

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO TEIXEIRA SOUZA

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

NATAL/RN

2020

RODRIGO TEIXEIRA SOUZA

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

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 Pereiras

NATAL/RN

2020

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

Souza, Rodrigo Teixeira.

Confecção de concreto para torres eólicas pré-moldadas protendidas
/ Rodrigo Teixeira Souza. – Natal, 2020.
50 f.

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

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

1. Resistência à compressão – Monografia. 2. Torres eólicas –
Monografia. 3. Concreto protendido – Monografia. I. Pereira, Fábio
Sérgio da Costa. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

RODRIGO TEIXEIRA SOUZA

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

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: 24 / 06 / 2020 .

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Fabio Sergio da Costa Pereira-UNI-RN

Professor Orientador

Prof.MSc. Leavlam Rodrigues de Lima-UNI-RN

Professor Membro Interno

Prof. Esp. Álverson Rodrigo Negromonte de Oliveira

Professor Membro Externo

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me deram tudo com muito amor, mesmo tirando as vezes deles para poder me dar o que estava precisando ou o que queria. A minha família inteira que isto é uma forma de mostrar os meus esforços que fui conquistando até este momento. E a minha namorada que me incentiva direto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter providenciado muitas oportunidades para que essa conquista se tornasse algo concreto.

Aos meus pais, Ana Lúcia Teixeira e Marcelo de Oliveira por cada sacrifício, incentivos e compreensão de minhas escolhas, por todo apoio que me deram desde o momento em que nasci até o dia de hoje, sei que durante meu percurso até aqui teve uns tropeços, principalmente na época da escola, mas como dizem, “Deus escreve certo por linhas tortas”. Deus desviou meu caminho um pouco atrasando um pouco, mas graças a isso hoje sei que eu realmente queria fazer esse curso, como eu sempre dizia para vocês quando criança, porém não tinha certeza se era mesmo. Obrigado mesmo por tudo que vocês me proporcionaram.

Aos meus avós que sempre estiveram comigo, na infância basicamente morei na casa dos meus avós, passava o dia na casa deles porque meus pais estavam trabalhando e não tinha com quem ficar em casa, aí só voltava para casa a noite. Eles que sempre fizeram tudo por mim também como se fossem meus segundos pais, tudo que eu pedia eles se esforçavam ao máximo para eu sempre ter aquilo que pedi.

Aos meus amigos Mateus Isaias, Kleyton Lima E Kamila Maia da faculdade que me ajudaram no meu tcc na parte do estudo de caso, aos outros que também me ajudaram me dando força de vontade para passar o oitavo semestre, que foi o mais puxado de todos.

E agradecer também a Izabel Lopes, que todo dia sempre ficava me incentivando a fazer o TCC, sempre me apoiando, mesmo as vezes eu estando errado, mas agradecer de todo meu coração pelo seu apoio e seu companheirismo, fez toda diferença em minha vida.

RESUMO

As energias renováveis vêm cada dia crescendo mais e mais, as torres eólicas já são uma realidade no mundo em que vivemos, na verdade, já existe há tempos. Começou com moinhos de vento na Holanda e hoje já estamos construindo torres de metal e de concreto armado para a produção de energia elétrica. A protensão já é uma realidade, pois com ela podemos superar vãos cada vez maiores e, assim, com essa superação, seríamos capazes de quadruplicar ou até mesmo quintuplicar a energia produzida apenas por conta de conseguirmos alturas cada vez maiores. O motivo do aumento da altura seria a capacidade de colocar pás cada vez maiores, fazendo com que os aerogeradores rotacionem sua bobina interna mais rapidamente. Já pode existir um investimento maior nesta área. No estudo do trabalho, utilizei 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, utilizei a NBR 5738:2015 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. Como conclusão desta pesquisa, comprovamos que os traços apresentaram ótimos resultados: para CAA I chegou a 34,97Mpa, enquanto o exigido por norma é 25Mpa, e para CAA II chegou a 42,64Mpa, enquanto a norma exige 35Mpa, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014. Obtiveram também um ótimo desempenho na porcentagem de absorção, que foi 0,72% (CAA I) e 0,6 (CAA II), de acordo com a ABNT NBR 9778:2005.

Palavras-chave: Resistência à compressão. Torres eólicas. Concreto protendido. Absorção de água.

ABSTRACT

Renewable energies are growing more and more every day, wind towers are already a reality in the world we live in, in fact, it has been around for a while. It started with windmills in Holland and today we are already building metal and reinforced concrete for the production of electricity. The prestressing is already a reality, because with it we can overcome increasingly large gaps and, therefore, with this overcoming, we would be able to quadruple or even quintuple the energy produced just on account of achieving greater and greater heights. The reason for the height increase would be the ability to place larger and larger blades, making the wind turbines rotate their internal coil more quickly. There may already be a greater investment in this area. For the study of the work, I used the methods adopted by the Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) to make two lines, both on-shore, one for the environmental aggressiveness class (CAA) I and the other for CAA III, which is defined from ABNT NBR 6118: 2014. For the tests of the elaborated traces, I used NBR 5738: 2015 and NBR 5739: 2018 for the elaboration of specimens and the compressive strength test, showing their feasibility of use and cost. As a conclusion of this research, we found that the traces showed excellent results: for CAA I it reached 34.97Mpa, while the standard requirement is 25Mpa, and for CAA II it reached 42.64Mpa, while the standard requires 35Mpa, according to ABNT NBR 6118: 2014. They also obtained an excellent performance in the percentage of absorption, which was 0.72% (CAA I) and 0.6 (CAA II), according to ABNT NBR 9778:2005.

Keywords: Compressive strength. Wind towers. Prestressed concrete. Water absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Torre eólica protendida	13
Figura 2- Ordem das potências eólicas em 2012	14
Figura 3 - Torre pré moldada protendida	14
Figura 4- Livros recebendo esforços de compressão	19
Figura 5- Elementos pré-moldados unidos por uma protensão	20
Figura 6- Fissuras na viga de concreto	21
Figura 7- Aplicação de estado prévio de tensões na viga de concreto	22
Figura 8- Confeção da laje alveolar em concreto protendido	24
Figura 9- Confeção da laje alveolar em concreto protendido	24
Figura 10- Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	27
Figura 11 - Seção submetida à descompressão parcial	28
Figura 12 - Classes de agressividade	29
Figura 13- Formação dos ventos	31
Figura 14- Moinhos da Holanda	32
Figura 15- Moinho de madeira	33
Figura 16- Torres eólicas	34
Figura 17- Parque eólico de Pararácuru- CE	35
Figura 18- Curva de potência	37
Figura 19 - Tabela de classe e o comprimento de rugosidade	39
Figura 20 - Atuação do vento devido a altura	40
Figura 21 - Constituição de uma turbina	41
Figura 22 - Torres pré moldadas protendidas internamente	42
Figura 23 - Protensão nas cordoalhas das torres eólicas	42
Figura 24 - Protensão externa	43
Figura 25 - Estrutura pré-moldada	43
Figura 26 - Fabrica de Pré-moldados	44
Figura 27 - Base de uma torre de concreto pré moldada	45
Figura 28 - pesagem da areia	48
Figura 29- Pesagem do cimento	48
Figura 30- Pesagem da brita 19	49
Figura 31- Confeção dos corpos de prova	49
Figura 32- Registro de como deve ficar o corpo de prova (10x20) na prensa	51
Figura 33- Tipo de ruptura, classificada com Tipo E	51
Figura 34- Tipos de ruptura	52
Figura 35- Corpo de prova seco	53
Figura 36- Corpo de prova saturado	53
Figura 37 - Classificação do concreto	57

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

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- CAA I, com 15 dias de cura	54
Tabela 2- CAA I com 7 dias de cura	55
Tabela 3- CAA III, com 15 dias de cura	55
Tabela 4- CAA III para 7 dias de cura.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 GERAL	15
2.2 ESPECÍFICOS	15
3 JUSTIFICATIVA	16
5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	18
6 HISTÓRIA DA ARTE	19
6.1 CONCRETO PROTENDIDO	19
6.1.1 Conceito de protensão	19
6.1.2 Concreto protendido	20
6.1.3 Histórico do concreto protendido	22
6.1.4 Sistemas de protensão	23
6.1.4.1 Protensão com aderência inicial	23
6.1.4.2 Protensão sem aderência	24
6.1.4.3 Protensão com adesão posterior	25
6.1.4.4 Escolha do sistema de protensão	25
6.1.5 Estados limites de uma estrutura	26
6.1.6 Níveis de protensão	28
6.1.6.1 Protensão completa (nível 3)	28
6.1.6.2 Protensão limitada (Nível 2)	29
6.1.6.3 Protensão parcial (Nível 1)	30
6.2 ENERGIA EÓLICA	30
6.2.1 Histórico da utilização de energia eólica	31
6.2.1.1 Fundação de moinhos de vento	33
6.2.2 Parque eólico	34
6.2.2.1 Potência instalada	37
6.2.2.2 Locação das torres	38
6.2.3 Torre de concreto protendido	40
6.2.3.1 Torre de concreto pré-moldado protendido	44
6.2.3.2 Vantagens da utilização do pré moldado protendido	46

7 ESTUDO DE CASO	47
7.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	47
7.2 ENSAIOS REALIZADOS	50
7.2.1 Ensaio de compressão	50
7.2.2 Ensaio de absorção de água	52
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
9 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Nos primórdios dos tempos a energia eólica era utilizada como um mecanismo de energia para transportar navios a vela por todo os oceanos, mas com o descobrir de novas tecnologias foram substituindo o vento por motores e assim a tecnologia passou um tempo esquecida, fazendo com que fosse utilizados a água como produção de energia para os transportes, casas e eletrodomésticos.

Em meados do século XIX, mais especificamente em 1888, foi criado o primeiro aerogerador, que são transformadores que farão com que o vento gire as hélices e transforme essa rotação de energia cinética para energia elétrica.

Com as inovações tecnológicas e o passar do tempo vem surgindo muitos tipos de torres de vários materiais diferentes como as torres de madeira, torres de aço, torres de concreto, torres de pré-moldados e a mais nova tecnologia é a de concreto pré-moldado protendido.

As torres de concreto pré-moldado protendido vêm com o intuito de evitar que elas sofram fraturas em suas bases, o que provocaria uma fragilidade nos blocos de sustentação, e seja mais rentável tanto na visão financeira como na parte executiva, evitando as patologias decorrentes dos. A protensão da uma resistência maior ao concreto antes mesmo de sua cura, pois o aço vai estar tracionado ao máximo e o concreto comprimido ao máximo, sendo o caso perfeito (Figura 1).

Figura 1- Torre eólica protendida



Fonte: Protendidos Dywidag Ltda. (2018).

O Brasil apesar de ter um grande potencial eólico, de acordo com a pesquisa realizada em 2012, ele se encontra se em 10º(décimo) lugar, estando em primeiro a China e logo em seguida a Alemanha (Figura 2).

Figura 2- Ordem das potências eólicas em 2012

Rank ¹		Country	All renewables	Wind index	Onshore wind	Offshore wind	Solar index	Solar PV	Solar CSP	Biomass/ other	Geo-thermal	Infra-structure ²
1	(1)	China	69.6	76	77	69	64	66	46	59	50	72
2	(2)	Germany	65.6	68	65	79	61	70	0	68	58	73
3	(2)	US ³	64.5	62	64	55	70	69	73	61	67	59
4	(4)	India	63.5	63	69	40	66	68	53	60	44	63
5	(6)	France	55.8	58	59	54	53	57	29	57	34	56
6	(5)	UK	54.6	62	59	78	41	47	0	57	35	64
7	(8)	Canada	53.6	63	66	46	40	46	0	50	36	66
8	(9)	Japan	52.6	50	52	43	60	65	29	42	49	58
9	(6)	Italy	52.4	53	54	45	53	56	37	49	57	44
10	(10)	Brazil	50.5	52	55	40	48	50	33	54	24	51

Fonte: Agência Envolverde (2018).

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) mostraremos que a utilização do concreto protendido trará torres mais resistentes, mais altas sem problemas estruturais, e com isso serão gerados mais energia elétrica, devido a alcançar uma altura mais alta, suas hélices serão maiores, conseqüentemente, necessitando uma energia maior para poder rotacioná-las. Pois quando mais alto maior será a corrente de vento, gerando uma rotação mais rápida nas hélices.

Figura 3 - Torre pré moldada protendida



Fonte: Impacto (2020).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Elaborar um estudo sobre a energia eólica demonstrando seu desenvolvimento através dos anos, diferenciar os tipos de torres e mostrar o benefício das torres pré-moldadas protendidas, mostrando seus benefícios e suas desvantagens através de estudos bibliográficos, de TCC's, artigos, e periódicos.

2.2 ESPECÍFICOS

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.

3 JUSTIFICATIVA

Retirar os problemas normalmente vistos nas torres que são mais usadas, como aguentar mais tensões, conseguir ter maiores vão, diminuir o custo com a manutenção oxidações presentes, diminuir as fissuras presente em sua torre, ou seja, retirar as patologias presentes e com isso fazer com que ela tenha uma melhor funcionalidade, aproveitando mais a utilização dos materiais presentes na estrutura, melhorando sua ductilidade e sua durabilidade de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

4 METODOLOGIA

Confeccionar dois traços para a classe de agressividade ambiental I (CAA I) e para a classe e agressividade III (CAA III) e a partir deles moldar corpos de prova para que possamos realizar dois ensaios, os ensaios de compressão e o ensaio de absorção, sempre baseando-se nas normas da ABNT que são exigidas para que para os ensaios referidos. E dos resultados obtidos mostrar os benefícios que obtivemos com os ensaios realizados e deles apresentar uma conclusão.

5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

- ✓ O capítulo 1 é a introdução, mostrando um resumo geral do que será apresentado;
- ✓ O capítulo 2 foi dissertado os objetivos gerais e específicos do trabalho;
- ✓ O capítulo 3 foi comentado a justificativa do motivo de falar sobre este tema;
- ✓ O capítulo 4 foi apresentado a metodologia que falará sobre os processos deste trabalho e como farei para consegui-los;
- ✓ O capítulo 6 foi dissertado a história da arte, falando sobre o tema;
- ✓ O capítulo 7 foi mostrado o estudo de caso, falando dos resultados obtidos;
- ✓ O capítulo 8 foi apresentada a conclusão obtida através dos resultados obtidos;

6 HISTÓRIA DA ARTE

6.1 CONCRETO PROTENDIDO

6.1.1 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 4), 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.”

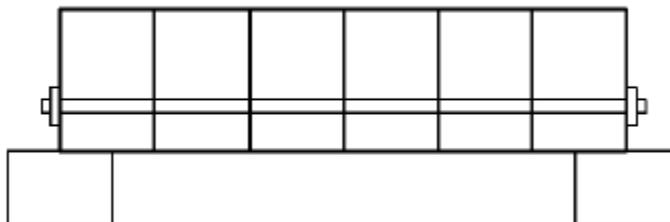
Figura 4- Livros recebendo esforços de compressão



Fonte: Santos (2015).

O protendido tem a função também de juntar elementos pré-moldados de concreto, (figura 5), nesse caso a protensão tem função de solidarizar as peças estruturais, garantindo a integridade da construção. O sistema em sido implementado no Brasil na construção de torres eólicas (SANTOS, 2015).

Figura 5- Elementos pré-moldados unidos por uma protensão



Fonte: Santos (2015).

Conforme Pfeil (1983), “a protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações”.

6.1.2 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 idéia de pré comprimir as estruturas ao longo de sua seção, para que, sobre a ação de cargas ficariam submetidas a tensões trativas, (LANNES, 1986, 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).

A protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, geralmente obtido pelas ações elásticas transmitidas ao concreto diretamente por aderência e atrito ou através de dispositivos especiais chamados ancoragens, por meio de cabos de aço de alta resistência, tracionados e ancorados na própria peça, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sobre ação de diversas solicitações (PFEIL,1983).

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

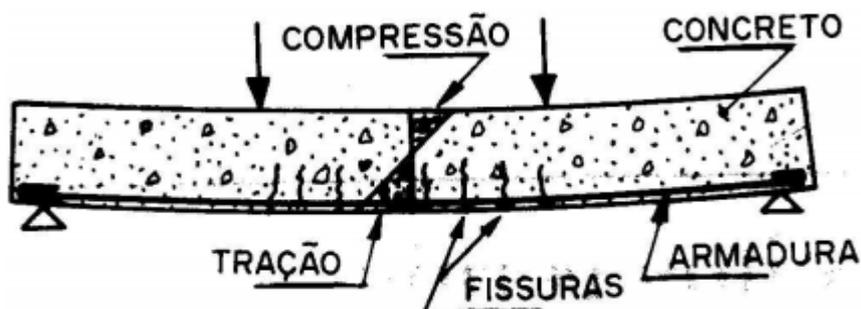
- Construções que utiliza melhor o concreto apresentando grandes vãos e o peso menor

- 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 dos 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 6), 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).

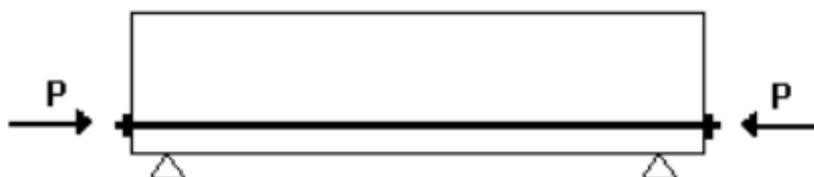
Figura 6- Fissuras na viga de concreto



Fonte: Almeida (2002).

Já nesta viga (figura 7), 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 7- 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).

6.1.3 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)

Porem 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 as forças de protensão não era eficiente (GOMES JÚNIOR, 2009).

O protendido teve um alto desempenho, 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).

6.1.4 Sistemas de protensão

Mostrarei a diante os tipos de protensão para o concreto. 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.

6.1.4.1 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 8). 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 8- Confeção da laje alveolar em concreto protendido



Fonte: Santos (2015).

6.1.4.2 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 9), 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 9- Confeção da laje alveolar em concreto protendido



Fonte: FCK -Engenharia (2018).

6.1.4.3 Protensão com adesão 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).

6.1.4.4 Escolha do sistema de protensão

O sistema de protensão com aderência inicial é utilizado em elementos pré-moldados, como já foi falado no item 6.1.4.1.

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:

- 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.

6.1.5 Estados limites de uma estrutura

Os estados limite simbolizam que a estrutura apresenta um desempenho inadequado, assim como representa no projeto, (HANAI, 2005). Os estados limites representados pelo ABNT NBR 6118:2014 (SANTOS, 2015).

- Estado Limite Último (ELU)
Significa o colapso da estrutura, ou uma forma 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 10).

Figura 10- 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	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		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.

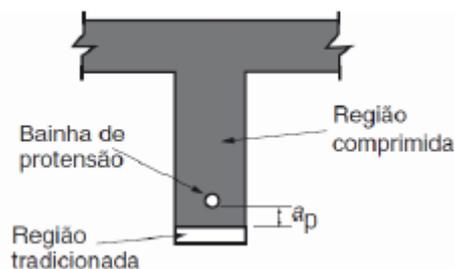
2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

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 distancia da parte tracionada até a cordoalha, (figura 11).

Figura 11 - Seção submetida à descompressão parcial



Fonte: Santos (2015).

- 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).

6.1.6 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 de vai ser a força aplicada nos cabos.

6.1.6.1 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).

Dessa forma, na protensão completa não se admitem tensões normais de tração no concreto, decorrentes da flexão, a não ser em casos excepcionais.

Figura 12 - 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).

6.1.6.2 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} .

6.1.6.3 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:

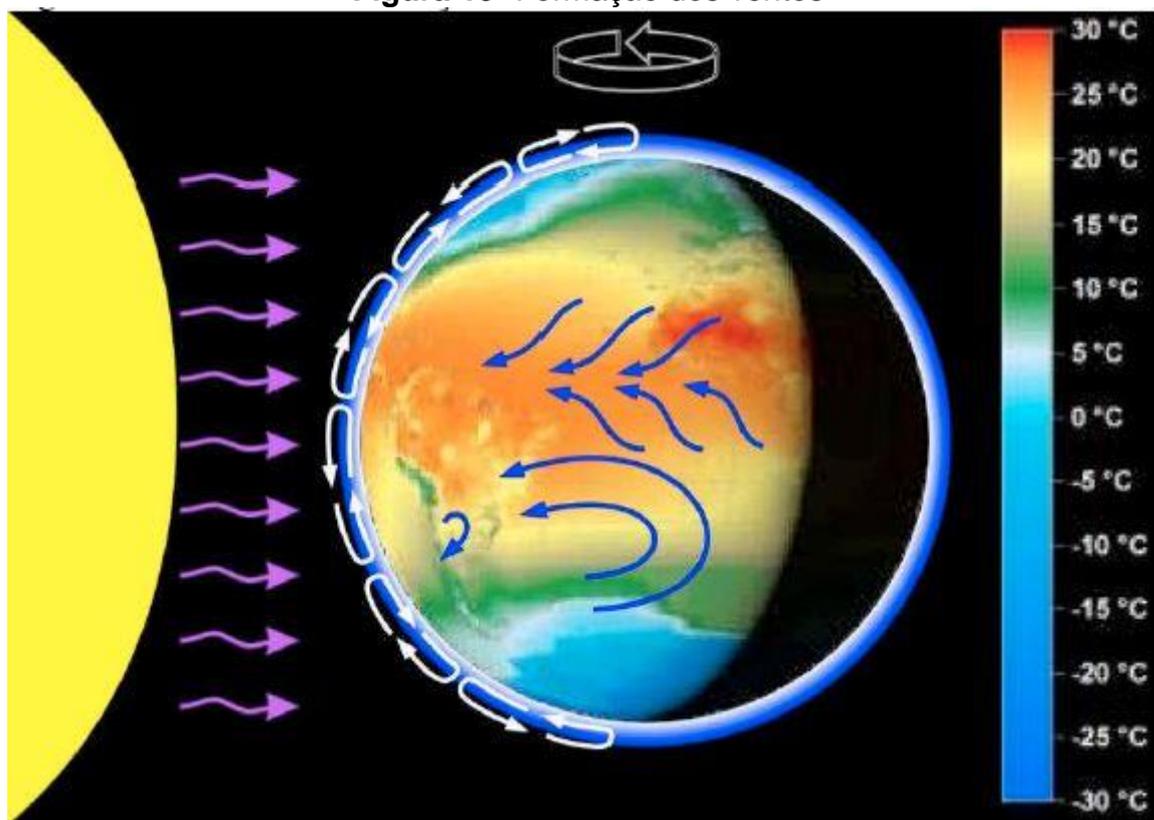
- Para condições frequentes de ações é respeitado o estado limite de abertura de fissuras (ELS-W), com $w_k \leq 0,2$ mm, ou seja, é admitida a fissuração, desde que as fissuras características não ultrapassem 0,2 mm.

6.2 ENERGIA EÓLICA

O sol quando incide 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 origina 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).

Figura 13- Formação dos ventos



Fonte: Amarante *et al.* (2001).

6.2.1 Histórico da utilização de energia eólica

A utilização da energia eólica é gerada a partir da energia cinética dos ventos. As primeiras 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 utilizada 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 14), 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 o sistema de gerar a própria energia esta diretamente ligado a todo os sistema, (BERTUZZI, 2013).

Figura 14- 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 séculos 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, um dos benefícios é que as torres não ocupam muito espaço para serem instalada, 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).

6.2.1.1 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 contruídas 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 15- 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).

6.2.2 Parque eólico

Parque eólico é quando há várias torres eólicas em uma determinada área construída, sendo próximas. Cada 1MW de potência instalado é possível gerar eletricidade para 2000(dois mil) residências (DAMAS, 2013).

Normalmente os parques eólicos são os projetos que foram levados para terem a aprovação, técnica, ambiental e de investimentos. Porém já o complexo eólico é a junção de vários parques que ficam próximos. Quando comparado aos outros tipos de geradores de energia, como de hidrelétricas e usinas nucleares, (BURTON, 2001).

Figura 16- 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 17- 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 em dono do terreno e investidores, que vai receber uma porcentagem da receita, em torno de 1% a 3%. Outro fator importante é

a localização, pois tem que ser de fácil acesso devido possuir maquinas 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).

6.2.2.1 Potência instalada

Segundo Santos (2011):

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.

Figura 18- 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, 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).

6.2.2.2 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:

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

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).

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 19) pode variar de zero a quatro, tendo intervalo de meio entre eles, e mostrando também o comprimento de rugosidade, (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

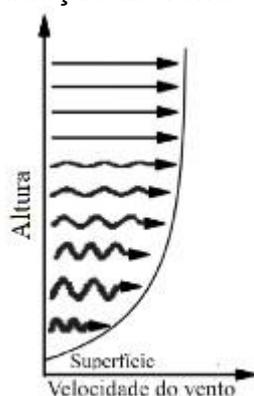
Figura 19 - Tabela de classe e o comprimento de rugosidade

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 20), as suas alturas influenciam para ter um melhor aproveitamento do potencial de energia, (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Figura 20 - Atuação do vento devido a altura

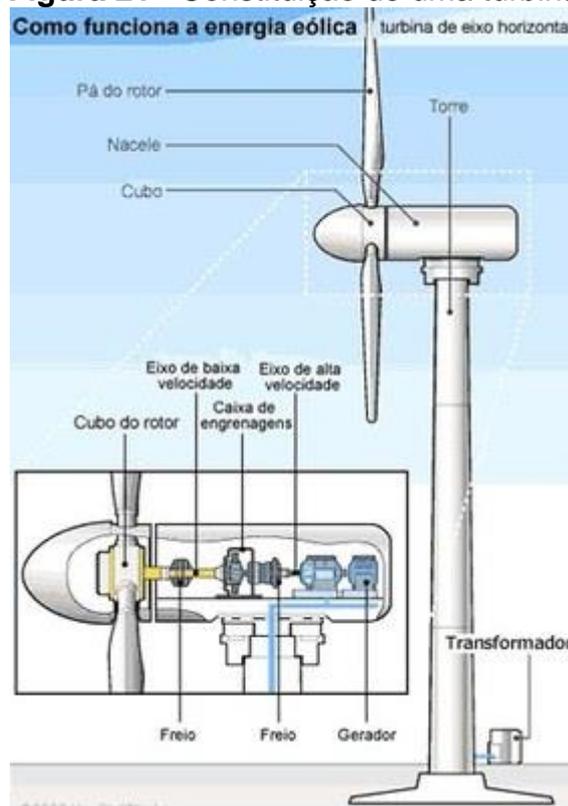


Fonte: WINTER; SEGALOVICH (2018).

6.2.3 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).

Devido à ductilidade e rigidez do concreto protendido, ele é uma ótima base de suporte para os aerogeradores, pois com o aumento da rigidez faz com que diminua a deflexão lateral, causada devido à ação dinâmica do vento nas torres. Com isso, as torres sofrerão menos vibração e o suporte para o aerogerador, chamado de nacelle (Figura 21), não será tão afetado, (WAY, 2014).

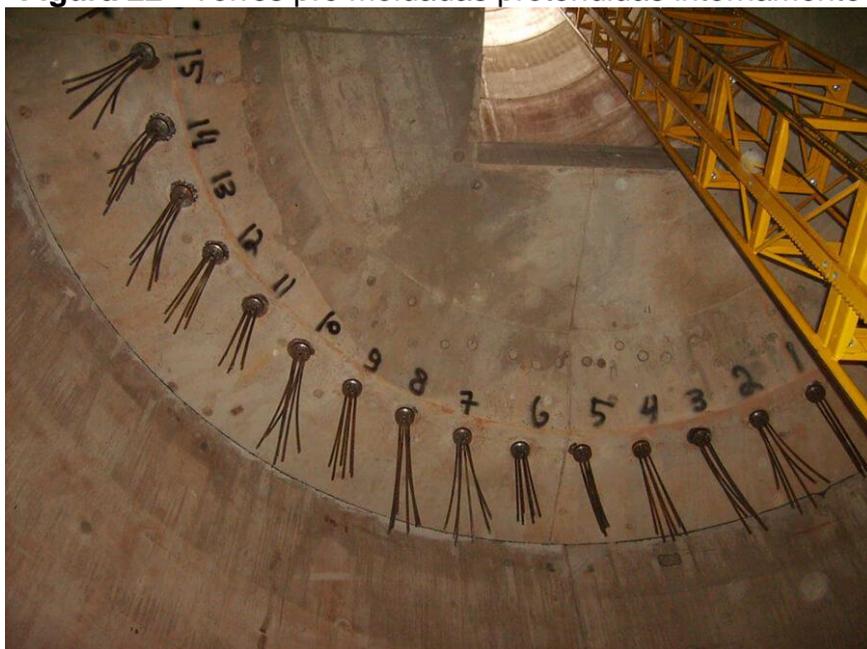
Figura 21 - Constituição de uma turbina

Fonte: Micro Eólica (2020).

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 21), faz-se necessário de pás, (Figura 21), 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 a resistência a tração. Para que seja garantido o ganho de resistência a tração são adicionados as barras de ferros longitudinais, sendo este o concreto armado (NBR 6118:2014/ NBR:12142:2010). No entanto, nas torres de energia eólica, faz-se apenas necessário a resistência a pressão (Elforsk, 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 24) ou internamente (Figura 22), para ter como ser realizado posteriormente uma inspeção das mesmas, (ROCHA, 2016).

Figura 22 - Torres pré moldadas protendidas internamente



Fonte: Impacto (2020).

Figura 23 - Protensão nas cordoalhas das torres eólicas



Fonte: Impacto (2020).

Figura 24 - Protensão externa

Fonte: Duarte (2014a).

As torres de concreto pré-tensionadas podem ser moldadas *in loco* através das formas deslizantes, como as pré-moldadas (Figura 25), que são pré-fabricadas e montadas parecidamente com as torres de aço (ROCHA, 2016).

Figura 25 - Estrutura pré-moldada

Fonte: Duarte (2014a).

6.2.3.1 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 26) 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 26 - Fabrica 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 s 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 nascelle 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, porem a peça fica mais pesada, mas isso não muda pois o guindaste não vai ser mudado (ROCHA, 2016).

Figura 27 - 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 a 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 fabricas, 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).

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.

6.2.3.2 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 Ultimo, 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).

7 ESTUDO DE CASO

Este trabalho de conclusão de curso teve por finalidade a elaboração de dois traços para o concreto protendido, com o intuito de obter a compressão do concreto para atuar em torres eólicas em meio rural e em meio marinho. Os cálculos de compressão seguirá a norma da ABNT NBR 5739:2018.

7.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Para a execução do estudo, foi necessário ser criado dois traços, um para um para classe de agressividade ambiental (CAA) I, e outro para CAA III e outro que 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) para cada CAA, sendo cilíndricos de 20x30. Para a moldagem dos mesmos foi seguida a norma da ABNT NBR 5738:2015, que padroniza o procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.

Após o cálculo dos traços em peso obtivemos os seguintes valores:

$$\text{CAA-I} = 1: 3,01: 3,19: 0,60$$

$$\text{CAA-III} = 1: 1,92: 2,15: 0,45$$

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 (figura 31) primeiramente foi separada a areia grossa (figura 28), a brita de 19mm (figura 30), o cimento apodi CP-V ARI (figura 29) e a água, do traço que realizaria no dia, o cimento que será utilizado é o cimento ARI-alta resistência inicial, para confeccionar a quantidade de moldes que tinha no laboratório, antes mesmo de começar a colocar o material na betoneira, jogava-se água nela para retirar os resíduos e umidifica-la para que não absorva a água do traço. Logo após ter jogado agua na betoneira e derramado o excedente e tirado os resíduos, coloca a brita com 1/3 da água total dentro da mesma durante 5 minutos, depois de passado o tempo, acrescenta a areia e mais 1/3 da água deixando bater por mais 5 minutos para que misture bem a areia com a brita e água e por fim acrescenta o cimento com o restante da água e deixa bater por mais 5 minutos. Enquanto estava 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 na quando for romper. Depois de batido o concreto na betoneira será compactado nos moldes o concreto, ele pode ser compactado com o vibrador ou com uma haste.

Figura 28 - pesagem da areia



Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 29- Pesagem do cimento



Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 30- Pesagem da brita 19

Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 31- Confeção dos corpos de prova

Fonte: Acervo do autor (2018).

Depois da moldagem dos CP's, deixa-os em uma superfície plana horizontal, livre de vibrações e de outra qualquer perturbação durante as primeiras 24h, sempre os identificando, como pede a ABNT NBR 5738:2015. Depois de o concreto secar, ele foi pesado para fazer a verificação de absorção após 24h submerso em água havendo a necessidade verificar novamente o peso dele já saturado, seguindo a norma ABNT NBR 9778:2005. E depois coloca-se novamente para realizar a cura até completar 7 e 15 dias, para comprovar que com esse tempo ele já superaria as cargas necessárias exigidas pela ABNT NBR 6118:2014, que fala sobre as cargas necessárias para cada classe de agressividade ambiental.

7.2 ENSAIOS REALIZADOS

7.2.1 Ensaio de compressão

O ensaio que realizamos laboratorialmente foi de compressão do CP cilíndrico de 10x20, seguindo a norma da ABNT NBR 5739:2018, que remete aos ensaios de compressão de corpo de prova cilíndrico. Depois dos CP's ficarem 7 dias e 15 dias submersos para que ocorresse a cura do concreto num tanque com água no mesmo local que foi confeccionado os corpos de prova, como exige a ABNT NBR 5738:2015. Depois de todos os corpos de prova terem sido retirados do tanque ficaram 6h e 13h, respectivamente, sem ser rompidos como exige a mesma norma que citamos a pouco. Após estas 24h foram todos colocados na prensa para serem rompidos na ordem em que foram identificados, os ensaios foram realizados como manda a norma da ABNT NBR 5739:2018 que é responsável pelos ensaios de compressão para corpos cilíndricos. Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais do UNI/RN.

Para utilizar a prensa da forma correta o corpo de prova deve ser colocado (figura 32), porém isso deve ser ajustada para o tamanho do CP em questão, no meu caso é um de 10x20 (10 de diâmetro, para 20 de altura), ela é uma máquina que a carga é aplicada gradativamente, conforme a norma ABNT NBR 5739:2018. Como a intenção da confecção do traço é para a construção de torres eólicas pré-moldadas protendidas, este concreto será usado para a compressão, ou seja, as serão comprimidas devendo aguentar a força necessária para a CAA, que é comentada na norma da ABNT NBR 6118:2014.

Na norma da ABNT NBR 5739:2018, ela fala também sobre os tipos de ruptura que o corpo pode sofrer, existem até 7 modos de ruptura diferentes classificados por esta norma (Figura 33).

Ao realizar a compressão do corpo de prova elevando até a ruptura, a prensa mostra um valor em tonelada força (tf), mas para fazer a comparação com o valor da CAA, faz-se necessário a transformação de tf em Mega Pascal (Mpa). Para isso utiliza-se a fórmula:

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

Onde,

t_f = carga encontrada na prensa;

D = diâmetro (em cm).

Figura 32- Registro de como deve ficar o corpo de prova (10x20) na prensa



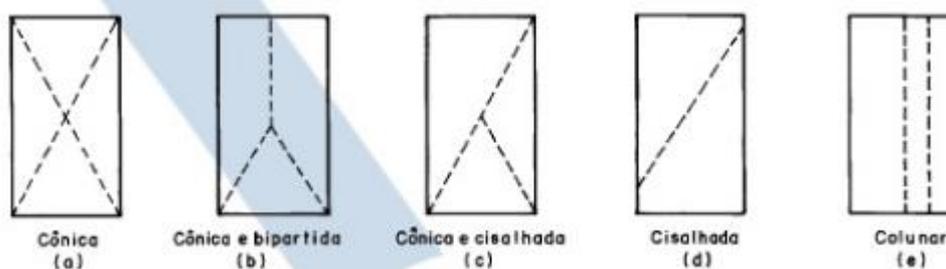
Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 33- Tipo de ruptura, classificada com Tipo E



Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 34- Tipos de ruptura



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS (1994).

7.2.2 Ensaio de absorção de água

Este ensaio foi realizado no laboratório, seguindo a norma padrão a ABNT NBR 9778:2005, que rege a determinação da absorção de água por imersão. Após os corpos de prova terem sido moldados e ficado as 24h realizando a cura a seco, eles foram retirados dos moldes e em seguida foram pesados para verificar o peso seco (Figura 35) de cada CP e saturado (Figura 36) logo em seguida. Após 72h, como rege a norma ABNT NBR 9778:2005, foi retirado para fazer a pesagem do CP saturado, para ser realizado o cálculo de absorção por imersão na água. Como é citado na norma.

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

Onde,

Msat= Massa do corpo de prova saturado

Ms= Massa do corpo de prova seco

Segue as fotos de exemplo do corpo de prova seco e saturado:

Figura 35- Corpo de prova seco



Fonte: Acervo do autor (2018).

Figura 36- Corpo de prova saturado



Fonte: Acervo do autor (2018).

8 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 do resultados obtidos para a CAA I, em 15 e 7 dias de cura, respectivamente, e para a CAA III, também para o mesmo período nas tabelas (tabela 1, tabela2, tabela 3 e tabela 4):

Tabela 1- CAA I, com 15 dias de cura

Nº	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: Acervo do autor (2020).

Tabela 2- CAA I com 7 dias de cura

N°	Tf	Tipo de ruptura	Absorção	Mpa
1	30,30	B - Cônica e bipartida	1,05	37,83
2	31,12	B - Cônica e bipartida	1,21	38,86
3	27,09	F - Ruptura no topo	1,08	33,83
4	32,23	B - Cônica e bipartida	1,25	40,24
5	30,97	B - Cônica e bipartida	1,05	38,67
6	26,03	E - Cisalhada	1,02	32,50
7	31,65	B - Cônica e bipartida	1,12	39,52
8	25,65	B - Cônica e bipartida	1,02	32,03
9	22,82	E - Cisalhada	0,80	28,49
10	27,98	B - Cônica e bipartida	0,73	34,94
11	29,55	B - Cônica e bipartida	0,75	36,90
12	26,07	B - Cônica com mais de duas Partições	0,77	32,55
13	31,76	B - Cônica e bipartida	0,74	39,66
Média			0,97	35,85
Desvio padrão			0,18	4,00

Fonte: Acervo do autor (2020).

Tabela 3- CAA III, com 15 dias de cura

N°	Tf	Tipo de ruptura	Absorção	Mpa
1	32,86	B - Cônica e bipartida	0,70	41,03
2	33,44	Cisalhamento múltiplo	0,45	41,76
3	37,09	B - Cônica e bipartida	0,66	46,31
4	37,85	E - Cisalhada	0,62	47,26
5	31,99	E - Cisalhada	0,67	39,94
6	33,03	B - Cônica e bipartida	0,65	41,24
7	38,63	B - Cônica e bipartida	0,67	48,24
8	39,33	B - Cônica e bipartida	0,55	49,11
9	41,65	E - Cisalhada	0,53	52,01
10	33,65	E - Cisalhada	0,58	42,02
11	29,64	B - Cônica e bipartida	0,56	37,01
12	33,85	F - Topo inferior	0,56	42,27
13	32,59	B - Cônica e bipartida	0,65	40,69
Média			0,60	43,76
Desvio padrão			0,08	4,85

Fonte: Acervo do autor (2020).

Tabela 4- CAA III para 7 dias de cura

N°	Tf	Tipo de ruptura	Absorção	Mpa
1	29,65	E - Cisalhada	0,81	37,02
2	30,21	E - Cisalhada com mais de uma partição	0,78	37,72
3	30,98	E - Cisalhada com mais de uma partição	0,96	38,68
4	23,62	E -Cisalhada	0,75	29,49
5	34,37	B - Cônica e bipartida	0,96	42,92
6	31,64	B - Cônica e bipartida	0,77	39,51
7	38,98	B - Cônica e bipartida	0,65	48,67
8	36,51	B - Cônica com mais de uma partição	0,73	45,59
9	35,9	E - Cisalhada	0,65	44,83
10	38,64	E - Cisalhada	0,71	48,25
11	33,54	B - Cônica e bipartida	0,72	41,88
12	30,47	E - Cisalhada	0,82	38,05
13	35,69	B - Cônica e bipartida	0,96	44,56
Média			0,79	41,32
Desvio padrão			0,11	8,53

Fonte: Acervo do autor (2020).

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 protendido a CAA I seja de 25Mpa e a para a CAA III seja de 35Mpa e a média dos 13 CP's de cada um respectivamente é 35,85Mpa e 41,32Mpa os CP's que ficaram apenas 7 dias submerso na água. E como podem ver nas médias da absorção, quase não teve vazio, tanto é que CAA I deu 0,97% e para a CAA III foi 0,79% na norma já citada a cima mostra que com essa porcentagem o concreto será durável e terá um alto desempenho (figura 37), isso os CP's de com 7 dias de cura.

Já os CP's com 15 dias de cura teve uma media de cargas de 34,11Mpa para CAA I e para o de CAA III a média foi de 43,76Mpa, quanto mais tempo de cura maior será a carga aumentada, normalmente, esse CAA I não aumentou, porém continuou bem acima do exigido pela norma ABNT NBR 6118:2014. Já para o teste de absorção tanto para o CAA I e para CAA III deu uma classificação de alto desempenho, os valores de cada um respectivamente foram, 0,72% e 0,6%, sendo todos os dois excelentes.

Figura 37 - Classificação do concreto

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 9778:2005

9 CONCLUSÕES

Sabendo que todos os ensaios foram realizados com sucesso, o ensaio da compressão e o ensaio da absorção, e todos seguindo as normas relacionadas a cada uma mostrou a eficiência dos traços calculados para CAA I e CAA III.

Com os ensaios que foram realizados verificou-se a eficácia da resistência a compressão chegando a atingir uma media de 43,76Mpa para a classe de agressividade 3, sendo 25,02% mais resistente a compressão do que a norma exige para a CAA III e 35,85Mpa 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 9778:2005. Outra vantagem é que com isso poderemos elevar as alturas das torres eólicas fazendo com que consigamos aproveitar mais o RN trazendo grandes parques eólicos de alto parâmetro, com estruturas maiores que 150m, pois quanto mais alto for, maiores serão as pás dos aero geradores, assim, fazendo com que tenha uma maior geração de energia, como já citado no estudo bibliográfico.

REFERÊNCIAS

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: 27 nov. 2018.

AGÊNCIA ENVOLVERDE. **Brasil perde uma posição em índice de renováveis.** Disponível em: <<https://envolverde.cartacapital.com.br/73941/>>. Acesso em: 19 set. 2018.

AMARANTE, O. A. C. do. *et al.* **Atlas eólico:** Rio Grande do Sul. 1. ed. Porto Alegre: SEMC, 2001. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 5738:** Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos – de – prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 9778:** Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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.

BURTON, T. *et al.* **Wind Energy** : Handbook. 1. ed. Reino Unido: Wiley, 2001. 642 p.

DAMAS, L. B. **Aplicação da metodologia MCP para análise da geração em dois parques eólicos no Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

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. 2020.

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. 2020.

FCK - ENGENHARIA. **O que é laje sobre o solo (radier)??**. Disponível em: <http://www.radierprotendido.com.br/radier_protendido.htm>. Acesso em: 26 nov. 2018.

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 nov. 2018.

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 nov. 2018.

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.

IMPACTO. **Torres Eólicas**. Disponível em: <<http://impactoprotensao.com.br/servicos/protensao/torres-eolicas/>>. Acesso em: 11 jun. 2020.

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.

MICRO EÓLICA. **Constituição de uma Turbina eólica horizontal (TEH)**. Disponível em: <<https://microeolica.weebly.com/constituiccedilatildeo-de-uma-teh.html>> Acesso em: 05 jun. 2020.

PFEIL, Walter. **Concreto Protendido: Processos Construtivos/Perdas de Protensão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

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 set. 2018.

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.

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

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

WAY, A. C. **A Study on the Design and Material Costs of Tall Wind Turbine Towers in South Africa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Stellenbosch University, Stellenbosch, 2014.

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: 27 nov. 2018.