

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE DE OLIVEIRA MARTINS

**CONFECÇÃO DE CONCRETO PARA FUNDAÇÕES DE TORRES
EÓLICAS PRÉ-MOLDADAS PROTENDIDAS OFFSHORE**

NATAL/RN

2023

FELIPE DE OLIVEIRA MARTINS

**CONFECÇÃO DE CONCRETO PARA FUNDAÇÕES DE TORRES
EÓLICAS PRÉ-MOLDADAS PROTENDIDAS OFFSHORE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

NATAL/RN

2023

Catálogo na Publicação – Biblioteca do UNI-RN
Setor de Processos Técnicos

Martins, Felipe de Oliveira.

Confecção de concreto para fundações de torres eólicas pré-moldadas protendidas offshore. / Felipe de Oliveira Martins. – Natal, 2023.

71 f.

Orientador: Prof. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

TC (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

1. Engenharia civil. 2. Fundação. 3. Eólica. 4. Concreto protendido. 5. Offshore. I. Pereira, Sérgio da Costa. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

FELIPE DE OLIVEIRA MARTINS

**CONFECÇÃO DE CONCRETO PARA FUNDAÇÃO DE TORRES EÓLICAS
PRÉ-MOLDADAS PROTENDIDAS OFFSHORE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

Orientador

Prof. Dr. Carlos Gomes de Moura.

Avaliador Interno

Prof. Esp. Mário César Nogueira

Avaliador Externo

Dedico este trabalho a minha mãe, que batalhou a vida inteira para eu estar onde estou hoje, em segundo e não menos importantes a minha família, que sempre me apoiaram e me incentivaram a estudar o que sempre almejei.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de adquirir todo esse conhecimento, além de Sua constante provisão ao longo deste caminho.

À minha mãe Yara, expresso minha gratidão eterna. Sua dedicação incansável em incentivar minha educação e transmitir os princípios fundamentais da vida foi essencial para que eu me tornasse quem sou hoje. Ela me ensinou a amar incondicionalmente tudo o que faço, e sou imensamente grato por todo seu apoio ao longo dos anos.

Quero expressar minha gratidão especial à toda equipe do laboratório de engenharia civil do UNI-RN, assim como aos meus colegas de curso. Desde o início até o fim dos ensaios laboratoriais, vocês estiveram ao meu lado, proporcionando um ambiente colaborativo e enriquecedor.

Agradeço sinceramente a todos os amigos que fizeram parte dessa jornada. Seja por meio de momentos descontraídos, apoio mútuo ou compartilhamento de experiências, cada um de vocês contribuiu para o meu crescimento e desenvolvimento.

Não poderia deixar de expressar minha imensa gratidão ao meu orientador, o professor PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira. Seu auxílio, dedicação e ensinamentos compartilhados durante a orientação deste trabalho foram inestimáveis. Agradeço especialmente pela escolha deste tema, que despertou meu interesse e me guiou para uma trajetória de sucesso.

RESUMO

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia renovável tem se intensificado, impulsionando o crescimento da energia eólica em particular. A energia eólica é obtida a partir do aproveitamento dos ventos, que são convertidos em eletricidade por meio de turbinas eólicas. Uma variante cada vez mais promissora dessa tecnologia é a energia eólica offshore, que se refere à geração de energia eólica em alto-mar. Nesse contexto, as fundações offshore desempenham um papel crucial, fornecendo suporte estrutural às turbinas eólicas e permitindo sua instalação em águas profundas. Nesta discussão, exploraremos o crescimento e o potencial da energia eólica offshore, bem como os diferentes tipos de fundações utilizadas nesse setor em rápida expansão.

O presente trabalho teve como foco principal avaliar um traço de concreto para classe de agressividade CAA I. Foi testado um traço de concreto 1:2,2:3,9, com o intuito de atingir uma resistência a compressão de 20 MPa para ser usado nas fundações de gravidade de torres eólicas offshore. Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas formas cilíndricas de 10 cm (diâmetro) x 20 cm (altura), nas quais foram moldados 15 (quinze) unidades e submetidos aos ensaios de resistência à compressão após 28 dias de cura. Além de ensaios de absorção de água. Os resultados mostram que, o traço testado obteve sucesso ao atingir o valor médio de resistência a compressão desejado de 20 MPa de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, assim como também obteve sucesso no teste de absorção atingindo a classificação de alto desempenho segundo ABNT NBR 9778:2009, sendo adequado para o uso descrito nas fundações das torres eólicas offshore.

Palavras-chave: Fundação. Eólica. Concreto protendido. Offshore.

ABSTRACT

In recent years, the search for renewable energy sources has intensified, driving the growth of wind energy in particular. Wind energy is obtained by harnessing the power of winds, which are converted into electricity through wind turbines. An increasingly promising variant of this technology is offshore wind energy, which refers to the generation of wind energy in the open sea. In this context, offshore foundations play a crucial role, providing structural support to wind turbines and enabling their installation in deep waters. In this discussion, we will explore the growth and potential of offshore wind energy, as well as the different types of foundations used in this rapidly expanding sector.

The main focus of this study was to evaluate a concrete mix for exposure class CAA I. A concrete mix of 1:2.2:3.9 was tested with the aim of achieving a compressive strength of 20 MPa for use in the gravity foundations of offshore wind towers. Cylindrical molds measuring 10 cm (diameter) x 20 cm (height) were used to create the specimens, from which 15 units were molded and subjected to compressive strength tests after 28 days of curing. Water absorption tests were also performed. The results show that the tested mix successfully achieved the desired average compressive strength value of 20 MPa, according to ABNT NBR 6118:2014, as well as passed the absorption test, attaining a high-performance classification according to ABNT NBR 9778:2009, making it suitable for the described use in offshore wind tower foundations.

Keywords: Foundation. Wind energy. Prestressed concrete. Offshore.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de ruptura	22
Figura 2 - Livros recebendo esforços de compressão.....	23
Figura 3 - Elementos pré-moldados unidos por uma protensão.....	24
Figura 4 - Fissuras na viga de concreto	25
Figura 5 - Aplicação de estado prévio de tensões na viga de concreto	25
Figura 6 - Confeção da laje alveolar em concreto protendido	27
Figura 7 - Confeção da laje alveolar em concreto protendido	28
Figura 8 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	30
Figura 9 - Seção submetida à descompressão parcial.....	31
Figura 10 - Classes de agressividade	32
Figura 11 - Moinhos da Holanda	34
Figura 12 - Moinho de madeira	35
Figura 13 - Torres eólicas	36
Figura 14 - Parque eólico de Pararácuru- CE	37
Figura 15 - Curva de potência.....	38
Figura 16 - Tabela de classe e o comprimento de rugosidade.....	41
Figura 17 - Atuação do vento devido à altura.....	41
Figura 18 - Torres pré moldadas protendidas internamente	42
Figura 19 - Protensão nas cordoalhas das torres eólicas	43
Figura 20 - Protensão externa.....	43
Figura 21 - Estrutura pré-moldada	44
Figura 22 - Fábrica de Pré-moldados.....	45
Figura 23 - Base de uma torre de concreto pré-moldada.....	46
Figura 24 - Complexo eólico offshore.....	48
Figura 25 - Complexo eólico offshore.....	49
Figura 26 - Gráfico 1 - Distância e profundidade de parques eólicos offshore	50
Figura 27 - Gráfico 2 - Acúmulo de energia eólica offshore no mundo	50
Figura 28 - Comportamento do consumo de energia eólica no Brasil.....	51
Figura 29 - Oferta de energia elétrica por fonte.....	52
<i>Figura 30 - Complementaridade das fontes eólica e hidrelétrica.....</i>	<i>52</i>
Figura 31 - Principais tipos de fundações fixas	54
Figura 32 - Principais tipos de fundações flutuantes	55

Figura 33 - Tabela de resistência dos corpos de prova a compressão	58
Figura 34 - Pesagem de areia	58
Figura 35 - Pesagem de Brita.....	59
Figura 36 - Pesagem do cimento	59
Figura 37 - Confecção dos corpos de prova.....	60
Figura 38 - Identificação e pesagem de cps secos	60
Figura 39 - Cps em tanque para cura e análise da absorção de água.....	61
Figura 40 - Posicionamento de CP na prensa.....	61
Figura 41 - Tipo de ruptura, classificada com Tipo E	62
Figura 42 - Tabela da porcentagem de absorção dos corpos de prova	63
Figura 43 - Resultado do ensaio de compressão aos 28 dias.....	63
Figura 44 - Classificação do concreto quanto a absorção.....	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Tração	21
Equação 2 – Porcentagem de absorção	22
Equação 3 – Potência	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PCHs	Pequenas centrais hidrelétricas
UNI-RN	Centro Universitário do Rio Grande do Norte
NBR	Norma Brasileira
CAA	Classe de agressividade ambiental
DTS	Dois A Tower System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	GERAIS.....	17
2.2	ESPECÍFICOS	17
3	JUSTIFICAVA.....	18
4	METODOLOGIA	19
4.1	ENSAIOS REALIZADOS.....	20
4.1.1	Ensaio de compressão.....	20
4.1.2	Ensaios de absorção de água	22
5	HISTÓRIA DA ARTE	23
5.1	CONCRETO PROTENDIDO.....	23
5.1.1	Conceito de protensão.....	23
5.1.2	Concreto protendido	24
5.1.3	Histórico do concreto protendido	26
5.1.4	Sistemas de protensão	27
5.1.5	Protensão com aderência inicial.....	27
5.1.6	Protensão sem aderência	28
5.1.7	Protensão com adesão posterior	28
5.1.8	Escolha do sistema de protensão.....	28
5.1.9	Estados limites de uma estrutura	29
5.1.10	Níveis de protensão.....	31
5.1.10.1	Protensão completa (Nível 3).....	31
5.1.10.2	Protensão limitada (Nível 2)	32
5.1.10.3	Protensão parcial (Nível 1).....	33
5.2	ENERGIA EÓLICA.....	33

5.2.1	Histórico da utilização de energia eólica	33
5.2.1.1	Fudação de moinhos de vento.....	35
5.2.2	Parque eólico	36
5.2.2.1	Potência instalada.....	38
5.2.3	Locação das torres	39
5.2.4	Torre de concreto protendido	41
5.2.4.1	Torre de concreto pré-moldado protendido.....	44
5.2.4.2	Vantagens da utilização do pré-moldado protendido	47
5.2.5	Panorama da energia eólica offshore	47
5.2.5.1	Cenário mundial.....	48
5.2.5.2	Potencial brasileiro.....	51
5.3	FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE.....	53
6	ESTUDO DE CASO.....	58
6.1	PESAGEM DOS COMPONENTES SECOS	58
6.2	MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA PARA PESAGEM E CURA.....	59
6.3	PROCESSO DE ROMPIMENTO DE CORPOS DE PROVA	61
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
8	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

As torres eólicas offshore têm ganhado destaque como uma solução promissora para a produção de energia renovável em larga escala. Essas estruturas são instaladas em áreas marítimas, onde os ventos são mais fortes e constantes, proporcionando um potencial significativo para a geração de energia eólica. A construção dessas torres requer cuidados especiais devido ao ambiente marinho desafiador e à necessidade de garantir estabilidade e durabilidade a longo prazo.

Neste contexto, as fundações das torres eólicas offshore desempenham um papel crucial na estabilidade estrutural e no desempenho geral dessas estruturas. As fundações são responsáveis por transmitir as cargas das torres eólicas para o solo marinho de forma segura e eficiente, garantindo a estabilidade e resistência necessárias para enfrentar as condições extremas do ambiente offshore.

Ao longo dos anos, diversas tecnologias de fundações têm sido desenvolvidas e aprimoradas para atender aos requisitos específicos das torres eólicas offshore. Entre as principais opções disponíveis, destacam-se as fundações monopiles, jackets e floating.

As fundações monopiles são amplamente utilizadas na indústria de energia eólica offshore devido à sua eficiência, simplicidade e custos relativamente mais baixos. Essas fundações consistem em uma única estaca de aço cravada no leito marinho, proporcionando suporte estável para a torre eólica. De acordo com Rolfes et al. (2017), a análise geotécnica detalhada e a modelagem numérica precisa são fundamentais para garantir o desempenho adequado das fundações monopiles.

Por outro lado, as fundações jackets são estruturas mais complexas, compostas por várias pernas de aço conectadas por vigas horizontais e diagonais. Essas fundações oferecem maior resistência e estabilidade, sendo mais adequadas para áreas com maiores profundidades e condições ambientais adversas. Conforme Carneiro et al. (2019), a análise estrutural detalhada e o projeto otimizado das fundações jackets são essenciais para garantir a confiabilidade e o desempenho a longo prazo dessas estruturas.

Além disso, as torres eólicas offshore também podem ser sustentadas por fundações flutuantes, que são ancoradas ao leito marinho por meio de cabos e

sistemas de lastro. Essas fundações permitem a instalação de turbinas eólicas em áreas com profundidades maiores e condições oceânicas mais desafiadoras. Segundo Bredmose et al. (2018), o projeto de fundações flutuantes para torres eólicas offshore envolve desafios técnicos relacionados à hidrodinâmica complexa e à garantia da estabilidade adequada.

Essas diferentes tecnologias de fundações para torres eólicas offshore demonstram a busca contínua por soluções eficientes e seguras para a geração de energia renovável em ambientes marinhos. O aprimoramento dos métodos de projeto, análise e instalação das fundações é fundamental para impulsionar o setor eólico offshore e promover uma transição energética mais sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAIS

Realizar uma dissertação sobre o desenvolvimento da energia eólica com o passar dos anos, especificar os tipos de torres com enfoque nas torres pré-moldadas protendidas para uso offshore detalhando suas vantagens e desvantagens baseando-se em artigos, TCC's, estudos bibliográficos e periódicos.

2.2 ESPECÍFICOS

Elaborar um traço para o ambiente rural (sem exposição à Oxigênio) sendo sua classe de agressividade CAA I de 20MPa. Buscando assim atingir resultados de resistência à compressão e de absorção de água que estejam dentro dos valores mínimos exigidos pela ABNT NBR 6118:2014 e pela ABNT NBR 9778:2009 respectivamente.

3 JUSTIFICAVA

Solucionar problemas existentes na execução de torres eólicas pré-moldadas, protendidas offshore, como melhorar a resistência às tensões, diminuir as deteriorações provenientes do constante contato com os agentes oxidantes, otimizar o uso dos componentes da estrutura para assim melhorar seu desempenho em relação a durabilidade e apresentar um traço para fundações de gravidade de torres eólicas offshore se baseando na norma ABNT NBR 6118:2014. Sendo o traço 1:2,2:3,9 dimensionado para uma classe de agressividade CAA I.

4 METODOLOGIA

Tendo como base os objetivos de (SOUZA, 2020), elaborar traços, um para o ambiente rural e o outro para o ambiente marinho ou industrial, conhecidos pela sua classe de agressividade ambiental como CAA I e CAA III, respectivamente. E com isso obter resultados satisfatórios para cada classe de agressividade, ou seja, que ele atinja o mínimo exigido pela ABNT NBR 6118:2014.

Formular um traço de concreto para agressividade I (CAA I), e a partir disso, fabricar 15 (quinze) corpos de prova para realizar ensaios de compressão e de absorção de água de acordo com as normas da ABNT como é requerido. Com a obtenção dos resultados, mostrar os benefícios da pesquisa apresentando os dados em uma conclusão.

Este trabalho de conclusão de curso teve por finalidade a elaboração de um traço, com o intuito de obter a compressão do concreto para atuar em torres eólicas em um ambiente marinho, porém pela fundação não estar em contato com Oxigênio ou com a água do mar foi considerado um traço para ambiente rural. Os cálculos de compressão seguiram a norma da ABNT NBR 5739:2018.

Para a execução do estudo, foi necessário ser criado um traço para classe de agressividade ambiental CAA I, de acordo com a norma da ABNT NBR 6118:2014, que padroniza os projetos de estrutura de concreto - procedimento. Foram também confeccionados 15 corpos de prova (CP's) para cada CAA, sendo cilíndricos de 10 cm x 20 cm. Para a moldagem dos mesmos foi seguida a norma da ABNT NBR 5738:2016, que padroniza o procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.

Após o cálculo do traço em peso obtivemos os seguintes valores:

$$\text{CAA-I} = 1: 2,2: 3,9: 0,68$$

Onde, o 1º numero se remete ao cimento, o 2º a areia, o 3º brita e o 4º ao fator água/cimento do concreto.

Para a elaboração dos corpos de prova primeiramente foi separada a areia grossa, a brita de 19 mm, o cimento Apodi CP-II e a água, do traço que realizaria no

dia, para confeccionar a quantidade de moldes definida no laboratório. Antes mesmo de começar a colocar o material na betoneira, jogava-se água nela para retirar os resíduos e umidificá-la para que não absorva a água do traço. Logo após ter jogado a água na betoneira e derramado o excedente e tirado os resíduos, foi colocada a brita com 1/3 da água total dentro da mesma durante 5 minutos, depois de passado o tempo, foi acrescentada a areia e mais 1/3 da água deixando bater por mais 5 minutos para que misturasse bem a areia com a brita e água e por fim, foi acrescentado o cimento com o restante da água e deixado bater por mais 5 minutos. Enquanto o concreto estava batendo na betoneira estava sendo passado desmoldante nos moldes dos corpos de prova para o concreto não grudar no mesmo e danificar o CP e alterar o valor quando for romper. Depois de batido o concreto na betoneira será compactado nos moldes o concreto, sendo compactado com com uma haste de compactação.

Após a moldagem dos corpos de prova, eles devem ser colocados em uma superfície plana e horizontal, livre de vibrações e perturbações durante as primeiras 24 horas, sempre devidamente identificados, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 5738:2016. Após o período de secagem do concreto, os corpos de prova foram pesados, e após ficarem submersos em água por 24 horas foram pesados novamente para cálculo da absorção, seguindo a norma ABNT NBR 9778:2009. Em seguida, os corpos de prova foram novamente colocados para realizar a cura por mais 28 dias, a fim de verificar se, ao final desses períodos, o concreto seria capaz de suportar as cargas exigidas de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014, que estabelece os critérios para as cargas necessárias em relação às diferentes classes de agressividade ambiental.

4.1 ENSAIOS REALIZADOS

4.1.1 Ensaio de compressão

Foi realizado o ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10 cm x 20 cm, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 5739:2018, que trata dos ensaios de compressão nesse tipo de corpo de prova. Após a confecção dos corpos de prova, estes foram submersos em um tanque de

água no mesmo local, onde permaneceram por 28 dias para a cura do concreto, conforme exigido pela ABNT NBR 5738:2016. Após a retirada dos corpos de prova do tanque, eles foram submetidos ao ensaio de compressão na ordem em que foram identificados, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 5739:2018, responsável pelos ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos. Esse ensaio foi conduzido no laboratório de materiais do UNI/RN.

Para utilizar a prensa corretamente, o corpo de prova foi posicionado conforme mostrado na figura 32, e a máquina foi ajustada de acordo com as dimensões do corpo de prova em questão, no caso, 10 cm x 20 cm (onde o diâmetro é de 10 cm e a altura de 20 cm). A prensa é uma máquina em que a carga é aplicada gradualmente, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 5739:2018. Como o objetivo da produção dessa mistura é a construção de torres eólicas pré-moldadas protendidas, esse concreto será submetido à compressão, ou seja, será comprimido e deve suportar a força exigida para a Condição de Aderência Adequada (CAA), mencionada na norma ABNT NBR 6118:2014.

A norma ABNT NBR 5739:2018 também aborda os diferentes modos de falha que o corpo de prova pode apresentar, classificando-os em até 7 tipos diferentes.

Ao realizar a compressão do corpo de prova até a falha, a prensa indica um valor em toneladas-força (tf), no entanto, para fazer a comparação com o valor da CAA, é necessário converter esse valor de tf para Megapascal (MPa). Para isso, utiliza-se a equação 1 abaixo:

Equação 1 - Tração

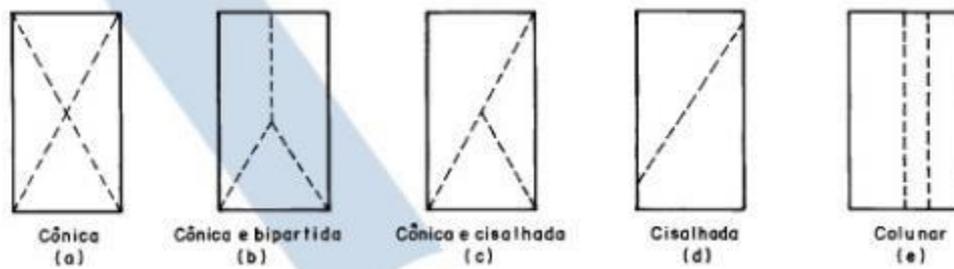
$$F_{mpa} = \left(\frac{Tf \times 1000}{\frac{\pi \times d^2}{4}} \right) \times 0,0980665$$

Onde,

Tf = carga encontrada na prensa;

D = diâmetro (em cm).

Figura 1 - Tipos de ruptura



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS (1994).

4.1.2 Ensaio de absorção de água

Realizamos no laboratório um ensaio conforme a norma ABNT NBR 9778:2009, que estabelece os procedimentos para a determinação da absorção de água por imersão. Após a confecção dos corpos de prova, estes foram submetidos a um período de cura a seco durante 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram removidos dos moldes e pesados para determinar o peso seco de cada um deles. Em seguida, os corpos de prova foram saturados em água. Conforme a ABNT NBR 9778:2009, após 72 horas, foi realizada uma nova pesagem dos corpos de prova saturados para calcular a absorção de água por imersão, como especificado na norma, utilizando a equação 2 abaixo.

Equação 2 - Porcentagem de absorção

$$Abs = \left(\frac{Msat \times Ms}{Ms} \right) \times 100$$

Onde,

Msat = Massa do corpo de prova saturado

Ms = Massa do corpo de prova seco

5 HISTÓRIA DA ARTE

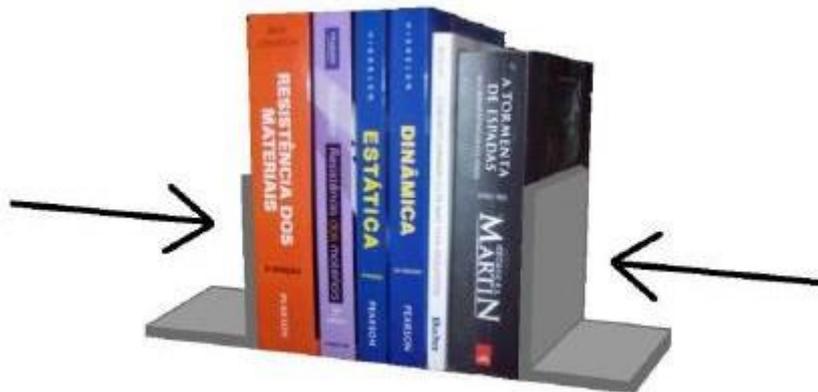
5.1 CONCRETO PROTENDIDO

5.1.1 Conceito de protensão

Segundo Santos (2015), a protensão tem como intuito a aplicação de forças em um corpo sólido, tentando melhorar seu comportamento com a atuação das cargas de serviço. A protensão é muito usada nos elementos estruturais, sempre tendo a finalidade de melhorar e utilizar ao máximo o uso dos materiais de construção.

“De acordo com Veríssimo e César Júnior (1998), a idéia de protensão pode ter vários tipos de aplicação. Por exemplo, se a pessoa quiser levar uma pilha de livros na horizontal, (Figura 2), é preciso aplicar uma força prévia no sentido de comprimir uns livros contra os outros. Dessa forma, o atrito entre os livros é ampliado de forma a tornar-se capaz de impedir a queda deles durante o transporte. Assim, foi aplicada uma protensão na pilha de livros.”

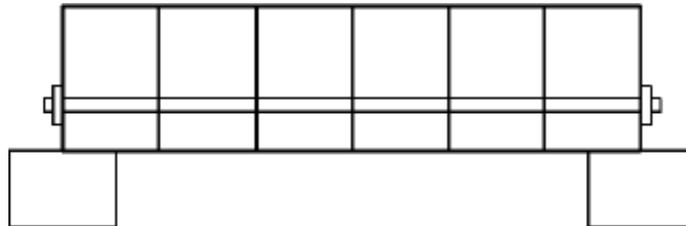
Figura 2 - Livros recebendo esforços de compressão



Fonte: Santos (2015).

O protendido tem a função também de juntar elementos pré-moldados de concreto, (figura 3), nesse caso a protensão tem função de solidarizar as peças estruturais, garantindo a integridade da construção. O sistema tem sido implementado no Brasil na construção de torres eólicas (SANTOS, 2015).

Figura 3 - Elementos pré-moldados unidos por



Fonte: Santos (2015).

5.1.2 Concreto protendido

Objetivando a aplicação do concreto junto ao aço na confecção de peças estruturais não sofrem fissuração, como ocorre no concreto armado, daí surgiu a ideia de pré comprimir as estruturas ao longo de sua seção, para que, sobre a ação de cargas ficariam submetidas a tensões trativas, (LANNES, 2005).

No entanto, a protensão não muda os esforços solicitantes das peças ocasionadas pelo seu peso próprio e pela carga atuante constantemente nele. A ação da força de protensão age no sentido contrário dos carregamentos, assim, equilibrando as ações atuantes e diminuindo consideravelmente as deformações e a fissurações. Resumindo, protender significa aplicar esforços que neutralizem os efeitos das cargas externas sobre as estruturas (LANNES, 2005).

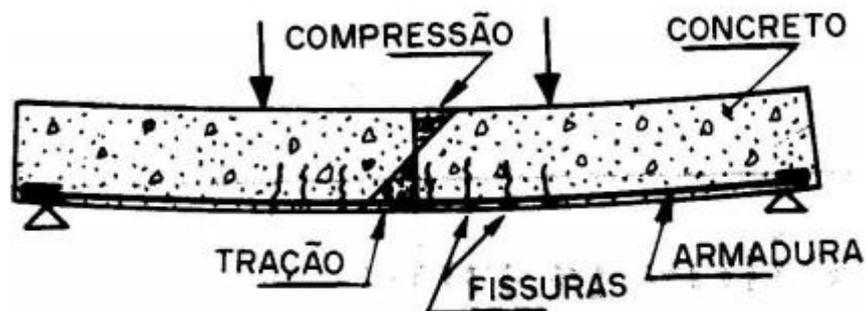
Santos (2015), descreveu que as principais vantagens do uso da protensão são:

- Construções que utiliza melhor o concreto apresentando grandes vãos e o peso menor;
- Construções de estruturas diferentes, onde o concreto armado não consegue ser modulado devido as tensões;
- Diminuição das deformações de serviço, conseqüentemente vai diminuir as deformações ocasionadas pela tração do concreto como as fissuras e ocasionando o melhoramento da estrutura, tanto da utilização do aço, como da utilização do concreto;
- Aumento da classe de agressividade ambiental, como a camada é mais espessa, aumenta a vida útil do aço, pois diminuirá a corrosão e assim aumentando a vida útil também da estrutura;
- Diminuição dos carregamentos sob as fundações, pois diminuirá a o peso próprio do elemento estrutural.

A protensão tem grande importância no caso do concreto devido ele ser o material de construção de menor custo de todas as regiões, devido ele possuir uma boa resistência à compressão e sua tração não ser tão confiável por ser apenas 10% da força de compressão e quando não é bem executada, quando ocorre a retração, a resistência diminui mais ainda antes mesmo de qualquer atuação de força (LANNES, 2005).

Para melhor entendimento, numa viga de concreto armado, quando acontece a retração do concreto (Figura 4), ocorrem as fissurações na parte inferior, pois na parte de cima da viga ela estará sofrendo a compressão e na parte de baixo da mesma sofrerá tração, como pode ver desenhado o diagrama na ilustração (LANNES, 2005).

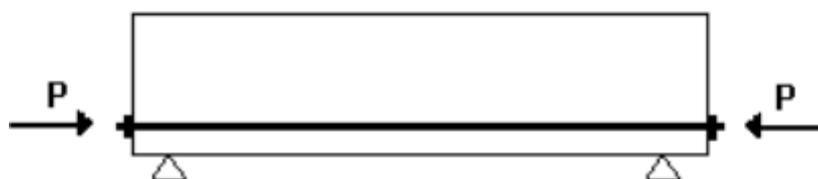
Figura 4 - Fissuras na viga de concreto



Fonte: Almeida (2002).

Já nesta viga (Figura 5), ela está submetida a cabos de aço esticados e ancorados na extremidade, assim anulando ou limitando drasticamente as tensões de tração, evitando assim a abertura das fissuras. Assim, concilia o trabalho simultâneo de dois materiais de alta resistência a de compressão (concreto) e a de tração (aço), (LANNES, 2005).

Figura 5 - Aplicação de estado prévio de tensões na viga de concreto



Fonte: Lannes (2005).

A compressão do concreto exercida pelas tensões do aço protendido, faz com que o concreto resista muito mais aos alongamentos que serão ocasionados pela flexão, havendo nenhuma ou quase nenhuma fissuração (LANNES, 2005).

Em resumo, com a protensão é possível melhorar a capacidade de utilização da peça estrutural e controlar de modo mais eficiente a fissuração, podendo, em alguns casos até eliminá-la (LANNES, 2005).

5.1.3 Histórico do concreto protendido

A utilização do sistema protendido nas estruturas de concreto deu-se na metade do século XIX, nos Estados Unidos. É um método que tem a intenção de unir elementos, no caso, as peças pré-moldadas com a utilização de tirantes com a aplicação prévia da tensão (GOMES JUNIOR, 2009)

Porém, outros pesquisadores fizeram estudos sobre a protensão, mas como acontecia a perda de protensão acabava comprometendo as estruturas. Isso mudou quando os pesquisadores Mörsch e Koenen mostraram a existência da fluência e da retração no concreto, que faz com que hajam as perdas de protensão. A partir disso foi admitido que a força de protensão não era eficiente (GOMES JÚNIOR, 2009).

O protendido teve um alto desempenho, e em 1928 o engenheiro francês conhecido como Eugène Freyssinet fez uma publicação sobre o tema. A proposta que ele apresentou foi que deveria apresentar aços de alta resistência (Cordoalhas) para que diminuísse as perdas de fluência e retração do concreto. Ele também desenvolveu aços diferentes, equipamentos e métodos construtivos dos quais realizou a patente sob (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

Quando terminou a Segunda Guerra Mundial a Europa ficou destruída e precisava ser reconstruída rapidamente, então teve a utilização do protendido principalmente nas pontes, pelo seu sucesso começou a ser usado no mundo inteiro (SANTOS, 2015).

A obra que deu início a utilização do concreto protendido no Brasil foi a ponte do Galeão, no Rio de Janeiro em 1945. Como não existia obras de protensão pelo Brasil, todos os aços foram importados da França. Durante a execução teve o acompanhamento do engenheiro francês Eugène Freyssinet, contribuindo com seu conhecimento na área (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR,

1998).

Em 1950 teve início a produção do aço para ser protendido no Brasil, dando destaque para a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, que foi a pioneira (SANTOS, 2015).

5.1.4 Sistemas de protensão

As diferenças entre cada um está presente na interação do concreto com a armadura ativa. Existem 3 tipos, o com aderência inicial, sem aderência e aderência posterior (SOUZA, 2020).

5.1.5 Protensão com aderência inicial

A protensão com aderência inicial é amplamente utilizada na produção de elementos pré-moldados de concreto protendido.

A armadura ativa é posicionada nas fôrmas e então tracionada, fazendo esse processo antes da concretagem, por esse motivo os macacos hidráulicos têm que serem fixados pela parte externa (Figura 6). Após a cura do concreto, os equipamentos que mantêm os cabos tracionados são retirados e os cabos cortados. Dessa forma, a protensão é transferida para o concreto, apenas por aderência (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

Figura 6 - Confeccção da laje alveolar em concreto protendido



Fonte: Santos (2015).

5.1.6 Protensão sem aderência

O estiramento da armadura ativa é feito após o endurecimento do concreto, dessa forma os equipamentos de protensão podem ser apoiados no próprio elemento estrutural. Nesse sistema, não acontece a injeção de nata e são utilizados cabos engraxados (Figura 7), para diminuir o atrito entre a armadura e o concreto, assim, o aço fica ligado ao concreto apenas em pontos localizados, através das ancoragens (NBR 6118, 2014).

Figura 7 - Confeção da laje alveolar em concreto protendido



Fonte: FCK -Engenharia (2018)

5.1.7 Protensão com aderência posterior

A protensão com aderência posterior só recebe a tração na armadura ativa depois de quando o concreto tem o seu tempo de cura, ou seja, só quando o cimento fica duro, criando aderência diretamente com o concreto através da colocação das bainhas (NBR 6118, 2014). No caso de haver rompimento de um dos cabos em um ponto, a protensão não se perderá, pois os esforços serão redistribuídos, devido a aderência (SANTOS, 2015).

5.1.8 Escolha do sistema de protensão

O sistema de protensão com aderência inicial é utilizado em elementos pré-moldados, como já foi falado no item 5.1.4.1.

Para saber se utilizaremos a protensão com aderência ou sem nenhuma aderência, vai depender do que será necessário em cada construção sempre levando em conta os seus benefícios e malefícios (SANTOS, 2015)

Veríssimo e César Júnior (1998), listaram as seguintes vantagens para a protensão não aderente:

- Possibilidade de posicionar os cabos com excentricidades maiores;
- O aço já vem de fábrica com proteção contra corrosão;
- As perdas por atrito são muito baixas;
- A execução dos cabos é rápida e simples e a operação de injeção é eliminada, dessa forma o custo da protensão é reduzido.

Já as vantagens para a protensão aderente são:

- No estado limite último (ELU), o concreto e o aço trabalham em conjunto, fazendo com que aumente a capacidade de carga, assim o uso de materiais é otimizado;
- Ocorre um melhoramento do comportamento dos estágios de fissuração e de ruptura;
- A ruptura do cabo em um ponto tem consequências muito restritas, pois como o concreto e o aço estão solidarizados, apenas o ponto da ruptura ficará sem protensão;
- A nata de cimento, quando bem injetada, constitui uma proteção confiável e permanente para a armadura ativa.

5.1.9 Estados limites de uma estrutura

Os estados limites representados pelo ABNT NBR 6118:2014 (SANTOS, 2015).

- Estado Limite Último (ELU)
Significa o colapso da estrutura, ou uma formas que paralise o uso da estrutura devido ela está bastante danificada (SANTOS, 2015).
- Estado Limite de Formação de Fissuras (ELS-F)

Estado quando começa a abrir as fissuras. Esse ponto chega quando a tração a resistência do concreto é igual a de flexão (SANTOS, 2015).

- Estado Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W)

Estado que a abertura da fissura (w_k) chega ao seu máximo, (Figura 8).

Figura 8 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	Combinação frequente
		ELS-F	
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	Combinação quase permanente
		ELS-D ^a	
		ELS-F	
		Verificar as duas condições abaixo	Combinação rara
		ELS-F	
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 2.5.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Fonte: Tabela 13.4 da NBR 6118 (2014).

- Estado Limite de Deformação Excessivas (ELS-DEF)

Estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal, dados no item 13.3 da NBR 6118:2014 (SANTOS, 2015).

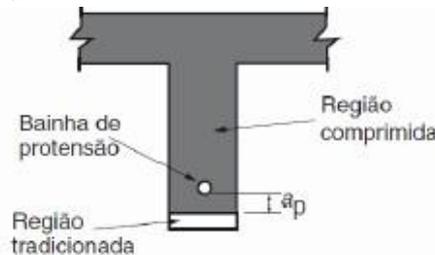
- Estado Limite de Descompressão (ELS-D)

Estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção (SANTOS, 2015).

- Estado Limite de Descompressão Parcial (ELS-DP)

Estado no que garante a compressão nas armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância a_p , que é a distância da parte tracionada até a cordoalha, (Figura 9).

Figura 9 - Seção submetida à descompressão parcial



Fonte: Santos

- Estado Limite de Compressão Excessiva (ELS-CE)

Estado que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido. O ELS-CE tem sua utilização quando for a verificação da aplicação de protensão. Assim, a tensão máxima de compressão na seção do concreto não pode ultrapassar 70% da resistência f_{ckj} característica para a idade de aplicação da protensão (SANTOS, 2015).

5.1.10 Níveis de protensão

A protensão se divide em 3 níveis, cada nível é chamado de completa, limitada ou parcial. A diferença entre os níveis está na questão de aguentar os esforços que vão ser a força aplicada nos cabos (SOUZA,2020).

5.1.10.1 Protensão completa (nível 3)

Para ser realizado a protensão completa de atender aos casos de elementos com armadura pré-tracionada em ambientes de Classe de Agressividade Ambiental (CAA) III e IV. Estas classes mostra o risco de deterioração da estrutura por fatores ambientais, (SANTOS, 2015).

De acordo com Santos (2015), devem ser atendidas as duas condições a seguir:

- Para combinações frequentes de ações é respeitado o estado limite de descompressão (ELS-D). O ESD-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm, a critério do projetista;

- Para as combinações raras de ações é respeitado o estado limite de formação de fissuras (ELS-F).

Segundo SOUZA (2020), na protensão completa não se admitem tensões normais de tração no concreto, decorrentes da flexão, a não ser em casos excepcionais.

Figura 10 - Classes de agressividade

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Tabela 6.1 da NBR 6118 (2014).

5.1.10.2 Protensão limitada (Nível 2)

As condições de protensão limitada devem ser atendidas no caso de elementos com armadura pré-tracionada em ambientes de CAA II ou com armadura pós-tracionada em ambientes de CAA III e IV (SANTOS, 2015).

Conforme Santos (2015) devem ser atendidas as duas condições a seguir:

- Para as combinações quase permanentes de ações é respeitado o estado limite de descompressão (ELS-D). A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm;
- Para as combinações frequentes de ações é respeitado o estado limite de formação de fissuras (ELS-F).

Para combinações quase permanentes não são permitidas tensões de tração no concreto, já para combinações frequentes são admitidas tensões de tração, porém sem ultrapassar a resistência à tração do concreto na flexão, f_{ctf} .

5.1.10.3 Protensão parcial (Nível 1)

Para ambientes com armadura pré-tracionada (CAA I) ou com armaduras pós-tracionadas (CAA I e II) as condições de protensão são para serem utilizadas (SANTOS, 2015).

De acordo com Santos (2015), para a protensão parcial, somente uma condição é imposta:

- Para condições frequentes de ações é respeitado o estado limite de abertura de fissuras (ELS-W), com $w_k \leq 0,2$ mm, ou seja, é admitida a fissuração, desde que as fissuras características não ultrapassem 0,2 mm.

5.2 ENERGIA EÓLICA

O sol quando incidi a energia solar sobre a terra, por ela ser geoide, gera um aquecimento desregular na atmosfera, fazendo com que criem sistemas de convecção atmosférica, o ar quente por ser mais leve que o ar frio sobe e o ar frio por ser mais denso desce, ocasionando correntes de vento. Esse movimento do ar originado devido à diferenças de pressões, fazendo com que o planeta sempre esteja em equilíbrio, esse acontecimento faz-se com que considere que a energia eólica é conversão de energia cinética através da movimentação de massas de ar, ou seja, do vento em energia elétrica (BERTUZZI, 2013).

Uns dos efeitos naturais que influenciam na velocidade e na direção dos ventos são a temperatura, precipitação de chuvas, densidade do ar, obstáculos no terreno, continentalidade, maritimidade, latitude e altitude. Um outro fator que afeta o ciclo do ar é a força de Coriolis. Esta representa movimentos circulares, provocando deslocamento de massas de ar entre o equador e os polos, (BERTUZZI, 2013).

5.2.1 Histórico da utilização de energia eólica

A utilização da energia eólica é gerada a partir da energia cinética dos ventos. Os primeiros meios de aproveitamento de vento provem dos trabalhos mecânicos. Os barcos utilizavam velas junto com os remos que eram manuseados pelos escravos, para se movimentar. As velas foram utilizadas

também, para ajudar no trabalho de força animal. Em meados de 200 a.C., foi construído os primeiros moinhos de vento para a aplicação em moagem dos grãos e bombeamento de água (BERTUZZI, 2013).

Os moinhos foram criados pelos Holandeses, por volta de 1300 d.C. Esses moinhos (Figura 11), de eixo vertical, faz o mesmo trabalho, porém com um rendimento melhor. Foi utilizado no período medieval espalhado pela Europa, como Inglaterra, França e Holanda, (KALDELLIS; ZAFIRAKIS, 2011). A ideia dessa tecnologia foi aplicada nos aerogeradores. Esses moinhos são um pouco diferentes e o sistema de gerar a própria energia esta diretamente ligado a todo o sistema, (BERTUZZI, 2013).

Figura 11 - Moinhos da Holanda



Fonte: Folha de São Paulo (2016).

Em julho de 1887 o professor James Blyth da Universidade de Glasgow (2008) criou o primeiro moinho que gera eletricidade e no mesmo ano Charles F. Brush criou o primeiro aerogerador em Ohio nos EUA, (BERTUZZI, 2013).

O gerador tinha um rotor com diâmetro de 17 metros e 144 pás de madeira. A turbina gerava somente 12 kW, no qual precisava de 408 baterias. Elas geravam energia para a casa do inventor, funcionando durante 20 anos. Brush foi uma das pessoas que fundaram a indústria elétrica nos EUA. Com o tempo surgiram vários físicos e engenheiros de muitos países que foram melhorando as turbinas, até as que são usadas no século XXI. O primeiro país que teve a turbina eólica comercial ligada diretamente a rede elétrica foi a Dinamarca, (BERTUZZI, 2013).

A energia eólica não diferente dos outros meios de fonte de energia tem

seus malefícios e benefícios para o meio ambiente, e um dos benefícios é que as torres não ocupam muito espaço para serem instaladas, não emite poluentes ou lixo radioativos para o ambiente, já os seus pontos negativos é que acaba afetando a fauna devido ao ruído do motor e devido a rotação das pás que pode acabar matando pássaros, e a questão do impacto visual e das interferências na rede da antena, afetando o ser humano, (BERTUZZI, 2013).

5.2.1.1 Fundação de moinhos de vento

Os moinhos tiveram a responsabilidade, antigamente, pelo desenvolvimento do poder econômico de muitas regiões do planeta. Essas construções no início eram construídas com madeira leve, assim, não havendo a necessidade de fundações muito reforçadas. Podem apenas serem suportadas por estacas de madeira e blocos de rochas, (BERTUZZI, 2013).

Figura 12 - Moinho de madeira



Fonte: Yandex (2018).

Com as inovações tecnológicas da engenharia dos moinhos de vento, essas máquinas cresceram bastante nas suas proporções, assim suas fundações se tornaram um elemento de grande importância. Contudo as soluções como fundação rasa composta por blocos cerâmicos eram utilizadas para resistir aos

carregamentos do seu próprio peso e das forças dos ventos. Esses moinhos foram tão bem projetados que até hoje uns ainda se encontram de pé, (BERTUZZI, 2013).

5.2.2 Parque eólico

Parque eólico é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. A proximidade geográfica entre as turbinas tem como vantagem a diluição de custos para o arrendamento do terreno, a construção das fundações, os custos de montagem, menores equipes de operação e manutenção e estoques de reposição. Os parques eólicos com turbinas de projeto consolidado e manutenção adequada apresentam fatores de disponibilidade típicos da ordem de 0.98. (RIBEIRO, 2013).

Figura 13 - Torres eólicas



Fonte: A tarde (2015).

O Plano Decenal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) concluiu que a energia eólica cresce mais acentuadamente que as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) em potencial instalado. Uma característica da energia eólica é a sua variação da geração de energia, sendo utilizada como energia

complementar, e não principal, já que o vento não pode ser guardado para fazer-se uso dele Posteriormente, diferente dos PCHs, que tem geração constante de energia. Mais um fator positivo para o processo de criação dos parques é o fato de que quando analisado os impactos ambientais é mais rápida quando comparado com os PCHs (BERTUZZI,2013).

Os passos para o entendimento de um parque eólico são: Estudo geológico da região, viabilidade ambiental e técnica, projeto básico e projeto executivo. As estruturas de um uma torre eólica normalmente apresentam vida útil por projeto de 20 anos, isso significa que vai ter assegurado que o projeto funcionará 20 anos, tecnicamente falando. Depois desse período a empresa que projetou e a que executou ficariam livres da responsabilidade de reparo e da responsabilidade técnica. Porém isso não significa que os aerogeradores pararão de funcionar, ele pode continuar gerando energia, porém necessitará de vistorias constantes, (BERTUZZI, 2013).

Figura 14 - Parque eólico de Pararácuru- CE



Fonte: Furtado (2014).

Para fazer um projeto de complexos eólicos eles normalmente apresentam em torno de 20 a 50 aerogeradores, sempre buscando uma forma de

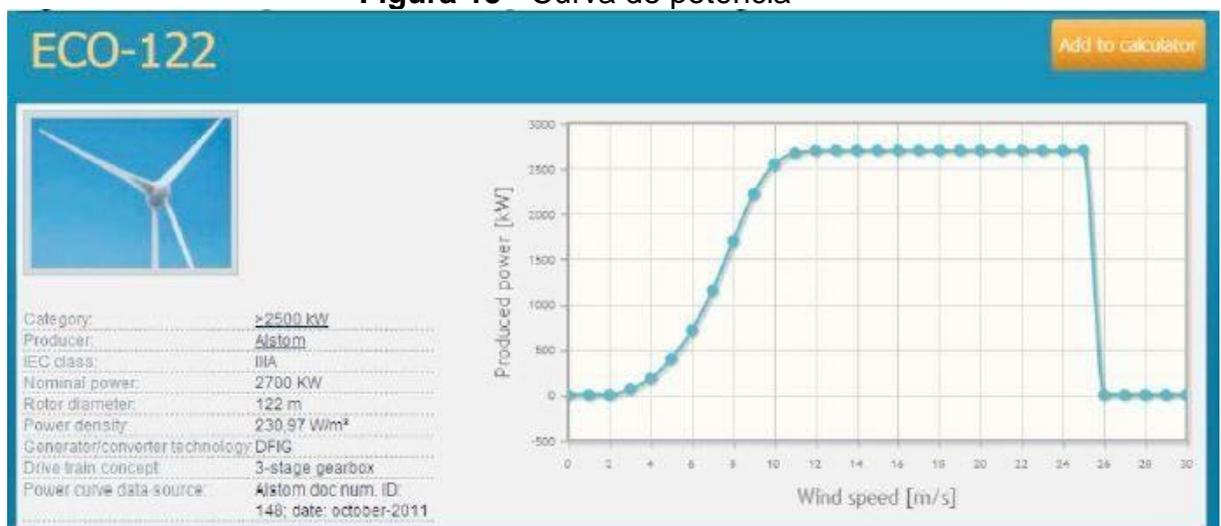
tornar o projeto viável. O terreno escolhido para a execução do parque eólico segue o sistema de arrendamento. É constituído um contrato entre o dono do terreno e os investidores, que vai receber uma percentagem da receita, em torno de 1% a 3%. Outro fator importante é a localização, pois tem que ser de fácil acesso devido possuir máquinas pesadas e ter disponibilidade de materiais, como brita e areia, (BERTUZZI, 2013).

As torres também são classificadas quanto a sua localização. Ou seja, considera-se que a torre eólica pode estar instalada em terra firme, on-shore (quando não tem massa de água superficial, entre a torre e/ou fundação), ou as torres eólicas instaladas em alto mar ou a pouca distancia da costa, offshore (ao contrário do on-shore). Sempre deve ser levado em consideração a questão de custos de instalação, quanto maior for a distância da costa o custo aumenta, como a transmissão de energia também, (BERTUZZI, 2013).

5.2.2.1 Potência instalada

O rotor e as três pás da torre eólica extraem energia cinética do vento, ocorrendo diminuição da velocidade do vento, devido ao princípio de conservação de massa. A turbina eólica não é capaz de extrair toda a energia dos ventos, caso isso ocorresse, a velocidade de saída seria zero. Existe um limite físico para extração da potência do vento. O Limite de Betz determina que 59,3% é o valor máximo que uma turbina pode capturar da energia cinética do vento. Além desse fator limitante, o gerador também apresenta taxa de rendimento. Portanto, pode-se concluir que apenas uma parcela da energia cinética do vento é convertida em eletricidade (SANTOS, 2015).

Figura 15 - Curva de potência



Fonte: Estudos de aspectos de engenharia implantação de torres eólicas, (Bertuzzi, 2013).

Nem sempre o aerogerador opera com a mesma potência em todas as velocidades quando o vento incide perante as pás. Para verificar se a potência que será entregue às residências. Deve combinar a distribuição de vento com a curva de potência do aparelho. Normalmente os fabricantes de cada aerogerador classifica a potência de cada uma das máquinas, fornecendo a potência nominal. Ou seja, a potência máxima que a máquina pode gerar, (BERTUZZI, 2013).

A soma de um complexo ou parque eólico é chamado de potência instalada, essa potência é utilizada para determinar a eletricidade que será gerada, e para encontrar esse valor é só multiplicar a potência instalada pelo fator de capacidade. Ou seja, além da quantidade de geradores, a potência varia de acordo com a incidência de vento da região, altura das torres e eficiência dos motores. Como é muito inconstante a produção, a energia eólica ainda é tratada com uma fonte complementar, (BERTUZZI, 2013).

5.2.3 Locação das torres

Os parques não podem ser montados em qualquer lugar, pois se não tiver um estudo para as usinas eólicas podem resultar numa ineficiência e não trazer lucros, sendo financeiramente inviável. Devido a esse motivo, antes mesmo de ser criado o parque, a área deve ser estudada para ser realizado o levantamento do vento que ajudará a estimar quanto ele pode render, para escolher um local onde tenha uma maior eficiência na obtenção de energia e quanto ele pode gerar de energia, para assim escolher melhor a turbina para utilizar nas torres (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Para um bom estudo do vento na região, faz-se necessário que sejam pelo menos três anos de verificação, essa etapa é muito importante, pois dela saberemos o ângulo que a turbina deve está rotacionada. Este estudo é feito através de anemômetros, ele identifica também a frequência do vento (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Com a informação da densidade e da frequência do mesmo encontrado pelo anemômetro, calcula-se a energia e da energia é calculada a potência. Para a turbina captar o vento, primeiramente ele passa pelas pás do rotor, gerando a rotação do mesmo e assim gerando a energia cinética e dentro do aerogerador transforma essa energia cinética em energia elétrica. Então, a partir disso a

potência é encontrada através da Equação 3 abaixo:

Equação 3 - Potência

$$P \text{ (watts)} = \frac{1}{2} \times \rho \times A_r \times v^3 \times C_p \times n$$

Onde:

P = Potência;

ρ = Densidade do ar (Kg/m³);

A_r = Área do rotor ($(\pi \cdot d^2)/4$);

C_p = Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

V = velocidade do vento em m/s;

N = eficiência do conjunto gerador;

Todo cálculo mostra o sistema ideal, porém temos que entender que ainda não existe o sistema perfeito, todo sistema tem suas perdas e para calcular a potência já com sua perda é utilizar um fator conhecido como coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, representado na fórmula por C_p , (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Normalmente as torres dos parques eólicos são enfileiradas devido a posição de maior incidência dos ventos. Por esse motivo, obtém-se uma maior capacidade, essa distribuição facilita a construção de estradas de acesso às torres e uma organização no projeto, (BERTUZZI, 2013).

Recentemente, as leis ambientais podem interferir no projeto, decidindo não apenas com que as torres fiquem enfileiradas devido ao impacto que causa na fauna, mas também como quando acontece a migração dos pássaros de uma região para outra, quando se deparam com grandes estruturas como são as torres, (BERTUZZI, 2013).

Segundo SOUZA (2020), outros fatores que influenciam a atuação do vento são as rugosidades do ambiente e a altura.

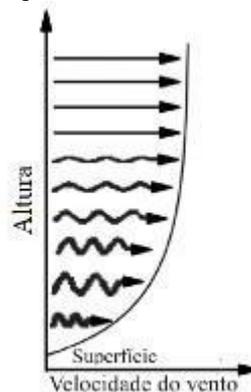
A rugosidade tem a ver com as irregularidades do terreno, a questão do relevo e os obstáculos, de acordo com suas características a classe (Figura 16) pode variar de zero a quatro, tendo intervalo de meio entre eles, e mostrando também o comprimento de rugosidade, (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Figura 16 - Tabela de classe e o comprimento de rugosidade

Classe de Rugosidade	Comprimento de Rugosidade (m)	Descrição da paisagem
0	0,0002	Superfície do mar.
0,5	0,0024	Terreno com a superfície plana, aberto, como aeroportos, grama cortada, etc.
1	0,03	Área agrícola aberta, sem fendas e cercas, e construções dispersas.
1,5	0,055	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8 m de altura, com uma distância de até 1.250 m.
2	0,1	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8 m de altura, com uma distância de até 500 m.
2,5	0,2	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8 m de altura, com uma distância de até 800 m.
3	0,4	Vilas, cidades pequenas, áreas agrícolas com cercas altas, florestas e terrenos irregulares e com rugosidade.
3,5	0,8	Grandes cidades com edifícios altos.
4	1,6	Cidades muito grandes com edifícios altos e arranha-céus.

Fonte: WINTER; SEGALOVICH (2018).

Já as alturas elas influenciam nas velocidades dos ventos (Figura 17), as suas alturas influenciam para ter um melhor aproveitamento do potencial de energia, (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Figura 17 - Atuação do vento devido à altura

Fonte: WINTER; SEGALOVICH (2018).

5.2.4 Torre de concreto protendido

As torres protendidas expressam-se a partir da pretensão da cordoalha, que tenha um módulo de elasticidade alto, para que o conjunto da estrutura de concreto armado e as cordoalhas ganhem ductilidade e rigidez para combater as cargas exercidas pelo vento, (ROCHA, 2016).

Cada dia as torres de concreto vem sendo mais vista no mercado, pois a

demanda de energia aumenta, assim, os aerogeradores são fabricados com mais potência e para que ocorra a rotação do rotor, (Figura 17), faz-se necessário de pás, (Figura 17), e de que sejam construídas cada vez mais altas. No entanto as torres necessitam ser cada dia maior para atender as necessidades, (ROCHA, 2016).

De acordo com a ABNT NBR, as propriedades físicas do concreto fazem com que tenham uma grande resistência a compressão e só 10% da resistência garantida de compressão refere-se à resistência a tração. Para que seja garantido o ganho de resistência à tração são adicionadas as barras de ferros longitudinais, sendo este o concreto armado (NBR 6118:2014/ NBR12142:2010). As tensões são absorvidas por meio do pré-tensionamento das cordoalhas, criando um sistema estrutural pré-tensionado. As cordoalhas são colocadas na parede externa (Figura 20) ou internamente (Figura 18), para ter como ser realizado posteriormente uma inspeção das mesmas, (ROCHA, 2016).

Figura 18 - Torres pré moldadas protendidas internamente



Fonte: Impacto (2020).

Figura 19 - Protensão nas cordoalhas das torres eólicas



Fonte: Impacto (2020).

Figura 20 - Protensão externa



Fonte: Duarte (2014).

As torres de concreto pré-tensionadas podem ser moldadas “*in loco*” através das formas deslizantes, como as pré-moldadas (Figura 21), que são pré-fabricadas e montadas parecidamente com as torres de aço (ROCHA, 2016).

Figura 21 - Estrutura pré-moldada



Fonte: Duarte (2014a).

5.2.4.1 Torre de concreto pré-moldado protendido

A utilização do concreto pré-moldado para servir de apoio para os aerogeradores vem se tornando mais popular devido grande viabilidade de utilizá-lo, pois possui alta rigidez, como já citado, e outro fator é a facilidade de ser transportado. As fabricas dos pré-moldados (Figura 23) podem ser instaladas dentro ou fora da construção, porém se for fora terá um custo maior, pois elas serão feitas para que não haja necessidade de carretas especiais e por isso mais custoso para o transporte das peças, (ROCHA, 2016).

Figura 22 - Fábrica de Pré-moldados

Fonte: Duarte (2014a).

As torres que são executadas de concreto pré-moldadas tem muitos jeitos de serem projetadas, as que usam mais são as que possuem em torno de 20 a 25 anéis com 3 a 5 metros cada anel, isso varia, pois depende da altura da torre a ser executada, e um seguimento para haver a conexão entre a nacelle e a torre. Como a base é maior, os anéis inferiores são maiores e tendo que ser dividido em dois semicírculos (Figura 27) que são pré montados na plataforma, mesmo. Outros tipos de pré-moldados são com anéis maiores, chamados de tramos, cada um com 20 metros de altura. Por ser maior, conseqüentemente, ele usa menos seguimento, isso seria uma vantagem, porém a peça fica mais pesada, mas isso não muda, pois, o guindaste não vai ser mudado, (ROCHA, 2016).

Figura 23 - Base de uma torre de concreto pré-moldada



Fonte: Massa cinzenta, (2020).

Outro tipo de torre pré-moldada é a que a DTS (Dois A Tower System), mais conhecida como a Dois A (empresa do Rio Grande do Norte), fabrica. Essa torre é moldada com um concreto chamado de Ductal, que tem uma performance diferenciada quando comparada aos outros concretos, pois essa tecnologia faz com que o concreto tenha um ganho de 300% de resistência à compressão e ainda é 50% mais leve (ROCHA, 2016).

Como já foi dito anteriormente os pré-moldados tem a vantagem de a fábrica ser facilmente deslocada para ser instalada na própria obra, diminuindo o custo com os transportes, sendo mais rentável, financeiramente, (ROCHA, 2016).

Outra vantagem na qual podemos citar é a facilidade de encontrar o material e grande demanda de empresas que existem havendo assim uma competição de valores e assim podemos escolher a que é melhor em custo benefício para o empresário. Normalmente, utiliza-se a matéria prima da própria região que será instalado o parque eólico (ROCHA, 2016).

As torres pré-moldadas versus as de moldes deslizantes quem sai ganhando são as pré-moldadas por serem feitas em fábricas, lá terão mais cuidado quando for feito o concreto, lá tem o molde já pronto para ser executada, lá recebe o tempo de cura necessário estabelecido por norma. Já em executado "*in loco*" não terá esse cuidado (ROCHA, 2016).

Como já comentado, as torres pré-moldadas têm alta rigidez tendo uma grande vantagem com ações dinâmicas, e como o quesito é o aumento da altura das torres, elas têm a vantagem (ROCHA, 2016).

De acordo com SOUZA (2020), Como as torres de pré-moldado ressaltam tanto no estrutural, como no logístico, as torres pré-moldadas estão entre as mais usadas por todo o Brasil. As torres pré-moldadas protendidas vêm para superar as alturas que as pré-moldadas não conseguiram sozinhas.

5.2.4.2 Vantagens da utilização do pré-moldado protendido

Para realizar a conferência da integridade estrutural e o comportamento das juntas das peças pré-moldadas, faz-se necessário a aplicação da protensão para os Estados Limites de utilização, que entra a fissuração, a fadiga e deformação ou limite de deslocamento da nascelle, e o Estado Limite Último, seria a ruptura (Duarte, 2014b).

Para entender as vantagens que o pré-moldado protendido algumas das soluções da utilização do mesmo são, a baixa manutenção, a durabilidade alta, a não presença de oxidação, um melhor comportamento dinâmico (ou seja, tem uma rigidez transversal maior, reduz as ações dinâmicas, diminuindo os grandes deslocamentos), maior resistência ao fogo (devido aos cobrimentos maiores), menor custo com a utilização das cordoalhas (pois no Brasil há uma grande competitividade e solução no mercado do concreto x soluções de aço), alta facilidade da industrialização das peças de concreto (Pré-moldados), não há problema de flambagem (quando há altas tensões, normalmente acontece em torres metálicas) e a interrupção de produção (a torre de concreto, na mesma altura de uma metálica, tem uma produção de energia maior), (Duarte, 2014b).

5.2.5 Panorama da energia eólica offshore

A energia eólica offshore consiste no aproveitamento da energia cinética do vento, através da implantação de usinas eólicas ao longo da costa marítima. A transformação da energia do vento em energia útil se dá através de aerogeradores para geração de eletricidade. Trata-se de uma fonte energética abundante, limpa e renovável e, no caso da offshore, apresenta uma série de vantagens no que se refere à uniformidade e velocidade do vento e não ocupação de terras habitáveis, (Costa, 2018).

Figura 24 - Complexo eólico offshore



Fonte: IBERDROLA

A presente seção visa apresentar de maneira geral o contexto de utilização da energia eólica offshore no mundo e, particularmente, no Brasil, atentando para o panorama do mercado atual e potencial energético existente, (Costa, 2018).

5.2.5.1 Cenário mundial

De acordo com relatório do Global Wind Energy Council [15], em 2016 um total de 14 países já tinham parques eólicos em alto mar. A Dinamarca foi o país pioneiro em 1991, com a produção de energia offshore na primeira usina eólica mundial, a Vindeby [7]. Desde então, a presença da União Europeia no mercado foi bastante expressiva. Atualmente, o Mar do Norte concentra cerca de 72% da energia eólica offshore da Europa, distribuída entre a Noruega, Dinamarca, Reino Unido, Alemanha, Holanda, Bélgica e França [15], (Costa, 2018).

O início do uso massivo da eólica offshore na Europa se deu, sobretudo, com a saturação do espaço continental para instalação de novos empreendimentos, aliado a uma conjuntura de impulso da indústria offshore [16]. Recentemente, a modalidade energética já apresenta certa maturidade e Reino Unido, Dinamarca e Alemanha representam os países com as maiores usinas eólicas offshore

operacionais e em construção do mundo, com tamanhos variando de 1GW até 2,5 GW [7], (Costa, 2018).

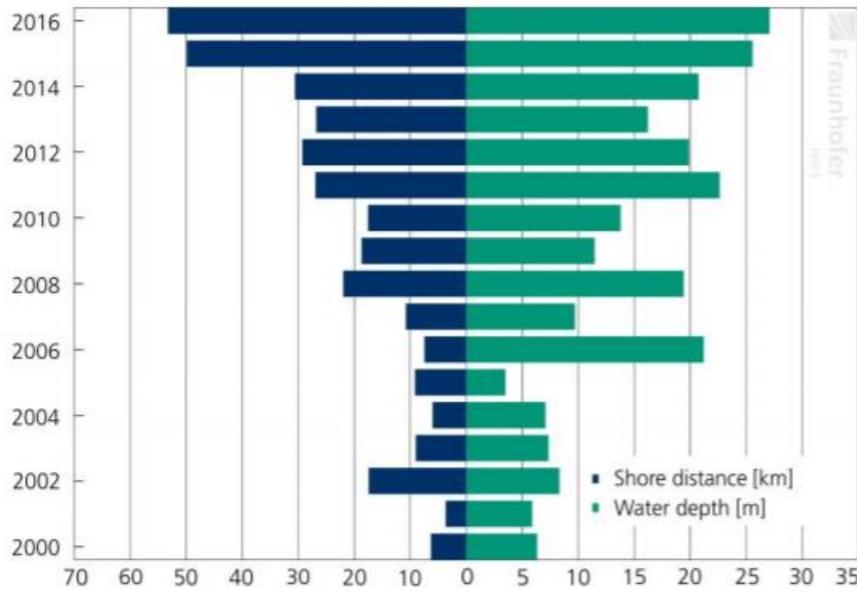
Figura 25 - Complexo eólico offshore



Fonte: IBERDROLA

O amadurecimento da indústria, da tecnologia e a confiança dos investidores nos projetos, aliada a uma nova geração de aerogeradores causaram uma queda brusca nos preços da eólica offshore nos últimos anos [15]. Consequentemente à redução de custo e ao aumento de experiência de mercado, cada vez mais projetos foram executados em maiores distâncias da costa e em laminais d'água mais profundas, o que é ilustrado no Gráfico 1, (Costa, 2018).

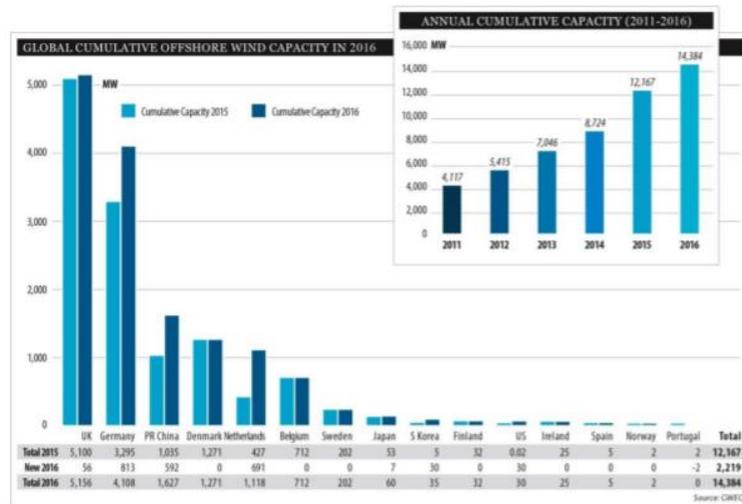
Figura 26 - Gráfico 1 - Distância e profundidade de parques eólicos offshore



Fonte: Fraunhofer IWES

A tendência atual é a expansão da energia eólica offshore em outros continentes. A Europa ainda lidera o mercado, mas a recente baixa de preços atraiu a atenção de diversos países, sobretudo na América do Norte e Ásia, como pode ser visto no Gráfico 2. A primeira usina eólica offshore implantada nos Estados Unidos se tornou operacional em 2016 e mais projetos estão em andamento atualmente. Já a China impressionou com o impulso da indústria, tendo o maior crescimento recente e uma capacidade instalada de 169 GW, visando 210 GW até o ano de 2020, (Costa, 2018).

Figura 27 - Gráfico 2 - Acúmulo de energia eólica offshore no mundo



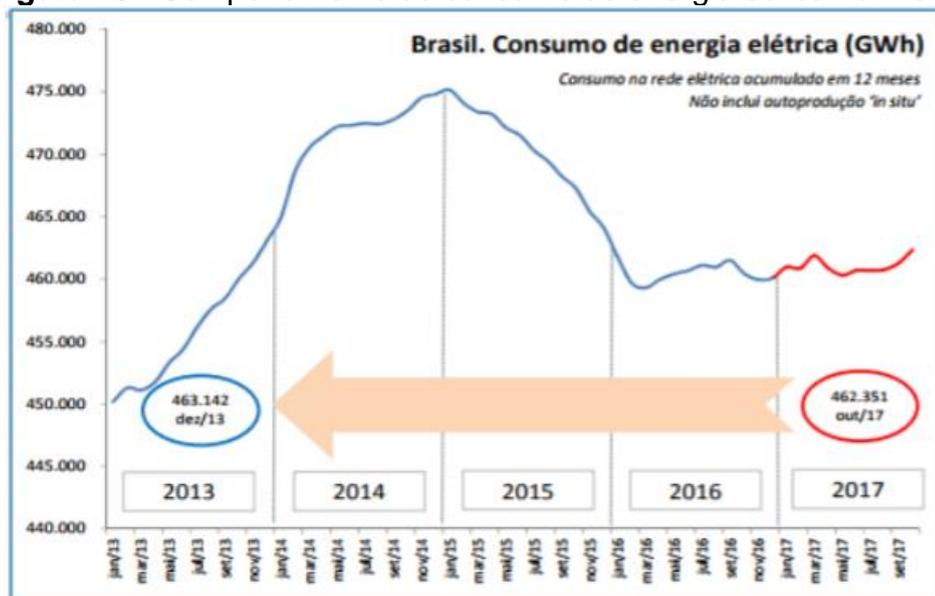
Fonte: GWEC [15]

5.2.5.2 Potencial brasileiro

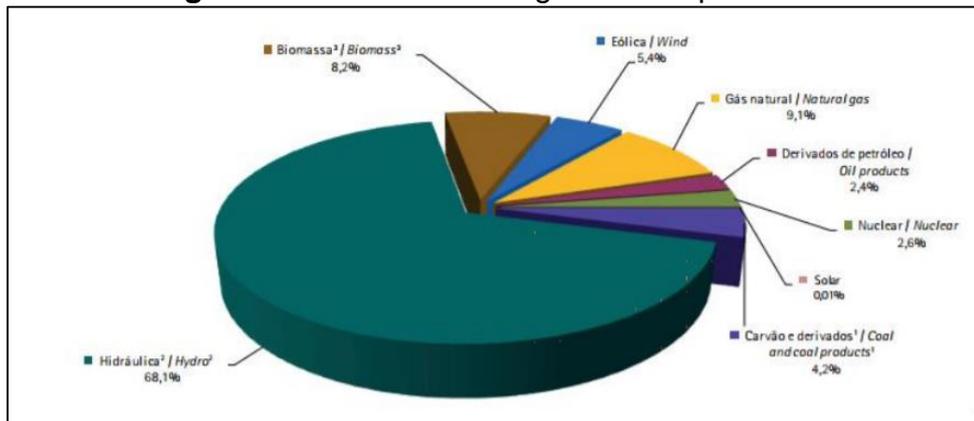
Um fator de destaque no contexto energético nacional é o comportamento da demanda elétrica atrelada ao consumo interno. Nos últimos anos, com o cenário econômico desfavorável, o consumo de energia elétrica se manteve baixo quando comparado com os índices de 2014, como pode ser visto no Gráfico 3. Entretanto, percebe-se uma recuperação nos últimos meses de 2017 e, de acordo com estudos divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética [18], o consumo brasileiro vai alcançar 1.624 terawatt-hora até o ano de 2050, (Costa, 2018).

A fim de garantir a demanda prevista pelo estudo da EPE [18], serão necessários muitos investimentos na geração e transmissão de energia elétrica e diversificação da matriz energética, que atualmente é baseada na produção hidrelétrica como é ilustrado no Gráfico (Figura 28), (Costa, 2018).

Figura 28 - Comportamento do consumo de energia eólica no Brasil.

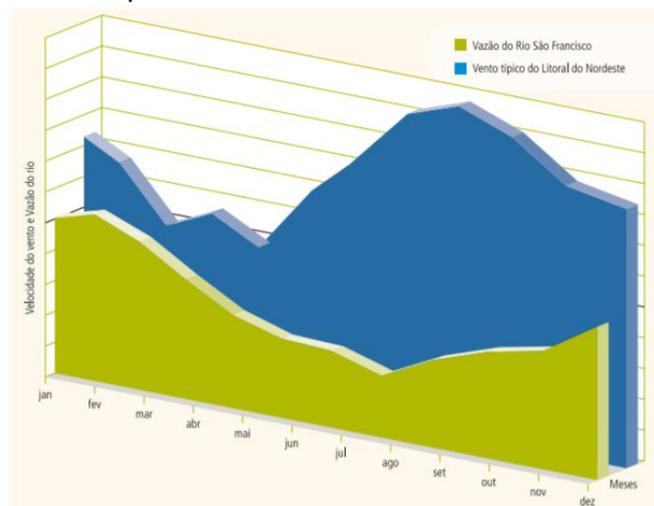


Fonte: EPE [18]

Figura 29 - Oferta de energia elétrica por fonte.

Fonte: EPE [18]

A participação da fonte eólica na oferta interna de energia elétrica atinge, atualmente, 5,4% do mercado. São 503 parques eólicos e 6.500 geradores em todo território nacional e a modalidade continua em trajetória ascendente. Uma das grandes vantagens da geração de eletricidade por meio dos ventos no Brasil é que ela pode servir como fonte complementar à modalidade hidrelétrica. Isso se evidencia principalmente no Nordeste, onde o potencial da energia eólica é mais intenso no segundo semestre do ano, período de seca na região. Já nos primeiros seis meses do ano, quando as chuvas se tornam mais frequentes, os reservatórios das hidrelétricas se mantêm em níveis adequados ao funcionamento e a oferta eólica diminui. Tal comportamento pode ser visualizado no gráfico abaixo, (Costa, 2018).

Figura 30 - Complementaridade das fontes eólica e hidrelétrica

Fonte: ANEEL [18]

Embora existam diversos parques eólicos instalados no Brasil, até o momento ainda não existem instalações eólicas offshore em operação. Apesar do grande potencial de ventos na ZEE brasileira, que apresentou um potencial energético de 1,78 TW [20], superando assim o potencial estimado para a área continental do país, a fonte eólica offshore ainda enfrenta alguns obstáculos. No Brasil, a modalidade esbarra em altos custos, falta de regulamentação, falta de dados coletados e grandes extensões de terras desabitadas. De acordo com especialistas, a fonte on-shore de energia vem se mostrando próspera em todos os aspectos, com custos competitivos frente às outras modalidades. Dessa maneira, a previsão é que a geração de energia eólica offshore só se torne estrategicamente atrativa no Brasil daqui a 10 a 20 anos, (Costa, 2018).

Contudo, projetos conceituais de parques eólicos offshore já são uma realidade no país. O Parque Eólico Asa Branca é um projeto que prevê a instalação de uma usina com capacidade de 500 MW na região costeira do estado de Ceará, com operação prevista para 2022. Além disso, a própria Petrobras estaria realizando medições em plataformas com o objetivo de estudar o potencial da fonte eólica [16]. A expertise na operação offshore para o petróleo e gás natural pode ser um diferencial para a petrolífera no caso de investimentos em uma nova área, (Costa, 2018).

5.3 FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE

As fundações têm a função básica de manter o aerogerador apoiado ao solo marinho e estão sujeitas a carregamentos ambientais provenientes de correntes marinhas, ondas e ventos que atuam na estrutura de suporte e na própria turbina em operação. As fundações estão sujeitas a condições específicas em cada local, requerendo, portanto, projetos específicos para cada locação (TEMPEL et al., 2010 apud NUNES, 2020).

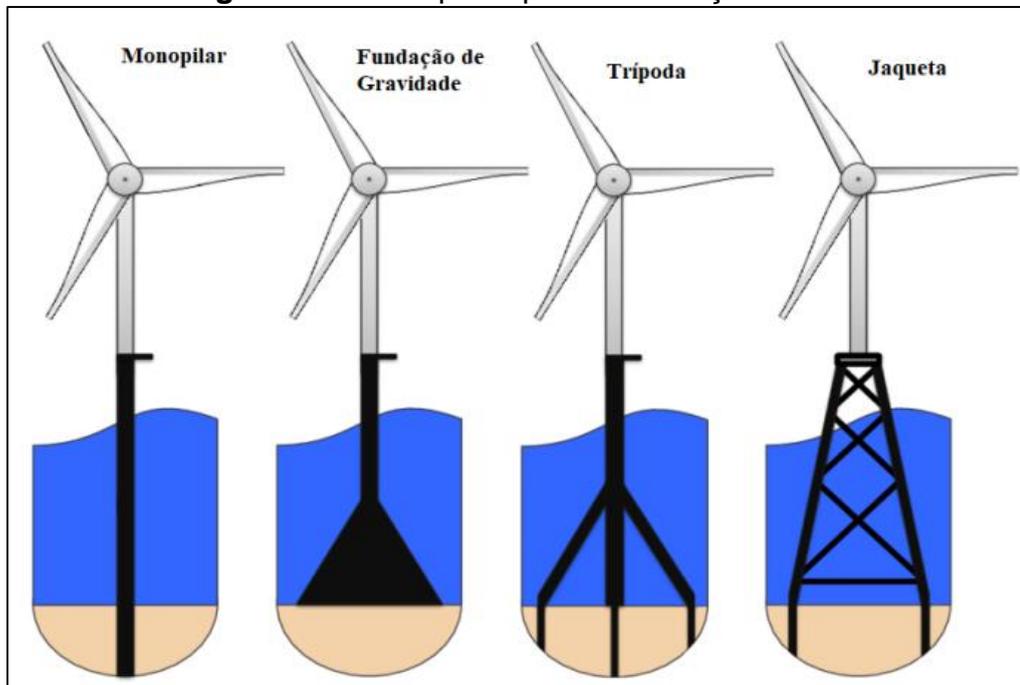
A fundação de uma turbina eólica offshore é projetada de acordo com a profundidade marítima, as condições meteoceanográficas e as características do solo marinho no local onde se pretende instalá-la. As estruturas de suporte utilizadas em fundações de turbinas eólicas offshore devem ser capazes de suportar cargas hidrodinâmicas e eólicas simultaneamente, bem como cargas em diferentes frequências provenientes do complexo comportamento dinâmico da turbina em

movimento circular. As dimensões e massa do conjunto torre e turbina também são determinantes para o adequado dimensionamento da fundação (THOMSEN, 2012 apud NUNES, 2020).

Segundo NUNES (2020, p. 76 apud TEMPEL et al., 2010), utilizam o termo fundação para se referir à parte da estrutura de suporte da turbina, ou seja, a parte localizada abaixo e ao nível da água, excluindo a torre. A finalidade das fundações é direcionar as cargas na estrutura de suporte para o fundo do mar e são classificadas pela forma como estão conectadas ao solo. Para Kaiser e Snyder (2012), o sistema de suporte de aerogeradores offshore inclui a fundação e uma peça de transição para absorver tolerâncias na inclinação e simplificar a fixação da torre.

Estruturas de suporte utilizadas em fundações são construídas em diversas geometrias e dimensões. Resumidamente, cinco tipos básicos de estruturas são os mais utilizados em UEOs: (i) monopilares (*monopiles*), (ii) fundações de gravidade, (iii) tripodas, (iv) jaquetas (v) flutuantes, em especial dos tipos semissubmersível, *tension leg platform* (TLP) e *spar buoy* (KAISER; SNYDER, 2012 apud NUNES, 2020).

Figura 31 - Principais tipos de fundações fixas



Fonte: Adaptado de van der Valk (2014)

De acordo com Cavazzi e Dutton (2016), para águas rasas, de até 30 m de profundidade, o tipo de fundação mais utilizado é o de monopilar; para águas

intermediárias, entre 30 e 60 m, é o de jaqueta; e para águas profundas, acima dos 60 m, o ideal são turbinas flutuantes.

Figura 32 - Principais tipos de fundações flutuantes



Fonte: Adaptado de Joshua Bauer, NREL, US Department of Energy (2016)

Fundações do tipo monopilar são compostas de tubos de aço de alta espessura (até 150 mm) e de grande diâmetro (4 a 6 metros) que são inseridas no solo marinho por cravação com o uso de martelo hidráulico de grande porte ou perfuração. Atualmente, os monopilares são o tipo de fundação mais utilizado em UEOs em águas rasas, com profundidade inferior a 50 metros. Tal opção se dá pelo menor custo e simplicidade desta solução quando comparada às outras alternativas. Devido às limitações de profundidade e condições de superfície, é provável que no futuro os monopilares percam participação relativa entre as principais de fundações offshore (KAISER; SNYDER, 2012 apud NUNES, 2020).

Fundações de gravidade são estruturas de concreto que utilizam o próprio peso para resistir esforços provenientes dos ventos e ondas. A base de concreto, que aplica pressão vertical à área imediatamente abaixo, permanece sobre o solo marinho. Geralmente, a base possui diâmetro entre 15 e 25 metros e todos os esforços e momentos fletores impostos são transportados à base da fundação (THOMSEN, 2012). Este tipo de fundação é utilizado em locais onde a instalação de pilares no fundo do mar é difícil, como em solos rochosos ou duros, em águas relativamente rasas, de 15 a 30 metros. Seu uso elimina o problema de ruído inerente

ao processo de cravação da estaca monopilar no solo oceânico (GOVINDJI; JAMES; CARVALLO, 2014).

Fundações do tipo tríпода consistem de um eixo de aço central conectado a três tubos de aço cilíndricos através dos quais o pilar é engastado no fundo do mar. Suportes diagonais são utilizados para apoiar a peça de transição central que se conecta a base da turbina eólica (KAISER; SNYDER, 2012). Onde os monopilares não são viáveis, em águas mais profundas, as trípodas podem ser utilizadas para limitar as deflexões das torres eólicas. A base em tripé adapta o design monopilar, expandindo sua pegada (NUNES, 2020).

Fundações do tipo jaqueta são estruturas de suporte constituídas de treliças de aço, formadas a partir de membros tubulares soldados, os quais se estendem desde o solo marinho até acima da zona de variação de maré. A geometria da jaqueta, tipicamente de base quadrangular, favorece a criação de grande resistência a esforços e momentos fletores, simplesmente por meio do aumento da área quadrangular da base da jaqueta, sem aumentar significativamente a dimensão global da estrutura. Em geral, as jaquetas são cravadas no solo marinho por meio de quatro pilares (NUNES, 2020).

As jaquetas são baseadas na experiência da indústria de óleo e gás em estruturas offshore (MUSIAL et al. 2017). Tratam-se de estruturas robustas e de grande porte que 79% demandam recursos de instalações especiais, que oneram bastante o transporte e instalação. Tipicamente, as jaquetas são estruturas de suporte adequadas para áreas com profundidade variando entre 20 e 60 metros (KAISER; SNYDER, 2012).

Com relação às fundações flutuantes, projetadas para profundidades marítimas superiores a 60 metros, tem-se (ANTUNES, 2016):

- (i) *Tension leg platform* (TLP) – Plataforma de pernas atirantadas. Estrutura semissubmersível ancorada ao fundo do mar com cabos em tensão para dar estabilidade.
- (ii) *Spar Buoy* – Plataforma do tipo Spar. Neste tipo de plataforma, aerogerador é estabilizado por um lastro apoiado a uma boia. Esta estrutura tem centro gravitacional submerso, abaixo do seu centro de flutuação, visto que as partes mais pesadas da estrutura ficam mais abaixo enquanto que as mais à superfície são ocas, subindo o centro de flutuação.

- (iii) Semissubmersível - utiliza uma estrutura semissubmersível que oferece mais estabilidade, assimilando os conceitos estruturais do TLP e do *Spar Buoy*.

Após a instalação da fundação, uma peça de transição (*transition piece*) é posicionada no topo da fundação, no intuito de se criar uma plataforma de nivelamento e ajuste de geometrias entre a torre e a fundação. A peça de transição corrige desalinhamentos que possam ter ocorrido durante o processo de instalação da fundação. Esse componente funciona, também, como suporte para estruturas de aço, que permitem o acesso de pessoal à turbina mediante uma plataforma de trabalho, apoiando cabos e o sistema de proteção contra corrosão, o qual protege a fundação desse evento (BVG ASSOCIATES, 2019).

Tendo como base (SOUZA, 2020), que utilizou os métodos adotados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a confecção de dois traços, ambos on-shore, uma para a classe de agressividade ambiental (CAA) I e outro para a CAA III, que é definida a partir da ABNT NBR 6118:2014. Nos ensaios dos traços elaborados, utilizou a NBR 5738:2016 e a NBR 5739:2018 para as elaborações dos corpos de prova e do ensaio de resistência à compressão, mostrando sua viabilidade de uso e de custo.

De acordo com os resultados de (SOUZA, 2020), mostrou a eficiência dos traços calculados para CAA I e CAA III. Com os ensaios que foram realizados verificou-se a eficácia da resistência à compressão chegando a atingir uma média de 43,76 MPa para a classe de agressividade 3, sendo 25,02% mais resistente a compressão do que a norma exige para a CAA III e 35,85 MPa para a agressividade I, sendo 43,4% mais resistente para o exigido na CAA I, terá alto desempenho como mostra os testes de absorção, regido pela ABNT NBR 9778:2009.

Figura 33 - Tabela de resistência dos corpos de prova a compressão**Tabela 1-** CAA I, com 15 dias de cura

N°	TF	Tipo de ruptura	Absorção	Mpa
1	27,73	B - Cônica e bipartida	0,86	34,63
2	26,05	B - Cônica e bipartida	0,83	32,53
3	30,06	B - Cônica e bipartida	0,85	37,53
4	26,14	B - Cônica e bipartida	0,77	32,64
5	25,08	B - Cônica com mais de uma partição	0,78	31,32
6	24,71	B - Cônica e bipartida	0,84	30,85
7	25,33	E - Cisalhada	0,84	31,63
8	31,35	B - Cônica com mais de uma partição	0,70	39,15
9	27,55	E - Cisalhada	0,69	34,40
10	26,97	B - Cônica e bipartida	0,68	33,68
11	29,05	B - Cônica e bipartida	0,68	36,27
12	28,17	B - Cônica e bipartida	0,71	35,17
13	26,94	B - Cônica e bipartida	0,73	33,64
Média			0,71	34,11
Desvio padrão			0,07	3,20

Fonte - (SOUZA, 2020)

Tem-se então os resultados como um embasamento do traço apresentado nessa pesquisa para as torres protendidas, contrastando com o trabalho em desenvolvimento por se tratar de um estudo das fundações das torres, onde não há a protensão da estrutura, alterando assim o traço em estudo e servindo como um complemento para os dados apresentados.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 PESAGEM DOS COMPONENTES SECOS

Figura 34 - Pesagem de areia

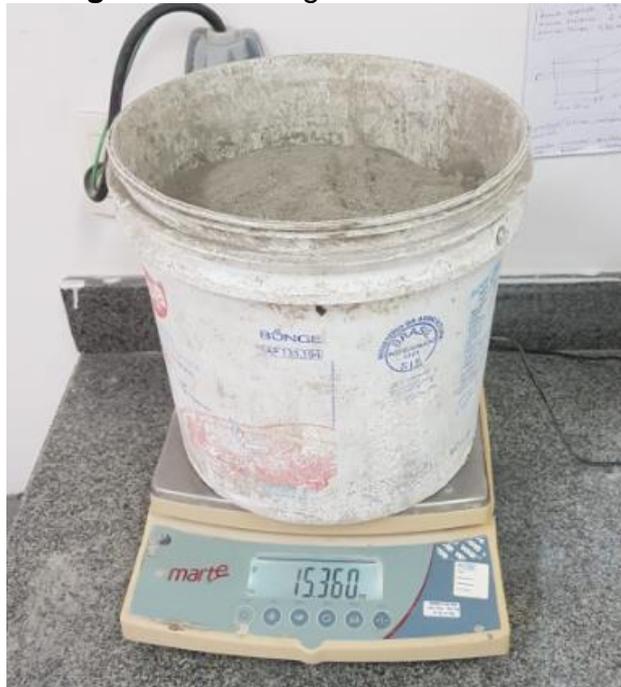
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 35 - Pesagem de Brita



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 36 - Pesagem do cimento



Fonte: Acervo do autor (2023)

6.2 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA PARA PESAGEM E CURA

Figura 37 - Confeção dos corpos de prova



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 38 - Identificação e pesagem de CPs secos



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 39 - CPs em tanque para cura e análise da absorção de água



Fonte: Acervo do autor (2023)

6.3 PROCESSO DE ROMPIMENTO DE CORPOS DE PROVA

Figura 40 - Posicionamento de CP na prensa



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 41 - Tipo de ruptura, classificada com Tipo E



Fonte: Acervo do autor (2023)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de compressão, todos orientados e seguindo as normas já citadas. Segue anexo das tabelas dos ensaios de absorção e compressão dos corpos de prova, respectivamente, resultados de compressão obtidos para o taço de CAA I, em 28 dias de cura:

Figura 42 - Tabela da porcentagem de absorção dos corpos de prova

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA			
IDENTIFICAÇÃO	PESO SECO(KG)	PESO SATURADO(KG)	% DE ABSORÇÃO
CP1	3,700	3,733	0,89
CP2	4,035	4,074	0,97
CP3	3,683	3,718	0,95
CP4	3,717	3,754	1,00
CP5	3,787	3,823	0,95
CP6	3,762	3,796	0,90
CP7	3,878	3,914	0,93
CP8	3,794	3,829	0,92
CP9	3,755	3,792	0,99
CP10	3,692	3,728	0,98
CP11	3,822	3,856	0,89
CP12	3,680	3,713	0,90
CP13	3,866	3,901	0,91
CP14	3,715	3,748	0,89
CP15	3,840	3,878	0,99
		MÉDIA	0,94
		DESVIO PADRÃO	0,04

Fonte: Acervo do autor (2023).

Figura 43 - Resultado do ensaio de compressão aos 28 dias

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DOS CP'S (10X20)		
IDENTIFICAÇÃO	VALOR PRENSA H.	MPA
CP 2	17,09	21,35
CP 13	15,45	19,30
	MÉDIA	20,33
	DESVIO PADRÃO	1,45

Fonte: Acervo do autor (2023).

Como especificado nas normas já citadas anteriormente os ensaios de compressão superou os solicitados pela ABNT NBR 6118:2014 que na norma exige que para concreto armado a CAA I seja de 20 MPa e a média dos CP's aos 28 dias sendo de 20,33 MPa. E como podem ver nas média da absorção, quase não teve vazio, tanto é que CAA I deu 0,94%, na norma já citada mostra que com

essa porcentagem de absorção de água o concreto será durável e terá um alto desempenho (Figura 44).

Figura 44 - Classificação do concreto quanto a absorção

Classificação do concreto	Teor de absorção de água (a)
Durável – Alto desempenho	$\leq 4,2\%$
Convencional	$4,2\% \leq a \leq 6,2\%$
Deficiente	$\geq 6,2\%$

Fonte: ABNT NBR 9778:2009

8 CONCLUSÃO

O traço CAA I foi submetido a ensaios de compressão e absorção, seguindo as normas correspondentes, e mostrou uma eficiência comprovada. Em relação à resistência à compressão, o traço CAA I alcançou uma média de 20,33 MPa para a classe de agressividade 1.

Esses resultados promissores indicam que o concreto de alta resistência CAA I apresenta um desempenho elevado em termos de resistência à compressão. Isso traz benefícios significativos para a construção de torres eólicas, pois permite a utilização de estruturas mais altas, e no ambiente marinho (Offshore), resultando em pás de aerogeradores maiores e, conseqüentemente, em uma maior geração de energia.

Através desses testes, foi possível verificar que o traço CAA I atende às exigências da norma, demonstrando ser uma escolha confiável e adequada para a construção de torres eólicas. Sua resistência superior à compressão proporciona maior segurança e durabilidade às estruturas, possibilitando o desenvolvimento de parques eólicos em alto mar e contribuindo para a expansão da energia eólica no estado do Rio Grande do Norte como uma fonte renovável de grande potencial.

REFERÊNCIAS

A AGÊNCIA ENVOLVERDE. **Brasil perde uma posição em índice de renováveis.** Disponível em: <https://envolverde.cartacapital.com.br/73941/>. Acesso em: 24 jun. 2023.

A TARDE. **Bahia já é 3º produtor de energia eólica.** Disponível em: <http://atarde.uol.com.br/economia/noticias/1732669-bahia-ja-e-3o-produtor-de-energia-eolica>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ANTUNES, F. J. P. **Desenvolvimento Actual e Perspectivas Futuras da Energia Eólica Offshore em Portugal.** 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia das Energias Renováveis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/23422>. Acesso em: 29 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BERTUZZI, P. J. **Estudos de Aspectos de Engenharia para Implantação de Torres Eólicas.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BRANDÃO, Antonio Matheus Silva. **A IMPLANTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS EM ARANAÚ E AS ALTERAÇÕES NA PAISAGEM E VIDA COMUNITÁRIA.** 2022. 31 f. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Geografia) - Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/69182/3/2022_tcc_amsbrandao.pdf. Acesso em: 28 jun. 2023.

BREDMOSE, H. et al. **Floating wind turbine foundations: A state-of-the-art review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 91, p. 1102-1117, 2018.

BVG ASSOCIATES. **Guide to an offshore wind farm: Updated and extended.** UK: The Crown State, 2019. 128 p. Published on behalf of The Crown State and the Offshore Renewable Energy Catapult. Disponível em: <https://bvgassociates.com/wpcontent/uploads/2019/04/BVGA-Guide-to-an-offshore-wind-farm-r2.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2023

CARNEIRO, J. D. S. et al. **Structural analysis and optimization of offshore wind turbine jacket foundations.** Renewable Energy, v. 131, p. 259-271, 2019.

CAVAZZI, S.; DUTTON, A. G. An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's Offshore Wind Energy Potential. *Renewable Energy*, v. 87, p. 212–228, 2016.

COSTA, K. M. **Reutilização de plataformas fixas para geração de energias eólica offshore**, Rio de Janeiro. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

DUARTE, E. P. **Evolução das torres eólicas pré-moldadas protendidas. CONCRETO & Construções**, São Paulo, n. 75, p. 36-41, jul. 2014b. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_75.pdf. Acesso em: 16 jun. 2023.

DUARTE, E. P. **Eolicabras Torres de Concreto: Mais alto para ir mais longe**. 2014a. 93 slides. Disponível em: http://www.ibracon.org.br/eventos/56cbc/APRESENTACAO_IBRACON2014.pdf. Acesso em: 16 jun. 2023.

FCK - ENGENHARIA. **O que é laje sobre o solo (radier)?**. Disponível em: http://www.radierprotendido.com.br/radier_protendido.htm. Acesso em: 26 jun. 2023.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Conheça 5 dos moinhos mais bonitos do planeta**. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/asmais/2016/04/1757471-conheca-5-dos-moinhos-mais-bonitos-do-planeta.shtml>. Acesso em: 27 jun. 2023.

FURTADO, M. **Tintas e revestimentos: Torres eólicas e máquinas agrícolas estimulam vendas de anticorrosivas**. QUÍMICA.com.br, São Paulo. 2014. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/tintas-e-revestimentos-torres-eolicas-e-maquinas-agricolas-estimulam-vendas-de-anticorrosivas/> Acesso em 20 de jun. 2023.

GOMES JÚNIOR, H. A. **Vigas protendidas: estudo da norma e modelagem com auxílio de programa de análise comercial**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GOVINDJI, A.; JAMES, R.; CARVALLO, A. **Appraisal of the offshore Wind industry in Japan**. The Carbon Trust. London, 2014. Disponível em: <https://tinyurl.com/yb62yjdj>. Acesso em 3 jul. 2023.

GONZÁLEZ, Á., DIAZ-CASAS, V. M., ARBELO, M. A., et al. (2020). **Dynamic Characterization of a Jacket Foundation for an Offshore Wind Turbine: Experimental and Numerical Approaches**. *Energies*, 13(6), 1339. DOI: 10.3390/en13061339.

IMPACTO. **Torres Eólicas**. Disponível em: <http://impactoprotensao.com.br/servicos/protensao/torres-eolicas/>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

KAISER, M. J.; SNYDER, B. F. **Offshore Wind Energy Cost Modeling – Installation and Decommissioning**. 1.ed. Londres: Springer-Verlag, 2012. 235 p.

KALDELLIS, J. K.; e ZAFIRAKIS, D. **The wind energy (r)evolution: A short review of a long history**. *Renewable Energy*. [S.l.], v. 36, n. 7, p. 1887-1907, jul. 2011.

LANNES, C. V., **Dimensionamento de Uma Concessionária de Veículos em Concreto Protendido**. 2005. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2005.

LETH-OLSEN, N., OVERGAARD, L., & JUHL, T. (2019). **Foundation Selection for Offshore Wind Turbines: A Review**. *Energies*, 12(18), 3481. DOI: 10.3390/en12183481.

MICRO EÓLICA. **Constituição de uma Turbina eólica horizontal (TEH)**. Disponível em: <https://microeolica.weebly.com/constituiccedilatildeo-de-uma-teh.html> Acesso em: 05 jun. 2023.

MUSIAL, W. et al. 2016 **Offshore Wind Technologies Market Report**. U.S. Department of Energy. DOE, 2017. Disponível em: < <https://tinyurl.com/rcvww26>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MUSIAL, W. et al. 2018. **Offshore Wind Technologies Market Report**. U.S. Department of Energy. DOE, 2019. Disponível em: <https://tinyurl.com/tjm77aw>. Acesso em: 04 jun. 2023.

NUNES, João Paulo Costa et al. **Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PROTENDIDOS DYWIDAG LTDA. **Torres Eólicas em Espanha: Tirantes externos Prefabricados para obras em altura**. Disponível em: <https://www.dywidag.com.br/projetos/2012-info-20/torres-eolicas-em-espanha-tirantes-externos-prefabricados-para-obras-em-altura>. Acesso em: 19 jun. 2018.

RIBEIRO, G. L. **Parques eólicos: impactos socioambientais provocados na região da praia do Cumbe, no município de Aracati, Ceará.** 2013. 154 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2013.

ROCHA, A. B. **Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e concreto pré-moldado protendido na região de Serra do Mel, Rio Grande do Norte.** 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

ROLFES, J. K. et al. **Foundation design for offshore wind turbines: A review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 95, p. 40-53, 2017.

SANTOS, M. B. **Utilização de concreto protendido em pavimentos portuários.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2015.

SILVA, A. F., MARQUES, J., & SÁ, J. C. (2021). **A Review on Corrosion Protection of Offshore Wind Turbine Foundations.** *Metals*, 11(2), 256. DOI: 10.3390/met11020256.

SOUZA, Rodrigo Teixeira. **CONFECÇÃO DE CONCRETO PARA TORRES EÓLICAS PRÉ-MOLDADAS PROTENDIDAS.** 2020. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SNYDER, B.; KAISER, M. J. **Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy.** *Renewable Energy*, v. 34, n. 6, p. 1567–1578, 2009.

THOMSEN, K. E. **Offshore Wind: A Comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation.** [S.L.]: Elsevier, 2012. 324 p.

VERÍSSIMO, G. de S; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. C. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos.** 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. 78 p.

WINTER, A. C.; SEGALOVICH, R. N. **Análises das condições de segurança em usinas eólicas.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

YANDEX. **Suzdal.** Disponível em:
<https://yandex.ru/collections/user/nmarkelov/suzdal/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

ZUO, S., MA, Q., SONG, W., et al. (2018). **An Innovative Installation Method for Suction Pile Foundations of Offshore Wind Turbines.** *Energies*, 11(12), 3487. DOI: 10.3390/en11123487.