

A Engenharia de Fundações de Aerogeradores de Grande Porte

Evandro Medeiros Braz¹, Joatan Rosa², Mariana Bamberg Amaral³

¹ Calter do Brasil Engenharia Limitada / evandro@calterdobrasil.com.br

² Calter do Brasil Engenharia Limitada / joatan@calterdobrasil.com.br

³ Calter do Brasil Engenharia Limitada / marianabambergamaral@gmail.com

Resumo

O incentivo à utilização de energias renováveis no Brasil cresce exponencialmente há cada ano, entre estas a que se destaca significativamente é a energia eólica. O grande diferencial competitivo deste setor é o baixo impacto ambiental, rapidez de instalação e funcionalidade. Esta engenharia de grande porte de aerogeradores necessita uma estrutura de fundação robusta, que geralmente são compostas por sapatas maciças que demandam alto consumo de concreto e aço. Este estudo propõe uma nova concepção de fundações de aerogeradores mais vantajosa economicamente, uma vez que o consumo de aço permanece próximo ao de uma fundação convencional, entretanto há uma sensível redução do volume de concreto aliando a melhor reologia e qualidade deste concreto no estado endurecido, diminuindo o risco de fissuração durante a cura, devido ao aumento de área exposta ligado ao menor calor da hidratação. Esta fundação é composta por laje inferior formada por uma geometria circular, armada e concretada *in situ*, adicionalmente a esta laje de pequena espessura, a inclusão de nervuras que funcionam como contrafortes para compensar a baixa rigidez da laje. Estas nervuras poderão ser pré-fabricadas ou armadas e concretadas no local. A figura abaixo ilustra esquematicamente a concepção de fundação estudada, onde o número de nervuras e diâmetro da laje circular são ajustáveis aos esforços transmitidos pela torre e características geotécnicas do local.

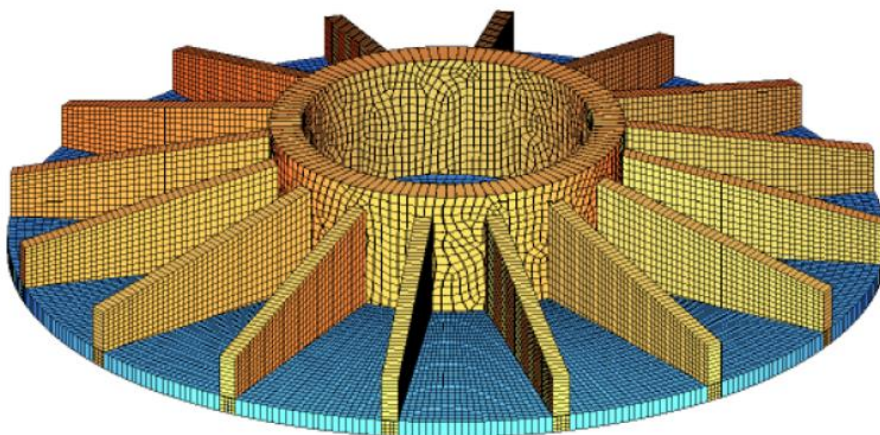


Figura 1 – Modelagem numérica da fundação em contrafortes desenvolvida pela Calter.

Palavras-chave

Fundação; Aerogerador; Concreto; Aço; Volume.

1. Introdução

O recurso eólico é a energia do vento presente em um determinado local que pode ser aproveitada na geração de energia elétrica. O recurso é quantificado a partir de registro da velocidade, direção, temperatura e outras variáveis. A distribuição da velocidade dos ventos em cada altura, a rosa dos ventos e as médias mensais, torna possível correlacionar a tecnologia dos aerogeradores disponíveis no mercado a fim de ver os melhores desempenhos.

A fonte de energia proveniente do vento, além de ser abundante, renovável e limpa, tem vantagens em sua utilização como a redução dos gases de efeito estufa. No Brasil encontra-se um grande potencial eólico de ventos com características unidirecional, estáveis e constantes, que até com potenciais baixos de geração de energia ultrapassam as melhores regiões de países Europeus como a Alemanha. A implantação dos parques eólicos resulta também em baixas tarifas de energia e rendas mensais para proprietários de terra, que independente de ter o parque instalado em suas propriedades podem continuar com rendas principais como plantações e criação de gado.

Em busca da expansão da fonte eólica na matriz energética nacional, o governo estabeleceu algumas ações visando desenvolver a tecnologia, como: a internalização desta tecnologia e a consolidação da indústria eólica nacional de fornecimento de componentes e montagem; a participação da iniciativa privada e o aprimoramento da legislação, do conhecimento da fonte primária e de sua interação energética com um parque gerador de base hidráulica (EPE, 2009). Por meio da Lei 10.438/2002 criou-se o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), que gerou tarifas generosas e contratos de longa duração para investidores em energia, voluntariando a compra de energia pelo governo por meio da fonte eólica. Desta forma, o mercado brasileiro criou fábricas de pás, torres, aerogeradores, entre outros.

Na última década o aumento de investimentos no setor eólico cresceu exponencialmente, como pode ser observado na Figura 2. Segundo dados da ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica) no ano de 2018 houve um aumento de 14,6% em relação ao ano anterior (2017), resultando na geração de 48,4 TWh de energia eólica. Em 2019 a potência instalada no Brasil chegou a 15,4 GW em 619 parques e mais de sete mil aerogeradores operando em 12 estados (ABEEólica, 2019).

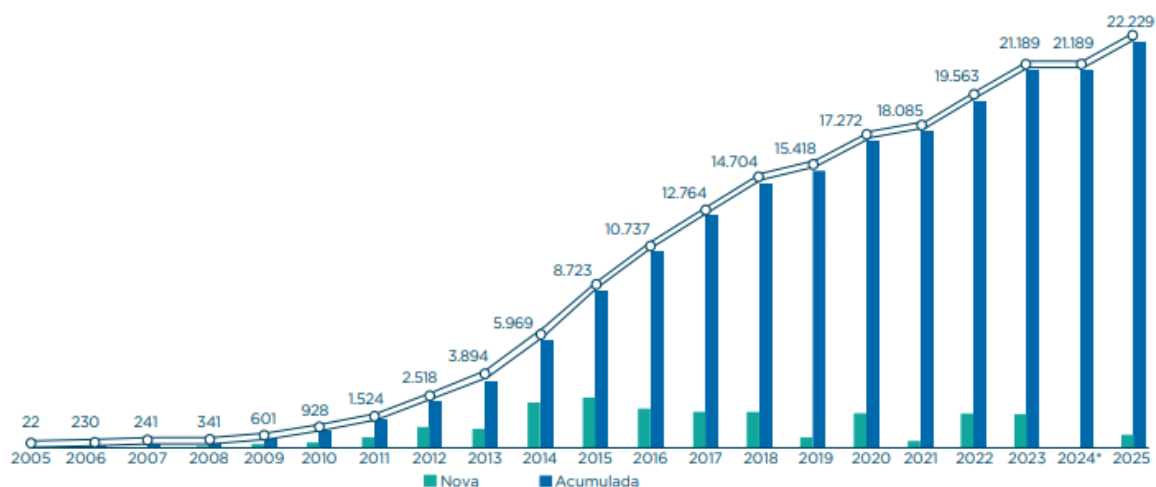


Figura 2 – Gráfico de energia eólica nova e acumulada anualmente
Fonte: ABEEólica, 2019

2. Fundações de Aeroeradores de Grande Porte

A fundação é o elemento responsável pela ligação entre o conjunto da torre, do aerogerador, das cargas (tanto estáticas como dinâmicas que esse conjunto está submetido) e o solo. Desta forma, a fundação de um aerogerador é calculada para suportar cargas estáticas, como o peso próprio, e cargas dinâmicas, como vento e os sismos (regiões que estão sujeitas a este fenômeno). Na maior parte dos projetos estruturais as fundações são projetadas principalmente para atender cargas verticais, no caso das fundações de torres eólicas são projetadas para atender essencialmente forças horizontais que são impostas por ventos de diferentes velocidades e que geram valores elevados de momentos fletores nas bases da torre e na fundação.

De acordo com Silva (2014) a utilização de sapatas circulares na fundação de aerogeradores é consequência de uma distribuição uniforme das forças provenientes do vento, independentes de sua direção. Junto à uma distribuição uniforme das forças, este formato otimiza o consumo de concreto e aço, resultando em fundações mais viáveis economicamente. Sua principal desvantagem é a mão-de-obra especializada, diante do fato das armaduras necessitarem profissionais mais qualificados para a execução de armaduras em seções poligonais ou retangulares como pode ser visualizado na Figura 3 abaixo.



Figura 3 – Montagem das armaduras de uma fundação de aerogeradores

Fonte: Autor

Esta engenharia de grande porte de aerogeradores necessita de uma estrutura robusta de fundação para suportar os esforços gerados pelo conjunto de elementos que a integram como torre, pás e aerogeradores. As fundações geralmente são compostas por sapatas maciças ou fundações profundas com estacas, isto é definido após estudo do solo existente no local que será construída. Em casos de solos com baixas resistências, necessita-se transmitir as cargas para as camadas mais profundas, utilizando assim, fundações com estacas. Quando o solo da região é de alta resistência pode-se optar pela primeira opção, sapatas maciças compostas por concreto e aço.

As fundações convencionais de turbinas eólicas são imensos blocos que resultam em alto consumo de concreto e aço. Estas fundações completas correspondem a um custo para uma torre eólica entre 5% a 10%

do valor do aerogerador completo, ou seja, valores entre R\$ 500.000,00 à R\$ 1.000.000,00 dependendo das unidades a serem instaladas, fator de escala, bem como, envelope de cargas (carregamentos), que mudam em função do modelo do aerogerador, potência, altura do cubo, tamanho do rotor, entre outros. Quanto maior o número de aerogeradores instalados menor será o custo desses elementos.

3. Otimização do consumo de aço em Aerogeradores

Este artigo adotou o programa computacional SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES) como ferramenta auxiliar para desenvolvimento do trabalho, com o intuito de avaliar uma concepção estrutural mais econômica para a fundação de aerogeradores. Desta forma, desenvolveu-se dois modelos de elementos finitos de diferentes geometrias, um modelo de uma estrutura convencional e outro modelo de estrutura com nova concepção utilizando contrafortes.

Para o estudo em referência foi utilizado um aerogerador de eixo vertical com potência de 4 MW e altura do cubo de 100 metros.

A nova fundação é formada por uma laje inferior de geometria circular, armada e concretada in situ. Adicionalmente a esta laje de pequena espessura, são inclusas nervuras que funcionam como contrafortes para compensar a baixa rigidez da laje. Estas nervuras poderão ser pré-fabricadas ou armadas e concretadas no local. Este tipo de fundação tem como principal vantagem a redução do consumo de concreto e menor risco de fissuração durante a cura, devido ao aumento de área exposta ligado ao menor calor de hidratação. Entretanto, há uma sensível redução do volume de concreto aliado a melhor reologia e qualidade deste concreto no estado endurecido.

A Tabela 1 apresenta os quantitativos encontrados para uma fundação convencional de um aerogerador e na Figura 4 sua geometria. Já na Tabela 2 exibe os quantitativos encontrados para uma fundação com nova concepção de um aerogerador utilizando contrafortes e na Figura 5 sua geometria.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADES	UN
Concreto magro ($f_{ck} \geq 20$ MPa)	38,17	m ³
Concreto da base ($f_{ck} \geq 35$ MPa)	434,22	m ³
Concreto pedestal ($f_{ck} \geq 45$ MPa)	15,75	m ³
Groute Masterflow 9300 ($f_{ck} \geq 88,5$ MPa)	0,67	m ³
Volume estrutural total	449,97	m ³
Volume total de concreto do bloco de fundação incluso magro	488,81	m ³
Aço CA-50 12,50mm	1.626,00	Kg
Aço CA-50 16,00mm	2.128,90	Kg
Aço CA-50 20,00mm	26.087,30	Kg
Aço CA-50 25,00mm	21.587,40	Kg
Aço CA-50	51.429,60	Kg

Tabela 1 – Quantitativos de uma fundação convencional

Fonte: Autor



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

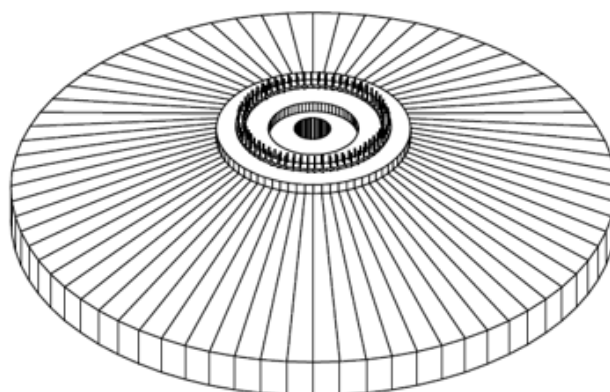


Figura 4 – Modelo geométrico de uma fundação de aerogeradores convencional
Fonte: Autor

DESCRIÇÃO	QUANTIDADES	UN
Concreto magro ($f_{ck} \geq 20$ MPa)	38,17	m ³
Concreto da base ($f_{ck} \geq 35$ MPa)	309,73	m ³
Concreto pedestal ($f_{ck} \geq 45$ MPa)	14,46	m ³
Groute Masterflow 9300 ($f_{ck} \geq 88,5$ MPa)	0,67	m ³
Volume estrutural total	324,86	m ³
Volume total de concreto do bloco de fundação incluso magro	363,03	m ³
Aço CA-50 8,00mm	133,00	Kg
Aço CA-50 12,50mm	4.239,40	Kg
Aço CA-50 16,00mm	1.178,10	Kg
Aço CA-50 20,00mm	25.287,20	Kg
Aço CA-50 25,00mm	12.905,10	Kg
Aço CA-50 Total	43.742,80	Kg

Tabela 2 – Quantitativos de uma fundação com contrafortes
Fonte: Autor

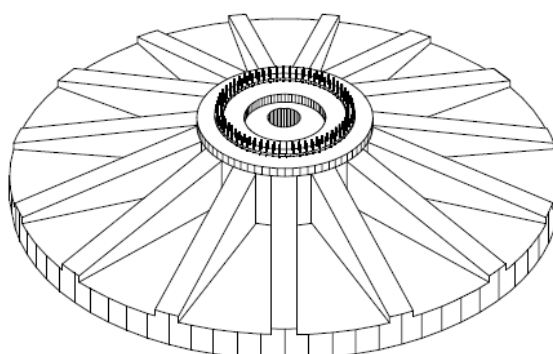


Figura 5 – Modelo geométrico de uma fundação de aerogeradores com contrafortes
Fonte: Autor



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Como pode-se visualizar o quantitativo de aço reduziu consideravelmente no segundo modelo, passando de 51,43 t na fundação convencional para 43,74 t na fundação com contrafortes. Em termos orçamentários, essa diferença reduz uma quantidade relevante nos custos de cada fundação, ainda mais, se considerar um custo total em parques de até 60 aerogeradores. A seguir é apresentada duas tabelas com o orçamento da quantidade total de concreto e aço utilizado em fundações convencionais (Tabela 3) e com contrafortes (Tabela 4).

DESCRIÇÃO	QUANT.	UN	PREÇO UNIT. (R\$)	PREÇO TOTAL (R\$)	REFERÊNCIA
Concreto magro (fck \geq 20 MPa)	38,17	m ³	R\$ 439,10	R\$16.760,45	SINAPI
Concreto da base (fck \geq 35 MPa)	434,22	m ³	R\$ 398,42	R\$173.001,93	Média de três fornecedores
Concreto pedestal (fck \geq 45 MPa)	15,75	m ³	R\$ 531,36	R\$8.368,92	Média de três fornecedores
Groute Masterflow 9300 (fck \geq 88,5 MPa)	0,67	m ³	R\$ 326,28	R\$218,61	Média de três fornecedores
Aço CA-50 12,50mm	1.626,00	Kg	R\$ 6,42	R\$10.438,92	SINAPI
Aço CA-50 16,00mm	2.128,90	Kg	R\$ 5,91	R\$12.581,80	SINAPI
Aço CA-50 20,00mm	26.087,30	Kg	R\$ 5,39	R\$140.610,55	SINAPI
Aço CA-50 25,00mm	21.587,40	Kg	R\$ 5,84	R\$126.070,42	SINAPI
TOTAL				R\$488.051,59	

Tabela 3 – Orçamento de uma fundação convencional
Fonte: Autor

DESCRIÇÃO	QUANT.	UN	PREÇO UNIT. (R\$)	PREÇO TOTAL (R\$)	REFERÊNCIA
Concreto magro (fck \geq 20 MPa)	38,17	m ³	R\$ 439,10	R\$16.760,45	SINAPI
Concreto da base (fck \geq 35 MPa)	309,73	m ³	R\$ 398,42	R\$123.402,63	Média de três fornecedores
Concreto pedestal (fck \geq 45 MPa)	14,46	m ³	R\$ 531,36	R\$7.683,47	Média de três fornecedores
Groute Masterflow 9300 (fck \geq 88,5 MPa)	0,67	m ³	R\$ 326,28	R\$218,61	Média de três fornecedores
Aço CA-50 8,00mm	133,00	Kg	R\$ 8,96	R\$1.191,68	SINAPI
Aço CA-50 12,50mm	4.239,40	Kg	R\$ 6,42	R\$27.216,95	SINAPI
Aço CA-50 16,00mm	1.178,10	Kg	R\$ 5,91	R\$6.962,57	SINAPI
Aço CA-50 20,00mm	25.287,20	Kg	R\$ 5,39	R\$136.298,01	SINAPI
Aço CA-50 25,00mm	12.905,10	Kg	R\$ 5,84	R\$75.365,78	SINAPI
TOTAL				R\$ 395.100,14	

Tabela 4 – Orçamento de uma fundação com contrafortes
Fonte: Autor

Conforme apresentado nas tabelas o custo de uma fundação com contrafortes é 19,05% menor em relação à fundação convencional, esse número quando realizados parques de até 60 aerogeradores garante uma economia em obra de R\$ R\$5.577.087,07. Estes dados podem ser observados na Figura 6 onde foram analisados os custos de cada fundação somados a quantidades de aerogeradores implantados em parques eólicos.

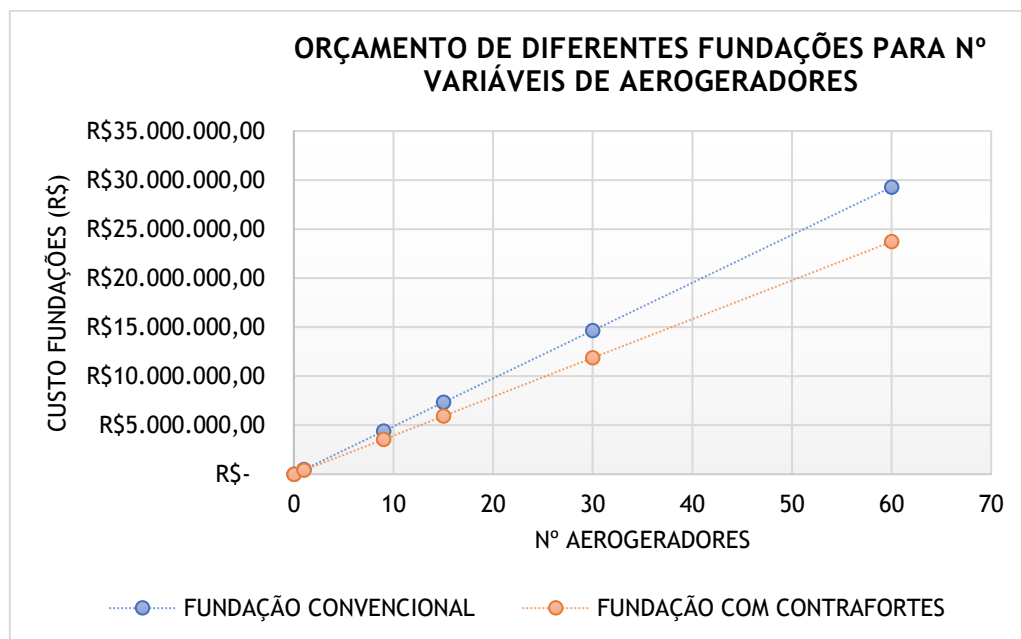


Figura 6 – Comparativo orçamentário de diferentes fundações com número variável de aerogeradores
Fonte: Autor

Além desta significativa redução de custos, esta fundação com contrafortes otimiza o consumo de aço e de concreto resultando em menor risco de fissuração durante a cura, devido ao aumento de área exposta ligado ao menor calor de hidratação, como já comentado anteriormente.

Conclusões

Na busca constante por maior eficiência energética, o setor eólico busca por aerogeradores mais potentes e torres cada vez maiores. Estes esforços refletem diretamente nas fundações destes aerogeradores, necessitando assim, incrementos consideráveis nas cargas e volumes maiores de aço e concreto. Desta forma, busca-se por soluções inovadoras para diminuir economicamente o empreendimento, viabilizando o investimento.

Com a solução proposta nesse artigo, houve uma redução no custo das fundações de 19,05%, número significativo quando comparado a execução de várias torres de aerogeradores. Concluindo assim, que inovações na área dos cálculos estruturais podem ser viáveis economicamente para o empreendedor, facilitando também a execução em obra, transtornos de implantação e aumentar a vida útil do empreendimento.



Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos à empresa Calter do Brasil pelo fornecimento dos programas computacionais necessários ao desenvolvimento desse trabalho.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Energia Eólica os bons ventos do Brasil. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Infovento-14_PT.pdf. Acesso em: 05 de março de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61400: Aerogeradores – parte 1 – requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

SILVA, M. D., Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.