.

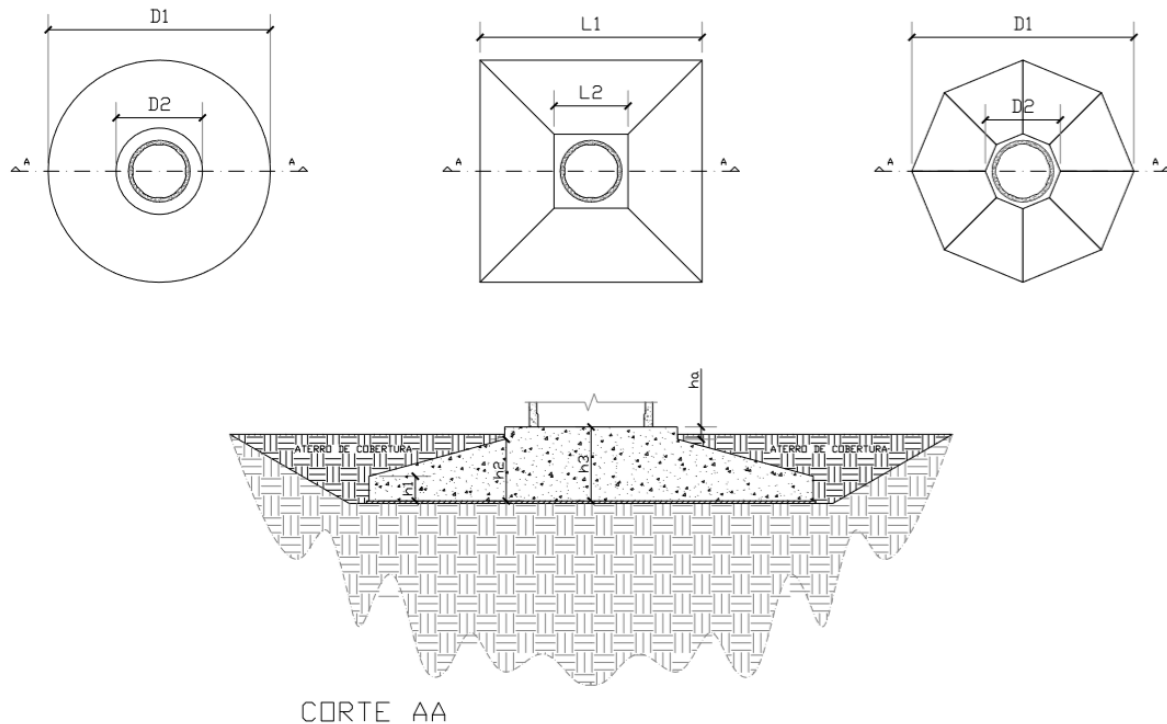


Figura 1 - Propriedades geométricas adotadas.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos modelos.

Propriedades geométricas					
Fundação circular		Fundação quadrada		Fundação octogonal	
Φ_{torre}	7.75 m	Φ_{torre}	7.75 m	Φ_{torre}	7.75 m
D ₁	20 m	D ₁	17 m	D ₁	20 m
D ₂	9.5 m	D ₂	9.5 m	D ₂	9.5 m
h ₁	1 m	h ₁	1.05 m	h ₁	1.20 m
h ₂	1.5 m	h ₂	1.6 m	h ₂	1.7 m
h ₃	2 m	h ₃	2 m	h ₃	2.00 m
Volume	438.64 m ³	Volume	438.69 m ³	Volume	438.72 m ³

1.2 Carregamentos e combinações utilizadas

Cargas resultantes e combinações

Foram utilizados dados de ações e carregamentos típicos de aerogeradores com altura de cubo de 120 m (torre de concreto) e diâmetro do rotor de 110 m. Esses valores são relativos a cargas estáticas calculadas considerando cenários mais críticos de combinação das ações atuantes no aerogerador. Os esforços resultantes transmitidos à fundação são: força F_{xy} (referente à resultante das forças horizontais atuando no plano XY); momento M_{xy} (resultante dos momentos agindo entorno dos eixos X e Y) e força axial devido a cargas gravitacionais (F_z). A Figura 2 mostra a convenção de eixos considerada nas análises.



Figura 2 - Sistema de eixos globais adotado.

Foram adotadas duas situações de cálculo referente a dois Estados Limites distintos. O Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS), sendo o primeiro utilizado nas análises dos esforços solicitantes e o segundo para verificação da rigidez rotacional da fundação.

Tabela 2 - Cargas resultantes para o ELU.

Cargas resultantes (ELU)		
Força axial (F_z)	1200,00	tf
Momento (M_{xy})	9400	tfm
Força horizontal (F_{xy})	90	tf

Tabela 3 - Cargas resultantes para o ELS.

Cargas resultantes (ELS)		
Força axial (F_z)	1200,00	tf
Momento (M_{xy})	5200	tfm
Força horizontal (F_{xy})	60	tf

Além das cargas provenientes da torre, deve-se considerar também o peso próprio da fundação e o peso do aterro. As combinações utilizadas foram:

$$ELU = 1,1 \cdot M_{ext} + 1,4 \cdot W_{fundação} + 1,4 \cdot W_{torre} + 1,4 \cdot W_{aterro} \quad (1)$$

$$ELS = 1,0 \cdot M_{normal} + 1,0 \cdot W_{fundação} + 1,0 \cdot W_{torre} + 1,0 \cdot W_{aterro} \quad (2)$$

Onde M_{ext} e M_{normal} são relativos aos esforços provenientes do momento máximo de tombamento para situações extremas e normais de vento, respectivamente, $W_{fundação}$ é o peso da fundação, W_{torre} é a carga vertical transmitida pela torre (peso da torre e da nacelle juntamente com as pás do rotor) e W_{aterro} é o peso do aterro. Para o ELU o coeficiente de majoração devido ao peso próprio das partes componentes do sistema torre-fundação foi determinado utilizando a Tabela 11.1 da NBR 6118 (2014) para combinações de ações normais permanentes. Como a carga do vento é extrema, então há que se utilizar um coeficiente para ações especiais ou excepcionais. A *International Standard – Wind Turbines* –

Part 1: Design requirements (IEC, 2005), que é uma norma internacional referência no projeto de estruturas para aerogeradores traz em sua Tabela 3 (Figura 3, abaixo) fatores parciais de segurança a serem utilizados.

Unfavourable loads			Favourable ⁹ loads
Type of design situation (see Table 2)			All design situations
Normal (N)	Abnormal (A)	Transport and erection (T)	
1,35*	1,1	1,5	0,9

Figura 3 - Fatores de segurança parciais utilizados no dimensionamento de fundações para aerogeradores.
Fonte: IEC (2015)

Da tabela acima, tem-se que para ações anormais não favoráveis deve-se utilizar um coeficiente de majoração de 1,1.

Já os coeficientes do ELS, por se tratar de uma análise de deflexão crítica da fundação, são considerados os valores característicos das cargas, como preconiza a IEC 61400-1 (IEC, 2005) em seu item 7.6.5.

Direção do momento na base da torre

A direção do momento agindo na base da torre dependerá da ação, principalmente, do vento. Deve-se considerar, como forma de manter o dimensionamento a favor da segurança, que a resultante dos momentos agindo no plano XY na base da torre possa agir em qualquer direção.

Para a fundação circular, que possui infinitos planos de simetria, a análise de uma direção de atuação do momento resultante é o suficiente. Porém, partindo para as fundações quadradas e octogonais deve-se analisar qual direção gerará os maiores esforços. Levando-se isso em conta foram definidas duas direções de atuação do momento para a fundação quadrada (M_{xy} agindo à 0 e 45 graus) e outras duas para a fundação octogonal (M_{xy} agindo à 0 e 22,5 graus). A Figura 4 abaixo ilustra em planta as direções adotadas. Apesar de na imagem constar M_{ext} as mesmas direções foram adotadas para o M_{normal} .

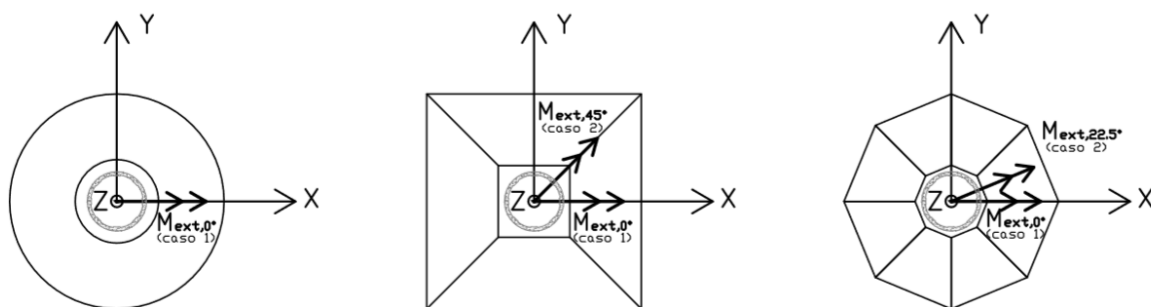


Figura 4 - Direção do momento solicitante resultante transmitido à fundação.

1.3 Modelagem com elementos finitos

A análise numérica das fundações foi feita utilizando o software SAP 2000 (*Computer and Structure Inc.*, 2017) que é um programa que trabalha com a análise de elementos finitos. Numa análise numérica usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) é de vital importância a escolha do tipo certo de elemento, das condições de contorno do problema e das propriedades constitutivas dos materiais envolvidos, tendo em vista o objetivo do estudo e a rigorosidade da análise que se pretende fazer.

Elemento utilizado

A análise numérica estática das fundações foi feita utilizando o elemento *shell* do SAP 2000. O elemento *shell* é um tipo de elemento de área utilizado para modelar estruturas com comportamento de membrana, placa ou casca tanto em modelos planos quanto em três dimensões (CSI, 2015). Tal elemento pode ser homogêneo ou possuir camadas através de sua espessura, sendo-o passível de considerar análises não lineares quando modelado em camadas.

As fundações foram modeladas utilizando elementos de placa fina (*thin-plate*). A propriedade de placa permite que uma seção plana possua as seguintes propriedades (CSI, 2015):

- Comportamento puro de placa.
- Suporta apenas momentos fletores e forças transversais.
- Pode ser fina ou espessa (*thin/thick plate*).
- Material linear e homogêneo.

Outra consideração importante diz respeito aos eixos locais escolhidos, pois toda a análise do pós-processamento é feita em função deles. Como uma forma de dar ao presente trabalho um viés mais prático relativo ao dimensionamento de fundações de aerogeradores, os eixos locais foram escolhidos de forma que o esforço resultante fosse equivalente aos padrões de armação de flexão geralmente adotados para cada tipo de fundação. Assim, as fundações circular e octogonal apresentam eixos locais de seus elementos com ângulo de inclinação em relação aos eixos globais horizontais variáveis, de forma a se obter componentes de momento radiais e circunferenciais (que são os padrões adotados nas armações). Já a fundação quadrada apresenta eixos locais coincidentes com os globais, de maneira que o momento a tenha apenas componentes ortogonais, disposição essa que é compatível com a malha ortogonal de armaduras geralmente utilizada nesse tipo de fundação.

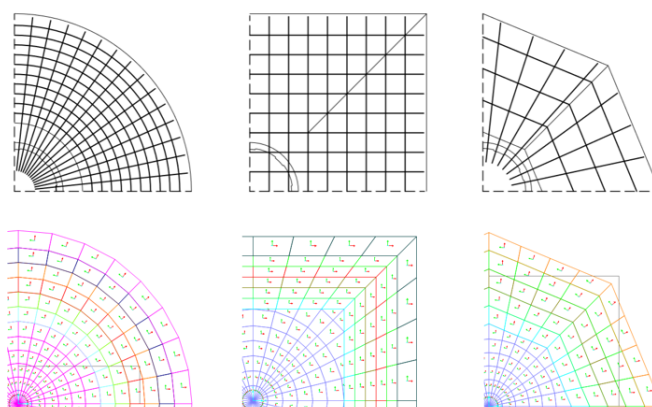


Figura 5 - Comparação entre os padrões de armação geralmente adotados e os eixos locais dos elementos utilizados na modelagem das fundações.

Transmissão de esforços da torre para a fundação

O momento considerado no encontro da torre com a fundação é o momento total de tombamento, que é composto do momento M_{xy} e do momento causado pela força F_{xy} em relação ao ponto de tombamento da base, tomado como sendo o centro da face inferior da sapata (Figura 8) de forma que o momento total é dado pela Eq. (3).

$$M_{total} = M_{tombamento} + h_3 \cdot F_{xy} \quad (3)$$

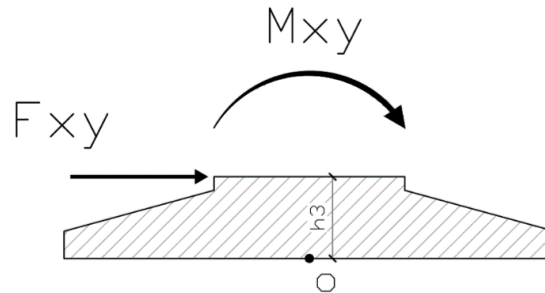


Figura 6 - Momento de tombamento.

A transmissão dos esforços da torre para a fundação pode ser feita de vários modos, sendo os dois principais, como descrito por Warren-Codrington (2013):

- Um anel de perfil metálico I imerso no concreto da base, sendo ligados à mesa superior desse perfil, tirantes protendidos também ligados à torre;
- Uma gaiola de tirantes protendidos ligados a duas flanges concretadas no fundo e no topo da fundação.

Diante dessas técnicas construtivas tem-se que a transmissão do momento pode ser feita considerando todos os tirantes com mesma rigidez, onde a carga de cada um será dada por pela Eq. (4).

$$P_{tirante} = \frac{V}{N} \pm \frac{M \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4)$$

Onde V é a carga vertical, N é o número de tirantes, M é o momento de tombamento total e x_i é a coordenada no eixo perpendicular ao eixo de atuação do momento solicitante de cada tirante. Foram considerados 16 pontos de transmissão de carga (tirantes) locados em um raio de 3,785 m (ponto médio da espessura da torre no ponto de encontro com a fundação)

Outro fato importante de ser destacado é que a força horizontal só entrou como um momento, sendo este seu equivalente estático. Tal medida foi tomada devido ao fato de que, com relação aos esforços de flexão da fundação, apenas o efeito de flexão devido a essa força ser importante.

Condições de contorno – interação solo-estrutura

Foi utilizado o Modelo de Winkler para modelar a interação solo-estrutura. A Eq. (5), abaixo, proposta do Vesic (1961a, 1961b) *apud* Warren-Codrington (2012), é usada para determinar o módulo de reação vertical.

$$k_v = \frac{1}{B} \left[0,65^{12} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_f I_f}} \right] \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)} \quad (5)$$

Ao analisar a Eq. (5) percebe-se que a mesma possui parâmetros que relacionam tanto propriedades constitutivas do solo e da fundação quanto propriedades geométricas da fundação. Como o presente estudo possui foco no comportamento estrutural da fundação e não nos aspectos geotécnicos propriamente ditos, decidiu-se parametrizar o estudo definindo uma parcela da Eq. (5) relativa às propriedades constitutivas do solo e da fundação, as quais são constantes, possuindo o mesmo valor para os três casos, e uma parcela relacionada às propriedades geométricas da fundação. Portanto, partindo da Eq. (5), tem-se:

$$k_v = \left(\frac{1}{B} \sqrt[12]{\frac{B^4}{I_f}} \right) \cdot \left[(0,65 \sqrt[12]{E_s}) \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)} \right] \cdot \left(\sqrt[12]{\frac{1}{E_f}} \right) \quad (6)$$

$$k_v = \alpha_v \cdot \beta_v \quad (7)$$

Onde α_v é o coeficiente de forma da fundação e β_v é o coeficiente constitutivo relativo ao solo e a fundação.

Como já mencionado, apenas o coeficiente de forma sofre variações, porém, não dependendo tão somente da forma da fundação, mas também da direção em que o momento solicitante atua. Porém, devido à simetria presente em todas as geometrias analisadas seu momento de inércia não sofre variações. Portanto, tem-se que foi adotado um coeficiente de forma por fundação.

Disso tem-se que os coeficientes de forma são:

$$\alpha_{v,circular} = \left(\frac{1}{B} \sqrt[12]{\frac{B^4}{I_f}} \right) = \left(\frac{1}{20} \sqrt[12]{\frac{20^4}{\frac{\pi \cdot 20^4}{64}}} \right) = 0,06428 /m \quad (8)$$

$$\alpha_{v,quadrada} = \left(\frac{1}{B} \sqrt[12]{\frac{B^4}{I_f}} \right) = \left(\frac{1}{17} \sqrt[12]{\frac{17^4}{6960,08}} \right) = 0,07236 /m \quad (9)$$

$$\alpha_{v,octogonal} = \left(\frac{1}{B} \sqrt[12]{\frac{B^4}{I_f}} \right) = \left(\frac{1}{20} \sqrt[12]{\frac{20^4}{6380,71}} \right) = 0,06540/m \quad (10)$$

Dividindo todos os coeficientes de forma pelo $\alpha_{v,circular}$, tem-se

$$\alpha_{v,circular} = 1,0000 \quad (11)$$

$$\alpha_{v,quadrada} = 1,1257 \quad (12)$$

$$\alpha_{v,octogonal} = 1,0174 \quad (13)$$

Dessa forma, considerando-se um valor usual de módulo de reação vertical base para a fundação circular, tem-se qual seria esse valor para as outras duas.

Adotando-se um valor de 3000 tf/m³ para o módulo de reação vertical da fundação circular, que é, levando-se em conta o nível de tensões no solo para estruturas desse tipo (algo em torno de 2 a 3 kgf/cm²), um valor usual de projeto, tem-se:

$$k_{v,circular} = 3000 \text{ tf}/m^3 \quad (14)$$

Para as demais, tem-se:

$$k_{v,quadrada} = 3377 \text{ tf}/m^3 \quad (15)$$

$$k_{v,octogonal} = 3052 \text{ tf}/m^3 \quad (16)$$

No SAP 2000 o módulo de reação vertical pode ser modelado como elementos de *links* do tipo *Gap*, os quais só são solicitados à compressão. Para tornar válida essa atribuição, o programa requer que seja feita uma análise do tipo não linear, pois só assim ele é capaz de estabelecer corretamente a mudança de rigidez relativa ao nível de tensão do solo (quando o mesmo possuir tração, não apresentará rigidez).

2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.1 Caso de Estudo 1 – Análise comparativa dos esforços internos

Foram analisados os momentos fletores M11 e M22 fornecidos pelo SAP 2000. O M11 é relativo ao momento fletor por unidade de comprimento que age em torno do eixo local 2 no plano médio da espessura do elemento plano, ou seja, rotaciona um plano normal ao eixo 1. Da mesma forma, o momento M22 age em torno do eixo 1, rotacionando um plano normal ao eixo 2. A Figura 35 ilustra a atuação do momento fletor M11, sendo a atuação do momento M22 análoga.

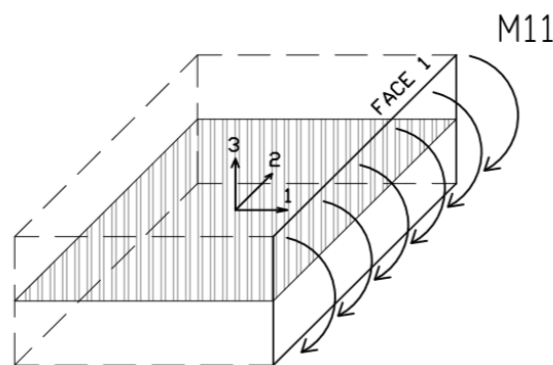


Figura 7 - Convenção direcional do momento M11.

A Tabela 4 sintetiza os resultados obtidos. As Figuras 8 a 10 mostram mapas de momentos fletores para todas as fundações para o caso do momento agindo a 0° . Em cada figura é possível encontrar também um corte mostrando o perfil de momentos fletores passando pelo ponto onde o valor do esforço é máximo.

Comparando os resultados viu-se que a fundação com formato circular apresentou o maior momento fletor máximo com um valor 429,73 tf.m/m, valor esse 17,94% maior do que o momento fletor máximo encontrado para a fundação quadrada e 4,43% maior em comparação com a fundação octogonal.

Com relação ao momento M22 o maior valor foi encontrado para a fundação quadrada. Esse momento fletor foi de 367,11 tf.m/m chegando a ser 21,72% maior que o esforço análogo desenvolvido na fundação octogonal.

Verificando os momentos negativos, observou-se que a fundação octogonal apresentou os maiores valores para o M11 (diferença de 27,04 % com relação à fundação quadrada e 3,42% para a fundação circular), enquanto que a fundação quadrada teve resultados mais críticos considerando os valores de M22. A Tabela 5 mostra a diferença percentual dos valores dos esforços para todas as fundações em comparação com o maior valor obtido para cada caso. Quando o valor da tabela for nulo é por que o momento fletor em questão foi o maior.

Com relação à distribuição dos esforços nas sapatas, obtiveram-se resultados bastante parecidos, tendo uma grande concentração de momentos fletores nos pontos de ancoragem distantes 3,875 m do centro das fundações. Isso ocorre devido à maneira como os esforços são transmitidos da torre para as fundações, tendo tirantes de ancoragem da torre mais solicitados na direção ortogonal à atuação do momento solicitante. Esse mesmo padrão foi observado também na distribuição de tensões tanto nas faces inferior e superior do elemento de placa.

Tabela 4 - Tabela comparativa dos momentos fletores desenvolvidos nas fundações.

Esforços internos					
Momento fletor	Circular	Quadrada (0°)	Quadrada (45°)	Octogonal (0°)	Octogonal (22,5°)
	tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m	tf.m/m
M11 _{máximo}	429,73	319,01	352,63	410,68	405,89
M11 _{mínimo}	-175,34	-94,71	-132,45	-181,54	-180,39
M22 _{máximo}	301,43	367,11	352,63	279,88	287,38
M22 _{mínimo}	-66,31	-159,98	-132,45	-79,21	-76,51

Tabela 5 - Diferenças percentuais entre os momentos fletores da fundação.

Diferenças percentuais					
Momento fletor	Circular	Quadrada (0°)	Quadrada (45°)	Octogonal (0°)	Octogonal (22,5°)
	%	%	%	%	%
M11 _{máximo}	0,00	-25,77	-17,94	-4,43	-5,55
M11 _{mínimo}	-3,42	-47,83	-27,04	0,00	-0,63
M22 _{máximo}	-17,89	0,00	-3,94	-23,76	-21,72
M22 _{mínimo}	-58,55	0,00	-17,21	-50,49	-50,30

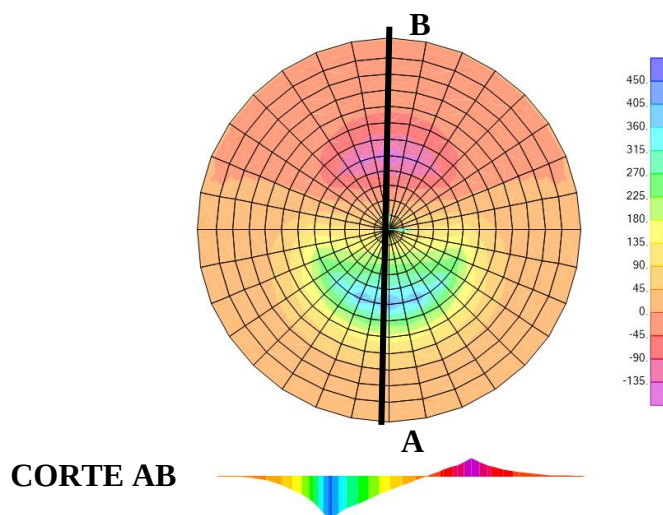


Figura 8 - Mapa de esforços de momentos fletores M11 para a fundação circular.

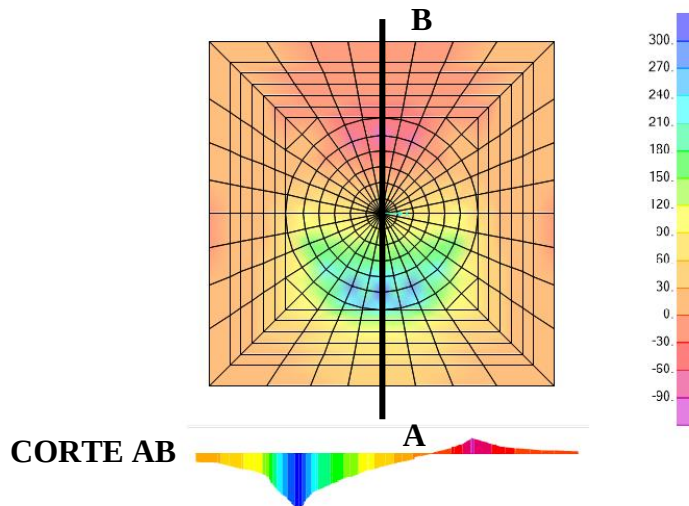


Figura 9 - Mapa de esforços de momentos fletores M11 para a fundação quadrada (0°).

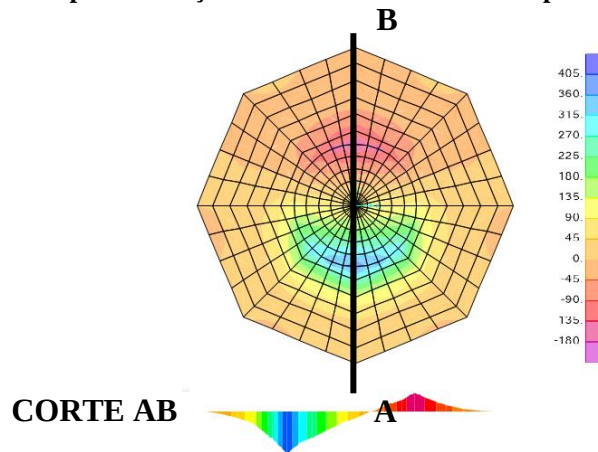


Figura 10 - Mapa de esforços de momentos fletores M11 para a fundação octogonal (0°).

2.2 Caso de Estudo 2 – Análise comparativa da rigidez rotacional fornecida à torre

Ao analisar as fundações utilizando os módulos de reação vertical estabelecidos no item anterior verificou-se que as mesmas, de fato, possuem um padrão de deformação flexível. Tal fato torna inválido o método normalmente empregado para determinar a rigidez rotacional de fundações rígidas, isso por que esse método leva em consideração que os deslocamentos da face inferior da fundação são equivalentes a o deslocamento de um corpo rígido, sendo possível utilizar a diferença entre as deformações de dois pontos extremos no cálculo da rigidez rotacional.

Porém, deve-se lembrar que a rigidez analisada aqui é a que as fundações fornecem para a torre, portanto, é razoável utilizar os deslocamentos dos nós da ligação entre a torre e fundação no referido cálculo. Tal procedimento também foi empregado em Ribeiro (2014) no cálculo da rigidez rotacional tanto de fundações superficiais quanto de fundações profundas.

Além disso, outro fator que deve ser considerado e que corrobora o uso desse método é o fato de que as fundações possuem um núcleo mais alto que o resto da sapata, de forma que esse núcleo possui um comportamento mais rígido. Tal comportamento pode ser observado na

Figura 11, referente à fundação circular. Esse padrão de deformação dos nós internos à torre foi observado em todas as fundações.

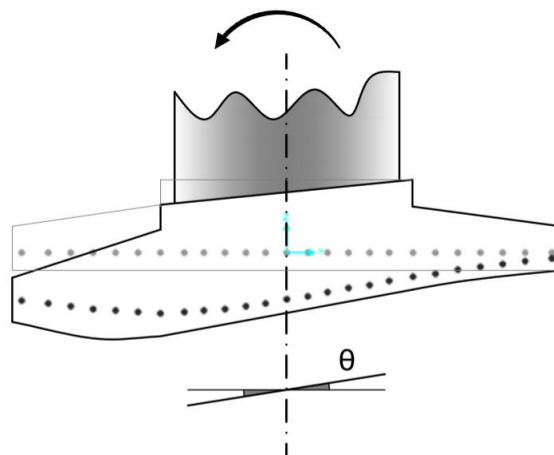


Figura 11 - Deformada da fundação circular referente a um corte passando pelo deslocamento máximo (resultado do SAP 2000 modificado).

Tabela 6 - Análise comparativa da rigidez rotacional.

Análise da rigidez rotacional						
		Circular	Quadrada (0°)	Quadrada (45°)	Octogonal (0°)	Octogonal (22,5°)
k_v	tf/m ³	3000	3377	3377	3052	3052
δ_1	mm	-2.11	-1.87	-1.88	-2.31	-2.31
δ_2	mm	-4.48	-4.15	-4.10	-4.78	-4.78
L	m	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
M	tf.m	4710.2	4710.2	4710.2	4710.2	4710.2
θ	rad	0.000305806	0.000294194	0.000286452	0.00031871	0.00031871
K_θ	tf.m/rad	15402553	16010548	16443266	14778968	14778968

Comparando os resultados expostas na Tabela 6, viu-se que a fundação quadrada apresenta os maiores valores de rigidez rotacional, sendo o menor deles (o mais crítico) 3,79% e 7,69% maior do que as menores rigidezes apresentadas pelas fundações circular e octogonal, respectivamente.

Esse resultado é interessante devido ao fato de mostrar uma independência da rigidez rotacional da área de contato da fundação com solo, pois, apesar da fundação circular apresentar a maior área de contato (314,16 m²), sua rigidez não foi a maior. Além disso, a área de contato da sapata quadrada é de 289 m², enquanto a fundação octogonal apresenta uma área de 282,84 m², ou seja, não existe uma correlação entre a ordem das fundações mais rígidas e sua respectiva área de contato. Isso é um indicativo que o aumento das dimensões em planta de sapatas de aerogeradores não irá trazer melhores desempenhos com relação a esse estado limite, devendo-se atentar, principalmente, para questões relacionadas ao tombamento e deslizamento da fundação, as quais, geralmente, direcionam seu pré-dimensionamento.

2.3 Caso de Estudo 3 – Análise paramétrica da variação do momento fletor com a rigidez do solo

A distribuição de pressões no solo sob a sapata possui grande influência nos esforços da fundação. Como o formato da fundação influencia não só na área de contato com o solo, mas também na distribuição de pressões de contato, tem-se que a verificação da mudança nos esforços internos com a variação da rigidez do solo é de vital importância para o presente estudo.

A presente análise foi feita considerando uma certa faixa de valores para o módulo de reação vertical, indo de 10% o valor utilizado nas análises do item 2.1 até 40 vezes esses valores. Importante lembrar que a proporção entre os módulos adotados para cada fundação também foi mantida. A Tabela 7 mostra os valores de k_v adotados.

Tabela 7 - Módulos de reação vertical utilizados na análise paramétrica da influência da rigidez do solo.

		Módulo de reação vertical				
		Circular	Quadrada (0°)	Quadrada (45°)	Octogonal (0°)	Octogonal (22,5°)
$k_{v,1}$	tf/m ³	300	338	338	305	305
$k_{v,2}$	tf/m ³	750	844	844	763	763
$k_{v,3}$	tf/m ³	1500	1689	1689	1526	1526
$k_{v,4}$	tf/m ³	2250	2533	2533	2289	2289
$k_{v,5}$	tf/m ³	3000	3377	3377	3052	3052
$k_{v,6}$	tf/m ³	3750	4221	4221	3815	3815
$k_{v,7}$	tf/m ³	4500	5066	5066	4578	4578
$k_{v,8}$	tf/m ³	5250	5910	5910	5341	5341
$k_{v,9}$	tf/m ³	6000	6754	6754	6104	6104
$k_{v,10}$	tf/m ³	12000	13508	13508	12209	12209

Os valores de módulo de reação vertical foram escolhidos de forma a considerar uma faixa possível de valores para solo coesivos e não coesivos. A Tabela 8 abaixo mostra valores comumente encontrados para solos argilosos e arenosos.

Tabela 8 - Valor de módulo de reação vertical obtido em ensaios de placa. Valores em tf/m³. Fonte: Terzaghi (1955) apud Lopes e Velloso (2004).

Argilas	Rija	Muito rija	Dura
Faixa de valores	1600-3200	3100-6400	>6400
Valor proposto	2400	4800	9600
Areias	Fofa	Med. compacta	Compacta
Faixa de valores	600-1900	1900-9600	9600-32000
Areia acima do N.A.	1300	4200	16000
Areia submersa	800	2600	96000

A Tabela 9 apresenta relacionados os valores de momento fletor máximo obtido em cada modelo considerando a mudança de módulo de reação vertical. Verificando esses valores é possível perceber que o valor do momento máximo diminuiu com o aumento da rigidez do solo para todos os casos, sendo que a maior redução ocorreu para a fundação quadrada na direção de 45° de atuação do momento solicitante, com um valor de 24,16%. Para a fundação circular (a que apresentou a maior variação ao se considerar todas as direções de atuação) essa diferença foi de 22,86%.

Tabela 9 - Variação do momento fletor máximo com a rigidez do solo.

Variação do momento fletor com a rigidez do solo					
Momento fletor máximo					
k_v (BASE)	Circular	Quadrada (0°)	Quadrada (45°)	Octogonal (0°)	Octogonal (22.5°)
tf/m ³	tf.m/m				
300	466.58	387.05	387.00	434.35	428.43
750	458.91	382.80	379.69	429.52	423.85
1500	447.36	376.37	368.84	422.01	416.69
2250	437.04	370.61	359.40	415.13	410.10
3000	429.73	367.11	352.63	410.68	405.89
3750	419.36	360.69	343.64	402.87	398.33
4500	411.74	356.39	336.95	397.36	393.03
5250	404.73	352.43	330.91	392.21	388.06
6000	398.24	348.77	325.40	387.36	383.40
12000	359.91	326.36	293.52	356.80	354.05

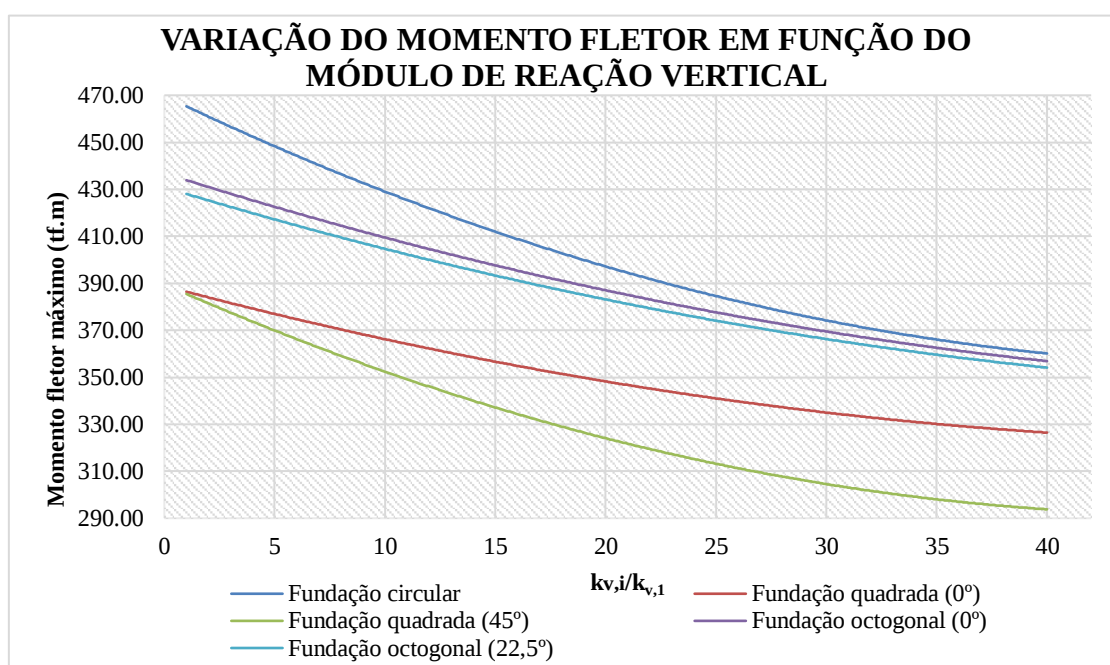


Figura 12 - Variação do momento fletor máximo com a variação do módulo de reação vertical.

2.4 Caso de Estudo 4 – Análise paramétrica da variação da rigidez rotacional com o módulo de reação vertical do solo

O gráfico da Figura 13 mostra a rigidez rotacional em função do coeficiente de reação vertical do solo normalizado, o qual é obtido dividindo-se o coeficiente k_{vi} em questão pelo valor de k_{v1} (menor valor de k_v).

Os valores de rigidez rotacional para as duas direções de ação do momento solicitante foram iguais para a fundação octogonal. Comportamento esse semelhante ao que acontece com a fundação circular. Tal padrão não foi observado na fundação quadrada, em que a diferença entre a rigidez rotacional para o momento solicitante agindo nas duas direções analisadas chegou a ser 2,82 %.

Da Figura 13 conclui-se que a fundação quadrada apresenta o melhor desempenho relativo à rigidez rotacional para todos os valores de módulo de reação vertical da faixa de valores analisados. Além disso, a diferença entre as rigidezes apresentadas pelas fundações circular em relação aos valores relativos à fundação quadrada aumentou para solos mais rígidos, enquanto que para a fundação octogonal essa diferença é maior para solos menos rígidos. A Tabela 10 traz essa diferença para os valores de k_v considerados. Outro aspecto observado é que para solos muito rígidos a fundação octogonal apresenta uma maior eficiência se comparada com a fundação circular.

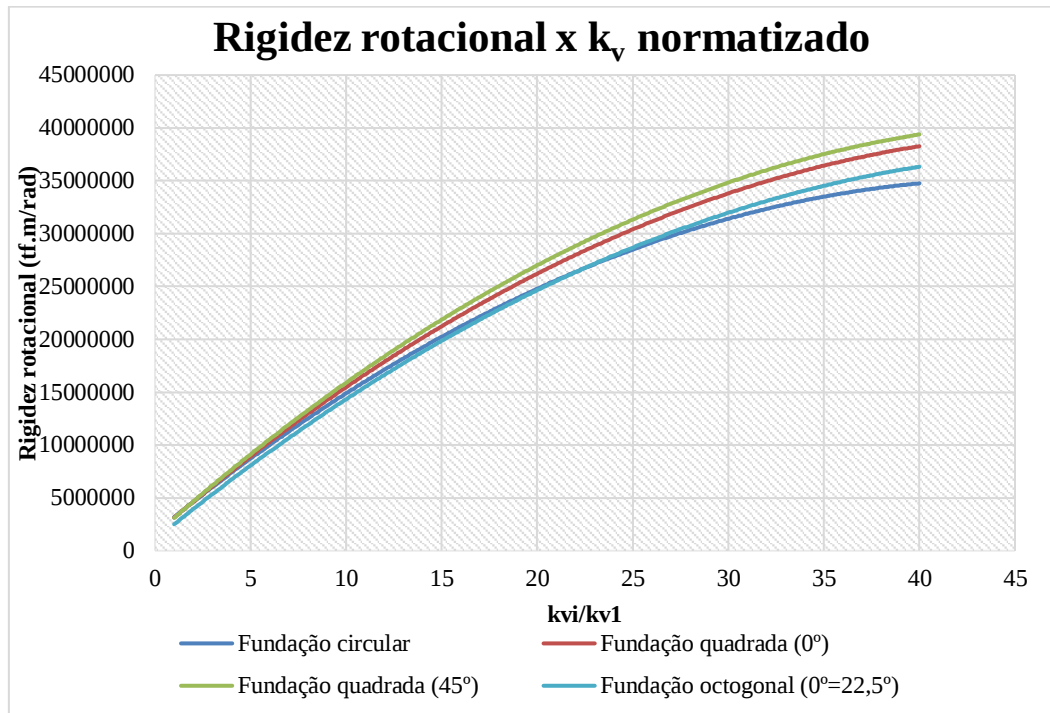


Figura 13 - Rigidez rotacional versus módulo de reação vertical normalizado.

Tabela 10 - Diferença percentual entre a rigidez rotacional das fundações circular e octogonal em relação à fundação quadrada.

k_{vi}/k_{v1}	ΔK_{θ} (%)	
	Circular	Octogonal
1	1.35	15.75
2.5	1.50	13.61
5	1.80	11.00
7.5	2.45	9.40
10	3.38	7.89
12.5	4.35	7.17
15	4.41	6.25
17.5	5.17	5.67
20	6.04	5.58
40	9.08	5.16

Além de comparar os valores de rigidez rotacional também foi analisada a deformação apresentada pelas fundações. Ademias foram comparados o padrão de deformação apresentado para o menor e o maior módulo de reação vertical.

Analisando os resultados foi possível perceber que para o menor valor de k_v a fundação comporta-se como rígida, enquanto que para o maior k_v seu comportamento é flexível. Isso acontece devido à rigidez relativa entre o solo e a fundação. Quando o solo se apresentou menos rígido, a fundação, em relação ao solo, era rígida, comportando-se, portanto, como tal. Porém ao enrijecer o solo, esse panorama inverteu-se fazendo com que a fundação passasse a ser flexível frente ao solo. Tal padrão foi observado para as três fundações.

A deformada das fundações afeta também a distribuição de tensões no solo. Para valores baixos de módulo de reação vertical o solo apresentou pressões de contato distribuídas de maneira mais linear, se aproximando do modelo usualmente utilizado para cálculo de sapatas. O mesmo não acontece para solos mais rígidos considerando fundações de mesma rigidez, onde essa distribuição de pressões de contato não é linear.

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam a deformada da fundação circular, quadrada e octogonal, respectivamente, para o valor mínimo e máximo de k_v .

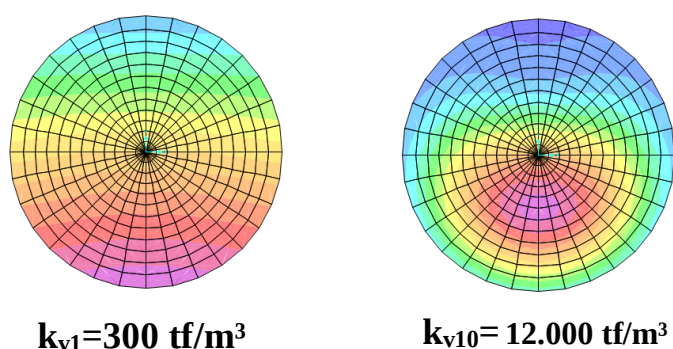


Figura 14 - Deformada da fundação circular para k_{v1} e k_{v10} .

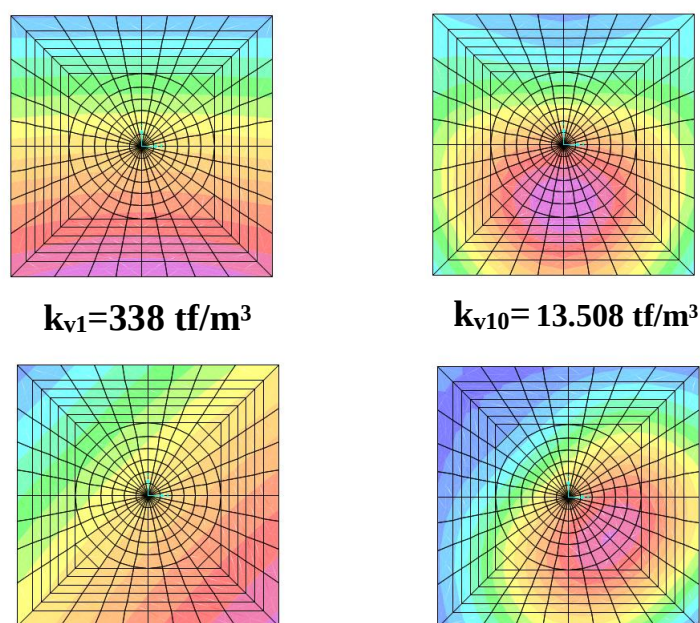


Figura 15 - Deformada da fundação quadrada para k_{v1} e k_{v10} .

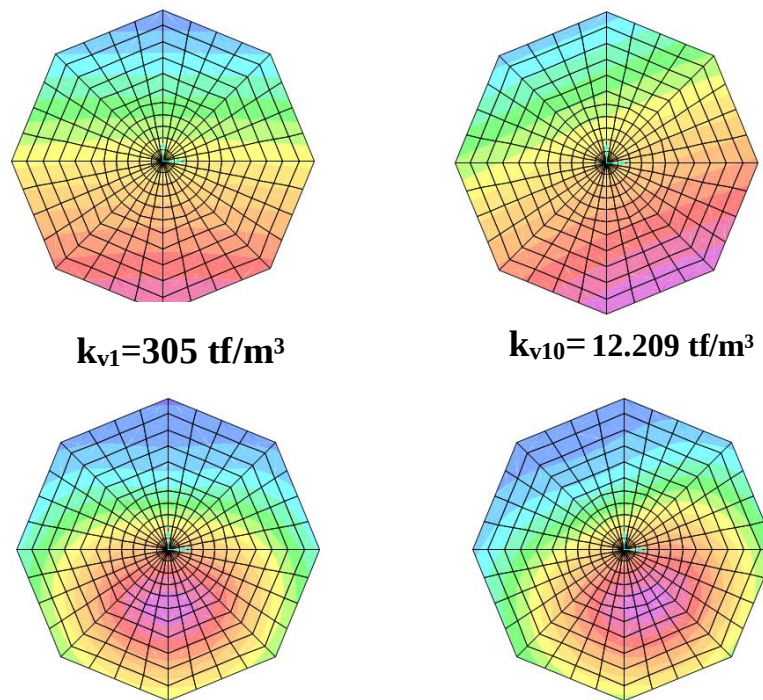


Figura 16 - Deformada da fundação octogonal para k_{v1} e k_{v10} .

3 CONCLUSÕES

A geometria de fundações superficiais de aerogeradores é um fator que possui grande influência na eficiência da fundação, tanto com relação ao desenvolvimento de esforços internos quanto na rigidez rotacional fornecida à torre.

O estudo mostrou que a fundação quadrada desenvolve os menores valores de momentos fletores máximos, indicando que essa geometria favorece a distribuição de esforços ao longo da sapata, atenuando picos de momentos encontrados na região de ancoragem da torre. Esse padrão foi observado para um faixa de módulo de reação vertical variando de valores da ordem de 300 a 12000 tf/m³, como revelado pela análise paramétrica do item 2.3

A fundação octogonal, por apresentar uma forma aproximadamente circular não apresentou grande diferença entre as direções de atuação de momento fletor estudadas.

A fundação quadrada também apresentou os maiores valores de rigidez rotacional chegando a ser 3,79% e 7,69% maior do que o valor apresentado para as fundações circular e octogonal, respectivamente. A ordem de eficiência nesse quesito é ligada, ao que tudo indica somente ao formato da sapata, sem ter relação direta com a área de contato da fundação com o solo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BHATTACHARYA, S., ADHIKARI, S. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations. Shock and Vibrations, 19, 37-56, 2012.

- CANDEMIL, A. et al. Análise numérica de fundações diretas de aerogeradores. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2014.
- CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. Dynamics of Structures, Computers & Structures, Inc., Berkeley, EUA, 2003.
- DNV/Risø. Guidelines for design of wind turbines, 2nd Edition. DNV/Risø Publication. 2002, Copenhagen, Dinamarca.
- FILONENKO, M. & BORODICH, M.(1940) . Some approximate theories of the elastic foundation. Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennoho Universiteta Mekhanika, 46, pp 3-18 (in Russian).
- GÖRANSSON, F., NORDENMARK, A., Fatigue Assessment of Concrete Foundations for Wind Power Plants. Master of Science Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- HETENYI, M., (1946) . Beams on elastic foundations. The university of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan
- HUSSAIN, S. S. E, SATARI, M. A., Vibration Based Wind Turbine Tower Foundation Design Utilizing Soil-Foundation-Structure Interaction, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Pequim, China, 2008
- IEC 61400-1, Wind Turbines – Part 1: Design Requirements. International Standard, Genebra, Suíça, 2005.
- MARANHÃO, G. M., Análise da Rigidez Rotacional de Fundações Estaqueadas de Torres Eólicas, IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, CBPE, 2016.
- MAUNU, P. Design of Wind Turbine Foundation Slabs. Dissertação de mestrado, Lulea University of Technology, Suécia, 2008.
- MELO, M. S. M., Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- MOURA, A. S. Avaliação de metodologias de projeto de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2007.
- RIBEIRO, A.R, LIMA, S.S, SANTOS, S.H.C. Análise de Fadiga em Estrutura de Fundação de Torre de Turbina Eólica. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2014.
- RIBEIRO, M. A. A., Análise de Fadiga em Estrutura de Fundação de Torre de Turbina Eólica. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- SANTOS, S. H. C., Análise de Placas de Fundação considerando a Matriz de Rigidez do Solo Condensada na Superfície. Exame de Qualificação para Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1990.
- SAP2000, Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc. University Ave. Berkeley, California, 1995.
- SVENSSON H., Design of Foundations for Wind Turbines. Master's Dissertation, Lund University, Suécia, 2010.
- VELLOSO D. A. e LOPES F. R., Fundações - Volume 1. Oficina de Textos, Rio de Janeiro, 2004.
- WARREN-CODRINGTON, Geotechnical Considerations for Onshore Wind Turbines, Dissertação de mestrado, University of Cape Town, África do Sul, 2013.