



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO DE ENGENHARIAS  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VINÍCIUS SOUSA DE ALMEIDA

**ESTUDO DOS AEROGERADORES: APRESENTAÇÃO DAS ETAPAS  
CONSTRUTIVAS E MODELAGEM ESTRUTURAL POR MEIO DO MEF.**

MOSSORÓ

2024

VINÍCIUS SOUSA DE ALMEIDA

**ESTUDO DOS AEROGERADORES: APRESENTAÇÃO DAS ETAPAS  
CONSTRUTIVAS E MODELAGEM ESTRUTURAL POR MEIO DO MEF.**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Professor Doutor  
Raimundo Gomes de Amorim Neto

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Ae Almeida, Vinícius Sousa de .  
Estudo dos aerogeradores: apresentação das etapas construtivas e modelagem estrutural por meio do MEF / Vinícius Sousa de Almeida. - 2024.  
62 f. : il.

Orientador: Raimundo Gomes de Amorim Neto.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2024.

1. Parque eólico. 2. Aerogerador. 3. Método dos Elementos Finitos (MEF). 4. Ansys. I. Amorim Neto, Raimundo Gomes de , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VINÍCIUS SOUSA DE ALMEIDA

**ESTUDO DOS AEROGERADORES: APRESENTAÇÃO DAS ETAPAS  
CONSTRUTIVAS E MODELAGEM ESTRUTURAL POR MEIO DO MEF.**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Defendida em: 11 / 04 / 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Raimundo Gomes de Amorim Neto, Prof, Dr. (UFERSA)  
Presidente



Documento assinado digitalmente  
**RAIMUNDO GOMES DE AMORIM NETO**  
Data: 18/04/2024 21:11:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

John Elói Bezerra, Prof, Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente  
**FRANCISCO ALVES DA SILVA JUNIOR**  
Data: 18/04/2024 17:26:14-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Francisco Alves da Silva Junior, Prof, Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

JOHN ELOI  
BEZERRA

Digitally signed by JOHN ELOI BEZERRA  
DN: cn=JOHN ELOI BEZERRA  
Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, o=ICPEdu, c=BR  
Date: 2024.04.18 20:42:01 -03'00'

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente tenho de agradecer a minha falecida avó, Maria de Sousa Rebouças, a qual ajudou em minha criação e no incentivo ao estudo sendo considerada minha segunda mãe, e qual infelizmente não tive o prazer de mostra-lhe nenhuma de minhas conquistas acadêmicas no ensino superior, mas essa está sempre no meu coração, só tenho agradecimentos para com ela em relação do momento do meu nascimento ao trágico dia da sua partida.

Em relação a minha família só tenho gratidão, pelo apoio e incentivo. Em especial minha mãe, Edione Rebouças de Sousa, e meu Pai, Claudemir Vieira de Almeida, por sempre me incentivarem a continuar estudando e buscando a melhoria na qualidade de minha vida. A meu irmão Carlos Manuel Rebouças Almeida e Maria Letícia Rebouças da Silva, aos quais só tenho afeto e amor pelos mesmos.

Uma das frases de Mário Sergio Cortella é “Faça teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”, aprendi essa frase com uma grande mulher, amiga e também uma grande engenheira ao qual preciso citar e agradecer Raphaela Paes dos Santos por tudo que me ensinou, transmitiu e pelos incentivos. Uma segunda mulher tão grande quanto a primeira a qual preciso agradecer também Fabícia Maria de França, as duas além de me ensinarem bastante também tem uma grande contribuição para que eu tenha chegado até aqui neste momento, pois quando houve um período ao qual estava bastante indeciso se continuava o curso após a graduação do Bacharelado em Ciências e Tecnologia, elas foram as pessoas que mais me apoiaram a continuar e tenho 100% de convicção se não fosse por elas não estaria no curso.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa jornada acadêmica e que muitas vezes me encorajaram em diversos momentos de incertezas. Em especial, Lucas Estevão Rebouças e Claudeirton de Carvalho Oliveira, grandes amigos que levarei pelo resto da vida.

Aos meus amigos da Afaplan que me apoiaram, ensinaram e incentivaram a sempre melhorar, tenho muito respeito a todos e só agradecimentos em especial Alex Macedo, Douglas Pinheiro e Luís Rodolfo.

A senhorita Vitória Ellen Freitas Rebouças por todo apoio.

E por fim ao Prof. Doutor Raimundo Gomes de Amorim Neto por todo apoio, orientação e principalmente toda paciência durante essa jornada deste trabalho acadêmico.

## RESUMO

A presente monografia tem como objetivo principal apresentar os principais métodos de construção de um parque eólico e observar o comportamento de um aerogerador estrutural estático, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Para além do explicitado, pretende-se explicar os métodos construtivos envolvidos na construção de um parque, realizando-se a modelagem de um aerogerador através da ferramenta Ansys, versão estudantil, por fim, tem-se como objetivo a apresentação dos resultados obtidos com o método. A metodologia adotada parte de um estudo qualitativo de diversos autores e institutos relacionados ao campo da energia eólica, assim como quantitativo, perante a modelagem e os cálculos executados. A hipótese, por outro lado, busca compreender o comportamento do aerogerador frente a determinadas condições, sendo estas: o peso do aerogerador e as correntes de ar. Conclui-se abordando a eficiência do MEF para a análise de grandes estruturas elementares.

**Palavras-chave:** Parque Eólico, Aerogerador, Método dos Elementos Finitos (MEF), Ansys.

## **ABSTRACT**

The main objective of this monograph is to present the main construction methods of a wind farm and observe the behavior of a static structural wind turbine, using the Finite Element Method (FEM). In addition to what has been explained, the aim is to explain the construction methods involved in the construction of a park, modeling a wind turbine using the Ansys tool, student version, and finally, the objective is to present the results obtained with the method. The methodology adopted is based on a qualitative study by several authors and institutes related to the field of wind energy, as well as a quantitative study, based on the modeling and calculations performed. The hypothesis, on the other hand, seeks to understand the behavior of the wind turbine under certain conditions, namely: the weight of the wind turbine and air currents. It concludes by addressing the efficiency of the FEM for the analysis of large elementary structures.

**Keywords:.** Wind Farm, Wind Generator, Finite Element Method (FEM), Ansys.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Evolução da capacidade instalada do setor eólico em MW ..... | 18 |
| Figura 2 - Ensaio de sondagem percussão (SPT). ....                     | 20 |
| Figura 3 - Laudo de sondagem SPT .....                                  | 20 |
| Figura 4 - Camadas da terraplenagem. ....                               | 23 |
| Figura 5: Camadas de Revestimento Asfáltico.....                        | 24 |
| Figura 6 - Escavação de Fundação .....                                  | 25 |
| Figura 7 - Ensaio de PIT .....                                          | 28 |
| Figura 8 - Análise de Relatório Ensaio PIT .....                        | 28 |
| Figura 9 - Ensaio de prova de carga .....                               | 29 |
| Figura 10 - Fôrma e armação do bloco de fundação. ....                  | 30 |
| Figura 11: Execução de Concretagem da Fundação.....                     | 31 |
| Figura 12: Reaterro de Fundação.....                                    | 33 |
| Figura 13: Montagem de aerogerador .....                                | 34 |
| Figura 14: Montagem de aerogerador internamente.....                    | 34 |
| Figura 15: Tubulão de aço para montagem de aerogerador .....            | 35 |
| Figura 16: Aduela de concreto armado para despache .....                | 36 |
| Figura 17: Tramos finalizados .....                                     | 37 |
| Figura 18: Nacele.....                                                  | 38 |
| Figura 19: Montagem das pás ao HUB .....                                | 38 |
| Figura 20: Içamento do HUB e pás .....                                  | 39 |
| Figura 21: Projeto de base de aerogerador .....                         | 42 |
| Figura 22: Modelagem da Fundação .....                                  | 43 |
| Figura 23: Modelagem da Torre.....                                      | 44 |
| Figura 24: Modelagem da Nacele.....                                     | 45 |
| Figura 25: Modelagem do HUB .....                                       | 45 |
| Figura 26: Modelagem das Pás.....                                       | 46 |
| Figura 27: Modelagem Finalizada Aerogerador.....                        | 47 |
| Figura 28: Diagrama de carregamentos iniciais .....                     | 50 |
| Figura 29: Escala da deformação total .....                             | 51 |
| Figura 30: Análise da deformação total.....                             | 51 |
| Figura 31: Escala da deformação elástica equivalente .....              | 52 |
| Figura 32: Aerogerador sobre deformação elástica equivalente .....      | 53 |
| Figura 33: Simulação da tensão principal máximo .....                   | 54 |
| Figura 34: Vetores Principais de Estresse .....                         | 55 |
| Figura 35: Tensão Normal no Aerogerador.....                            | 56 |

## LISTA DE FÓRMULAS

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Fórmula 1 – Eq. Da Força Peso .....                    | 48 |
| Fórmula 2 – Eq. simplificada da pressão dinâmica ..... | 49 |
| Fórmula 2 – Eq. da Pressão Total.....                  | 49 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Geração e representatividade da fonte eólica no Brasil..... | 13 |
| Tabela 2: Instalação de parques eólicos no Nordeste em 2022 .....     | 14 |
| Tabela 3: Legislação ambiental .....                                  | 22 |
| Tabela 4: Configuração das aduelas .....                              | 36 |

## SUMÁRIO

|              |                                                                             |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                     | <b>13</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                      | <b>15</b> |
| 2.1          | GERAL.....                                                                  | 15        |
| 2.2          | ESPECÍFICOS .....                                                           | 15        |
| 2.3          | JUSTIFICATIVA.....                                                          | 15        |
| <b>3</b>     | <b>SETOR EÓLICO NO BRASIL.....</b>                                          | <b>17</b> |
| <b>4</b>     | <b>ETAPAS CONSTRUTIVAS DE UM PARQUE EÓLICO .....</b>                        | <b>19</b> |
| 4.1          | ENSAIO DE SONDAGEM SIMPLES A PERCUSSÃO (SPT) .....                          | 19        |
| 4.2          | LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO .....                                              | 21        |
| 4.3          | SUPRESSÃO VEGETAL.....                                                      | 21        |
| 4.4          | TERRAPLENAGEM .....                                                         | 23        |
| <b>4.4.1</b> | <b>Drenagem .....</b>                                                       | <b>24</b> |
| 4.5          | ESCAVAÇÃO.....                                                              | 25        |
| <b>4.5.1</b> | <b>Bloco de fundação.....</b>                                               | <b>26</b> |
| <b>4.5.2</b> | <b>Fundações diretas .....</b>                                              | <b>26</b> |
| <b>4.5.3</b> | <b>Fundações indiretas.....</b>                                             | <b>27</b> |
| <b>4.5.4</b> | <b>Armação .....</b>                                                        | <b>29</b> |
| <b>4.5.5</b> | <b>Concretagem .....</b>                                                    | <b>30</b> |
| 4.6          | CONTROLE DE CONCRETO.....                                                   | 31        |
| <b>4.6.1</b> | <b>Cura de concreto .....</b>                                               | <b>32</b> |
| 4.7          | REATERRO .....                                                              | 32        |
| 4.8          | MONTAGEM DO AEROGERADOR .....                                               | 33        |
| <b>4.8.1</b> | <b>Tipo tubulões.....</b>                                                   | <b>35</b> |
| <b>4.8.2</b> | <b>Tipo de concreto armado .....</b>                                        | <b>35</b> |
| <b>4.8.3</b> | <b>Conclusão da montagem .....</b>                                          | <b>37</b> |
| 4.9          | OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M) .....                                           | 39        |
| <b>5</b>     | <b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM UM ESTUDO DE CASO .....</b> | <b>41</b> |
| 5.1          | MODELAGEM DOS COMPONENTES .....                                             | 42        |
| <b>5.1.1</b> | <b>Fundação .....</b>                                                       | <b>43</b> |
| <b>5.1.2</b> | <b>Torre.....</b>                                                           | <b>43</b> |
| <b>5.1.3</b> | <b>Nacele.....</b>                                                          | <b>44</b> |

|       |                                       |    |
|-------|---------------------------------------|----|
| 5.1.4 | Rotor/HUB .....                       | 45 |
| 5.1.5 | Pás.....                              | 46 |
| 5.1.6 | Aerogerador .....                     | 46 |
| 6     | RESULTADO E DISCUSSÃO.....            | 48 |
| 6.1   | RESULTADOS DA MODELAGEM ESTÁTICA..... | 48 |
| 6.1.1 | Deformação total .....                | 50 |
| 6.1.2 | Deformação elástica equivalente.....  | 52 |
| 6.1.3 | Tensão principal máxima .....         | 53 |
| 6.1.4 | Tensão principal do vetor .....       | 54 |
| 6.1.5 | Tensão normal .....                   | 55 |
| 7     | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....             | 57 |
| 8     | REFERÊNCIAS .....                     | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Em primeira análise, o desenvolvimento do trabalho teve como base os métodos utilizados em obras de construção dos parques eólicos, percorrendo desde fases como sondagem do solo até a montagem do aerogerador, popularmente conhecido como “torre eólica”, tendo em vista que esse setor teve um grande crescimento desde o ano de 2009. Ademais, estimou-se no território Brasileiro um potencial de 143 GW de energia, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, não havendo mais atualização desde sua publicação em 2002. Sendo assim, tem-se que esse valor seria correspondente a torres de 50 m de altura e correntes de ar a 7 m/s, entretanto, vale ressaltar que nos dias atuais já existem modelos que passam dos 120 m de altura, podendo este número estar subestimado.

Além do exposto, em 2022 alcançou-se um recorde de instalação de 4,05 GW, o qual ultrapassou o estabelecido no ano anterior de 2021, de 3,82 GW, sendo que a geração representativa do setor se dá com maior força na região Nordeste, tanto em 2021 como em 2022, conforme demonstrado na Tabela 1, em consonância com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica).

Tabela 1: Geração e representatividade da fonte eólica no Brasil

| Região   | 2021          |                    | 2022          |                    | % de crescimento |
|----------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|------------------|
|          | Geração (TWh) | Representatividade | Geração (TWh) | Representatividade |                  |
| Sudeste  | 0,06          | 0,1%               | 0,06          | 0,1%               | 16%              |
| Sul      | 6,20          | 8,7%               | 5,95          | 7,6%               | -4%              |
| Nordeste | 63,20         | 88,7%              | 70,48         | 90,3%              | 12%              |
| Norte    | 1,76          | 2,5%               | 1,59          | 2,0%               | -10%             |
| Total    | 71,22         | 100%               | 78,08         | 100%               | 9,6%             |

Fonte: ABEEólica (2024).

É crucial destacar também, que a região Nordeste, no ano de 2022, teve uma representatividade de 90,3% e um crescimento de 12% se comparado ao ano de 2021. Com isso, pode-se concluir que no Brasil a região supracitada é a mais favorável para a instalação desse tipo de investimento, alcançando um total de 109 parques instalados em 2022, perante o estabelecido na Tabela 2.

Tabela 2: Instalação de parques eólicos no Nordeste em 2022

|                    | Soma de Potência (MW) | Número de Parques |
|--------------------|-----------------------|-------------------|
| BA                 | 1.674,06              | 52                |
| PI                 | 1.088,80              | 24                |
| RN                 | 983,89                | 26                |
| PE                 | 164,40                | 4                 |
| PB                 | 93,50                 | 2                 |
| CE                 | 71,40                 | 1                 |
| <b>Total Geral</b> | <b>4.054,05</b>       | <b>109</b>        |

Fonte: ABEEólica (2024).

Tendo em vista a construção de parques eólicos e seus impactos nos últimos anos, para prevenir situações costumeiras no Brasil - como a crise hidrelétrica de 2021 – faz-se de grande importância a compreensão dos métodos de desenvolvimento destes parques, desde o levantamento topográfico até a construção do aerogerador, para mais, o setor eólico se tornou, desse modo, uma importante fonte de energia para o país, em conformidade com a ABEEólica (2024), compondo cerca de 13,4% da matriz elétrica do Brasil em 2022.

Dada a significativa relevância desses empreendimentos, sendo assim, foi-se questionado o comportamento dessas construções. Dessa maneira, foi executada a avaliação do aerogerador pelo método dos elementos finitos (MEF), que teve sua origem em meados do século XX, obtendo potencial bastante reduzido devido a tecnologia da época e sendo mais explorado após a revolução digital e a implementação de computadores com maior capacidade de processamento.

Com o levantamento de dados, houve a possibilidade de dimensionar os elementos do aerogerador, com o envolvimento da confecção de seus componentes em 3D utilizando-se do software Ansys, em sua versão estudantil, para tal ação. Considera-se no desenvolvimento dos componentes, a aplicação de condições para tal análise, sendo por essa empregada, a estática do qual despreza a inércia por ter as forças lentas, considerando a geometria indeformável.

Ao longo do desenvolvimento da modelagem, é necessário atribuir aos elementos suas propriedades para posterior verificação, que o programa processará. Para desenvolver tais processos, tem-se que envolver o objeto em malhas, ao ponto que quanto maior o número de malhas, mais detalhado os resultados. Logo, alcança-se a conclusão de cada análise realizada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os principais métodos de construção de um parque eólico e observar o comportamento de um aerogerador estrutural estático, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Explicar os métodos construtivos envolvidos na construção de um parque eólico;
- Realizar a modelagem de um aerogerador utilizando a ferramenta Ansys, versão estudantil, para descobrir o comportamento frente a certas condições como correntes de ar e forças aplicadas;
- Demonstrar os resultados obtidos com o MEF e analisa-los.

### 2.3 JUSTIFICATIVA

O aumento exponencial no desenvolvimento do setor eólico nos últimos anos gera muitas dúvidas para quem não interage diretamente e/ou não possui discernimento em relação a este campo. Por ser um meio de energia limpa a mesma não gera CO<sub>2</sub>, o qual é um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa, além de contar com uma fonte “ilimitada” de geração de energia, as rajadas de vento.

Como uma fonte tão sustentável e de grande crescimento é de suma importância se conhecer como um investimento tão grande é desenvolvido e quais etapas as quais ele

necessita para sua realização.

Perante o explicitado, é importante entender também aspectos do seu dimensionamento estrutural, de acordo com os motivos citados anteriormente será utilizado o software Ansys, em sua versão estudantil, para a modelagem da estrutura de um aerogerador, utilizando do método dos elementos finitos (MEF) e a análise dos resultados.

Assim, possibilitando-se ter noção do comportamento dessas máquinas com os dados a serem adquiridos em relação às condições de contorno, que serão as correntes de ar e o peso próprio do aerogerador estimado em 250 toneladas. Ademais, será utilizada a métrica de uma corrente de ar a 7 m/s, baseando-se as fixações do aerogerador e forças relacionadas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2002.

Em relação aos dados obtidos, será possível ter noção do comportamento da máquina, podendo assim averiguar as condições em diversos ambientes com fatores que podem favorecer ou desfavorecer seu comportamento devido a região. Por este motivo, é evidente a necessidade de se compreender o processo de desenvolvimento de um parque eólico, visualizando cada uma de suas fases, tendo em vista sua complexibilidade na fase de implantação.

### 3 SETOR EÓLICO NO BRASIL

O setor eólico brasileiro tem data de início no ano de 1992, com a instalação de uma turbina de 225 kW em Fernando de Noronha/PE, quando o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) realizaram uma parceria com um instituto de pesquisa Dinamarquês. Após 7 anos, em 1999, entrou em operação a primeira usina no Ceará, localizada na Praia de Taíba, com capacidade de 5 MW, possuindo dez aerogeradores de 44 m e 500 kW instalados (Moreira, *et al.*, 2013).

Mesmo após a implantação da primeira usina em 1999, o setor eólico no país não ganhou muita relevância até meados de 2001, quando houve a maior crise energética enfrentada pelo Brasil. Em decorrência da crise, foi lançado o Programa Emergencial de Energia Eólica (Proeólica), que corroborou para o setor a respirar novamente e dá seus primeiros passos em abril de 2002 com o surgimento do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), que estabeleceu um prazo mínimo de vinte anos para a contratação e a aquisição de energia produzida por fontes eólicas, até o limite de 1100 MW.

O setor ainda teve um grande impulso do Centro de Referências Para Energia Solar e Eólica (Creseb-Cepel), que em 2002 divulgou o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, que considerou a altura média das torres em 50 m acima do nível do mar e com a velocidade média superior a do vento, a 7 m/s. Além disso, estimou-se um potencial de 143 GW, tendo em vista que nos últimos anos a altura média das torres é superior a 100 m, logo o potencial do país se torna exponencialmente maior que o constatado no documento.

No ano de 2004, com o Novo Modelo do Setor Elétrico (Lei 10.848/2004), o Programa de Incentivo às Forças Alternativas (Proinfa) ganhou mais força, sendo relançado pelo Governo Federal e adotando o método de transferência de incentivos, a partir de leilões específicos para setor renováveis ou próprios do setor, com o intuito de aumentar a concorrência perante as outras fontes de geração de energia presente no mercado. No período de 2004 a 2009, o desenvolvimento tecnológico no setor mundialmente teve grande avanço o que o tornou mais viável financeiramente no país.

Devido aos avanços tecnológicos e para consolidar o setor, em 2009 foi realizado pelo Governo Federal um leilão exclusivo, 71 projetos foram leiloados, com 1,8 GW, tendo o preço médio de R\$ 148,39 MW/h. A realização do leilão obteve tamanho sucesso e, em 2011, o leilão realizado foi constituído de 2,9 GW em projetos.

O setor se tornou tão próspero que em 2018 atingiu a marca de 2,022 GW instalados em todo o país, tornando o Brasil o oitavo no ranking mundial do desenvolvimento eólica, somente atrás da China (188,232 GW), dos Estados Unidos (89 GW), da Alemanha (56,1 GW), da Índia (32,8 GW), da Espanha (23,2 GW), do Reino Unido (18,8 GW) e da França (13,7 GW), dados apresentados pela ABEEólica. A pesquisa da Associação Brasileira de Energia Eólica, afirmou, ainda, que o desenvolvimento crescente na área tornou o Brasil, em 2022, o sexto colocado no ranking mundial do desenvolvimento eólico, com 25,6 GW, estando somente atrás da China (310,6 GW), dos Estados Unidos (134,3 GW), da Alemanha (56,8 GW), da Índia (40 GW) e da Espanha (28,3 GW). Isto posto, como pode-se observar na Figura 1, é nítido o crescimento exponencial no Brasil nas últimas décadas.

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada do setor eólico em MW



Fonte: ABEEólica (2024).

## 4 ETAPAS CONSTRUTIVAS DE UM PARQUE EÓLICO

O desenvolvimento dos parques eólicos se dá por diversas etapas, sendo uma das mais importantes a investigação do solo. Esta etapa, irá determinar quais tipos de fundação serão utilizadas na construção do aerogerador, adiante, será executado o levantamento topográfico para o desenvolvimento do projeto referente ao parque, somado a estas, tem-se a supressão vegetal, em que se necessita das Licenças Prévias, logo após há a Implantação e a Operação, que permitem todo o desenvolvimento do parque.

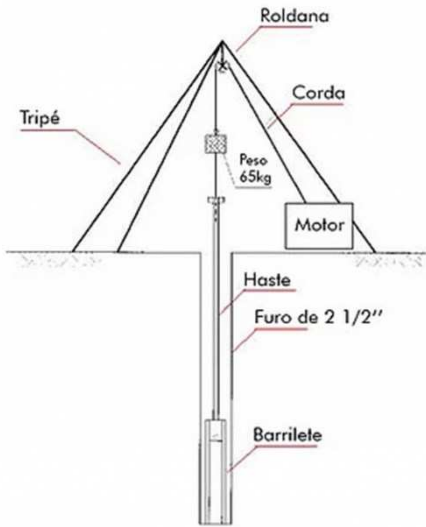
Dando continuidade, a terraplenagem emerge como a próxima etapa, sendo utilizada para a construção dos acessos às áreas onde o aerogerador será implantado e, por fim, a construção do aerogerador, em que dependendo do modelo, metálico ou concreto, teremos uma diferença na velocidade de montagem, dado que os de concreto necessitam ser construídos em formato cônico *in loco*, com os segmentos que o compõe. Entretanto, os de material metálico já vem no formato explicitado anteriormente, por conta de seu peso mais leve.

### 4.1 ENSAIO DE SONDAGEM SIMPLES A PERCUSSÃO (SPT)

O ensaio de sondagem simples a percussão (SPT), é necessário para estudar as características do solo em que será realizada a implantação do parque eólico, assim como qualquer outro ensaio de investigação geotécnico. Para Ribeirão (2008, p. 7), o SPT tem o objetivo de fixar o traçado e prolongar-se na fase de Projeto de Execução, para definir com mais precisão a sequência de trabalhos para a solução adotada.

Assim sendo, o SPT, regulamentado pela Norma Regulamentadora (NBR) 6484/2020 (Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio) consiste na utilização de um tripé, conjunto de trado, um peso de 65kg e uma haste de perfuração, esta última receberá os golpes aplicados pelo peso, que estará a uma altura máxima de 75 cm da haste durante a aplicação dos golpes, em conformidade com o demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Ensaio de sondagem percussão (SPT).



Fonte: Thomas (2021).

Este ensaio de percussão possui como objetivo a identificação do perfil geotécnico do terreno em foi realizado, conseguindo as informações granulométricas, plasticidade, cor e origem, no caso de solos residuais ou transportados. Para além disso, tem-se estas informações plotadas em um laudo, perante o demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Laudo de sondagem SPT

| PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAAGEM A PERCUSSÃO (SPT)                                       |       |                  |            |                  |                             |              |                                                             |                        |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|------------------------|----------|
| Ensaio realizado conforme a NBR 6484/01 - Sondagens de simples reconhecimento com SPT. |       |                  |            |                  |                             |              |                                                             |                        |          |
| Cliente: <u>Concessionária Rota das Bandeiras</u>                                      |       |                  |            |                  | Furo: <b>SP-1011</b>        |              | Folha: <b>1 / 1</b>                                         |                        |          |
| Obra: <u>Perimetral de Ruínas</u>                                                      |       |                  |            |                  | Cota(m): 768,581            |              |                                                             |                        |          |
| Local: <u>Ruínas/SP</u>                                                                |       |                  |            |                  | Coordenadas: N= 306466,0000 |              |                                                             |                        |          |
| Data: Início: 13/01/2018<br>Fim: 14/01/2018                                            |       |                  |            |                  | E= 140545,0000              |              |                                                             |                        |          |
| RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO (S.P.T.) 30cm FINAIS                                          | N SPT | NUMERO DE GOLPES | ESCALA (m) | PROF. CAMADA (m) | PERFIL GEOLOGICO            | INTER. GEOL. | DESCRIÇÃO DO MATERIAL                                       | COMPOSIÇÃO DO MATERIAL | N.A. (m) |
| 0 10 20 30 40 50                                                                       |       |                  | 0          | 0,00             |                             |              |                                                             |                        |          |
|                                                                                        | 2/45  | 1/30 1/15        |            | 1,75             |                             | AL           | ARGILA ARENO-SILTOSA, CINZA ESCURA, COM FRAGMENTOS VEGETAIS | MTO. MOLE.             |          |
|                                                                                        | 2     | 1/15 1/15 1/15   |            |                  |                             |              |                                                             | MTO. MOLE.             |          |
|                                                                                        | 2/25  | 1/20 1/15 1/10   |            | 4,90             |                             | SR           | ARGILA, MUITO ARENOSA, CINZA CLARA, COM PEDREGULHOS (FINOS) | MTO. MOLE.             |          |
|                                                                                        | 3     | 1/15 1/15 2/15   |            |                  |                             |              |                                                             | MOLE                   |          |
|                                                                                        | 5     | 2/15 2/15 3/15   |            |                  |                             |              |                                                             | PCO. COMB.             |          |
|                                                                                        | 7     | 2/15 3/15 4/15   |            |                  |                             |              |                                                             | PCO. COMB.             |          |
|                                                                                        |       |                  |            |                  |                             |              |                                                             | MED.                   |          |

Fonte: Suportesolos (2023).

## 4.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

A topografia é uma ciência que está ligada aos estudos da geometria aplicada. Tal estudo é importante para observar e resolver problemas ligados ao campo, cujas soluções requerem associação prática ao problema com a teoria (Borges, 1992). Esta etapa é realizada por diversos tipos de equipamentos, desde as estações totais aos mais recentes meios de utilização para topografia, os Veículos Aéreos não Tripulados (VANTS), que possuem alta tecnologia.

Os levantamentos planialtimétricos são fundamentais para a visualização de acidentes geográficos e outras características sobre a superfície do relevo, evidenciando, então, superfícies íngremes e planas. Essas características são fundamentais nas atividades de planejamento do uso desta superfície nos mapeamentos (Borges, 1992), como as áreas utilizadas no desenvolvimento de parques eólicos são de larga escala, esse levantamento é de suma importância para que haja a construção.

## 4.3 SUPRESSÃO VEGETAL

A supressão vegetal consiste na retirada de vegetação presente no local do empreendimento, tendo em vista que a retirada não pode ocorrer de forma descontrolada, sendo necessário o desenvolvimento do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), os quais são utilizados para avaliar e precisar a intensidade e o dimensionamento do impacto ambiental causado por esse tipo de atividade.

Para empreendimentos desse tipo, é necessária a obtenção de três tipos de licenças, sendo estas a Licença Prévia (LP), sendo responsável por definir os aspectos do controle ambiental da empresa, Licença de Implantação (LI), que garante a execução do projeto conforme especificado na LP, sendo que qualquer alteração deste deverá ser encaminhada ao órgão ambiental responsável e, por fim, a Licença de Operação (LO), possuindo a responsabilidade de autorização para o funcionamento do empreendimento quando este está finalizado.

Outrossim, o licenciamento ambiental pode ocorrer por diversos órgãos dependendo da competência destes, por exemplo, o município de implantação dos projetos tem a competência referente a esses licenciamentos localizados em seus territórios, quando este município não possuir um órgão ambiental competente para a função, esta passa para o estado e, caso os estados não dispuserem de tal órgão, a instância responsável passa a ser a união.

De acordo com Guimarães (2020), todas as leis necessárias para as questões ambientais de projetos eólicos estão presentes na Tabela 3, situada abaixo.

Tabela 3: Legislação ambiental

| RESOLUÇÃO                    | TEMA                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lei nº 6938/81               | Política Nacional do Meio Ambiente                                                                                                                                                                                     |
| Resolução CONAMA nº 001/1986 | Avaliação de Impacto Ambiental                                                                                                                                                                                         |
| Resolução CONAMA nº 237/1997 | Licenciamento Ambiental baseadas na PNMA                                                                                                                                                                               |
| Resolução CONAMA nº 006/1987 | Dispõe sobre o licenciamento ambiental de obras do setor de geração de energia elétrica de grande porte (Dando ênfase a usinas hidrelétricas, usinas termelétricas e linhas de transmissão).                           |
| Resolução CONAMA nº 279/2001 | Licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, como Usinas Eólicas e outras fontes alternativas de energia.                                             |
| Lei Complementar nº 140/2011 | Fixa normas para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum.                                                   |
| Resolução CONAMA nº 462/2014 | Licenciamento ambiental de Usinas eólicas em superfície terrestre (RAS x EIA/RIMA).                                                                                                                                    |
| Decreto nº 8.437/2015        | Regulamenta a Lei Complementar nº 140, para estabelecer as tipologias de empreendimentos e atividades cujo licenciamento ambiental será de competência da União, dentre eles empreendimentos eólicos <i>offshore</i> . |

**Fonte:** Guimarães (2020).

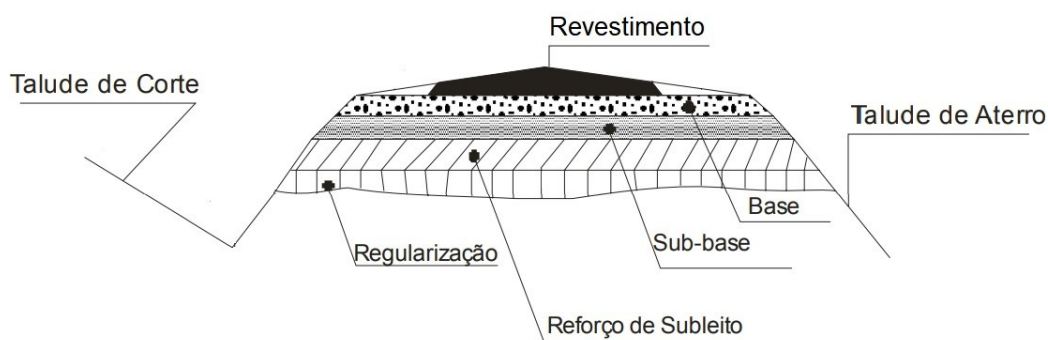
#### 4.4 TERRAPLENAGEM

A terraplenagem é a operação destinada a conformar o terreno existente aos gabaritos definidos em projeto. De maneira geral ela engloba os serviços de corte (escavação de materiais) e de aterro (deposição e compactação de materiais escavados). A conjugação desses dois serviços tem por finalidade proporcionar condições geométricas compatíveis com o volume e tipo dos veículos que irão utilizar a rodovia (Pereira e Djalma, 2015).

Sendo necessária a execução das etapas responsáveis por receber as cargas derivadas do tráfego de veículos, estas são formadas pelas camadas de subleito (terra natural), reforço de subleito, sub-base e base, dessa maneira, o solo natural compactado forma a fundação dos acesos e demais áreas.

Em casos em que o solo natural tem uma baixa capacidade de suporte, se faz necessária a utilização do reforço do subleito, isto é, ela não é aplicada a todos os casos, além do que é necessário a execução dessa camada por medidas de segurança e por razões econômicas, pois se camadas maiores de sub-base e base forem aplicadas, esse problema será resolvido, mas não de forma econômica como o reforço. Perante o demonstrado no esquema presente na Figura 4.

Figura 4 - Camadas da terraplenagem.

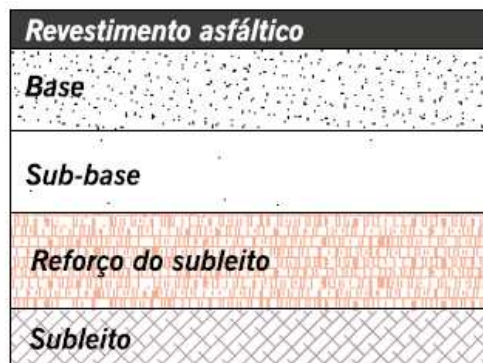


**Fonte:** Guia da engenharia (2019).

A sub-base é responsável por transferir as cargas recebidas para a fundação, ou seja, para o subleito, além de ter função de drenagem de infiltrações como também acessões capilares. A base se torna a última etapa da execução, pois raramente é realizado o revestimento asfáltico nesse tipo de obra, logo esta é a camada responsável por receber todas

as cargas e dissipá-las às etapas produzidas anteriormente, tem-se a ilustração da constituição destas camadas na Figura 5.

Figura 5: Camadas de Revestimento Asfáltico



Fonte: BERNUCCI, Liedi B. et al.

#### 4.4.1 Drenagem

É cabível ressaltar que independente da região há temporadas de chuvas, desse modo, é necessário tomar previsões para quando essas temporadas chuvosas chegarem. Já que o acúmulo de água causa complicações para o acesso de veículos, dado que a base com o acúmulo excessivo de água torna a aderência do veículo com o solo baixa, sendo este só um exemplo do que pode ocorrer devido ao acúmulo de água.

Tendo em vista que a água percorre o caminho mais viável, tem-se a necessidade da construção de um sistema de drenagem, em que possa ocorrer o escoamento.

##### 4.4.1.1 Superficial

O sistema de drenagem superficial é composto, basicamente, dos seguintes dispositivos: canaleta longitudinal, canaleta transversal de descida, caixas coletoras e de passagem dissipadores de energia (GEO-RIO apud CAVALCANTE, 2000). Para obras desse gênero é mais usado as canaletas para o escoamento da água.

#### 4.4.1.2 Profunda

O principal tipo de drenagem profunda são os bueiros. Os bueiros, geralmente constituídos de tubos de concreto ou PEAD (Polietileno de Alta Densidade), são executados em cotas sob o solo, respeitando o cobrimento especificado. (Duarte, 2021)

### 4.5 ESCAVAÇÃO

Etapa a qual é executada após delimitação do local onde será efetuada a fundação, com o apoio de equipes topográficas, se faz necessário o uso de uma escavadeira hidráulica para escavar a região até a cota determinada pelos projetistas, como destacado na figura 6.

Figura 6 - Escavação de Fundação



**Fonte:** Gel Eng, 2022.

Após a escavação concluída, é crucial a execução do nivelamento do terreno e compactação deste. Após a conclusão desta etapa, é executada uma camada de concreto para a regularização, sendo esta a “laje” de regularização, sendo executada a fundação posteriormente.

#### **4.5.1 Bloco de fundação**

A estrutura do bloco de fundação se torna um dos principais componentes referentes ao projeto, mantendo, então, todas as características de uma fundação empregada em obras mais comuns como ressaltado por Lôbo (2018, p. 20):

Sabe-se que a fundação de uma estrutura é o elemento construtivo responsável por transferir os carregamentos estáticos – como peso próprio – bem como os dinâmicos – como o vento e, eventualmente, a ação sísmica – para o solo. No caso da fundação de um aerogerador, esta verdade se mantém, havendo, entretanto, peculiaridades envolvidas relativas ao tipo de estrutura – o aerogerador – se diferenciar bastante das estruturas mais comuns na engenharia civil.

Para a implantação da fundação é necessário primeiro o resultado da investigação geotécnica do solo local, após esses dados é que se pode escolher o melhor tipo fundação a ser implementada na região, sendo direta ou indireta (profunda). Para a implantação de fundações diretas, segundo Milititsky (2019, p. 22), “a locação de parques de aerogeradores ocorre em uma região com horizontes rochosos e favoráveis a esse tipo de solução, especialmente quando os horizontes são de pequena profundidade ou superficiais”.

De acordo com o exposto, o solo tende a ter maior resistência para suportar as tensões transmitidas pelo aerogerador que será implantado, mesmo que na maioria dos casos esse tipo de solução tenda a não ser utilizada pelas características dos solos não atenderem aos requisitos e haver a necessidade de implementar fundações indiretas, as quais são financeiramente mais caras para o empreendimento.

#### **4.5.2 Fundações diretas**

Devido ao poder e tipo de carga, é necessária uma boa resistência do solo para a execução de fundações diretas, além do dimensionamento para a execução destas, sendo em sua grande maioria empregada as sapatas para as fundações.

### 4.5.3 Fundações indiretas

Como já mencionado, se as características geotécnicas não atenderem os requisitos para a aplicação de fundações diretas rasas, será executada as indiretas, nestas se utiliza dos métodos de estacas para reforçar a fundação. As comumente utilizadas são de hélice contínua, que contém alta produtividade, além da elevada capacidade de carga nas estacas.

#### 4.5.3.1 Ensaio de PIT

O ensaio de integridade PIT, ou Pile Integrity Test, tem como objetivo a verificação de estacas executadas, neste cenário averigua-se as propriedades de resistência do material e se há comprometimento maior ou igual a 20%, tendo como regra geral, que a relação entre o comprimento e o diâmetro da estaca não seja superior a 30, para que o ensaio tenha um funcionamento ótimo mesmo se a estaca não atingir essa condição o diagnóstico poderá ser limitado, mas não impede a sua utilização.

O presente ensaio não é normatizado por órgãos brasileiros, mesmo estando presente no país desde a década de 90, entretanto, em diversos países segue normatizado, como no caso dos Estados Unidos, pela American Society for Testing and Materials (ASTM) D-5882-96.

A execução deste ensaio pode ser considerada rápida e simples, sendo necessário que antes de sua execução seja realizada o arrasamento das estacas para ampliar a qualidade. Posteriormente, são utilizadas ondas de baixa deformação, sendo propagadas golpeando o topo das estacas com um martelo e um acelerômetro para a captação destas, a interpretação se dá pela alteração da propagação da onda realizada pelo equipamento, diante do exposto na Figura 7.

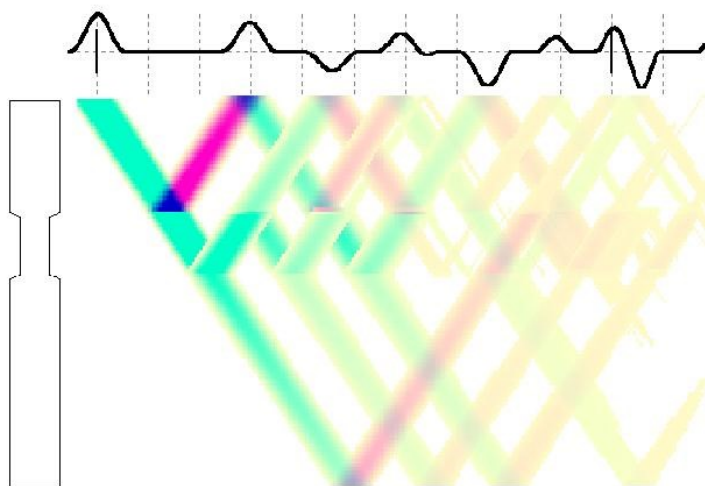
Figura 7 - Ensaio de PIT



Fonte: Bungenstab (2020)

Após a aplicação, se obtém os relatórios que através de gráficos demonstraram as informações referente à estaca analisada, sendo que estes podem ter diferentes interpretações, explicitado na Figura 8.

Figura 8 - Análise de Relatório Ensaio PIT



Fonte: PDI Engenharia (2023)

É possível concluir, a partir da Figura 8, que quando houver uma diminuição do diâmetro da estaca, o gráfico apresentará um pico para cima e, no caso do aumento deste parâmetro, haverá a disposição do gráfico para baixo. Neste cenário, estes fatores podem indicar uma falha de concretagem, além da verificação de elementos, tais como tamanho total da estaca, sendo necessário ter uma atenção nos pontos de estreitamento, que são capazes de diminuir a tolerância pré-estabelecida pelas tensões da estaca.

#### 4.5.3.2 Ensaio de prova de carga

Após as execuções das estacas é necessário avaliar se estas são apropriadas para receber todos os esforços requeridos, por isso se faz necessário o ensaio de Prova de Carga Estática (PCE), presente na Figura 9. Este ensaio simula em até duas vezes o valor previsto para a carga de trabalho recepcionada pela estaca.

Figura 9 - Ensaio de prova de carga



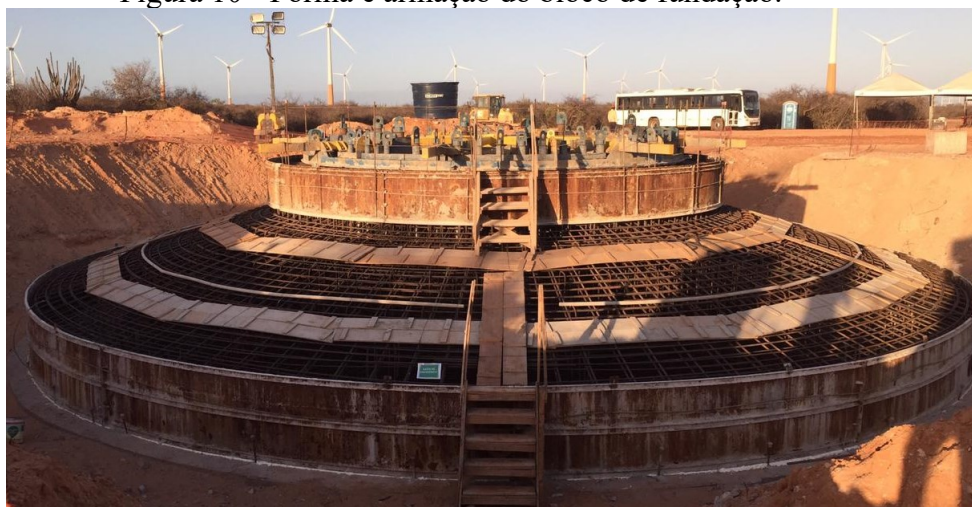
**Fonte:** Google Imagens (2023).

Esse ensaio tem previsão de execução de no mínimo 12 horas em que serão aplicados carregamentos sucessivos, em estágios crescentes, da ordem de 20% da carga de trabalho, registrando o deslocamento correspondente.

#### 4.5.4 Armação

Após a finalização de todos os ensaios e liberação, é realizada conforme o projeto a armação da fundação, a qual, segundo Estevão (2022), a montagem de toda a armação dura em média 5 dias com 20 colaboradores trabalhando. Sendo assim, a Figura 10 mostra a armação e montagem da forma finalizados e liberada para a concretagem.

Figura 10 - Fôrma e armação do bloco de fundação.



**Fonte:** Estevão, Lucas (2022).

Assim, é necessário primeiramente, antes da liberação, a conferência da armação de uma fundação do aerogerador, sendo uma etapa fundamental no processo de construção desse tipo de estrutura. A fundação é responsável pela ancoragem da torre e subsequentemente das pás do aerogerador, garantindo sua estabilidade e segurança.

A realização de uma conferência adequada da armação da fundação, consiste na verificação minuciosa de todos os elementos estruturais, desde a base até os pontos de fixação do aerogerador, incluindo a inspeção visual de todos os componentes, desde a medida da geometria até o aperto correto dos parafusos e conexões.

#### **4.5.5 Concretagem**

A concretagem de uma fundação necessita aproximadamente de 450 m<sup>3</sup> de concreto, que serão lançados com a utilização de uma bomba lança - demonstrada na Figura 11 - de concreto, sendo abastecida por caminhões betoneiras, que suportam um volume de 8 m<sup>3</sup> do concreto.

Figura 11: Execução de Concretagem da Fundação



**Fonte:** Estevão, Lucas (2022)

O procedimento adotado para a concretagem, perante o explicitado por Estevão (2022), é realizar uma única concretagem com duração média de 12 horas, executada por um caminhão betoneira, assim como também, o teste de abatimento de tronco de cone e a medição da temperatura do concreto antes do lançamento. Foram adotados parâmetros mínimos para estes ensaios, tendo o abatimento em  $140 \pm 2$  mm e a temperatura máxima atingida pelo concreto em  $25^\circ\text{C}$ , sendo necessária a obtenção destes dois parâmetros para a liberação do concreto presente na betoneira.

#### 4.6 CONTROLE DE CONCRETO

Uma importante etapa da execução do parque eólico é o controle de concreto, que tende a ser realizado de forma muito rígida, já que a conclusão da fundação depende da boa execução desta etapa, utilizando-se de diversas formas de prevenção de patologias que possam ocorrer, como fissuras e nichos de concretagem.

O concreto, nessa etapa, tende a ser lançado em camadas, capazes de alcançar elevadas temperaturas. Um dos métodos mais difundidos no setor eólico é a utilização de gelo em escamas no concreto fresco para reduzir esse aumento de temperatura.

O resfriamento, por sua vez, se dá utilizando-se de métodos como o lançamento de água, para que o concreto lançado não ultrapasse a temperatura de 25°C, assim como a utilização de cimento com baixo calor de hidratação (BC).

#### **4.6.1 Cura de concreto**

Os cuidados necessários para a cura do concreto da fundação, se dá por causa da evaporação da umidade presente, em que se esta evaporar em um curto período, tende a criar fissuras e até nichos de concretagem.

Dessa forma, é possível a utilização de 3 tipos de cura, podendo ser utilizadas no mínimo por 7 dias. A úmida (bastante utilizada) necessita da utilização de uma manta geotêxtil, que tem como principal função é impedir que a água nos vazios capilares evapore. Já a cura química se dá pela aplicação de uma película sobre a superfície do concreto, podendo ser empregue em até 12 horas após o lançamento do concreto, e por fim, a cura térmica, possuindo como objetivo a utilização de aplicações de altas temperaturas no concreto, sendo estas controladas e programadas, neste aspecto, são bastante utilizadas na indústria de pré-moldados.

#### **4.7 REATERRO**

Após a cura da fundação ser finalizada é necessário realizar o reaterro da fundação, em que passará pelo processo de compactação do solo ao redor, sendo demonstrado na Figura 12, geralmente com a utilização de maquinários como placas vibratórias e o sapinho, somente em casos onde as máquinas de grande porte como rolo compactador fica impossibilitado de ser utilizado.

Figura 12: Reaterro de Fundação



Fonte: Google Imagens (2023)

#### 4.8 Montagem do Aerogerador

A etapa de montagem do aerogerador se baseia basicamente em empilhar os segmentos da torre. Nesta etapa se utiliza de guindastes, mudando sua geometria para atender a fase em que se encontra o segmento, como salientado na Figura 13.

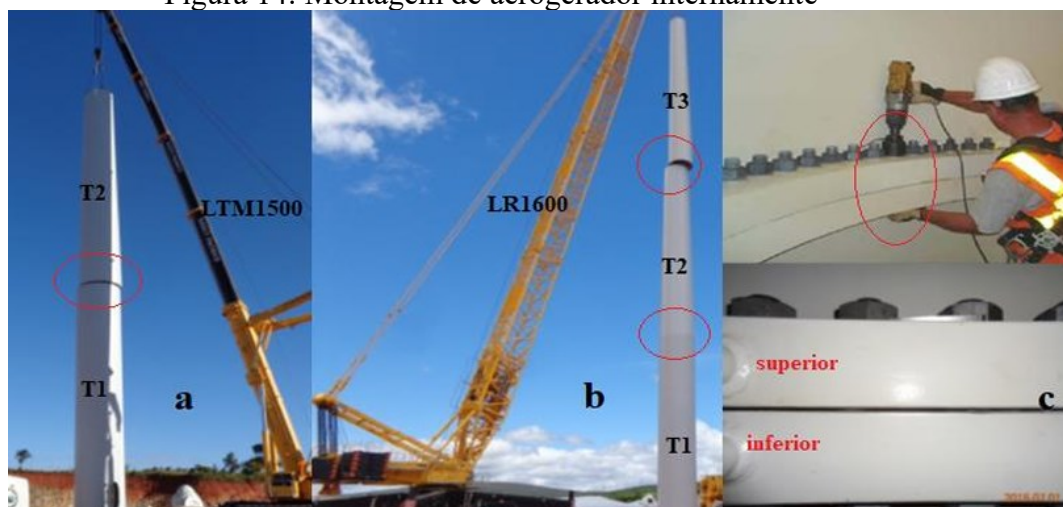
Figura 13: Montagem de aerogerador



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para os segmentos utilizados temos os de aço, tubulões ou concreto armado, os Tramos, sendo para cada caso parafusadas internamente entre os segmentos, como apresentado na Figura 14.

Figura 14: Montagem de aerogerador internamente



Fonte: Filho, Dário (2017)

#### 4.8.1 Tipo tubulões

Segundo Santos e Núria (2013), as boas propriedades do aço, surgiram com as torres em configuração geométrica tubular. Contendo a facilidade de serem mais simples e rápidas para a montagem em relação as de concreto armado, apresentada na Figura 15.

Figura 15: Tubulão de aço para montagem de aerogerador



Fonte: Google Imagens (2023)

#### 4.8.2 Tipo de concreto armado

Os tramos, como são denominados, são as faces cônicas do aerogerador para se realizar a montagem da torre, todavia, estes são formados por aduelas, de acordo com a Figura 16, de concreto armado em que cada segmento tem uma quantidade, perante o indicado na Tabela 04.

Figura 16: Aduela de concreto armado para despacho



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 4: Configuração das aduelas

| Tramo | Nº de Aduelas |
|-------|---------------|
| 1     | 6             |
| 2     | 4             |
| 3     | 4             |
| 4     | 4             |
| 5     | 3             |
| 6     | 2             |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Estas configurações tendem a ter mais etapas se comparado as torres de aço, como a montagem do tramo utilizando o método de coloca-los sobre superfícies niveladas, adicionando um limitador de profundidade para massas, como o tarucel, posteriormente se aplicando a camada de resina para confinar o grout na junta vertical, representada na Figura 17.

Figura 17: Tramos finalizados



**Fonte:** Autoria Própria (2022)

Após o grout atingir a resistência, é iniciada a montagem dos tramos. E, após montagem, executa-se o grout nas juntas horizontais no interior da torre. Realiza-se, assim, a cofragem/forma e aplicavam o grout até preencher completamente a junta.

#### **4.8.3 Conclusão da montagem**

Após a etapa de montagem da torre do aerogerador se adiciona a Nacele, um compartimento em que é adicionado todos os mecanismos necessários para o funcionamento do aerogerador, como a caixa de engrenagem, um eixo para acionar os componentes e o gerador. Em conformidade com o demonstrado na Figura 18, em que está sendo preparada para a instalação.

Figura 18: Nacele



**Fonte:** Autoria Própria (2022)

Após a instalação dos componentes, como o gerador já citado, se iniciava a montagem do HUB, o rotor do aerogerador, juntamente com as pás, para finalizar a etapa de montagem da torre, perante o explicitado nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Figura 19: Montagem das pás ao HUB



**Fonte:** Autoria Própria (2022)

Figura 20: Içamento do HUB e pás



**Fonte:** Autoria Própria (2022)

#### 4.9 Operação e Manutenção (O&M)

O aerogerador é uma construção que tem como principal função absorver parte da potência cinética do vento por um rotor aerodinâmico, convertendo em potência dinâmica que, por sua vez, é transformada em potência elétrica por um gerador.

Tendo em vista que as máquinas sofrem desgastes consideráveis durante a sua operação, logo a implementação do O&M tem enquanto principal objetivo da gestão, da operação e manutenção dos parques eólicos minimizando os custos totais por unidade de energia gerada durante a vida útil do empreendimento (Santiago, 2012), sendo assim, a vida útil média do equipamento é de 20 anos.

Para a realização desse trabalho é necessária uma equipe de pequeno porte para o monitoramento, supervisão e controle dos equipamentos, carregando-se a responsabilidade das manutenções, sendo as manutenções planejadas dos tipos preventivas, preditivas e corretivas, além dos casos de manutenções não-planejadas, as quais tem como sua justificativa principal ser uma corretiva.

Após a construção, essa é a atividade que estará em funcionamento com o parque eólico ligada diretamente a ele, pois se as atividades de O&M estiverem em boa conformidade, o

risco de algum equipamento necessitar de uma manutenção não-planejada será menor, o que acarretará em um desempenho operacional maior, implicando, então, positivamente no setor financeiro da empresa.

## 5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM UM ESTUDO DE CASO

Ao decorrer das etapas necessárias para a construção de um parque eólico, desde seus ensaios até a finalização do aerogerador, tende-se a questionar como é o comportamento dessas máquinas no meio onde se encontram. Portanto, é necessário a utilização de softwares para simulações desses casos; um bom exemplo é o Ansys, um aplicativo que se utiliza do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Segundo Giacchini (2012) a ideia central do Método dos Elementos Finitos (MEF) é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos. Em outra análise, Azevedo (2003) afirma que “o MEF tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária e ações exteriores”. Por conseguinte, com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), pode-se analisar uma geometria de grande porte, onde esta será “dividida” em pequenas partes, que serão individualmente calculadas e posteriormente somadas, assim, facilita-se a própria análise deste procedimento.

Com o avanço da tecnologia, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tornou-se cada vez mais poderoso, tendo em vista que o processamento dos computadores facilita, em grande escala, os cálculos realizados e o tempo de análise das geometrias examinadas. Logo, as análises seguem sequências, sendo essas a estrutura real, a qual irá servir de modelo físico e, posteriormente, o matemático para, por fim, chegar ao modelo numérico.

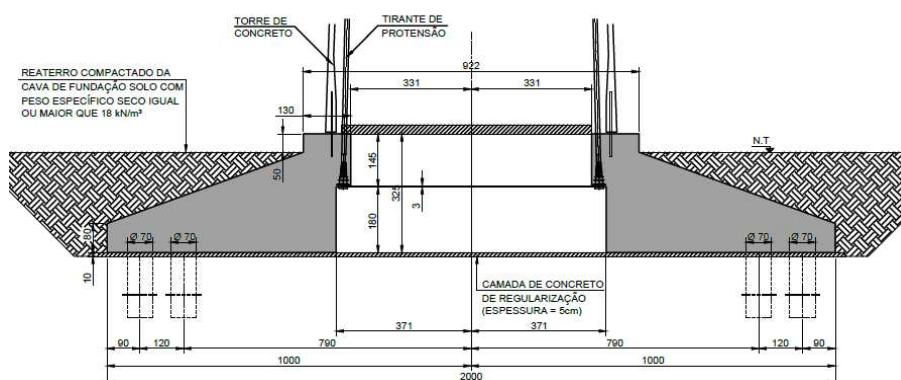
O MEF contém sua análise de maneira dinâmica ou estática. As análises estáticas são realizadas quando o desenvolvimento da aplicação de forças se considera de modo suficientemente lento, à vista disso, as forças de inércia são desprezadas. Já as dinâmicas, são os casos gerais, em que, neste contexto, as forças de inércia, são contrárias as de estática, em todos os componentes da análise.

Além da análise não linear ou linear sem levado em consideração a relação tensão e deformação, as análises prosseguem como linear, considerando-se uma determinada geometria, que as forças aplicadas a mesma sejam desprezíveis temos que a estrutura é indeformável, logo, não há modificação da geometria. Para casos de não linearidade serão os opostos aos dos lineares, com geometrias deformáveis e suas forças de aplicação. Para Lacerda (2014), “a não linearidade geométrica é quando ocorre a perda da linearidade entre as relações de deslocamento e deformação, levando a estrutura a grandes mudanças na

geometria e necessitando de reformular as equações de equilíbrio iniciais” e por fim Borges (1999) “disserta que a não linearidade física está relacionada com as propriedades intrínsecas do material e gera a não proporcionalidade entre causa e efeito”.

Pela praticidade da aplicação do MEF nos dias atuais, a utilização deste método foi de fundamental importância para a modelagem de um aerogerador, desde a sua base até o acoplamento das pás. Este estudo foi modelado no programa Ansys, utilizando dimensões aproximadas dos aerogeradores - sendo estas encontradas em diversos sites e/ou artigos – sendo assim, começou-se com a base, representada na Figura 21, como referência para a fundação.

Figura 21: Projeto de base de aerogerador



Fonte: Estevão, Lucas (2022)

Continuou-se a modelagem com os demais componentes, até a formação completa do elemento estrutural, o aerogerador. Após o término da modelagem, foi realizada a aplicação da malha, que tem o papel de auxiliar os cálculos necessários, por analisar todos os comportamentos separadamente e uni-los para se alcançar o comportamento final do sólido estudado e, com isso, é adicionado as condições de contorno, sendo capaz, assim, de analisar os resultados do aerogerador.

## 5.1 MODELAGEM DOS COMPONENTES

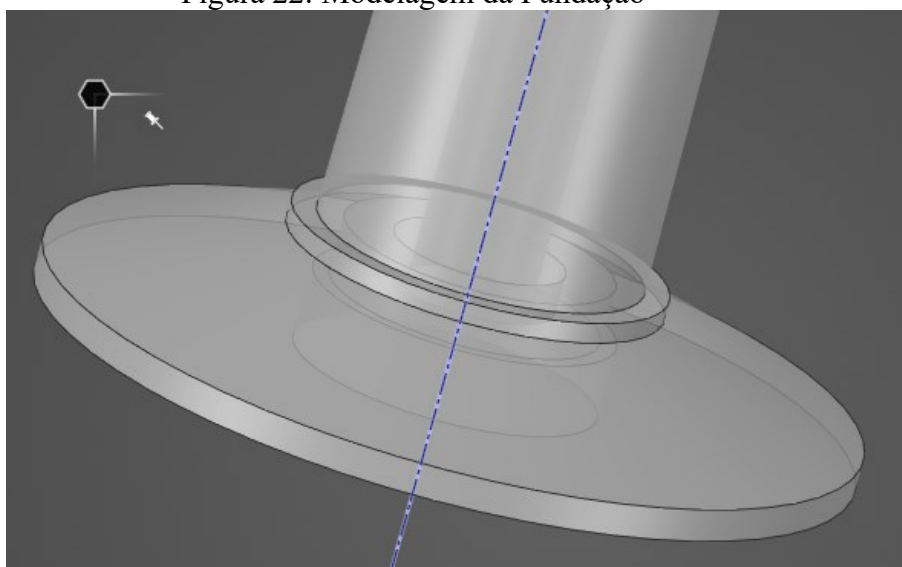
Dada a necessidade da modelagem do aerogerador, manipulou-se o programa Ansys, utilizando o Discovery, este que é uma ferramenta embutida no programa. Foi necessária a

criação de 5 componentes já mencionados. a Fundação, a Torre, a Nacele, o Rotor/HUB e as Pás, aos quais foram atribuídos os materiais dos respectivos componentes fabricados.

### 5.1.1 Fundação

A modelagem da fundação se deu seguindo os parâmetros indicados na Figura 21, considerando as suas dimensões em 2D para modelagem 3D, indicadas na Figura 22.

Figura 22: Modelagem da Fundação

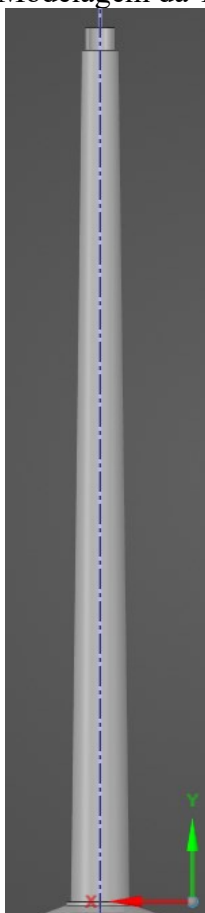


Fonte: Autoria Própria (2023)

### 5.1.2 Torre

Como a forma das torres dos aerogeradores se dá em formato cônico e devido a falta de referências de projetos e afins, nessa etapa ainda foi utilizada a Figura 21 como base. Nela, tem-se a representação aproximada de onde se encaixaria o primeiro segmento da torre, por essa razão, utilizou-se um diâmetro do cone de 8 m de base inferior e 5 m na base superior, sendo a modelagem finalizada na Figura 23.

Figura 23: Modelagem da Torre



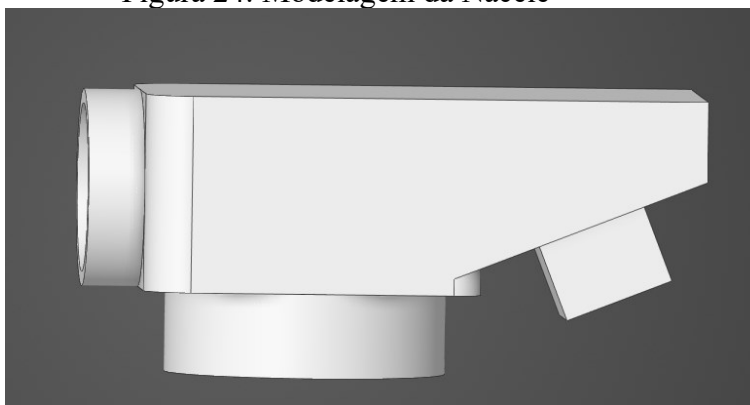
**Fonte:** Autoria Própria (2023)

Pode-se observar no topo do cone um objeto cilíndrico, este é o anel de concreto usado para conectar a nacele.

### 5.1.3 Nacele

A modelagem deste componente é realizada para a conexão com o anel de concreto e posteriormente o HUB e, possuindo, na prática, o objetivo de receber o gerador além de outros componentes, como o eixo do HUB. Sendo dimensionado na Figura 18, estando os componentes representado na Figura 24.

Figura 24: Modelagem da Nacele

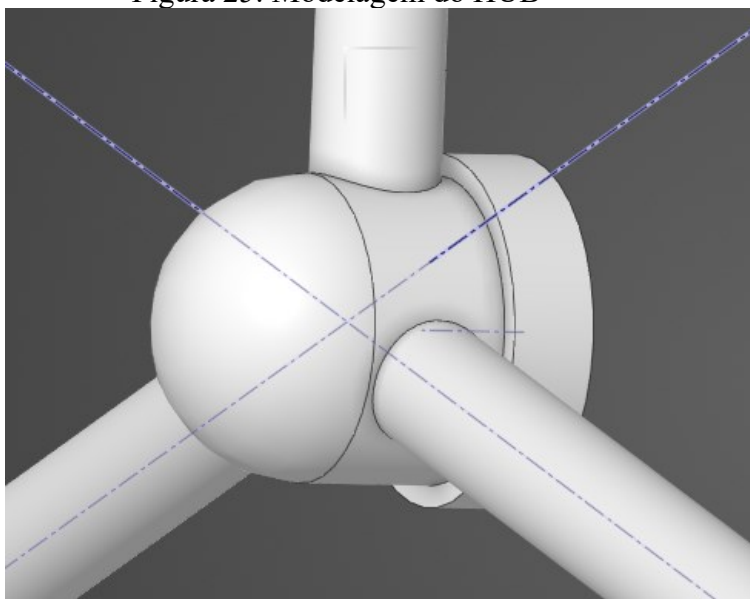


Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 5.1.4 Rotor/HUB

O eixo do aerogerador responsável por sustentar as Pás e girá-las em torno de seu próprio eixo, gerando, assim, energia cinética, transformada pelo gerador em energia elétrica. A demonstração deste componente está na Figura 25.

Figura 25: Modelagem do HUB



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 5.1.5 Pás

As mesmas são acopladas ao HUB, como antes mencionadas, sendo que existem dois modelos mais utilizados: primeiramente montar a estrutura em solo e posteriormente conecta-la a nacele ou anexar o HUB à nacele e, posteriormente, elevar uma par por vez e conecta-la ao HUB, sendo que cada um dos processos tem suas vantagens e desvantagens, mas o resultado final ainda é equivalente. Assim, leva-se em conta que as pás modeladas tem 73,5 m, de acordo com o demonstrado na Figura 26.

Figura 26: Modelagem das Pás

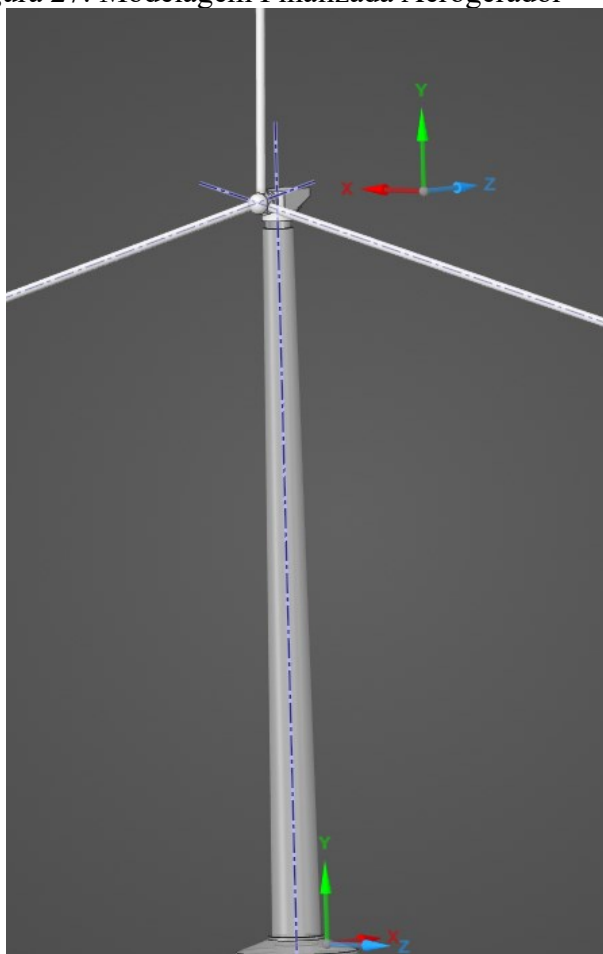


Fonte: Autoria Própria (2023)

### 5.1.6 Aerogerador

Após a modelagem de cada componente, estes são conectados utilizando as ferramentas do Discovery, obtendo assim os resultados primários desejados na modelagem deste programa, como observado na Figura 27.

Figura 27: Modelagem Finalizada Aerogerador



**Fonte:** Autoria Própria (2023)

## 6 RESULTADO E DISCUSSÃO

O desenvolvimento de um parque eólico é constatado por diversos fatores em que se utiliza diversos ensaios e procedimentos como a supressão vegetal e a terraplenagem, os quais mais impactam, mas são tão relevantes quantos os demais que colaboram com a construção. A motivação final do aerogerador irá gerar energia pelas rajadas de vento que realizarão a rotação de suas pás e transformarão energia cinética em energia elétrica, a partir do rotor.

Os ensaios de sondagem do solo, de prova de carga e integridade PIT, tem grande importância na qualidade, um requisito cobrado em grande escala nessas obras, além da confiabilidade do projeto. Sendo que esses ensaios garantem atividades já mencionadas, como levantamento topográfico, supressão vegetal, terraplenagem, escavação e reaterro da base, via de exemplo.

Por final dos serviços, temos a montagem do aerogerador, dependendo do material, sendo tramos de concreto ou tubulões de aço. Neste caso, terá uma diferença na sua montagem dado que nas torres de aço os tubulões já vem prontos para conseguirem acoplar na base e realizar a montagem, enquanto os tramos de concreto são categorizados conforme ilustrado na Tabela 6, em que cada categoria será montada para formar um cone. Em suma, independente do material, este formará o corpo do aerogerador que posteriormente será acoplado a Nacele, o HUB/Rotor e as pás.

### 6.1 RESULTADOS DA MODELAGEM ESTÁTICA

O desenvolvimento da análise da estrutura se dá após a inserção dos parâmetros, dos quais foram selecionados a massa do aerogerador e a velocidade do vento. Podendo se analisar a estrutura do aerogerador, necessitou-se transformar sua massa em Força (N), onde a estimativa desta, para a variedade de modelos de um aerogerador, é de 100 a 300 toneladas. Então, ao realizar a transformação, foi necessária a utilização da Equação (1), relacionada a força peso.

$$F(N) = Massa (Kg) \times g \quad (1)$$

Onde:

- $F(N)$  é a força a qual se deseja encontrar;
- $g$  é a aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ).

Ao se aplicar a aceleração da gravidade vezes a massa de 250 toneladas, medida adotada dentro da variação, se obtém uma  $F(N) = 2,4525 * 10^6 N$ . O segundo parâmetro, como mencionado, é a velocidade do vento, neste contexto, faz-se necessária a transformação de  $\frac{m}{s}$  para Pascal (Pa). Assim sendo, irá se utilizar a Equação (2), conhecida como fórmula simplificada da pressão dinâmica, derivada da equação de Bernouli.

$$q = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (2)$$

Onde:

- $q$  é a pressão dinâmica (Pa);
- $\rho$  é a densidade do ar ( $\frac{kg}{m^3}$ );
- $v$  é a velocidade do vento ( $\frac{m}{s}$ ).

Como se adotou uma velocidade de 7 m/s, medida base do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, a densidade do ar será aplicada com relação as condições normais de 1 atm e 23 °C onde se tem um valor de  $1,2754 \frac{kg}{m^3}$ . Aplicando esses valores, então, obtém-se uma pressão dinâmica de aproximadamente 31,25 Pa.

Para se alcançar um dos parâmetros finais, urge calcular a pressão total, definida na Equação (3)

$$P = P_{st} + q \quad (3)$$

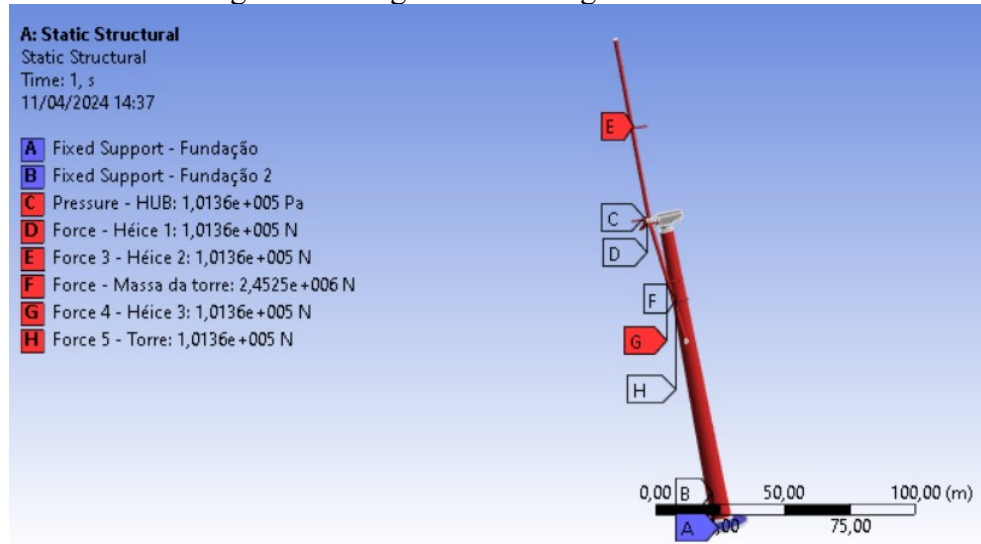
Onde:

- $P$  é a pressão total (Pa);
- $P_{st}$  é a Pressão atmosférica (Pa);
- $q$  é a pressão dinâmica (Pa);

Sendo considerada a pressão estática como pressão atmosférica, o valor convertido em Pa é de 101.325, ao se realizar a somatória se obtém o valor de  $P = 101356,25 Pa$ , aplicada no HUB, na torre e nas pás do aerogerador, concluindo-se que  $1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$ .

Com os parâmetros definidos e seus respectivos valores encontrados, demonstrado na Figura 28, para a aplicação no software Ansys, pode-se executar as devidas simulações e analisar os resultados gerados.

Figura 28: Diagrama de carregamentos iniciais

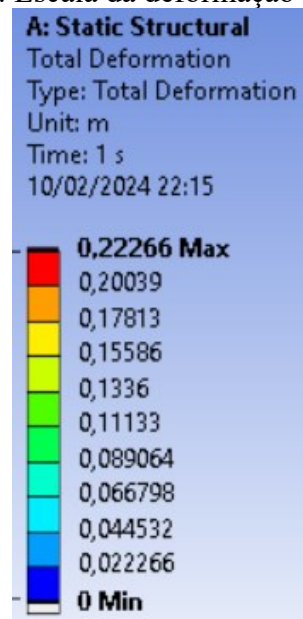


Fonte: Autoria Própria (2024)

### 6.1.1 Deformação total

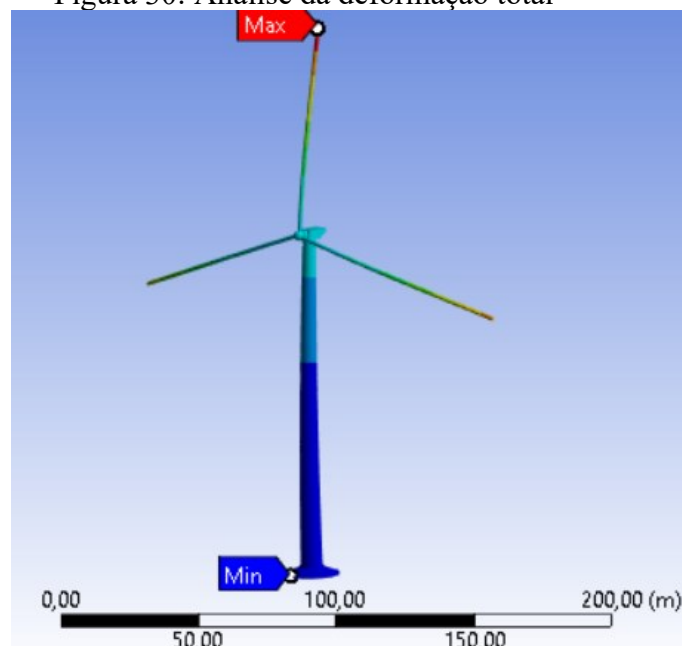
O estudo da deformação total, é executado para investigar o comportamento de um material e as forças externas, levando em consideração tanto a deformação elástica quanto a plástica. Após análise do Ansys, obteve-se a deformação numérica e abstrata, dado que o valor é da grandeza de metros, como destacado nas Figuras 29 e 30.

Figura 29: Escala da deformação total



Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 30: Análise da deformação total



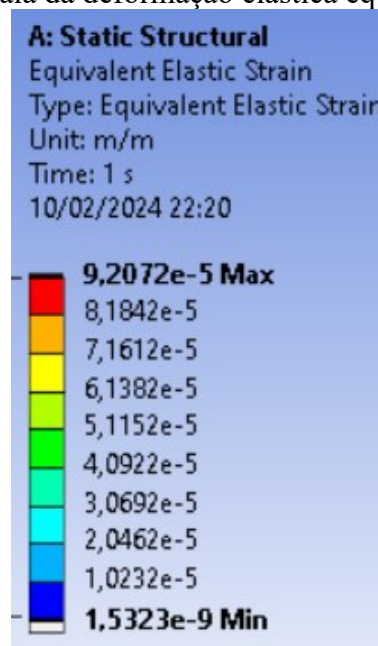
Fonte: Autoria Própria (2024)

Com a análise da Figura 28, temos que a deformação total é de 0,22266 m, à vista disso, os componentes mais afetados são as pás do aerogerador, demonstrado na Figura 30.

### 6.1.2 Deformação elástica equivalente

Esse tipo de deformação é reversível à medida que a força aplicada é retirada, portanto, no tempo que a força referente da corrente de ar vai diminuindo ou cessando, constata-se que o objeto retorna a sua forma original. O resultado decorrente da Figura 31 define a escala da deformação produzida.

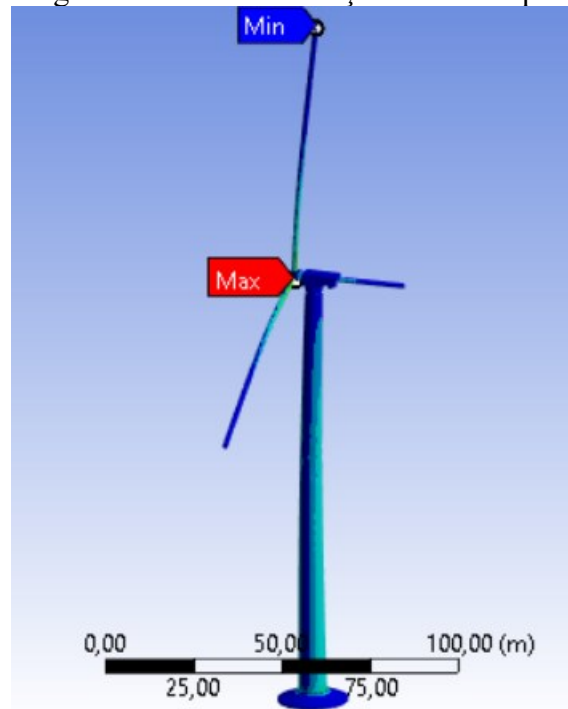
Figura 31: Escala da deformação elástica equivalente



Fonte: Autoria Própria (2024)

Tendo essa escala em cores e valores, tem-se que dados os parâmetros para a execução do programa, o aerogerador suporta uma escala da deformação elástica equivalente máxima de  $9,2072 \times 10^{-5} \frac{m}{m}$  e mínima de  $1,53223 \times 10^{-9} \frac{m}{m}$ , é permitida uma melhor visualização na Figura 31.

Figura 32: Aerogerador sobre deformação elástica equivalente



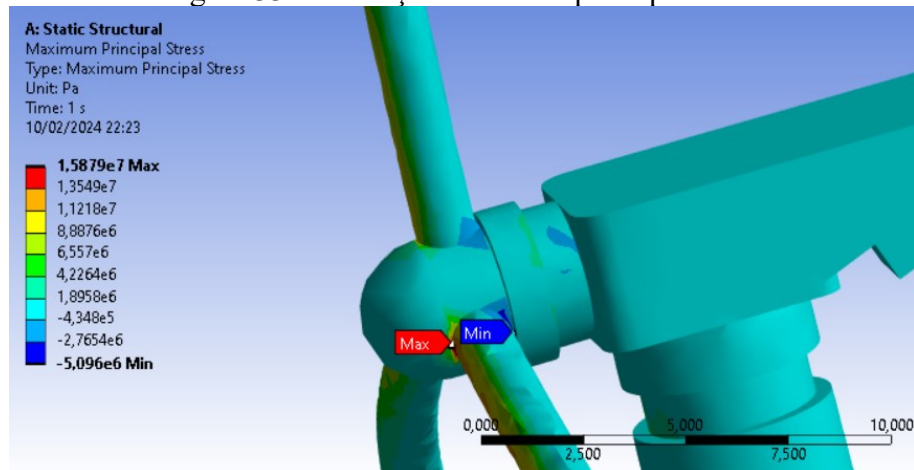
Fonte: Autoria Própria (2024)

Da perspectiva da Figura 32, pode-se expor que a área de maior deformação se dá no início da torre e na parte superior da base, enquanto a de menor são as pás, principalmente a que fica mais ao topo do aerogerador.

### 6.1.3 Tensão principal máxima

É o ponto particular de um material, onde as tensões podem ser decompostas em diferentes direções, sendo essencial para a compreensão do material e de sua reação a diferentes níveis de carga, como demonstrado na Figura 33.

Figura 33: Simulação da tensão principal máximo



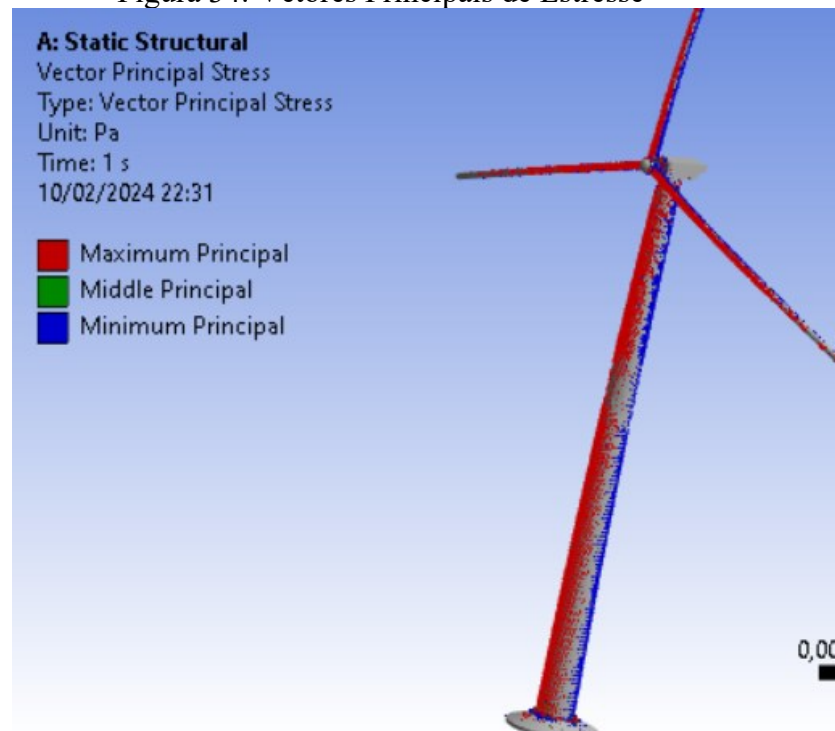
Fonte: Autoria Própria (2024)

Toda a tensão principal se situa no HUB/Rotor e nas pás da torre, sendo o valor máximo de  $1,5879 \times 10^7$  Pa, ressalta-se que este é um dado de grande relevância para avaliação da segurança e da capacidade de carga do material, assim, assegurando as capacidades da estrutura.

#### 6.1.4 Tensão principal do vetor

As tensões principais descrevem de forma abrangente o estado em um ponto, representando os seus valores máximos e mínimos em uma determinada região de um sólido quando sujeito a forças externas. Elas são as magnitudes máximas dessas tensões e ocorrem em direções específicas, denominadas direções principais. Como mostrado na Figura 34.

Figura 34: Vetores Principais de Estresse

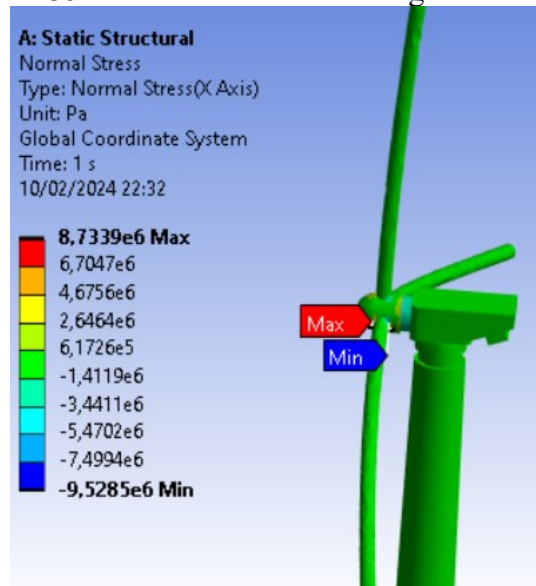


Fonte: Aatoria Própria (2024)

### 6.1.5 Tensão normal

A tensão normal é uma força que atua perpendicularmente a área de uma superfície. Ela representa a intensidade da força aplicada por unidade de área, sendo expressa em Pa. Quando um objeto é submetido a uma força externa, por exemplo, que age perpendicularmente à sua superfície, essa força é distribuída sobre a área do sólido, resultando em tensão normal. Caso observado na Figura 35.

Figura 35: Tensão Normal no Aerogerador



**Fonte:** Autoria Própria (2024)

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se analisar o comportamento dessas máquinas, podemos concluir que passam por diversas ações, desde o peso próprio às correntes de ar que a fazem funcionar devidamente. Levando isto em consideração, pode-se considerar o estudo do comportamento em que os aerogeradores são submetidos e para tal foi escolhido utilizar o método dos elementos finitos (MEF), sendo possível se ter uma análise detalhada desse comportamento como já demonstrado.

Como destacado, as deformações são muito pequenas, variando na casa de 0 a 0,22 mm para a deformação total, sendo total ou elástica. E, por outro lado, as tensões submetidas aos aerogeradores, são de -5,096 MPa a 15,879 MPa, estes devem ser projetados para suportar. Além da tensão principal de vetores e a tensão normal, a análise fornece dados de qualidade.

Contudo, essas mesmas análises permitem ao projetista conhecer as informações necessárias para que essas estruturas não sejam mal dimensionadas, podendo ter a sua segurança de projeto. Logo, a utilização desses métodos tem muita importância tanto teórica quanto prática, devido ao seu vasto uso para estudos de problemas de campo.

## 8 REFERÊNCIAS

APL Engenharia. Entenda tudo sobre a prova de carga estática em fundações. **APL Engenharia**, 2019. Disponível em: <https://blog.apl.eng.br/entenda-tudo-sobre-a-prova-de-carga-estatica-em-fundacoes/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TÉCNOLOGIAS. ABEEólica. **Boletim Anual**, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>: ABEEólica, 1 dez. 2022. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2024.

BERNUCCI, Liedi B; *et al.* **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022. 756 p.

BORGES, A .C. **Topografia aplicada à engenharia civil** . São Paulo, Ed. Edgar Blücher Ltda, v.2. 232p. 1992.

BOHME, Gustavo Silveira; *et al.* **Análise das etapas de desenvolvimento de projetos de energia eólica – estudo de caso**. ENGEMA, 2016.

BUNGENSTAB, Felipe C.. Ensaio de integridade PIT em estacas: O que o contratante precisa saber?. **Linkedin**, 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/ensaio-de-integridade-pit-em-estacas-o-que-precisa-c-bungenstab/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 06 jan. 2023.

BORGES, A. C. L. **Análise de pilares esbeltos de concreto armado solicitados a flexocompressão oblíqua**. São Carlos, 1999.

CAVALCANTI, MAYARA M. **Estabilização de encostas com proteção superficial e drenagem superficial e profunda**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho. 2017. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

CRUZ, Felipe Souza. O ENSAIO DE INTEGRIDADE (PET/PIT) E SUA UTILIZAÇÃO. **LinkedIn**, 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-ensaio-de-integridade-petpit-e-sua-utiliza%C3%A7%C3%A3o-felipe-souza-cruz/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 06 jan. 2023.

DUARTE, Fernanda Karoline Monteiro de Melo. **Métodos construtivos empregados em parques eólicos com fundações dos tipos convencionais e jabalcones no rio grande do norte e bahia**, 2021, TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2021.

ESTEVIÃO, Lucas. **Estudo do controle tecnológico do concreto em uma obra de um parque eólico em icapuí-ce**. 2022. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró – RN, 2022.

FILHO, Dário Conceição Soares. **ANÁLISE DE PROJETOS DE MONTAGEM DE TURBINAS EÓLICAS**. 2017. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2017.

FERMAN, Henrique. Brasil sobe para 6º lugar em ranking mundial de eólicas. **Canal Energia**, 2022. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53207229/brasil-sobe-para-6o-lugar-em-ranking-mundial-de-eolicas#:~:text=Com%203%2C8%20GW%20de,%2Dfeira%2C%204%20de%20abril>. Acesso em: 06 jan. 2023.

GIACCHINI, Breno Loureiro. **Uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos**. 01/2012. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2012.

Globo. Brasil atinge 8º lugar em ranking mundial de energia eólica. **g1**, 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/ultimas-noticias/noticia/brasil-atinge-8o-lugar-em-ranking-mundial-de-energia-eolica.ghtml>. Acesso em: 06 jan. 2023.

GUIMARÃES, Bruna. **O licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos offshore: histórico mundial e diretrizes para o Brasil**. Orientador: Emilio Lèbre La Rovere. 2020. 245 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2020.

SANTOS, Wesley Gonçalves. **Panorama da operação e manutenção de parques eólicos no Brasil**. 2022. 78 p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2022.

JESUS, Keith Soares; CAMPOS, Gisleine Coelho De. Construções de acessos e plataformas de parques de parques eólicos. **pmkb**, 2018. Disponível em: <https://pmkb.com.br/artigos/construcoes-de-acessos-e-plataformas-de-parques-de-parques-eolicos/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

LAGE, Elisa Salomão; PROCESSI, Lucas Duarte. **Panorama do setor de energia eólica**. BNDES.

LACERDA, E. G. M. **Análise não linear de treliças pelo método dos elementos finitos posicional**. Natal: 2014.

LEVY, Loel. Subleito e Sub-base: Suas especificações. **Anapre**, 2009. Disponível em: [http://www.anapre.org.br/boletim\\_tecnico/edicao15.asp](http://www.anapre.org.br/boletim_tecnico/edicao15.asp). Acesso em: 06 jan. 2023.

MOREIRA, R. *et al.* Percepção ambiental dos impactos socioambientais na instalação e operação de uma usina na comunidade de sítio do Cumbé em Aracati-CE, PB. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS* 45. **Revistageas**, 10 maio 2013. Disponível em: <<http://www.revistageas.org.br/ojs/index.php/geas/article/view/39>>. Acesso em: 14 Abr. 2024.

Milititsky, Jarbas. **Fundações de torres aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2019.

Ensaio de Integridade PIT. [S. l.], **PDI Engenharia**. Disponível em: <http://www.pdi.com.br/PIT->

port.htm#:~:text=O%20PIT%20%C3%A9%20um%20ensaio,de%20m%C3%A3o%20(%20foto%20). Acesso em: 19 jun. 2023.

Pavimentação: Quais as etapas para estradas duradouras e resistentes?. **Ecolinks**, 2021. Disponível em: <https://ecolinksolutions.com.br/blog/artigos-autorais/pavimentacao-quais-as-etapas-para-estradas-duradouras-e-resistentes>. Acesso em: 06 jan. 2023.

PENA, Rodolfo F. Alves. Energia eólica no Brasil. **Mundo Educação**, 2014. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/energia-eolica-no-brasil.htm>. Acesso em: 06 jan. 2023.

RIBEIRO, Simão Pedro Tavares. **Terraplenagem: metodologia e técnicas de compactação**. PORTUGAL: Faculdade de engenharia da universidade do porto, 2008. 100 p.

SANTIAGO, N. R. A. **Metodologias para avaliação do desempenho e previsão de avarias em turbinas eólicas utilizando a curva de potência do fabricante**. 2012. 148 p. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização Sustentáveis) - Universidade Nova de Lisboa.

SELMA,. O Setor: Desenvolvimento da eólica no Brasil. **ABBEEólica**, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

SONDAGEM a Percussão (SPT) - Quais informações deve conter no Relatório de Sondagem. [S. l.]: Belén Cogliati Lodeiro. **SUPORTESOLO**. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/sondagem-a-percussao-spt-quais-informacoes-deve-conter-no-relatorio-de-sondagem-artigo/47/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SANTOS, Núria Alice Alves Silva. **Otimização de torre de aço para aerogerador eólico**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, [S. l.], 2013.

THOMAS, Jennifer Ann. Ensaio SPT: a importância de estudar o terreno para garantir a segurança da sua residência. **eescjr**, 2021. Disponível em: <https://eescjr.com.br/blog/ensaio-spt/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

THOMAS, Jennifer Ann. Entenda como é o setor de energia eólica no brasil. **Guia Do Estudante**, 2021. Disponível em: <https://guiadoestudante.abril.com.br/atualidades/entenda-como-e-o-setor-de-energia-eolica-no-brasil/>. Acesso em: 06 jan. 2023.

VIANA, Dandara. Entenda o que é um pavimento asfáltico. **Guia da Engenharia**, 2019. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>. Acesso em: 06 jan. 2023.