

## Fundações De Aerogeradores: Uma Abordagem entre as Tipologias Direta e Indireta

Evandro Medeiros Braz<sup>1</sup>, Rui Carneiro de Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) – Portugal / [up202204076@up.pt](mailto:up202204076@up.pt)

<sup>2</sup> Prof. Jubilado Eng<sup>a</sup> Estrutural, Dept<sup>o</sup> Eng<sup>a</sup> Civil, (FEUP); CONSTRUCT - Portugal / [rcb@fe.up.pt](mailto:rcb@fe.up.pt)

### Resumo

A busca por energias renováveis a nível mundial cresce a cada ano, entre estas a que se destaca significativamente é a energia com aproveitamento do vento, a eólica. A energia eólica é uma alternativa limpa e renovável para produção de energia elétrica, apresentando grande aceitação social (Custódio, 2009). Os parques eólicos, como são chamados o agrupamento de aerogeradores, são projetados e construídos no Brasil em grande escala, é comum ver projetos com centenas de aerogeradores na região sul e nordeste do Brasil. Aerogeradores necessitam de uma estrutura de fundação robusta, que geralmente são compostas por blocos maciços que demandam alto consumo de concreto e elevada taxa de aço. Existem basicamente duas tipologias de fundação, as diretas, que são assentes diretamente no solo e as indiretas que necessitam transmitir esforços a camadas mais resistentes. Ambas são projetadas para atender aos requisitos de segurança e desempenho para toda a vida útil do aerogerador. Considerando as facilidades construtivas e os custos associados, as fundações diretas são sempre a primeira escolha de solução em fundações (Milititsky, 2019). No decorrer das construções de parques eólicos é comum, constatar a troca de tipologia direta para indireta, acarretando custos e dificuldade construtiva como já mencionado. Essa troca é justificada por alguns cenários, seja pela constatação in loco de condição distinta da investigação geotécnica, seja pela presença de apenas estudos geotécnicos preliminares, seja pela identificação in loco de solos colapsíveis, entre outros. Este estudo busca apresentar resultados de um parque eólico, onde tem-se a estratigráfica do solo em condições aderentes as duas tipologias. Neste contexto, pretende-se apresentar um breve dimensionamento de ambas as soluções de fundações e os custos envolvidos na referida substituição, da direta pela indireta (estacas). Na figura 01, tem-se a modelagem de uma fundação de aerogerador na tipologia indireta.

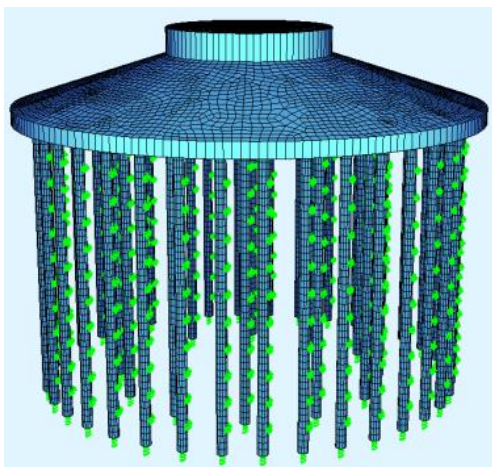


Figura 1 – Modelagem numérica da fundação estaqueada de um aerogerador.

### Palavras-chave

Fundação; Aerogerador; Estaca; Concreto.

## 1. Introdução

### 1.1 Energia Eólica

A energia eólica é de conhecimento do homem há mais de 3.000 anos. Este recurso era utilizado pelas antigas civilizações para dar força e impulsionar barcos à vela, gerar energia mecânica para moer grãos e bombear água. Estes sistemas de energia surgiram na China, Pérsia e Oriente Médio, com uma funcionalidade muito mais simples, através do uso de moinhos. Na Europa essa tecnologia foi introduzida nas Cruzadas e passou por grandes melhorias conduzidas pelos povos alemães e ingleses.

Por meio da literatura, Miguel dos Cervantes no século XIII, já era evidenciado o uso de recursos eólicos por meio dos moinhos de ventos. O recurso eólico se originou nas antigas civilizações, sendo responsável principalmente pela energia mecânica gerada por meio de moinhos e cata-ventos para bombeamentos de água e moagem de grãos. A energia elétrica gerada através do recurso eólico surgiu somente no século XIX. Esse feito foi realizado na Dinamarca com um rotor de 25 metros de diâmetro que gerava pouco mais de 25 kW.

No Brasil, nas últimas duas décadas, os investimentos no setor eólico cresceram exponencialmente, seja pelo apelo as energias de fonte renováveis, seja pela facilidade de instalação ou pelos incentivos governamentais aplicados a esta fonte, através de tarifas especiais e contratos de longa duração as empresas geradoras.

Hoje os aerogeradores passaram por um grande desenvolvimento tecnológico, onde no rotor tem-se 150 m de diâmetro, e na potência a geração de 6000 kW. Hoje o Brasil conta com mais de 9.500 aerogeradores em operação. Como ordem de grandeza, relata-se que o diâmetro do rotor (conjunto 3 pás) é 1,5 x o tamanho do campo de futebol. Na figura 02, tem-se a ilustração de um parque eólico em operação situado na região nordeste do Brasil.



Figura 1: Parque eólico em operação no Brasil.

### 1.2 Fundações de Aerogeradores

Os aerogeradores são estruturas de grande porte, sustentadas por uma fundação, a qual transmite todo carregamento ao solo. De forma geral, as fundações são elementos estruturais executadas em função da necessidade de transmissão de cargas ao solo oriundas de uma estrutura a ser construída.

Para obter um alto desempenho da fundação de qualquer estrutura, deve-se conhecer a característica do solo onde será construída, para que o projeto esteja dimensionado de acordo com estas informações, ser executada conforme procedimentos executivos preconizados por norma e pós-conclusão não modificar o tipo de carregamento calculado, não realizar escavações nas proximidades e nem vibrações que possam causar movimentos de massa (MILITITSKY, J.; CONSOLI N. C.; SCHNAID, F. 2015).

As fundações de aerogeradores possuem duas tipologias, as diretas e as indiretas, a primeira é gravitacional dependendo diretamente da capacidade de suporte na cota de assentamento, e a segunda necessita de estaqueamento, por não ter condições geotécnicas de ser assente diretamente. A busca pela fundação direta é sempre a mais vantajosa em termos de custo e tempo de execução, por não ter a inclusão de estaqueamento no bloco de fundação, e por não depender de equipamento mecânico especializado. Lembrando que os projetos eólicos geralmente encontram-se distantes dos grandes centros. Na figura 03, tem-se ilustração de uma fundação de um aerogerador após a etapa de concretagem.



Figura 03 – Fundação de aerogerador após a etapa de concretagem

### 1.2.1 Fundações tipologia direta

Nas fundações diretas os requisitos de estabilidade do elemento de fundação de um aerogerador, tem como variável três grandezas principais, tais como, altura, peso e área de contato com o solo. Na fundação direta devem-se verificar alguns pontos, como capacidade de carga, segurança ao deslizamento, segurança ao tombamento, área comprimida da base, recalques e avaliação da rigidez. Nas verificações, tem-se também em conta que mesmo cumprindo todas os requisitos já descritos anteriormente, a presença de solo colapsível geralmente é constatado no momento da construção, ao realizar ensaio de placa em solo na condição saturada, ou através do ensaio laboratorial denominado edométrico. A ocorrência de solos com comportamento especial, sensíveis a variação no grau de saturação do terreno, é extremamente importante para a adequada escolha da solução de fundações de aerogeradores. Neste grupo estão os solos colapsíveis, definidos como “materiais que apresentam uma estrutura metaestável, sujeita a rearranjo radical de partículas e grande variação (redução) volumétrica dividido à saturação, como ou sem carregamento externo adicional”, (Milititsky, 2016). Na figura 04, observa-se a execução de uma prova de carga em placa, ensaio onde pode-se observar colapsidade ao submeter carga ao solo nas condições seca e saturada.





Figura 04 – Estrutura da prova de carga em placa.

### 1.2.2 Fundações tipologia Indiretas

Não ocorrendo condições técnicas já citadas anteriormente para o uso da tipologia direta, entre em cena a tipologia indireta, ou seja, utilização de fundações profundas (estacas). Existem diversos tipos de estacas a considerar, logicamente dependendo de condições do solo. Entre as mais utilizadas está a estaca hélice contínua monitorada e a estaca raiz. A estaca profunda também passa por avaliação geotécnica para provar sua capacidade de carga. Na figura 05, tem-se a ilustração da execução das estacas tipo raiz e na figura 06, tem-se a ilustração de uma foto de uma prova de carga aplicada na estaca.



Figura 05 e 06 – Execução de estaca tipo raiz e prova de carga em estaca

## 2. Objetivo do Estudo

Este estudo buscará apresentar os resultados do dimensionamento de duas fundações de um mesmo projeto eólico, onde tem-se as duas tipologias, uma fundação direta e uma fundação indireta com uso de estacas raízes de diâmetro 355/410 mm. Será apresentado também quantitativos de ambas as soluções, bem como custos envolvidos na mudança de tipologia. A mudança de tipologia, verificada na etapa de construção dar-se-á por alguns motivos já citados anteriormente, tais como: Sondagens geotécnicas realizados preliminarmente, faltando confirmação, estratigrafia no local

diferente do apresentado na sondagem, presença de solos colapsíveis. Os estudos foram desenvolvidos com uso do software de análise de elementos finitos, Sofistik e planilhas de Excel.

### 3. Estudo de caso

O parque de geração eólica localizado no agreste Pernambucano. O projeto conta com 06 aerogeradores, que estão dispostos em linha com uma extensão de 2 km, e distância entre aerogeradores de aproximadamente 500 m. Nesta configuração foi realizada uma campanha de sondagem mista, SPT (standard Penetration test) e rotativa, com o furo localizado no eixo da fundação de cada aerogerador. O aerogerador trata-se de um modelo comercial de um fabricante europeu com rotor de 150 m de diâmetro, potência de 4200 kW e altura da torre metálica de 100 m.

#### 3.1 Características dos materiais

As fundações dos aerogeradores são de concreto armado, e abaixo lista-se as características dos materiais constituintes das fundações estudadas:

Concreto Base ou Laje – sapata C30:

Resistência à compressão  $f_{ck} = 30$  MPa

Módulo de elasticidade  $E = 27$  GPa

Coefficiente de Poisson  $\nu = 0,2$

Peso específico  $\gamma_c = 25$  kN/m<sup>3</sup>

Concreto Pedestal ou fuste C45:

Resistência à compressão  $f_{ck} = 45$  MPa

Módulo de elasticidade  $E = 34$  GPa

Coefficiente de Poisson  $\nu = 0,2$

Peso específico  $\gamma_c = 25$  kN/m<sup>3</sup>

Aço (vergalhões) CA-50:

Tensão de escoamento  $f_y = 500$  MPa

Módulo de elasticidade  $E = 210$  GPa

Cobrimento nominal  $C = 5,0$  cm

#### 3.2 Sondagens geotécnicas

Apresenta-se abaixo as tabelas 01 e 02, com os resultados das investigações geotécnicas de dois pontos, onde claramente observa-se a distinção entre elas, mesmo se tratando do mesmo projeto eólico. Na sondagem 01 temos a aderência da tipologia direta, diferentemente da sondagem 02, que apresenta solução aderente a fundação indireta.

Sondagem Mista (SPT e Rotativa) - 01				
Prof (m)	Descrição do Material	Nspt	Recuperação	RQD
1	Argila siltosa, com areia fina amarelada (solo de alteração de rocha)	50	N/A	N/A
2		53	N/A	N/A
3		64	N/A	N/A
4	Granito - Rocha ígnea de coloração cinza	N/A	96%	76%
5		N/A	100%	76%
6		N/A	100%	90%
7		N/A	100%	90%

Tabela 01 – Sondagem Mista 01 / Fundação direta

Sondagem Mista (SPT e Rotativa) - 02				
Prof (m)	Descrição do Material	Nspt	Recuperação	RQD
1	Silte arenoso, pouco argiloso, com pouca mica, muito compacto à medianamente compacto.	45	N/A	N/A
2		9	N/A	N/A
3		7	N/A	N/A
4		10	N/A	N/A
5		9	N/A	N/A
6		9	N/A	N/A
7		9	N/A	N/A

Tabela 02 – Sondagem Mista 02 – Fundação indireta

### 3.3 Modelagem das fundações

Os modelos apresentados são do tipo casca, ou seja, cada elemento da fundação é modelado com elementos planos 2D, concretamente elementos planos quadriláteros de 4 nós, que têm um comportamento combinado de membrana e placa. A flexão da placa é modelada de acordo com a teoria de Reissner-Midlin, ou seja, levando em consideração o comportamento ao cisalhamento da placa. Os sistemas de coordenadas locais para esses elementos são mostrados abaixo na figura 07. Nas figuras 08 e 09 tem a ilustração de ambos os modelos (direta e indireta). O solo foi modelado de acordo com o módulo de reação fornecida (Winkler), implementado como molas de área no software.

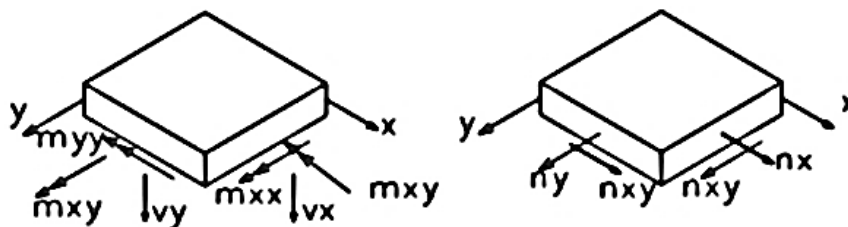


Figura 07 – Sistema de coordenadas locais

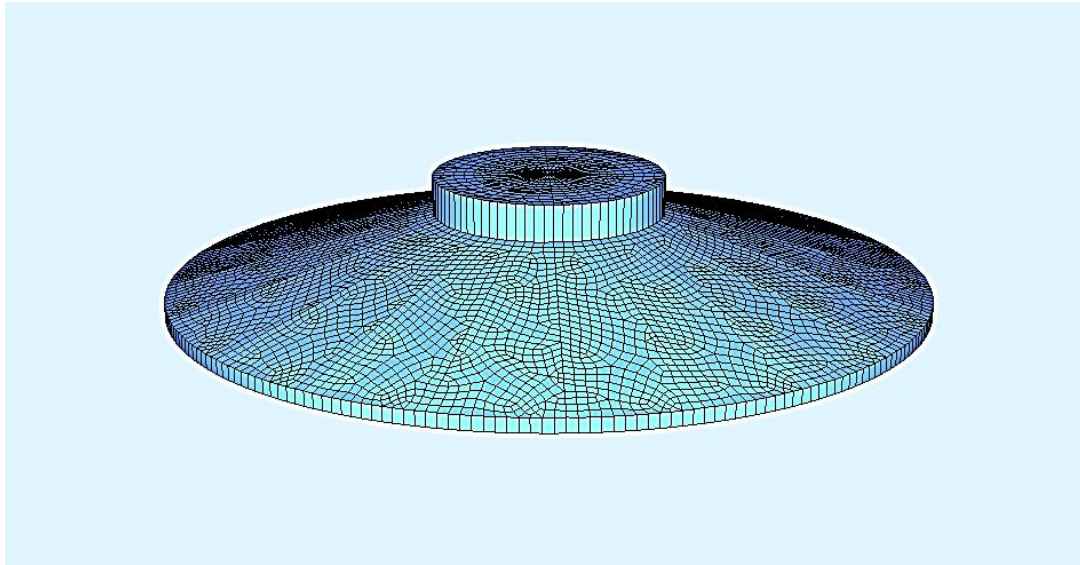


Figura 08 – Modelação numérica da fundação direta

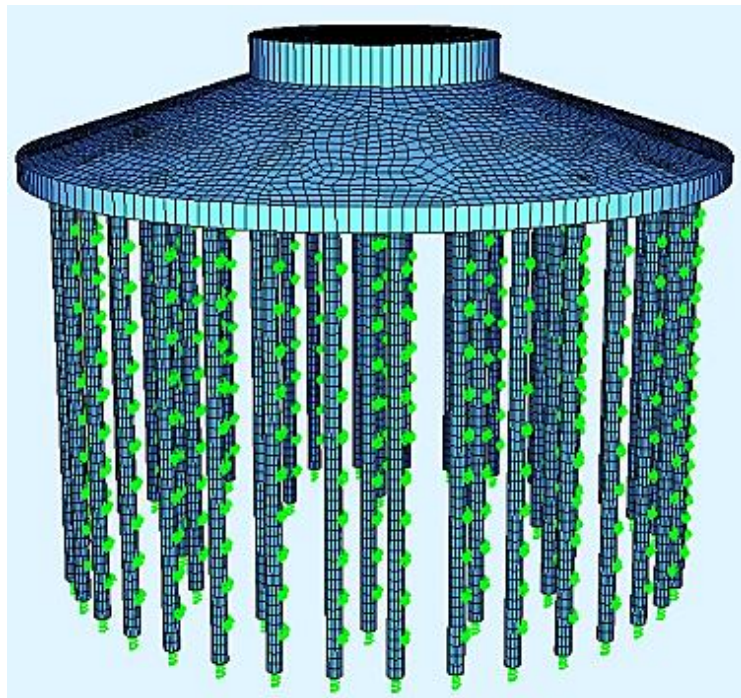


Figura 09 – Modelo numérica da fundação tipo indireta (com estacas)

Para modelar a reação do terreno sobre a estrutura, neste caso sobre as estacas, o terreno é modelado com molas nos elementos de viga de 1 m de comprimento. As molas estão dispostas sobre as estacas cujo valor corresponde aos obtidos nas curvas p-y e que representam a reação do terreno às ações transmitidas pelas estacas em função da sua profundidade e do tipo de solo em que se encontram. Na figura 10, tem-se a modelagem numérica das estacas profundas.



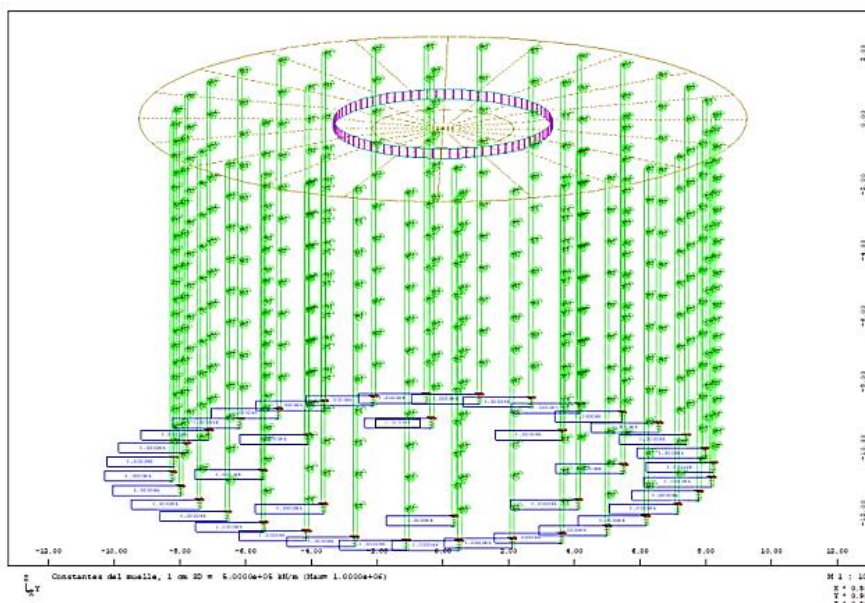


Figura 10 – Modelo numérico das estacas profundas

### 3.4 Quantitativos e volumetria

O resultado do dimensionamento das fundações, tanto na tipologia direta como indireta, após verificada todas as condições e requisitos de cálculo, atendendo segurança e desempenho do elemento estrutural para toda vida útil do projeto eólico, encontra-se abaixo. Na tabela 03, tem-se o quadro comparativo dos volumes das fundações de ambas as tipologias. Na figura 11, tem-se as dimensões da fundação direta, e na figura 12, tem-se as da fundação indireta com uso de 40 estacas raízes de 355/410 mm com profundidade de 12 m, sendo 8 m em solo, e 4 m em rocha. Na figura 13, observa-se a armadura utilizada na estaca, considerada neste estudo.

Descrição dos materiais	Und	Qde. Indireta	Qde. direta
Concreto de regularização e=10cm fck ≥ 15MPa	m <sup>3</sup>	36,31	38,01
Fornecimento e montagem de forma	m <sup>2</sup>	450,14	529,30
Concreto estrutural - fck = 30MPa sapata	m <sup>3</sup>	422,30	544,80
Concreto estrutural - fck = 45MPa pedestal	m <sup>3</sup>	36,50	36,50
Armadura - aço CA-50	kg	52.926,00	53.716,00
Escavação Material 1ª Categoria	m <sup>3</sup>	1.322,82	1.574,27
Reaterro com material local	m <sup>3</sup>	864,02	992,97
<b>ESTACA RAIZ (40 Estacas de 12 m cada)</b>			
Mobilização do equipamento	un	1,00	N/A
Estaca raiz em Solo 355/410 mm - 8m	m	320,00	N/A
Estaca raiz em Rocha 355/410 mm -4m	m	160,00	N/A
Armadura - aço CA-50 das estacas	kg	5.631,59	N/A
Argamassa - fck = 20 MPa para as estacas	m <sup>3</sup>	60,32	N/A

Tabela 03 – Tabela comparativa dos volumes de ambas as tipologias



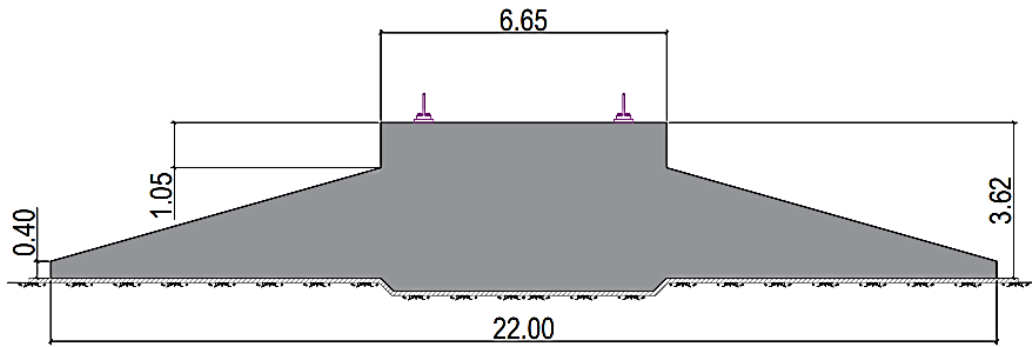


Figura 11 – Dimensões da fundação direta (m)

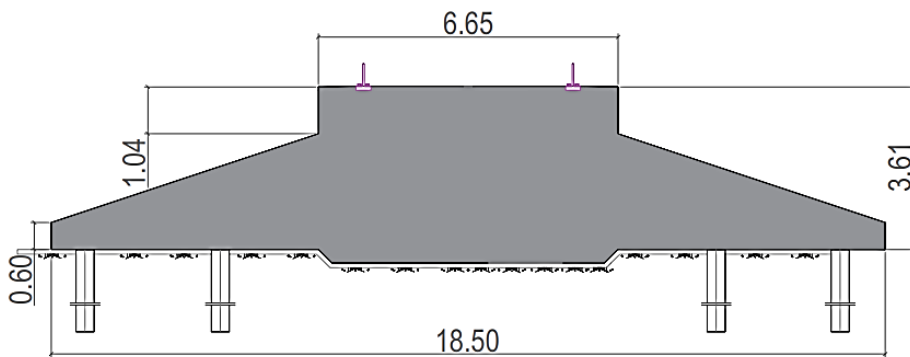


Figura 12 – Dimensões da fundação indireta (m)

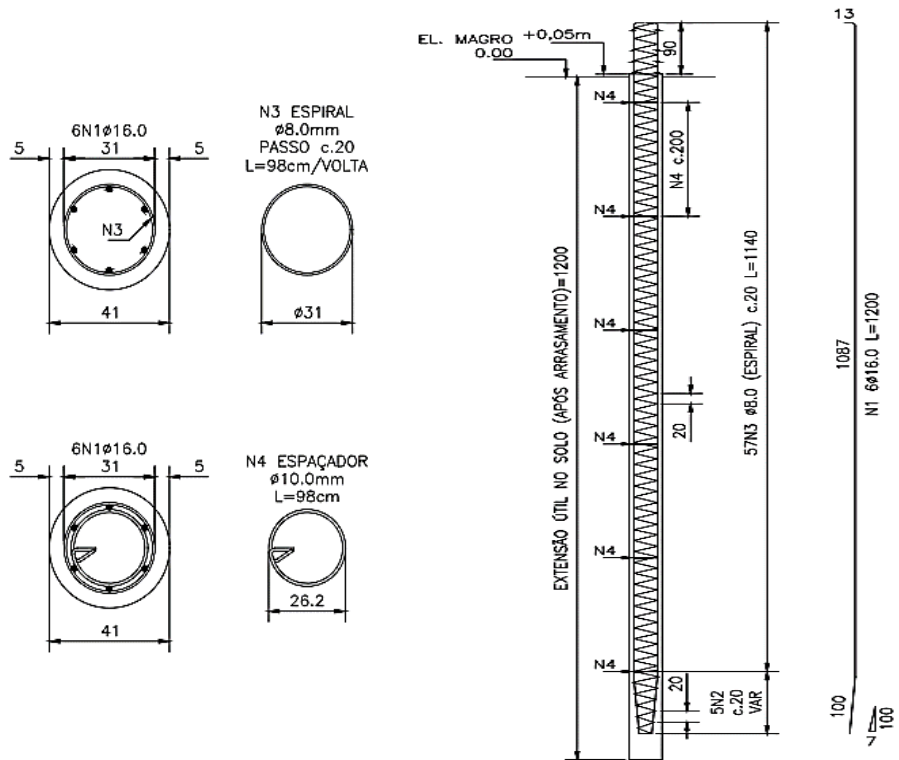


Figura 13 – Detalhamento da armadura das estacas tipo raiz 355/410

### 3.5 Custos de construção

Na tabela 04 abaixo, tem-se o comparativo de custos de construção das fundações considerando as duas tipologias, e foram adotados valores de venda (mão-de-obra, material, equipamentos e BDI). Na figura 14, tem-se gráfico com custos apropriados a ambas as tipologias. Os quantitativos tiveram origem nos projetos executivos, e os valores unitários são oriundos da planilha de custos padrão de uma construtora com grande expertise na construção de fundações de parques eólicos, e tem como data-base janeiro de 2022.

COMPARAÇÃO DE CUSTOS - FUNDAÇÃO DIRETA X INDIRETA POR UNIDADE				
FUNDAÇÕES INDIRETAS (ESTACA RAIZ)		R\$ 1.482.432,51		
Concreto de regularização e=10cm fck ≥ 15MPa	m <sup>3</sup>	36,31	R\$ 650,00	R\$ 23.601,50
Fornecimento e montagem de forma	m <sup>2</sup>	450,14	R\$ 510,00	R\$ 229.568,92
Concreto estrutural - fck = 30MPa sapata	m <sup>3</sup>	422,30	R\$ 690,00	R\$ 291.387,00
Concreto estrutural - fck = 45MPa pedestal	m <sup>3</sup>	36,50	R\$ 700,00	R\$ 25.550,00
Armadura - aço CA-50	kg	52.926,00	R\$ 9,50	R\$ 502.797,00
Escavação Material 1ª Categoria	m <sup>3</sup>	1.322,82	R\$ 8,50	R\$ 11.243,99
Reaterro com material local	m <sup>3</sup>	864,02	R\$ 24,00	R\$ 20.736,55
ESTACA RAIZ				
Mobilização do equipamento	un	1,00	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00
Estaca raiz em Solo 355/410 mm - 8m	m	320,00	R\$ 389,64	R\$ 124.686,14
Estaca raiz em Rocha 355/410 mm -4m	m	160,00	R\$ 601,41	R\$ 96.224,83
Armadura - aço CA-50 das estacas	kg	5.631,59	R\$ 10,70	R\$ 60.258,01
Argamassa - fck = 20 MPa para as estacas	m <sup>3</sup>	60,32	R\$ 573,74	R\$ 34.606,16
Arrasamento	un	40,00	R\$ 94,31	R\$ 3.772,40
ENSAIOS GEOTÉCNICOS NAS ESTACAS				
Quantidades de Estacas - Prova Carga Estática	um	1,00	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00
PIT - Prova de Integridade nas Estacas	un	40,00	R\$ 200,00	R\$ 8.000,00
FUNDAÇÕES DIRETAS		R\$ 1.251.126,50		
Concreto de regularização e=10cm fck ≥ 15MPa	m <sup>3</sup>	38,01	R\$ 650,00	R\$ 24.706,50
Fornecimento e montagem de forma	m <sup>2</sup>	529,30	R\$ 510,00	R\$ 269.943,48
Concreto estrutural - fck = 30MPa sapata	m <sup>3</sup>	544,80	R\$ 690,00	R\$ 375.912,00
Concreto estrutural - fck = 45MPa pedestal	m <sup>3</sup>	36,50	R\$ 700,00	R\$ 25.550,00
Armadura - aço CA-50	kg	53.716,00	R\$ 9,50	R\$ 510.302,00
Escavação Material 1ª Categoria	m <sup>3</sup>	1.574,27	R\$ 8,50	R\$ 13.381,28
Reaterro com material local	m <sup>3</sup>	992,97	R\$ 24,00	R\$ 23.831,24
ENSAIOS GEOTÉCNICOS - FUNDO CA VA				
Ensaio de Prova de Carga (NBR 6489)	un	1,00	R\$ 7.500,00	R\$ 7.500,00

Tabela 04 – Comparação de custos entre as tipologias estudadas

A troca de tipologia de fundações de aerogeradores, entre as soluções direta e indireta com uso de estaca raiz para o mesmo envelope de carga, apenas variando as condições geotécnicas, motivo da dita mudança, fica na ordem de 18%. Em outras palavras, a fundação indireta é mais onerosa que a direta.

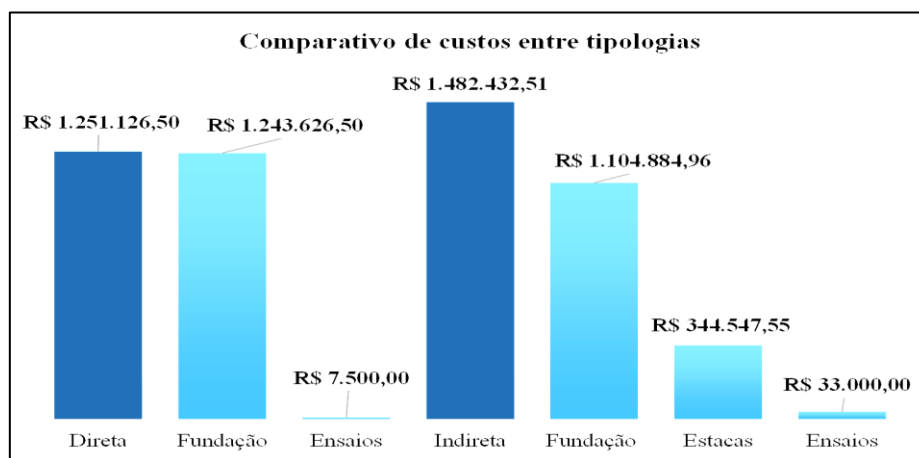


Figura 14– Custos de construção de ambas as tipologias

#### 4. Considerações finais

A energia com aproveitamento do vento, a eólica é uma realidade no Brasil, onde tem-se mais de 9500 aerogeradores instalados, representando mais de 24 GW de potência.

O cenário para os próximos anos é de crescimento, ou seja, muitos projetos eólicos serão implantados, principalmente na região nordeste e sul do Brasil.

A fundação dos aerogeradores, como já mencionado, encontra na tipologia direta, seu melhor custo-benefício, seja pela ausência do custo do estaqueamento, ou pela adição de mais uma etapa, que demanda tempo, e tempo, em projetos eólicos é precioso devido a quantidade de indiretos envolvidos em cada atividade, (segurança do trabalho, qualidade, infraestrutura de canteiro), etc.

Como já exposto, é comum a troca de tipologia (direta-indireta) durante o período da construção, e como apontado por este estudo apresenta um acréscimo somente de custos diretos na ordem de 18%.

Estes custos são geralmente repassados ao cliente final que busca justificativas técnicas e comprovações de custo para analisar e validar tal despesa. Este estudo teve como objetivo apresentar custos oriundos, de dois diferentes tipos de fundação, direta e indireta para um mesmo envelope de cargas, apenas alterando as condições geotécnicas e com isso criar uma ordem de grandeza de custos para esta problemática.

## **Bibliografia:**

**ABEEOLICA.** Associação Brasileira de Energia Eólica. 2022.

**BRAZ, E.** Identificação e caracterização de solos colapsíveis em fundações de aerogeradores de grande porte. Dissertação (mestrado) -- UDESC, CCT, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

**CUSTÓDIO, R.** Energia eólica para produção de energia elétrica. Editora Centro da memória da Eletricidade no Brasil. Rio de Janeiro, 2009.

**DNV/Risø.** 2002. Guidelines for design of wind turbines - Second Edition. Det Norske Veritas, Copenhagen, and Wind Energy Department, Risø National Laboratory. Denmark.

**MILITITSKY, J.; CONSOLI N. C.; SCHNAID, F.** Patologia das Fundações. Ed. 2. São Paulo, Oficina do texto, 2015.

**MILITITSKY, J.** Fundações de Torres, Aerogeradores, Linhas de Transmissão e Telecomunicação. Ed. 1. São Paulo, Oficina do texto, 2019.

**SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E.** Ensaios de campo e suas Aplicações à Engenharia. São Paulo, Oficina do texto, 2012.